

3/81  
Université des Sciences et de la Technologie

Houari Boumédiène

Ecole Nationale Polytechnique

Département : Génie - Mécanique.

المعهد الوطني للعلوم والتقنية  
المكتب  
Projet de fin d'études  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

TECHNOLOGIE D'EXECUTION DES  
POUTRES EN DOUBLE T  
SOUDEES POUR PONT-ROULANT

2 PLANS

Proposé par:  
E. BARDOKINE

Maitre de Conférence à l'ENPA

Etudié et Présenté par:  
A. DJEMMANE

Promotion juin 1981

Emr

## Remerciements

Je tiens à remercier vivement Monsieur  
Evgeni Barabokine mon promoteur, de l'aide  
précieuse qu'il m'a apportée pour réaliser  
ce document.

Je remercie également tous mes professeurs  
qui ont contribué à ma formation.

## Dédicaces

Je dédie ce présent document

- À mes parents.
- À tous mes amis.

Schour. D.

# Table des matières

<u>Chapitres</u>	<u>Pages</u>
<b>I- Généralités</b> .....	1
<b>II- Etude des conditions de fonctionnement</b> .....	2
des poutres en double T .....	
2-1 Destination des poutres .....	-
2-2 Conditions de fonctionnement .....	-
2-3 Exigences techniques .....	8
<b>III- Description de construction des Poutres</b> .....	9
3-1 Généralités .....	-
3-2 Description .....	-
3-3 Calcul des dimensions .....	11
3-4 Choix du métal de base .....	16
3-5 Forme de la poutre .....	21
<b>IV- Soudage</b> .....	23
4-1 Calcul des cordons de soudure .....	-
4-2 Choix du procédé de soudage .....	24
4-3 Choix du matériau de soudage .....	28
4-4 Calcul des régimes de soudage .....	31
4-5 Les paramètres en soudage automatique .....	40
4-6 Schéma de Principe d'une tête de soudage automatique .....	42
<b>V- Calcul des déformations</b> .....	43
5-1 Introduction .....	-
5-2 Normes de tolérance .....	44
5-3 Calcul des déformations longitudinales .....	-
5-4 Calcul des déformations latérales .....	49
5-5 Contrôle des déformations .....	50

<b>VI- Equipement nécessaire</b> .....	53
6-1 appareils ou postes de soudage .....	—
6-1-4 appareils de soudage employés .....	58
6-2 Les appareils de contrôle de la soudure .....	59
6-3 Critères d'acceptabilité des défauts .....	68
6-4 Machine pour le découpage des tôles .....	76
6-4-4-2 Choix du procédé de découpage .....	79
6-5 Machine pour le pliage de la tôle .....	80
6-6 Machine pour l'assemblage des tôles .....	81
6-7 Machine pour positionner les tôles .....	—
Conclusion .....	84

I

I Généralités.

Les applications de la technique du soudage, au sens où nous les envisageons aujourd'hui, ont débuté pratiquement avec le vingtième siècle, mais ce n'est en fait qu'au cours des vingt-cinq dernières années que ces applications ont pris une réelle ampleur dans le domaine industriel. L'évolution lente à ses débuts, s'est ensuite accélérée de façon telle qu'on peut affirmer aujourd'hui que bien des conditions de notre vie moderne dépendent de la technique du soudage.

Sans elle, les avions géants qui sont de plus en plus utilisés pour le transport des passagers et du fret seraient trop lourds pour voler; les grands navires, indispensables au transport international des marchandises, auraient un tonnage utile nettement inférieur à celui que nous leur connaissons. L'automobile ne serait pas devenue un objet courant de consommation, car son poids trop élevé aurait exigé une énergie de propulsion considérable, rendant son coût prohibitif.

Les oléoducs et les gazoducs ne seraient pas en mesure d'assurer économiquement le transport des combustibles de leurs sources aux endroits de transformation. La conquête spatiale n'aurait jamais eu l'essor que nous lui connaissons aujourd'hui.

Il existe plusieurs modes de soudage. Ils diffèrent tous par les sources d'énergie utilisées: chimique (au gaz et à l'oxygène); chimico-mécanique (par forgeage et aluminothermie); électrochimique (à l'hydrogène atomique); électromécanique (par résistance); et électrique (à l'arc).

Dans le soudage à l'arc, la chaleur nécessaire pour fondre le métal est fournie par un arc électrique. La température de sa colonne ionisée la flamme étant stable s'élève à 5000°C.

Le mode le plus usité est celui du soudage à l'électrode métallique proposée en 1888 par l'ingénieur russe N. SLAVIANOV (1854-1897).

La soudabilité de la plupart des métaux et alliages utilisés en construction mécanique est très bonne.

Les moyens de contrôle des soudures ne cessent de se développer, en parallèle avec les procédés de soudage (contrôle à l'ultra son, aux rayons  $\gamma$ ; aux rayons X, etc...).

On tend vers la soudure idéale; celle qui modifie aussi peu que possible l'homogénéité du métal.

La présente étude concerne l'exécution en très grande série de poutres en double T de longueur 12m. L'assemblage des éléments (semelle, âme, nervure) constituant les poutres, est effectué entièrement par soudage manuel et automatique.

## II. ETUDE DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DES POUTRES EN DOUBLE T

### 2-1 DESTINATION DES POUTRES

les poutres que nous nous proposons d'étudier sont à ame pleine. elles sont destinées à la fabrication en série des ponts roulants de 10 tonnes desservant un atelier. Un pont roulant est constitué de deux poutres principales, servant de chemin de roulement à un chariot (fig 6).

### 2-2 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT.

Durant leur service, ces poutres seront soumises à plusieurs facteurs dont les principaux sont:

- a) les charges statiques et dynamiques.
- b) la corrosion.
- c) la rupture fragile des cordons de soudure, la température du milieu ambiant.

#### a-1 les charges statiques.

Pour vérifier les assemblages soudés sollicités à des charges statiques, il existe des règles de calcul normalisées. Ces règles sont établies lors des essais au laboratoire, respectant les conditions suivantes:

- la conception et l'exécution des assemblages soudés sont effectués selon les règles de bonne pratique.
- les règles permettant d'éliminer le risque d'apparition de ruptures fragiles sont respectées.
- les propriétés mécaniques du métal d'apport sont presque identiques à celles du métal de base.

Du fait qu'elles sont basées directement sur des résultats d'essais, ces règles normalisées font implicitement intervenir l'influence des contraintes résiduelles directes de soudage sur les conditions de rupture statiques. Les contraintes résiduelles directes ne doivent donc pas être prises en

compte dans les calculs. D'autre part, pour des raisons pratiques, les règles normalisées de calcul ne tiennent pas compte non plus des contraintes résiduelles indirectes (ou de bridage). 3

Dans le cas des assemblages par cordons d'angles, les essais montrent que les cordons présentent avec une bonne approximation, un comportement du type élastique parfaitement plastique. On devrait donc s'attendre à ce que le calcul, de ces assemblages soit basé sur un critère de plastification. Dans le stade actuel, la plupart des règles normalisées basent le calcul des joints soudés sur des critères de rupture, et utilisent des expressions de contraintes de comparaison, déterminées à partir de résultats d'essais à la rupture. Ces règles préconisent la limitation des valeurs de la contrainte de comparaison à la valeur de la contrainte admissible en traction du métal de base. Dans le cas des assemblages bout à bout, soumis principalement à des sollicitations statiques, il n'est pas nécessaire d'effectuer des calculs, ni de vérification complémentaire. En effet dans le cas des aciers soudables, courant, un des buts des règles de bonne pratique, est d'obtenir des caractéristiques du métal déposé et du métal de base thermiquement affecté, au moins équivalentes à celles du métal de base. Diverses études expérimentales montrent que les cordons de soudure présentent avec une bonne approximation, un comportement de type élastique parfaitement plastique. Le calcul de ces assemblages devrait donc être basé sur un critère de plastification. Or les expressions de la contrainte de comparaison qui figurent dans les règles normalisées, sont en fait basées sur des critères expérimentaux de rupture, de sorte qu'on doit s'attendre à ce qu'elles conduisent dans certains cas à des anomalies graves. Des études poussées ont abouti à la mise au point d'une méthode de calcul basée sur le critère du cisaillement maximal. Cette méthode présente l'avantage de déboucher sur des règles de calcul simples, cohérentes et en bon accord avec l'expérience.

### a-2 charges dynamiques (ou variables).

La rupture du métal sous l'effet des contraintes répétées ou alternées s'appelle la fatigue du métal. Son aptitude à résister à la rupture porte le nom d'endurance. Le spectre de contrainte d'une pièce ou d'un assemblage est la fonction du temps décrivant la variation des contraintes que cette pièce ou cet assemblage



subit en service. (voir fig 1).

un spectre sinusoïdal de contrainte est entièrement défini par le groupe de paramètres suivants :

- contrainte maximale
- contrainte minimale
- la fréquence.

On définit un paramètre  $R_s = \sigma_{\text{mini}} / \sigma_{\text{max}}$  ;  $0 \leq R_s \leq 1$

$R_s = -1$  correspond au cycle symétrique.

$R_s = 0$  " " pulsatoire.

$0 < R_s < 1$  " " asymétrique.

$R_s = 1$  " " statique.

les poutres qui font objet de notre étude fonctionnent selon les cycles statique et pulsatoire, provoqués par l'arrêt et le déplacement du chariot.

Pour chaque valeur de  $R_s$ , la limite d'endurance  $\sigma_D$  de l'acier est la limite de la résistance à la fatigue  $\sigma_N$  quand  $N$  tend vers l'infini, où  $N$  est le nombre de cycles. (voir fig 2)

l'influence de la fréquence sur le comportement en fatigue des pièces et des assemblages, est faible pour autant qu'elle soit comprise entre 10 et 5000 cycles par minute, ce qui est généralement le cas dans les essais classiques de fatigue et dans les constructions métalliques. Dans les constructions mécaniques, les fréquences peuvent être plus élevées, mais l'influence favorable des fréquences élevées est pratiquement toujours négligée et considérée comme réserve de sécurité. Pour les très hautes fréquences, de l'ordre de 60000 cycles par minute, on observe un accroissement de résistance de l'ordre de 10%.

Pour les très faibles fréquences, telles qu'on en rencontre dans certaines constructions chaudronnées, comme les réservoirs à pression on peut obtenir des contraintes élevées qui ne sont appliquées qu'un faible nombre de fois au cours de la vie de la construction.

Dans les constructions mécaniques, les spectres de contraintes sont généralement sinusoïdaux et du même type que ceux qui correspondent aux essais classiques de fatigue. Les résultats de ces essais peuvent donc être directement utilisés pour le calcul des constructions mécaniques. Dans les constructions métalliques, les spectres de contrainte sont rarement sinusoïdaux et varient

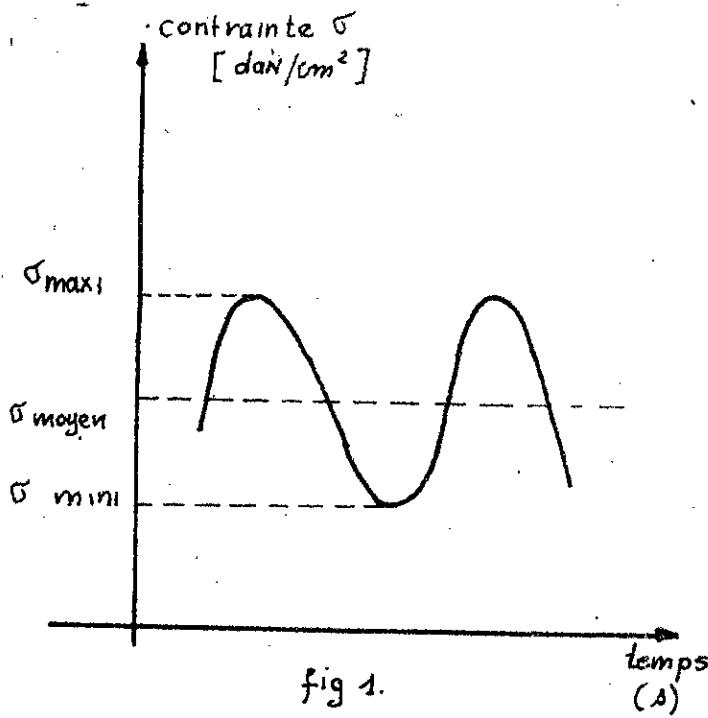


fig 1.

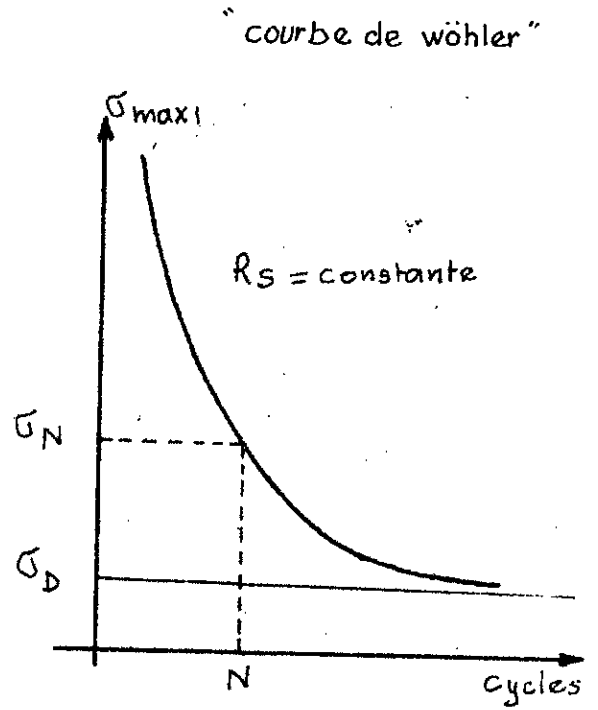


fig 2.

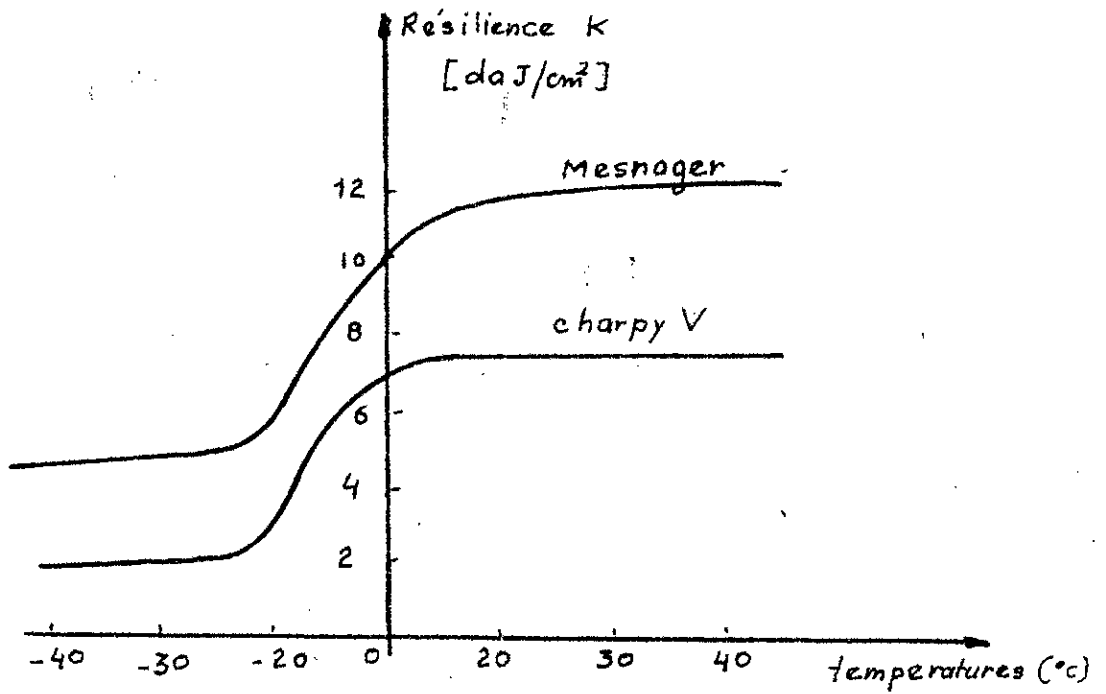


fig 3

sensiblement d'une construction à l'autre.

exigences de la poutre étudiées.

- Elle doit rester en service pendant 20 ans.
- Supporter journellement 200 déplacements du chariot.

à raison de 250 jours ouvrables par an, le nombre total de cycles de mise en charge est égal à  $N = 10^6$

b. la corrosion -

Les causes de la dégradation des métaux sont en ordre principal, l'usure, la fatigue et la corrosion.

la corrosion est une altération progressive et lente des métaux. Elle est due à une attaque chimique des agents atmosphériques ou des divers produits chimiques de l'industrie.

Démarrage du phénomène de corrosion.

Il est admis que la corrosion des métaux est due à des phénomènes électrochimiques, rappelant le fonctionnement des piles électriques. Une pile électrique est un générateur comprenant deux électrodes constituées par des matériaux différents qui plongent dans un électrolyte. La pile débite du courant lorsque les électrodes sont réunies par un fil conducteur. Ce processus a pour effet de produire une dégradation des électrodes.

Prenons le cas d'un assemblage soudé, généralement le métal de soudure et le métal de base sont différents. Une simple fissure dans le joint, peut recevoir la pluie, les vapeurs, les fumées qui constitueront un électrolyte idéal. Le métal faisant fonction d'anode est attaqué. Un matériau qui résiste le mieux à l'action de la corrosion est celui dont la structure n'est pas trop hétérogène et qui présente des caractéristiques d'auto-protection. De ces considérations, nous serons donc prudent dans le choix du métal de base et du métal d'apport.

Nous choisirons un métal d'apport dont la composition chimique et métallurgique se rapprocheront de celle du métal de base, nous éviterons le risque d'apparition des fissures.

choix du moyen de protection -

Nous utiliserons comme moyen protecteur, la peinture. Après finition de la construction, les poutres seront grattées

et brossées à la brosse métallique pour faire disparaître les plaques de calamine et la rouille.

Les peintures utilisées couramment sont les suivantes avec leur composition :

1 - peinture antirouille au graphite

graphite à 80% \_\_\_\_\_ 0,50

huile de lin cuite \_\_\_\_\_ 0,40

terebenthine \_\_\_\_\_ 0,10

2 - peinture antirouille à l'aluminium

oxyde de fer micacé \_\_\_\_\_ 0,40

aluminium grosses paillettes \_\_\_\_\_ 0,10

huile de lin cuite \_\_\_\_\_ 0,43

terebenthine \_\_\_\_\_ 0,07

3 - Minium de plomb.

minium de plomb en pâte \_\_\_\_\_ 0,75

huile de lin \_\_\_\_\_ 0,20

terebenthine \_\_\_\_\_ 0,05

Nous emploierons deux couches de peinture anti rouille à l'aluminium déposées au pistolet automatique.

### C - la rupture fragile -

La rupture fragile d'un assemblage soudé ou non soudé est un phénomène provoqué par les basses températures. La rupture fragile est une rupture sans déformation<sup>plastique</sup>. Une expérience effectuée au laboratoire prouve que pour une éprouvette non entaillée, l'obtention d'une rupture fragile par le seul effet du froid exige que la température descende jusqu'à  $-200^{\circ}\text{C}$ . Dans le cas d'éprouvettes entaillées, il suffit d'un froid modéré que l'entaille est plus sévère pour provoquer la rupture. Durant le soudage, il faut donc éviter les défauts tels que les fissures, les entailles de pénétration et le manque de pénétration.

### Effet de la température sur la résilience du métal.

L'essai de résilience consiste à provoquer la rupture sous le choc d'un pendule d'une éprouvette prismatique entaillée  $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$ . Elle s'exprime par le rapport du travail absorbé à la section résistante entaillée de

Les poutres en double T. de la présente étude seront soumises à des variations de températures entre l'hiver et l'été. En Algérie la température moyenne en hiver est environ  $12^{\circ}\text{C}$ , en été la moyenne est environ  $20^{\circ}\text{C}$ . Ces températures n'affecteront pas la résilience de l'acier constituant les poutres.

Nous donnerons l'allure de la courbe, résilience en fonction de la température, expériences effectuées sur éprouvettes CHARPY V et MESNAGER. (voir fig 3).

### 2-3 Exigences techniques :

On donne le nom d'aciers de construction aux aciers employés dans la fabrication des éléments de machine, dans la construction des ouvrages d'art et des édifices. Les aciers de construction peuvent être des aciers au carbone et alliés. Le plus souvent la teneur en carbone de ce groupe d'aciers ne dépasse pas  $0,5 - 0,6\%$ . Les constructions sont généralement sollicitées en service par des charges dynamiques élevées, de fortes concentrations de contraintes et de hautes ou basses températures. Tout ceci favorise la rupture fragile, et altère la fiabilité des constructions. L'amélioration de la résistance du métal augmente la fiabilité et la longévité des constructions, et diminue le débit des métaux nécessaires pour leur fabrication, par suite de la diminution de la section des éléments de la construction, ceci est d'un grand intérêt pour l'économie nationale. La résistance technique du métal est déterminée par ses caractéristiques mécaniques. La limite d'élasticité est la caractéristique principale de la résistance technique du métal, utilisée dans les calculs de la résistance sous des sollicitations statiques, et dont la valeur détermine les charges admissibles. Il s'en suit qu'une plus grande valeur de la limite élastique permet de diminuer la section et la masse des constructions. Un acier de construction doit posséder également de bonnes propriétés technologiques : se prêter bien au formage (laminage, forgeage, emboutissage etc...), à l'usinage, au soudage.

L'application des matériaux à résistance élevée montre que les constructions subissent souvent une rupture fragile brusque sous des sollicitations plus faibles que la limite d'élasticité. Par conséquent, pour assurer la fiabilité d'une construction, le matériau doit posséder en plus d'une limite élastique, élevée une bonne résistance à la rupture fragile. Un métal possède toujours divers défauts qui servent d'amorce aux fissures. La fiabilité d'un matériau est donc déterminée surtout par le travail absorbé par la propagation d'une fissure. Les entailles, c'est à dire les changements brusques de section peuvent dégrader sensiblement le fonctionnement des pièces. L'action des entailles des trous de bouchants, des filets etc... des défauts internes du métal (inclusions non métalliques, fissures ou tapures, etc...) rend irrégulière la distribution des contraintes en conditionnant leur concentration. C'est pourquoi toutes sortes d'entailles, trous, congés, s'appellent concentrateurs de contraintes.

3-1 Généralités.

Les poutres ou les divers profilés venus du laminage sont utilisés dans plusieurs domaines, tels que les bâtiments, les ponts, les chemins de roulement des chariots de ponts roulant etc... Chaque type de profilé présente des caractéristiques propres du point de vue résistance aux sollicitations auxquelles il est soumis. Les aciers sont livrables sous diverses formes dont les principales sont :

- le tube rond ou carré.
- le fer en T (ou poutrelle).
- Le fer en U, la cornière.

Ces profilés laminés sont normalisés. En dépit du choix important de poutrelles, et de fortes sections dont on dispose, il est souvent avantageux pour la construction lourde et un peu élaborée, de constituer des profilés composites faits de larges plats ou de tôles composées et assemblées par soudage, plutôt que d'associer de grands profilés laminés.

3-2 Description.

Une poutre en double T est constituée de deux parties principales.

- L'âme, formant la partie verticale caractérisée par son épaisseur "e".
- Les deux semelles en position horizontale, caractérisées par la largeur "b" et l'épaisseur "e'".

La hauteur totale de la poutre est "h". Les valeurs que peut prendre "h" sont :

$$h = \frac{l}{10} \div \frac{l}{15} \text{ — pour les hauteurs courantes.}$$

$$h = \frac{l}{7} \text{ — si on veut une grande rigidité.}$$

la largeur b peut prendre les valeurs suivantes ;  $b \approx \frac{3h}{10} \div \frac{4h}{10}$

L'épaisseur de l'âme est conditionnée par la condition de flambage local de sorte que :

$$e = \frac{h}{100} \text{ — poutres à hauteur moyenne.}$$

$$e = \frac{h}{140} \div \frac{h}{160} \text{ — poutres à très grande hauteur.}$$

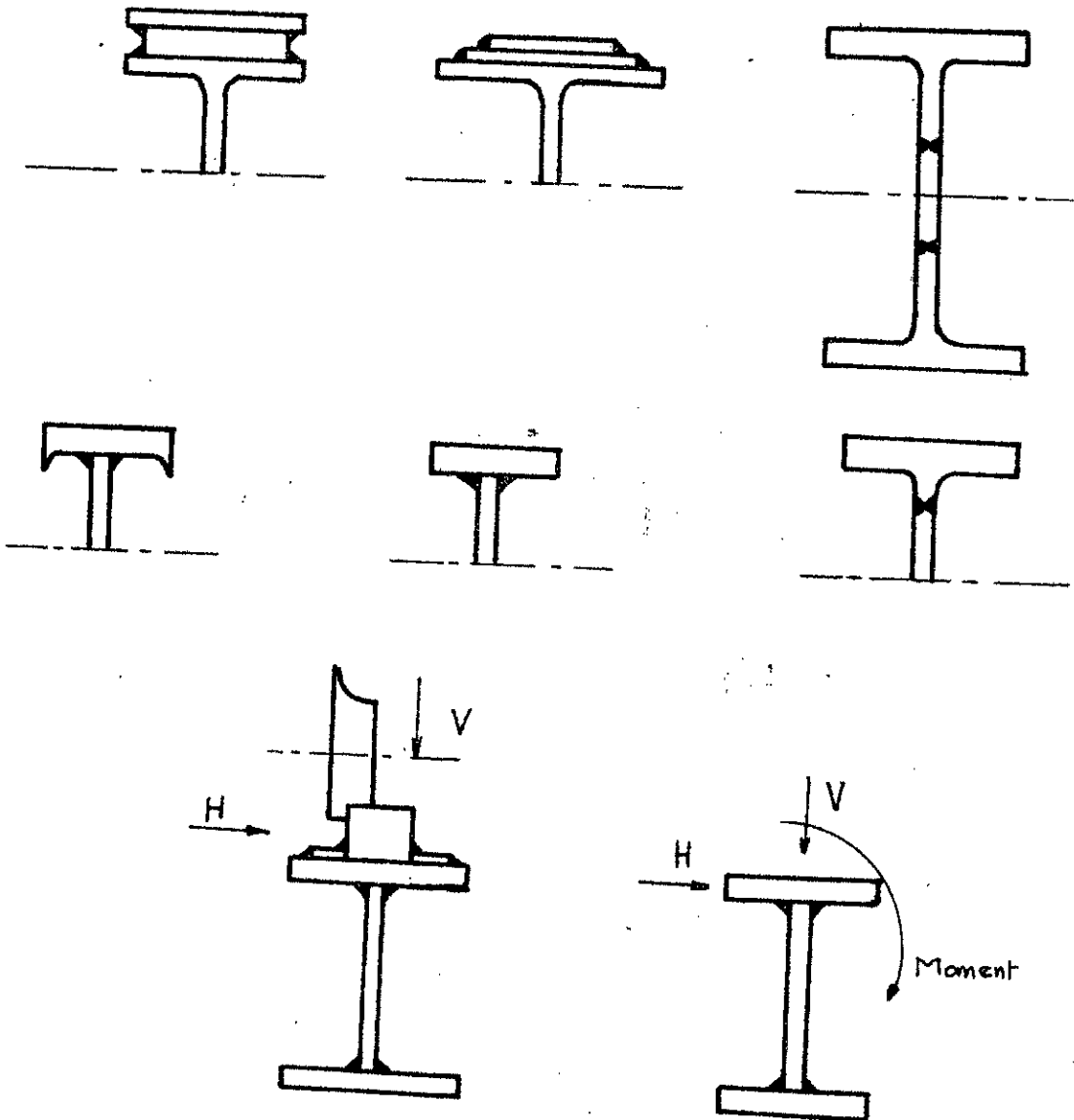
3-2-1 Divers types d'assemblages.

Les types de joints soudés que l'on peut rencontrer sont les suivants :

- en bout
- à clin ou à couvre joint.
- en T.
- d'angle.

L'endurance des assemblages varia suivant les types. Elle est plus faible dans les constructions où l'inflexion du flux des lignes de force est plus importante.

Differents profils que peuvent presenter les  
poutres soudees à ame pleine.

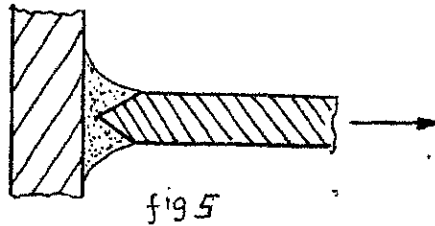


- fig 4 -

Dans les assemblages en bout, le flux des lignes de force est presque rectiligne. Ce type est plus avantageux que les soudures d'angle. La résistance sous charges variables des joints à clin et à couvre joint est faible, la distribution des contraintes suivant la section du joint et du metal de base étant très inégale.

### choix du type d'assemblage.

Nous disposerons de quatre tôles dont les dimensions seront données plus loin. L'assemblage de l'âme avec les semelles, de même que les nervures avec l'âme, sera du type en T. L'assemblage entre l'âme et la semelle supérieure de la poutre, est l'objet de sollicitation complexe en fatigue étant donné la superposition de contraintes locales aux contraintes d'ensemble auxquelles cet assemblage est soumis (voir fig 4). Nous adopterons un joint de soudure qui se rapproche du joint en K, car ce type de joint donne à l'assemblage une limite de fatigue plus importante fig 5.



joint en T avec soudure en K.

fig 5

### Raidissage -

Pour éviter le voilement de l'âme, nous placerons sur celle-ci des raidisseurs. Le raidissage de l'âme se fait à l'aide de plats pour les poutres ordinaires et à l'aide de profils en "T" lorsque la poutre est de fortes dimensions. La fixation de ces raidisseurs est assurée par des soudures généralement discontinues pour éviter les déformations.

La poutre considérée subit des variations de fatigue. Pour lui donner une endurance, on évite de souder les raidisseurs directement sur la semelle par un cordon transversal qui créerait ce qu'on appelle "coup de hache", réduisant à cet endroit la résistance à l'endurance de l'acier. Pour cela on soude le raidisseur sur une cale qui elle-même est soudée sur la semelle à l'aide de faible cordon longitudinal, ou bien on réduit la largeur du raidisseur à son attache sur la semelle. Nous adopterons cette dernière solution qui est plus pratique.

### 3-3 calcul des dimensions

données :

$l =$  portée de la poutre

$Q_u =$  charge à soulever = 100 000 kg

$Q_c =$  poids du chariot = 40 000 N

$G_e =$  poids de l'organe de manutention = 8000 N

$G_m =$  poids du moufle = 520 N.

charge totale :  $Q_T = Q_u + G_e + G_m = 100000 + 8000 + 520$



# PONT ROULANT

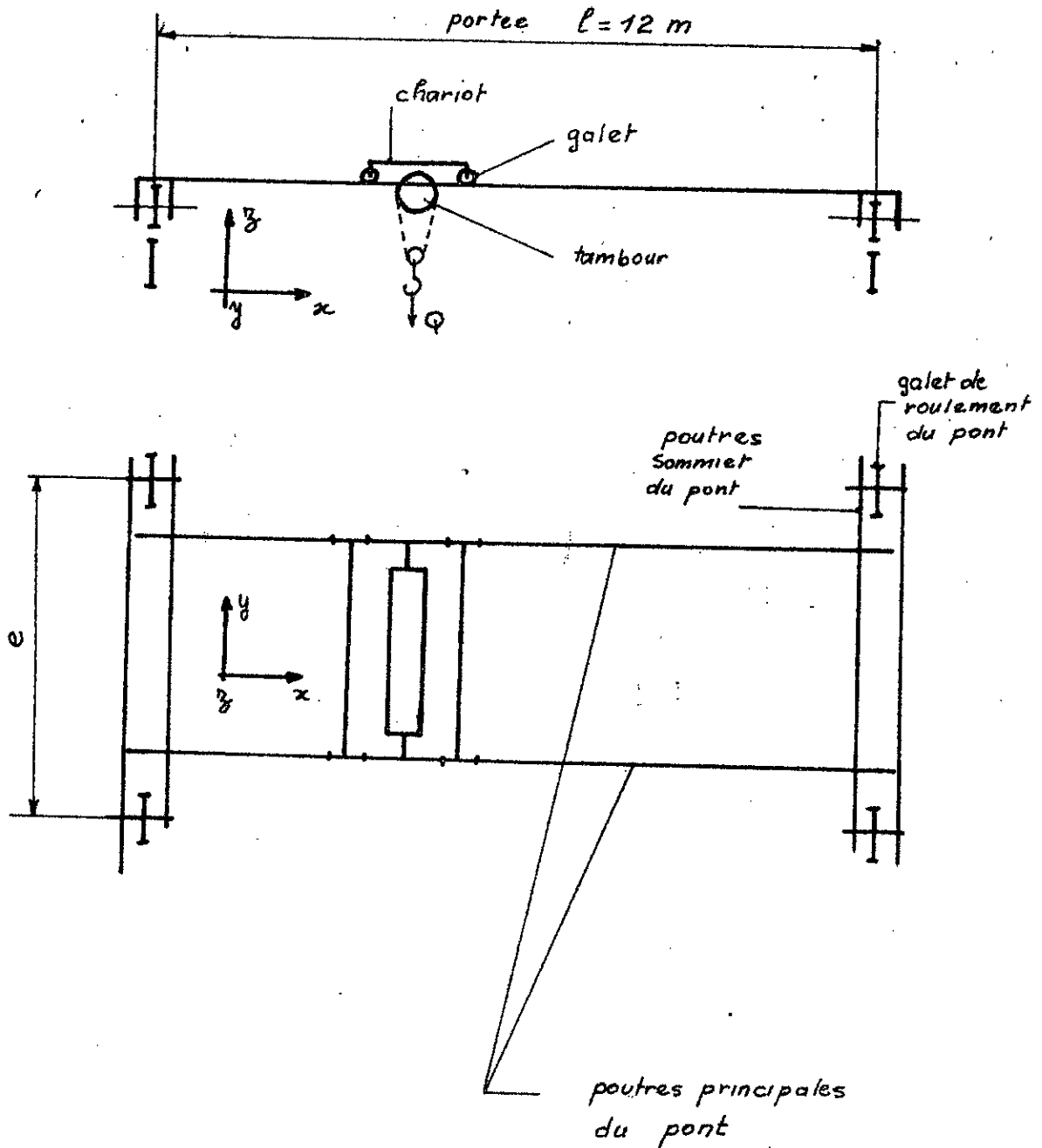


fig 6

$$Q_T = 108520 \text{ N}$$

Les sollicitations dues à la charge totale sont multipliées par un coefficient  $\Psi$  qui tient compte du démarrage brusque.

$$Q'_T = \Psi \cdot Q_T$$

$$\Psi = 1 + \varepsilon V_p$$

$\Psi$  = coefficient dynamique

$\varepsilon$  = coefficient de vitesse,

$$\varepsilon = \begin{cases} 0,6 & \text{pour les ponts roulants et portiques} \\ 0,3 & \text{pour les grues.} \end{cases}$$

$V_p$  = vitesse de levage, donnée dans un tableau en fonction de la charge.

Voir bibliographie [9]: nous lisons  $V_p = 10 \text{ m/mn} = 0,166 \text{ m/s}$

$$\text{Alors } \Psi = 1 + 0,6 \cdot 0,166 = 1,099$$

$$\text{d'où } Q'_T = 1,099 \cdot Q_T$$

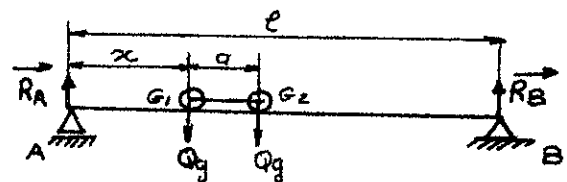
$$Q'_T = 119330 \text{ N}$$

Charge sur un galet du chariot:

$$Q_g = \frac{Q_c + Q'_T}{4} = \frac{40000 + 119330}{4} = 39832,5 \text{ N}$$

Nota. nous supposons que la charge  $(Q'_T + Q_c)$  s'applique au milieu du chariot de sorte que les galets supportent le même effort.

Détermination de la position du chariot correspondant au moment fléchissant maximal.



$$M_B = R_A \cdot l - Q_g (l-x) - Q_g (l-x-a) = 0$$

$$R_A = \frac{Q_g}{l} (2l - 2x - a)$$

$$M_{fG_1} = R_A \cdot x = \frac{Q_g}{l} (2l - 2x - a) \cdot x$$

$$\frac{dM_{fG_1}}{dx} = 0 \iff x = \frac{l}{2} - \frac{a}{2}$$

$$l = 12 \text{ m}; \quad a = 1,865 \text{ m}$$

$$x = \frac{12}{2} - \frac{1,865}{2} = 5,53 \text{ m} \text{ c'est la position critique.}$$

Calcul du moment fléchissant et de l'effort tranchant maximum dans la position  $d=x$ .

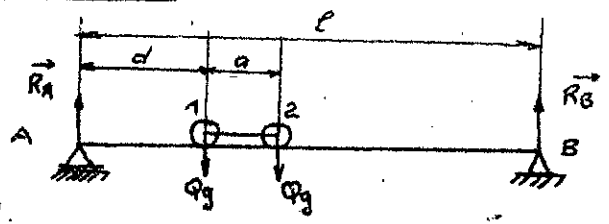
A) Efforts verticaux

A-1 efforts dus à la charge roulante.

$$M_B = R_A \cdot l - Q_g(l-d) - Q_g(l-a-d) = 0$$

$$R_A = \frac{Q_g}{l} (2l - 2d - a)$$

$$R_A = \frac{39832,5}{12} [24 - 11,05 - 1,865] = 36762 \text{ N.}$$



$$M_A = R_B \cdot l - Q_g(d+a) - Q_g \cdot d = 0$$

$$R_B = \frac{Q_g}{l} (2d+a) = \frac{39832,5}{12} (11,05 + 1,865) = 42903 \text{ N}$$

Etudions chaque zone.

entre A-1

$$T = R_A = 36762 \text{ N}$$

$$M_f = R_A \cdot x \quad ; \quad \text{en 1 nous avons } T = R_A \text{ et } M_{f1} = 203294 \text{ N.m}$$

entre 1 et 2

$$T = R_A - Q_g = -3070,5 \text{ N.}$$

$$M_f = R_A(d+x) - Q_g \cdot x \quad ; \quad \text{en 2 nous avons } T = -3070,5 \text{ N}; M_{f2} = 197567 \text{ N.m.}$$

entre B et 2

$$T = -R_B = -42903 \text{ N.}$$

$$M_f = R_B \cdot x \quad ; \quad \text{en 2 nous avons } T = -42903 \text{ N}; M_{f2} = 197567 \text{ N.m}$$

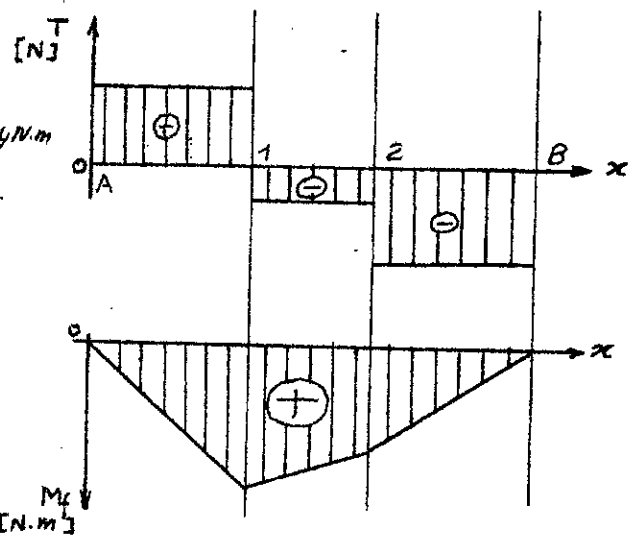
diagrammes

Moment fléchissant maximal  $M_{fmax} = 203294 \text{ N.m}$

Effort tranchant maximal  $|T_{max}| = 42903 \text{ N.}$

$$M_{f1} = M_{fmax} = 203294 \text{ N.m}$$

$$|T_1| = |T_{max}| = 42903 \text{ N.}$$



A-2 efforts dus au poids propre de la poutre.

La poutre a une charge (poids propre) uniformément répartie.

$q =$  poids par unité de longueur

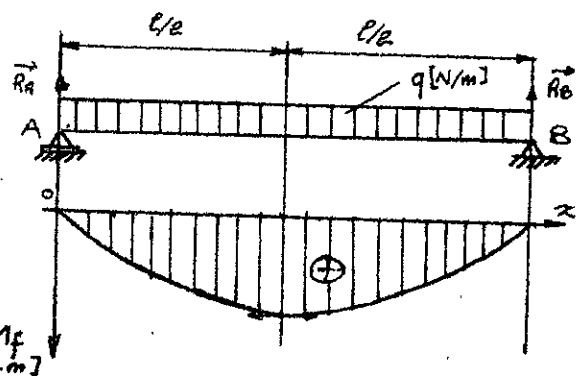
le poids propre de la poutre est

$$P = q \cdot l = q \times 12$$

$$M_B = R_A \cdot l - q \cdot l \cdot \frac{l}{2} = 0$$

$$R_A = \frac{q \cdot l}{2}$$

$$M_f = R_A \cdot x - q \cdot x \cdot \frac{x}{2} = q \cdot l \cdot \frac{x}{2} - q \cdot \frac{x^2}{2}$$



Pour  $x = 5,53 \text{ m}$ ; le moment fléchissant dû au poids propre sera

15

$$M_{fp} = 17,9 \text{ q}$$

### Dimensionnement de la poutre.

Les dimensions recommandées sont les suivantes (voir Bibliographie [9])

$$a \geq \frac{l}{35} \geq \frac{12}{35} = 343 \text{ mm.}$$

$$e' \geq \frac{a}{80}$$

$$e \geq \frac{h}{100} \quad (\text{condition de non flambement local, règle CMSG}).$$

$a$  = distance entre 2 raidisseurs

$e'$  = épaisseur des semelles.

$e$  = épaisseur de l'âme.

$h$  = hauteur de la poutre.

$$\text{adoptons } a = 800 \text{ mm. et } h = \frac{l}{16} = \frac{12}{16} = 750 \text{ mm.}$$

$$e' \geq 13,3 \text{ mm.}$$

### Dimensions du rail.

$D$  = diamètre des galets du chariot.

$D = 300 \div 400 \text{ mm}$  pour les charges jusqu'à 5000 kg.

$D = 600 \div 700 \text{ mm}$  pour des charges 10 000  $\div$  12 000 kg (sur un galet).

$$Q_1 = D \cdot b \cdot k \quad \longrightarrow \quad b = \frac{Q_1}{D \cdot k}$$

$Q_1$  = charge sur un galet.

$b$  = largeur du rail. = 40  $\div$  80 mm.

$$k = \begin{cases} 250 \text{ N/cm}^2 & \text{pour galet en fonte / rail en acier} \\ 600 \text{ N/cm}^2 & \text{pour galet en acier / rail en acier.} \end{cases}$$

Les pattes d'attache sont soudées au rail et à la semelle.

$s = 0,50 \div 0,70 \text{ m}$  — distance entre deux pattes d'attache.

adoptons  $s = 0,60 \text{ m}$ . d'où

$$b = \frac{39832,5}{350 \cdot 250} = 45,5 \text{ mm.} \quad \text{fixons un rail normalisé carré } 50 \times 50.$$

### Choix des dimensions de la semelle

En tenant compte des dimensions du rail, nous choisirons deux semelles identiques  $180 \times 18 \times 12000 \text{ [mm]}$ . Nous trouvons dans le commerce des tôles de longueur allant de 5 à 18 m, et une gamme d'épaisseurs.

### Choix de l'épaisseur de l'âme.

$e \geq 7,5 \text{ mm}$  — nous adoptons  $e = 10 \text{ mm}$  (pour avoir une bonne rigidité)

$$I_{x\beta} = \frac{e(h-2e')^3}{12} + 2 \left[ \frac{be'^3}{12} + be' \left( \frac{h}{2} - \frac{e'}{2} \right)^2 \right]$$

$I_{x\beta}$  = moment d'inertie de la section par rapport à l'axe  $x\beta$ .

en remplaçant les lettres par leur valeur, nous trouvons

$$I_{x\beta} = 125771,92 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

## Section de la poutre

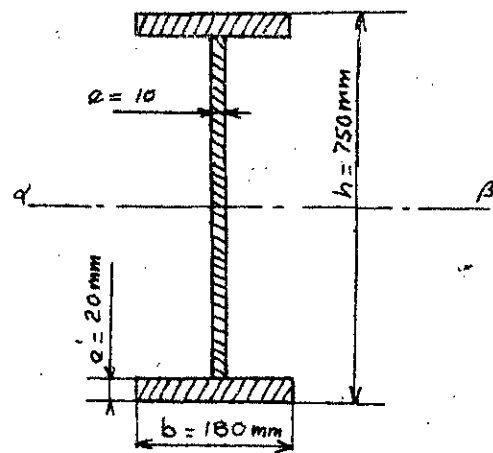
$$\bar{v} = \frac{h}{2}$$

Le module d'inertie sera

$$\frac{I_{xA}}{v} = 335,39 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

aire de la section

$$S = 710 \times 10 + 2 \times 180 \times 20 = 14300 \text{ mm}^2$$



## Choix du métal de base.

Nous choisirons le métal de base d'après les conditions de fonctionnement des poutres déjà étudiées :

- La température minimale d'exploitation sera supérieure à  $-10^{\circ}\text{C}$
  - Les sollicitations sur les cordons de soudure sont bilatérales.
- nous prenons  $k_s = 2$  (voir tableau suivant 1) et fig 7c
- l'épaisseur de la semelle est la plus grande et égale à 20 mm.
- L'acier qui répond à ces exigences, est l'acier semi-calmé.
- nous donnerons quelques précisions sur les aciers.

### Les aciers calmés.

Les aciers calmés s'obtiennent par désoxydation complète du métal dans un four puis dans une poche de coulée. Ces aciers contiennent une quantité minimale de protoxyde de fer ( $\text{FeO}$ ). En assurant ainsi une solidification calmée du métal dans la lingotière, qui s'accompagne de diminution de volume. En haut du lingot, il se forme une retassure et une porosité due au retrait, elles s'éliminent par chutage lors du laminage.

### Les aciers effervescents

Ils sont insuffisamment désoxygénés, surtout au ferro-silicium, et contiennent de ce fait une quantité accrue de  $\text{FeO}$  (la teneur en silicium étant faible). La solidification dans une lingotière provoque la réaction de  $\text{FeO}$  avec le carbone du métal en formant  $\text{CO}$ . Le dégagement de bulles ainsi produites rend le métal effervescent.

Ces aciers sont moins coûteux, car les rebuts de leur fabrication sont réduits au minimum. Comparés aux aciers calmés et semi-calmés, les aciers effervescents ont une tendance plus marquée au vieillissement et à la fragilité à froid, et une aptitude au soudage plus faible.

### Les aciers semi-calmés

Ils sont d'un type intermédiaire et trouvent aujourd'hui un emploi toujours plus large.

Nous prendrons un acier A42T325 (Norme NFA35008), semi-calmé.  
Il convient bien aux constructions des poutres soudées.

% C	% Mn	% Si	% S	% P
0,14 - 0,22	0,4 - 0,65	0,12 - 0,30	< 0,05	< 0,05

valeurs de la résistance à la rupture par traction et de la limite élastique de quelques aciers de construction métallique.

	A 37	A 42	A 47	A 52
$R_r$ [ $\frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$ ]	37	42	47	52
$\sigma_e$ [ $\frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$ ]	24	26	30	36

L'acier choisi a pour résistance à la rupture par traction  $R_r = 42 \frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$   
 sa contrainte de limite élastique :  $\sigma_e = 26 \frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$   
 Sa résilience  $K = 8 \text{ kg.m/m}^2$

Détermination de sa contrainte admissible " $\sigma_a$ ".

Adoptons un coefficient de sécurité convenable  $k$ .

$$\sigma_a = \sigma_e / k$$

$k = 1,1$  — pont roulant hors service avec vent maximal.

$k = 1,3$  — pont roulant en service avec vent.

$k = 1,5$  — pont roulant en service sans vent.

Prenons  $k = 1,5$  (le pont roulant est à l'abri)

$$\sigma_a = \frac{26}{1,5} = 17,33 \frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$$

L'acier que nous avons choisi a pour masse volumique  $\rho = 7,83 \text{ g/cm}^3$ .  
 le poids propre de la poutre par unité de longueur est donc

$$q = 1120 \text{ N/m}$$

Nous pouvons maintenant calculer le moment fléchissant maximal dû au poids propre.

$$M_{fp} = 17,9 \cdot q = 17,9 \times 1120 = 20048 \text{ N.m}$$

Moment fléchissant maximum total.

$$M_{\Sigma T} = M_{f1} + M_{fp} = 203294 + 20048 = 223342 \text{ N.m}$$

la contrainte verticale sera :

$$\sigma_{fv} = \frac{M_{\Sigma T}}{\frac{I_{GA}}{G}} = \frac{223342 \cdot 10^3}{385,39 \cdot 10^4} = 6,66 \frac{\text{dan}}{\text{mm}^2} < \sigma_a \text{ (vérifié)}$$

Contrainte de cisaillement due à l'effort tranchant

la contrainte de cisaillement admissible a pour valeur :

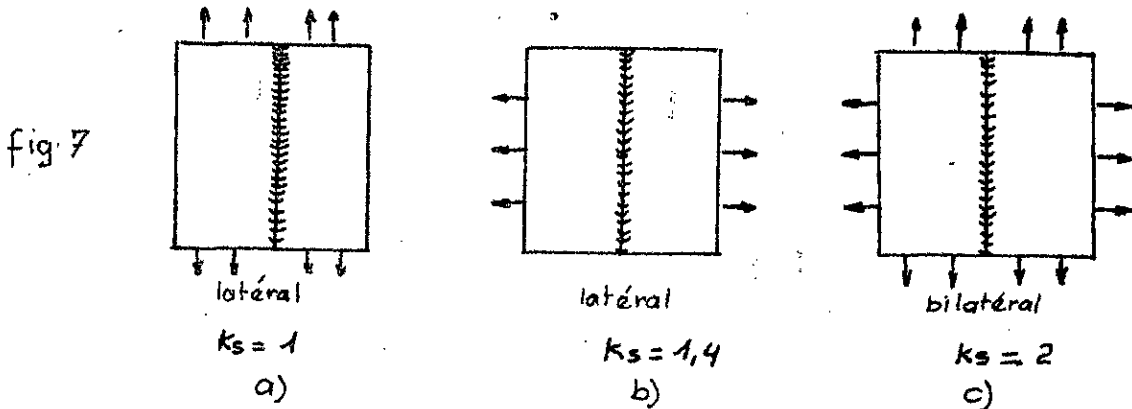
$$\tau_a = 0,58 \sigma_a = 0,58 \times 17,33 = 10,05 \frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$$

- tableau 1 -

facteur combiné $K_s$	Température mini d'exploitation				Épaisseur jusqu'à : [mm]									
	$\geq 15$	$\geq -10$	$\geq -30$	$< -30$	8	12	16	20	25	35	40	45	50	
-	-	-	2,0											A
-	-	2,0	1,4											
-	2,0	1,4	1,0		D ou C			C			B			
2,0	1,4	1,0	0,7											
1,4	1,0	0,7	0,5											
1,0	0,7	0,5	-		D									
Compression														
déformation à froid	faible $\frac{P}{s} \geq 19$			Épaisseur										
	forte $\frac{P}{s} \geq 10$													

$P$  = rayon de flexion ;  $s$  = épaisseur

Direction des efforts



A - aciers spéciaux (faible fragilité)

B - aciers calmés

C - aciers semi-calmés

D - aciers effervescents.

le prix de revient croit de D à A.

$$\tau_V = \frac{T}{S} = \frac{42903}{7100} = 6,04 \text{ N/mm}^2 = 0,604 \text{ daN/mm}^2 < \tau_a \text{ (Vérifié)} \quad 19$$

$$S = \text{section de l'âme} ; S = e(h - 2e') = 7100 \text{ mm}^2$$

Vérification de la contrainte due à la sollicitation composée.

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_f^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{6,66^2 + 3 \cdot 0,604^2} = 6,74 \text{ daN/mm}^2 < \sigma_a \text{ (Vérifié)}$$

Vérification des déformées

La flèche admissible  $f_a$ ; ne doit pas dépasser la valeur suivante:

$$f_a = \frac{l}{1000} \div \frac{l}{600} = 12 \text{ mm} \div 20 \text{ mm}$$

flèche due au poids propre

La flèche est définie comme suit:

$$EIY'' = -M_f(x) \quad \text{ou}$$

$$E = \text{module d'élasticité} = 2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$I =$  moment d'inertie par rapport à la fibre neutre.

$$M_f(x) = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2}$$

$$EIY' = - \int M_f(x) dx + C_1 = q \frac{x^3}{6} - q \frac{l x^2}{4} + C_1$$

$$EIY = \int q \frac{x^3}{6} dx - \int q \frac{l x^2}{4} dx + \int C_1 dx + C_2$$

$$EIY = \frac{q x^4}{24} - \frac{q l x^3}{12} + C_1 x + C_2$$

conditions aux limites

$$x=0 \quad \left\{ \begin{array}{l} C_2 = 0 \\ y=0 \end{array} \right.$$

$$x=l/2 \quad \left\{ \begin{array}{l} C_1 = \frac{q l^3}{24} \\ y'=0 \end{array} \right.$$

$$\text{d'où } y=y_0 = \frac{q l^4}{24 EI} (x^4 - 2lx^3 + l^3 x)$$

cas le plus défavorable lorsque  $x = l/2$ , la flèche prend l'expression suivante:

$$y = \frac{5}{384} \frac{q l^4}{EI} \quad \text{en remplaçant les lettres par leur valeur nous}$$

trouvons:

$$y = 1,14 \text{ mm} \quad \text{posons } f_1 = y$$

Flèche due à la charge roulante.

$$EIY'' = -M_f(x)$$

pour  $x < d$ ,  $b = l - d$

$$y_1 = \frac{Q_a}{6 l EI} (2b^2 dx + b d^2 x - b x^3)$$

pour  $x > d$

$$y_2 = \frac{Q_a}{6 l EI} (2d^2 b (l-x) + d b^2 (l-x) - d (l-x)^3)$$



pour  $x = l/2$  (cas le plus défavorable)

$$\tilde{y} = \frac{Q_0 l^3}{48EI}$$

En remplaçant les lettres par leur valeur nous trouvons:

$$y = 5,43 \text{ mm} \quad \text{posons } f_2 = y.$$

La flèche totale

$$f_T = f_1 + f_2 = 1,14 + 5,43 = 6,57 \text{ mm} < f_a \text{ (vérifié)}$$

## B. sollicitations horizontales

### a) effet d'inertie (freinage et démarrage)

$F_i$  = force d'inertie du chariot appliquée au milieu de la poutre.

$$F_i = m_j \dot{v}$$

$m$  = masse du chariot = 4000 kg.

$$\dot{v} = \frac{v}{t}$$

$v$  = vitesse du pont = 100 m/min = 1,66 m/s.

$t$  = temps de freinage = 4 s.

---

$$F_i = 1660 \text{ N}$$

$F'_i$  = force d'inertie due au poids propre. s'applique au milieu de la portée.

$$F'_i = m' \dot{v}$$

$m'$  = masse de la poutre = 1344 kg

---

$$F'_i = 558 \text{ N}$$

Moments fléchissants.

$M_{f1}$  dû à  $F_i$

$M_{f2}$  dû à  $F'_i$

$$M_{f1} = F_i \frac{x}{2} \quad \text{---} \quad M_{f1, \max} = F_i \frac{l}{4}$$

$$M_{f2} = F'_i \frac{x}{2} - q_1 x \frac{x^2}{2}$$

$$\frac{dM_{f2}}{dx} = 0 \quad \text{---} \quad x = l/2 \quad ; \quad M_{f2, \max} = F'_i \frac{l}{8}$$

$$M_{fT} = M_{f1, \max} + M_{f2, \max} = 10795,5 \text{ N.m.}$$

Effort tranchant.

$$T_H = \frac{F'_i}{2} + \frac{F_i}{2} = 1108,5 \text{ N.} \quad (\text{faible par rapport à } T_v)$$

### b) réactions transversales dues au roulement

Ces efforts composants du couple, sont égaux à :

$$H_1 = Q_g \cdot \lambda$$

$\lambda$  = coefficient dépendant du rapport  $l/a$

$l$  = portée

$a$  = écartement de deux galets.

$$\lambda = 0,05 + 0,2 \text{ pour } l/a = 2 + 8.$$

$$- \alpha = 1,865 \text{ m.}$$

$$\text{adoptons } \lambda = 0,14 ; H_1 = 39842,5 \times 0,14 = 5576,5 \text{ N.}$$

cet effort engendre un couple de moment concentré

$$M_c = H_1 \cdot \alpha = 10400 \text{ N.m.}$$

c) sollicitations dues au vent

elles seront négligées, car le pont roulant est à l'abri.

Moment fléchissant maximal résultant des efforts horizontaux.

$$M_{fH} = M_{f1 \max} + M_{f2 \max} + M_c = 21195,5 \text{ N.m}$$

$$\sigma_H = \frac{M_{fH}}{I_{d\beta} / v}$$

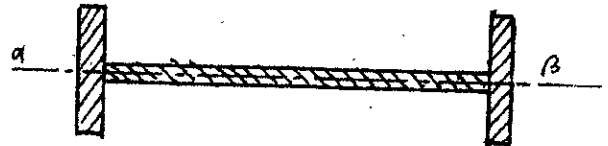
$$I_{d\beta} = \frac{2e'b^3}{12} + \frac{(h-2e')e^3}{12}$$

$$I_{d\beta} = 1949,9 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$v = b/2$$

$$\frac{I_{d\beta}}{v} = 21,66 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_H = \frac{21195,5 \cdot 10^3}{21,66 \cdot 10^4} = 9,78 \text{ daN/mm}^2$$



la contrainte défavorable est la combinaison de la contrainte verticale et horizontale.

$$\sigma_T = \sigma_v + \sigma_H = 6,74 + 9,78 = 16,52 \text{ daN/mm}^2 < \sigma_a \text{ (verifié)}$$

flèche due aux sollicitations horizontales.

$$f = \frac{(F_1 + F_2) l^3}{48 EI} = \frac{(1660 + 557) \cdot 12^3 \cdot 10^9}{48 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1949,9 \cdot 10^4} = 19,49 \text{ mm} < f_a \text{ (verifié)}$$

Forme de la poutre.

Nous vérifions que la poutre a une forme d'égale contrainte.

$$\frac{M_{fT}}{\frac{I_{x\alpha}}{v}} \leq \sigma_a ; \quad \frac{I_{x\beta}}{v} \geq \frac{M_{fT}}{\sigma_a} = \frac{223342000}{173,3} = 128,87 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

or la poutre considérée a un module de flexion égale à :

$$\frac{I_{x\alpha}}{v} = 335,39 \cdot 10^4 \text{ mm}^3, \text{ donc c'est vérifié.}$$

Du point de vue de la résistance au fatigue, l'ordre de préférence est a, b, c, d (fig 8). nous choisissons le type C. car nous pouvons approcher

diverses possibilités de changement de  
hauteur d'une poutre en double T au  
voisinage d'un appui.

fig 8

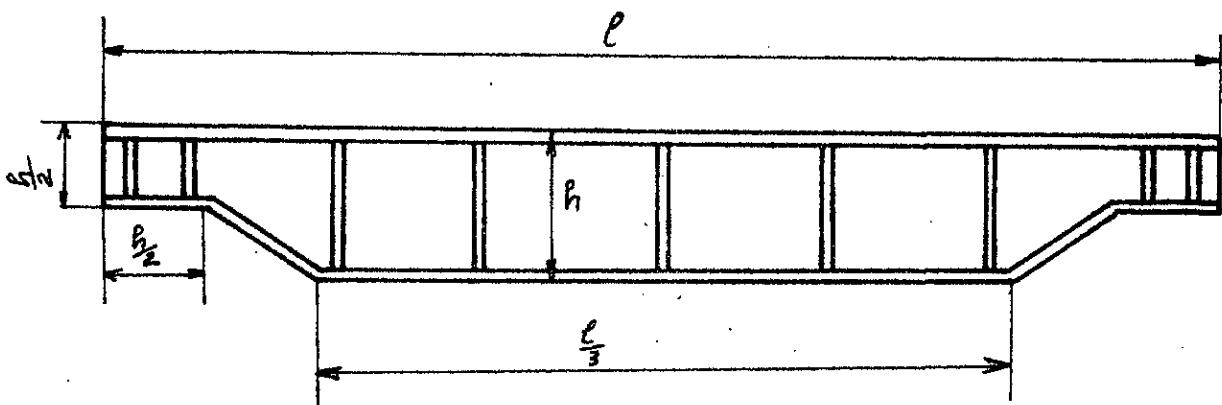
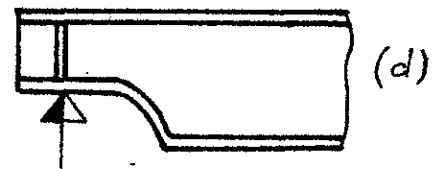
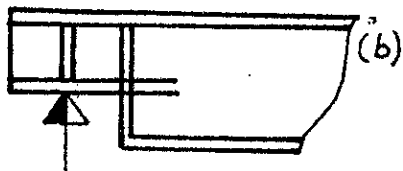
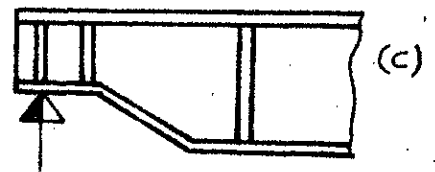


fig 9

## IV SOUDAGE

### 4-1 Calcul des cordons de soudure.

#### charges statiques

#### 1. assemblage auge-semelle.

nous baserons nos calculs sur le critère de cisaillement maximal. pour que l'assemblage résiste en toute sécurité aux charges statiques, il faut que:

$$\tau = \frac{T \cdot S_t}{2 \cdot a \cdot I_{\alpha\beta}} \leq \tau_{MB} \quad (\text{voir bibliographie [4]})$$

(Conditions d'applications de cette formule,  $a \geq 4 \text{ mm}$ ;  $L \geq 50 \text{ mm}$ .)

$$\tau_a = 10,05 \text{ daN/mm}^2$$

$$\tau_{MB} = \tau_a \cdot \sqrt{2} = 14,21 \text{ daN/mm}^2$$

$\tau_{MB}$  = contrainte de cisaillement du métal de base.

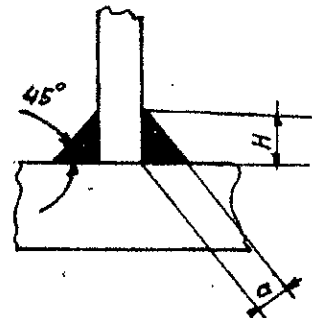
$S_t$  = moment statique, de la semelle, par rapport à  $\alpha\beta$  (axe).

$$S_t = 180 \times 20 \times 365 = 1,314 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

pour  $a = 4 \text{ mm}$  et

$$H = \frac{2a}{\sqrt{2}} = a\sqrt{2} = 5,65 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{42803 \cdot 1,314 \cdot 10^6}{2 \cdot 4 \cdot 125771,92 \cdot 10^6} = 5,6 \text{ daN/mm}^2 < \tau_{MB}$$



Dans le calcul du régime de soudage qui s'effectuera dans les chapitres qui suivent, normalement nous prendrons une cathète  $H$  supérieure ou égale à  $5,65 \text{ mm}$ . Si n'en est pas ainsi, nous donnerons la cause dans la remarque qui suivra.

#### 2. assemblage auge-nervure.

pour que l'assemblage résiste en toute sécurité il faut que:

$$\frac{T}{\Sigma a \cdot l} \leq \tau_{MB}$$

$$\Sigma a \cdot l \geq \frac{T}{\tau_{MB}} \quad ; \quad \text{en adoptant } a = 5 \text{ mm} \rightarrow H = 7,07 \text{ mm}$$

La longueur du cordon de soudure doit vérifier l'inégalité suivante:

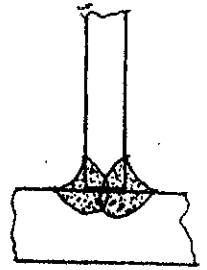
$$\Sigma l \geq \frac{T}{a \cdot \tau_{MB}} = \frac{42903}{5 \cdot \sqrt{2} \tau_a} = 60,37 \text{ mm}$$

#### 3. assemblage semelle-nervure.

nous raisonnons de la même manière qu'en 2. nous trouvons

$$\Sigma l \geq 60,37 \text{ mm.}$$

Dans notre projet, l'assemblage auge-semelle sera exécuté par cordons de soudure d'angle à forte pénétration qui qui se rapproche du joint en K de sorte que la condition  $H > 5,65 \text{ mm}$  n'est pas exigée. voir figure ci-contre



## 4-2 Choix du procédé de soudage.

### 4-2-1 classement des procédés de soudage.

Les procédés de soudage sont nombreux. Ils doivent tous répondre aux 4 exigences suivantes :

- 1) Comporter une source d'énergie permettant d'unir par fusion ou pression.
- 2) Eliminer la contamination superficielle des faces à unir.
- 3) Eviter la contamination atmosphérique ou ses effets.
- 4) Avoir le contrôle métallurgique de la soudure.

Nous adopterons le classement selon les premières et troisième exigences. [4].

Les principales sources d'énergie sont d'origine électrique, (arc ou résistance), mécanique, chimique ou optique.

Les principaux éléments de protection contre la contamination atmosphérique sont : Le flux - les gaz inertes - les gaz actifs - le vide.

Dans une production de série le soudage automatique est plus productif par rapport au soudage manuel. Il est utilisé lorsque les longueurs à souder dépassent le mètre. Pour des longueurs inférieures ou égales à 1 mètre le soudage manuel devient alors plus intéressant. Dans le soudage automatique l'approvisionnement en fil électrode est continu et à vitesse contrôlée, de manière à maintenir un arc stable de longueur constante. L'assemblage des semelles avec l'auge se fera par soudage automatique.

• Les raidisseurs seront soudés à l'auge et à la semelle par soudage manuel.

Après avoir étudié plusieurs procédés : utilisation, avantages, inconvénients, etc... nous avons sélectionné deux :

- le soudage automatique sous flux solide.
- le soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée.

## A - Soudage automatique sous flux solide.

25

La source d'énergie est de type électrique, la chaleur est produite par un arc électrique amorcé entre un fil électrode et les pièces à assembler.

Le courant peut être continu ou alternatif. Son intensité varie entre 200 ÷ 2000 A. L'énergie dissipée est comprise entre 6 ÷ 80 kW.

### A-1 métal d'apport

Il se présente sous forme d'un fil électrode plein dont le diamètre varie entre 2,5 et 6 mm.

### A-2 élément de protection.

Un flux recouvre le bain de fusion. L'arc de soudage submergé dans ce flux provoque la fusion de l'électrode, du métal de base et d'une partie du flux. Le bain de fusion est ainsi protégé de la contamination atmosphérique par le flux fondu.

### A-3 Nature des flux.

Les flux utilisés en soudage automatique ont une granulométrie contrôlée, et peuvent être de type fondu, aggloméré, ou fritté. Le comportement du flux dépend à la fois de sa composition chimique et de sa granulométrie. Pendant le processus de soudage, une partie du flux fond pour recouvrir le bain, et les particules métalliques quittent l'électrode, ce qui donne lieu à des réactions chimiques entre le métal et le flux. Ces réactions concernent en particulier le silicium et le manganèse, éléments importants du point de vue résistance et qualité de soudure. L'apport de silicium par le flux N°20 (voir tableau 2) permet une action désoxydante importante, pour 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 multipasses. On ne l'emploie pas pour des soudures de plus de trois passes. Le flux N°20 très utilisé donne un laitier très fluide et facilement détachable lorsqu'il est solidifié. La composition chimique du flux et sa granulométrie influent sur la tendance à la porosité. Le soudage automatique sous flux présente plus de risques de fissuration dans le cas où les pièces sont sales ou rouillées, que les procédés à arc décourent. Ces derniers permettent en effet à la vapeur d'eau et aux gaz de s'échapper, alors qu'en soudage sous flux, ils sont emprisonnés sous la couverture du flux. C'est la raison pour laquelle les flux qui s'accommodent le mieux aux surfaces sales ou rouillées sont ceux qui ont la perméabilité la plus grande, obtenue par des grains relativement gros et réguliers. Lorsqu'il est nécessaire de souder avec une forte intensité, on emploie un flux à granulométrie plus fine, permettant une protection plus efficace de l'arc.

Pour notre cas, nous utiliserons un flux à gros grain.

### A-4 avantages du procédé

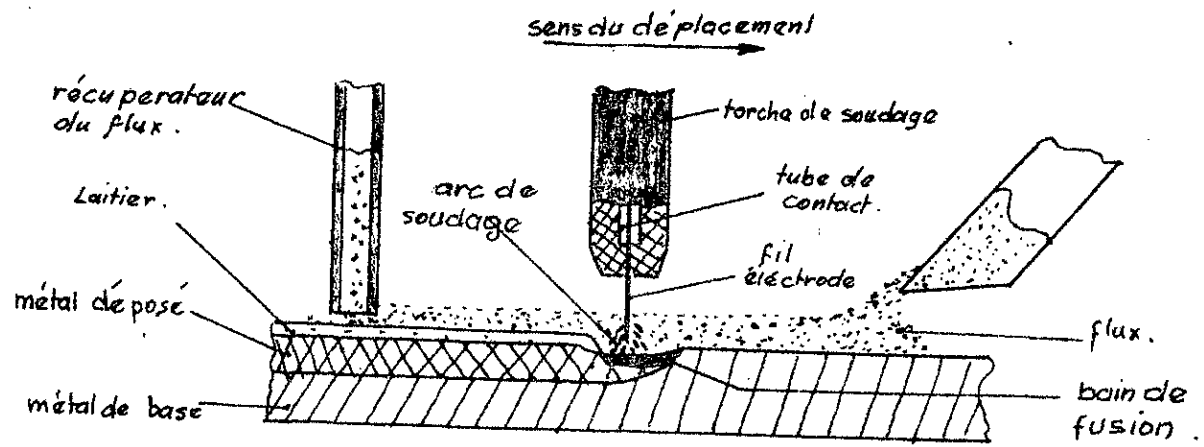
- Vitesse élevée de dépôt des cordons.
- bel aspect des surfaces des cordons.
- bonne profondeur de pénétration
- procédé propre
- le soudeur n'a pas besoin de se protéger contre l'arc car celui-ci est submergé par le laitier.
- fabrication en très grande série.

A-5 inconvénients du procédé

- grande précision de préparation des bords (non nécessaire dans notre cas).
- positions de soudage limitées par la viscosité du laitier (à plat seulement).
- procédé coûteux.

tableau 2

type de flux	50	80	70	20
	%	%	%	%
CaO	5	24	28	27
CaF <sub>2</sub>	5	5	—	—
MgO	—	12	6,5	7,5
SiO <sub>2</sub>	41	38	48	53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5	13	5	5
MnO	0,75	7,5	10	—
MnO <sub>2</sub>	39	—	—	—
<u>Métal fondu</u>				
C	0,12	0,11	0,12	0,12
Mn	1,05	1,10	1,00	0,70
Si	0,25	0,30	0,37	0,40
<u>fil.</u>				
C	0,12			
Mn	1,80			
Si	0,15			



Soudage automatique sous flux solide.

## B - Soudage manuel

27

### B-1 Source d'énergie

La source est du type électrique. La chaleur est produite par un arc électrique amorcé entre une électrode enrobée et les pièces à assembler. Le courant peut être continu ou alternatif. Les diamètres des électrodes varient entre 1,6 et 8mm, tandis que leur longueur varie entre 40cm et 1m. Le courant varie entre 30 et 500 A.

### B-2 Domaine d'utilisation

Il convient pour l'assemblage des métaux ferreux et certains métaux non ferreux. Pratiquement il permet de souder tous les types de joints en toutes positions, et de mettre en œuvre toutes les épaisseurs à partir de 1mm. très largement utilisé en ferronnerie, en carrosserie automobile, en menuiserie métallique, en tôlerie, dans les équipements de chauffage et de ventilation, pour le soudage des pipe-lines et des réservoirs de stockage en charpente métallique etc...

### B-3 Avantages

- faible coût en équipements.
- peut souder des joints de divers types.
- soudage en toutes positions, et pour une gamme très étendue d'épaisseurs.

### B-4 Inconvénients

- faible productivité
- exige des opérateurs adroits, pour obtenir des soudures de bonne qualité.
- prévoir l'enlèvement du laitier protecteur.

### B-5 électrode sans enrobage et ses inconvénients

Le métal chaud se refroidit vite au contact de l'air ambiant, il est difficile de maintenir un arc stable avec émission constante d'électrons. Ceci pour un courant continu. En utilisant un courant alternatif, l'électrode se refroidit rapidement lorsque le courant s'annule pour changer de sens, il s'ensuit un désamorçage de l'arc qui perturbe l'opération de soudage. Les gaz de l'air, oxygène, azote, attaquent le métal. L'oxydation le rend poreux, la nitruration diminue sa résilience.

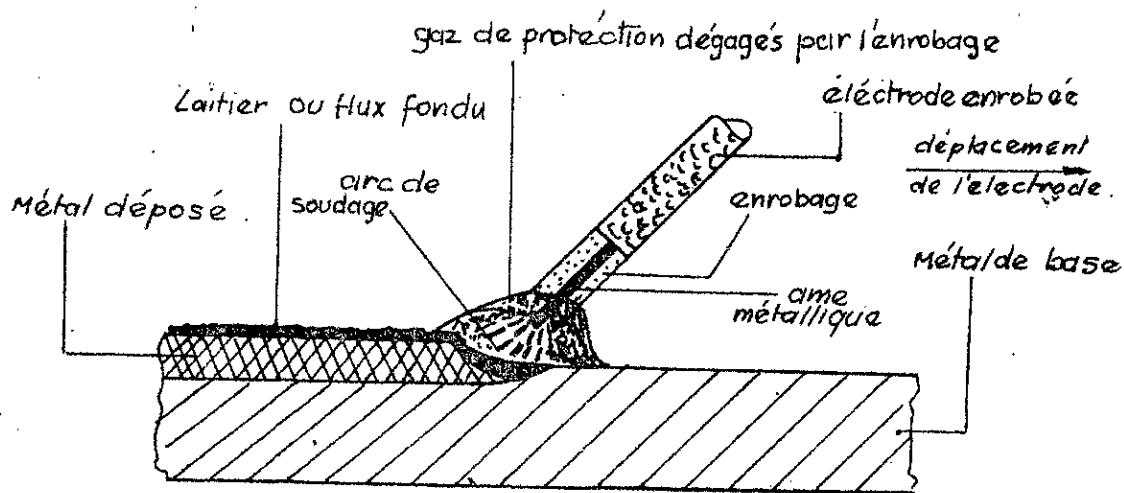
### B-6 électrode enrobée

La protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique (H, O, N) 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. L'enrobage qui entoure le métal est d'une composition complexe,  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Mn$ ,  $Fe_3O_4$ , etc... Le nombre et la proportion de ces corps varient suivant les marques d'électrodes.

Il existe plusieurs types d'enrobage :

L'enrobage : oxydant ; acide, rutile, basique, cellulosique.





- Soudage manuel à l'arc -

### 4-3 Choix du matériaux de soudage.

Les poutres étant destinées à la construction de ponts - roulant, la rupture de l'assemblage par fissuration à froid risque de provoquer des pertes humaines. Nous tiendrons compte des défauts tels que les fissures à froid ; dans notre choix.

#### les fissurations à froid.

Durant le soudage, le métal fondu absorbe de l'hydrogène jusqu'à saturation (pour les aciers ordinaires,  $300\text{cm}^3/100\text{g}$  du métal liquide). Au cours du refroidissement, l'hydrogène atomique se transforme en hydrogène moléculaire avec augmentation de volume, qui entraîne la formation de contraintes internes, et par suite des fissurations à froid. on les appelle fissures à froid à cause de leur température de formation relativement basse ( $200^\circ\text{C}$ ).

tableau 3

types de procédés de soudage	quantité d'hydrogène dissous en $\text{cm}^3$ par 100gr de métal
<u>Soudage manuel à l'arc</u>	
- électrode rutile	10 ÷ 30
- électrode basique normale	15
- électrode basique à très bas H	5
- électrode austénitique rutile	10 ÷ 30
<u>Procédé automatique à l'arc submergé</u>	2 ÷ 10
<u>Procédé sous protection gazeuse.</u>	
- fil plein	2
- fil fourré.	0,5 ÷ 20

Après avoir étudié chaque type d'enrobage, nous avons jugé que l'électrode à enrobage rutile est intéressante. Elle convient pour le soudage des aciers de construction. La quantité d'hydrogène dissous est  $10 - 30 \text{ cm}^3/100\text{g}$ . (voir tableau 3) Les électrodes avec enrobage rutile sont de deux types:

- 1) Les électrodes dont l'épaisseur d'enrobage est faible ou moyenne, utilisées à cause de leur facilité d'emploi, en toutes positions pour les assemblages de pièces mal ajustées.
- 2) Les électrodes dont l'épaisseur d'enrobage est forte, utilisées pour le dépôt de cordons devant présenter un bel aspect extérieur.

Nous choisissons l'électrode rutile dont l'épaisseur d'enrobage est moyenne (sans poudre de fer, car nous n'exigeons pas une forte pénétration de la soudure) de marque CIAUTIRL4, de classification NF A 81. 309 (voir revue commerc soudure, bibliographie [11])

Caractéristiques de cette électrode rutile:

- Résistance à la rupture par traction ( $R_r \text{ N/mm}^2$ ) = 470 - 550
- Limite d'élasticité ( $R_e \text{ N/mm}^2$ )  $\geq 350$
- Allongement  $A\% \geq 22$ .

Les autres caractéristiques seront données plus loin, dans le paragraphe calcul des régimes de soudage.

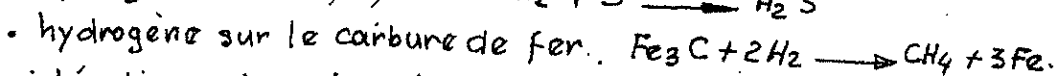
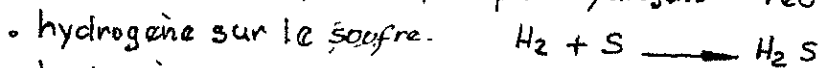
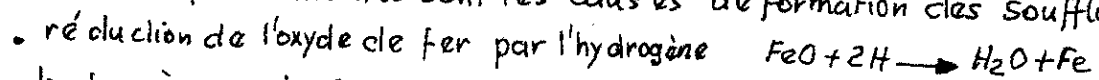
### Soudage automatique.

L'assemblage ame-selle étant le plus sollicité, en plus du risque de fissurations provoquées par la présence de l'hydrogène, nous tiendrons compte dans aussi des autres influences de l'hydrogène qui sont les suivantes: notre choix,

— La sursaturation de gaz dans le métal liquide ou une solidification trop rapide entraîne la création de soufflures contenant des gaz sous pression ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ).

— Un flux humide donne plus facilement des soufflures, il suffit de 0,35% d'humidité en poids d'un flux basique pour faire apparaître des soufflures dans la soudure.

Les réactions chimiques suivantes sont les causes de formation des soufflures.



Des considérations faites jusqu'ici:

- Nous choisissons le flux N° 70, qui contient 40% de silicium, et 10% de manganèse (voir tableau 3). la granulométrie, c'est à dire

le diamètre des grains doit être assez grande (0,40 - 0,60mm) pour ne pas emprisonner la vapeur d'eau et le gaz éventuels.

• Avant son utilisation, le flux sera déshumidifié à l'étuve à la température (300/350°C).

• Le métal d'apport doit être choisi pour obtenir des joints présentant un maximum d'homogénéité sur le plan des propriétés mécaniques, de la composition chimique et de la structure métallurgique. Les éléments d'alliage sont contenus dans le fil et non dans le flux, l'apport de silicium et de manganèse est plus élevée dans le flux que dans le fil électrode. Le fil N° 50 (voir tableau 3) répond bien à nos besoins.

### But des chanfreins.

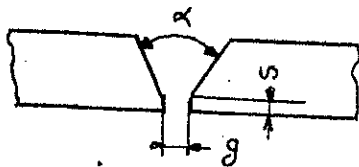
Le but de la préparation et du chanfreinage des pièces, est d'assurer la pénétration de la soudure, et de faciliter l'exécution des joints soudés.

Les éléments qui influencent cette préparation sont :

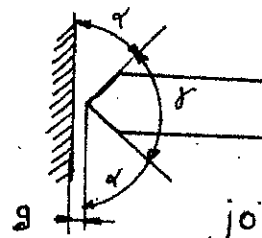
- les procédés de soudage.
- les épaisseurs des pièces à assembler.
- les positions de soudage.
- le degré de pénétration des soudures.
- les coûts de préparation.
- les quantités de métal déposé
- la nature du métal de base.

### Séction et forme des joints.

De nombreuses mesures réalisées aussi bien en laboratoire qu'en atelier et sur chantier, montrent que le retrait transversal dépend surtout de la section des joints, leurs formes, l'écartement des pièces à souder et dans une mesure moindre, l'ouverture angulaire  $\alpha$  des chanfreins ont également une certaine influence.



Joint en V



joint en K.

### Assemblage bout à bout.

Les éléments disposés dans le même plan, sont assemblés par des joints en bout. En comparant les joints en V et "U", on est amené à noter que le débit d'énergie électrique et de matériau d'apport est inférieur dans le cas d'un joint en "U" et que leur chanfrein étant peu important, lors du refroidissement le retrait du métal est presque uniforme sur toute la section, et donc le gauchissement des tôles est beaucoup plus faible.

que dans le cas d'un joint en V. Les défauts des soudures en X et en U sont 31 le manque de pénétration éventuel au milieu du joint, et le prix élevé de la préparation des bords et surtout pour des joints en U. Les chanfreins en K ont beaucoup d'avantages. Ils évitent les retraits transversaux et angulaires trop importants tout en obtenant une bonne pénétration. Ils sont surtout utilisés dans les cas où les axes des pièces assemblées sont perpendiculaires entre eux. Nous rappelons encore que le joint en K, utilisé dans un assemblage en T soumis aux charges variables, augmente la limite de fatigue.

### Assemblage par cordons d'angle.

La section droite d'un cordon présente habituellement la forme d'un triangle isocèle caractérisé par la cathète  $H$ . En pratique, on peut obtenir des cordons de forme concave ou convexe. Pour les sollicitations statiques, le cordon bombé augmente la résistance. Pour les sollicitations à la fatigue, les cordons concaves sont préférables aux cordons convexes. Si la concavité est importante, le cordon peut se fissurer pendant le refroidissement de la soudure. Pour les assemblages de pièces perpendiculaires, les cordons d'angle sont généralement exécutés sans préparation des pièces à assembler. Cependant afin d'améliorer la résistance des assemblages en fatigue, on réalise parfois un chanfreinage plus ou moins prononcé d'une des deux pièces conduisant au joint en bout K.

### choix des chanfreins.

- Dans le procédé de soudage automatique envisagé c'est à dire sous flux solide, le chanfreinage de l'âme n'est pas nécessaire car l'épaisseur de celle-ci est faible, égale à 10 mm. Afin de limiter les risques d'apparition des fissures, et augmenter la limite de fatigue de l'assemblage nous effectuerons une liaison en bout entre l'âme et la semelle ce qui conduit à un joint en K.

- Dans le procédé de soudage manuel envisagé c'est à dire à l'arc avec électrode enrobée, l'assemblage des raidisseurs avec l'âme sera effectué par cordon d'angle sans préparation particulière.

## 4-4 Calcul des régimes de soudage.

### 4-4-1 soudage manuel.

#### soudage des raidisseurs avec l'âme et la semelle.

##### a) choix du diamètre de l'électrode.

Le tableau suivant donne la cathète  $H$  d'après l'épaisseur de la tôle.

tableau 4

épaisseur (mm)	5-10	10	15	20	25	30	40	50
cathète $H$ (mm)	5-6	7-8	9-10	9-10	10-12	12-14	14-16	18-20

pour  $e = 10$  mm (épaisseur de l'âme) nous lisons  $H = 8$  mm

Pour les soudures d'angle, le diamètre de l'électrode "de" est donné dans le tableau suivant en fonction de la cathète H.



Tableau 5

cathète H (mm)	3	4-5	6-9
de (mm)	3	4	5

Pour H = 8mm nous lisons de = 5mm.

b) intensité du courant.

Elle est donnée par la relation suivante :  
le tableau ci-dessous permet de choisir K<sub>i</sub>.

$$I_s = K_i \cdot de$$

tableau 6

de (mm)	2	3	4	5	6
K <sub>i</sub> (A/mm)	25-30	30-45	35-50	40-55	45-60

choisissons K<sub>i</sub> = 45 A/mm

$$I_s = 45 \times 5 = 225 \text{ Amperes}$$

c) tension du courant.

Elle est donnée par la relation suivante:

$$U_s = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{de}} I_s \pm 1$$

$$U_s = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{5}} \cdot 225 \pm 1 = 24,03V \text{ prenons}$$

$$U_s = 25 \text{ volts}$$

d) aire de la section transversale.

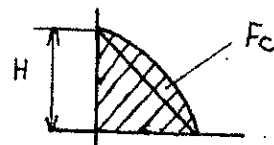
Pour les soudures d'angle, l'aire de la section transversale est donnée par la relation:

$$F_c = \frac{K_R \cdot H^2}{2}$$

F<sub>c</sub> = aire totale (mm<sup>2</sup>)

K<sub>R</sub> = coefficient de renforcement du cordon.

H = cathète (mm).



Pour une seule passe, l'aire de la section transversale ne doit pas dépasser 30 ÷ 40 mm<sup>2</sup>. K<sub>R</sub> est donné dans le tableau suivant:

catéte H(mm)	3-4	5-6	7-10	15-20	20-30	30
K <sub>R</sub>	1,5	1,35	1,25	1,15	1,10	1,05

Tableau 7.

Pour H=8mm nous lisons K<sub>R</sub> = 1,25.

$$F_c = \frac{1,25 \cdot 8^2}{2} = 40 \text{ mm}^2$$

e) nombre de passes :

$$n = \frac{F_c - F_1}{F_p} + 1$$

le nombre de passes "n".

pour la première passe : F<sub>1</sub> = (6 ÷ 8) de

pour la passe suivante : F<sub>p</sub> = (8 ÷ 10) de

oiloptions :

$$F_1 = 6 \text{ de} = 6 \times 5 = 30 \text{ mm}^2$$

$$F_p = 9 \text{ de} = 9 \times 5 = 45 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{40 - 30}{45} + 1 = 1,22 \quad \text{nous prenons :}$$

$$n = 2$$

#### 4-4-2 soudage automatique.

##### Assemblage des semelles supérieure et inférieure avec lame.

nous ferons les calculs pour des soudures bout à bout avec chanfrein à 45° qui seraient assimilables à des soudures d'angle sans chanfreinage.

Les deux semelles ont mêmes dimensions, les résultats de calcul suivant seront valables pour les deux parties symétriques (semelle supérieure, semelle inférieure)

##### 1) pénétration nécessaire de la soudure.

$$H_1 = \frac{S}{2} + (1 \div 2) \text{ mm} \quad \text{— pour le soudage des 2 côtés .}$$

$$H_1 = S - 2 \text{ mm} \quad \text{— si le soudage s'effectue d'un seul côté .}$$

utilisons :

$$H_1 = \frac{S}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ mm.}$$

##### 2) intensité du courant de soudage.

$$I_s = \frac{H_1}{k_h} \cdot 100$$

$k_h$  = coefficient déterminant les conditions de soudage.

34

Le tableau ci-dessous donne  $k_h$ .

Tableau 8  $k_h$  [mm/100Amp]

mode de soudage.	diamètre du fil (mm)	courant alternatif (↔)	courant continu polarité directe	courant continu polarité inverse
sous flux solide.	2	1,25 - 1,30	1,15	1,40 - 1,45
	3	1,10 - 1,15	0,95	1,25 - 1,3
	4	1,0 - 1,05	0,85 - 0,9	1,1 - 1,15
	5	0,95	0,75 - 0,86	1,05 - 1,1
	6	0,90	0,80	0,95 - 1,05
en atmosphère de CO <sub>2</sub> .	1,2			2,1
	1,6			1,75
	2			1,55
	3			1,45
	4			1,35
	5			1,2

Nous donnerons aussi les valeurs de la densité admissible du courant noté par "j".

Tableau 9

dé (mm)	2	3	4	5	6
j (A/mm <sup>2</sup> )	65-200	45-90	35-60	30-50	25-45

Preons  $d_e = 5 \text{ mm}$  nous lisons  $k_h = 0,95$   
 $j = 30$

$$I_s = \frac{5}{0,95} \cdot 100 = 526 \text{ A}$$

### 3) Verification du choix de "de"

Le diamètre de l'électrode se calcule d'après la formule ci après.

$$d_e = 1,13 \sqrt{\frac{I_s}{j}}$$

$$d_e = 1,13 \sqrt{\frac{526}{30}} = 4,94 \text{ mm} < d_e \text{ (vérifié)}$$

nous adopterons donc  $d_e = 5 \text{ mm}$ .

#### 4) vitesse de soudage.

$$V_s = \frac{A}{I_s}$$

tableau 10

$d_e \text{ (mm)}$	1,2	1,6	2	3	4	5	6
$A \text{ (A.m/h)} \cdot 10^3$	2-5	5-8	8-12	12-16	10-20	20-25	25-30

pour  $d_e = 5 \text{ mm} \rightarrow A = 20 \cdot 10^3$

$$V_s = \frac{20 \cdot 10^3}{526} = 38 \text{ m/h.}$$

#### 5) tension optimale.

$$U_s = 20 + \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{d_e}} I_s + 1 = 20 + \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{5}} \cdot 526 + 1 = 32,76 \text{ V}$$

nous prenons  $U_s = 33 \text{ volts.}$

#### CALCUL DES DIMENSIONS DU CORDON.

#### 6) pénétration de la soudure.

$$H = A \sqrt{\frac{q_c}{\Psi_f}}$$

$q_c =$  énergie courante.

$H =$  profondeur de fusion du métal.

$\Psi_f =$  Coefficient de forme de fusion  $= f(U_s, I_s)$

$e =$  largeur du cordon

$$\Psi_f = \frac{e}{H}$$

$A = 0,0156$  pour le soudage des aciers non alliés et faiblement alliés sous flux solide avec fil électrode non allié.

$$\Psi_r = \frac{e}{g}$$

$g =$  hauteur de forme de renforcement.

$\Psi_r =$  coefficient de forme de renforcement.

$$q_c = \frac{I_s \cdot U_s}{V_s} \cdot \eta$$

$\eta =$  rendement thermique  $= 0,8.$

$$q_c = \frac{526 \cdot 33}{38} \cdot 3600 \cdot 0,8 = 13155,53 \text{ J/cm.}$$

Pour les divers diamètres de fil électrode  $\Psi_f$  se calcule d'après l'expression ci-après:



$$\Psi_f = -K' (19 - 0,01 I_s) \frac{d_e \cdot U_s}{I_s}$$

$K'$  = coefficient dépendant de la nature du courant et de sa polarité.  
 $d_e$  = diamètre de l'électrode.

$$K' = \begin{cases} 1 & \text{pour le courant alternatif.} \\ 0,367 \cdot j^{0,1925} & \text{pour courant continu polarité inverse, avec } j = 120 \text{ A/mm}^2. \\ \frac{2,92}{j^{0,1925}} & \text{pour courant continu polarité directe avec } j = 120 \text{ A/mm}^2 \end{cases}$$

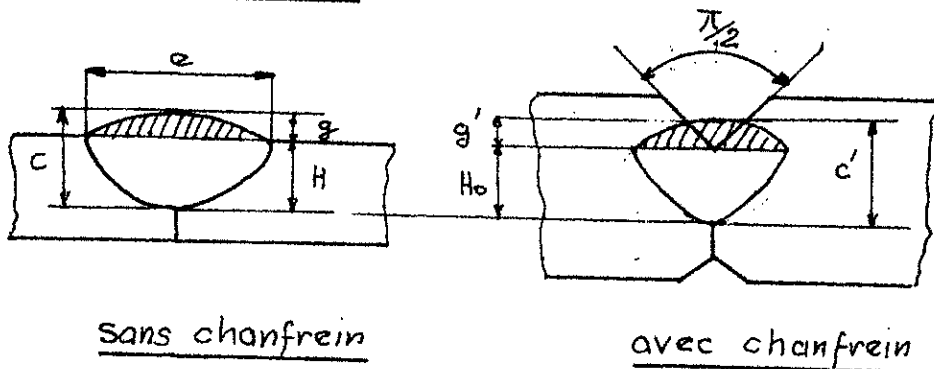
$$K' = \begin{cases} 0,92 & \text{pour courant continu polarité inverse} \\ 1,12 & \text{pour courant continu polarité directe} \end{cases}$$

avec  $j < 120 \text{ A/mm}^2$ .

Nous utiliserons le courant alternatif donc  $K' = 1$

$$\Psi_f = 1 (19 - 0,01 \cdot 526) \frac{5 \times 33}{526} = 4,31$$

7) dimensions du cordon.



Nous calculons les dimensions principales du cordon qui aurait lieu au soudage bout à bout sans chanfreinage, et en supposant que la hauteur totale du cordon est invariable pour le cas de soudure chanfreinée.

$$c' = c$$

$$c' = H_0 + g'$$

$$c = H + g$$

déterminons  $H, H_0, g, g'$ .

$$H = 0,0156 \sqrt{\frac{13755,53}{4,31}} = 0,862 \text{ cm} = 8,62 \text{ mm}$$

$$g = \frac{F_d}{0,73 e}$$

$F_d$  = aire de la section transversale du cordon.

37

$$F_d = \frac{\alpha_d \cdot I_s}{3600 C \cdot V_s}$$

$$\alpha_{d0} = \alpha_f (1 - \Psi)$$

$\alpha_f$  = coefficient de fusion du métal.

$\Psi$  = coefficient de perte du métal d'apport (c'est le rapport de la quantité de métal perdu sous l'aspect d'étincelles, à la quantité totale du métal d'apport fondu). Il est donné par la formule suivante:

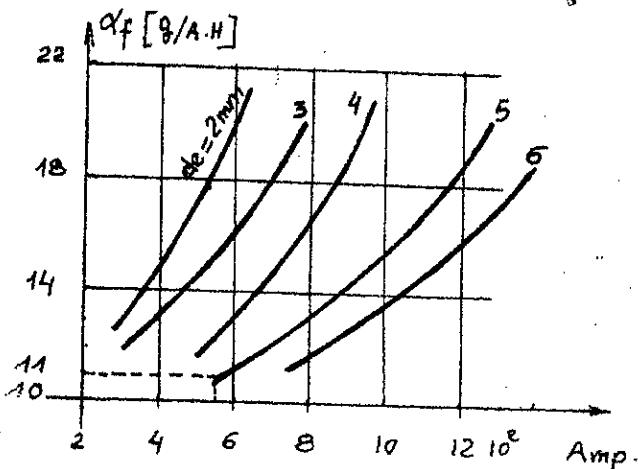
$$\Psi = -4,72 + 17,6 \cdot 10^{-2} j - 4,48 \cdot 10^{-4} j^2$$

Dans le soudage automatique sous flux solide, les étincelles sont normalement étouffées par le flux, l'arc étant submergé, l'opération ne peut pas être contrôlée, <sup>mais</sup> alors pour la sécurité,

nous affectons la valeur  $j = 30$  de sorte que  $\Psi \neq 0$ .

$$\Psi = -4,72 + 17,6 \cdot 10^{-2} \cdot 30 - 4,48 \cdot 10^{-4} \cdot 30^2$$

$$\Psi = 0,156$$



pour courant alternatif

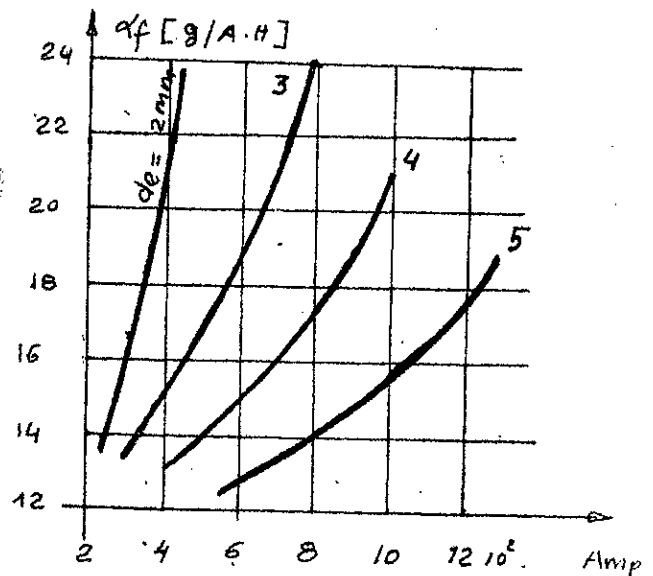
$$I_s = 526 A \rightarrow \alpha_f = 11$$

$$\alpha_d = 11 (1 - 0,156) = 9,28$$

$$C = 7,85 \text{ g/cm}^3 = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$$

$$F_d = \frac{9,28 \times 526}{3600 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3}} = \frac{488128}{28050} = 174,02 \text{ mm}^2$$

$$e = \sqrt{F_d} = \sqrt{174,02} = 13,18 \text{ mm}$$



en courant continu

$$g = \frac{16,36}{0,93 \times 37,15} = 0,603 \text{ mm}$$

$$g' = \sqrt{\frac{Fd - c \cdot b}{\pm g \frac{\alpha}{2}}}$$

$g'$  = hauteur de remplissage du chanfrein.

L'espace entre les deux pièces est nul d'où  $c \cdot b = 0$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad g' = \sqrt{\frac{Fd - 0}{\pm g \frac{\alpha}{2}}} = \sqrt{\frac{16,36}{1}} = 4,04 \text{ mm}$$

$$c' = c = H + g = H_0 + g'$$

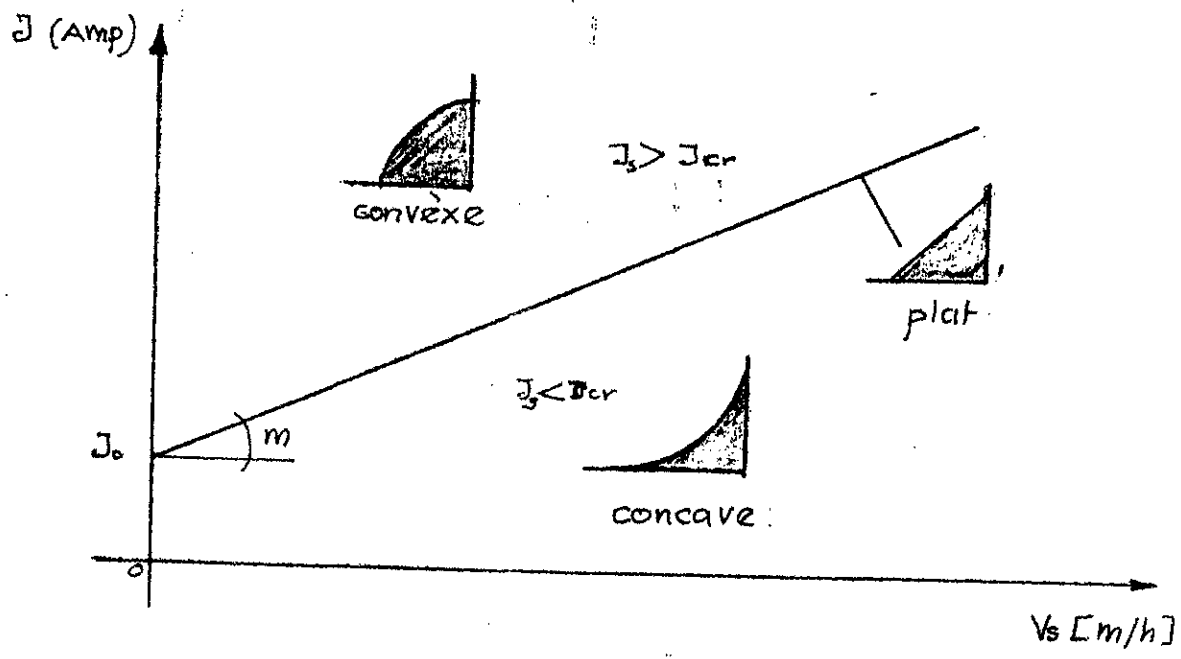
$$H_0 = H + g - g'$$

$$H_0 = 8,62 + 0,603 - 4,04 = 5,18 \text{ mm}$$

Longueur du cordon  $e_0$ .

$$e_0 = \frac{\pi}{4} \cdot H_0 = 4,31 \times 5,18 = 22,33 \text{ mm}$$

Forme du cordon.



$$J_0 = 350 \text{ A}$$

$$J_{critique} (J_{cr}) = J_0 + m \cdot V_s$$

$m$  = pente de la droite.

valeurs de  $m$ :

tableau II

$d_e$ (mm)	2	3	4	5
$m$	2	4,5	7	10

$d_e = 5 \text{ mm}$  nous lisons  $m = 10$

$$J_{cr} = 350 + 10 \times 38 = 730 \text{ A}$$

conclusion

$$I_s = 526 \text{ A} < J_{cr}$$

Le cordon est donc concave.

nous adopterons donc un cordon concave. ses avantages sont indiqués dans les chapitres précédents.

### 8) Vitesse de déroulement du fil électrode.

$$V_d = \frac{4 \cdot I_s \cdot d_f}{\pi \cdot d_e^2 \cdot \rho}$$

$$d_f = (14 \div 18),$$

nous prenons  $d_f = 18$ .

$$V_d = \frac{4 \times 526 \times 18}{\pi \cdot (0,5)^2 \cdot 7,85} = 61,46 \text{ m/h}$$

$$V_d = 61,46 \text{ m/h}$$

### suite des caractéristiques de l'électrode enrobée.

l'électrode choisie étant le type CYRUTIR4, nous donnons la suite des caractéristiques.

diamètre (mm)	→	5
longueur (mm)	→	350
intensité moyenne (Amp)	→	235
poils aux 1000 pièces	→	70
nombre d'électrodes	boite	70
	Carton	210

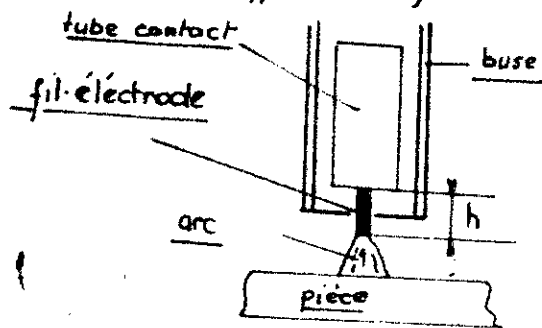
## 4-5 paramètres en soudage automatique.

40

Nous terminerons ce chapitre en donnant les précisions concernant les paramètres en soudage automatique sous flux.

Les paramètres importants en soudage automatique sous flux sont:

- l'intensité
  - la tension
  - le diamètre du fil.
  - la vitesse de soudage.
  - la longueur libre du fil électrode.
- L'intensité influe directement sur le taux de fusion et sur la pénétration.
  - La tension fait varier la forme de la pénétration de la soudure dans la pièce et le contour du cordon. Si la tension est très élevée, l'arc est en grande partie au dessus de la pièce, la quantité de flux fondu augmente et le cordon devient large et plat. Une tension faible se traduit au contraire par un arc presque entièrement au dessous de la surface de la pièce de sorte que la pénétration a une forme en tulipe très profonde. La tension normale pour le soudage bout à bout par exemple est d'environ 35 V à 1000 Ampères, et elle augmente à peu près de 6 V, quand l'intensité augmente de 1000 A, comme l'indique la fig 14. Pour les soudures d'angle, la tension est plus faible d'environ 5 V, pour assurer une bonne forme de cordon.
  - La vitesse de soudage a un effet important sur la largeur de la soudure, une vitesse rapide se traduisant par un cordon plus étroit et plus saillant. La pénétration ne s'en trouve pas modifiée proportionnellement parce que les pertes de chaleur par conduction sont moindres lorsque la vitesse est augmentée si bien que le rendement du procédé est amélioré. La vitesse est cependant limitée par l'apparition de morsures et par la surépaisseur excessive du cordon.
  - Une augmentation de la longueur libre du fil électrode - longueur comprise entre l'arrivée du courant et l'arc (voir figure 13) - provoque l'échauffement du fil, (cause de l'effet joule) et aussi une chute de tension dans la longueur

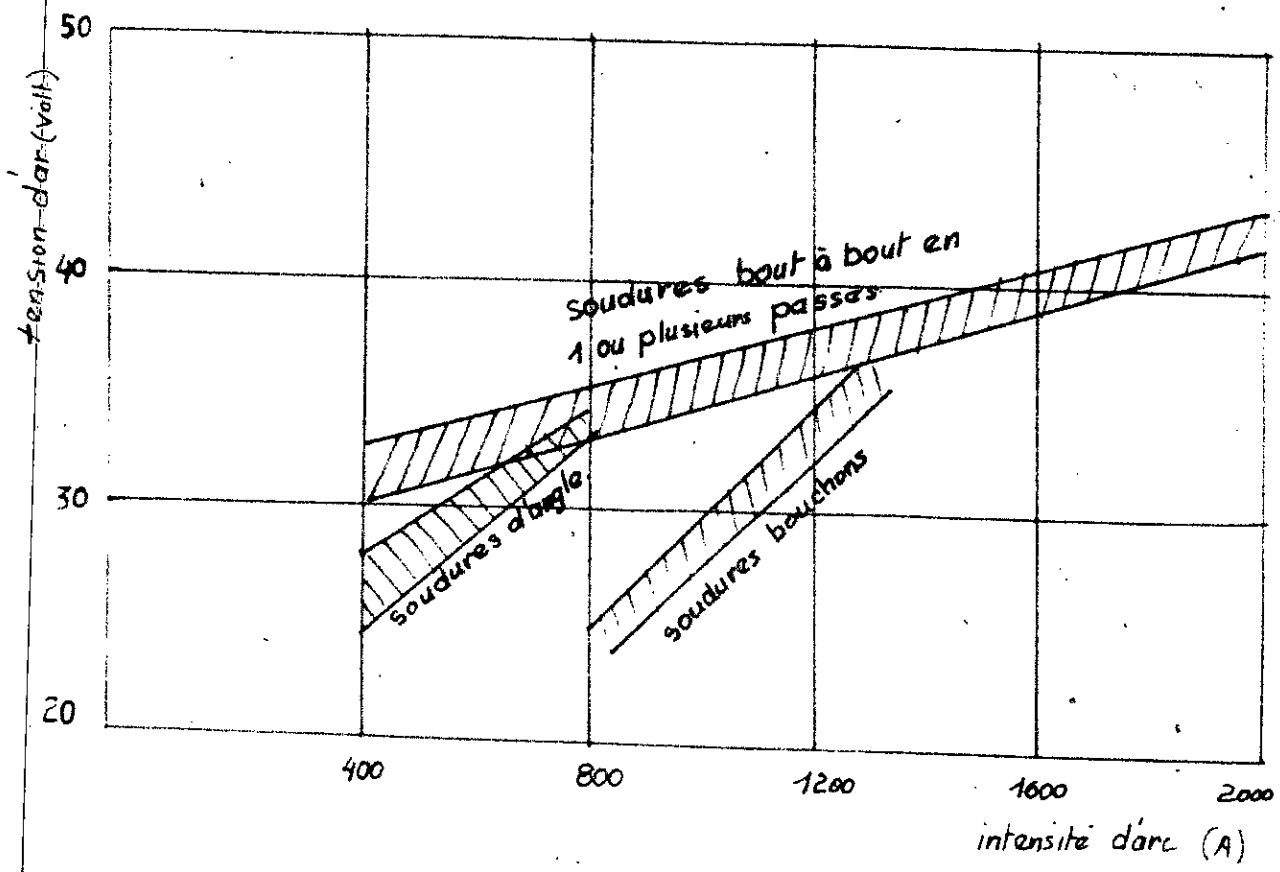


$h$  = longueur libre du fil électrode.

- fig 13 -

libre de l'électrode. Il se produira alors une fusion rapide de l'électrode.

L'effet joule, proportionnel à  $RI^2$ , est donc particulièrement important pour les hautes valeurs de l'intensité dans des fils fins de résistivité élevée. Le taux de fusion de l'électrode comprend celui dû à la chaleur développée par l'arc pour une longueur libre nulle, et celui dû à l'effet joule dans la longueur libre de l'électrode.



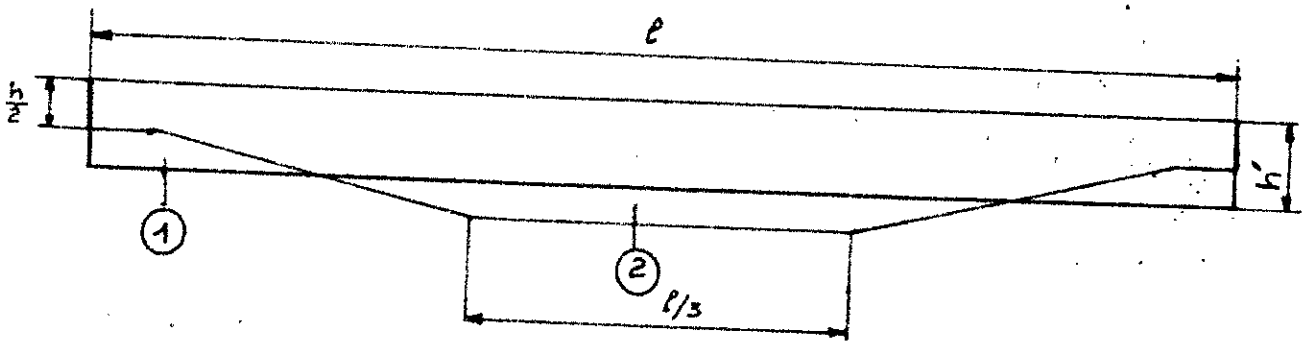
- fig 14 -



## V CALCUL DES DEFORMATIONS

### 5-1 Introduction

Les poutres considérées n'ont pas une section constante. Le calcul des déformations sera alors long et laborieux. Pour simplifier, nous ferons les calculs des déformations sur les poutres de section constante et de hauteur  $h'$



$$\text{Aire } \textcircled{1} = \text{Aire } \textcircled{2}$$

$$l \cdot h' = l \cdot \frac{h}{2} + \frac{l}{3} \cdot \frac{h}{2} + \frac{h}{2} \left( \frac{l}{3} - \frac{h}{2} \right)$$

$$l h' = \frac{5 l h}{6} - \frac{h^2}{4}$$

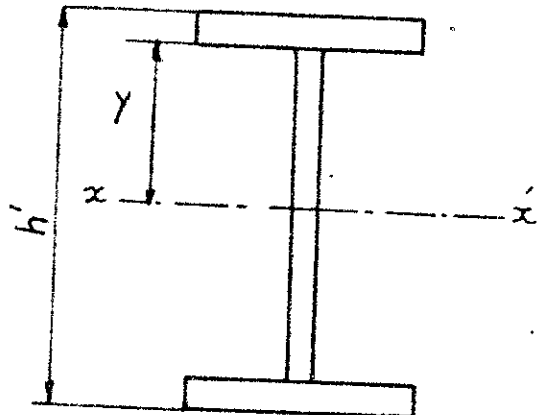
$$l h' = \frac{5 l h}{6} - \frac{h^2}{4} = \frac{5 \times 0,75}{6} - \frac{0,75^2}{4 \times 12} = 0,613 \text{ m}$$

$$h' = 613 \text{ mm}$$

l'aire de la nouvelle section

$$S' = 20 \times 180 \times 2 + 5730$$

$$S' = 129,3 \text{ cm}^2$$





$$I_{xx'} = \frac{e(h-2e')^3}{12} + 2 \left[ \frac{be^3}{12} + be' \left( \frac{h'}{2} - \frac{e'}{2} \right)^2 \right]$$

en remplaçant les lettres par leur valeur, nous trouvons:

$$I_{xx'} = 78998,53 \text{ cm}^4$$

### 5-2 Normes de tolérances

Dans la construction des poutres en double T soudées, les retraits engendrent la flexion. La Norme soviétique (CHU II, III - BS - 69), précise les flèches critiques qu'il ne faut pas dépasser.

- Flèche critique due aux déformations longitudinales  $f_{cl} = \frac{P}{750} = \frac{12000}{750} = 16 \text{ mm}$ .
- Flèche critique due aux déformations transversales:

$$f_{ct} = 0,01 \cdot b = 0,01 \cdot 180 = 1,8 \text{ mm}$$

### 5-3 Calcul des déformations longitudinales.

Nota:

Il y a des méthodes de calcul des déformations, utilisées par l'institut de Leningrad et l'école supérieure de Moscou. nous utiliserons la méthode d'OKERBLOME.

#### 5-3-1 Calcul des déformations dues au soudage automatique.

$$q_c = \frac{U_s I_s}{V_s} \cdot \eta$$

$U_s$  = tension en volt

$I_s$  = intensité du courant en ampère

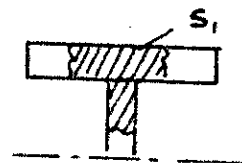
$V_s$  = vitesse de soudage cm/mn.

$$q_c = 13155,53 \text{ J/cm} = 3147,3 \text{ cal/cm}$$

#### a) Calcul des surfaces de plasticité de traction.

Nous ferons un seul calcul, car les 2 semelles ont la même épaisseur.

$$S_1 = \frac{1}{\frac{1}{S'} + \frac{Y^2}{I_{xx}} + \frac{340}{q_c}}$$



$$Y = 286,5 \text{ mm}$$

$$S_1 = \frac{1}{\frac{1}{129,3} + \frac{286,5^2}{78998,53} + \frac{340}{3147,3}} = 7,926 \text{ cm}^2$$

$$m = 1 + \frac{(H+e) \cdot e'}{S_1} = 1 + \frac{(0,54+1) \cdot 2}{7,926} = 1,469$$

$m$  = coefficient d'augmentation de l'énergie courante entraînée par l'exécution du 2<sup>ème</sup> cordon 45

$$Q = m \cdot q_c = 1,469 \times 3147,3 = 4623,38 \text{ Cal/cm.}$$

$Q$  = énergie courante totale nécessaire pour souder chaque semelle à l'âme.

### b) calcul du retrécissement

$$\frac{Q}{S} = \frac{4623,38}{129,30} = 35,75 \text{ cal/cm}^2 < 150 \text{ cal/cm}^2.$$

Nota:

• si  $Q/s > 150 \text{ cal/cm}^2$ , le retrécissement relatif est donné par un graphique qui n'est pas représenté ici.

• si  $Q/s \leq 150 \text{ cal/cm}^2$ , le retrécissement relatif est donné par la relation suivante:

$$\Delta s = - 3,55 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{Q}{S} = - 3,55 \cdot 10^{-6} \cdot 35,75 = - 126,91 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$$

$$\Delta s = - 126,91 \cdot 10^{-6} \text{ cm.}$$

Le retrécissement longitudinal de la poutre sera donc

$$\Delta l_1 = \Delta l_2 = l \Delta s = 1200 \cdot (-126,91 \cdot 10^{-6}) = - 0,1522 \text{ cm.}$$

### c) calcul de la charge fictive qui peut entraîner cette déformation.

$$C_s = \frac{\Delta s_1 \cdot S \cdot Y}{I_{xx}} = \frac{- 126,91 \cdot 10^{-6} \cdot 129,3 \cdot 28,65}{78998,53} = - 5,95 \cdot 10^{-6}$$

### d) calcul de la déformée (flèche).

$$f_A = \frac{(C_{s2} - C_{s1}) l^2}{8}$$

or  $C_{s1} = C_{s2} = C_s = - 5,95 \cdot 10^{-6}$  d'où.

$$\boxed{f_A = 0}$$

Le retrécissement relatif  $\Delta s$  suivant la semelle supérieure est égal à celui de la semelle inférieure

### 5-3-2 Calcul des déformations dues au soudage manuel.

Le soudage est manuel, la vitesse de soudage est variable, l'énergie courante est aussi variable. Alors l'énergie courante est calculée d'après l'expression suivante:

$$\boxed{q_c = 7250 \cdot H^2} \text{ [cal/cm].}$$

H = cathète

$$q_c = 7250 \times 0,8^2 = 4640 \text{ cal/cm}$$

L'énergie courante totale des nervures est la somme des énergies courantes suivant la semelle (soudage de la nervure avec la semelle), et l'énergie courante suivant l'âme (soudage de la nervure avec l'âme).

a) énergie courante suivant l'âme.

$$q_a = \frac{2e}{2e + e''} q_c$$

$$q_a = \frac{2 \times 1}{2 \times 1 + 0,8} \times 4640 = \underline{\underline{3314,28 \text{ cal/cm}}}$$

b) énergie courante suivant la semelle

$$q_s = \frac{2e'}{2e' + e''} \times q_c$$

$$q_s = \frac{2 \times 2}{2 \times 2 + 0,8} \times 4640 = \underline{\underline{3866,66 \text{ cal/cm}}}$$

e = épaisseur de l'âme

e' = épaisseur de la semelle

e'' = épaisseur de la nervure

c) calcul des surfaces de plasticité de traction

c-1 suivant l'âme

$$S_1 = \frac{1}{\frac{1}{S'} + \frac{Y_1^2}{I_{xx}} + \frac{340}{q_a}}$$

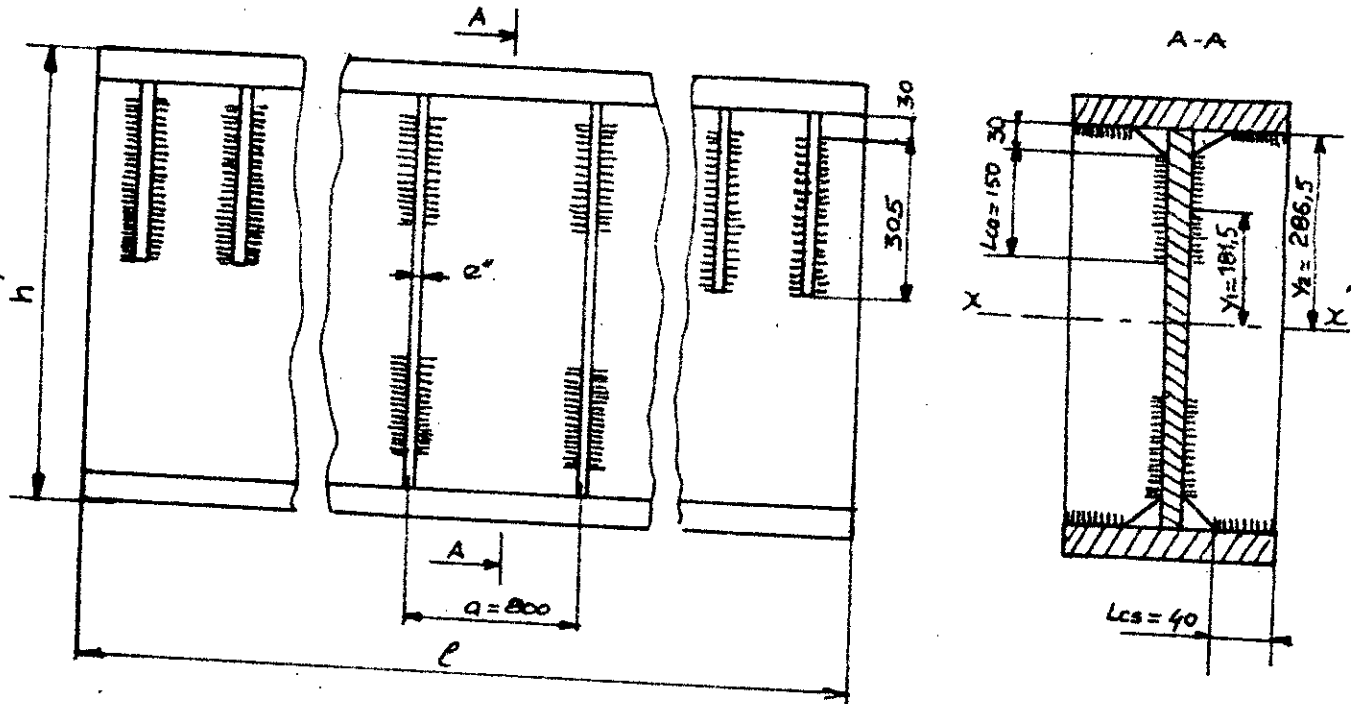
$$S_1 = \frac{1}{\frac{1}{129,3} + \frac{18,15^2}{78998,53} + \frac{340}{3314,28}} = \underline{\underline{8,73 \text{ cm}^2}}$$

c-2 suivant la semelle

$$S_2 = \frac{1}{\frac{1}{S'} + \frac{Y_2^2}{I_{xx}} + \frac{340}{q_s}}$$

47

$$S_2 = \frac{1}{\frac{1}{129,3} + \frac{20,65^2}{28998,53} + \frac{340}{3866,66}} = \underline{9,429 \text{ cm}^2}$$



$$m_1 = 1 + \frac{h_1 + e}{s_1} e''$$

$$m_1 = 1 + \frac{0,8 + 1}{8,73} \cdot 0,8 = 1,165$$

$$m_2 = 1 + \frac{h_2 + e'}{s_2} e''$$

$$m_2 = 1 + \frac{0,8 + 2}{9,429} \cdot 0,8 = 1,237$$

$$Q_1 = 2 m_1 \cdot q_a = 2 \times 1,165 \times 3314,28 = \underline{7722,27 \text{ cal/cm}}$$

$$Q_2 = 2 m_2 \cdot q_s = 2 \times 1,237 \times 3866,66 = \underline{9566,11 \text{ cal/cm}}$$

d) calcul des retrécissements.

d-1 calcul de la rigidité suivant l'âme et la semelle.  $M_a$  et  $M_s$ .

a - désigne l'âme

s - désigne la semelle.

$$Ma = \frac{S'}{x_a \cdot e}$$

$x =$  longueur du métal à l'état de plasticité.

$$M_s = \frac{S'}{x_s \cdot e'}$$

$$x = 8,1 \cdot 10^{-6} \left( \frac{Q}{\Sigma e} \right)^2 \cdot V_s$$

Pour le soudage manuelle ;  $V_s = 6 \text{ m/h} = 0,166 \text{ cm/s}$ .

suivant l'âme.

$$x_a = 8,1 \cdot 10^{-6} \left( \frac{Q_1}{2e + e''} \right)^2 \cdot V_s$$

$$x_a = 8,1 \cdot 10^{-6} \left( \frac{7722,27}{2 \cdot 1 + 0,8} \right)^2 \cdot 0,166 = 10,22 \text{ cm}$$

$$Ma = 120,3 \frac{1}{10,22 \cdot 1} = 12,65$$

d'après la courbe (voir fig 16).

pour  $Ma = 12,65$  — nous lisons  $\mu_a = -7,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{cal}$ .

retrecissement

$$\Delta a = \mu_a \cdot Q_1 \cdot \frac{n}{5} \cdot L_{ca} = -7,6 \cdot 10^{-6} \cdot 7722,27 \cdot \frac{(20 \times 15 + 4 \times 30,5)}{129,3}$$

$$\Delta a = -0,1915 \text{ cm}$$

$n =$  nombre de nervures

$L_{ca} =$  longueur du cordon de l'âme et de la nervure.

angle de déviation

$$\varphi_a = \mu_a \cdot Q_1 \cdot \frac{y_c}{I_{xx}} \cdot L_{ca}$$

$$\varphi_a = -7,6 \cdot 10^{-6} \frac{7722,27 \times 18,15 \times 15}{78998,53} = -202,26 \cdot 10^{-6} \text{ rads}$$

calcul de la flèche

$$f_a = \varphi_a \cdot a \cdot \frac{n_1 \cdot (n_1 + 1)}{2}$$

$n_1 =$  nombre de paires de nervures contenues dans la mi-portée.

$a =$  distance entre 2 nervures.

$n_1 = 9$ .

$$f_a = \varphi_a \cdot a \cdot \frac{n_1(n_1+1)}{2} = -202,26 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{80 \times 9(9+1)}{2}$$

$$f_a = -0,728 \text{ cm.}$$

Suivant la semelle.

$$x_s = 8,1 \cdot 10^{-6} \left( \frac{Q_2}{2e_s + e''} \right)^2 \cdot V_s = 8,1 \cdot 10^{-6} \left( \frac{9566,11}{2 \cdot 2 + 0,8} \right)^2 \cdot 0,166$$

$$x_s = 5,34 \text{ cm}$$

$$M_s = \frac{129,3}{5,34 \cdot 2} = 12,10$$

pour  $M_a = 12,10$  — nous lisons  $M_s = -7,65 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cal.}$

$$\Delta s = M_s \cdot \frac{Q_2}{S} \cdot n \cdot L_s.$$

$$\Delta s = -7,65 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{9566,11}{129,3} \cdot 18 \cdot (4+4)$$

$$\Delta s = -0,0815 \text{ cm.}$$

$L_s$  = longueur du cordon de la nervure et de la semelle.  
angle de déviation.

$$\varphi_s = M_s \cdot Q_2 \cdot \frac{y_2}{I_{xx'}} \cdot L_s = -7,65 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{9566,11 \cdot 28,65}{78998,53} \cdot (4+4).$$

$$\varphi_s = -212,3 \cdot 10^{-6} \text{ rads}$$

$$f_s = \varphi_s \cdot a \cdot \frac{n_1(n_1+1)}{2} = -212,3 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot \frac{9(9+1)}{2}$$

$$f_s = -0,7642 \text{ cm.}$$

déviaton totale.

$$\varphi_T = \varphi_a + \varphi_s = -(202,26 + 212,3) \cdot 10^{-6} = -414,26 \cdot 10^{-6} \text{ rads.}$$

flèche totale.

$$f_m = f_a + f_s = -(0,728 + 0,7642) = -1,492 \text{ cm.}$$

$$f_m = -14,92 \text{ mm.}$$

La déformée de la poutre en double T sera la somme des déformations dues au soudage manuelle et automatique.

$$f = f_m + f_a = -14,92 + 0 = -14,92 \text{ mm} < f_{cl}. \quad (\text{vérifié}).$$

La correction n'est pas nécessaire.

5-4 Calcul des déformations latérales.

dues au soudage automatique.

la deviation sera:

$$tg \alpha_1 = \frac{0,075 h_1 (b_1 + e')}{b_1 (0,075 b_1 + e' + \frac{3 h_1 e'^3}{b_1^2})}$$

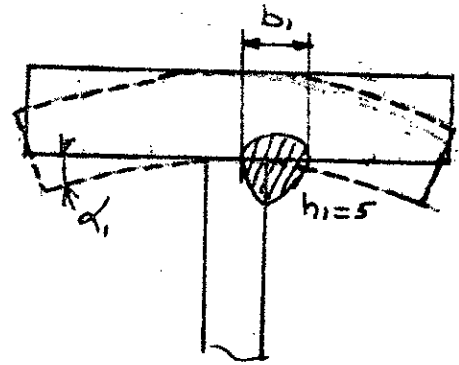
$h_1 = \text{cathete} = 5 \text{ mm}$

$b_1 = \text{hauteur du cordon}$

$$b_1 = h_1 + \frac{e}{2} = 0,5 + \frac{1}{2} = 1 \text{ cm.}$$

$$tg \alpha_1 = \frac{0,075 \cdot 0,5 (1+2)}{1 \cdot (0,075 \cdot 2 + 1 + \frac{3 \cdot 0,5 \cdot 2^3}{1^2})}$$

$$tg \alpha_1 = 0,00855$$



flèche :

$$f_1 = 0,5 B \cdot tg \alpha_1 = 0,5 \cdot 18 \cdot 0,00855$$

$$f_1 = 0,769 \text{ mm}$$

La flèche suivant la semelle supérieure est égale à celle de la semelle inférieure.

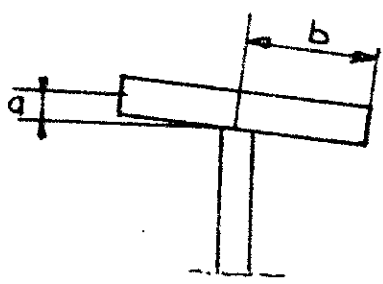
$$f_1 = f_2 = 0,769 \text{ mm} < f_{ct} \text{ (vérifié).}$$

La correction n'est pas nécessaire.

5.5 Contrôle des déformations.

Avant de les livrer en service, après le soudage, les poutres subiront un contrôle

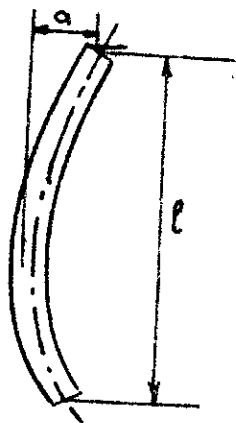
- de deviation des semelles par rapport à l'âme.
- de l'alignement de l'âme.
- de la symétrie



$$a \leq 0,005 \cdot b$$

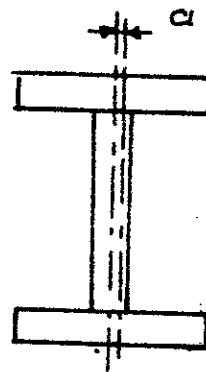
$$b = 90 \text{ mm}$$

$$a \leq 0,005 \cdot 90 = 0,450 \text{ mm}$$

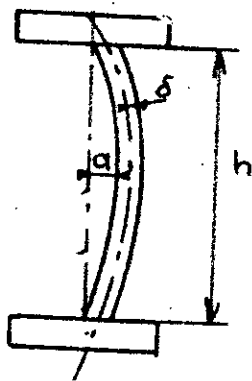


$$a \leq 0,001 P = 0,001 \cdot 12000$$

$$a \ll 12 \text{ mm}$$



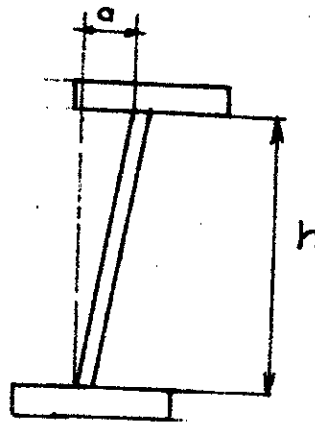
$$a \leq 5 \text{ mm}$$



$$a \leq 0,003 \cdot h = 0,003 \cdot 710 = 2,13 \text{ mm}$$

$$a < \frac{\delta}{2} < 5 \text{ mm}$$

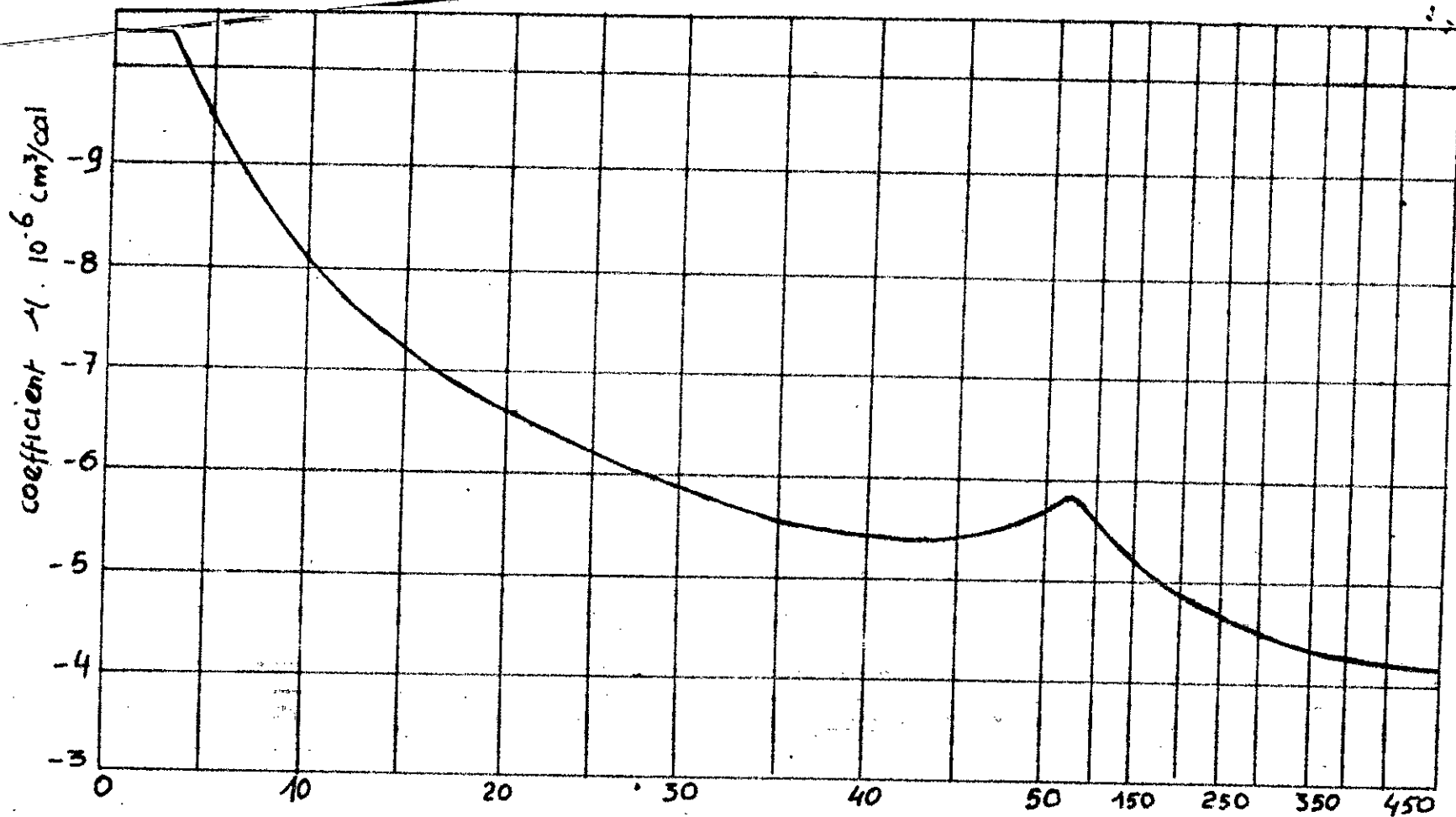
$$a < \frac{\delta}{2} = \frac{10/2}{2} = 2,5 \text{ mm}$$



$$a \leq 0,003 h$$

$$a \leq 0,003 \cdot 710 = 2,13 \text{ mm}$$





Rigidité relative  $m$

courbe donnant  $\mu$  en fonction de  $m$ .

fig 15

Dans ce chapitre, nous allons définir l'équipement nécessaire :

- les appareils de soudage
- les appareils du contrôle de la soudure.
- les machines pour le découpage des tôles.
- les machines pour le pliage des tôles.
- le positionneur des tôles.
- la machine pour l'assemblage des tôles (pointage des soudures).

### 6-1 l'appareil ou poste de soudage.

#### 6-1-1 introduction.

Les postes de soudage à l'arc sont des appareils électriques qui ont pour rôle

- a) d'abaisser la tension du réseau (le plus souvent 110 - 220V) à une valeur égale à la tension d'amorçage nécessaire (45 - 100V).
- b) de permettre un réglage de l'intensité du courant de soudage.
- c) généralement de permettre un réglage de la tension d'amorçage.
- d) d'assurer automatiquement, et aussi rapidement que possible le passage de cette tension d'amorçage à la tension d'arc au moment où l'arc s'amorce.
- e) de réaliser des conditions d'alimentation permettant le maintien d'un arc stable.

La caractéristique d'un poste de soudage, est la courbe donnant la tension aux bornes de l'arc électrique en fonction de l'intensité du courant. Nous pouvons pour le soudage dans des conditions déterminées, indiquer deux points importants de la courbe caractéristique

- Le premier point indique qu'avant de commencer à souder, c'est à dire que le circuit est ouvert, la tension  $U$  est maximum (tension d'amorçage  $U_a$ ) l'intensité étant nulle.
- Le deuxième point indique que pour l'intensité  $I$  nécessaire à l'emploi normal de l'électrode choisie, la tension est tombée à une valeur  $U_r$  (tension de régime).

#### 6-1-2 choix de la nature du courant.

Le choix de la nature du courant (continu ou alternatif) dépend du métal à souder et de la nature des électrodes.

### a) - Courant continu.

L'utilisation du courant continu peut être généralement considérée comme préférable en raison: 54

- de la parfaite stabilité de l'arc.
- du champ d'application plus étendu.

Il faut cependant mentionner au passif de l'emploi du courant continu les deux inconvénients: ① - Le courant de distribution, est presque toujours alternatif, il faut donc le redresser.

② - le soufflage magnétique, l'arc se comporte comme un conducteur mobile, l'arc devient par le champ magnétique, induit par le courant de soudage. En conséquence son extrémité sur la pièce, se déplace en différents points du métal ce qui est très gênant.

Rémede à ces deux inconvénients. ① - Utiliser un redresseur.

② - Il faut tenir l'arc aussi court que possible

- On modifie la position de l'électrode ou bien
- On enroule autour de la pièce à souder un câble d'alimentation de façon à créer un champ magnétique entre la pièce et l'arc ou bien.
- effectuer un pointage de pièce à intervalle rapproché.
- ou alors préchauffer la pièce pour rapprocher le métal au point de curie (diminuer les propriétés magnétiques du métal).

### b) - Courant alternatif.

Le phénomène du soufflage magnétique ne se produit pas car les alternances du champ magnétique induisent dans le corps métallique un courant de Foucault dont le champ est antagoniste.

Un autre avantage est que le courant de distribution est alternatif, il suffit de le faire passer dans un transformateur pour abaisser sa tension.

L'inconvénient est que l'arc en alternatif est moins stable, car il se refroidit lorsque le courant s'annule.

Pour cela on augmente souvent la fréquence du courant de soudage  $50 \div 450 \text{ Hz}$ . L'emploi du courant continu est en régression surtout depuis que l'adjonction de générateur à haute fréquence au poste de soudage, a permis de souder les aciers inoxydables.

### c) Polarité.

La polarité est dite directe si l'électrode est la cathode.

La polarité est dite inverse si l'électrode est anode.

L'anode est plus chaude que la cathode.

L'atelier de fabrication des poutres étudiées est alimenté par le courant du secteur. Les procédés de soudage manuel et automatique utilisés dans notre

s'adaptent bien au courant alternatif.

Nous utiliserons le courant alternatif à polarité directe.

### 6.1.3 Choix du poste de soudage.

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.
- Les conditions d'utilisation.
- Les exigences de la compagnie distributrice d'électricité.

#### a) La puissance électrique nécessaire.

Il existe trois groupes d'appareils de soudage.

a) les postes légers qui peuvent souder avec des électrodes de diamètre allant jusqu'à 3,25 mm ( $I < 150 \text{ A}$ ). La puissance minimum nécessaire est 5 kW.

b) les postes normaux. Ils sont les plus couramment utilisés qui peuvent souder avec des électrodes de diamètre allant jusqu'à 5 mm.  $I < 250 \div 300 \text{ A}$ . Puissance minimum nécessaire 8 ÷ 10 kW.

c) les postes à grande puissance: pouvant souder avec des électrodes de diamètre allant jusqu'à 8 mm ou pouvant alimenter 2 ou plusieurs soudeurs. L'intensité allant jusqu'à 600 A et plus. Leur puissance minimum nécessaire 18 kW.

#### b) nature de la force motrice dont on dispose.

Nous disposons pour la puissance nécessaire, de courant alternatif une tension de 380 V et les travaux envisagés permettent l'emploi d'un courant de soudage alternatif. Nous rencontrons les appareils suivants:

##### b1) 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 passe ainsi par exemple de 50 à 150 Hz, ce qui permet d'augmenter la stabilité de l'arc.

##### b2) appareils statiques.

Ce sont les transformateurs statiques, appareils de soudage les plus répandus nous rencontrons:

##### a) les transformateurs statiques monophasés simples.

Leurs organes essentiels sont les suivants:

- Un noyau magnétique N, constitué par un empilage de tôles et sur lequel sont montés.

• Un enroulement primaire, raccordé à ses deux bornes au réseau d'alimentation.

• Un enroulement secondaire raccordé à ses deux bornes au circuit de soudage

Les deux enroulements sont parfaitement isolés l'un de l'autre et chacun d'eux par rapport au noyau de façon à constituer deux circuits électriquement indépendants.

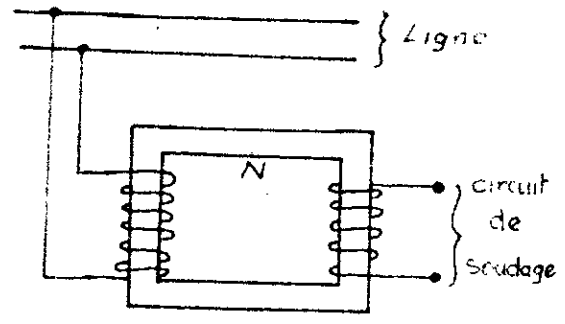
L'appareil est complété par un système de réglage qui peut être une inductance ou bobine de self (transformateur à tension secondaire constante et inductance de réglage).

ou bien un 3<sup>ème</sup> enroulement dit tertiaire monté sur le noyau

(transformateur autorégulateur).

Un autre système de réglage, appelé shunt magnétique, consiste à dériver une plus ou moins grande partie du flux magnétique du noyau dans une partie de l'armature non pourvue d'enroulement

on diminue alors le flux magnétique secondaire et par suite la tension au secondaire. Le réglage est effectué au moyen d'un volant



b) transformateurs statiques monophasés compensés.

Ils comportent en plus des organes, des appareils précédents, une batterie de condensateur qui en réduisant le déphasage, permettent de relever le facteur de puissance. Cet avantage est cependant obtenu au détriment du poids et du prix de l'appareil.

c) transformateurs statiques trimonophasés.

Leur but est de transformer le courant triphasé du réseau en un courant monophasé approprié au soudage. Leur principe est le même que celui des transformateurs monophasés. La différence est que le monophasé comporte un enroulement primaire simple, alors que le trimonophasé possède au primaire une combinaison d'enroulements raccordés par trois cables, d'alimentation au réseau triphasé

d) transformateurs statiques trimonophasés compensés.

Ils comportent en plus une batterie de condensateur qui joue le même rôle que pour les monophasés compensés.

### c) les conditions d'utilisation :

57

Les appareils de soulage peuvent

être portatifs, transportables ou fixes

- Les appareils portatifs sont destinés à des travaux légers, ils possèdent des poignées ou des brancards et des crochets d'élévation. Leur poids varie de 60 à 100 kg

- Les appareils transportables, les plus courants, sont montés sur des chariots et traînés 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 deux 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 dont le poids dépasse 700 kg. Ils sont soit installés dans un atelier soit montés 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

### Tableau de valeur des facteurs de puissance habituels des principaux types de postes alimentés en alternatif pour le courant correspondant au régime maximal.

- tableau 12 -

types d'appareils	facteurs de Puissance
- groupes convertisseurs	0,70 à 0,90
- Redresseurs	0,70 à 0,95
- convertisseurs de fréquences	0,70 à 0,75
- transformateurs monophasés simples	0,30 à 0,55
- transformateurs monophasés compensés	0,70 à 0,90
- transformateurs trimonophasés simples	0,25 à 0,60
- transformateurs trimonophasés compensés	0,70 à 0,90

A) Appareil pour le soudage manuel.

Pour notre projet, nous utiliserons un transformateur monophasé série M:350, en courant alternatif. Bibliographie [12].  
Ses caractéristiques.

- Alimentation monophasé : 50HZ
- consommation primaire à vide : 4V; 2,5A.
- consommation primaire maxi : 125V; 75A.
- tension d'amorçage : 75V.
- intensité de soudage sous la tension conventionnelle : 30V à 350A.
- coefficient d'utilisation multihoraire : 100% à 350A.
- Dimensions hors tout : 910 x 654 x 830 ; [mm]
- poids sans accessoires : 189 kg.

B) Appareil de soudage automatique.

Nous utiliserons la machine de soudage automatique TC-17M-13. Cette machine est destinée à l'exécution sous flux des soudures en bout à bords rabattus, et non rabattus, à l'exécution des soudures d'angles à l'électrode verticale et inclinée, et des soudures avec recouvrement.

La TC-17M-13 est prévue pour être utilisée dans les pays à climat modéré en présence d'une humidité relative de 80% au plus (à 20°C), à une altitude de 1000m au maximum et une température de l'air ambiant comprise comprise entre -10 et +40°C. La machine est alimentée à partir d'un réseau triphasé. Elle se déplace sur la poutre à souder, comporte une tête de soudage automatique.

Ses caractéristiques techniques.

- tensions du réseau d'alimentation à 50HZ: 220; 230; 240; 380; 415 Volts.
- courant de soudage : 400 - 1000 Ampères
- diamètre du fil à souder : 1,6 ÷ 5 mm.
- vitesse d'alimentation en fil à souder à 50Hz : 52 ÷ 403 m/h.

- vitesse de soudage à 50Hz :  $16 \pm 126$  m/h.
  - angle d'inclinaison de la tête de soudage dans le plan perpendiculaire à la soudure  $45^\circ$  maximum.
  - masse du fil à souder dans le tambour : jusqu'à 8 kg.
  - capacité de la principale trémie pour le flux :  $6,5$  m<sup>3</sup>.
  - côtes d'encombrement de la machine
    - hauteur = 540 mm
    - largeur = 345 mm
    - longueur = 715 mm.
  - côtes d'encombrement du bloc de commande
    - hauteur = 325 mm
    - largeur = 985 mm
    - longueur = 460 mm.
- masse :
- de la machine sans fil ni flux = 48 kg maxi.
  - du bloc de commande = 3,2 kg.

## 6-2 les appareils de contrôle de la soudure.

### 6-2-1 généralités.

6 a) défauts des joints soudés. Les principaux défauts qui peuvent se rencontrer en pratique sont dus à une exécution défectueuse des joints soudés.

Parmi ces défauts nous trouvons :

- les inclusions gazeuses
- les inclusions de laitier ou inclusions de solides.
- les défauts de pénétration
- les fissurations
- les sillons
- les retassures de cratère.

- Les cordons trop bombés sont le signe d'une intensité trop faible du courant de soudage et d'un balancement insuffisant de l'électrode.
- Les cordons trop étalés indiquent que l'intensité du courant est trop forte et que les pièces sont surchauffées.
- Les cordons irréguliers sont souvent le résultat d'un choix défectueux, de l'intensité du courant de soudage. Ils peuvent aussi résulter de l'utilisation d'électrodes non appropriées du métal des pièces, d'une mauvaise conduite du laitier ou d'une mauvaise longueur de l'arc.



## 60-1) Les inclusions gazeuses . fig 17

Les inclusions sont de 2 types :

- les inclusions gazeuses sous forme de soufflures sphériques
- les inclusions gazeuses sous forme de soufflures vermiculaires, se disposant les unes à la suite des autres.

Les principales causes de formation sont :

- les gaz résultants des réactions chimiques dans le métal des pièces dans la métal d'apport, et dans les enrobages.

- L'humidité des pièces et des électrodes.

les moyens d'éviter ces défauts sont :

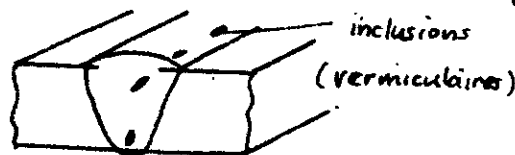
- utilisation d'aciers calmes.
- Utilisation d'électrodes soumises à des tests d'ignéation.
- séchage des pièces avant soudage.

- séchage des électrodes à 400°C et conservation à 100°C avant soudage.

fig 17



- a -



- b -

## 60-2) Les inclusions de laitier ou inclusions solides fig 18

Ce sont des restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint se disposant entre passes ou au croisement de 2 ou plusieurs soudures. On distingue des inclusions

- de forme et d'orientations quelconques - alignées ou en chapelet - alternées de part et d'autre de l'axe du cordon.

Les principales causes de formation sont :

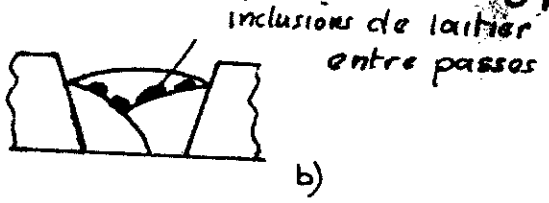
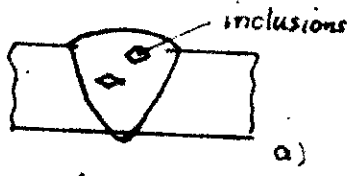
- Insuffisance de nettoyage des cordons - préparation inadéquate des pièces - techniques de soudage défectueuses - utilisation d'outils de burinage inadéquats ou mal aiguisés - déféctuosité dans les reprises à l'envers - utilisation d'électrodes de diamètres trop importants - morsures en angle aigu, localisées sur les faces de chanfrein et difficiles à nettoyer.

Les moyens d'éviter ces défauts sont :

- L'utilisation des électrodes dont le diamètre est adapté à l'épaisseur des pièces et au type de préparation. - contrôle visuel pendant le soudage.

- Nettoyage convenable des cordons avec des outils appropriés - Soins dans la préparation des pièces, dans le maintien maniemment des électrodes et dans l'exécution des reprises à l'envers.

fig 18



6.2.3) les défauts de pénétration fig 19

Ils se distinguent par l'absence de métal à la racine des chanfreins.

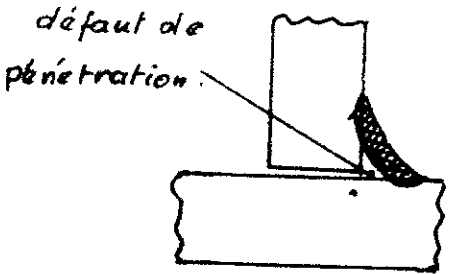
Les principales causes de leur formation sont:

- Utilisation d'électrodes de diamètres trop importants - Intensité trop faible du courant de soudage - mode d'exécution inadéquat - mauvaise préparation du chanfrein, angle d'ouverture  $\alpha$ , et d'écartements  $g$  des pièces trop faibles; méplats  $s$  trop importants. - Position relative défectueuse des pièces, avec chevauchement.

Les moyens d'éviter ces défauts sont:

- contrôle visuel pendant le soudage - choix judicieux de l'intensité du courant de soudage, du mode d'exécution et de la préparation du chanfrein. - Fixation correcte de la position relative des pièces.
- Elimination des défauts de pénétration par gougeage et reprise à l'envers.

fig 19



6.2.4) Les fissurations.

Nous pouvons rencontrer deux types de fissuration

- les fissurations à froid
- les fissurations à chaud.

Nous avons défini les fissurations à froid dans le chapitre IV. nous définirons dans la suite le 2<sup>ème</sup> type.

4-1 Les fissurations à chaud fig 20

Nous savons que tous les métaux possèdent des impuretés, en particulier le soufre et le phosphore. Ces impuretés peuvent former l'eutectique (composé à bas point de fusion), qui se dégage dans le liquide pendant la solidification. les fissurations qui s'ensuivent sont dues principalement au manque de ductilité à chaud du métal lorsqu'il subit les effets de retrait.

les hautes teneurs en carbone favorisent aussi la formation de fissuration à chaud. Si le métal de base utilisé est à haut carbone, ou allié, l'emploi

des électrodes à enrobage basique peut éviter la formation de fissurations à chaud, grâce à la réaction suivante.

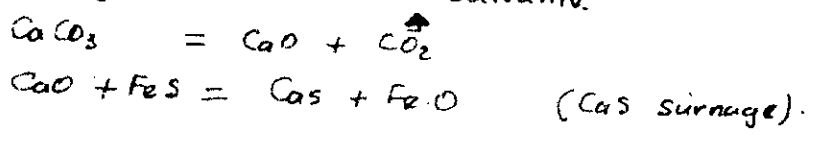
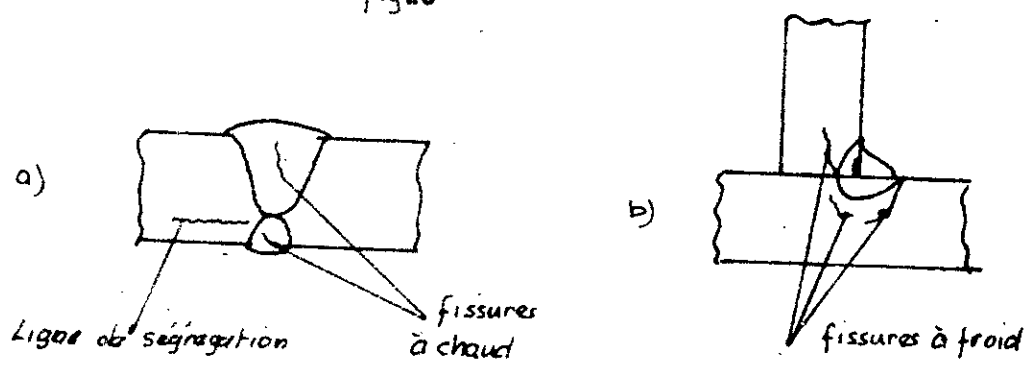


fig 20



6.a-5) les sillons fig 21

Les sillons ou caniveaux sont des rainures ou gorges à la surface des pièces, le long des bords des joints soudés, morsures en surface. Ces rainures ou gorges sont de faible longueur.

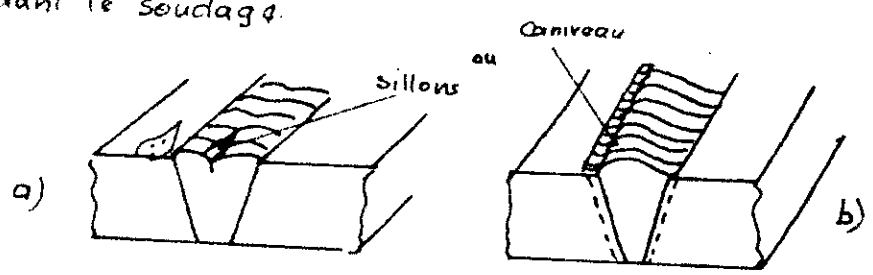
Les principales causes de leur formation sont:

- l'intensité trop forte du courant de soudage - Position déféctueuse de l'électrode dans le cas des cordons d'angles - températures des pièces trop élevées.

Les moyens d'éviter ces défauts:

- contrôle visuel pendant le soudage - choix judicieux de l'intensité du courant de soudage, de la position de l'électrode, et de la température des pièces pendant le soudage.

fig 21



6.a-6) retassures de cratère fig 22

Ce sont des cavités à l'extrémité des cordons, souvent remplis de laitier et pouvant donner lieu à fissuration.

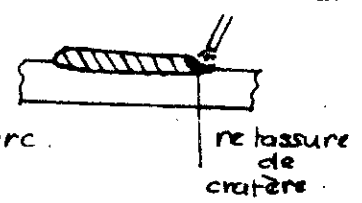
La principale cause est:

- solidification rapide du métal après interruption de l'arc.

Le moyen d'éviter ces défauts:

- contrôle visuel pendant le soudage.

fig 22



- interruption progressive de l'arc en fin d'exécution des cordons.

## 6.b) Contrôle des joints soudés.

### 6.b-1) Contrôles visuels.

Nous emploierons dans l'atelier de fabrication des poutres le contrôle visuel. Cet examen a une grande importance.

Les contrôles visuels s'effectuent pendant et après le soudage

- Pendant le soudage, ils ont pour but de contrôler que la position relative des pièces reste correcte, et que les conditions d'exécution des soudures sont en accord avec le procédé de soudage utilisé compte tenu des types de préparation adoptés pour les pièces.

Ces contrôles permettent de diminuer fortement le risque d'obtention de défauts tels que les inclusions gazeuses et de laitier etc...

- Après soudage, les contrôles visuels ont pour but de s'assurer de l'absence de défauts apparents dans ce joint et de vérifier que l'aspect extérieur de ces joints est adapté à la destination et au type de sollicitations de la construction, cet examen visuel s'attache particulièrement à détecter les défauts de fusion, manque de pénétration etc...

dans le cas de l'assemblage par cordon d'angle, l'examen visuel nous permet de vérifier, si la forme concave des cordons est adaptée aux sollicitations dynamiques

### 6.b-2) essais non destructifs.

Le contrôle visuel est toujours essentiel, mais il est souvent nécessaire de prévoir des essais non destructifs pour contrôler la qualité interne des joints soudés.

Les principaux essais non destructifs utilisés dans le domaine des constructions soudées sont :

- Les essais radiographiques.
- Les essais magnétiques.
- Les essais par rassuage.
- Les essais par ultrasons.

#### 6.b-2-1) Domaines d'application des essais non destructifs.

Chaque essai non destructif permet de détecter certains défauts et convient pour le contrôle d'un type d'assemblage bien précis.

Le tableau ci-dessous résume les principaux domaines d'application

- Tableau 13 -

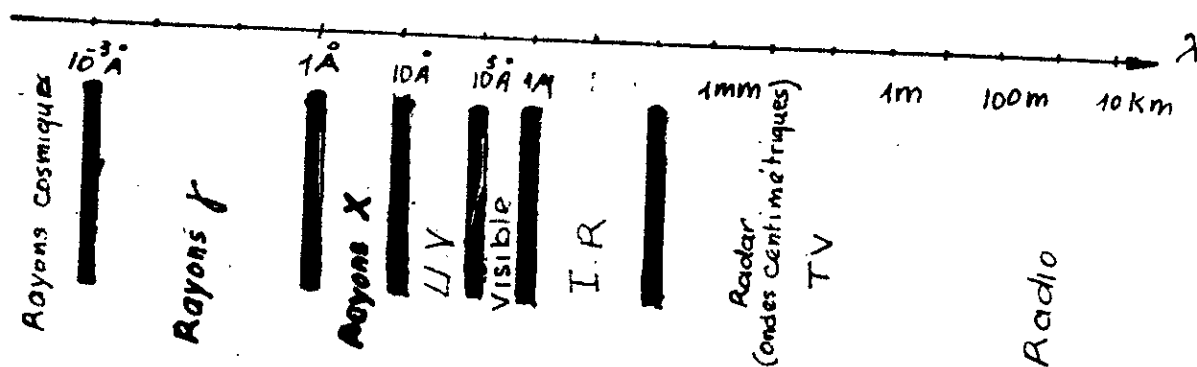
Assemblage	défauts	essais non destructifs
Assemblage boulé bout	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclusions gazeuses et solides</li> <li>- défauts de fusion</li> <li>- défauts de pénétration</li> <li>- fissurations internes</li> <li>- fissurations voisines de la surface</li> <li>- fissurations débouchant en surface</li> <li>- fissurations d'arrachement lamellaires, et défauts situés dans des plans parallèles à la surface des pièces</li> <li>- fissurations dues aux retassures de cratère</li> </ul>	<p>essais radiographiques. essais par ultrasons. essais radiographiques. essais radiographiques ou par ultrasons. essais magnétiques. essais magnétique ou par ressuage essais par ultrasons. essais par ressuage.</p>
assemblage par cordon d'angle.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Défauts de pénétration</li> <li>- Fissurations (pratiquement toujours voisines de la surface)</li> <li>- fissurations dues aux retassures de cratères</li> </ul>	<p>essais radiographiques. essais par ultrasons dans les assemblages en T.E.  essais magnétiques essais par ressuage.</p>

## 6.b.2.2. - essais radiographiques .

65

Dans les essais radiographiques, on fait passer à travers le joint soudé des rayons x ou des rayons gamma et on enregistre les résultats de l'opération sur des films ou sur des écrans de sensibilité convenable.

Ces méthodes de contrôle reposent sur le fait que tout manque de matière d'un cordon ainsi que la présence de toute matière non métallique provoque une très grande transparence vis à vis des rayons x et  $\gamma$ , et se traduisent dans le film photographique par une tache dont les dimensions et l'aspect correspond à ceux des défauts. Les rayons x et  $\gamma$  sont des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est très faible ( $\lambda$ ).



$$\text{Rayons } \gamma \longrightarrow \lambda = 10^{-10} \text{ -- } 10^{-11} \text{ cm}$$

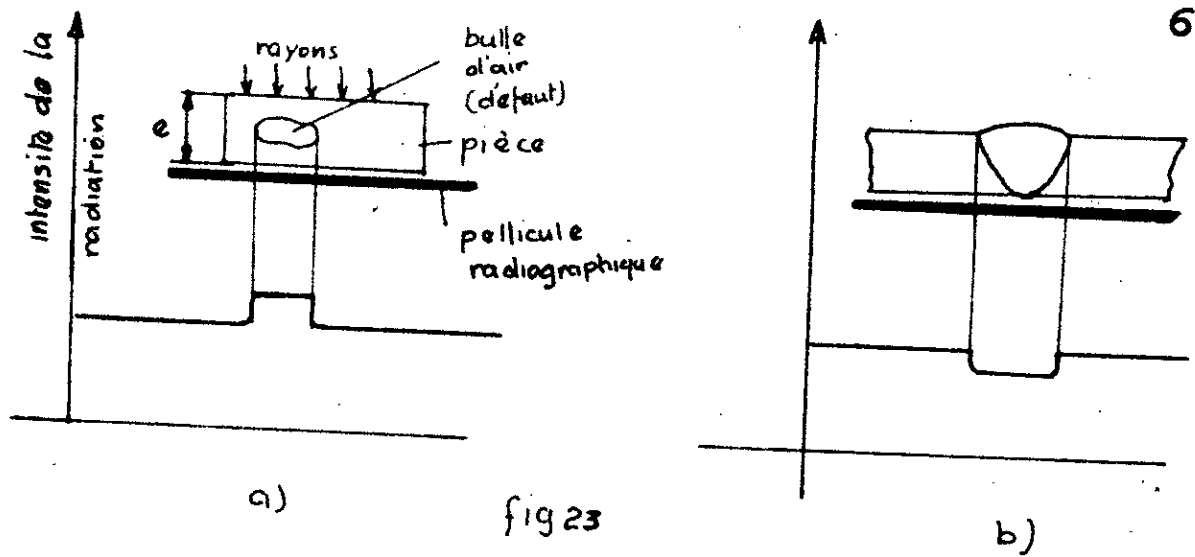
$$\text{Rayons X} \longrightarrow \lambda = 10^{-3} \text{ -- } 10^{-1} \text{ cm}$$

Les très faibles longueurs d'onde conférant aux rayons x et  $\gamma$  les propriétés suivantes :

- 1) de traverser les pores qui sont opaques pour la lumière ordinaire.
- 2) de noircir les émulsions photographiques.

- Lorsque les rayons traversent un matériau homogène, ils sont progressivement absorbés et leur intensité devient réduite.
- L'absorption est d'autant plus forte que l'épaisseur et la densité sont plus grandes

tous les défauts se traduisent par une tache sombre et toutes les surépaisseurs par une tache claire.



La fig 23a montre l'augmentation brusque de l'intensité de la radiation, en présence d'un défaut.

La fig 23b montre la chute brusque de l'intensité de la radiation en présence d'une surépaisseur.

### 6.b.2.3- Essais magnétiques.

Ils permettent de détecter les fissures et les discontinuités des matériaux ferreux et des autres matériaux magnétiques, pour autant que ces défauts soient situés à la surface des pièces ou à une faible profondeur sous cette surface. Ces essais qui peuvent être effectués suivant différentes techniques utilisent un aimant et un produit magnétique en suspension ou non dans un liquide. Dans les applications courantes, la surface à contrôler est enduite d'une peinture claire, sur laquelle on dépose de l'encre ou de la poudre magnétique. Une force magnétique est ensuite appliquée à l'aide d'un aimant dans une direction telle que le plan, dans lequel les défauts ont le plus de chance de se trouver, soit perpendiculaire à la direction initiale du flux. Les défauts dévient le flux magnétique, l'encre ou la poudre magnétique forme sur la surface une image correspondant aux lignes du flux dévié, permettant de localiser les défauts.

### 6.b.2.4- Essais par ressuage.

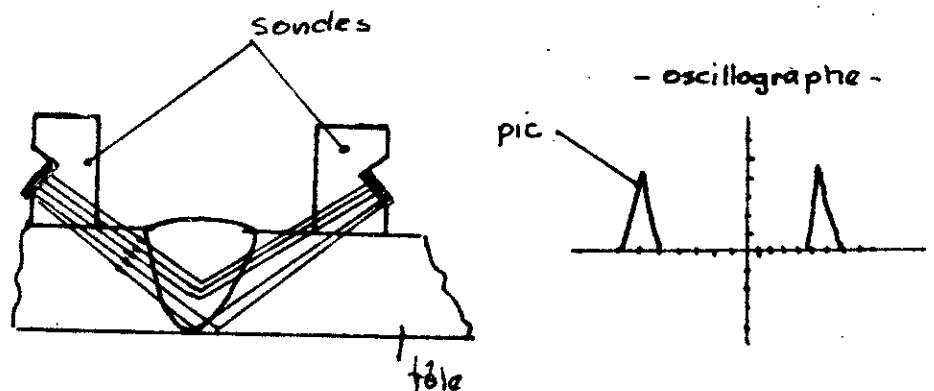
Dans ces essais, les fissures et les cavités débouchant à la surface des pièces peuvent être détectées à l'aide d'un liquide qui est répandu et qui pénètre dans ces défauts. Après enlèvement du liquide en excès, on dépose une poudre absorbante détectrice qui agit comme un buvard. Cette poudre s'imprègne du liquide ressortant des fissures et des cavités et permet ainsi de déceler, par mouillage

la présence et la forme des défauts. On utilise généralement un liquide 67 pénétrant de teinte rouge et une poudre détectrice blanche telle que la craie. Ces essais exigent une préparation particulière des surfaces, avec nettoyage, dégraissage, décapage chimique et sablage, mettant à vif les surfaces; ils ne conviennent pas dans le cas des préparations telles que le meulage, le rabotage et le burinage, qui peuvent boucher les fissures et les cavités en surface, sauf si on procède à une mise à vif énergique des surfaces par sablage.

### 6.625- Essais par Ultra sons.

Dans les essais par ultrasons on fait passer à travers les joints soudés un rayon étroit d'énergie ultrasonore, émis à partir d'un palpeur. Les ondes ultrasonores présentent les mêmes caractéristiques que les ondes acoustiques, mais leurs fréquences sont beaucoup plus élevées. Elles sont produites par le passage des pulsations électriques dans un cristal qui, aux fréquences de résonnance 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/A. Aux variations des propriétés acoustiques du métal des joints soudés, onnes pendent des réflexions partielles ou totales de l'énergie ultrasonore qui est recueillie sous forme d'échos, par un récepteur. Les échos peuvent être mis en évidence sur un tube à rayons cathodiques; ils permettent de détecter les défauts des soudures de même que les variations significatives de la compacité du métal des joints. Suivant les types de palpeurs utilisés on obtient des ondes longitudinales qui vibrent perpendiculairement à cette direction.

fig 24



Si on pose une sonde excitée, sur la surface d'un assemblage soudé, les impulsions mécaniques d'une part se reflètent sur cette surface et retournent à la sonde qui les reconvertit en impulsions électriques, et d'autre part, elles pénètrent dans la tôle et se reflètent sur le fond et passent dans l'autre sonde.



avec la création d'un 2<sup>ème</sup> pic qu'on appelle "écho de fond", c'est une image quand la soudure est de bonne qualité. Si au sein de la soudure, se trouve un défaut quelconque, il donne un pic intermédiaire entre les 2 autres qui sont fixes (voir fig 20).

a) avantages

- équipement compact et portatif
- absence d'interruption des autres travaux pendant le contrôle.
- disponibilités immédiates des résultats des essais.

b) inconvénients

- haute qualification et expérience de l'opérateur pour l'interprétation des résultats d'essai.
- absence d'enregistrement des résultats d'essai.

Après le contrôle de la soudure par un ou quelques uns des essais non destructifs que nous avons cité, le problème reste à savoir si les défauts trouvés seront acceptés ou non. Pour cela, nous allons définir les critères d'acceptabilité des défauts

6-3 Critères d'acceptabilité des défauts :

L'élaboration de critères précis d'acceptabilité des défauts, compte tenu des facteurs qui conditionnent leur importance, a fait l'objet de nombreuses études expérimentales qui ont permis de résoudre un certain nombre de problèmes tels que par exemple celui du choix des aciers, en vue d'éviter les ruptures fragiles.

Ces études ont également permis de préciser l'influence des soufflures gazeuses, des inclusions de laitier et de manques de pénétration sur la résistance en fatigue des joints. Elles ne sont cependant pas encore assez développées actuellement pour permettre d'établir des critères objectifs complets et précis d'acceptabilité des défauts.

Nous nous baserons sur les recommandations de l'institut international de la soudure et envisager 3 niveaux de qualité des joints ou des assemblages.

- Une qualité ordinaire a.
- Une qualité dite bonne b.
- Une qualité spéciale s.

1) qualité «a» :

Elle est admise pour des éléments de construction ou des constructions dans lesquelles le risque de rupture fragile est négligeable, et les conséquences de la ruine, tant au point de vue humain que matériel sans gravité.

En pratique, le risque de rupture fragile est considéré comme négligeable, si les sollicitations sont statiques, si les contraintes de service sont inférieures à  $\sigma_e/3$ , si les températures de service sont les températures ambiantes courantes, et si les épaisseurs des pièces soumises à traction sont inférieures à 10mm.

2) Qualité « b » :

Elle est exigée pour des éléments de construction et des constructions dans lesquelles le risque de rupture fragile est peu important, sans cependant être négligeable ; les conséquences économiques de la ruine peuvent être graves, pour autant que les conséquences au point de vue humain restent sans gravité. Le risque de rupture fragile est considéré comme peu important, si les contraintes de service sont inférieures à  $2/3 \sigma_e$ , si les températures de service sont les températures ambiantes courantes et si les épaisseurs mises en oeuvre sont inférieures à 40mm.

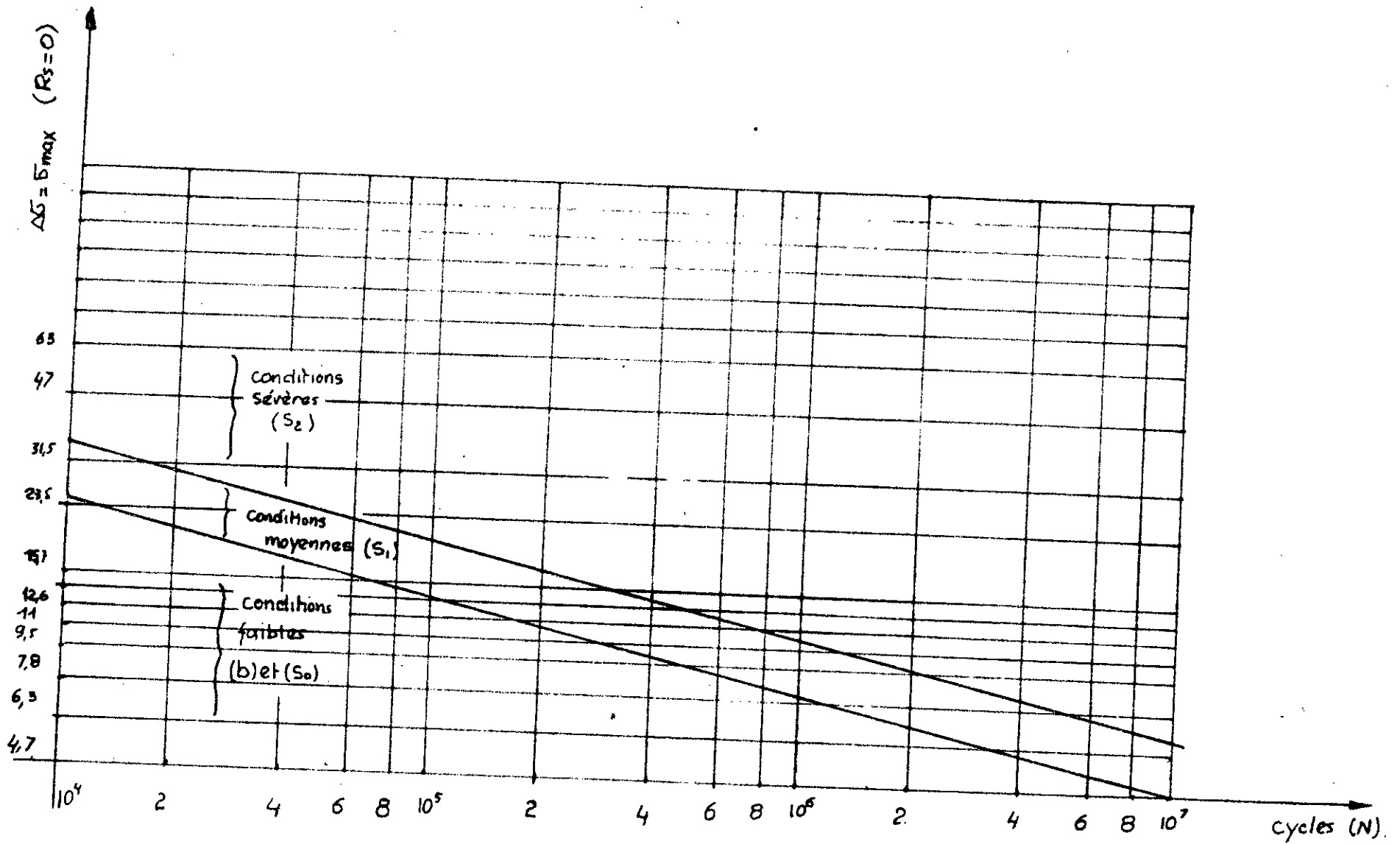
3) Qualité « S » :

Elle est exigée d'une part pour des éléments de construction, et des constructions dans lesquels le risque de rupture fragile est grand, et d'autre part dans les cas où les conséquences humaines ou économiques de la ruine de la construction sont particulièrement graves. Le risque de rupture fragile est considéré comme important si les contraintes de service atteignent ou dépassent  $2/3 \sigma_e$ , si les températures de service sont les températures ambiantes courantes, et si les épaisseurs mises en jeu dépassent 40mm, le risque de rupture fragile peut encore être sensiblement augmenté, si les pièces assemblées ou les joints ont subi des traitements fragilisants, par exemple si le taux d'écroutissage est supérieur à 4% ou bien si la rigidité ou le bridage du joint est particulièrement élevé. Par ailleurs certaines conditions particulières de service peuvent à elles seules justifier l'exigence de la qualité spéciale. Citons par exemple le cas d'un environnement fortement agressif, ou l'exigence d'une étanchéité poussée.

Nous pouvons en fait envisager trois niveaux de qualité spéciale, suivant la sévérité des sollicitations variables.

- la qualité S<sub>0</sub> convient si les sollicitations variables sont faibles.
- la qualité S<sub>1</sub> convient si les sollicitations variables sont moyennes.
- la qualité S<sub>2</sub> convient si les sollicitations variables sont importantes.

On considère généralement 3 niveaux de sévérité des sollicitations variables représentés sur le diagramme fig 22.



- fig 25 -

des Dans un système d'axe portant en ordonnées, la contrainte maximale de calcul  $\sigma_{max}$ , et en abscisse la durée de vie requise  $N$ . Ces trois zones ne sont en fait valables que pour un rapport  $R_3 = 0$ . Elles tiennent compte de la précision avec laquelle on peut mesurer par les moyens de contrôle non destructifs les dimensions des défauts. Dans notre projet nous avons prévu  $N = 10^6$ .

Nota:

- ① = Le pont-roulant travaille en présence d'ouvriers. Sa rupture risque de provoquer des pertes humaines
- ② = Le risque de rupture fragile est considéré comme peu important, car nous supposons que les contraintes de service peuvent atteindre  $\frac{2}{3} \sigma_e = \frac{2}{3} \times 26 = 17,33 \text{ daN/mm}^2$ . Et les épaisseurs mis en jeu sont inférieures à 40mm.

en tenant compte de ① et ②, nous choisissons la qualité "S".

■ D'autre part le déplacement du chariot sur les poutres, engendre des sollicitations variables moyennes. Nous nous limiterons donc à la qualité S<sub>1</sub> de sorte que pour  $N = 10^6$  cycles, la contrainte maximale  $\sigma_{max}$  ne doit pas dépasser  $11,5 \text{ daN/mm}^2$  (voir fig 25).

6-3-1 Défauts admissibles.

6-3-1-1 Introduction.

L'importance des défauts admissibles de chaque type diffère suivant la qualité exigée pour les joints et les assemblages. Chaque méthode de contrôle convient pour mettre en évidence certains types de défauts avec plus ou moins de précision, de sorte que les dimensions limites des défauts doivent être examinées successivement pour chacune des méthodes. Les fissurations à froid, à chaud, ne sont tolérées dans les joints ou dans les assemblages soudés que pour certains cas particuliers. Les fissures peuvent être admises dans les zones comprimées, on considère aussi qu'elles ne présentent pas de danger important, si le plan que les contient est parallèle à la direction des contraintes principales monoaxiales de traction. Les fissurations peuvent aussi être admises dans les zones

Etudes, si la tenacité du matériau est suffisante pour éliminer le risque d'obtention de ruptures fragiles et le danger de développement des fissures sous sollicitations variables.

De nombreuses études expérimentales ont pour but de définir les dimensions des défauts acceptables, mais à l'heure actuelle, on n'est pas encore arrivé à établir à ce sujet des règles précises. Aussi se contente-t-on généralement de donner des indications générales relatives à la possibilité d'accepter des fissurations suivant la qualité exigée des joints.

6.3-1.2 Les inclusions solides.

- Pour la qualité "0" les inclusions solides peuvent être admises, si la diminution de section qu'elles entraînent n'est pas trop grande, pour ne pas abaisser sensiblement la résistance du joint ou de l'assemblage.
- Si la qualité b ou s<sub>0</sub> est exigée, les inclusions solides sont admises quelle que soit leur longueur, pour autant que leur dimension transversale par rapport aux contraintes, mesurée suivant l'épaisseur des pièces assemblées, soit inférieure à 3mm pour des épaisseurs de pièce de l'ordre de 10mm, cette limite augmente jusqu'à 5mm pour des épaisseurs croissant de 10 à 20mm.
- Si la qualité S<sub>1</sub> est exigée, on admet les inclusions de longueur supérieure à une longueur critique L<sub>c</sub>, pour notre cas c'est à dire pour le soudage manuel à l'électrode rutile, L<sub>c</sub> = 10mm et pour le soudage automatique sous flux solide, L<sub>c</sub> = 10mm (voir tableau 14).

tableau 14

procédé de soudage	L <sub>c</sub> (mm)
<u>soudage manuel à l'arc</u>	
- électrode basique →	25
- autres électrodes →	10
<u>Soudage automatique sous flux</u>	
- flux basique →	25
- autre type de flux →	10
<u>Soudage semi automatique sous protection gazeuse.</u>	
- fil fourré basique →	25
- autres fils fourrés. →	10
- fil plein →	10

• Dans le cas de joints ou d'assemblages qui ont subi un recuit de relaxation, la longueur critique des inclusions solides est de 25mm, quelle que soit la nature de l'enrobage.

• Si la qualité  $S_2$  est exigée, les inclusions solides, les inclusions solides de moins de 5mm de longueur sont admises, si le flux ou l'enrobage est de nature basique. Pour les autres enrobages, ou flux cette limite est de 2mm.

### 6.3.1.3 Les inclusions gazeuses.

• Pour les qualités  $a$ ,  $b$  et  $S_0$ , des joint ou des assemblages et si l'étanchéité n'est pas nécessaire, les inclusions gazeuses sphéroïdales sont admises.

• Si la qualité  $S_1$  ou  $S_2$  sont exigées, les inclusions gazeuses sphéroïdales sont admises si leur concentration en surface est inférieure ou égale à 3% dans le cas d'inclusions isolées et à 2% dans le cas d'inclusions groupées.

La concentration en surface est le quotient exprimé en % de la surface totale des inclusions repérées sur films radiographique, par la section longitudinale du joint correspondant à une longueur de 150mm arbitrairement choisie.

Les inclusions gazeuses se présentant sous forme de soufflures vermiculaires, sont admises dans les mêmes conditions que les inclusions solides et si elles ne compromettent pas l'étanchéité de la construction lorsque celle-ci est exigée.

### 6.3.1.4 Les manques de pénétration.

Pour les assemblages bout à bout, les hauteurs  $h$  des manques de pénétration généralement admis sont donnés sur les diagrammes ci-dessous. Ces diagrammes sont valables quelle que soit la longueur du manque de pénétration.

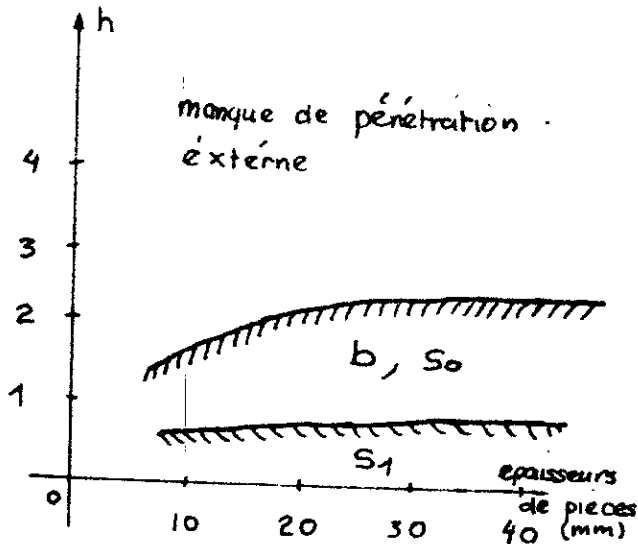


fig 26

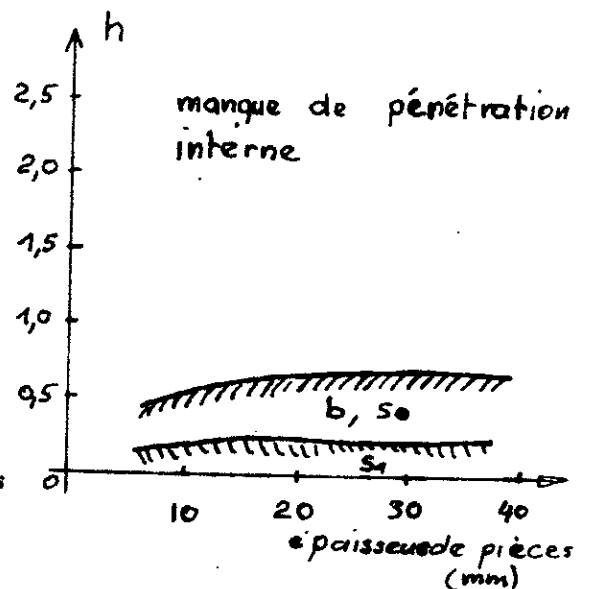


fig 27

• Si la qualité  $a'$  suffit, les dimensions  $h$  ne sont pas limitées. Pour des manques de pénétration dont la longueur est sensiblement égale à la hauteur  $h$ , les valeurs admises peuvent être multipliées par 3 pour les qualités  $b$  et  $S_0$ , et par 5 pour la qualité  $S_1$ . Dans le cas où ces manques de pénétration sont internes, les valeurs peuvent être multipliées par 1,5 pour les qualités  $b$  et  $S_0$  et par 2,5 pour la qualité  $S_1$ , dans le cas où ces manques de pénétration débouchent en surface.

Pour les assemblages par cordons d'angle, les manques de pénétration ne peuvent se mesurer que sur des coupes macrographiques. Ces manques de pénétration sont mesurés par les valeurs de  $m_1$  et  $m_2$ . voir fig ci après. Ces manques de liaisons  $m_1$  et  $m_2$

interviennent comme facteurs réducteurs de la gorge du cordon et donc de sa résistance statique.

• pour le soudage manuel à l'arc on admet les valeurs maximales  $m_1$ ,  $m_2$  et  $J$  suivant le tableau 15.

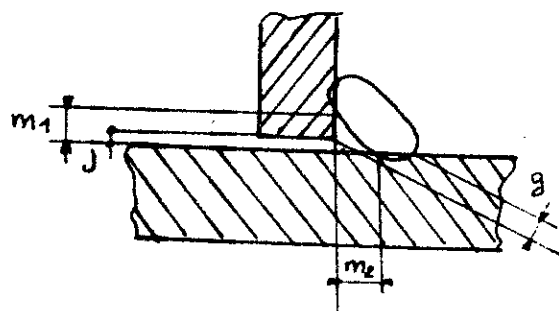


tableau 15

qualités	$m_1$	$m_2$	$J$ (mm)
• $b$ • $S_0$	$g/2$ ; maximum = 2mm	$g/2$ ; maximum = 2mm	$\frac{e}{20} + 1$
• $S_1$ • $S_2$	0	0	maximum = 4

• Pour le soudage automatique sous flux, aucun manque de pénétration n'est accepté.

Il existe aussi dans le domaine du soudage, les essais mécaniques. leur négligence peut compromettre la résistance de la construction soudée.

### 6.3.15 Les essais mécaniques:

Ils ont pour but de s'assurer que l'assemblage a conservé, après soudage, des caractéristiques mécaniques compatibles avec les conditions de service auxquelles il sera soumis. Les essais indiqués par la plupart des normes sont les essais de traction transversale, les mesures de dureté du métal déposé et de la zone thermiquement affectée, les pliages à l'endroit et à

l'énvers, ainsi que les plis sur tranche, les essais de résilience, les essais de fractures, et les examens micrographiques sur coupes transversales : nous nous intéresserons seulement aux 3 essais suivants : de fracture, de résilience, et de traction.

1- L'essai de fracture est préconisé pour les assemblages par cordons d'angle. Cet essai remplace les examens radiographiques destinés à déterminer les dimensions des inclusions, étant donné les difficultés d'interprétation des radiographies de cordons d'angle. On se base sur le rapport  $A/s$ , entre la surface totale  $A$  des inclusions gazeuses et solides, relevées sur la section de rupture, et la surface  $s$  de cette section. L'assemblage est considéré comme valable, si le rapport  $A/s$  est inférieur ou égal aux valeurs données dans le tableau 16

tableau 16

qualités	$A/s$ en %
b; S <sub>0</sub>	—
S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub>	2

2- Pour la résilience du métal déposé et de la zone thermiquement affectée, il faut que la valeur moyenne de la résilience Charpy V, obtenue à partir de 4 essais, soit supérieure à 35 J/cm<sup>2</sup> pour les températures indiquées dans le tableau 17

tableau 17

qualités	température (°C)
b	0
S <sub>0</sub> ; S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub>	-20

3- Dans l'essai de traction transversale à la soudure, la résistance à la rupture de l'assemblage doit être au moins égale à la résistance à la rupture minimale garantie du métal de base, c'est à dire 42 daN/mm<sup>2</sup>.

#### Nota:

D'après les conditions de fonctionnement des poutres (voir chapitre II), nous remarquons que les essais mécaniques ne sont pas tous nécessaires au bon fonctionnement du pont roulant. Nous exécuterons seulement les essais de traction transversale, de fracture et de résilience. Ces essais s'effectueront sur une seule poutre avant de lancer la production en série.

#### Choix de l'appareil de contrôle de la soudure :

Nous choisirons l'essai par ultra-sons, d'après les recommandations données au tableau 12 (page 63).

En ce qui concerne la longueur pratique qu'il faudra contrôler, elle ne doit être ni trop grande, sinon son contrôle prendra beaucoup de temps; ni faible autrement la probabilité de trouver les défauts (si ceux-ci existent effectivement) sera petite, et la résistance du pont-roulant ne sera pas garantie.

La longueur convenable à contrôler, doit donc être égale à 20% de la longueur totale du cordon de soudure.



Nous utiliserons l'appareil LSMZ ( nous avons trouvé ce type d'appareil dans un catalogue. )

#### ses données techniques.

fréquences :  $0,5 \div 12$  MHz ( pour notre acier A42T3ES, la fréquence est égale à 2 MHz, cette valeur appartient à l'intervalle imposé ).

domaine de contrôle : 10 mm à 5 m.

#### Dimensions :

longueur = 250 mm

Longueur = 350 mm

hauteur = 145 mm

poids : 5,8 Kg, Y compris le bloc batterie.

### 6-4 machine pour le découpage des tôles :

Il existe plusieurs moyens permettant le découpage des tôles, les principaux sont :

#### 6.4.1 le cisailage.

Il présente l'inconvénient de conduire à des bords de coupe irréguliers et de donner lieu à un écrouissage et à une microfissuration superficielle. Aussi avant soudage, on rabote les bords des pièces sur une profondeur de l'ordre de 3 à 4 mm. Dans le cas de l'acier doux, le rabotage ne s'effectue que pour des épaisseurs de pièces supérieures à 10 mm. Pour des épaisseurs comprises entre 7 et 10 mm, un simple meulage suffit, tandis que pour des épaisseurs inférieures à 7 mm, aucune préparation n'est nécessaire.

#### 6.4.2 le sciage.

Le sciage des pièces ne présente aucun inconvénient particulier, les bords sciés pouvant être soudés sans préparation ultérieure. Cependant l'intérêt de ce procédé est limité, étant donné qu'il ne permet pas de réaliser directement les chanfreins qui sont souvent nécessaires.

L'oxycoupage est un procédé de découpage du fer et de l'acier par combustion localisée du fer sous un jet d'oxygène. L'oxydation vive du fer a été mise en évidence par l'expérience désormais classique de LAVOISIER ; si nous plongeons dans un bocal rempli d'oxygène un fil de fer dont l'extrémité a été portée au rouge, l'oxydation commence en ce point. L'oxyde ainsi formé a une température de fusion inférieure à celle du fer, il s'écoule donc en laissant à nu, l'extrémité du fil de fer. La chaleur dégagée par la combustion est assez grande pour porter au rouge cette extrémité qui à son tour s'oxyde et ainsi de suite jusqu'à combustion complète. Seuls les métaux ou alliages dont la température de fusion est supérieure à celle de leur oxyde présentent cette propriété. Le phénomène est donc limité au fer et aux aciers peu carburés, et il n'est déclenché que si un point du métal est porté à plus de  $1350^{\circ}\text{C}$ . Cependant le procédé a été étendu au coupage d'autres métaux, tels que la fonte et les aciers inoxydables grâce à l'intervention de flux facilitant l'élimination de l'oxyde réfractaire.

La régularité de la coupe dépend de la régularité du déplacement du chalumeau coupeur que seule l'automatisation permet d'assurer. Dans le cas où les faces de la saignée sont lisses aucune précaution particulière n'est à prendre avant soudage, si ce n'est l'élimination par brossage, de la couche d'oxyde non adhérente, inhérente au procédé. La composition du métal des pièces à découper joue un rôle important dans la mise en œuvre pratique de l'oxycoupage. Dans le cas de l'acier doux, aucune précaution particulière n'est nécessaire. Pour les aciers alliés, l'oxycoupage reste possible, sans précaution particulière, si la teneur des différents éléments d'alliage soit inférieure à certaines limites (voir tableau 10). Les teneurs en soufre et en phosphore, que l'on rencontre habituellement dans les aciers, sont sans influence sur l'oxycoupage.

tableau 10

éléments d'alliage	oxycoupage possible sans précaution particulière	oxycoupage impossible par la technique habituelle
Carbone	$[C] \leq 0,5\%$	$[C] > 1,9\%$
Silicium	$[Si] \leq 4\%$ avec $[C] \leq 0,2\%$	—
Manganèse	$[Mn] \leq 13\%$	—
Chrome	$[Cr] \leq 0,5\%$	$[Cr] > 5\%$
Nickel	$[Ni] \leq 35\%$ avec $[C] \leq 0,3\%$	—
Aluminium	$[Al] \leq 6\%$	$[Al] > 6\%$
Tungstène	$[W] \leq 10\%$ avec $[C] \leq 0,2\%$ et $[Cr] \leq 5\%$	$[W] > 20\%$

Pour les teneurs en carbone comprises entre 0,5 et 1,5%, l'oxycoupage reste possible par la technique habituelle, pour autant que la pièce soit préchauffée.

## 6.4.4 Découpage au plasma d'arc.

### 6.4.4.1 introduction

a) Composition du plasma d'arc : Un arc est une décharge électrique entre 2 électrodes qui apparaît dans une atmosphère gazeuse ionisée appelée plasma. Avec des électrodes de fer, le potentiel d'ionisation du plasma est de l'ordre de 9 volts, alors que ceux de l'air et du fer sont respectivement de 15 et 7,83 volts. Le plasma est dans ce cas formé presque exclusivement de vapeur de fer ionisé. Avec des électrodes réfractaires, le potentiel d'ionisation est de l'ordre de 15 volts, de sorte que le plasma est formé que d'air ionisé.

### b) température du plasma d'arc.

Elle peut être déterminée par la vitesse du son dans le plasma d'arc, les résultats obtenus par cette méthode, montrent que la température absolue du plasma est de l'ordre de  $5500^{\circ}\text{K}$  (ou  $5227^{\circ}\text{C}$ ) dans le cas des électrodes au graphite et  $6000^{\circ}\text{K}$  (ou  $5727^{\circ}\text{C}$ ) dans celui des électrodes enrobées, et de  $6500^{\circ}\text{K}$  (ou  $6227^{\circ}\text{C}$ ) dans celui des électrodes en tungstène.

### c) arc électrique confiné.

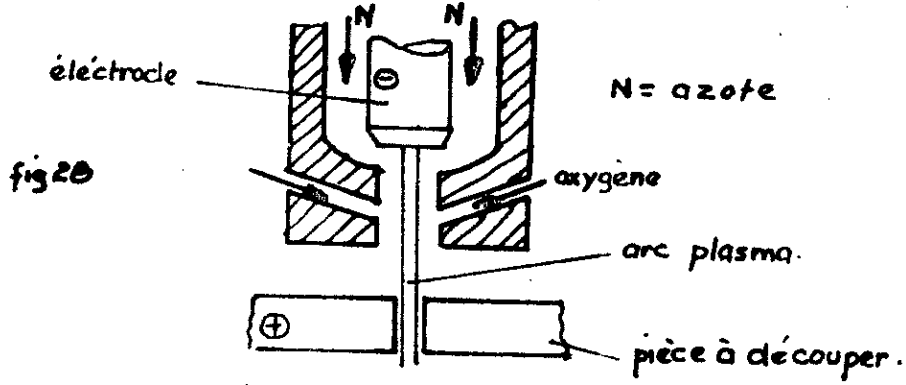
Les échanges calorifiques par convection entre l'arc et le milieu ambiant influencent la forme de la colonne. Si cette colonne est soumise à une convection forcée, elle subit un étranglement et un accroissement de température, l'arc est alors dit confiné.

Si par exemple on entoure la colonne par un tube annulaire en cuivre refroidi à l'eau, on obtient un arc confiné dont la température peut atteindre  $50000^{\circ}\text{K}$  pour une densité de courant de  $200\text{ A/mm}^2$ . Ces valeurs très élevées permettent le soudage à grandes vitesses et le découpage de matériaux difficilement découposables par les procédés classiques.

### d) principe du procédé

En faisant jaillir un arc confiné entre une électrode en tungstène et la pièce à découper, on obtient des températures élevées qui permettent la fusion d'une zone très localisée de la pièce. Le jet de plasma, qui est projeté à grande vitesse, chasse le métal de la zone fondue, et permet le découpage par déplacement continu de l'arc. Ce procédé dit à l'arc plasma, est utilisable pour le découpage de tous les matériaux. En pratique l'épaisseur

maximale des pièces découpées varie avec les métaux et ne dépasse pas 50mm dans le cas de l'acier. Les gaz plasma magènes les plus utilisés sont respectivement l'azote, pour les aciers au carbone, l'azote ou un mélange argon hydrogene pour l'aluminium et ses alliages. Dans le cas des aciers au carbone, on ajoute de l'oxygène, pur sous pression à la sortie de la tuyère afin d'augmenter la vitesse de coupe. On combine alors les hautes températures de l'arc plasma avec la réaction exothermique de combustion de l'acier dans l'oxygène. Le découpage au plasma se caractérise par une grande vitesse de coupe et par la faible étendue des zones métallurgiquement affectées de part et d'autre de la saignée.



6.4.4.2 Choix du procédé de découpage

- Le cisailage présente l'inconvénient de concluire des bords de coupe irréguliers nous refusons donc son emploi.
- Le sciage ne permet pas de réaliser les chanfreins, ces derniers ne sont pas prévus dans notre projet, mais nous refusons l'emploi du sciage à cause de sa faible productivité comparée à celle du procédé au plasma d'arc.
- L'oxycoupage produit une zone thermiquement affectée, plus large que celle produite par le procédé au plasma d'arc.

Nous adopterons donc le procédé au plasma d'arc pour sa plus grande vitesse de coupe, et pour la faible zone affectée.

caractéristiques de l'appareil employé :

Nous choisirons la machine à découper au plasma d'arc, de type LPR 201.

tension d'alimentation	.....	380, 400, 415 volts
tension à vide	.....	180 volts.
Intensités	.....	150 ÷ 200 Ampères

Gaz plasmagène ..... air  
 Pression de l'air ..... 3,5 ÷ 4,5 kgf/cm<sup>2</sup>  
 épaisseurs découpées possibles: ..... jusqu'à 40mm (aciers et alliages ferreux).  
 Débit ..... 14 l/s (50 m<sup>3</sup>/h).  
 Dimensions ..... 1065 x 816 x 940 [mm]

### 6-5 Machine pour le pliage de la tôle:

L'opération de pliage des tôles peut conduire à un écrouissage trop important et à l'apparition de fissures. Dans le cas des tôles en acier doux, il faut pour éviter ces inconvénients respecter les conditions suivantes.

• Pour des épaisseurs inférieures ou égales à 10mm nous avons le tableau suivant:

$e \leq 3 \text{ mm}$	$r/e \geq 1$
$3 < e \leq 8 \text{ mm}$	$r/e \geq 1 + \frac{e-3}{4}$
$8 < e \leq 10 \text{ mm}$	$r/e \geq 2$

- Pour des épaisseurs supérieures à 10mm et des valeurs du rapport  $r/e$  de l'ordre de 2, le pliage doit être exécuté à chaud.
- Si les valeurs du rapport  $r/e$  sont supérieures à 2, le pliage peut être exécuté à froid, mais il doit être suivi d'un traitement de normalisation ou d'un recuit de détente.

► Dans notre cas, nous effectuerons le pliage sans tenir compte des conditions ci-dessus, car l'angle engendré par le pliage n'est pas très grand.

Nous choisirons comme machine, la presse plieuse de marque SACMA de modèle T2-25

Épaisseurs possibles de la tôle ..... 20 ÷ 25 mm  
 longueur utile de pliage ..... 2025 mm.  
 largeur de la table ..... 130 mm  
 course du coulisseau ..... 50 mm  
 Cycles normaux par minute (N) ..... 35  
 cycles à vitesse réduite (N) ..... 10  
 Puissance du moteur principal ..... 3 CV  
 Poids approximatif de la machine ..... 3000 Kg.

## 6-6 Machine pour l'assemblage des tôles :

Pour effectuer le pointage des soudures, (bridage ams-semelles), il est indispensable de commencer par placer et maintenir convenablement les éléments de l'assemblage. Pour cela, nous utiliserons la machine de type **BMTUT 21 MAL** (voir fig 29).

### caractéristiques de la machine.

Longueur .....	16450 mm
largeur .....	4300 mm
hauteur .....	1750 mm
pois de la machine .....	13,8 tonnes.
longueur de poutre possibles .....	jusqu'à 15m
hauteur de poutre possible .....	jusqu'à 2m.
largeur de semelle, possible .....	jusqu'à 600mm
épaisseur de semelle possible .....	jusqu'à 50mm.
vitesse de déplacement de la machine .....	$V = 36 \text{ m/min.}$
efforts des cylindres pneumatiques verticaux .....	2,5 tonnes.
efforts des cylindres pneumatiques horizontaux .....	5 tonnes.

## 6-7 Machine pour positionner les tôles.

Pour effectuer le soudage automatique, nous devons prévoir un système qui permet le retournement des poutres. A cet effet, nous emploierons la machine " positionneur de type **K II]] - 16** (voir fig 30)

### caractéristiques de la machine

pois de la machine :	30,4 tonnes.
L :	6500 mm
l :	1530 mm
h :	1600 mm
a :	6000 mm
b :	3000 mm

installation d'assemblage de marque

ВМТУТЯ ± МАЛ

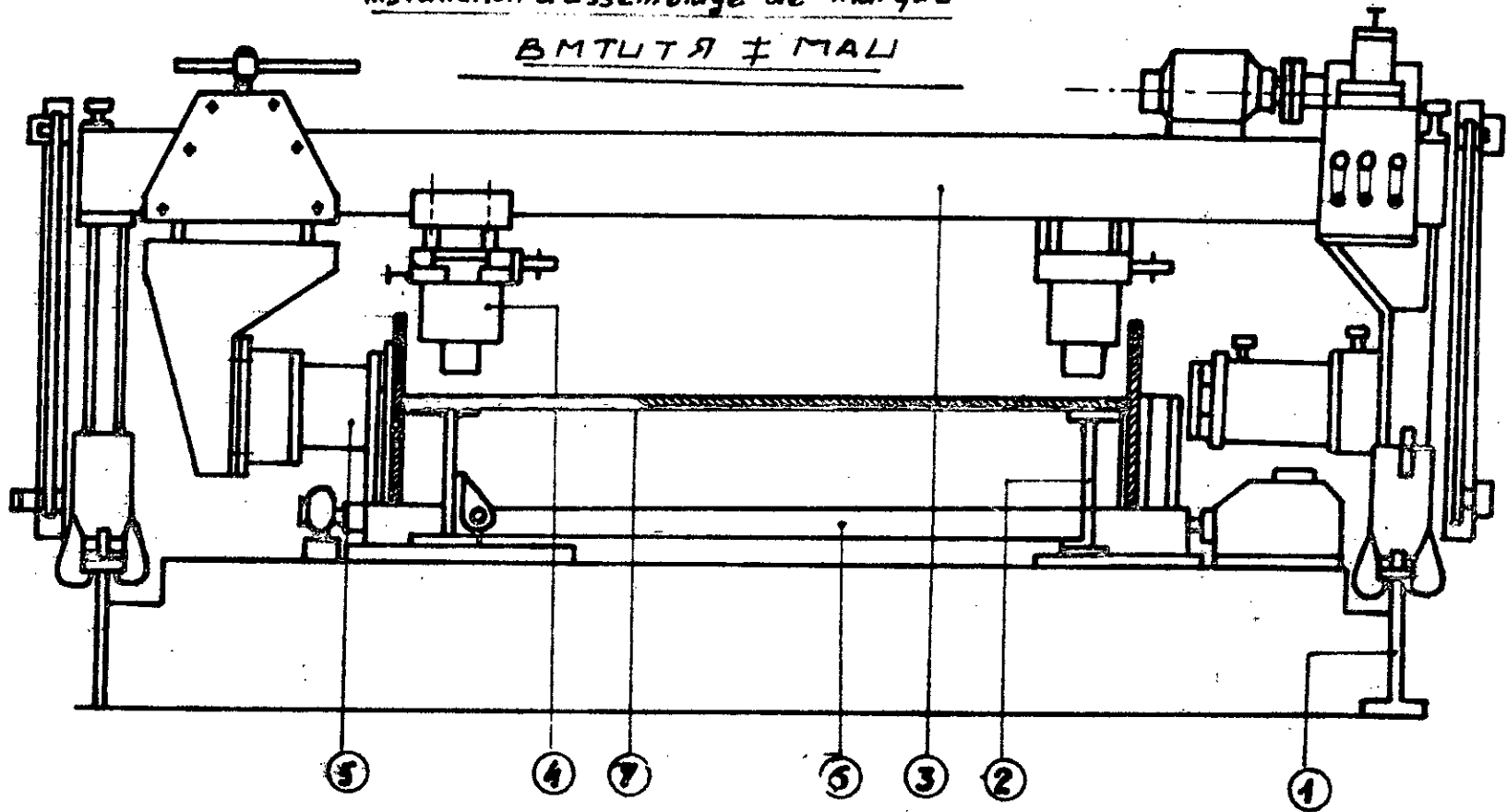
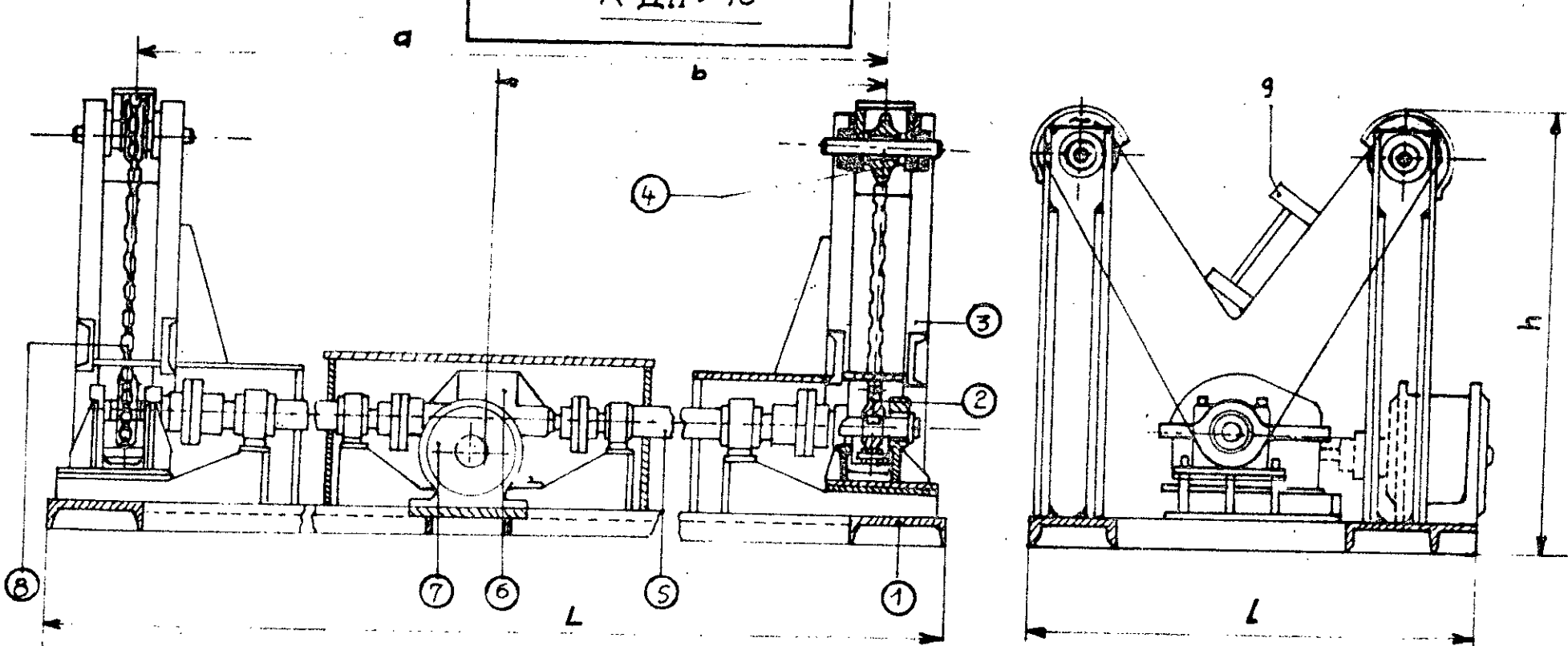


fig 29

1	cadre (ensemble soude' avec chemin de fer)
2	poutre de support.
3	portique autopropulsé
4	cylindres pneumatiques verticaux
5	cylindres pneumatiques horizontaux
6	barre pour réglage des supports
7	tôles à assembler

positionneur de type

K ДИИ - 16



- fig 30 -

1	bati
2	poulie motrice
3	potEAU
4	poulie folle
5	arbre
6	reducteur
7	moteur
8	chaine
9	pièce



## Conclusion

Dans cette étude, nous avons insisté sur la partie soudage. Les cordons de soudure constituent la zone la plus vulnérable de la construction.

Les risques engendrés par la rupture accidentelle du pont roulant sont grands, c'est pour cette raison, particulièrement, que nous avons attribué la qualité "S" spéciale aux soudures.

Dans le souci d'augmenter encore la résistance de la construction, nous appliquerons rigoureusement les consignes suivantes:

- Le soudage manuel doit être effectué par des techniciens soudeurs de haute compétence
- Eviter de souder dans un courant d'air, ce dernier peut modifier la température du milieu ambiant, par suite la vitesse de refroidissement des cordons de soudure
- Renouveler chaque semestre les trois essais mécaniques, cités au paragraphe (6.3.15); sur une seule poutre puis lancer la nouvelle série

## Bibliographie

- [ 1 ] Manuel pratique du soudage à l'arc . L. MENDEL.
- [ 2 ] Constructions métalliques rivées et soudées . tome 2 . G. KIENERT  
7<sup>e</sup> édition mise à jour Editions EYROLLES . 1967.
- [ 3 ] Les procédés de soudage . P. T. HOULDCROFT . DUNOD Paris 1971.
- [ 4 ] Applications du soudage aux constructions R. BAUS ; W. CHAPEAU.  
Edition EYROLLES.
- [ 5 ] Matériaux de construction mécaniques et électriques . G. LEMASSON,  
et L. BLAIN.
- [ 6 ] Cours magistral de TE3 . Mr. BARDOKINE . E.
- [ 7 ] Cours magistral de CM4 . Mr. IVAN.
- [ 8 ] Cours magistral de soudage . Mr. CHALIMOV
- [ 9 ] Eléments de construction tome 8 . " Appareils de levage et de manuten-  
tion " G. LEMASSON , TOURANCHEAU
- [ 10 ] Eléments de machine V. DOBROVOLSKI Edition MIR Moscou 1971
- [ 11 ] Revue C. y. commercy , soudage des aciers de construction , électrodes .
- [ 12 ] Revue commercy Soudure .
- [ 13 ] Métallographie et traitements thermiques des métaux .  
I. LAKHTINE . Editions mir.

	DESIGNATION	SCHEMAS	OUTILLAGE	PHASE	OPER	DESIGNATION	SCHEMAS	OUTILLAGE
I Planage	1 Planage des tôles 160x20x12000 Lmax 740x10x12000 200x8x9000		Planeuse à cylindres SP4-170	VI Contrôle	1	contrôle sur 20% de la longueur		
	1 Réalisation des gabarits sur tôle de épaisseur 3mm Gabarits raidisseurs		- table - pointe à tracer et trusquin - machine à découper au plasma d'arc UPR201				VII Pointage	1
II Découpage	2 Gabarit (âme)			2	Rotation, pointage, du côté B			
	3 Pointage, soudage des raidisseurs "a" du côté A		- table - machine à découper au plasma d'arc UPR201 - poinçonneuse - machine à souder au plasma d'arc UPR201	3	Pointage des raidisseurs "b" du côté B			
III Pointage	4 Pointage, soudage des raidisseurs "b" du côté B			4	Rotation, pointage, du côté A			
	5 Pointage, soudage des raidisseurs "c" du côté A			5	Pointage des raidisseurs "c" du côté B			
IV Soudage	6 Rotation, soudage, du côté B			6	Rotation, soudage, du côté A			
	1 Soudage des raidisseurs "a" du côté A			VIII Soudage	1	Soudage des raidisseurs "a" du côté A		
2 Rotation, soudage, du côté B		- Machine de marque B. M. TUTTA & MAU - Pointage avec transformateur 1350	2		Rotation, soudage, du côté "B"			
V Pointage	3 Retournement puis pointage des semelles avec l'âme côté B				3	Soudage des raidisseurs "b" côté B		
	4 Retournement puis pointage des semelles avec l'âme côté A				4	Rotation, soudage du côté A		
VI Soudage	1 Réalisation du cordon 1 position en gâchette				5	Soudage des raidisseurs "c" côté A		
	2 Rotation puis réalisation du cordon 3				6	Rotation, soudage, du côté B		
	3 Retournement réalisation du cordon 2		- Positionneur de type K. I. N. - 16 - poste de soudage type 17M-13 (soudage automatique)					
	4 Rotation puis réalisation du cordon 4							

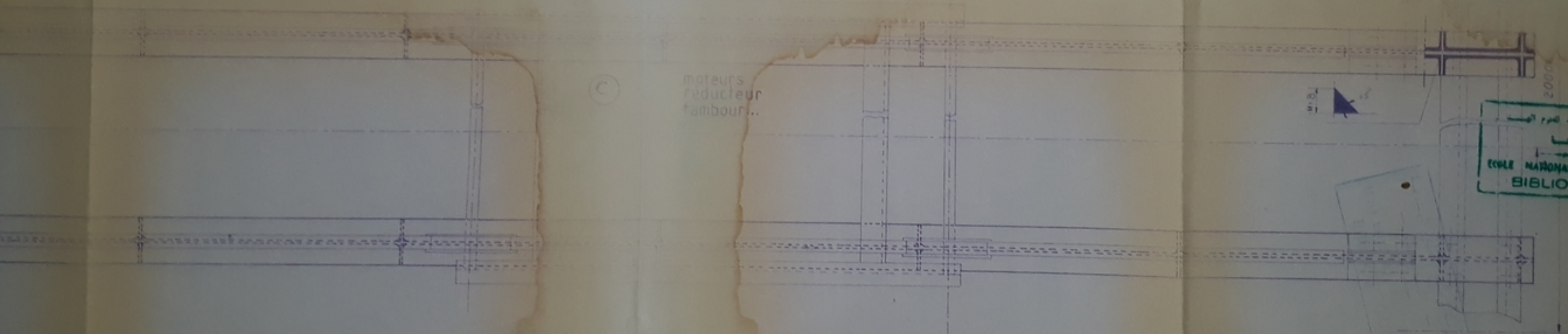
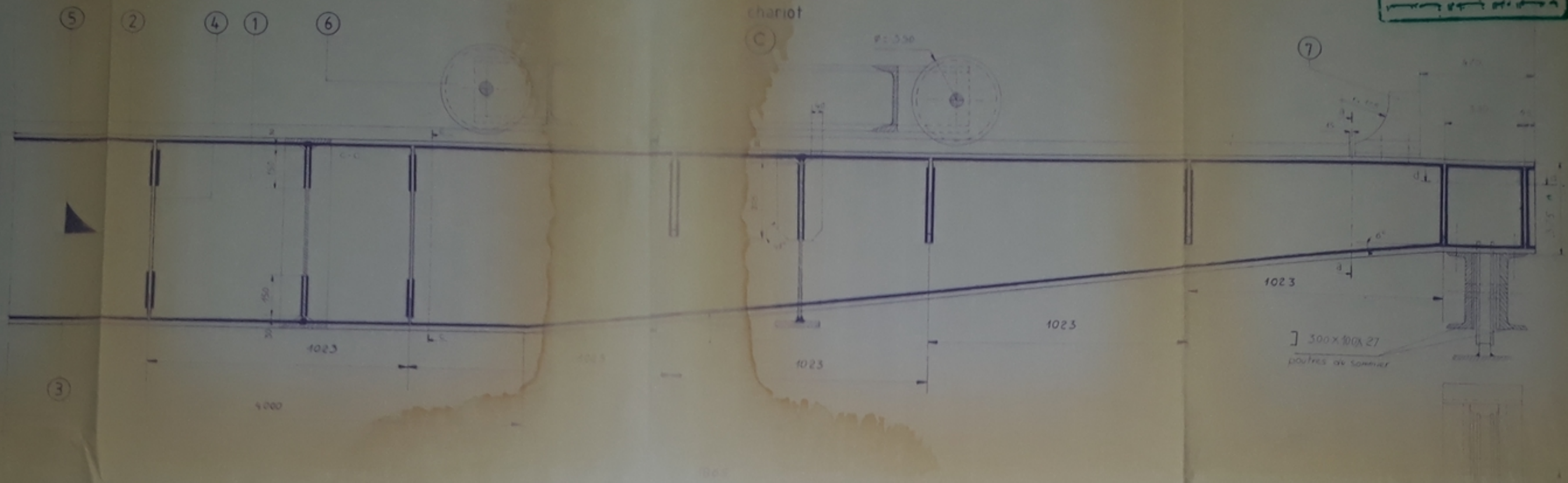
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

PM00381  
-A-

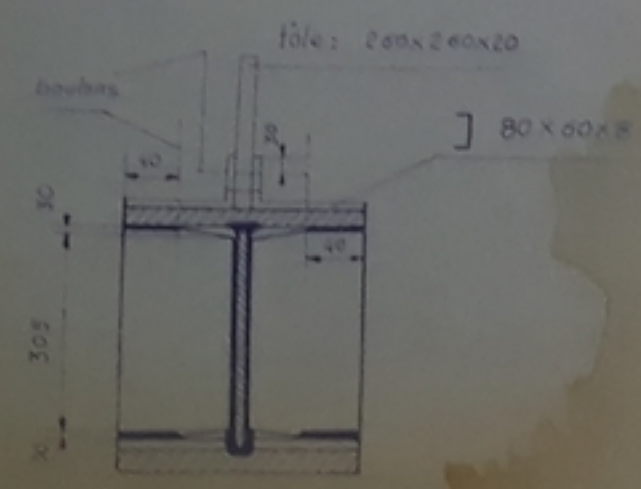
Proposé Par: E. BARDOKINE  
Etudié Par: A. DJEMANE  
GAMME DE FABRICATION

ENPA

BIBLIOTHEQUE  
 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



coupe suivant a-a



الجامعة التونسية  
 المكتبة  
 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
 BIBLIOTHEQUE

PM0038A  
 -2-

Rp	Nb	DESIGNATION	DIMENSIONS
7	4	butée	200 x 200
6	4	galef	420 x 420
5	2	rail	100 x 100
4	28	raidisseur d'ame	70 x 70
3	1	semelle inférieure	120 x 120
2	1	semelle supérieure	120 x 120
1	1	ame	120 x 120

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
 Proposé par: E. BARDOUINE  
 Dessiné par: A. DIENNAI  
 DEMI-VUES DES  
 POUTRES EN  
 DOUBLE

