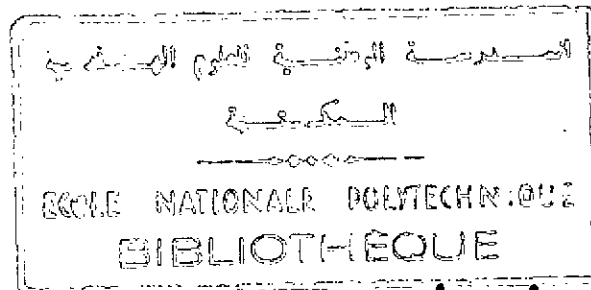


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

département de génie-mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES



Atelier de fabrication de poutres de section rectangulaire

Proposé par: E. BARDOKINE

Maitre de conférence à l'ENPA.

Etudié et présenté par: M. MEZGHICHE

Promotion: janvier 1981

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

département de génie-mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Atelier de fabrication de poutres de section rectangulaire

Proposé par: E. BARDOKINE

Maitre de conférence à l'ENPA.

Etudié et présenté par: M. MEZGHICHE

Promotion: janvier 1981

REMERCIEMENTS

Mes remerciements à Monsieur E. BARDOKINE, maître de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui n'a cessé tout au long de mon travail, de consentir de grands efforts pour m'assurer le meilleur encadrement. Aussi, voudrai-je qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Mes remerciements à Messieurs les professeurs au Département de Génie-Mécanique qui ont donné de leur mieux pour ma formation.

Je tiens à remercier vivement M^{elle} D. KAMEL qui a gentille-ment consentie à me faire "la frappe" de ce présent document. Je l'assure de ma respectueuse amitié.

Je remercie tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Mohamed MEZGHICHE

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

Il existe bon nombre de modes de soudages qui ne diffèrent que par les sources d'énergie :

Chimique (au gaz et l'oxygaz), chimico-mécanique (par forgeage et aluminothermique), électrochimique (à l'hydrogène atomique), électromécanique (par résistance), et électrique (à l'arc).

Les modes de soudage les plus appliqués en construction mécanique sont les soudages électromécanique et électrique mais, dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons au mode de soudage à l'arc électrique que nous décrivons en détail un peu plus loin.

Le soudage électrique (à l'arc) permet de fabriquer les pièces les plus variées. Pour fixer les idées, citons les avantages de ce mode de fabrication (soudage).

- Avantages des constructions soudées sur les constructions rivées ou moulées :

Lors de l'exécution des assemblages permanents, les soudures présentent plusieurs avantages sur ceux exécutés par rivage.

- L'économie du métal :

a)- une meilleure utilisation de celui-ci en l'absence des trous qui affaiblissent les sections sollicitées,

b)- un poids plus faible des éléments d'assemblage :

le poids des cordons de soudures constitué de 1 à 1,5% de celui de la construction, alors que celui des rivets est de 3,5 à 4% environ,

c)- une large utilisation de joint en bout rendant inutiles les éléments secondaires sous forme de couvre-joints,

d)- le gain du poids enregistré dans le cas d'une soudure par rapport à une rivure varie de 10 à 20%.

- La diminution de la quantité de travail :

En effet, les opérations de traçage, de poinçonnage et de perçage des trous n'ont pas lieu, l'utilisation du soudage au lieu du moulage diminue le déchet du métal, les surépaisseurs d'usinage étant réduites d'une part et d'autre part, il est possible d'imposer aux pièces moulées des sections plus petites, car l'épaisseur des parois des pièces moulées est généralement deux fois et plus supérieure à celle des pièces soudées.

Le soudage est un mode de fabrication qui dans de nombreux cas est automatisé et devient par suite très productif.

Les aciers que nous allons utiliser pour la fabrication des poutres sont des aciers faiblement alliés au manganésé. Ils sont caractérisés par leurs limites d'élasticité élevées qui est essentiellement due à l'action du manganésé (0,9 à 1,5%) et par leur bonne soudabilité. Les aciers à limite d'élasticité élevée trouvent une large application dans les constructions pour lesquelles l'économie du poids présente un grand intérêt comme par exemple les conduites forcées, les récipients à pression diverses structures de charpenterie, les constructions navales, le matériel de chemin de fer etc...

*

*

*

PREMIER CHAPITRE

PREMIER CHAPITRE

I) ETUDE DES PHENOMENES THERMIQUES :

Au point de vue thermique, un arc électrique est assimilé à une source ponctuelle de chaleur mobile qui peut être remplacée par une série de sources ponctuelles instantanées, placées les unes à la suite des autres, le long de la trajectoire de la source mobile.

1°) Répartitions thermiques dans les assemblages soudés

Dans le cas du soudage à l'arc électrique, la propagation de la chaleur comporte la succession de trois étapes :

- une étape de saturation calorifique pendant laquelle la répartition thermique suit une fonction croissante du temps.
- une étape dite "quasi-stationnaire" pendant laquelle la répartition thermique ne dépend plus du temps.
- une étape dite "d'homogénéisation des températures" pendant laquelle les températures s'uniformisent dans les pièces après soudage.

2°) Régimes thermiques dans les assemblages soudés.

Le régime thermique peut affecter les caractéristiques physico-chimiques et chimiques des matériaux des assemblages. Ces régimes thermiques ou "cycles thermiques" sont donc des traitements thermiques dont dépend la structure micrographique finale de divers points situés à proximité du joint.

Les cycles thermiques dépendent essentiellement des facteurs suivants :

- position et distance du point considéré par rapport à la ligne de soudure.
- procédé de soudage.
- épaisseur des pièces et type de joint.
- température initiale des pièces.

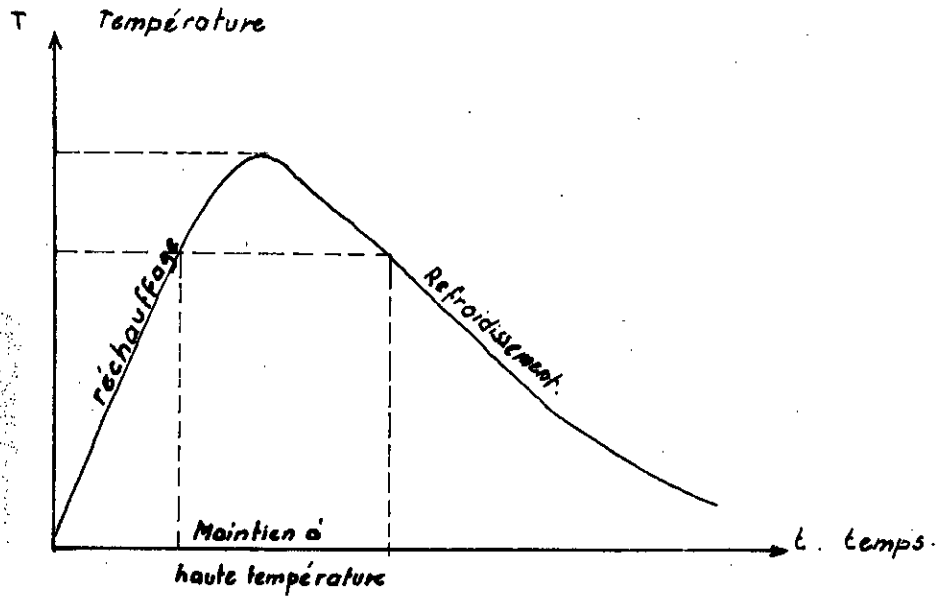


Fig: 1 - Cycle thermique de soudage et ses différentes phases.

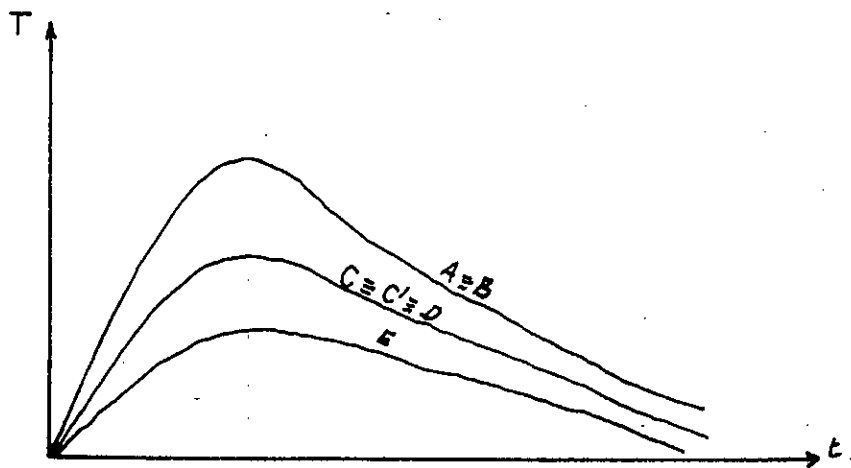
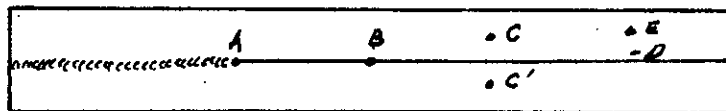
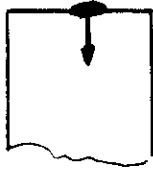
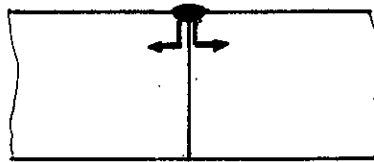


Fig2: Cycles thermiques des différents points situés à différentes distances de la ligne de soudage.

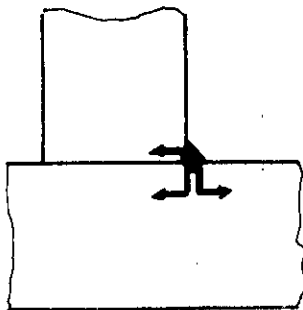
Fig. 3. Voies d'écoulement de la chaleur.



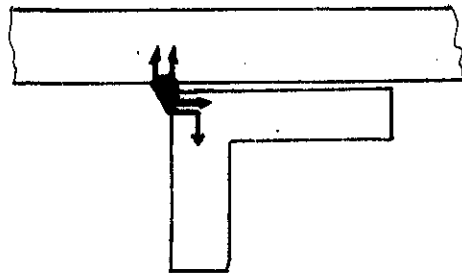
a). Flux monothermique



b). Flux difthermique.



c). Flux trithermique



d). Flux quadrithermique.

Le procédé de soudage est caractérisé du point de vue des cycles thermiques par la quantité de chaleur introduite par centimètre de joint : c'est l'apport thermique spécifique qui est donné par la relation :

$$Q = \frac{UI}{60v}$$

Où U = tension d'arc en volts.
I = intensité de courant d'arc en ampères.
V = vitesse de soudage en centimètres par minute.

Plus Q est élevé, plus la quantité de chaleur que le joint doit évacuer est importante, plus le refroidissement est lent. La vitesse de refroidissement est conditionnée par l'épaisseur et le type du joint. En effet, plus l'épaisseur des pièces est importante, plus la vitesse de refroidissement est élevée, plus les effets de traitement thermique sont remarquables.

Le type de joint intervient à son tour lors de l'évacuation de la chaleur selon qu'il lie une, deux ou plusieurs pièces. Le flux thermique est multiplié de la même façon que la vitesse de refroidissement, et le cycle thermique devient sévère.

Les matériaux de base n'influent sur les cycles thermiques que par leurs propriétés physiques à savoir : la conductibilité thermique et la chaleur spécifique. Les éléments d'addition dans les aciers faiblement alliés n'ont pratiquement pas d'effet de telle sorte qu'on peut négliger leur influence de ce point de vue.

3°) Préchauffage des assemblages.

Les phénomènes thermiques ainsi que les cycles thermiques de soudage sont beaucoup influencés par la température initiale des pièces à assembler.

En pratique, on agit sur cette température par préchauffage afin d'augmenter la durée de refroidissement et adoucir les cycles de manière à éviter la formation de structures métallurgiques incompatibles avec les conditions de service imposées à l'assemblage.

Cette température peut être calculée à partir de la notion de carbone équivalent que nous verrons plus loin.

4°) Soudage des aciers de construction.

L'étude des régimes thermiques montre que l'opération de soudage se distingue des opérations métallurgiques classiques par les faits que les vitesses d'échauffement sont très élevées, que les températures maximales des différents points des pièces varient avec leurs distances au joint et que les durées de maintien de ces températures sont très faibles, de plus les transformations métallurgiques qui apparaissent au refroidissement dans la zone thermiquement affectée du joint s'accompagnent de traitements mécaniques.

On distingue alors quatre zones dans les joints, suivant les températures maximales atteintes :

- la zone fondue pour laquelle la température maximale atteinte est supérieure ou égale à la température de fusion T_f .
- la zone entièrement austénitisée, où la température maximale est comprise entre la température de fusion T_f et la température A_{C3} .
- la zone partiellement austénitisée, où la température maximale est comprise entre les températures A_{C3} et A_{C1} .
- la zone non influencée, non austénitisée où la température maximale est inférieure à A_{C1} .

Dans le cas soudage multipasses, la zone de surchauffe d'une passe quelconque est partiellement normalisée par la passe précédente.

Les propriétés mécaniques de la zone thermiquement affectée varient d'un point à l'autre. Dans la partie normalisée, les caractéristiques mécaniques sont améliorées (généralement) par rapport à celle du métal de base.

Dans la zone surchauffée, les dégradations des propriétés mécaniques sont fonction du temps de passage à la température de surchauffe.

II CONTRAINTES RESIDUELLES DANS LES ASSEMBLAGES SOUDES.

Dans le cas des assemblages soudés, on considère généralement deux types de contraintes résiduelles.

1°) Contraintes résiduelles directes.

Elles ont pour origine le bridage dû aux pièces assemblées elles-mêmes. En effet, le bridage imposé par les pièces elles-mêmes empêche les libres dilatations et les contractions durant le soudage. Ce bridage est maximal dans le sens longitudinal (contraintes résiduelles longitudinales).

Les extrémités du cordon de soudeur se refroidissent plus rapidement que la partie centrale. Cela a pour effet de laisser apparaître librement le retrait transversal des extrémités pendant que celui de la zone centrale est empêché.

2°) Contraintes résiduelles indirectes.

Elles ont pour origine le bridage des pièces à assembler avec des éléments de construction plus ou moins rigides. Elles croissent avec la longueur moyenne des joints et diminuent quand les longueurs de bridage augmentent.

3°) Moyens pour réduire les contraintes résiduelles.

- Traitement d'égalisation des contraintes à base température :

On chauffe le métal de base de chaque côté de la soudure, celle-ci reste à la température ambiante. Au cours du refroidissement, le métal de base tend à revenir à sa longueur initiale tandis que la soudure reste allongée plastiquement. Les contraintes résiduelles sont ainsi diminuées.

- Martelage à chaud.

Il n'est praticable que sur des matériaux forgeables à chaud. Il n'apporte que des améliorations des propriétés mécaniques par modification de la structure et par diminution des soufflures.

- Martelage à froid.

Il produit des déformations plus faibles qu'à chaud, mais celles-ci conduisent à une égalisation des contraintes. On l'applique au cordon pour réduire les contraintes longitudinales et transversales.

4°) Moyens pour réduire les déformations résiduelles de retrait.

- Avant le soudage.

On prévoit des déplacements ou des déformations en sens inverse avant l'exécution des soudures. Ce moyen est délicat car ne sait pas exactement la valeur à donner préalablement aux déformations.

- Pendant le soudage.

On peut exécuter les soudures dans un ordre tel que leurs déformations successives s'opposent mutuellement.

- Après le soudage.

L'opération dite "des chaudes de retrait" consiste à chauffer localement et rapidement certaines zones des pièces afin d'obtenir au refroidissement une contraction locale du métal aux endroits chauffés. On arrive ainsi à supprimer les déformations résiduelles.

DEUXIEME CHAPITRE

I. GENERALITES.

Les poutres ou les divers profiles venus du laminoir sont utilisés dans plusieurs domaines tels que les bâtiments, les ponts, les chemins de roulement etc...

Chaque type de profilet présente des caractéristiques propres du point de vue résistance aux sollicitations auxquelles il est soumis.

Ainsi, on distingue :

- des éléments (profilets) essentiellement comprimés que sont les poteaux.
- des éléments essentiellement tendus que sont les suspentes.
- des éléments essentiellement fléchis dans leur plan que sont les poutres.

Cependant, les cas de sollicitations pures définis ci-dessus sont très rares, car du fait qu'il y ait d'autres éléments dans la construction il se crée des sollicitations composées :

- les poteaux sont souvent fléchis de façon importante en plus du risque de flambement.
- les suspentes assurent parfois un contreventement.
- les poutres reçoivent des charges latérales et sont exposées au diversement.

Ceci influe beaucoup sur la disposition et la détermination des échantillons élémentaires dont ces pièces sont constituées.

II. EXIGENCE TECHNIQUE ET CHOIX DES ECHANTILLONS.

Considérons le choix à faire, uniquement en vue de construction soudées (soudage à l'arc principalement). Les aciers sont livrables sous diverses formes dont les principales sont :

- le tube rond ou carré, le fer I (ou poutrelle) entier ou refendu, le fer U, la cornière, le plat, le rond et le carré.

Un choix sera fait en fonction des formes et en fonction de leur efficacité aux efforts et aussi de leur aptitude aux assemblages et à la mise en oeuvre.

Un autre élément important en est le prix au bilogramme.

Ainsi, on peut dire (1.II) que les tubes ronds et carrés ont à poids égal, des performances voisines. Le tube carré relativement plus mince se trouve avantagé.

Puis viennent le profil H et le crasillon un peu inférieur, ensuite le fer U, la poutrelle I, le T, la cornière libre sont de valeur comparable. Après arrivent presque ensemble le fer carré et le fer rond. Enfin, le plus mauvais de tous est le fer plat libre. Il n'est utilisé que dans un treillis en tant que diagonales croisées entre deux montants rigides.

Toujours, à même poids au bilogramme, on peut facilement mettre en évidence l'intérêt primordial en flexion de la poutre I, après quoi viennent la poutrelle H et le fer U, puis le tube carré ou rectangulaire, puis le tube rond, viennent ensuite le plat la cornière, puis le fer T. Mais, le plat et la cornière sont trop sensibles au diversement.

En dépit du choix important de pontrelles et de fortes sections dont on dispose pour la construction des poutres et des poteaux, il est souvent avantageux pour la construction lourde et un peu élaborée de constituer des profilets composites faits de larges plats ou de tôles découpées et associées par soudage plutôt que d'associer de grands profilet laminés. Ainsi les dimensions précisées recherchées sont mieux assurées et les tolérances géométriques garanties sont plus étroites.

Le cas échéant, on peut associer des éléments de nuances ou de qualité différente en fonction du rôle dévolu à chacun d'eux.

Si les circonstances particulières à la construction ne permettent pas de donner aux poutres une hauteur suffisante, on emploie des poutres du type "caisson" de section carrée ou rectangulaire. Leurs dispositions sont très variées :

- poteaux formés de deux IPN, de deux I larges ailes ou de deux UPN solidarités par des barrettes (figure a).
- poteaux formés de deux UPN ou de deux IPN ou de deux I large ailes solidarités par des semelles (figure b).
- poteaux formés par quatre UPN assemblés en caisson fermé (figure c).
- poteaux formés de deux cornières à ailes égales ou inégales (figure d).
- poteaux formés de deux UAP ou de deux UPN (figure e).

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes proposés d'étudier la construction par soudage de poteaux de section rectangulaire à partir de deux UAP.

Nous avons choisi les UAP comme profilets de base car ils donnent une section rectangulaire après assemblage bout à bout. L'assemblage bout à bout est toujours préférable à un assemblage d'angle à cause de la meilleure qualité du joint et la facilité d'exécution.

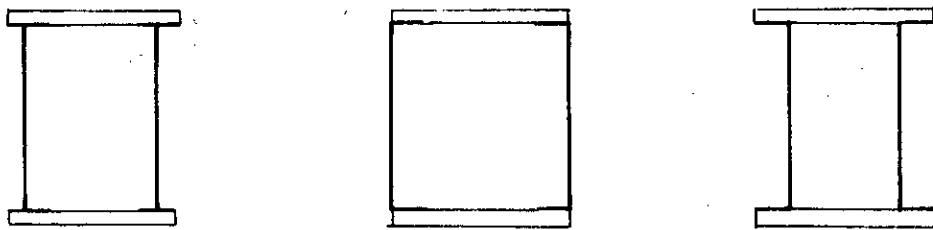


Fig: a.



Fig: b.

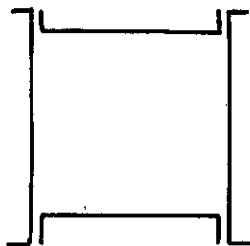


Fig: c

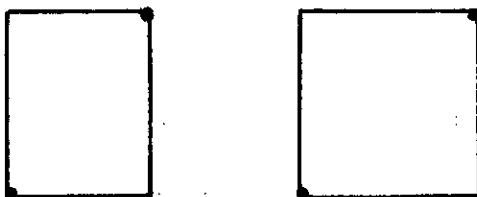


Fig: d

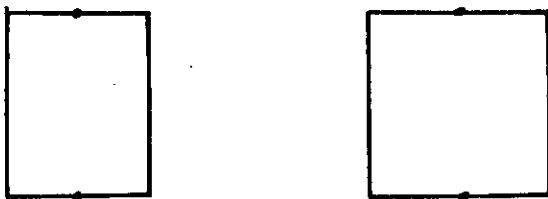
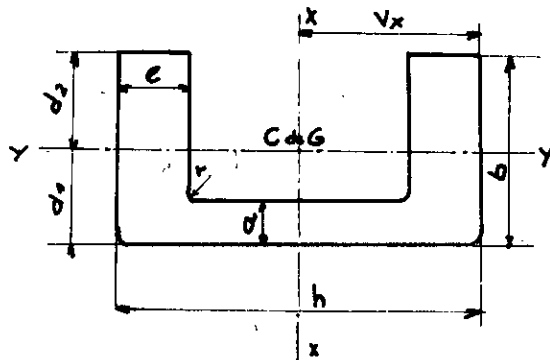


Fig: e.

Table [5.1] : Caracteristiques des profilets UAP.



pro- fils	Dimensions (mm.)					Masse par mètre kg.	Sec- tion F cm ²	Surface de peinture.		Position du Centre de gravité.	
	h	b	a	e	r			m ² /m	m ² /t.	d ₁ cm	d ₂ = y _g cm
90	90	45	5	8	8	2,38	10,7	0,360	38,4	1,61	2,88.
100	100	50	5,5	8,5	8,5	10,5	13,4	0,398	36,4	1,70	3,30
130	130	55	6	9,5	9,5	13,7	17,5	0,469	33,6	1,78	3,78
150	150	65	7	10,25	10,25	17,9	22,9	0,546	30,0	2,05	4,45
175	175	70	7,5	10,75	10,75	21,2	27,0	0,615	28,6	2,12	4,88.
200	200	75	8	11,5	11,5	25,1	32,0	0,684	26,9	2,22	5,28
220	220	80	8	12,5	12,5	29,5	36,3	0,744	25,7	2,40	5,60
250	250	85	9	13,5	13,5	34,4	43,8	0,822	23,6	2,45	6,05
270	270	95	9	14,5	14,5	39,4	50,1	0,902	22,6	2,42	6,69
300	300	100	9,5	16	16	46	59,6	0,981	21,0	2,86	7,04

En plus, un cordon d'angle peut jouer le rôle de concentrateur de contraintes qui a des effets néfastes sur la résistance de la construction en service.

Aussi, les UAP donnent une construction esthétique et moins dangereuse (grâce aux arêtes adoucies par arrondis) dans le cas où elle se trouve aux endroits où circulent les êtres humains.

III. CHOIX DU METAL DE BASE. (Acier faiblement allié).

Pour notre construction, nous recherchons un acier qui doit répondre à un certain nombre d'exigences qui conditionneront une bonne qualité de fabrication.

- limite d'élasticité élevée et économie de masse de métal.
- la meilleure soudabilité possible.
- les teneurs en éléments compromettant la qualité de la soudure contrôlées.

1°) Limite d'élasticité élevée et économie de la masse de métal.

Les aciers à faible teneur en carbone et en éléments d'alliage contiennent une quantité accrue de manganèse et de silicium, ainsi que le chrome, le nickel, le cuivre et certains autres éléments. Ces aciers laminés à chaud ou après normalisation s'emploient pour des constructions soudées.

Ils doivent posséder une limite d'élasticité élevée, une plasticité suffisante et une résistance élevée à la rupture fragile.

En se dissolvant dans la ferrite, les éléments d'alliage affinent le grain et, en renforçant l'aptitude de l'austénite à la surfusion, contribuent à l'affinement de la phase des carbures.

C'est pourquoi par rapport aux aciers au carbone ordinaires (Ct₂, Ct₃, Ct₄) les aciers faiblement alliés ont des valeurs plus grandes de charge de rupture et de limite élastique, tout en conservant une bonne plasticité et ayant une plus faible aptitude au vieillissement et à la rupture à froid.

L'utilisation des aciers faiblement alliés à limite élastique (V_e) = 35 daN/mm² au lieu des aciers au carbone permet d'économiser 15% de métal, et dans le cas de (V_e) = 40 daN/mm², cette économie atteint 25 à 30%.

L'utilisation dans la construction des profils et des tôles thermiquement traités en acier faiblement allié à (V_e) = 40 à 50 daN/mm² donne une économie de 50% de métal.

Une bonne combinaison des propriétés mécaniques et technologiques s'obtient lorsqu'on ajoute à l'acier 0,08 à 1,8% V et environ 0,02% N.

L'interaction du vanadium et de l'azote permet d'obtenir un nitrure de vanadium qui affine le grain et abaisse le seuil de rupture à froid (-40° C). Le principe est à la base de l'étude et de l'élaboration des aciers faiblement alliés (14S2AØ, 12S2AØ, etc...) à la limite élastique allant jusqu'à 45 daN/mm².

Compte tenu de la fabrication en masse des produits, les aciers qui sont retenus sont ceux qui sont alliés avec les éléments peu coûteux et facilement disponibles que sont pour les aciers soudages : le manganèse et le chrome.

TABLEAU DONNANT LES PROPRIETES MECANQUES ET LE DOMAINE D'UTILISATION DE QUELQUES ACIERS FAIBLEMENT ALLIES. (2.II).

ACIERS DE CONSTRUCTION GOST 19282 - 73.

Designation (1)	R. (daN/mm ²)	(V _e) daN/mm ²	Δ%	UTILISATION.
19S2	45	31	21	Constructions soudées ✓
14S2	47 (54)	34 (40)	21 (18)	Constructions soudées, hauts-fourneaux dépoussiéreux - réchauffeurs d'air.
17S2C	52 (54)	34 (35)(40)	23 (18)	Constructions soudées ✕
14S2C	50	35	22	Tubes soudés - ponts - wagons
15X2CFA	50 (60)	35 (50)	35 Δ1 (17)	Fermes - rames - etc...

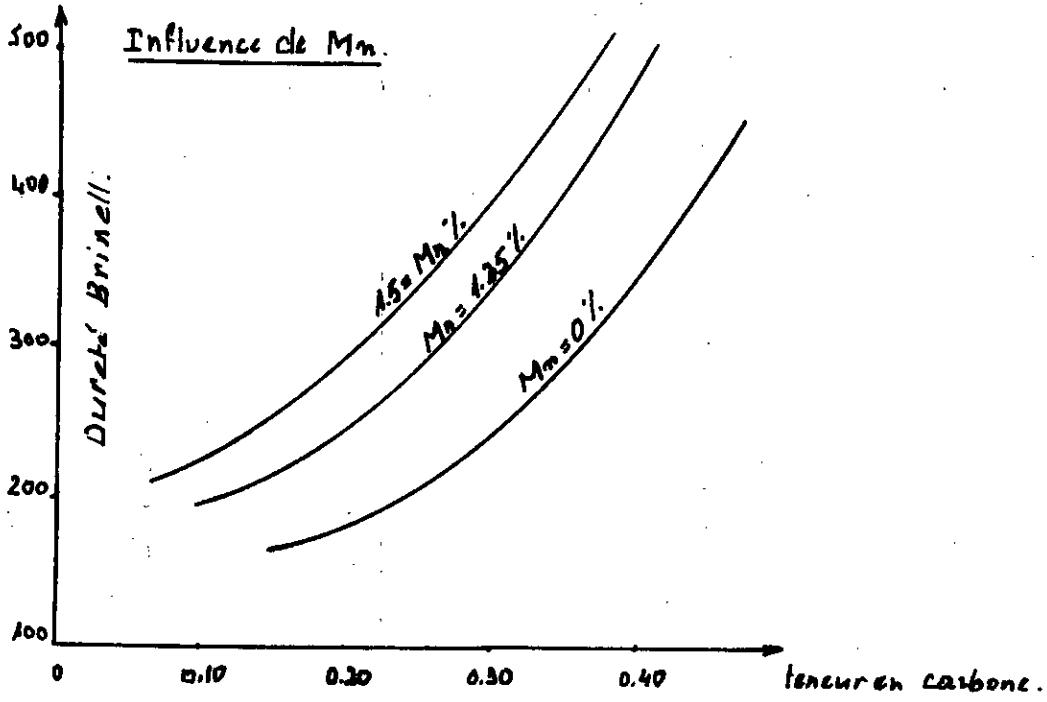
(1) : Tous les aciers contiennent 0,3% de cuivre (Δ).

Les valeurs entre parenthèses correspondent aux propriétés mécaniques après trempe et revenu.

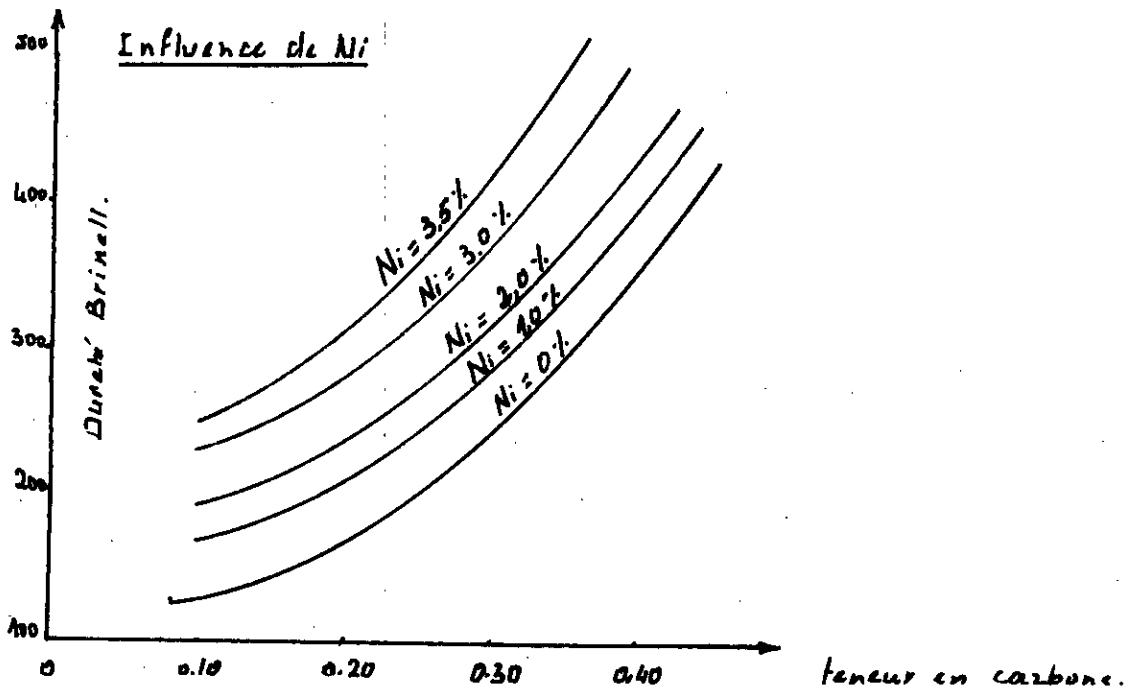
Δ : Manganèse - X = Chrome - C = Silicium - Δ = Cuivre.

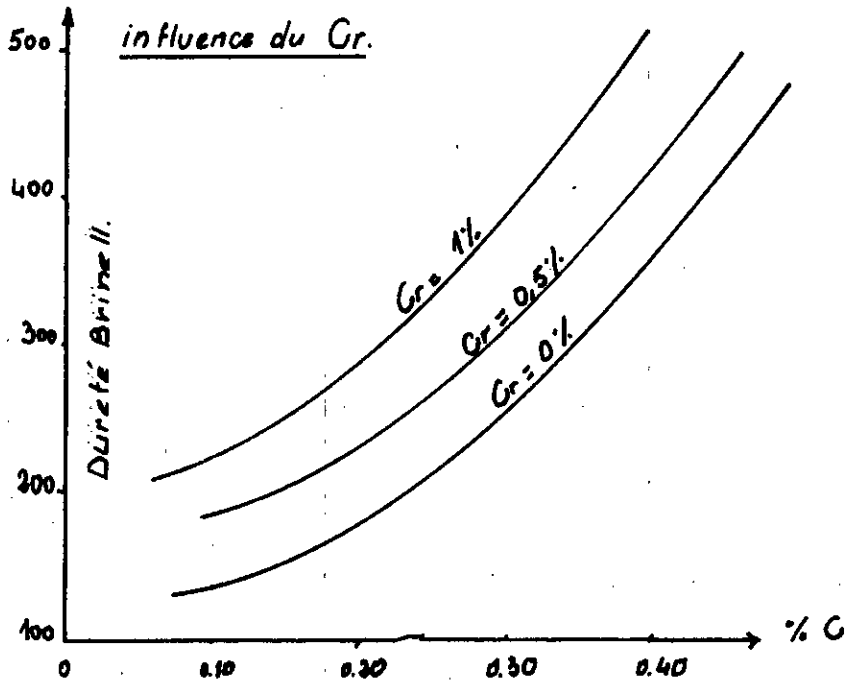
2°) Bonne soudabilité.

- Le carbone est toujours l'élément le plus important qui caractérise l'aptitude au soudage des aciers. La teneur doit être limitée, elle ne dépasse pas 0,25% en général. En effet, si la teneur en carbone augmente, la sensibilité à la fissuration en sous-couche augmente.

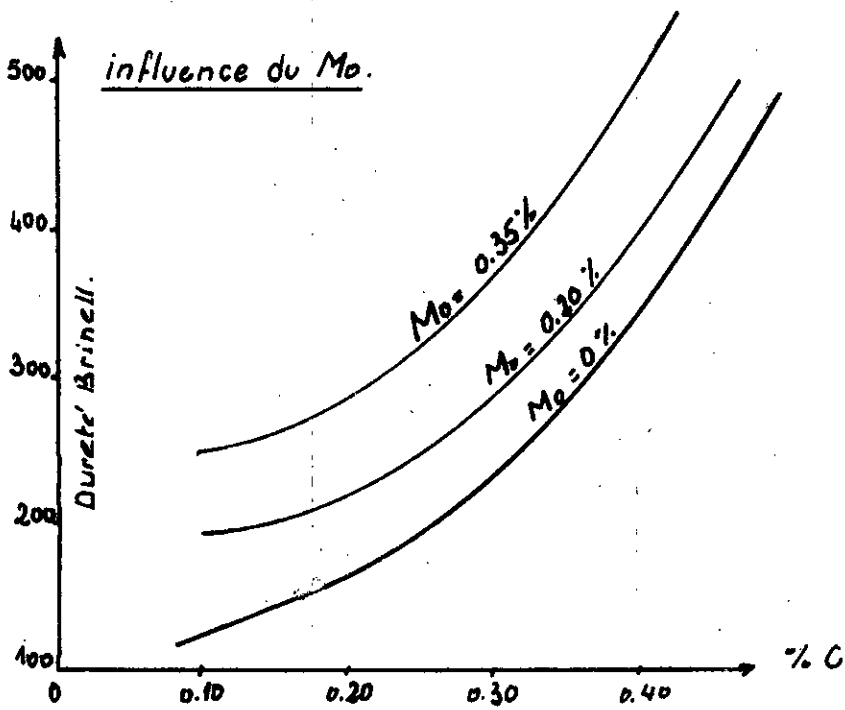


[4. II.]





[4. II]



Aussi le carbone joue un rôle important dans le comportement des aciers aux basses températures. Dans notre cas, la température minimale d'exploitation est supérieure ou égale à (-10°C). C'est pourquoi, il est bon de limiter la teneur en carbone à 0,20% afin que la construction soudée puisse travailler à froid sans risque de rupture fragile.

- la présence du manganèse en teneur comprise entre 0,9 et 1,5% dans ces aciers améliore nettement la soudabilité. On a souvent recours à agir sur la teneur en manganèse plutôt que sur le carbone afin d'obtenir une limite d'élasticité élevée et un effet moins trempant donc une bonne soudabilité. De plus le Mn est un désoxydant énergique qui peut absorber l'oxygène pendant la fusion.
- le silicium est un réducteur puissant de l'acier comme le manganèse. Sa teneur doit être limitée car elle augmente la sensibilité à la fissuration lors de la soudure. Néanmoins, il reste un élément intéressant jusqu'à une teneur de 1,1% car il améliore la ductilité des aciers, sans trop affecter leur soudabilité.
- le nickel, à faible teneur améliore les propriétés de capacité de déformation des soudures, affine le grain et agit favorablement sur la température de rupture fragile à froid. En effet, un taux de 1% de Ni repousse de 60 à 80°C le seuil de rupture à froid. Il améliore la plasticité et la ductilité. Mais si sa teneur augmente (3 à 5%), le Ni peut affecter la fragilité de l'assemblage.
- le chrome, le molybdène le vanadium sont des éléments qui augmentent la trempabilité de l'acier. Leurs teneurs doivent être limitées, sinon, elles auront des effets néfastes sur la soudabilité. Ainsi, la teneur en Cr est inférieure à 0,5%, la teneur en Mo est inférieure à 0,35%, la teneur en V est inférieure à 0,2%. Leur présence n'est que pour améliorer les propriétés mécaniques de l'acier.
- le cuivre confère aux aciers une plus grande résistance à la corrosion. Il est recommandé de ne pas dépasser 0,40% de Cu dans les aciers destinés aux assemblages soudés pour ne pas altérer leur soudabilité.

La soudabilité d'un acier peut être définie par la notion de carbone équivalent

$$C_e\% = C + \frac{Mn}{9} + \frac{Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

La teneur du carbone équivalent doit être inférieure à 0,4 % si l'on veut avoir bonne soudabilité.

3°) Éléments compromettant la qualité de la soudure.

Les éléments comme le soufre et le phosphore existent dans les aciers en quantités très faibles et peuvent être à l'origine de défauts rencontrés dans les soudures. La présence de soufre donne, avec le fer eutectique vers 985°C la sulfure de fer qui se développe aux joints des grains, augmentant ainsi la sensibilité à la fissuration du métal.

Tableau [3.II] : Influence des éléments d'apport sur les qualités des aciers.

Element d'alliage	Symbole Chimique	Symbole AFNOR	Caractéristiques du métal.					Transformation de forme.		
			Rr	Re	A%	H	K	Usinabilité	Forgeabilité	Soudabilité
Carbone	C		↗	↗	↘	↗	↘	↘	↘	↘
Chrome	Cr	C	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↘
Manganèse	Mn	M	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↘
Molybdène	Mo	D	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↘
Silicium	Si	S	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↘
Nickel	Ni	N	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↘
Cobalt	Co	K.	↗				↘			
Vanadium	V	V	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↘
Tungstène	W	W.	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↘
Phosphore	P	P	↗	↗	↘	↗	↘	↘	↘	↘
Soufre	S	F	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘

↗ augmentation

↘ forte augmentation.

↘ diminution.

Le phosphore peut contribuer à haute température à la fissuration en sous couche. C'est pourquoi nous retenons que les aciers de construction dont les teneurs en ces éléments ne dépassent pas 0,035% (aciers de qualité).

4°) INFLUENCE DES ELEMENTS D'APPORT SUR LES QUALITES DES ACIERS. (voir tableau 3.II)

L'acier choisi pour notre construction est un acier faiblement allié 12MS 6.08 dont la composition chimique et les caractéristiques mécaniques après trempe et revenu ont :

C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	S	P	CARACTERISTIQUES MECANQUES			
								R _r daN/mm ²	R _c caractérisée	A%	Réilience à (-40 °C)
0,12	1,5	0,8	0,3	0,20	0,30	0,035	0,035	60	36	21	4 daJ/cm ²

4. CALCUL DE RESISTANCE.

La poutre dont nous allons calculer la résistance à la compression, la flexion et le flambement est fixée au sol articulée pour recevoir les effets de flexion et porte à l'autre extrémité deux consoles. Une console sert de support au rail d'un appareil de levage alors que l'autre constitue une attache du poteau dans le sens transversal, comme sur le schéma de la figure (f). La charge p est due à l'appareil de levage. Cette charge est variable en module du fait que l'appareil de levage se déplace sur le rail (P mini = 0).

Il sera tenu compte de ce régime variable dans tous les calculs à venir. La charge P est due aux poids des constructions qui reposent sur le poteau et est constante. Ceci, lui confère un caractère statique. L'ensemble des charges p et P sollicite le poteau à la compression et au flambement. Nous allons uniquement vérifier la stabilité de la construction dans le plan d'action du moment fléchissant et dans le plan qui lui est perpendiculaire. En ce qui concerne les cordons de soudure, le calcul (vérification) portera sur ceux les plus chargés à savoir les cordons d'angle de fixation de la console au mur par l'intermédiaire du pilastre. (planche N° 1).

1°) Dimensionnement du poteau.

L'effort normal N qui sollicite le poteau à la compression est :

$$N = - p - P = - 4\ 000 - 40\ 000 = - 84\ 000\ daN$$

La contrainte maximale σ mase est donnée par :

$$\sigma_{max} = \pm \frac{M_y}{W_y} + \frac{N}{F}$$

Du fait que la section F nous est inconnue, le calcul de cette contrainte s'avère impossible. En première approximation nous considérons que le moment de flexion M_y est nul et nous introduisons à sa place un coefficient de flexion longitudinal ϕ si bien que :

$$F = \frac{N}{\phi \times (\sigma)_{\text{p}}} \quad \text{où } (\sigma)_{\text{p}} \text{ est la contrainte admissible}$$

ϕ toujours inférieur à 1

L'acier que nous utilisons a une limite à la rupture R_m de 60 daN/mm² et une limite d'élasticité R_e de 36 daN/mm².

Nous calculons la contrainte admissible à la compression à partir de la résistance calculée : $R_p = 0,9 R_e = 0,9 \times 36 = 32,4$ daN/mm².

$$(\sigma)_{\text{p}} = R_p \frac{m_0}{n_0} \quad \text{où } m_0 = 0,8 \text{ pour éléments comprimés et } n_0 = (1,1 \text{ à } 1,3)$$

qui est le coefficient de surchargement ($n_0 = 1,2$)

ϕ est pris égal à 0,5, ainsi nous pouvons calculer F

$$F \geq \frac{84.000}{0,5 \times 2160} = 78 \text{ cm}^2$$

Mais comme l'effet de flexion est très important et par soucis de respecter les dimensions qui évitent le flambement, nous donnons à F une valeur légèrement supérieure. Le résultat final en constituera une justification. Ainsi les tables (5.II) de profils U.A.P nous indiquent que deux U.A.P. 300 réunis bout à bout auront une section de 117,2 cm².

$F = 117,2$ cm² est l'aire de la section rectangulaire retenue pour nos calculs. Nous avons négligé les effets des arrondis aux angles de la poutre ainsi que les poids propres des éléments constituants.

a) calcul du moment d'inertie de la section par rapport à l'axe yy .

$$I_y = \left(\frac{30 \times 20^3}{12} - \frac{26,8 \times 18,1^3}{12} \right) = 6757 \text{ cm}^4$$

b) calcul du rayon de giration de la section par rapport à l'axe yy .

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{I_y}{F}} = \sqrt{\frac{6757}{117,2}} = 7,6 \text{ cm}$$

c) calcul de la flexibilité selon yy .

$$\lambda_y = \frac{l}{r_y} = \frac{1.000}{7,6} = 675,7 \text{ cm}^3$$

d) calcul du moment de flexion M_y .

$$M_y = \frac{I_y}{v_y} = \frac{6757}{10} = 675,7 \text{ cm}^3$$

e) calcul du moment de flexion M_y

$$M_y = p \times e = 4\,000 \times 80 = 320\,000 \text{ daN/cm}$$

f) calcul de la tension maximale (contrainte)

$$\sigma_{\max} = - \frac{M_y}{W_y} + \frac{N}{F} = - \frac{320.000}{675,7} - \frac{84.000}{117,2} = - 1190 \text{ daN/cm}^2$$

g) calcul de la contrainte minimale

$$\sigma_{\min} = \frac{M_y}{W_y} - \frac{N}{F} = 474 - 716 = -242 \text{ daN/cm}^2$$

h) calcul de la caractéristique du cycle des charges

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{242}{1190} = 0,20$$

i) calcul du coefficient g qui tient compte du degré de nécessité d'abaissement des contraintes admissibles.

$$g = \frac{1}{(a K_e - b) - (a k e + b) r}$$

a et b : coefficients tenant compte du type de construction.
a = 0,8
b = 0,3 pour appareil de levage

K_e : coefficient de concentration de contraintes.

$K_e = 2,0$ dans notre cas : nous prévoyons la fixation de consoles.

r = 0,20 calculé au point (h).

$$g = \frac{1}{(0,8 \times 2 - 0,3) - (0,8 \times 2 + 0,3) \times 0,20} > 1,0$$

Nous prenons $g = 1,0$ pour ne pas diminuer les contraintes admissibles.

2) Vérification de la stabilité de la construction dans le plan d'action de M_y .

a) calcul de l'excentricité relative.

$$m = \frac{M_y \times F}{W_y \times N} = \frac{320.000 \times 117,2}{675,7 \times 84.000} = 0,66$$

b) calcul du coefficient n dépendant de la forme de la section

$$n = 1,45 - 0,0031 \times \lambda_y \text{ pour } \lambda_y \leq 150$$

$$n = 1,45 - 0,0031 \times 132 = 1,04$$

c) calcul de ϕ_M (à partir du produit m x n et λ_y)

ϕ_M = coefficient de flexion longitudinale pour section pleine.

$$m \times n = 0,66 \times 1,04 = 0,68$$

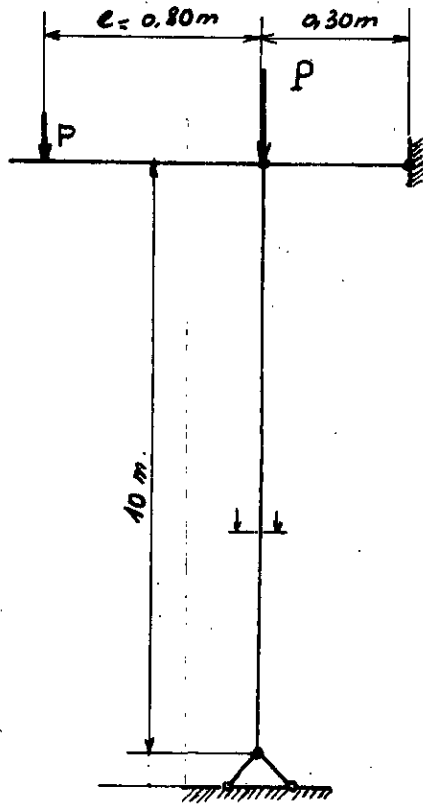
le tableau 1.(6.II) nous donne $\phi_M = 0,35$

d) calcul de la contrainte de compression

$$\sigma = \frac{N}{\phi_M \times F} = \frac{84.000}{0,35 \times 117,2} = 2048 \text{ daN/cm}^2$$

$$\sigma_{(T)_p} = 2160 \text{ daN/cm}^2$$

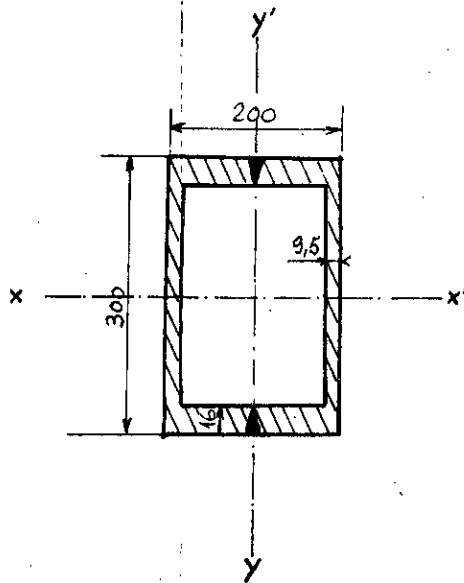
ainsi la stabilité dans le plan d'action de M_y est vérifiée.



$p = 4000 \text{ daN.}$

$P = 80000 \text{ daN.}$

Fig.f: dimensionnement du poteau.



3. Vérification de la stabilité dans le plan perpendiculaire au plan de My.

a) calcul du moment d'inertie de la section par rapport à l'axe x,x

$$I_x = \frac{20 \cdot 20^3}{12} - \frac{18,1 \times 26,8^3}{12} = 15966 \text{ cm}^4$$

b) calcul du rayon de giration de la section autour de l'axe x,x

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{F}} = \sqrt{\frac{15966}{117,2}} = 11,66 \text{ cm}$$

c) calcul de la flexibilité

$$\lambda_x = \frac{l}{r_x} = \frac{1000}{11,66} = 86$$

d) le coefficient ϕ_{\min} correspondant à la flexion maximale de l'élément comprimé est donné par le tableau 2. (6.II) pour ($\lambda_x = 86$) et les aciers faiblement alliés.

$$\phi_{\min} = 0,58.$$

e) calcul du coefficient C de forme de la section transversale.

$$C = \frac{b'}{1 + a' m} \quad \text{où} \quad \begin{matrix} b' = 1 \\ a' = 0,7 \\ m = 0,66 \end{matrix} \quad \text{pour notre type de construction}$$

$$C = \frac{1}{1 + (0,7 \times 0,66)} = 0,68 \text{ d'après tableau 3. (6.II)}$$

f) calcul de la contrainte de compression

$$= \frac{N}{C \phi_{\min} \times F} = \frac{-84\,000}{0,68 \times 0,58 \times 117,2} = -1817 \text{ daN/cm}^2$$

$$(\sigma)_p = 2160 \text{ daN/cm}^2$$

Ici aussi, la stabilité dans le plan perpendiculaire à My est vérifiée. Nous en concluons que la construction est bien résistante et elle peut être adoptée.

4. Dimensionnement des cordons de soudure à l'encastrement (pilastre).

La console de la partie supérieure du poteau est assimilée à une poutre continue hyperstatique libre à une extrémité et encastree à l'autre par soudage à un pilastre et reposant sur un appui intermédiaire. Pour calculer la contrainte au niveau du pilastre nous utilisons la méthode des trois moments de CLA PEYZON. (voir schéma de la figure g).

a) calcul des réactions sur les appuis B et C.

$$\text{somme } (\sum/B) = 0 \text{ entraîne que } (P \times l_0 - R_C \times l_1) = 0$$

$$\text{d'où } R_C = P \cdot \frac{l_0}{l_1} = + \frac{8}{3} P = 10667 \text{ daN}$$

.../...

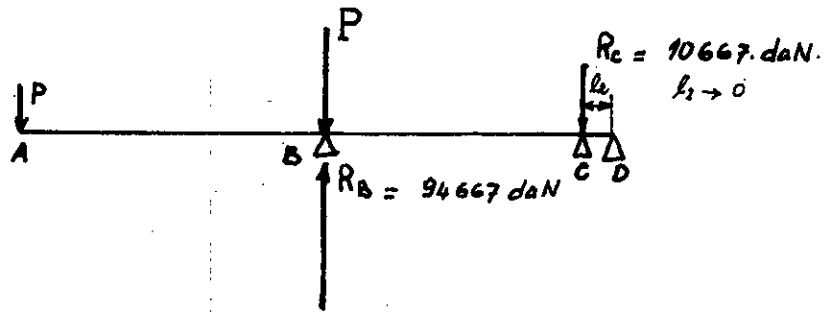
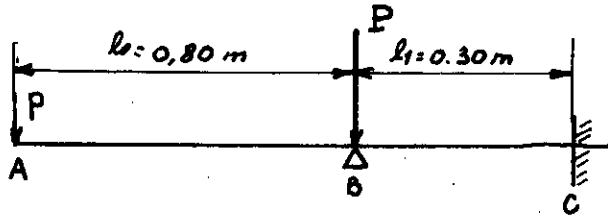


Fig. 9. Efforts sur les consoles.

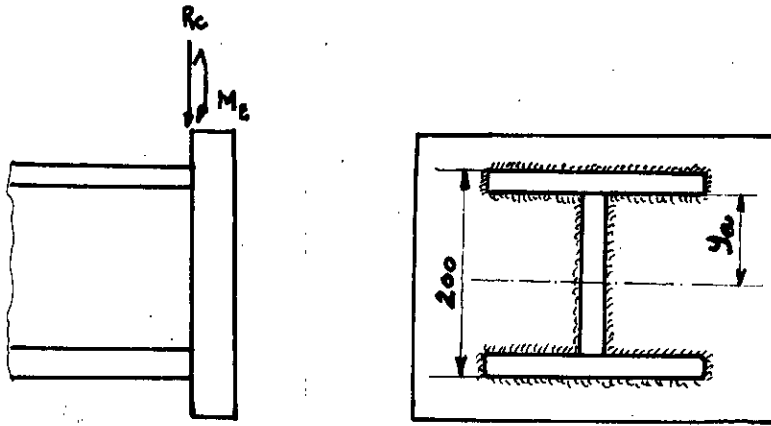
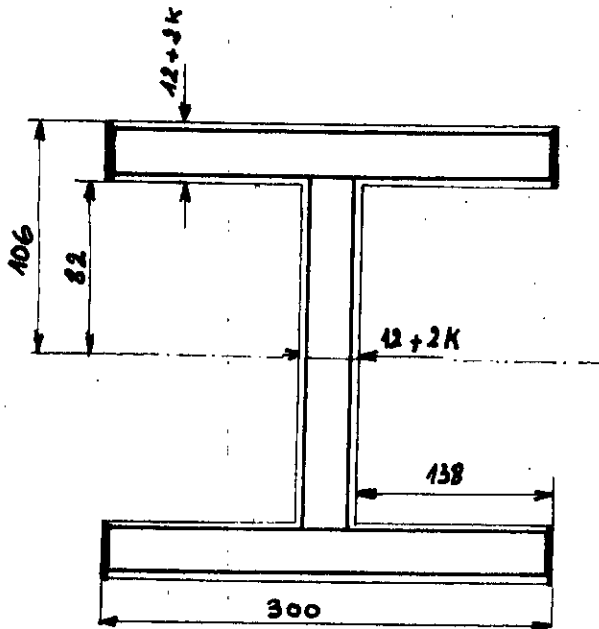


Fig. h: dimensionnement des cordons d'angle.



$K = \text{cathète des cordons} = 6 \text{ mm.}$

somme (M/C) = 0 entraîne que $p \times (l_0 + l_1) - R_B \times l_1 = 0$
 d'où $R_B = + \frac{11}{3} p + P = 94667 \text{ daN}$

b) calcul du moment d'encastrement M_E d'après la formule :

$$M_B \times l_1 + 2 M_E \times l_1 = - \frac{6}{l_1} \int_0^{l_1} U_x dx$$

où U est le moment flechissant entre B et C

$$U = R_C \cdot x - px \text{ et } M_B = p \times l_0$$

$$\text{d'où } p \cdot l_0 \cdot l_1 + 2 M_E l_1 = - \frac{6}{l_1} \int_0^{l_1} \left(\frac{8}{3} p \right) x^2 dx = \frac{6}{l_1} \frac{l_1^3}{3} \frac{8}{3} p$$

$$M_E = - \frac{8}{3} p l_1 - p \frac{l_0}{2} = - \frac{8}{3} \times 4000 \times 0,3 - \frac{4000 \times 0,4}{2} =$$

$$M_E = - 4000 \text{ daN.m}$$

c) vérification de la résistance des cordons d'angle de l'encastrement.

Les cordons sont soumis à l'effort tranchant (variable entre 0 et R_C) et au moment d'encastrement M_E . La contrainte admissible de cisaillement

$(\tau)_{\alpha}$ est égale à $k \gamma (\bar{\sigma})$ où :

k vaut 0,65 dans le cas du soudage semi-automatique sous gaz (voir tableau 4.(7.II) tient compte du régime variable de R_C .

$$\gamma = \frac{1}{1,3 - \frac{R_{c \text{ min}}}{R_{c \text{ max}}}} = \frac{1}{1,3 - 0} = 0,77$$

$(\tau)_{\alpha}$ est donc égale à $0,65 \times 0,77 \times 2160 = 1081 \text{ daN/cm}^2$

Nous supposons que l'effort tranchant R_C n'est supporté que par les joints verticaux. Soit τ_1 la contrainte moyenne due à R_C .

$$\tau_1 = \frac{R_C}{0,7 \times S} \text{ où } S = \text{section des deux cordons verticaux}$$

$$S = 2 (16,4 \times 0,6) = 19,7 \text{ cm}^2$$

$$\tau_1 = \frac{10667}{0,7 \times 19,7} = 774 \text{ daN/cm}^2$$

La contrainte maximale produite par le couple M_E est donnée par :

$$\tau_2 = \frac{M_E \times Y_a}{0,7 I_x} \text{ où } I_x \text{ est le moment d'inertie des joints d'angle par rapport à l'axe } x$$

$$Y_a = 8,8 \text{ cm}$$

$$I_x = 2 \left(\frac{0,6 \times 16,4^3}{12} \right) + 2 \left(\frac{30 \times 0,6^3}{12} + 30 \times 0,6 \times 10,3^2 \right) + 4 \left(\frac{0,6^3 \times 13,8}{12} + 0,6 \times 13,8 \times 8,5^2 \right) + 4 \left(\frac{0,6 \times 1,2^3}{12} + 1,2 \times 0,6 \times 9,4^2 \right)$$

$$I_x = 6910 \text{ cm}^4$$

$$\text{d'où } \sigma_2 = \frac{400\,000 \times 8,8}{0,7 \times 6910} = 728 \text{ daN/cm}^2$$

Nous calculons la contrainte totale qui doit être inférieure à (σ_a') .

$$\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{\frac{1}{2}} = (774^2 + 728^2)^{\frac{1}{2}} = 1063 \text{ daN/cm}^2$$

La construction peut donc être adoptée par σ est inférieure à (σ_a') .

Tableau 4.(7.II) donnant le coefficient k à adopter pour le calcul des contraintes admissibles.

Rapport de la construction admissible à la (σ_e) du métal de base.	MODE DE SOUDAGE			Automatique sous-flux	Semi-automatique électrode couchée ou oblique
	manuel à l'électrode enrobée				
	E 24	E 42	E 42 A		
À la compression $(\sigma_c')/(\sigma_e)$	0,75	0,90	-	-	0,90
À la traction $(\sigma_t')/(\sigma_e)$	0,60	0,80	0,90	0,90	0,80
Au cisaillement $(\tau')/(\sigma_e)$	0,50	0,65	0,70	0,70	0,65

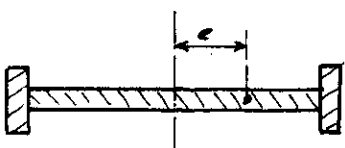
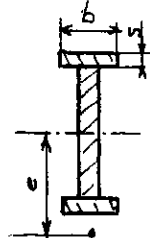

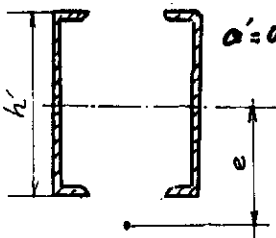
Tableau 1.(6.II) donnant ϕ_H en fonction de λ , et du produit (m x n)

m.n	ϕ_H									
	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	14,0
20	0,96	0,80	0,67	0,58	0,50	0,39	0,32	0,23	0,17	0,11
30	0,94	0,77	0,64	0,55	0,48	0,37	0,30	0,22	0,17	0,10
40	0,92	0,74	0,61	0,52	0,45	0,35	0,23	0,21	0,16	0,10
50	0,49	0,71	0,57	0,49	0,43	0,34	0,28	0,20	0,16	0,10
60	0,86	0,67	0,54	0,46	0,40	0,32	0,27	0,19	0,15	0,10
70	0,81	0,63	0,51	0,43	0,38	0,30	0,25	0,18	0,15	0,09
80	0,75	0,59	0,47	0,40	0,35	0,28	0,24	0,17	0,14	0,09
90	0,69	0,55	0,44	0,37	0,33	0,27	0,22	0,16	0,14	0,09
100	0,60	0,50	0,40	0,34	0,31	0,25	0,21	0,16	0,13	0,09
110	0,52	0,46	0,37	0,32	0,28	0,23	0,20	0,15	0,13	0,08
120	0,45	0,41	0,34	0,30	0,26	0,22	0,19	0,14	0,12	0,08
130	0,40	0,37	0,31	0,27	0,24	0,21	0,18	0,14	0,12	0,08
140	0,36	0,33	0,28	0,25	0,22	0,19	0,17	0,13	0,11	0,07
160	0,29	0,28	0,24	0,22	0,20	0,16	0,15	0,12	0,10	0,07
180	0,23	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,06
200	0,19	0,19	0,17	0,16	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,06

Tableau 2.(6.II) donnant ϕ_{mini} en fonction de λ_x et la nuance d'acier.

Flexibilité λ_x	Coefficient ϕ_{mini} .			
	% C $\leq 0,25$	% C $0,25$	aciers faible- ment alliés.	alliages légers
10	0,99	0,98	0,98	0,97
20	0,97	0,96	0,95	0,94
30	0,95	0,93	0,92	0,89
40	0,92	0,89	0,89	0,77
50	0,89	0,85	0,84	0,66
60	0,86	0,80	0,78	0,54
70	0,81	0,74	0,71	0,46
80	0,75	0,67	0,63	0,39
90	0,69	0,59	0,54	0,32
100	0,60	0,50	0,46	0,28
110	0,52	0,43	0,39	0,24
120	0,45	0,37	0,33	0,21
130	0,40	0,32	0,29	0,18
140	0,36	0,28	0,25	0,16
150	0,32	0,25	0,23	0,15
160	0,29	0,23	0,21	
170	0,26	0,21	0,19	
180	0,23	0,19	0,17	
190	0,21	0,17	0,15	
200	0,19	0,15	0,13	

Tableau 3. [6.2] donnant les coefficients: n et a' .

Coefficient n .		Coefficient a'
$\lambda < 150$	$\lambda > 150$	
		 <p>$a' = 0,70$</p>
 <p>$n = 1,0$</p>		
<p>$n = 1,45 - 0,031\lambda$</p>		 <p>$a' = 0,60$</p>

TROISIEME CHAPITRE

I. CHOIX DU PROCÉDÉ DE SOUDAGE POUR LA PARTIE POTEAU.

Nous avons assemblé bout à bout et à plat deux profilets U.A.P d'épaisseur 16 mm sur une longueur de dix mètres. Les calculs de résistance faits au chapitre précédent supposent une continuité des propriétés mécaniques des joints et du métal de base et une régularité de dépôt de métal. Aussi, la fabrication est de séries et non unitaire. Tous ces facteurs font que le soudage automatique s'impose car il est de loin le procédé le mieux approprié pour répondre à ces besoins du moins pour la partie poteaux sans consolés.

Le soudage à l'arc sous flux solide (poudre) convient bien pour les soudures à plat.

1°) Principe du procédé - son application - ses avantages et ses inconvénients.

La source de chaleur est un arc électrique qui jaillit entre un fil électrode nu de diamètre allant de 1,2 mm à 9,5 mm, alimenté soit en courant continu soit en courant alternatif, et la pièce à souder sous un flux en poudre.

L'alimentation en flux est assurée séparément par une goulotte placée en avant du fil, cependant que l'excès de flux est récupéré en arrière par un aspirateur. A l'amorçage, l'arc éclate au sein de la poudre, il se crée alors une cavité remplie de gaz (CO et CO₂) qui est entourée de flux fondu. Ce dernier étant conducteur, une partie de l'énergie est transmise au bain par effet joule. Comme avec les électrodes enrobées, le laitier protège le bain de fusion et la soudure pendant son refroidissement. (voir figure 1).

Le courant continu plus généralement utilisé n'est remplacé par le courant alternatif que dans le cas où les intensités de soudage dépassent 600 A et notamment, évite les inconvénients causés par le soufflage magnétique.

Le soudage sous flux en poudre autorise grâce aux énergies élevées, l'assemblage bout à bout en une seule passe de 15 mm d'acier sur bords jointifs soutenus, ou 50 mm en deux passes opposées sur les bords jointifs et chanfreinés.

Principe et schéma du soudage à l'arc sous flux solide

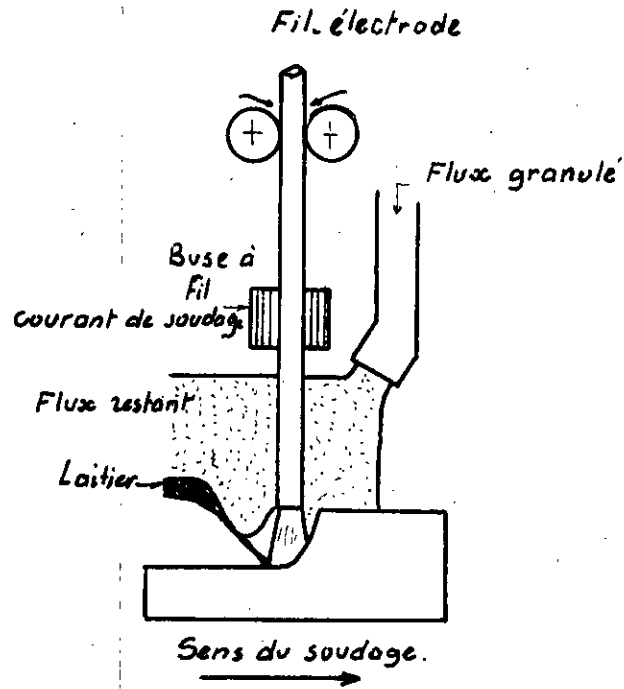


Fig: 1

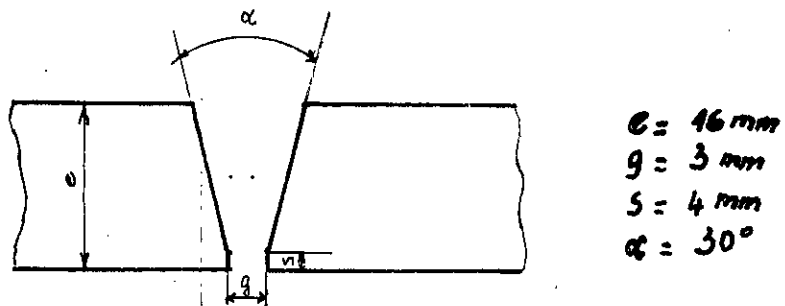


Fig: 2. géométrie du chanfrein.

Ce procédé se caractérise par la vitesse élevée de dépôt de cordon, le bel aspect de sa surface et la profondeur de pénétration (forte). Le procédé est propre, la fumée produite est peu abondante et le laitier se détache facilement l'opérateur n'a pas besoin d'aucune protection contre l'éclat de l'arc qui reste caché pendant le soudage.

Mais, le fait que l'arc n'est pas visible, l'opérateur ne peut pas observer le bain de soudage et juger comment se fait la fusion.

La préparation des pièces doit être faite avec grande précision tout le long du joint afin d'éviter l'apparition de défauts tels que des manques de fusion, des manques de pénétrations et des affondrements.

2°) Choix du type de flux et du fil électrode.

Les flux utilisés en soudage automatique ont une granulométrie contrôlée et peuvent être de l'une des nuances : fondue, aggloméré ou fritté. Leur comportement dépend de leur composition chimique et de leur granulométrie ainsi que de la composition chimique du métal de base et du métal d'apport. En pratique, il existe trois systèmes pour choisir le flux et le fil électrode. :

Premier système : Fil électrode à teneur en carbone faible. Flux à grande teneur en Mn et Si. (35 - 45 %) Mn O et (40 - 45 %) Si O₂ (flux basique).

Deuxième système : Fil électrode à teneur en carbone allié à 2 % en Mn. Flux à haute teneur en Si (40 - 42 %) Si O₂. Mn O₂ 15% (flux oxidel).

Troisième système : Fil électrode allié au Mn (env. 1%) flux de teneur moyenne en Mn (env. 30%).

Tableau donnant la composition chimique de flux, fil électrode et de métal fondue pour soudage automatique sous flux (1. III).

Seuls les constituants principaux sont indiqués.

Type de flux	50	80	70	20
Ca O	5	24	28	27
Ca F ₂	5	5		
Mg O		12	6,5	7,5
Si O ₂	41	38	48	53
Al ₂ O ₃	2,5	13	5	5
Mn O	0,75	7,5	10	
Mn O ₂	39			
Métal fondu				
C	0,12	0,11	0,12	0,12
Mn	1,05	1,10	1,00	1,70
Si	0,25	0,30	0,37	0,40
Fil électrode				
C	0,12			
Mn	1,80			
Si	0,15			

Pendant le processus de soudage une partie du flux fond pour recouvrir le bain et les particules métalliques quittant le fil 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 la soudure. L'apport du silicium par le flux permet une action d'oxydante importante pour empêcher la porosité mais il peut nuire aux propriétés mécaniques et provoquer des fissures en soudage multipasses.

./.

Mais avant d'entamer le choix définitif du flux et du fil électrode regardons quels sont les effets des gaz (oxygène, azote, hydrogène) sur les qualités des soudures.

a) Absorption de l'oxygène par la soudure :

Les teneurs en O₂ dans les soudures sont influencées par de nombreux facteurs (nature du flux, intensité de courant, longueur d'arc).

Pour les flux oxydants la teneur en O₂ de la soudure reste encore très élevée (0,20 %). Les flux acides avec éléments réducteurs (Si O₂ - Fe O - MnO) et de même les flux à base d'oxyde de titane réduisent nettement la concentration en oxygène (0,05 à 0,10 %). Avec les flux basiques, cette teneur baisse encore (\leq 0,05 %).

L'oxygène affecte les propriétés mécaniques suivant qu'il est sous forme d'inclusions ou à l'état dissout :

- A l'état dissout, l'oxygène agit directement sur les caractéristiques mécaniques : la résistance et la dureté diminuent d'une façon sensible, l'allongement diminue peu mais la résilience est fortement abaissée.

- Sous forme d'inclusions, l'oxyde Fe O agit sur la compacité de l'assemblage et, par voie de conséquence, abaisse toutes les caractéristiques mécaniques.

b) Absorption de l'azote par la soudure

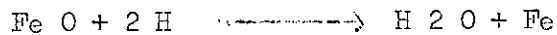
L'un des phénomènes chimiques les plus importants accompagnant la soudure du fer et de ses alliages est la fixation d'azote par le métal fondu pour donner le nitrure de fer Fe₄N. Cette absorption agit à la fois sur les propriétés mécaniques (la fragilité augmente), sur le pouvoir trempant de l'acier, sur le durcissement structural.

L'azote en teneur très faible obtenu par fusion lors du soudage diminue la capacité de déformation de l'acier (A %, K, Z %). Il se présente dans ce cas comme élément indésirable. On n'est amené à utiliser le manganèse et le chrome comme éléments permettant de réduire la teneur en azote par formation de nitrures métalliques qui se déplacent vers le laitier.

C) Influence de l'hydrogène sur les propriétés des soudures

- La présence de l'hydrogène dans la soudure peut entraîner des défauts comme la fissuration du métal de base par exemple.
- La sursaturation de gaz dans le métal liquide ou une solidification trop rapide entraîne la création de soufflures contenant les gaz sous pressions (H₂O, H₂S, CH₄).
- 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.

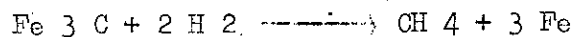
La réaction de réduction de l'oxyde de fer par l'hydrogène,



Celle de l'hydrogène sur le soufre :



Et celle de l'hydrogène sur les carbures de fer



Sont les causes de formation de soufflures.

Par suite, l'hydrogène influ sur les propriétés du métal de base en augmentant sa sensibilité à la fissuration.

./.

Soudage automatique sous flux	Teneur en hydrogène (Cm ³ /100g)		
	Diffusible	Résiduel	Total
Flux humide	14 à 15	0,5	14,5 à 15,5
Flux à l'état de réception	8 à 8,5	0,3	8 à 9

Diffusible : Hydrogène qui s'échappe à température ambiante.

Résiduel : Hydrogène restant après maintien à la température ambiante.

Le flux choisi doit donc être d'une composition chimique et d'une granulométrie telles que les effets des gaz nocifs à la soudure soient réduits au minimum et telles qu'elles permettent la protection efficace de l'arc pendant le soudage avec de fortes intensités.

En ce qui concerne le métal d'apport (fil électrode), celui-ci doit être choisi de manière telle qu'il permettra d'obtenir des joints présentant le maximum d'homogénéité, sur le plan des propriétés mécaniques, de la composition chimique et des structures métallurgiques avec le métal de base.

Le choix du premier système à savoir : fil électrode à bas carbone et flux à grande teneur en Mn et Si : (35 - 45 %) Si O₂ (basique) nous paraît le mieux approprié pour répondre à nos besoins; la granulométrie doit être de (0,40 à 0,60 mm) (diamètre des grains) pour laisser s'échapper les gaz et assurer une bonne protection de l'arc électrique.

Notons qu'il est préférable de passer à l'étuve (300/350° C) le flux pour le déshumidifier afin de réduire l'action de l'hydrogène.

Composition chimique du fil électrode : 10 MS6.06 d'après la norme française.

Elément	C	Mn	Si	Cr	Ni	(S)	(P)
%	0,10	1,40 1,70	0,60 0,85	0,20	0,25	0,025	0,030

3°) Préparation des bords

La préparation des bords avant le soudage est un facteur essentiel pour la réussite de l'opération de soudage. Quand les pièces à souder ont des épaisseurs importantes. Leur soudage demande des intensités de courant importantes. Par conséquent, les bains de fusion deviennent volumineux et pour les retenir, il faut prévoir des chanfreins.

Dans notre cas de construction soignée, il importe beaucoup de réaliser des points de bonne qualité. Nous sommes donc obligés de prévoir une préparation préalable des bords bien que cette opération exige des dépenses supplémentaires (matériel, main-d'oeuvre etc....).

Pour les soudures bout à bout, à plat sous flux solide, le chanfrein en V est le mieux approprié car :

- La quantité de métal à enlever est minimale (par comparaison à d'autres chanfreins).
- Il est facilement réalisable et on dispose de plusieurs moyens (oxycoupage, par exemple).
- La soudure n'est accessible que d'un seul côté.

Les dimensions du chanfrein sont déterminées en fonction de la machine à souder ADF¹⁰⁰⁰ et du type de support adapté pour le bain de fusion, comme nous le verrons plus loin. En effet, il est exigé un écart entre les bords à souder de 3mm et un méplat de 2,5mm (minimum) pour que cette machine puisse travailler.

L'angle du chanfrein varie de 30 à 50 degrés selon les épaisseurs des pièces (voir figure 2). Le fait d'exécuter la soudure avec un écart des 2 pièces de 3mm et une épaisseur de 16 mm fait augmenter la section de la poutre de $2 (1,6 \times 0,3) = 0,96 \text{ cm}^2$. La section de la poutre devient alors égale à $117,2 + 0,96 = 118 \text{ cm}^2$. Ce qui renforce la résistance calculée.

./.

Tableau (2.III) donnant les valeurs approximatives des paramètres pour les chanfreins en V.

Procédé de soudage	Position de soudage	e (mm)	(degrés)	S (mm)	g (mm)
E.E. T.I.G. G.M. G.F.	Soudage à plat	e < 15	⟨ ≥	15 < S < 2,5	15 < g < 4
	Soudage au plafond				20 < g < 5
M.F.S	Soudage verticale	e < 15	⟨ ≥	15 < S < 2,5	20 < g < 5
	Soudage à plat	6 < e < 40	30 < α < 50	0 < S < 4	0 < g < 6

4°) Support de bain

Le support est un moyen de contrôler la pénétration de la soudure quand celle-ci n'est accessible que d'un seul côté. Il existe en pratique trois types de supports : - support permanent ou fusible (en acier)
- support non permanent (latté en cuivre)
- lit de flux : le flux en poudre est contenu dans une pièce au dessous du joint et y est plaqué par un boyau confluente.

La première solution, outre les préparations qu'elle exige, entraîne un gaspillage de matière, s'avère inopportune pour la fabrication de série.

La seconde solution présente déjà un aspect économique meilleure car nous pouvons utiliser une latte en cuivre pour toute la série de fabrication. Mais, l'inconvénient majeur est que cette latte en cuivre ne possède pas sur les grandes longueurs la précision requise. Cette idée ne serait pas répétée car il existe des supports spéciaux en cuivre qui peuvent se déplacer en même temps que le bain de fusion. En effet, il existe des machines de soudage automatique qui se déplacent au dessus des pièces à souder et entraînent avec elles le support par dessous les tôles. De part sa forme creuse et de grandes dimensions notre construction peut très bien être exécutée par ce type de machine. L'écartement des tôles et le chanfrein ont été déterminés en conséquence (figure 3).

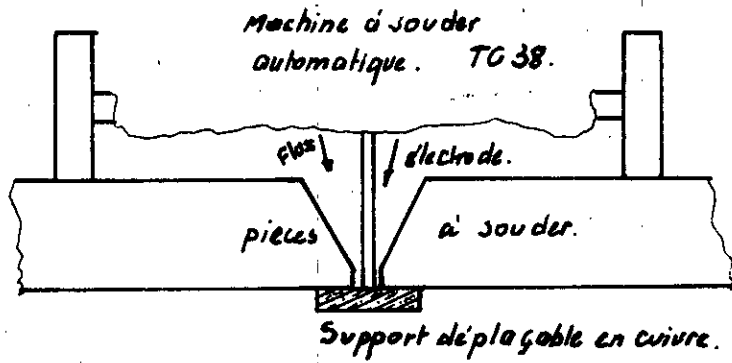


Fig. 3. Disposition du support de bain.

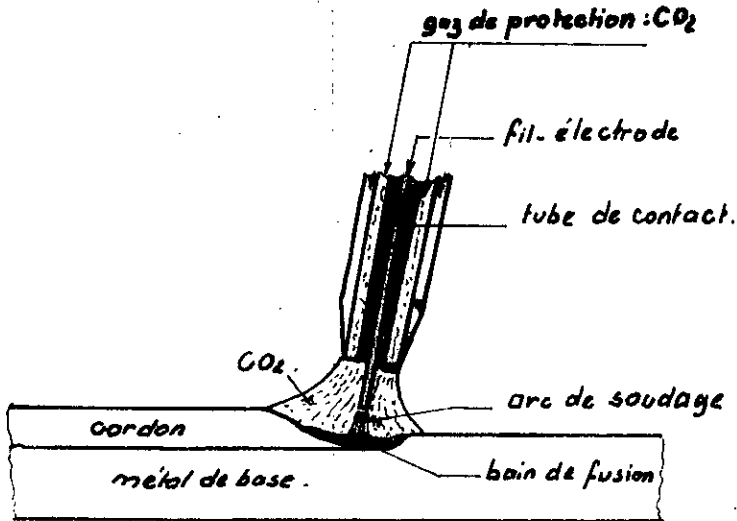


Fig 4: procédé de soudage semi-automatique sous CO_2 avec électrode fusible.

La troisième solution qui consiste à placer un lit de flux en dessous des tôles, a tous les avantages sur les solutions précédentes sauf qu'elle ne convient pas à notre construction à cause de la grande longueur (10 m). En effet, en plus des difficultés technologiques, il n'est pas économique d'utiliser un tel support car il demande beaucoup de temps pour être placé et retiré à deux reprises pour chaque poutre.

II) CHOIX DU PROCÉDE DE SOUDAGE PARTIE CONSOLES.

Nous recherchons pour cette partie un procédé qui puisse donner à peu près la même vitesse de soudage que pour la partie poteau. Autrement dit, nous envisageons de réaliser, en un temps presque le même, le poteau et les consoles pour qu'à la fin de l'opération de soudage, la construction soit prête à être montée. En plus de ces considérations, nous tenons compte du rendement du procédé et de la qualité de la soudure qui doit être soignée. Ceci dirige nos idées vers un procédé simple et efficace, de ce point de vue, qu'est le soudage semi-automatique sous CO₂ avec fil électrode comme métal d'apport.

1°) Principes du procédé - ses avantages - ses inconvénients et son application.

L'arc est entretenu entre la pièce à souder et l'électrode métallique fusible sous forme d'un fil se déroulant dans un dévidoir de façon automatique. L'avance de la torche de soudage se fait manuellement. L'opération de soudage est donc continue et elle n'est interrompue que lorsque le cordon est complètement réalisé.

Le bain de fusion est protégé contre la contamination atmosphérique par le dioxyde de carbone (CO₂) qui entoure le fil électrode dans la torche (fig. 4).

L'électrode est consommée à vitesse constante; celle-ci étant choisie de manière à pouvoir souder avec l'intensité voulue. La longueur d'arc varie avec le voltage. Pour le soudage en position horizontale, l'intensité du courant peut dépasser 250 A. La torche de soudage est généralement inclinée de 10 degrés, en sens inverse de la direction d'avancement du cordon, contrairement à la position adoptée en soudage manuel à l'arc. Si les intensités de soudage dépassent 350 A, il est nécessaire de prévoir le refroidissement de la torche par un courant d'eau.

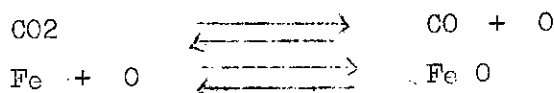
Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse (CO₂) convient pour le soudage de tous les types de joints en toutes positions et de toutes les épaisseurs à partir de 0,5 mm. Cependant, il exige un encombrement minimal sous forme d'angle (30° et plus) pour qu'on puisse introduire la tête de soudage (torche) en position de travail correct. C'est un procédé qui ne réclame pratiquement aucune opération de finition. Il présente une productivité élevée (nettement supérieure à celle du manuel à l'arc). Mais le fait que l'intensité de soudage soit liée au débit du fil électrode, entraîne certaines difficultés quant au choix des paramètres de soudage. Aussi, l'opération de soudage ne peut être effectuée à une trop grande distance de la source du courant à cause de l'alimentation en fil électrode.

2°) Choix du gaz protecteur.

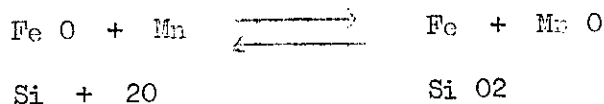
La protection du bain de fusion est assurée principalement par un gaz inerte (argon) ou un gaz actif (CO₂) (voir tableau (7. III.)).

L'argon est un gaz inerte beaucoup plus cher que le CO₂ et n'est utilisée que pour les constructions très soignées et s'avère moins rentable dans notre cas de construction. Le CO₂ présente l'avantage d'être plus lourd et arrive ainsi à chasser les gaz comme l'hydrogène, l'azote et l'oxygène dont les effets sur la qualité de la soudure ne sont point favorables. Il possède aussi une chaleur volumique élevée qui est très utile car elle permet un refroidissement rapide de l'ensemble torche et fil électrode et le refroidissement à l'eau n'est plus nécessaire comme dans le cas de l'argon.

Cependant, le CO₂ exige certaines précautions d'ordre métallurgiques qui sont dues à son caractère actif. En effet, à haute température (4.000°), le CO₂ se décompose en donnant le monoxyde de carbone et de l'oxygène atomique très avide du fer (Fe).



Il va falloir donc, empêcher la formation de l'oxyde de ferreux Fe O par l'adjonction des éléments comme le manganèse (Mn) et le silicium (Si) qui sont plus avides de l'oxygène que le fer. Ces éléments sont apportés par le métal du fil électrode.



3°) Choix du fil électrode.

Comme nous l'avons vu, la présence du Mn et du Si dans le métal d'apport est indispensable pour neutraliser les effets de l'oxygène sur le fer. (éléments désoxydants).

Donc, la teneur en ces éléments doit être relativement élevée sans que pour autant elle entrave la soudabilité (surtout le Si).

Le fil électrode sera donc en acier faiblement allié au manganèse tout comme le métal de base. Il présentera alors presque la même composition chimique et par suite, une homogénéité des propriétés mécaniques du joint et des pièces.

Le fil retenu est en acier 12 M8 selon la norme Française de composition chimique :

ELEMENTS	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
%	0,12	1,5 1,90	0,60 0,80	0,20	0,30	0,03	0,03

Ce fil contient 0,30 % de Ni et 0,30 % de Cr dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques et surtout les résiliences. Les résiliences sont garanties à (- 20° C).

Tableau [7.11]. Gaz de protection en soudage MIG ou MAG.

GAZ		FIL	METAL DE BASE	OBSERVATIONS.
Composition	Caractère			
Argon	inerte	comme métal de base.	Non ferreux.	Forte intensité.
Ar + Helium 25/75 ou 50/50	inerte	Comme métal de base.	Al. et ses alliages. Aciers INOX austénit. Aciers fortement alliés. Aciers à 18% Cr	Fortes épaisseurs transfert par polarisation Est seulement utilisé comme protection auxiliaire.
Argon impur + H ₂ .	réducteur.		Alliage Ni. Cr. Fe.	
Ar + 1% O ₂	Très légèrement oxydant.	Fil plus chargé en désoxydant.	Aciers austénitiques.	Peu employé.
Ar + 3% O ₂	Légerement oxydant	lorsque la teneur en O ₂ croît	Aciers au Ni-Cr.	Aciers ferritiques à températures de service inférieures à 350°C ou aciers austénitiques.
Ar + 3,5% O ₂	=	Fil désoxydant	Aciers non alliés et alliés ferritiques	Soudage MIG. avec arc court ou long.
Ar pur ou brut + 5% à 10% O ₂	=	=	Quartz pour chaudière.	Peu de projections. Permet des vitesses élevées.
CO ₂	Oxydant	Fil désoxydant Si ≈ 1% Mn ≈ 1,5%.	Aciers non alliés. Faiblement alliés	Arc court ou très court. Soudure de faibles épaisseurs.
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxydant	Fil désoxydant	Aciers à Carbone. Faiblement alliés	Arc court ou long. Soudure en toute position Très bonne compatibilité des soudures.
CO ₂ + 10 à 20% O ₂	Oxydant.	Fil chargé en désoxydant.	Aciers non alliés.	Fortes épaisseurs. Formation d'une pellicule de lattes.

III) CÁLCUL DES REGIMES DE SOUDAGE.

1°) Paramètre de soudage

L'intensité, la tension,, le diamètre du fil, la vitesse de soudage, la longueur libre du fil électrode et la température de préchauffage sont les paramètres principaux importants qui régissent l'exécution d'un cordon de soudage.

Les défauts de fusion ou de pénétration ont souvent pour cause : une intensité faible (trop faible), un avancement rapide du fil électrode, un diamètre trop important ou une mauvaise préparation des chanfreins. L'intensité joue aussi sur la forme du cordon : courbé, plat ou concave selon qu'elle est supérieure égale ou inférieure à l'intensité critique de soudage.

La tension fait varier la forme de la pénétration de la soudure dans la pièce et le contour du cordon. En effet, une tension élevée donne un cordon large et plat, alors qu'une tension faible donne une pénétration très profonde (la figure 5 (4.III.) donne la variation de la tension en fonction de l'intensité au soudage automatique sous flux).

La vitesse du soudage a un effet important sur la largeur de la soudure : une vitesse rapide traduit par un cordon plus étroit et plus saillant. Elle améliore le rendement du procédé, mais elle est limitée à cause de l'apparition de morbure et de surépaisseurs excessives du cordon. Elle influe aussi sur le retrait transversale. Plus elle est élevée (soudage automatique et semi-automatique), plus le retrait est réduit. (de moitié dans le cas d'un cordon réalisé en une ou deux passes) par rapport à celui réalisé par soudage manuel. (vitesse faible).

Une augmentation de la longueur libre du fil électrode provoque un échauffement accru du fil (effet soule) et par conséquent le taux de fusion est plus rapide. Il faut donc éviter l'emploi de fils fins ayant une forte résistivité dans le cas du soudage avec fortes intensités (soudage automatique sous flux en poudre).

Contrairement, en soudage semi-automatique avec électrode métallique, l'emploi de fils fins présentent l'avantage de permettre une bonne régulation de l'arc.

On constate aussi que pour un courant de soudage et une longueur d'arc constant, la vitesse de fusion (g/mn) est une fonction croissante de la

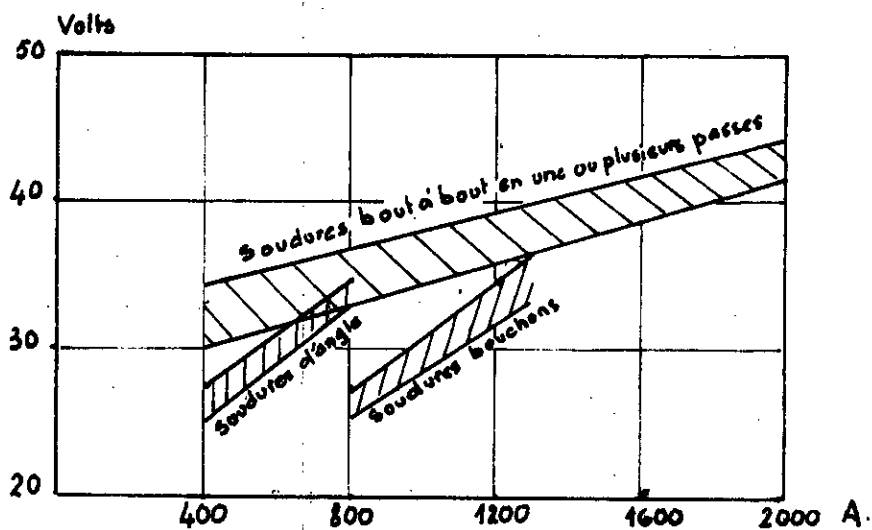


Fig. 5. [4. III] : Variation de la tension utilisée en fonction de l'intensité en soudage automatique sous flux.

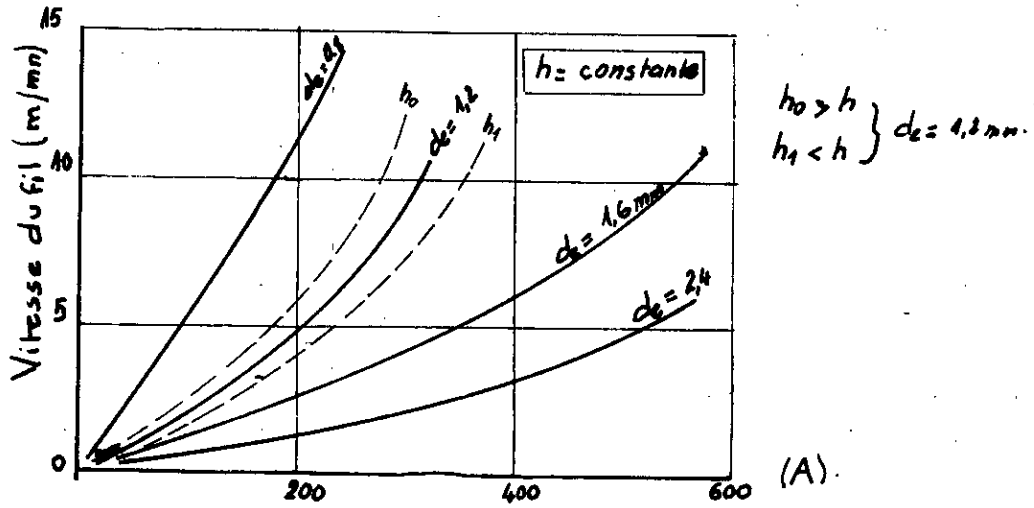


Fig. [6.11] : Relation entre la vitesse du fil et le courant de soudage
Fil à 1% Si et 1,5% Mn fondu sous CO_2 .

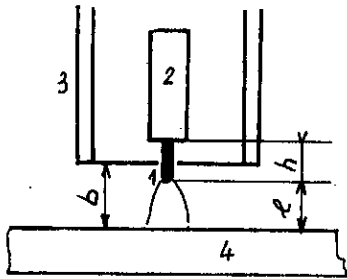


Fig. 7.

- 1: le fil-électrode.
- 2: tube-contact.
- 3: buse.
- 4: pièce à souder.

$$15 \leq b \leq 25 \text{ mm.}$$

l : longueur de l'arc.
 h : longueur libre du fil.

longueur libre h . (voir figure 6, III), il en résulte que cette longueur est un paramètre de réglage à prendre en considération lors du soudage. Ainsi l'on peut dire que les fils fins se comportent, à forte vitesse, comme les gros fils, à faibles vitesses.

2°) Température de préchauffage.

Il s'agit de la température minimale T_p à laquelle il faut chauffer les pièces avant de les souder dans le but d'améliorer la qualité de la soudure voir même d'éviter les défauts.

Pour un acier de composition donnée, les propriétés des assemblages soudés dépendent principalement de celles de la zone thermiquement affectée. Dans le cas des aciers au carbone, c'est le pouvoir trempant de cette zone qui conditionne la soudabilité (nous avons vu au chapitre II.; l'influence des éléments d'alliage sur le pouvoir trempant de l'acier) pour la plupart des procédés à l'arc.

Si les structures métallurgiques obtenues dans la zone thermiquement affectée sont satisfaisantes, il n'est pas nécessaire de prendre des précautions particulières en vue de réaliser la soudure. Sinon, le préchauffage s'impose.

Avant d'entreprendre le calcul de cette température, ajoutons que cette température ne dépasse jamais 300°C auquel cas de rayonnement des pièces rend le soudage particulièrement difficile. En pratique, elle se limite à 250°C .

Nous disposons de plusieurs moyens de calculer la température de préchauffage. Une, basée sur la fixation de la durée de refroidissement (valeur limitée) pour laquelle les structures de la zone thermiquement affectée sont satisfaisantes.

Les autres sont basées sur la notion de carbone équivalent (méthodes empiriques). Nous retenons pour nos calculs, la méthode parue dans le cours de Mr. CHALISOV "Métallurgie de la soudure" : le cours est : soudabilité des aciers faiblement alliés. Cette méthode tient compte du carbone équivalent et de la sévérité thermique du cycle par introduction dans les formules des épaisseurs des pièces.

La contribution des éléments d'alliage sur le pouvoir trempant de l'acier (influence sur la soudabilité) est donc de par $(C_e) = C + \frac{Mn}{9} + \frac{Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 Me}{90}$ (%)

Pour notre acier : C = 0,12 % - Mn = 1,5 % - Cr = 0,3 % - Ni = 0,30%

$$Mo = 0 \% / (C) = \frac{0,12}{9} + \frac{1,5}{9} + \frac{0,3}{9} + \frac{0,3}{18} + 0 = 0,336 \%$$

La contribution de la sévérité thermique du cycle et le carbone équivalent est donnée par : $(C) (1 + 0,005 e) (\%)$ où est l'épaisseur des pièces $e = 16 \text{ mm}$.

Si le (C_e) est supérieur à $(0,40 \%)$, le préchauffage devient nécessaire. Nous calculons alors la température T_p de préchauffage à l'aide de la formule $T_p = 350 \sqrt{(C_e) - 0,25}$

Si le carbone équivalent (C_e) est inférieur à $(0,40 \%)$, le préchauffage n'est pas nécessaire. Dans notre cas, (C_e) est égal à : $336 (1 + 0,005e) = 0,336 (1 + 0,005 + 16)$.

$(C_e) = 0,36 \%$: inférieur à $0,40 \%$, le préchauffage n'est pas nécessaire. Ainsi, le soudage se fait sans préchauffage des tôles.

3°) NATURES DES COURANTS DE SOUDAGE.

Le courant de soudage peut-être continu alternatif.

Le courant continu donne un arc très stable qui s'amorce facilement. Néanmoins quand le soudage s'effectue à de fortes intensités (600 A et plus). L'arc est perturbé par le champ magnétique induit car il devient très difficile de le concentrer au point voulu. On serait obligé de tenir l'arc aussi court que possible et ceci influe sur la longueur libre de l'électrode et posera ensuite des difficultés de régulation d'arc en soudage automatique. Mais il reste très employé de par l'avantage de la polarité. En effet, du fait que sa polarité peut être directe ou inverse, selon que le fil - électrode est la cathode l'anode - offre un plus grand champ d'emploi dans les cas où l'on cherche la facilité de fusion de la pièce de l'électrode.

Si l'on choisit la facilité de fusion de la pièce, cette dernière sera l'anode (positive) car elle est plus chaude (polarité inverse) et en plus l'arc aura une action décapante sur les bords à souder. Ceci présente donc tous les avantages pour être utilisé en soudage automatique sous CO₂ avec électrode fusible : le fait que le fil fond moins vite que la pièce permet à l'opérateur de mieux observer le bain et de mieux contrôler sa vitesse de soudage. (bonne régulation)).

Le courant alternatif s'adapte aux fortes intensités car le problème du magnétique n'a pas lieu. Le seul inconvénient majeur réside au fait qu'à chaque alternance l'arc s'éteint et se rallume provoquant ainsi son par refroidissement. Mais on peut y remédier, en partie, en augmentant la fréquence de distribution de 50 Hz à (150 450) Hz.

Comme nous prévoyons le soudage automatique sous flux solide d'utiliser des intensités dépassant de beaucoup les 600 A, nous sommes contraints d'écartier le courant continu et d'opter pour le courant alternatif.

4°) Calcul des régimes de soudage.

a - Soudage automatique sous flux solide.

Nous allons déterminer les régimes optimaux pour la soudure bout à bout et à plat des joints en V dont les dimensions sont représentées sur la figure 6a. Le soudage se fait avec support en cuivre, ce qui nous permet de réaliser en une seule passe, le remplissage du chanfrein.

Nous calculons d'abord, l'air transversale du cordon que nous devons avoir après l'opération de soudage (voir figure 6b).

$$F_c = (b \times c) + (e - s)^2 \operatorname{tg} 15^\circ + \frac{2}{3} g.l \text{ où } b \text{ est l'écart entre les tôles}$$

$$b = 3\text{mm}, c = \text{épaisseur des tôles}, s = \text{méplat} = 4\text{mm}, 15^\circ = \text{angle du } \frac{1}{2} V.$$

$$= 16 \text{ mm.}$$

$$l = \text{largeur maximale du cordon} = 15\text{mm}, g = \text{renforcement du cordon, est pris égal à } 2\text{mm.}$$

F_c est donc égale à : $(3 \times 16) + (16 - 4)^2 \operatorname{tg} 15^\circ + \frac{2}{3} g.l = 48 + 37,5 + 20 = 105,5 \text{ mm}^2$. Ainsi, il faut donc qu'une passe dépose $105,5 \text{ mm}^2$ au minimum.

Pour cela, nous sommes contraints d'utiliser un fil-électrode de fort diamètre et par suite une forte intensité de courant.

Nous prenons un diamètre $D_e = 6\text{mm}$ (arbitrairement) et une intensité $I_s = 1200 \text{ A}$. Nous vérifions, alors la densité de courant j dans le fil. Cette densité est donnée

$$\text{par } j = \frac{4 \times I_s}{3,14 \times D_e^2} = \frac{4 \times 1200}{3,14 \times 36} = 42,44 \text{ A/mm}^2$$

j est bien admissible car elle est comprise entre $(25 \text{ et } 45) \text{ A/mm}^2$ (tableau 8.III).

La tension optimale de soudage est liée à l'intensité et le diamètre du fil-électrode par la relation : $v_s = 20 + \frac{0,05}{D_c 0,5} I_s \pm 1 = (V)$.

$$\text{Ce qui nous donne une tension de soudage de : } 20 + \frac{0,05 \times 1200}{695} \pm 1 = 44V.$$

Le tableau (8.III) nous donne les valeurs de la vitesse admissibles pour l'intensité de soudage choisie. Pour $I_s = 1200 \text{ A}$, la vitesse V_s varie entre les limites

$$\left(\frac{25\ 000}{I_s} \text{ à } \frac{30\ 000}{I_s} \right) \text{ soit } v_s = (20,83 \div 25) \text{ m/h.}$$

Nous avons intérêt à poursuivre les calculs en considérant la plus grande vitesse, soit $v_s = 25 \text{ m/h}$, pour pouvoir remplir le chanfrein sans trop chauffer les pièces (énergie courante plus faible) et sans qu'il y ait dépôt excessif de métal.

L'aire du cordon déposé est donnée en fonction du coefficient de fusion af , du courant de soudage I_s , de la densité du métal et de la vitesse de soudage.

$$F_d \text{ (cm}^2\text{)} = \frac{af \times I_s}{m \times v_s}, \text{ } af \text{ est donné par l'abaque (9.III) courant alternatif.}$$

Nous ne tenons pas compte des pertes de métal pendant la fusion, car elles sont négligeables en soudage automatique sous flux, et nous pourrions affirmer que le coefficient de fusion est égal au coefficient de dépôt du métal. S'il s'agissait d'un autre procédé de soudage, les pertes seraient importantes (8 à 15%) et il serait imprudent de les négliger.

$ad = (0,75 \text{ à } 0,92) af$.

Pour notre cas, $af = ad = 17 \text{ g/A.h}$, $m = 7,8 \text{ g/cm}^3$, $v_s = 2500 \text{ cm/h}$.

F_d est égale alors à : $\frac{17 \times 1200}{7,8 \times 2500} = 104,6 \text{ mm}^2$

Nous voyons donc que l'aire de la section transversale du cordon effectivement déposée est pratiquement égale à celle calculée à partir de la géométrie du chanfrein F_c qui assure la résistance du joint.

À titre d'indication, nous calculons l'apport calorifique Q (énergie courante)

$Q = \frac{I_s \times v_s \times n}{v_s}$ où n est le rendement de l'arc = 0,90.

$Q = \frac{1200 \times 44 \times 0,30}{2500} \times 3600 = 58430 \text{ j/cm}$.

Nous calculons ensuite, la vitesse de défilement du fil qui assure le remplissage du chanfrein. Celle-ci est donnée en fonction de la densité du courant, du coefficient de dépôt et de la densité du métal.

d'après la relation : $V_d = \frac{j \times af}{m}$ (cm/h).

avec : j calculée plus haut et vaut $42,44 \text{ A/mm}^2 = 4244 \text{ A/cm}^2$

af vaut 17 g/A.h .

$m = 7,8 \text{ g/cm}^3$

d'où $V_d = \frac{4244 \times 17}{7,8} = 9250 \text{ cm/h}$ soit $V_d = 1,54 \text{ m/mm}$.

Enfin, nous vérifions la forme du cordon. celle-ci peut être, une forme convexe ou bombée, plate, et concave, selon l'intensité du courant critique : I_{cr} . Selon le type de joint et le type de sollicitation, telle ou telle forme est recherchée (voir chapitre défauts et contrôles des soudures).

Le courant critique est défini, par expérience, égal à

$I_{cr} = I_0 + C \cdot v_s$ où $I_0 = 350 \text{ A}$ et C est un facteur qui est fonction du diamètre du fil-électrode (tableau 8.III). Pour $D_e = 6 \text{ mm}$, m est environ 13 A.h/m , $v_s = 25 \text{ m/h}$.

d'où $I_{cr} = 350 + 13 \times 25 = 675 \text{ A}$ qui est inférieur à $I_s = 1200 \text{ A}$: le cordon est, comme il a été supposé, bombé (abaque 10.III).

Tableau (8.III) donnant j (A/mm^2), Λ ($A.m/h$), C ($\frac{A.h}{m}$), en fonction de D_e .

D_e (mm)	2	3	4	5	6
j (A/mm^2)	65/200	45/90	35/60	30/50	25/45
$\Lambda/1000$ ($\frac{A.h}{h}$)	8/12	12/16	16/20	20/25	25/30
C ($\frac{A.h}{m}$)	2	4,5	7	10	13

b - Choix du régime de soudage semi-automatique sous CO_2 .

Les calculs de résistance faits au paragraphe (V 4°) du chapitre II, sont relatifs à des cordons d'angle exécutés sans pénétration sur des tôles non chanfreinées. La cathète minimale K assurant la résistance est de 6mm. (figure 7) L'épaisseur des tôles est égale à 12mm partout. Sur ces bases nous avons déterminé le diamètre du fil électrode D_e , le courant de soudage I_s , le voltage optimal U_s , la vitesse de soudage v_s , le débit du gaz CO_2 , le nombre de passes p et la vitesse de dévidage du fil V_d . Les valeurs adoptées sont tirées de : Technologie du soudage de AKOULOV. (1977).

- Le diamètre du fil-électrode est $D_e = 2mm$. (fil-fin).

- Le courant de soudage $I_s = 300 A$ (courant continu en polarité inverse) ($j = 95,5 A/mm^2$).

- La tension de soudage $v_s = 20 + \frac{0,05 \times 300}{2} = 30$ volts.

- La vitesse de soudage $v_s = 29 m/h = 2900 cm/h$.

- Le débit de gaz $CO_2 = q = 17l/mm$.

- La vitesse de dévidage : $V_d = \frac{4 \times I_s \times a}{3,14 \times 0,2^2 \times m}$

où a = coefficient de fusion du métal d'apport lu sur l'abaque (9.III) "courant continu, polarité inverse"

$$a = 13,8g/A.h \text{ pour } I_s = 300A, m = 7,9 g/cm^3.$$

$$d'où V_d = \frac{4 \times 300 \times 13,8}{3,14 \times 0,04 \times 7,8} = 16896cm/h = 169m/h. = 2,82m/mm.$$

- La forme des cordons est donnée par $I_{cr} = 350 + c = v_s$ où $C = 2 A.h/m$ pour $D_e = 2mm$ (tableau 8.III). et $v_s = 30m/h$. $I_{cr} = 350 + 2 \times 30 = 410A$. I_{cr} est supérieur à I_s : le cordon sera concave c'est à dire il convient bien pour les joints d'angle car il réduit l'effet de concentration de contraintes.

- Le nombre de passes p est 1 : car l'aire du cordon déposé est $F_d = \frac{a \times I_s}{m \times v_s} = \frac{13,8 \times 300}{7,8 + 2900} = 18,3mm^2$ et l'aire du cordon calculé est $F_e = \frac{K^2}{2} = \frac{6 \times 6}{2} = 18 mm^2$
 et $p = \frac{F_c}{F_d} = \frac{18}{18,3} = 0,98$ soit $p = 1$.

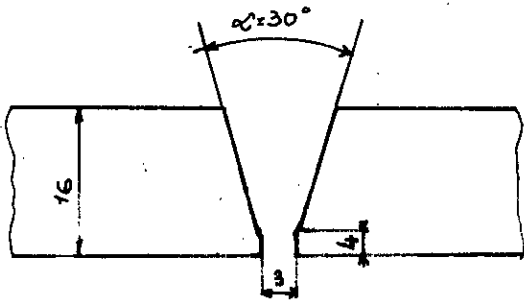


Fig. 6a. Géométrie du chanfrein en V.

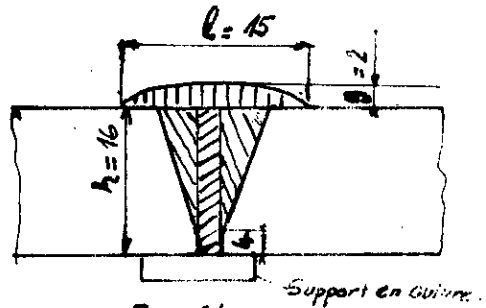
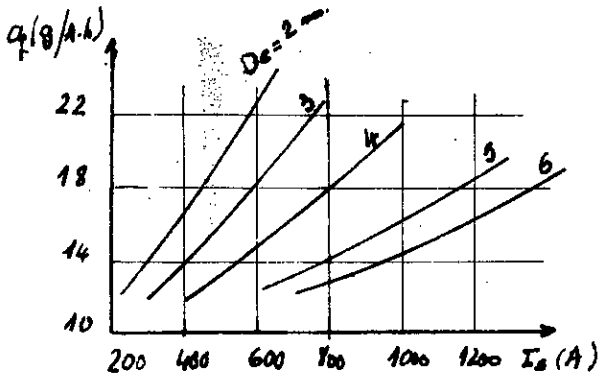
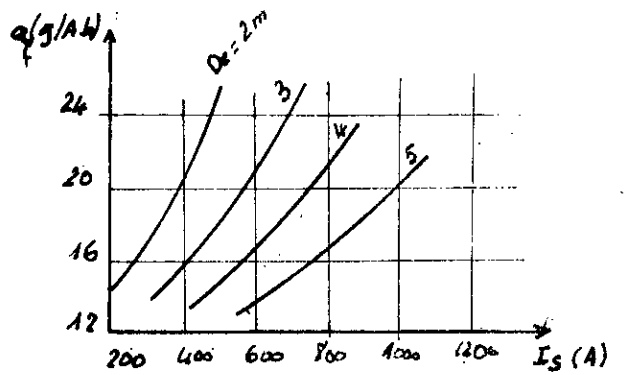


Fig. 6b.

$$F_c = (3 \times h) + (h - 4)^2 \times 15 + \frac{1}{3} \pi b^2 \quad (105,5 \text{ mm}^2)$$



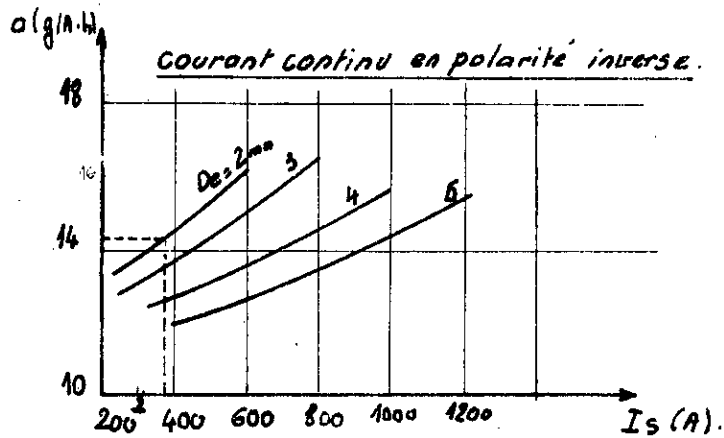
Courant alternatif



Courant continu en polarité directe.

Abaques [9. III]

coefficient de fusion "alpha" en fonction du régime de soudage.



Courant continu en polarité inverse.

QUATRIEME CHAPITRE

I. DEFAUTS DES JOINTS SOUDES.

Les principaux défauts rencontrés en pratique sont dus à une exécution défec- tueuse des joints soudés. Parmi ces défauts, on trouve les inclusions gazeuses, les inclusions du laitier; les manques de pénétration, les fissurations à chaud et à froid, les sillons et les retassures de cratère. En plus de ces défauts, les cordons peuvent être trop bombés, trop étalés, ou irréguliers.

Nous allons reprendre chaque défaut tout en indiquant les causes et les moyens de les éviter.

1°) Les inclusions gazeuses.

Elles sont dues aux gaz résultant des réactions chimiques dans le métal des pièces, dans le métal d'apport et dans le flux et à l'humidité des pièces et du flux. Pour les éviter, il faut adopter comme métal de base, un acier calmé et sécher le flux à (300/350°C) avant son emploi.

2°) Les inclusions du laitier. (inclusion solide)

Ce sont généralement les restes de laitier qui se disposent entre les passes. Elles sont dues à un mauvais nettoyage des cordons, une préparation inadéquate des pièces, une technique de soudage défectueuse ou des morsures en angle aigu, localisées sur les faces de chanfrein et difficiles à nettoyer.

Pour les éviter, il faut effectuer un nettoyage convenable des cordons avec des outils appropriés, saigner la préparation des bords, bien accoster les pièces et bien choisir le diamètre du fil électrode.

3°) Les manques de pénétration.

Ils sont caractérisés par l'absence de métal à la racine des chanfreins. Leurs principales causes, si le mode de soudage est bien choisi, peuvent être une utilisation d'électrodes de diamètres trop importants, une intensité de courant trop faible, une préparation inadéquate du chanfrein et une défectueuse position relative des pièces.

Pour les éviter, il faut prévoir une mise en oeuvre correcte des procédés de soudage adoptés, un accostage soigneux des pièces à assembler.

.../...

Le support de bain en est un bon moyen quand il est possible.

4°) Manques de fusion.

Là aussi, les paramètres de soudage (intensité, vitesse de soudage) influent sur la fusion. Encore, faut-il les choisir (calculer) correctement pour obtenir une bonne fusion.

5°) Défauts des surfaces.

Les défauts tels que : sillons, morsures, caniveaux et retassures de cratères sont principalement dûs à une mauvaise appropriation des conditions de soudage, soit que l'intensité du courant est mal adaptée au diamètre de l'électrode, soit que la position de l'électrode est défectueuse, soit que la température des pièces est trop élevée pendant le soudage ou qu'il se produit une interruption soudaine de l'arc électrique. Ces défauts apparaissent surtout quand l'exécution des cordons est très difficile.

6°) Fissurations à froid.

L'apparition de ce genre de fissuration est conditionnée par la présence de structure fragilisable, par la présence d'hydrogène et par l'état de contrainte de la zone thermiquement affectée.

Pour éviter la présence d'une structure fragilisable, il faut adapter judicieusement les paramètres de soudage à la composition du métal de base et du fil-électrode. La quantité d'hydrogène, dissout dans le métal fondu, peut être sensiblement diminuée par un choix correct du procédé de soudage et du flux (gaz protecteur), par un séchage du flux et des pièces ainsi que par l'élimination de la rouille des bords. Elle peut également être réduite, en augmentant la durée de refroidissement par préchauffage (éventuellement un post chauffage).

L'apparition des contraintes résiduelles directes est inévitable dans les assemblages soudés. On adopte alors des séquences de soudage pour abaisser leurs niveaux. Il est possible de les réduire en évitant la présence d'entailles dans la zone thermiquement affectée. Ainsi, on peut limiter leur risque d'apparition en remplaçant un assemblage par cordons d'angle par un assemblage bout à bout.

7°) Fissurations à chaud.

On distingue les fissures qui apparaissent dans le métal fondu et telles qui apparaissent dans le métal de base non fondu.

La cause principale des fissurations à chaud dans le métal de base non fondu est la solidification tardive des composés à basses températures de fusion, associée à leur manque de ductilité à chaud. (soufre, phosphore).

Le moyen de les éviter est de contrôler la teneur du métal de base en ces éléments et d'utiliser des aciers courants de construction alliés au manganèse tels que $\frac{Mn}{S}$ soit supérieur à 30 (pour not : acier 12 MS 6.08 $\frac{Mn}{S} = \frac{1,5}{0,0035} = 43 > 30$), Car le manganèse agit comme désulfurant et déphosphorisant.

Dans le métal fondu, leurs causes principales est un manque de ductilité à chaud de ce métal lorsqu'il subit les effets des retraits. A ce manque de ductilité, s'ajoutent des facteurs métallurgiques tels que les ségrégations au cours de la solidification, des transformations structurales d'une part et d'autre part, des facteurs géométriques et thermiques tels que le volume du bain, la limite d'élasticité du métal déposé, le degré de bridage du joint et la triaxialité des contraintes. Il faut donc utiliser des flux basiques qui ont un plus grand pouvoir d'épuration du bain de fusion, et bien adapter les paramètres de soudage de telle façon à obtenir un rapport de la pénétration P à la largeur L de la zone fondue inférieure ou égale à 1. En effet, on a constaté que pour un rapport P/L plus grand que l'unité, le risque de fissuration est plus important.

8°) Formes des cordons.

- Des cordons trop bombés sont le signe d'une intensité trop faible du courant de soudage.
- Des cordons trop étalés indiquent que l'intensité du courant est trop importante et que les pièces sont surchauffées.
- Des 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 au métal de base, d'une mauvaise conduite du laitier ou d'une mauvaise longueur d'arc.

L'obtention d'un cordon de bonne forme repose sur le bon choix des paramètres de soudage, et sur la manière d'effectuer les dernières passes dans le cas du soudage multipasses.

II. CONTROLE DES JOINTS SOUDES.

Le contrôle a pour but essentiel de garantir l'obtention de joints soudés de la qualité requise. Il porte sur l'étude de très près de toutes les phases et de toutes les variables du cycle de réalisation. (projet et les matériaux, main-d'œuvre, technique d'exécution, appareils, et les examens direct sur le joint achevé).

Le contrôle comporte traditionnellement trois phases bien distinctes :

- Contrôle avant le soudage.

.../...

- Contrôle pendant le soudage.

- Contrôle après le soudage.

1°) Contrôles avant le soudage.

On commence par examiner le projet, afin d'éliminer dès le départ les causes d'insuccès possibles. Ainsi, on vérifie la soudabilité des aciers sur des assemblages conçus pour respecter au mieux les conditions de réalisation réelles de la construction étudiée, la préparation des bords, le procédé de soudage, la position et l'accessibilité des joints et la main-d'oeuvre (qualification).

2°) Contrôles pendant le soudage.

Pendant le soudage, ils ont pu 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. Ces contrôles permettent de diminuer fortement les risques d'obtention de défauts (inclusion gazeuses et de laitier, les manques de fusion et de pénétration ainsi que les retassures de cratère). Il est donc nécessaire d'avoir un service de "surveillance" à la construction en cours de soudage.

3°) Contrôles après le soudage.

a) Contrôles externes.

Après le soudage, ils ont pour but de s'assurer que les joints ne présentent pas de défauts apparents et de vérifier que leur aspect extérieur est adapté à la destination et au type de sollicitations de la construction. Ils s'attachent à déceler particulièrement les défauts de fusion ou de pénétration, les caniveaux et les morsures, ils permettent également de contrôler les tolérances sur les dénivellations, les brisures locales, les pentes de raccordement, les surépaisseurs et les manques d'épaisseurs.

Ils portent également sur l'aspect des cordons, l'importance des stries et les angles de raccordement des cordons aux pièces ainsi que sur les fissurations apparaissant en surface et dont la détection nécessite l'emploi d'un liquide pénétrant. Dans le cas des assemblages par cordons d'angle, l'examen (visuel) permet de vérifier si la forme concave ou convexe des cordons est adaptée au type de sollicitations du joint.

b) Contrôles internes.

Pour déceler les défauts internes comme les inclusions de laitier, les soufflures, les manques de pénétration, etc....., on fera appel aux techniques d'investigation désignées sous le nom de "contrôles non destructifs".

Les méthodes de contrôle non destructif les plus employées sont :

- Le contrôle radiographique par les rayons X ou gamma.
- Le contrôle par ultrasons.
- Le contrôle magnétique.
- Le contrôle par ressuage.

c) Lors du contrôle radiographique (essai radiographique), on fait passer à travers le joint soudés des rayons X ou gamma et on enregistre les résultats sur des films ou sur des écrans de sensibilité convenable.

Le degré d'absorption des rayons, au cours de leur passage à travers le matériau du joint, dépend de la compacité de ce dernier, à des variations de compacité du matériau correspondent des variations du degré d'absorption des rayons qui le traversent et des variations de clarté des images obtenues sur les films. Ainsi, par exemple, un trou dans le joint, figure sur le film comme une tache plus foncée que le fond du film.

On peut également mettre en évidence les hétérogénéités des matériaux des joints soudés.

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

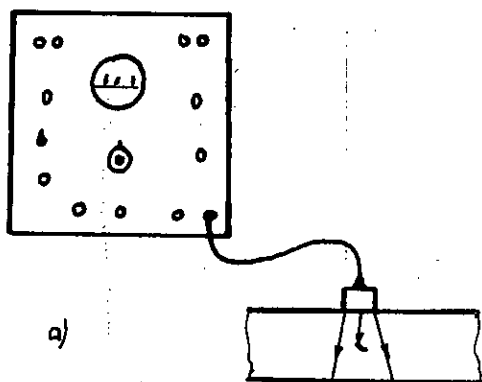
- D'un accès pour l'appareil émetteur de rayons X ou pour la source de rayons gamma.
- D'une vue dégagée de la soudure, à partir de la source.
- D'un emplacement disponible pour les films et les écrans renforçateurs en dessous de la soudure.

d) Lors des 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 ont des fréquences très élevées (1 à 5 MC/S) pour le contrôle des soudures.

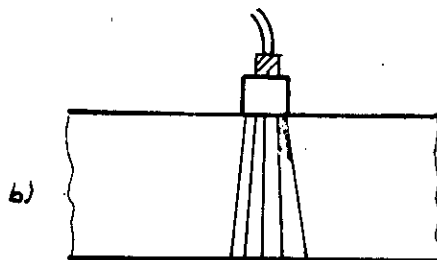
Aux variations des propriétés acoustiques du métal des joints soudés, correspondent des réflexions partielles ou totales de l'énergie ultrasonore qui est recueillie, sous forme d'échos, pour un récepteur. Ces échos permettent de détecter les défauts de soudures, de même que les variations significatives de la compacité du métal des joints.

Dans les essais par ultrasons, il faut que le palpeur puisse être déplacé sur une surface régulière, accessible au droit du joint ou bien de chaque côté de celui-ci (figures 1.IV).

Les soudures bout à bout et les soudures d'angle, qui n'intéressent pas la totalité de l'épaisseur des pièces, sont difficiles à contrôler par ultrasons à cause des difficultés d'interprétation des résultats.

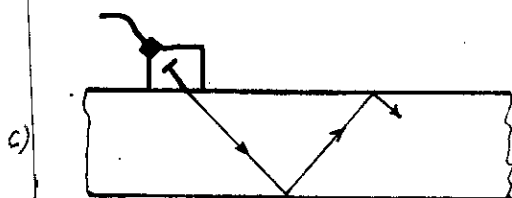


a) Sur l'écran de l'appareil chaque défaut fait apparaître un écho compris entre l'écho de départ et l'écho de fond.

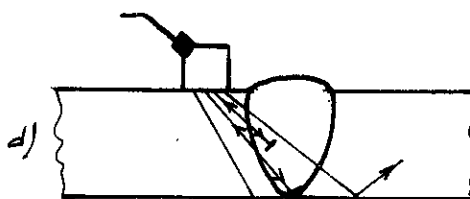


b) La divergence du faisceau ultrasonique dépend du diamètre de la sonde et de la fréquence des ultrasons.

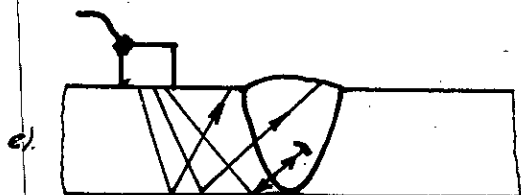
Fig. [1.IV]. Schéma de principe du contrôle par ultrasons



c) Sonde angulée et parcours incliné des ultrasons.



d) Sonde angulée en position pour l'examen de la partie intérieure du joint.



e) La partie supérieure du joint est explorée par le faisceau réfléchi sur le fond.

Nous donnons ci-dessous les avantages et les inconvénients des contrôles par rayons X et gamma et par ultrasons.

TABLEAU. (1.IV).

	AVANTAGES	INCONVENIENTS
RX	<ul style="list-style-type: none"> - Radiographies contrastées et de haute sensibilité. - Adaptation aisée des tensions d'alimentation aux différentes épaisseurs. - Facilité d'interruption du rayonnement. - Application possible à tous les matériaux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts d'investissement et de remplacement élevé. - Difficultés de transport, fragilité, encombrement important, poids croissant avec les épaisseurs à radiographier. - Nécessité d'une source d'énergie électrique. - Risques.
R.G	<ul style="list-style-type: none"> - Poids et encombrement relativement faibles. - Robustesse. - Bon pouvoir de pénétration - Possibilité d'introduction de la source à travers des orifices de faibles dimensions - Coûts d'investissement, de fonctionnement et d'entretien modérés. - Fonctionnement sans source d'énergie complémentaire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité moindre que celle des RX. - Impossibilité d'adapter le pouvoir de pénétration. - Rayonnement continu avec les risques qui en découlent - Diminution continue du pouvoir émissif de la source, nécessitant l'ajustement des temps de pose. - Durées d'exposition plus longues qu'avec les RX.
USON	<ul style="list-style-type: none"> - Equipement compact et portatif. - Absence des interruptions des autres travaux pendant le contrôle. - Disponibilité immédiate des résultats des essais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Haute qualification et expérience de l'opérateur pour l'interprétation des résultats. - Absence d'enregistrement des résultats d'essais.

c) Les essais magnétiques 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 contrôles utilisent un aimant et un produit magnétique en suspension ou non dans un liquide.

S'il existe des défauts dans le joint, le flux magnétique est dévié et on voit apparaître des lignes de flux qui permettent de localiser ces défauts.

L'essai est recommencé dans une autre direction (perpendiculaire à la première) pour s'assurer de la détection du maximum de défauts.

On utilise pour la distinction des lignes de flux de l'encre ou de la poudre magnétique étalées sur la surface.

f) Lors de ces essais, les figures et les cavités débouchant à la surface des pièces peuvent être détectées à l'aide d'un liquide qui y est étalé et qui pénètre dans ces défauts. Après avoir enlevé le 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 de cette façon de décoder, par mouillage, la présence et la forme des défauts.

Les liquides utilisés sont habituellement de teinte rouge ou fluorescents combinés à une poudre blanche (craie).

Ces essais exigent une préparation particulièrement soignée des surfaces, avec nettoyage, décapage chimique et sablage mettant à vif les surfaces.

4°) Essais mécaniques.

Ces essais ont pour but, d'une part de contrôler les assemblages au point de vue de leur résistance et de l'homogénéité de leurs caractéristiques et d'autre part, de vérifier que les procédés de soudage, les métaux de base et les métaux d'apport, ainsi que leur conditions de mise en oeuvre, ne peuvent être la cause de fissurations incompatibles avec le bon comportement en fatigue et la résistance ou la rupture fragile des constructions.

Les principaux types d'essais mécaniques sont : traction transversale, pliage, dureté, résilience, examen macrographique, fracture, fissuration à froid, fissuration à chaud, arrachement lamellaire.

Les éprouvettes destinées aux essais mécaniques sont extraites d'assemblages témoins qui doivent être réalisés de manière à reproduire aussi fidèlement que possible les assemblages réels. Il faut donc accorder une attention toute particulière à la nature du métal de base et du métal d'apport, aux conditions de soudage ainsi qu'aux régimes thermiques.

5°) Critères d'acceptabilité des défauts.

Une fois interprétés les résultats des contrôles, c'est à dire qu'on a défini la nature des défauts, le problème se pose de savoir si les défauts constatés peuvent être tolérés ou bien refusés.

Cela dépend de plusieurs considérations, entre autres, l'objet soudé, et les contraintes auxquelles il est soumis, les conditions de service, l'importance du coût de la construction, le danger et les conséquences de sa rupture éventuelle.

6°) Détermination de la qualité des joints.

Pour la détermination de la qualité des joints, on se base sur les recommandations de l'Institut International de la soudure qui envisage trois niveaux de qualification :

- Le niveau "a" ou qualité ordinaire : Cette qualité est admise pour les constructions dans lesquelles le risque de rupture fragile est négligeable et les conséquences sont sans gravité. Elle englobe toutes les constructions où les sollicitations sont statiques, les contraintes de service sont inférieures à $\frac{Re}{3}$ et où les épaisseurs des pièces soumises à la traction sont inférieures à 10 mm.
- Le niveau "b" ou qualité bonne : Elle est exigée pour les constructions dans lesquelles le risque de rupture fragile est peu important, les conséquences économiques de la ruine sont graves sans risques de pertes humaines. Le risque de rupture fragile est considéré comme peu important, si les contraintes de service sont inférieures à $\frac{2}{3} Re$, si les températures de service sont les températures ambiantes et si les épaisseurs sont inférieures à 40 mm.
- Le niveau "s" ou qualité s (spéciale) : Elle est exigée pour les constructions dans lesquelles le risque de rupture fragile est grand et les conséquences de la ruine en humains sont graves. Le risque de rupture fragile est considéré comme important si les contraintes de service atteignent ou dépassent $\frac{2}{3} Re$, si les températures de service sont les températures ambiantes et si les épaisseurs des pièces dépassent 40 mm.

Suivant la sévérité des sollicitations variables, on envisage trois niveaux de qualification spéciale :

- S₀ = Convient si les sollicitations variables sont faibles.
- S₁ = Convient si les sollicitations variables sont moyennes.
- S₂ = Convient si les sollicitations variables sont importantes.

Le tableau (2.IV) donne les conditions correspondants à chacune des qualités exigées pour un joint ou un assemblage.

Risque de rupture fragile	Sévérité des sollicitations variables.	Qualité exigée
Négligeable (conditions particulières impliquant la qualité "a").	Faible	a
Peu important (conditions particulières impliquant la qualité "b")	Faible	b
	Moyenne	s ₁
	Importante	s ₂
Important (conditions particulières impliquant la qualité "s")	Faible	s ₀
	Moyenne	s ₁
	Importante	s ₂

7°) Défauts admissibles.

a) Fissurations.

Elles sont liées à la qualité de la construction et leurs dispositions vis à vis des plans qui contiennent les contraintes de service.

Ainsi, elles peuvent être admises dans les zones comprimées, alors qu'il n'est pas toujours le cas pour les zones tendues à cause de leurs propagation pendant le service. Elles peuvent être acceptées pour la qualité "a" et parfois pour la qualité "b", par contre pour la qualité "s", il y a toujours lieu de les réparer.

b) Inclusions solides.

Leurs dimensions sont de l'ordre de 3 à 4 mm et ne posent pas de problèmes dans le cas de sollicitations statiques. Par contre, si les sollicitations variables sont sévères, elles peuvent causer les fissures de fatigue. (figure "2.IV")/

Si la qualité s₁ est exigée, on définit une longueur critique L₀ des inclusions à ne pas dépasser et par suite le défaut devient inacceptable.

Le tableau (3.IV) donne L_C en fonction des procédés de soudage et de la nature des enrobages ou des flux.

Procédé de soudage	L_C (mm)
Soudage manuel à l'arc	
- Électrodes basiques	25
- Autres électrodes	10
Soudage automatique sous flux	
- Flux basiques	25
- Autre types de flux	10
Soudage semi-automatique sous protection gazeuse	
- Fil fourré basique	25
- Autres fils fourrés	10
- Fil plein	10

Pour la qualité "s₂", les inclusions solides de moins de 5 mm de longueur sont admises, si le flux est basique. Elle est de 2 mm pour tout autre type de flux ou enrobage.

c) Les inclusions gazeuses.

Elles sont admises pour les qualités a, b, et s₀ des joints. Elles le sont aussi pour les qualités s₁ ou s₂ si leur concentration en surface resté inférieure à 3% (surface totale les inclusions divisée par la section longitudinale du joint de 150mm de longueur). Dans le cas où elles sont isolées, si elles sont groupées la limite est de 2%. Elles sont aussi admises quand la somme de leurs diamètres est inférieure à 3 mm.

d) Manques de pénétration.

Leurs critères d'acceptabilité sont basés sur le risque d'être à l'origine des fissures de fatigue.

Pour la qualité "a" des joints, leurs dimensions ne sont pas limitées. Les figures (3.IV) donnent les manques de pénétration admis h pour les assemblages bout à bout en fonction de la qualité requise.

Les valeurs admises sont multipliées par 3 pour les qualités b et s₀ et par 5 pour la qualité s₁, dans le cas de manques de pénétration internes et sont multipliées par 1,5 pour les qualités b et s₀, et par 2,5 pour la qualité s₁ dans le cas de manques de pénétration débouchant en surface.

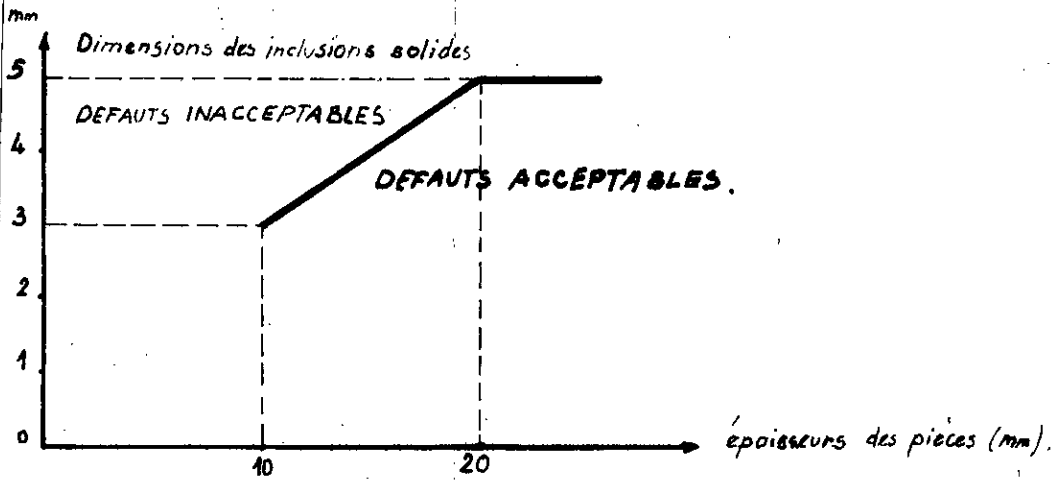


Fig. [20].

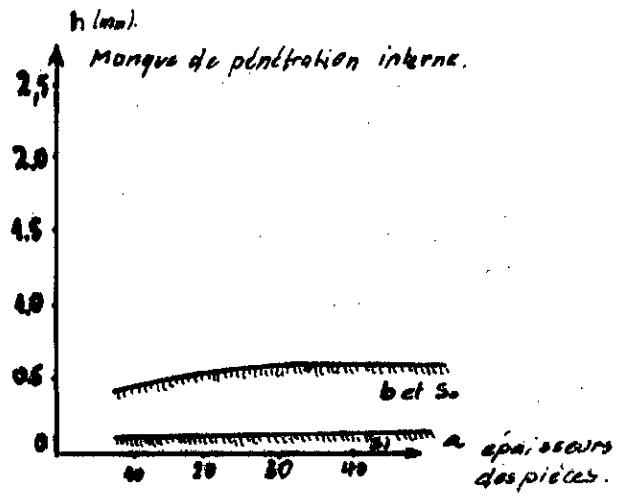
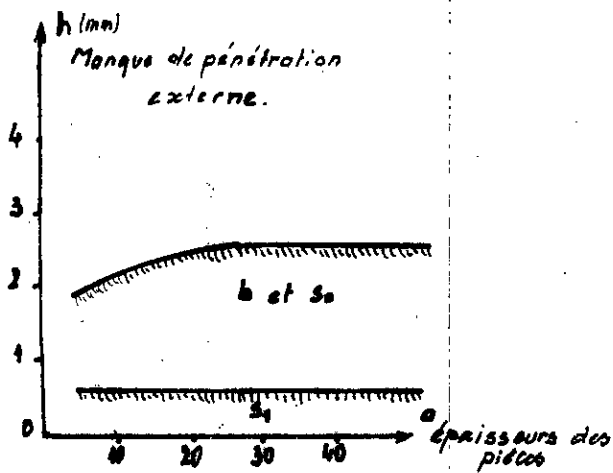


Fig [3. IV]

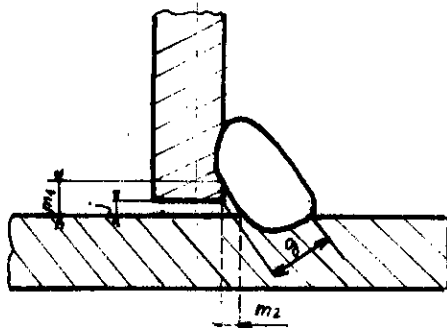


Fig. [4. IV].

Les manques de pénétration, pour les assemblages par cordons d'angle sont admis ou non selon les valeurs de m_1 et m_2 (voir figure "4.IV").

Dans le cas du soudage manuel à l'arc et du soudage semi-automatique sous protection gazeuse, on admet, pour les manques de liaison m_1 et m_2 ainsi que les jeux j , et les valeurs maximales données au tableau (4.IV) à suivant :

QUALITE	m_1	m_2	j
b s0	$\frac{g}{2}$ 2mm	$\frac{g}{2}$ 2mm	$\frac{e}{20} + 1$ (mm)
s1 s2	0	0	maximum 4 mm

Dans le cas du soudage automatique sous flux, aucun manque de pénétration n'est admis.

III. CHOIX DU MO DE DE CONTROLE POUR NOTRE CONSTRUCTION.

1°) Qualité exigée.

Le risque de rupture fragile est considéré comme peu important. En effet, notre métal de base a été choisi pour pouvoir travailler aux basses températures, la température d'exploitation minimale est de (-10°C), alors que la résilience à (-20°C) est de 4 daJ/cm² d'une part, d'autre part les contraintes de service sont plus faibles que $\frac{2}{3} R_c = 24 \text{ daN/mm}^2$ ($R_c = 36 \text{ daN/mm}^2$). D'après les calculs faits au chapitre II. Les risques de ruine de la construction peuvent entraîner des conséquences graves ainsi que des pertes humaines (éventuellement). Les sollicitations variables sont faibles. Ceci, nous donne une qualité exigée "b" (voir tableau 2.IV).

2°) Contrôles nécessaires.

La qualité "b" de la construction exige un certain nombre de contrôle. Il est exigé :

- Les contrôles visuels pour les deux types de joints. (bout à bout et par cordons d'angle).

- Les contrôles des matières réceptionnées : tôles, profilets, fils-électrodes.

Nous contrôlerons alors : la résistance à la rupture, la limite élastique, l'allongement en %, la résilience, la dureté et les teneurs en soufre et phosphore.

.../...

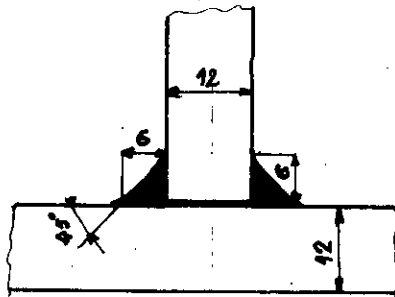
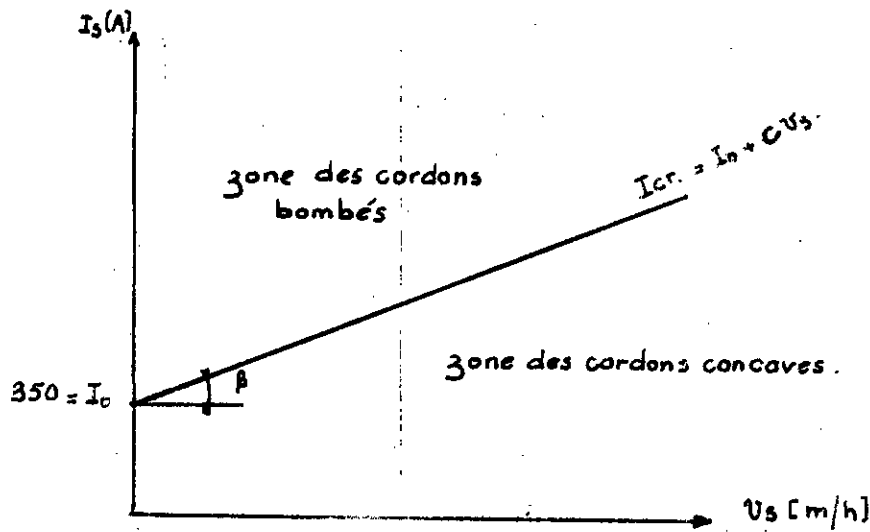


Fig. 7. Soudage des consoles par cordons d'angle.



Abaque [10. III]: Forme des cordons.

$\text{tg} \beta = C \text{ (A.h/m)}$. Si $I_s = I_{cr}$: cordons plats.

Nous contrôlerons aussi la nature du flux (basique, acide,...) et sa granulométrie. Elles doivent répondre aux exigences techniques du chapitre II. Pour se faire, la réception de ces produits doit être obligatoirement accompagnées des certificats où sont mentionnées des qualités requises.

- Les contrôles des joints se feront par ultrasons dont les avantages et les inconvénients ont été confrontés à ceux des autres modes au tableau (1.IV).

Pour la qualité b, les ultrasons donnent des résultats satisfaisant à tel point qu'il n'est pas nécessaire d'avoir recours aux rayons X ou gamma dont les risques de l'un et l'investissement monstrueux de l'autre ne sont pas justifiés pour la qualité requise.

En ce qui concerne la manière de faire ce contrôle, nous nous basons sur celle qui relève de l'expérience et qui stipule que :

- Le contrôle doit se pratiquer sur chaque pièce fabriquée (poteau et consoles) sur une longueur de 20 à 25% des joints. Par exemple, le contrôle du poteau long de 10m doit se faire sur $20 \times 10/100 = 2\text{m}$ à 2,5m de joint.

CINQUIEME CHAPITRE.

GAMME DE FABRICATION ET CHOIX DES EQUIPEMENTS.

La fabrication des poutres avec consoles exigent un certain nombre de matériel (machines, positionneurs, appareils de contrôle...), qui sont déterminés et choisis pour permettre la réalisation de toutes les opérations du processus de fabrication. Dans notre étude, nous avons donné les calculs relatifs à un seul type de construction afin de dégager une idée sur la technologie d'exécution et les moyens de sa mise en oeuvre avec le maximum d'optimisation. En fait, l'atelier que nous projettons, doit être en mesure, avec les équipements par lesquels il est doté, de permettre la réalisation de la gamme des produits dans diverses dimensions et diverses formes selon leurs destinations. Ceci, dans le but de répondre, en partie, aux besoins les plus variés de notre pays dans le domaine des constructions de ce type.

Ainsi, les équipements choisis (surtout les machines) doivent permettre une large plage d'utilisation avec, si possible un haut degré de spécialisation sans pour autant que cela entraîne du matériel complémentaire. Nous chercherons donc des machines qui travaillent souvent à pleine charge au lieu de celles qui ne le sont que rarement auquel cas, les pertes à vide seront importantes et interviendront sur les frais d'exploitation, par conséquent le produit reviendrait et son écoulement se verra plus problématique. Plus grave encore, si nous cherchons à exploiter au delà de ses capacités, une machine se détériorerait rapidement et serait vite mise à l'écart sans que son amortissement soit accompli.

Outre ces mesures d'ordre économique, les exigences telles que la qualité du produit, la fiabilité du matériel etc..., nous obligent à être très strict et très attentifs pour fixer le choix sur telle ou telle machine afin de ne pas se laisser prendre par "l'optimisme" tout naturel des constructeurs.

.../...

I FACTEURS INTERVENANT LORS DU CHOIX D'UN POSTE DE SOUDAGE.

1°) Force motrice disponible dans l'atelier.

Le courant distribué par la SONELGAZ est toujours le courant alternatif mono ou triphasé aux tensions courantes 220/380 Volts (50 Hz). L'appareil choisi doit donc pouvoir prendre directement sa puissance des sources d'alimentation sans connection d'appareillage auxiliaire.

2°) Facteur de puissance.

Le facteur de puissance égal à l'unité n'est pas pénalisé. Mais si sa valeur descend en dessous de un, la connection de condensateurs est indispensable pour relever $C_{os} \phi$ et pour éviter de payer une puissance perdue (dévattée). Les constructeurs sont conscients du problème et offrent des appareils fonctionnant dans les normes.

3°) Puissance électrique nécessaire.

Celle-ci est choisie en fonction de l'intensité maximale de soudage et la tension. L'appareil doit avoir une puissance un peu plus grande que celle nécessaire.

4°) Modes de réglage des paramètres de soudage.

Il existe principalement deux modes de réglage :

- Le mode dit à réglage continu : assuré par volant pour le réglage de l'intensité. Ceci entraîne automatiquement la variation de la tension selon la caractéristique du poste (plate ou plongeante).

La vitesse de dévidage du fil, se règle généralement par ce mode par l'intermédiaire d'un bouton décrivant 360°.

- Le mode dit à "réglage par plot" : Certains postes sont munis d'un commutateur de réglage de la tension assurant la progression 1/3 V par 1/3 V ou 1/2 V par 1/2 V entre les extrêmes de la tension en charge, et par suite couvre une large plage de tension.

Ceci, est d'une manière générale, les facteurs devant être examinés avant de fixer le choix sur un poste de soudage ; le reste sera envisagé pour chaque type de poste choisi.

.../...

II. CHOIX D'UN POSTE DE SOUDAGE MANUEL A L'ARC.

Ce poste n'est utilisé que pour les opérations de pointage et les petits travaux. Il n'est pas nécessaire de dépasser 230 A. Nous avons choisi un poste du type : ME 230.

Le poste ME 230 bitension 220/380 V fournit un courant de soudage alternatif monophasé. Il permet l'emploi de tous les types d'électrodes destinées au soudage des aciers courants.

Sa mise en oeuvre est immédiate, le réglage de l'intensité de soudage s'effectue à l'aide de deux commutateurs. Le raccordement des câbles soudure est prévu par fiches embrochables. Sa caractéristique est plongeante assurant ainsi une parfaite stabilité de l'arc. Il comporte un ventilateur puissant permettant l'emploi prolongé aux intensités élevées. Il a une bonne mobilité grâce aux roues et aux brancards amovibles dont il est doté.

Caractéristiques techniques.

Alimentation monophasée 50 Hz	220 V	380 V
Consommation primaire pour intensité de soudage 160 A	42 A	24 V
Tension à vide	55 V	
Intensité de soudage mini	40 A	
maxi	230 A	
des électrodes (mm)	2 à 5	
Coefficient d'utilisation multihoraire	60 %	à 160 A
Dimensions hors tout.	580 X	560 X 665
Poids		90 Kg.

III. CHOIX D'UN POSTE DE SOUDAGE SEMI-AUTOMATIQUE SOUS C_{o2}.

Le poste est utilisé pour le soudage de la console (cordons d'angle) qui n'est pas facilement accessible. Le courant de soudage est continu et les intensités sont de l'ordre de 300 A. Pour cela, nous avons choisi parmi la gamme C_y, des appareils monobloc pour soudage semi-automatique le C_y 400 dont les caractéristiques sont :

-- Générateur non ventilé : Il comprend essentiellement un transformateur triphasé à tension constante et un bloc de cellules refresseuses dont tous les organes sont bien dimensionnés pour faciliter les échanges thermiques par ventilation naturelle.

.../...

Performances au coefficient multihoraire de 100 %.

Ce coefficient est calculé sur la base d'un cycle répétitif de 5 min. Ainsi un coefficient de 60 % signifie que l'échauffement maximum admissible pour le générateur est atteint pour l'utilisation suivante : 3 min de soudure, 2 min d'arrêt. Cela est concevable pour le soudage manuel à l'électrode.

Dans le cas du procédé semi-automatique, il est indispensable que les performances élevées soient obtenues au coefficient multihoraire de 100 %.

De ce point de vue, les appareils tels que le C_y 400 offrent une garantie totale d'utilisation.

Puissance du moto-réducteur de dévidage.

Le bon dévidage du fil-électrode constitue la condition indispensable au parfait fonctionnement d'un appareil semi-automatique. Le C_y 400 est équipé, à cet effet, d'un moteur de dévidage très puissant 200 W, comportant des galets de grand diamètre ce qui améliore encore l'efficacité du système avance-fil.

Règlage précis de la tension de soudage.

Le C_y 400 permet le soudage des plus fortes aux plus faibles épaisseurs grâce au commutateur dont il est équipé et qui assure un réglage précis 1/3 de Volts par 1/3 de Volt.

Plage de vitesse.

L'intensité de soudage, pour une tension à vide déterminée, dépend de la vitesse de dévidage du fil-électrode. Il est donc important que la plage des vitesses soit étendue et réglable d'une manière simple et précise.

A cet effet, la variation de vitesse est obtenue d'une manière continue de 0 à 22 m/min à l'aide d'un bouton de grand diamètre décrivant une plage angulaire totale de 360°.

Qualités de fusion.

La caractéristique plate du générateur (nécessaire pour l'autorégulation de l'arc) conduit à l'établissement d'un régime d'arc crépitant et à un risque de projections. A cet effet, l'appareil est doté d'un self d'amortissement déterminée judicieusement et disposée dans le circuit de soudage pour assurer la meilleure qualité de fusion.

Simplicité.

Le C_y 400 ne nécessite aucun entretien grâce à la ventilation naturelle du générateur qui est statique. Les commandes sont uniquement électriques. Les éléments constitutifs sont largement dimensionnés et offrent ainsi une plus grande sécurité et une plus grande fiabilité.

Caractéristiques techniques du poste C_y 400.

Alimentation triphasée 50 H _E .	220 V	380 V
Consommation primaire maxi.	40 A	23 A
Puissance de branchement.		13 KW
Intensité de soudage.	35 A	450 A
Gamme des tensions à vide.	16 A	40 V
Gamme des tensions en charge.	15 A	35 V
Coefficient d'utilisation.	100 %	400 A
Diamètres de fils-utilisables.	0,6 A	1,6 mm (2 mm)
Vitesse de dévidage.	2 A	22 m/min
Puissance du moteur de dévidage.		200 W
Plage de réglage.		30 positions
Dimensions hors tout.	1100 X	660 X 810 mm
Poids approximatif.		340 Kg.

La torche conseillée est du type : 400 A. C.D 400. avec aménagement supplémentaire pour recevoir les fils de diamètres 2 mm ou plus.

Le poste comporte également le porte bouteille de gaz C₀₂.

IV. CHOIX D'UNE SOUDEUSE A FIL-AUTOMATIQUE.

La machine choisie est du type ADF - 1003. Elle est alimentée à partir d'un réseau triphasé. Elle se déplace sur la pièce à souder même ou suivant une règle de guidage légère posée sur la pièce à souder.

La machine se compose d'une tête de soudage automatique et d'un transformateur de soudage du type TDF - 1001. La machine est liée au bloc de commande et au transformateur de soudage.

L'intensité maximale à 100 % est de 1000 A, mais elle peut dépasser cette valeur à condition d'abaisser le coefficient multihoraire. Ainsi pour l'utiliser à 1200 A (nos besoins), nous sommes obligés de prévoir des temps d'arrêt pour éviter l'échauffement de la machine.

À 1200 A, la machine peut faire un cordon long de 5 m à la vitesse de 25 m/h. Le temps mis est de 12 min. Nous la laissons refroidir (arrêtée) pendant 8 min pour reprendre ensuite le soudage de la deuxième partie du cordon (12 m). Ainsi, le temps pour le soudage d'une partie est de (8 + 12) = 20 min c'est-à-dire le même temps à la base duquel est calculé le coefficient multihoraire.

.../...

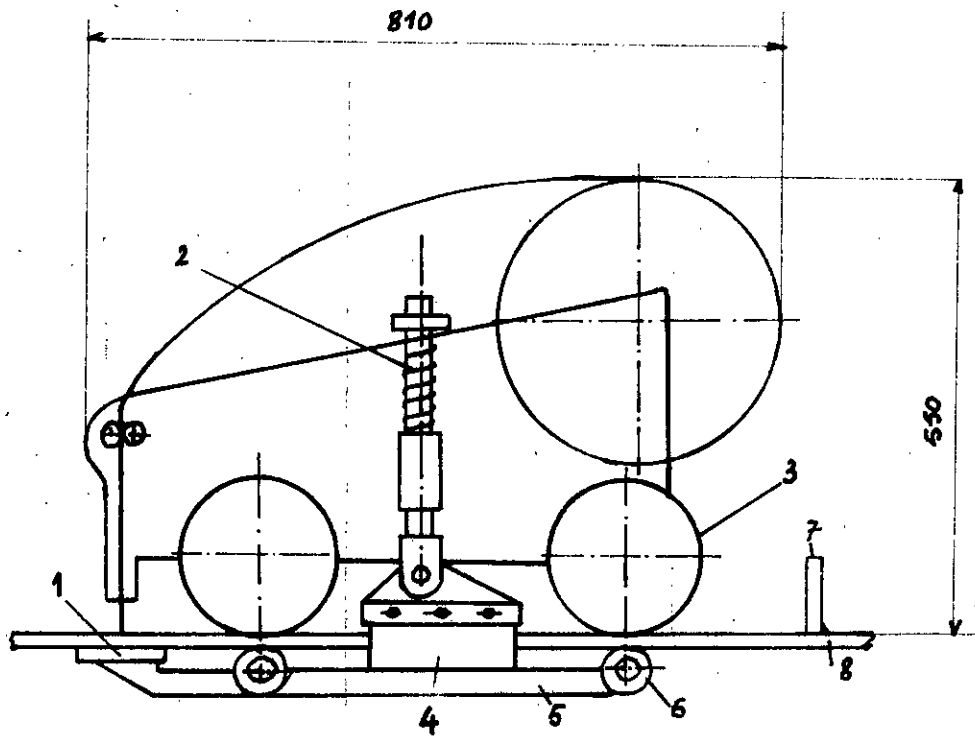


Fig [I.V]. Schéma de la machine à souder
et du support déplaçable en cuivre.

- 1: Support en cuivre.
- 2: Ressort de pression
- 3: Roues de la machine
- 4: Coateau de guidage
- 5: levier porte support.
- 6: galets
- 7: toles de bridage.
- 8: tole à souder.

Caractéristiques techniques. Machine à souder automatique. ADF 1003.

Tension d'alimentation :	220, 230, 240, 380, 400, 415 Volts.
Vitesse de soudage :	12 $\frac{\circ}{\text{h}}$ 120 m/h.
Vitesse de dévidage :	60 $\frac{\circ}{\text{h}}$ 360 m/h.
Diamètre des fil-électrode :	2 $\frac{\circ}{\text{mm}}$ 6 mm.
Intensité de soudage :	1000 A à 100 %.
Dimensions :	810 X 320 X 550 mm.
Capacité de la principale trémie pour le flux :	6,5 dm ³
Masse de la machine sans flux, ni fil :	48 Kg
Bloc de commande :	32 Kg

Transformateur type TDF - 1001

Tension d'alimentation :	220, 230, 240, 380, 400, 415 Volts.
Courant de soudage :	350 $\frac{\circ}{\text{A}}$ 1200 A
Tension de soudage :	$\frac{\circ}{\text{V}}$ 44 Volts
Dimensions :	1200 X 830 X 1200.

Ce type de machine est aussi conçu pour recevoir le support de bain déplaçable prévu au chapitre III et qui est représenté à la figure (1.V).

V. CHOIX D'UNE MACHINE A PLANER.

Les tôles réceptionnées subissent forcément des déformations. Ces déformations sont surtout causées par le transport et les moyens de manutention. A cet effet, nous devons assurer le planage des tôles avant leurs assemblages. Nous avons choisi, pour se faire, une machine planeuse du type SP4.170 de caractéristiques :

- Largeurs jusqu'à 2500 mm.
- Epaisseurs jusqu'à 22 mm.
- Nombre de cylindres 9.

Ceci, afin de couvrir toute la gamme de tôles nécessaires pour les différentes séries du produit, comme il a été dit au début de ce chapitre.

VI. CHOIX D'UN POSTE DE DECOUPAGE DES TOILES.

La machine doit assurer le découpage des tôles, pour leur mise à dimension, et la préparation des chanfreins en V sur les profilets. Il est clair que, si les méthodes mécaniques conviennent pour le découpage des tôles, elles ne sont guère recommandées pour le chanfreinage.

Faut-il encore, chercher un matériel qui puisse facilement réaliser les deux opérations. A cet effet, seuls, l'oxycoupage et le plasma-coupage peuvent être intéressants. L'un comme l'autre de ces procédés utilisent la chaleur pour découper. Mais, il se trouve que le plasma-coupage présente plus d'avantages notamment, les vitesses de coupage qui sont nettement plus grandes et l'état de surface des tôles après coupage qui est meilleur.

C'est donc, pour son aspect économique (productif) et de meilleure qualité que nous utiliserons le plasma-coupage ; le gaz plasmagène étant de l'air.

A titre indicatif, voici les vitesses réalisées en coupage au plasma (air) et en oxycoupage.

Epaisseurs (mm)	PLASMA (Air)		OXYCOUPAGE	
	P (KW)	D (m ³ /h)	V (m/h)	V (m/h)
6	55	7	300	36
12,7	55	7	150	36
25,4	55	7	75	30
50,8	100	9,8	45	21

La machine choisie est du type UPR 201 dont les caractéristiques sont :

- Tension d'alimentation : 380, 400, 415 V
- Tension à vie : 180 V
- Intensités : 150 à 200 A
- Gaz plasmagène : air
- Pression de l'air : 3,5 à 4,5 Kg /cm²
- Epaisseurs découpées : jusqu'à 40 mm (aciers et alliages ferreux)
- Débit : 14 l/s (50 m³/h)
- Dimensions : 1065 X 816 X 940 mm.

.../...

VII. CHOIX DES POSITIONNEURS.

Les positionneurs sont nécessaires pour assurer l'écart de 3 m. entre les profilés et de les brider ensuite à l'aide de tôles.

Nous allons avoir besoin de trois positionneurs disposés à 4 mètres d'intervalle pour avoir la précision de l'écartement.

Chaque positionneur comporte : - un mors fixe (1)
- un mors mobile (2) avec vis de serrage (5)
- Deux appuis (3) fixes.

L'ensemble est représenté sur la figure (2.V).

VIII. CHOIX D'UN APPAREIL DE CONTROLE.

Le contrôle sera effectué aux ultra-sons. L'appareil retenu à cet effet est du type : REFLECTOSCOPE M.90 de caractéristiques :

- Dimensions oscilloscope	80 X 100 mm.
- Poids,	17 Kg.
- Visualisation	Vidéo et RF.
- Emetteur	1000 Volts (grand pouvoir de pénétration).
- Gamme de fréquence étendue	0,4 à 25 MHz.
- Conception modulaire	
- Récurrence automatiquement réglable de	62 à 2000 Hz.

IX. CHOIX D'UNE PERCEUSE.

La perceuse retenue pour tous les travaux de perçage est du type :
CULLIER et BERNARDOU.

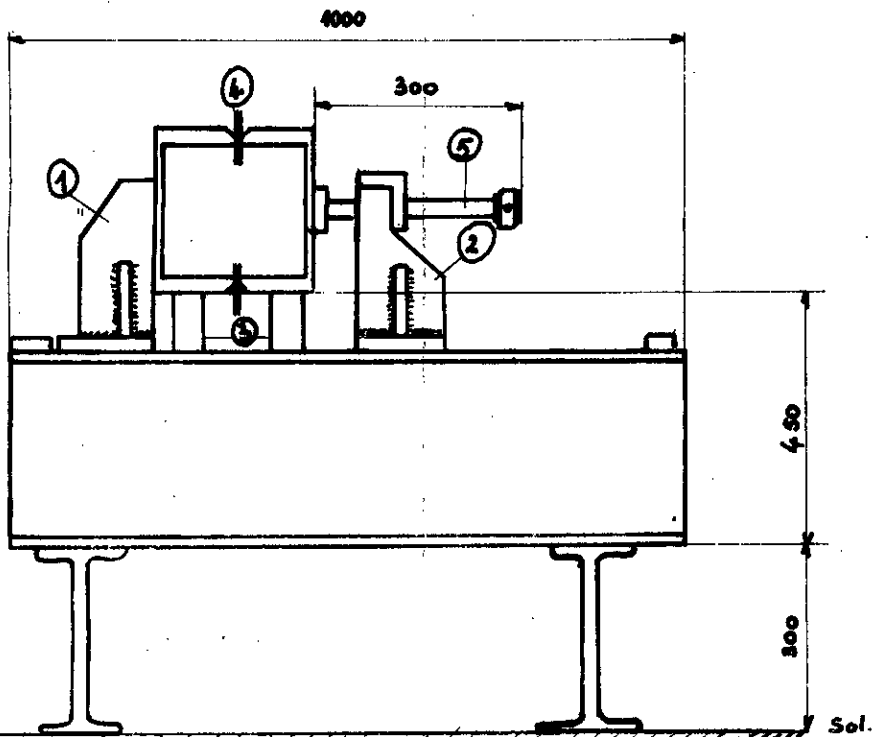


Fig [2.V] : Schéma du positionneur utilisé pour le bridage des profilets.

- 1: mors fixe
- 2: mors mobile
- 3: appuis (coles) réglables
- 4: tôle d'écartement: épaisseur 3mm.
- 5: Vis de serrage.

III. CALCUL DES TEMPS D'EXECUTION.

Le temps d'exécution de notre poteau-console est constitué, comme pour tout autre produit, des temps "machines" et des temps secondaires . $T_e = t_m + t_s$.

Nous appelons temps "machines" ; le temps réalisé sur une machine pour exécuter soit une opération ou soit une phase.

$t_m = \frac{l}{v}$ où l est la longueur travaillée et v la vitesse de travail.

Nous appelons "temps secondaires" : tous les temps nécessaires pour la préparation des éléments de la fabrication ainsi que les temps de transport ou de dégagement et les imprévus.

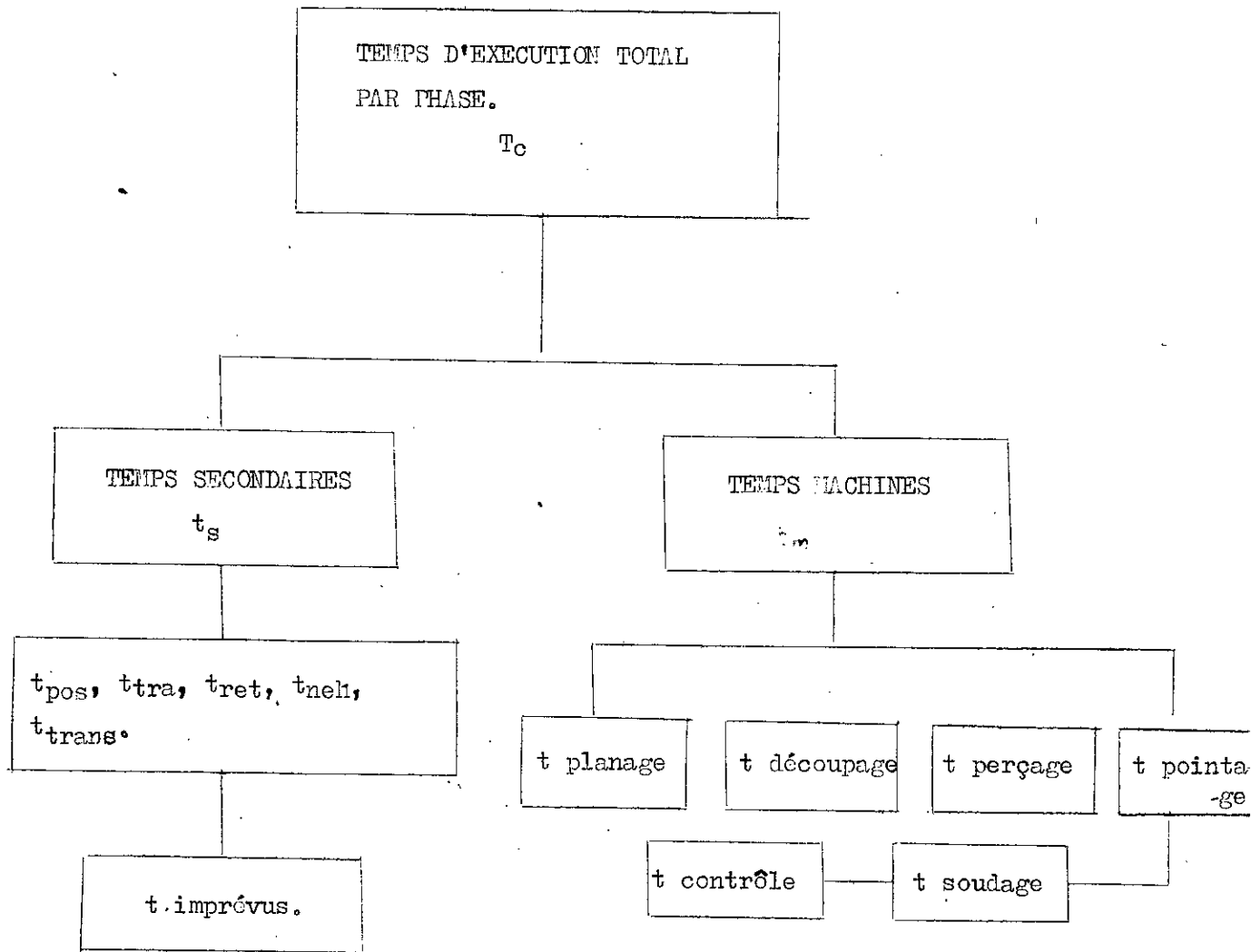
Le temps de préparation ou d'arrangement (t_a), regroupe les temps de positionnement (t_{pos}), de traçage (t_{tra}), de retournement des pièces (t_{ret}) et de nettoyage.

Le temps de transport (t_{trans}) regroupé : les temps de manutention des éléments d'un stock à un poste de travail ou d'un poste de travail au stock et le temps de déplacement de l'ouvrier le long de son poste de travail. Ces temps seront adoptés selon les normes prévues par expérience à cet effet.

Le temps relatif aux imprévus regroupe les pertes de temps dues aux accidents pendant le travail, les pannes d'électricité, etc...) (t_{imp}).

Ce temps est estimé à (-6 à 15%) du temps d'exécution total.

D'une façon générale, le calcul du temps d'exécution total par phase se fait selon l'organigramme suivant :



1°) Fabrication du poteau :

a) temps secondaires :

Ils sont directement donnés sur le tableau (1.V) des temps. Le temps total par phase est calculé en tenant compte du nombre d'opérations répétitives dans la même phase. Ainsi, par exemple, pour la phase traçage des UAP, nous avons quatre opérations de traçage, quatre opérations de positionnement et deux opérations de transport.

T_e est égal à : $4 \times t_{pos} + 4 \times t_{tra} + 2^t \text{ transp.}$

b) Temps machines :

-- Temps du découpage : $t_{dec} = \frac{1 \text{ déc}}{v \text{ déc}}$. La longueur découpée sur un UAP long de 10m et de $(2 \times 10) = 20m$.

La vitesse de découpage est de 150m/h soit $v_{d\acute{e}c} = 2,5\text{m/mm}$. $t_{d\acute{e}c} = \frac{20}{2,5} = 8\text{mm/1UAP}$.
Soit 16mm pour 2 UAP.

- Temps au pointage : la durée de pointage est (0,3 à 0,6)mm/point nous prenons 0,6mm/point (tole). La longueur à brider est de (10 000 - 800)mm, l'intervalle entre les tôles de bridage est 500mm. Le nombre de tôles sera : $1 + \frac{(10\ 000 - 800)}{500} = 20$ tôles par côté.

Soit pour 2 côtés 40 tôles auxquelles nous ajoutons les 8 points de fixation des talons à chaque extrémité du poteau :

Au total : 48 points durent $48 \times 0,6 = 29\text{mm}$.

- Temps au soudage : la longueur à souder est (10 000 + 100) = 10 100 mm par côté à la vitesse de 25m/h soit 0,416m/mm.

En soudage automatique, il est exigé un arrêt de 8mm lorsque la moitié de la longueur est soudée :

$$t_{\text{soud}} = \frac{10,1}{0,416} + 8 = 32,2\text{mm/côté} \text{ soit } t_{\text{soud}} = 64,4\text{mm/poteau}.$$

PHASE	t_s (mm)				t_m (mm)			TOTAL PHASE
	t_{pos}	$t_{\text{tra}\grave{c}}$	t_{trans}	t_{nettoy}	$t_{\text{d}\acute{e}cou}$	t_{point}	t_{soudage}	
traçage UAP	3	1,5	2	/	/	/	/	22
découpage chanfreins	3	/	2	/	16			32
pointage	7	/	2	2	/	29	/	51
soudage automatique	2	/	1	5	/	/	64,5	78,5

Le temps total de fabrication du poteau est de 183,5mm auxquelles nous ajoutons 6% d'imprévus et 15mm de contrôle.

$$T = 183,5 \times 106 + 15 = 209,5\text{mm}.$$

2) Fabrication de la console.

a) Temps secondaires :

Comme au 1 /a, ils sont directement donnés sur les tableaux (2.V).

b) Temps machines.

- Temps au découpage des tôles (1) à (8) : $t_{\text{déc}} = \frac{l \text{ déc}}{v \text{ déc}}$:

La longueur de découpage est prise égale au demi-périmètre de chaque tôle.

- Temps au pointage : la durée de pointage est de 0,3mm/point l'intervalle entre les points est de $30 \times e = 30 \times 12 = 360\text{mm}$.

Le nombre de points est $(\frac{L_p}{0,36} + 1)$ où L_p est la longueur à pointer sur chaque tôle (en m).

Le temps de pointage de chaque tôle est : $t_p = 0,3 \times (\frac{L_p}{0,36} + 1) \text{ mn}$.

- Temps au soudage semi-automatique.

La vitesse de soudage est de 29m/h soit 0,483m/mn.

$t_{\text{sou}} = \frac{l_s}{v_s} + t_{\text{arrêts}}$. Où l_s est la longueur du cordon et $t_{\text{arrêts}}$, le temps d'arrêts de l'arc à chaque fin de cordon. $t_{\text{arrêt}}$ est pris égal à 0,2mn par opération.

- Temps au planage : bien que le planage est fait sur des tôles de grandes dimensions (19000 x 1500mm), nous calculons la part de temps qui revient à chaque tôle élémentaire.

La vitesse de planage est à peu près 1m/mn.

N° tôle	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
temps								
t_{posit}	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	2	0,5
t_{transp}	1	1	1	1	1	1	1	1
$t_{\text{traçage}}$	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	2	2
Total par phase $T_e = 22,5\text{mn}$.								

- Temps au perçage. Nous avons à percer 6 trous de diamètre 34mm sur la tôle numéro (8).

Longueur de perçage $L = l_0 + l_1 + l_2$.

l_0 étant l'épaisseur de la tôle = 12mm.

l_1 l'engagement du forêt = 10,6mm.

l_2 dégagement du forêt = 2,5mm.

$L = 12 + 10,6 + 2,5 = 25,1\text{mm}$.

Avance par tour $a_p = 0,36\text{mm}/t_2$.

La vitesse de coupe $V_c = 17,7\text{m}/\text{mn}$.

Le temps machine est $t_m = \frac{L \times i}{n_r \times a_p}$

$$i = 6 \text{ trous d'où } t_m = \frac{25,1 \times 6}{160 \times 0,36} = 2,6\text{mn.}$$

Les temps secondaires de préparation, de serrage, de desserrage et de transport sont estimés à 10mn.

Le temps total d'exécution est $T_e = t_m + t_s = 12,6\text{mn}$. soit $T_e = 13\text{mn}$.

- Temps au planage et découpage. (T_e).

Tableau (2.V)^b

N° tôle	longueur planage (m)	temps planage mn	longueur découpage (m)	temps découpage (mn)	temps position	temps transp
(1)	1,2	1,2	1,5	0,6	0,5	1
(2)	0,812	0,8	0,95	0,38	0,5	1
(3)	0,80	0,8	0,97	0,39	0,5	1
(4)	0,2	0,2	0,5	0,2	0,5	1
(5)	0,2	0,2	0,4	0,16	0,5	1
(6)	0,236	0,24	0,56	0,22	0,5	1
(7)	0,4	0,4	0,428	0,17	2	1
(8)	0,48	0,5	0,928	0,37	0,5	1
T_e (mn)		13				

Temps au pointage et soudage. (2.V)c

Assemblage	longueur (m) point-soudage	Nombre points	t _{point} mm	t _{arrêts} mm	t _{soudage} mm	temps position	temps transport
(1) et (3)	$0,8 \times 2 = 1,6$	6	1,8	0,2	3,3	0,5	1
(1) et (5)	$2 \times 0,2 = 0,4$	3	0,9	0,2	0,8	0,5	1
(2) et (3)	$2 \times 0,812 = 1,62$	6	1,8	0,2	3,4	0,5	1
(4) et (5)	$2 \times 0,2 = 0,4$	3	0,9	0,2	0,8	0,5	1
(1), (5), (4) et (6)	1,57	6	1,8	0,2	3,2	0,5	1
colonne et poteau	$2 \times (0,3 + 0,5) = 1,6$	4	1,2	0,2	3,2	0,5	1
(7), (8) et poteau	$4 \times 0,2 = 0,8$	4	1,2	0,2	1,7	2	1
console et poteau	$1,57 + 1,248 + 0,4 = 3,22$	10	3	0,2	7	3	2
Total/ phase			30		63		

Le temps total d'exécution de la console est de $(22,5 + 13 + 18 + 16 + 30 + 63) = 162,5$ mn, auquel nous ajoutons 6% d'imprévu et 10mn de contrôle.

$$T_e = 162,5 \times 1,06 + 10 = 182 \text{mn.}$$

IV. CALCUL DU NOMBRE DE MACHINES.

L'objectif est de fabriquer 5000 pièces par an avec deux équipes de travail. Le fond disponible, c'est à dire le nombre d'heures ouvrables par année est donné par la relation :

$$F_d = Z_o \cdot K_s \cdot h \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right).$$

Z_0 = nombre de jours ouvrables par an = $365 - (52 + d)$ d'étant le nombre de jours fériés = 12 jours par an.

$$Z_0 = 365 - (52 + 12) = 301 \text{ jours/an.}$$

K_S = nombre d'équipes de travail = 2.

$$h = 8 \text{ heures/jours équipe} = 16h/\text{jour.}$$

α = coefficient de réparation varie selon la phase de fabrication.

$$Fd = 301 \times 3 \times 8 \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) = 4816 \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \text{ h/an.}$$

Pour chaque phase, le fond nécessaire F_n est calculé comme étant le produit de T_e par le nombre de pièces à fabriquer.

Le nombre de machines est calculé comme étant le rapport du fond nécessaire par le fond disponible exprimés en mm par an.

$$m_c = \frac{F_n}{Fd \times 60}$$

Tableau (3.V) donnant le nombre de machines.

PHASE	MACHINES	T_e (mm)	α	F_d (h/an)	F_n (mm)	m_c	m réel
traçage	tableau	44,5	0	4816	222500	0,77	1
découpage	poste UPR 200	46	3	4672	230000	0,82	1
pointage	poste ME 230	81	1	4768	405000	1,4	2
parçage	perceuse BERNARDOU	13	2	4720	65000	0,23	1
soudage sous CO_2	poste Cy 400	63	4	4624	315000	1,14	2
soudage sous flux solide	machines ADF 1003	78,5	4	4624	392500	1,4	2
	positionneurs	-	-	-	-	-	2 x 3 = 6
contrôle	appareil à ultrason	25	-	4816	125000	0,43	1
planage	SP4 170.	18	0	4816	90000	0,31	1

Pour assurer les opérations de transport (manutention) des tôles, des profilets et du produit fabriqué ; nous utiliserons des chariots et des ponts roulants.

Les chariots assurent le transport des tôles (légères) d'un poste à un autre alors que les pnts roulants assurent la manutention des éléments plus lourds tels que poteaux, consoles et le produit fini.

Le nombre de ponts roulants est calculé selon la formule :

$$m_c = \frac{N \times i \times T_c}{F_d \times B \times 60}$$

où i = nombre d'opérations de transport pour une pièce fabriquée.

T_c = temps par cycle.

B = coefficient d'utilisation du pont roulant = (0,92 à 0,96).

Pour notre atelier : $N = 5000.P/an.$

Les opérations de transport par pont roulant sont :

- 1 - Opération de transport de deux profilets UAP du stock au poste de traçage.
- 1 - Opération de transport du traçage au découpage.
- 1 - Opération de transport du découpage au positionneur.
- 1 - Opération de transport du positionneur au soudage automatique.
- 1 - Opération de transport du soudage au poste d'assemblage avec la console.
- 1 - Opération de transport de la console.
- 1 - Opération de transport du produit fini au stock.

Soit au total 7 opérations/pièce.

En prenant, en moyenne, 1,5mn de transport pour chaque opération, la durée du cycle par pièce est de 10,5mn = T_c .

En supposant le coefficient d'utilisation du pont roulant égal à 0,92, nous calculons le nombre de ponts roulants :

$$m_c = \frac{5000 \times 7 \times 10,5}{4816 \times 0,92 \times 60} = 1,38 \text{ soit deux ponts roulants.}$$

Le nombre de chariots n'est pas calculé, mais nous pouvons prendre deux (2) pour assurer toutes les opérations de transport (léger).

V. CALCUL DE L'EFFECTIF.

L'effectif sera composé de manoeuvre, d'ouvrier spécialisés, d'agents techniques, de comptables, d'agents auxiliaires et d'infirmiers.

Le nombre d'ouvriers spécialisés peut être calculé à partir de la formule

$$n_{os} = \frac{T_e \times N}{60 \times F_d (1 - K)}$$

K tient compte des absences, et est généralement égal à 0,2.

Tableau (4.V).

Poste de travail	T _e (mm)	n _{Fa}	n _{osc}	n _{os} réel
Planage	18	4816	0,99	1
Traçage	44,5	4816	0,96	1
Découpage	46	4672	1,02	1
Perçage	13	4720	0,29	1
Pointage	81	4768	1,78	2
Soudage sous-gaz	63	4624	1,42	2
Soudage sous flux	78,5	4624	1,77	2
Contrôle	25	4816	0,54	1

Nous voyons que le nombre d'ouvriers spécialisés est le même que le nombre de machine sauf pour le découpage. Mais, nous admettons pour ce poste un seul ouvrier car nous prévoyons deux (2) autres ouvriers polyvalents qui interviennent en cas d'absence à n'importe quel poste.

Soit au total, 11 ouvriers spécialisés plus deux (2) ouvriers polyvalents, plus un (1) aide soudeur (sous-gaz), 14 ouvriers spécialisés.

Les agents auxiliaires sont au nombre de trois (3) qualifiés comme suit :

- 1 - Contremaitre.
- 1 - Magasinier.
- 1 - Réparateur.

Les agents techniques, (études, méthodes,...) sont au nombre de deux (2).

Le transport, le nettoyage,..., sont assurés par trois (3) manoeuvres.

La comptabilité et les "affaires" économiques de l'atelier sont confiées à deux (2) comptables.

Il ne reste plus qu'à renforcer la sécurité et l'hygiène dans l'atelier par recrutement d'un infirmier.

Ainsi, l'effectif chargé de réaliser le programme annuel se compose de 20 personnes par équipe.

SIXIEME CHAPITRE.

HYGIENE ET SECURITE.

Les risques qui peuvent menacer la santé des soudeurs à l'arc proviennent :

- Des radiations de l'arc électrique.
- Des fumées, des particules métalliques ou gaz émis au poste de soudage.
- Du courant électrique.

Nous traitons le cas de soudage MAG dont les risques exigent certaines **précautions** supplémentaires.

I. PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS EMIS PAR L'ARC.

1°) Nature des rayonnements.

Dans les procédés de soudage sous gaz de protection (MAG), l'absence de cratère coiffant l'électrode permet à l'arc de rayonner dans un angle largement ouvert. L'absence de boîtier transforme le bain de fusion et les abords en un véritable miroir dont le pouvoir réflecteur peut-être très élevé. Les quelques fumées émises sont ténues et ont une opacité négligeable.

L'arc sous gaz atteint des températures beaucoup plus élevées que celles observées dans l'emploi des électrodes enrobées fondues dans l'air et ce dans les trois parties du spectre (ultra-violet, visible et infrarouge). Ainsi l'émission de rayonnement U.V est 3 ou 4 fois plus importante qu'en soudage manuel et même de 5 à 30 fois pour certaines bandes de radiations.

Les rayonnements U.V certaines matières organiques, ils désintègrent les tissus de coton. Leur pénétration est telle qu'ils peuvent traverser les cuirs poreux. Enfin, une brève exposition peut provoquer un érythème de la peau et leur action sur l'œil humain est particulièrement nocive. Ils provoquent rapidement la conjonctivité.

Les rayonnements visibles provoquent un éblouissement suivi d'une période de fatigue visuelle. Ces rayonnements sont particulièrement intenses dans les procédés T.I.G, M.I.G et M.A.G pour les raisons invoquées plus-haut. Les rayonnements infra-rouge qui sont environ 1,5 fois plus intenses que ceux du soudage manuel, pourraient à la longue, provoquer la cataracte. En fait, il n'y a pas de "cataracte du soudeur" grâce au port indispensable de filtres de protection oculaire.

Les rayons réfléchis sont aussi dangereux et plus insidieux que les rayons directs de sorte que les personnes qui se trouvent au voisinage du poste de soudage même pour un temps très court, peuvent être lésés.

2°) Protection contre les rayonnements.

a) Protection des yeux.

Les yeux du soudeur sont protégés par les verres filtrants montés sur la fenêtre du casque. Ces filtres sont choisis en fonction du procédé de soudage et de l'intensité du courant. Ainsi, pour le soudage MAG et une intensité de 300 A, les filtres de protection oculaire numéro 13 ou 14 conviennent bien (N.F 11004). Dans les cas extrêmes (très forte intensité), il est recommandé de doubler les verres filtrant côté opérateur d'un verre transparent résistant aux températures élevées qui protégera le soudeur contre la chaleur et améliorera son confort.

On peut aussi, dans le même but, disposer deux verres filtrants séparés par un intervalle de 1 mm. Il existe également des verres réfléchissants dont la face avant forme miroir et qui permettent d'obtenir les mêmes résultats.

Si d'autres soudeurs ou d'autres personnes, l'aide soudeur par exemple, travaillent à proximité d'un soudeur, il convient d'éviter l'aveuglement réciproque en leur faisant porter des lunettes à verres filtrants et munies d'écrans latéraux.

b) Protection de la tête.

Le port du casque, plutôt que celui du masque tenu à la main, est conseillé au soudeur MAG, parce qu'il a souvent besoin de se servir de ses deux mains pour soutenir et conduire le pistolet de soudage. L'aide soudeur, pourra par contre, se contenter d'un masque. Si le soudeur est appelé à travailler en position, il devra protéger sa tête contre les projections de gouttelettes au métal provenant du haut.

c) Protection du corps.

Aucune partie du corps ne doit être exposée aux rayonnements. Un bon équipement individuel consiste à mettre à la disposition du soudeur, s'il doit opérer avec de forts courants de soudage, plus de 250 A, un tablier en cuir chromé muni de manches et d'un col droit et se refermant par derrière. Des cuissards en cuir pourront compléter ce tablier si le soudeur soude accroupi.

II. PROTECTION CONTRE LES FUMÉES, GAZ ET PARTICULES SOLIDES.

1°) Nature des produits nocifs.

a) Oxyde de carbone.

Au centre de l'arc électrique, le gaz carbonique, qui sert de protection dans le procédé MAG, se décompose en oxyde de carbone et oxygène. Mais sur les bords de l'arc la recombinaison inverse se produit de sorte qu'il ne reste qu'une minime quantité de CO libre. La valeur maximale de concentration admissible (VIC) est de 50 ppm pour l'oxyde de carbone. Cette valeur peut être atteinte, si l'on soude avec une grande vitesse d'avance ont nécessitant un plus grand débit de CO₂.

b) Ozone.

Les rayonnements UV très abondants ont la propriété de transformer l'oxygène (O₂) en ozone (O₃) dont la (VIC) n'est que de 0,1 ppm, concentration qui est bien souvent dépassée au voisinage de l'arc. L'ozone est, toutefois, un gaz assez instable, il n'en reste pratiquement pas devant la bouche. Les symptômes d'une intoxication par l'ozone sont l'abattement et l'irritation des yeux et du nez.

c) Fumées métalliques.

La vaporisation des métaux peut se produire en soudage MAG. Il se forme alors des nuages de poussières métalliques très fines qui agissent sur les poumons et sur l'estomac et produisent une certaine fièvre. Ces métaux proviennent des fils-électrodes eux-mêmes lors du soudage en forte intensité. C'est souvent un élément d'alliage qui se vaporise, le manganèse des fils d'aciers au Mn - Si, par exemple.

d) Gaz carbonique.

Ce gaz n'est pas toxique, mais il accélère la respiration de telle sorte que la dose des autres fumées aspirées devient plus importante et peut provoquer l'asphyxie.

2°) Protection contre les fumées et les gaz.

Les moyens de protection des soudeurs et du personnel travaillant dans l'atelier contre les fumées et les gaz dangereux sont :

- La ventilation générale de l'atelier.
- L'aspiration locale des fumées (au voisinage de l'arc pour le soudeur MAG).
- L'usage d'appareil respiratoire individuel dans les cas spéciaux.

a) Valeurs limites maximales de concentration des substances toxiques dans l'air (pour 8 h d'exposition).

- Totalité des particules solides provenant des fumées de soudage : 5 mg/m^3 quelle que soit la zone de prélèvement.

- Vapeurs nitreuses : 9 mg/m^3 .

b) Caractéristiques de ventilation. (1-VI).

- Valeurs préconisées (en l'absence d'une aspiration locale). Taux de ventilation : 1500 à 5000 m^3 par kilogramme d'électrodes fondues, selon le type d'enrobage ou de flux.

Débit de renouvellement de l'air : 56 à $120 \text{ m}^3/\text{m}^2$ et par soudeur en fonction des conditions de travail.

c) Caractéristiques d'aspiration locale.

- Valeurs préconisées :

Vitesse d'aspiration au voisinage de l'arc : $0,50$ à 1 m/s .

Débit de l'arc à l'entrée de la buse, en fonction de sa distance par rapport à l'arc : $7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ pour 15 cm et $28 \text{ m}^3/\text{m}^2$ pour 30 cm . Ceci, nous impose d'équiper d'atelier de matériels de ventilation et d'aspiration de fumées.

- Pour l'aspiration locale, nous utiliserons un dispositif à base de captage mobile utile pour le soudage MAG.

Le débit d'air à l'entrée de la buse est $28 \text{ m}^3/\text{m}^2$ pour 30 cm .

Un appareil NEDERMAN peut aspirer et filtrer $30 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

- Pour la ventilation générale. Vu que les conditions de travail ne sont pas difficiles, nous assurons un débit de renouvellement d'air de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2$ par soudeur.

Le nombre de soudeur est de : plus l'ouvrier coupeur, donc soudeurs.

Le débit d'air à introduire dans l'atelier est de : $D = 60 \text{ K} \cdot \dots = 24 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

II. PROTECTION CONTRE LES DANGERS DE COURANTS ELECTRIQUES.

Le danger peut provenir soit d'un contact direct avec une pièce nue sous tension (tension du réseau, tension à l'électrode), soit d'un contact avec une pièce nue (boîtier, volant de manoeuvre, etc...) normalement isolée mais qui se trouve fortuitement mise sous tension à la suite d'un défaut (contact direct). La protection contre les contacts directs est obtenues par isolement des éléments conducteurs d'où la nécessité de veiller :

- A l'utilisation de conducteurs isolés, d'une qualité convenable, en bon état et correctement raccordés au niveau des boîtes à bornes.

- Au port de gants au cours des opérations de soudage, ces accessoires de protection devant être suffisamment isolants et sans solution de continuité.
- Au repos du porte électrode, dans un réceptacle isolé lorsqu'il n'est pas utilisé.

La protection contre les contacts indirects est assurée, généralement, par la mise des masses des appareils à la terre et par l'installation des dispositifs de coupure ou d'alerte qui agissent en cas de défaut.

Le procédé MAG est utilisé exclusivement en courant continu et met en oeuvre des tensions qui demeurent en deçà de la limite supérieure de la très basse tension (50 V). C'est pourquoi, le toucher du fil-électrode, par exemple, n'est pas plus dangereux que celui des bornes d'une batterie d'accumulateurs de 24 volts.

IV. AMÉNAGEMENT DE L'ATELIER DE SOUDAGE SOUS GAZ.

Le secteur de l'atelier réservé au soudage sous gaz doit être aménager en prenant certaines précautions :

- En raison de l'intensité des rayonnements U.V, les murs doivent de toute nécessité présenter une surface grumeleuse plutôt que lisse et être recouverts d'une peinture absorbant ces radiations.
- Les postes de soudage seront entourés de rideaux de toile, ou, mieux, de tissus spéciaux à base de fibre de verre et d'élaboration. Si l'on soude des ensembles importants qu'il n'est pas toujours possible d'entourer de rideaux, il est nécessaire de créer des couloirs protégés des rayonnements pour la circulation du personnel non-soudeur.

Pour réduire la fatigue du soudeur MAG, il est recommandé de disposer les dévidoirs et coffrets de commande suspendus au dessus du soudeur.

CONCLUSION

Notre travail consistait à étudier et concevoir un atelier de fabrication par soudage de colonnes (poteaux - consoles) en acier faiblement alliés.

Les aciers faiblement alliés, dont le comportement vis à vis du soudage à l'arc est nettement différent de celui des aciers courants de construction, nous imposèrent de prendre, tout au long de cette étude, des précautions et des mesures sur les choix des moyens et des conditions de fabrication afin de sortir avec la meilleure qualité. Cette qualité (b), de fait la destination de la construction, devait à tout prix être réalisée. C'est pourquoi, nous insistons sur la nécessité de disposer d'une main-d'oeuvre qualifiée surtout celle qui effectue les travaux de soudage et de contrôle. Aussi, nous conseillons d'utiliser des chauffages dans l'atelier pour éviter le soudage en temps très froid (en dessous de 0°C) dont les effets sont néfastes à la construction.

Les temps d'exécution ont été calculés à partir de données recommandées par la pratique pour mieux se rapprocher du cas réel de production.

Par souci de préserver la santé et la sécurité du personnel; nous avons prévu l'infirmierie, les vestiaires et les douches.

Le plan de l'atelier a été mis au point en respectant les normes établies et qui fixent les espaces de passage, les espaces de stockage, les espaces entre les postes de travail et les stocks etc...

Il serait souhaitable que notre travail trouve une réalisation pratique sur le terrain afin que nous puissions compléter notre étude par de l'expérience qui reste le meilleur pour la réalisation de projets à venir...

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION:

CHAPITRE I. GENERALITES DU SOUDAGE A L'ARC.

I. ETUDE DES PHENOMENES THERMIQUE.

1. Répartitions thermiques dans les assemblages soudés.
2. Régimes thermiques dans les assemblages soudés.
3. Préchauffage des assemblages.
4. Soudage des aciers de construction.

II. CONTRAINTES RESIDUELLES DANS LES ASSEMBLAGES SOUDES.

1. Contraintes résiduelles directes.
2. Contraintes résiduelles indirectes.
3. Moyens pour réduire les contraintes résiduelles.
4. Moyens pour réduire les déformations résiduelles de retrait.

CHAPITRE II. CONDITIONS D'UTILISATION DES POUTRES.

I. GENERALITES.

II. EXIGENCES TECHNIQUES ET CHOIX DES ECHANTILLONS.

III. CHOIX DU METAL DE BASE.

1. Limite d'élasticité élevée.
2. Soudabilité.
3. Eléments comprenant la qualité de la soudure.
4. Influence des éléments d'apport sur les qualités des aciers.

IV. CALCUL DE RESISTANCE.

1. Dimensionnement du poteau.
2. Vérification de la stabilité de la construction dans le plan d'action du moment de flexion.
3. Vérification de la stabilité dans le plan perpendiculaire au moment de flexion.
4. Dimensionnement des cordons d'angle.

CHAPITRE III.

I. CHOIX DU PROCÉDE DE SOUDAGE POUR LA PARTIE POTEAU.

1. Principe du procédé, son application, ses avantages et ses inconvénients.
2. Choix du type de flux et du fil-électrode.
3. Préparation des bords.
4. Support de bain.

II. CHOIX DU PROCÉDE DU SOUDAGE POUR LA PARTIE CONSOLE.

1. Principe du procédé, ses avantages, ses inconvénients et ses applications.
2. Choix du gaz protecteur.
3. Choix du fil-électrode.

III. CALCUL DES RÉGIMES DE SOUDAGE.

1. Paramètres de soudage.
2. Température de préchauffage.
3. Nature des courants de soudage.
4. Calcul des régimes de soudage.

CHAPITRE IV.

I. DÉFAUTS DES JOINTS SOUDÉS.

II. CONTRÔLE DES JOINTS SOUDÉS.

III. CHOIX DU MODE DE CONTRÔLE POUR NOTRE CONSTRUCTION.

CHAPITRE V.

I. FACTEURS INTERVENANT LORS DU CHOIX D'UN POSTE DE SOUDAGE.

II. CHOIX D'UN POSTE DE SOUDAGE MANUEL À L'ARC.

III. CHOIX D'UN POSTE DE SOUDAGE SEMI-AUTOMATIQUE SOUS CO_2 .

IV. CHOIX D'UNE SOUDEUSE À FIL AUTOMATIQUE.

V. CHOIX D'UNE MACHINE À PLANER.

VI. CHOIX D'UN POSTE DE DÉCOUPAGE.

VII. CHOIX DES POSITIONNEURS.

VIII. CHOIX D'UN APPAREIL DE CONTRÔLE.

IX. CHOIX D'UNE PERCHUSE.

X. CALCUL DES TEMPS D'EXÉCUTION.

- XI. CALCUL DU NOMBRE DE MACHINES.
- XII. CALCUL DE L'EFFECTIF.

CHAPITRE VI.

- I. PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS EMISS PAR L'ARC.
- II. PROTECTION CONTRE LES FUMÉES, GAZ ET PARTICULES SOLIDES.
- III. PROTECTION CONTRE LES DANGERS DE COURANTS ELECTRIQUES.
- IV. AMENAGEMENT DE L'ATELIER DE SOUDAGE SOUS GAZ.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - R. BAUS.
Application du soudage aux constructions.
(2.I), (2.III), (5.III), (1.IV), (2.IV), (3.IV), (4.IV).
- 2 - G. NICOLAEV.
Calculs, projets et réalisation des constructions soudées.
(6.II), (8.II), (1.V), (2.V).
- 3 - O.T.U.A.
Produits sidérurgiques. Tome 1 et 2. (5.II).
- 3 - A. CANPRA.
Mécanique par les problèmes. (3.II).
- 4 - V. DOBROVOLSKI.
Eléments de machines. (7.II).
- 5 - I. LAKHTINE.
Métallographie et traitements thermiques des métaux.
(2.II), (2.III).
- 6 - D. SEFERIAN.
Métallurgie de la soudure. (4.II).
- 7 - P.T. HOULDCROFT.
Les procédés de soudage. (1.III), (4.III).
- 8 - GUIDE DE SOUDAGE. Tome V. (6.III), (7.III).
- 9 - AKOULOV.
Technologie du soudage. (9.III).
- 10 - A. VALLINI.
Joints soudés. (1.I), (2.III).

11 - Revues.

- 1 - Revue "souder" N° volume 2. Mai 1980 (1.II).
- 2 - Revue "souder" N° volume 2. Juillet 1980 (1.VI), (2.VI).
- 3 - F.R. COC. J. Iron and Steel Inst (spécial report N° 73 1963) (3.II).

