

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ALGER

0/80

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT GÉNIE-MÉCANIQUE

124

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

ATELIER DE FABRICATION
DE POUTRES EN I

Tome 2

1 PLANCHE

Proposé et dirigé par :

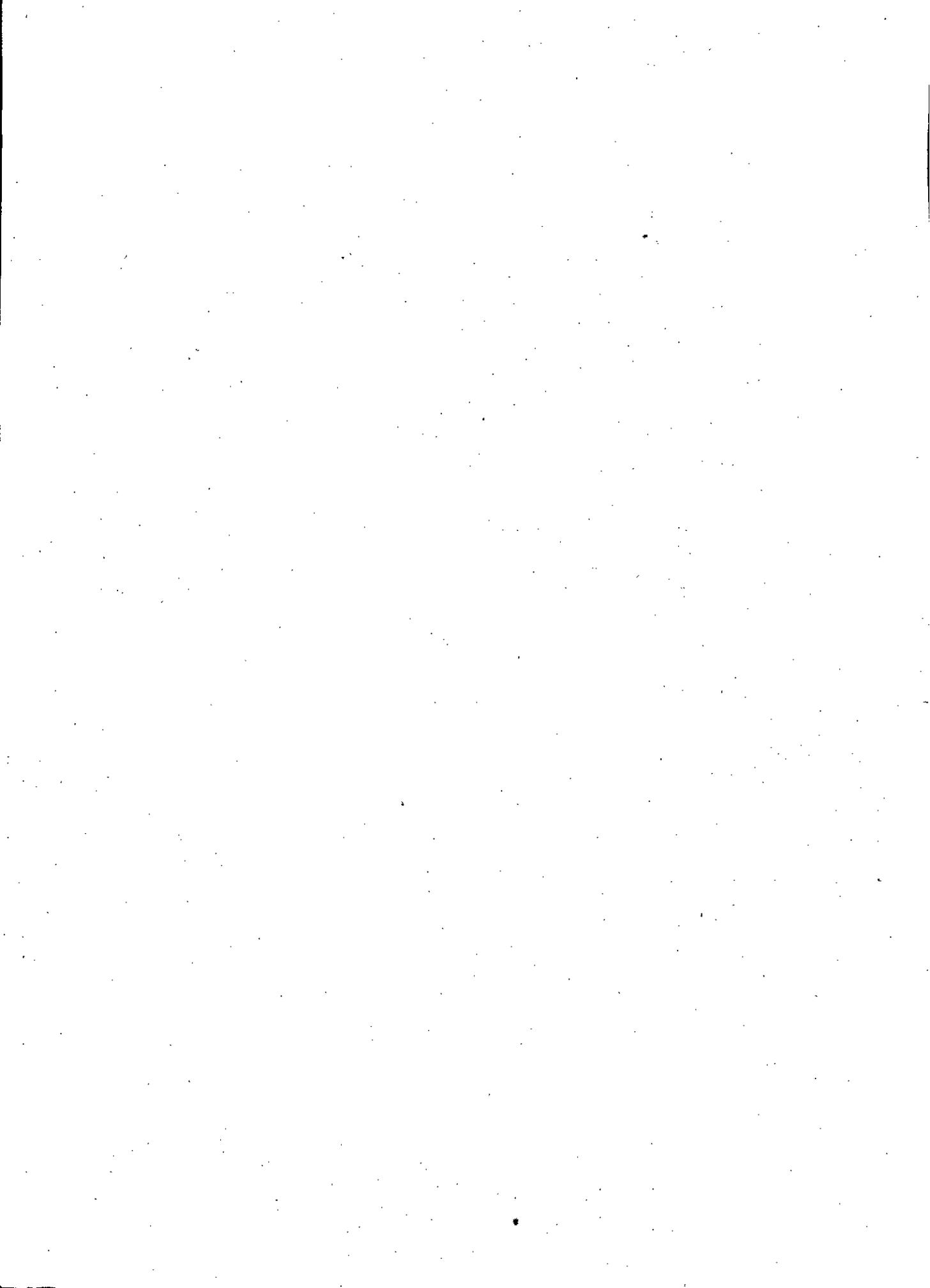
E. BARDOKINE

Maître de Conférence à l'E.N.P.A.

Étudié et présenté par :

M. KHETTOUF

PROMOTION JANVIER 1980



UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ALGER

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT GÉNIE-MÉCANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

ATELIER DE FABRICATION
DE POUTRES EN I

Tome 2

Proposé et dirigé par :

E. BARDOKINE

Maître de Conférence à l'E.N.P.A.

Étudié et présenté par :

M. KHETTOUF

PROMOTION JANVIER 1980

REMERCIEMENTS

- Que monsieur EVGUINI BERDOKINE

Maitre de conférence à l'Ecole Nationale Polytechnique, trouve ici l'expression de ma reconnaissance ainsi que mes remerciements les plus sincères pour les précieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de cette étude.

Je tiens aussi à remercier sincèrement tous les professeurs qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

DEDICACE

Je dédie ce Travail

- A la mémoire de mes Parents
- A ma famille
- A mes amis

Qui ont donné le meilleur d'eux-mêmes afin que ma formation aboutisse.

Mokhtar K.

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

Toute construction utilise les matériaux mis à notre disposition par la Nature ou par l'industrie. Elle est déterminée essentiellement par leurs caractéristiques dont découlent leurs modes d'emploi et leurs formes.

Les aciers ayant de fortes résistances en traction comme en compression donnent des facilités exceptionnelles pour réaliser des ensembles à la fois légers et résistants. Les mesures à prendre pour éviter les instabilités, soit par flambement, soit par voilement local sont de plus en plus nécessaires.

L'étude du métal est évidemment essentielle car elle nous renseigne sur les qualités du matériau que nous allons utiliser.

Parmi ces qualités, certaines sont favorables ou défavorables suivant les services que nous demanderons au métal. Certaines de ces qualités se contrarient: c'est ainsi qu'un acier de plus en plus dur est de moins en moins plastique. En construction métallique, nous recherchons des aciers ayant une bonne plasticité.

Tout ceci nous amène à conclure que l'on doit exiger des propriétés particulières du métal: il y a donc un critère de qualité que l'on appellera la soudabilité. Nous avons choisi un acier ordinaire A42 qui est parfaitement soudable. Les facteurs décisifs qui influent sur la soudabilité des aciers au carbone sont la composition chimique, les propriétés physiques et le traitement thermique des pièces.

La teneur en carbone est un facteur qui exerce une grande influence sur les propriétés de la soudure. La modification de sa teneur influe sur la résistance, la dureté et la ductilité de la soudure. Une teneur en carbone de plus de 0,3% élève l'autotrepabilité de la zone de surchauffe du métal de base et l'acier devient plus fragile.

Les aciers au carbone de construction se soudent bien par tous les procédés si leur teneur en carbone est inférieure à 0,27% et assez bien, si elle ne dépasse pas 0,35%. Pour obtenir une soudure de qualité à l'arc, il faut choisir judicieusement le régime et bien protéger le métal rechargé contre l'action de l'air.

Les aciers de construction d'une teneur en carbone supérieure à 0,36% ont une tendance à la fissuration, de façon qu'un préchauffage et un traitement thermique après le soudage s'imposent. La teneur en phosphore d'un acier supérieure à 0,04% exerce une influence nocive sur les propriétés mécaniques de la soudure en élevant sa fragilité. Le soufre exerce une action très nocive sur la soudabilité des aciers en provoquant leur fragilité à chaud. La teneur supérieure à 0,04% en soufre provoque la fissuration du métal. Le soudage des métaux est largement employé dans les branches les plus diverses de l'industrie et du bâtiment. Les charpentes métalliques des edifices industriels (ossatures des bâtiments industriels, des ponts, etc...) les ouvrages tôles (réservoirs métalliques); les armatures des constructions en béton armé sont fabriquées surtout par le procédé de soudage. L'utilisation du soudage est conditionnée par les avantages techniques et économiques qu'il présente quand on le compare à d'autres procédés d'assemblage des pièces métalliques comme le rivetage, le moulage, etc... .

Dans cette seconde partie du projet d'installation d'un atelier de capacité de 3000 poutres en I par an, nous allons étudier les déformations dues au cours du soudage à l'arc électrique et les remèdes possibles pour avoir une construction métallique valable dans le domaine choisi. Nous calculerons aussi le temps d'exécution pour chaque phase pour faire l'emplacement des machines et l'organisation de travail.

I) ETUDE METALLURGIQUE

1°) Examen de la section d'un cordon de soudure : Lorsqu'un cordon de soudure est obtenu par un procédé utilisant la fusion du métal, qu'il s'agisse du soudage à l'arc électrique, du soudage automatique sous flux, on a toujours dans la section du cordon différentes zones caractéristiques.

Il y a tout d'abord les zones du métal qui ont été fondues pendant l'opération de soudage, une partie de ce métal provenant de l'électrode, une autre partie du métal des pièces ou métal de base.

Nous y trouvons (fig 1)

- La zone centrale du cordon qui contient surtout du métal d'apport et les produits d'addition apportés par les enrobages.
- La zone du métal des pièces qui a été fondue, dite zone de pénétration. Il est absolu indispensable, pour la bonne liaison des pièces qu'une partie de celle-ci ait été fondue. Si le métal de base n'a pas été fondu, il y a collage et non pas soudage. Si cette zone est trop petite, on dit qu'il y a manque de pénétration, et ceci est un grave défaut.
- Il y a ensuite, au voisinage du cordon, les parties du métal de base qui, sans être fondues, ont été portées à haute température. Il s'ensuit que ces parties ont subi un traitement thermique qui peuvent avoir des conséquences importantes sur la structure (grosseur des grains) et sur l'équilibre physico-chimiques (équilibre instable). Ces parties constituent la zone de transition ou zone thermiquement affectée.

L'examen micrographique de la soudure montre que la zone de transition n'est pas homogène comme pourrait le laisser supposer la macrographie, mais que la constitution cristalline du métal varie progressivement comme l'action thermique qui l'a influencée. On peut dire qu'on y distingue, en partant du métal fondu, une zone de surchauffe, une zone de recuit, une zone de revenu. C'est dans la zone de surchauffe que la modification cristalline est la plus sensible par suite de la grande vitesse de refroidissement, à tel point qu'on peut y relever une structure de trempe si le métal n'a pas la composition chimique voulue, ou si pendant le soudage, un facteur est intervenu qui a accéléré le refroidissement.

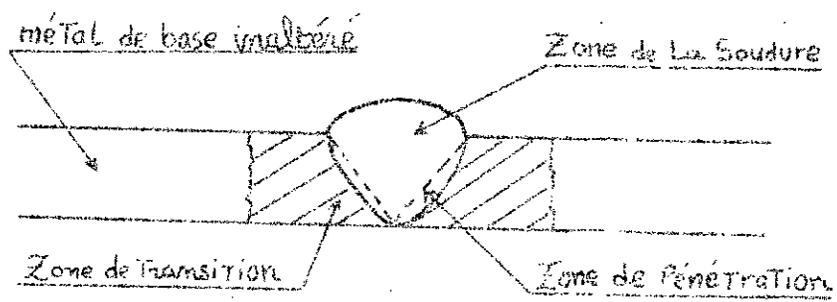


fig.1

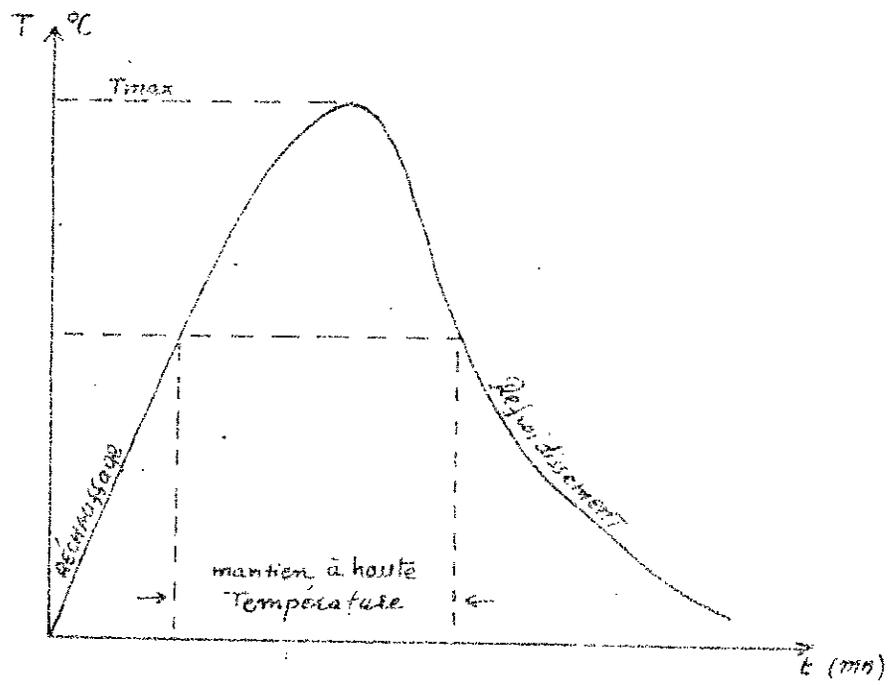


fig.2 . Cycle Thermique de Soudage et ses différentes phases

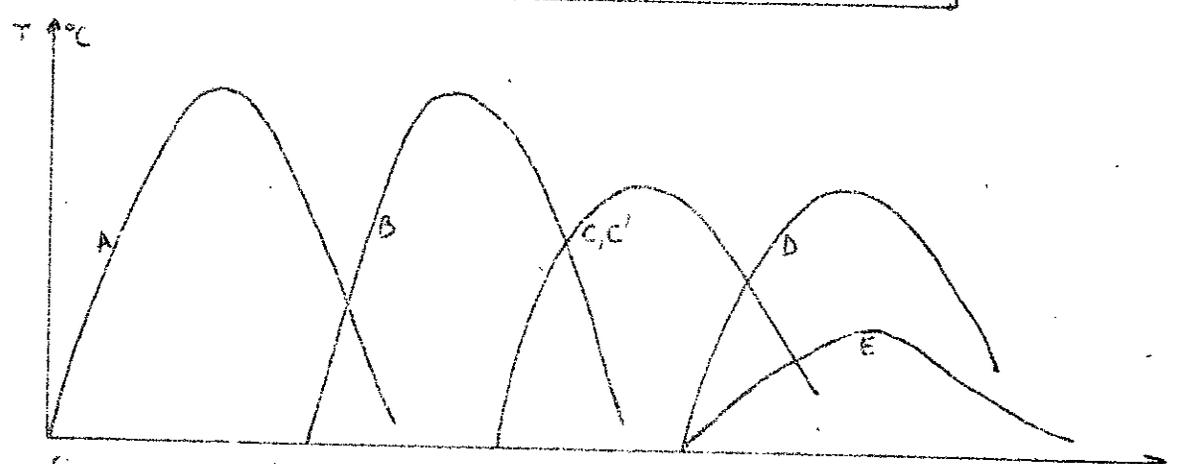
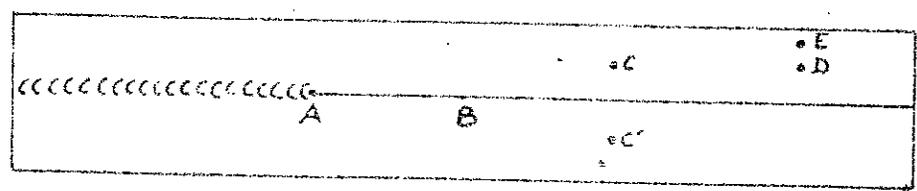


fig.3 Points situés à différentes distance de La ligne de Soudage et cycles Thermiques Correspondants

2°) Les cycles thermiques de soudage : Pendant que la source de chaleur (arc ou flamme) se déplace le long de ses bords à souder, le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale puis se refroidit. La loi suivant laquelle la température varie, en un point de la pièce en fonction du temps porte le Nom de "CYCLE THERMIQUE DE SOUDAGE"

Pour étudier expérimentalement un cycle thermique, on perce un trou à l'endroit voulu et on y introduit, convenablement isolée, l'extrémité sensible d'un thermocouple relié à un groupe amplificateur enregistreur.

L'allure générale de tout cycle thermique est représenté sur la figure 2 (fig 2).

Nous y distinguons :

- Une phase de réchauffage;
- Un maximum de température atteinte;
- Un temps de maintien à haute température;
- Une phase de refroidissement

Les cycles thermiques dépendent des variables suivantes:

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

a) Influence de la position du point :

- Prenons par exemple, pour fixer les idées, le dépôt d'une passe manuelle à l'arc sur une tôle et supposons constante la vitesse d'avancement.

Les points situés sur la ligne de fusion auront des cycles thermiques indentiques, mais déphasés l'un par rapport à l'autre du temps de l'arc à parcourir la distance A - B (Voir fig 3).

Des points comme C et C', symétriques par rapport au cordon de soudure subiront les mêmes cycles thermiques.

Des points comme C et D, situés à la même distance, auront des cycles thermiques identiques mais déphasés dans le temps.

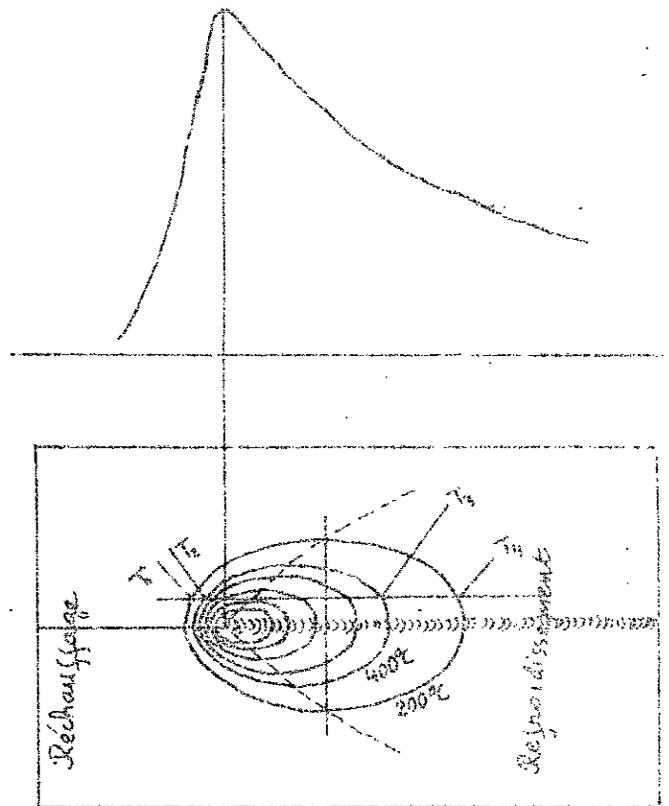


fig.4 - DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE AU COURS DU Soudage. ISOTHERMES ELLIPTIQUES ET CYCLES THERMIQUES des POINTS SITUÉS SUR LA LIGNE DE FUSION

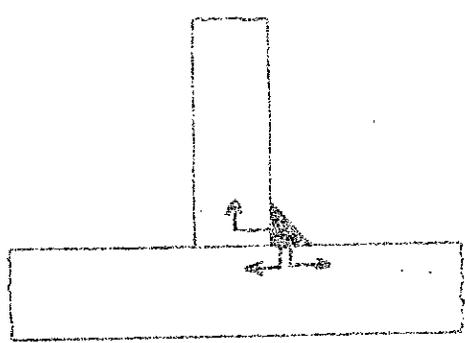


fig. b) flux TRITHERMIQUE

Le point E, aura un chauffage lent, une température plus basse.

- La distribution de la température aux différents points de la pièce à un instant donné (par exemple lorsque l'arc passe par A) est précisé par les isothermes de la figure 4 (voir fig 4).

Chaque isotherme est une ellipse dont le petit axe est d'autant plus déplacé vers l'arrière (par rapport au sens d'avancement de l'arc) que la température à laquelle correspond l'isotherme est plus faible. Tous les isothermes avancent avec l'arc en gardant inchangées leurs positions réciproques; ceci, naturellement, si la vitesse d'avancement est constante.

Les points qui, à un certain moment, se trouvent en avant du petit axe de l'ellipse correspondante sont dans la phase de réchauffage tandis que ceux qui se trouvent en arrière sont en train de se refroidir. Ainsi, le point T_1 situé sur l'isotherme de 200°C est en voie d'échauffement car il doit être remplacé par le point T_2 de l'isotherme de 400°C qui avance. De même, le point T_3 situé sur l'isotherme de 400°C est dans la phase de refroidissement car il doit être remplacé par le point T_4 situé sur l'isotherme de 200°C .

La ligne en trait interrompu qui relie entre elles les extrémités des petits axes des différents isothermes (appelée crête) divise par conséquent la tôle en deux zones: une antérieure qui est le siège des points se trouvant encore dans la phase de réchauffage et une postérieure dont les points sont en cours de refroidissement.

b) Influence du procédé: La variable qui, du point de vue des cycles thermiques, distingue les différents procédés de soudage est la quantité de chaleur introduite par centimètre de joint. Plus l'apport thermique spécifique est élevé et plus est importante la quantité de chaleur que le joint doit évacuer, de sorte, que le refroidissement sera plus lent

c) Influence de l'épaisseur: La chaleur introduite dans le joint par l'opération du soudage s'élimine principalement par conduction à travers le matériau, tandis que la part cédée à l'air par convection peut, en comparaison, être négligée.

Pratiquement toute la matière comprise dans un rayon d'environ 80 mm autour du point chaud concourt à la dissipation de la chaleur, de sorte qu'il est essentiel de tenir compte non seulement de l'épaisseur, mais encore de la géométrie du joint. (voir fig b)

d) Influence du matériau de base: Les propriétés physiques du métal de base qui influencent le plus les cycles thermiques sont la conductibilité thermique et la chaleur spécifique; tout autre condition restant égale par ailleurs, la vitesse de refroidissement leur est directement proportionnelle.

En ce qui concerne les aciers; on peut dire que l'influence des éléments d'alliage sur la conductibilité thermique est très modeste, de sorte qu'il n'y a pas lieu de faire de distinction, sous ce rapport, entre les aciers ordinaires et les aciers faiblement alliés.

e) Influence de la température des pièces: Plus la température initiale des pièces est élevée et plus le refroidissement est lent. La pratique du préchauffage peut être efficace toutes les fois qu'on a intérêt à atténuer la sévérité des cycles thermiques. La valeur de la température ambiante revêt ordinairement elle aussi une certaine importance, des soudures effectuées en plein air dans la saison d'hiver auront des cycles thermiques bien plus sévères que dans la saison d'été.

Les effets de dégagement de chaleur sont:

- modifications de l'équilibre physico-chimique et de la structure du métal, déformations et tensions internes.

L'allure de refroidissement (vitesse plus ou moins grande compte tenu de la composition chimique) à des conséquences

- sur la structure: agencement et grosseur des grains
- sur les composants à l'état solide : ferrite, cémentite ou solutions solides: martensite, austénite.

II Déformations dues au Soudage

a) dilatation et retrait

Soit une barre métallique chauffée mais restant à l'état solide, appelons l et l_0 les longueurs de la barre aux températures respectives T et 0°C .

On peut admettre que $l = l_0 (1 + \alpha T)$

α étant le coefficient de dilatation thermique linéaire, il est très petit variant de $8 \cdot 10^{-7}$ à $29 \cdot 10^{-6}$ qui n'est pas négligeable. Entre deux températures t et t' ($t' > t$)

L'accroissement de la longueur est de $\Delta l = l_0(1 + \alpha t) - l_0(1 + \alpha t') = l_0 \alpha \Delta t$
avec $\Delta t = t' - t$.

Cet accroissement Δl est donc proportionnel à l'accroissement de la température et \propto à la longueur initiale de la barre.

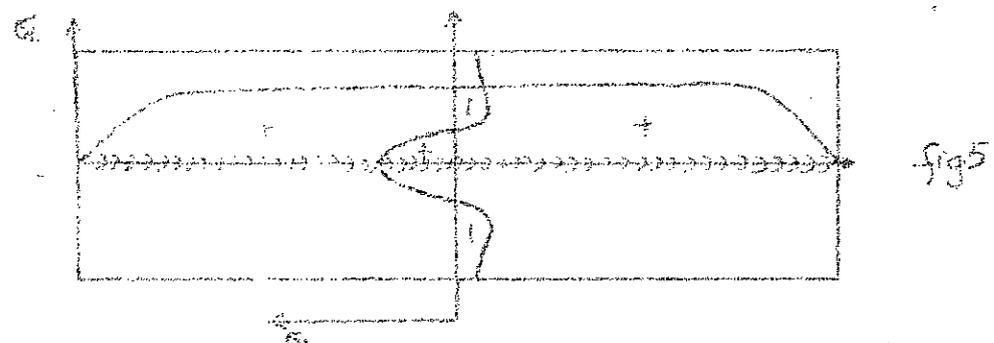
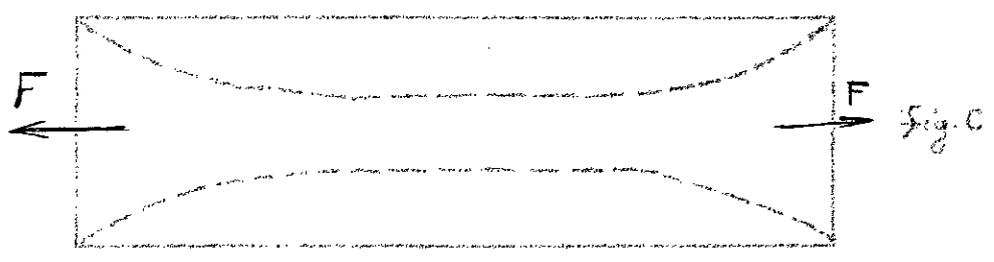
Cette dilatation se fait dans toutes les directions, elle est simplement plus accentuée dans le sens de la plus grande dimension. Au contraire sous l'action de forces de traction, l'allongement dans le sens d'attraction est toujours accompagné d'un retécissement dans les directions perpendiculaires pouvant aller jusqu'à la rupture complète (fig c)

Supposons qu'à la surface d'une pièce métallique, on chauffe une petite zone S (par l'arc électrique); cette zone S tend à se dilater, mais elle n'est plus adhérente avec le reste du métal qui reste froid. Cette zone S exerce une traction sur les parties froides et elle-même est soumise à une compression de la part du bloc auquel elle adhère. Si l'échauffement est suffisamment léger pour que le métal reste dans la zone d'élasticité, la petite zone S reprend sa forme et ses dimensions initiales lorsqu'elle se refroidit. Le phénomène de refroidissement est exactement symétrique de celui de l'échauffement. Au contraire si le gradient de température a été suffisant pour faire entrer le métal dans la zone d'élasticité, la petite zone S se contracte au refroidissement en conservant sa déformation, elle exerce donc sur le métal qu'il

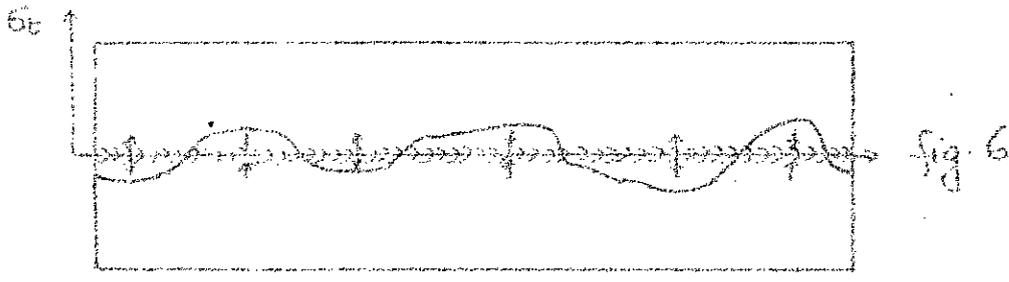
l'entoure une traction alors qu'elle même est soumise de sa part à la traction inverse. Nous voyons donc que tout point de soudure analogue à la petite zone S est le siège, après refroidissement, d'une zone de tension pouvant entraîner si le métal est fragile et peu ductile, la formation de fissures et même une rupture.

1) Tensions résiduelle de soudage

Pour fixer les idées, prenons le cas d'une soudure bord à bord entre deux tôles et examinons séparément le déroulement des phénomènes dans le sens longitudinal, c'est à dire parallèlement au joint puis dans le sens transversal.



TENSIONS RÉSIDUELLES LONGITUDINALES LE LONG DE L'AXE ET SUR UNE SECTION TRANSVERSAL DU JOINT



ALLURE IRRÉGULIÈRE DES TENSIONS RÉSIDUELLES TRANSVERSALES SUR L'AXE DU JOINT

a) Contraintes longitudinales : Pendant que la source de chaleur se déplace; le métal chauffé tend à s'allonger, mais le matériau froid adjacent agit par auto-bridage en s'opposant aux dilatations. La bande chaude subit d'abord une compression élastique et ensuite plastique. Les fibres longitudinales, refoulées à chaud, exerceront, au cours du refroidissement, une traction sur le métal de base adjacent. Le joint terminé se trouvera entièrement tendu dans le sens longitudinal, la tension ne s'annulant qu'aux extrémités. Les températures élevées mises en jeu autorisent à penser que l'effort résiduel de traction atteint la limite d'élasticité et que, tout comme dans le cas de la barre encastree, les derniers stades du refroidissement s'accompagnent également de phénomènes d'écrouissage (fig 5)

b) Contraintes Transversales : A mesure que le soudage avance le bain de fusion en un point quelconque se solidifie et tend à se contracter, il est empêché par le dépôt précédent qui, déjà refroidi, s'oppose à son retrait. Il en résulte dans le métal qui entoure ce point un état de traction transversal. Le déroulement rigoureux du phénomène est sensiblement influencé par le nombre de passes, par le pointage des bords, par le procédé de soudage utilisé, par l'épaisseur des tôles par la vitesse d'avancement etc... de sorte qu'il est pratiquement impossible de prévoir de façon précise quel sera l'état final. (fig 6)

L'exécution du joint s'accompagne globalement d'une contraction transversale qui ne peut se produire que si les tôles sont libres. Si elles sont bridées extérieurement, cette contraction ne peut avoir lieu, la réaction des bridages se superposera à l'effort exercé et la tension résiduelle totale pourra atteindre des niveaux très élevés.

2) Possibilités de déformations:

- a) Déformation angulaire ou transversale au cordon de soudure; sensible surtout si l'on opère à chanfrein en V et négligeable en chanfrein en X (fig 7)
- b) Si l'on soude deux tôles en angle intérieur à 90°, le retrait transversal du cordon de soudure et celui de la tôle continue produit, au refroidissement, un effet de pliage (fig 8)
- c) Si les pièces à souder entre elles sont assujetties de telle manière que le retrait transversal ne peut s'opérer librement, on risque d'aboutir à:

- des contraintes résiduelles susceptibles de créer des déformations permanentes (fig 9)

- des ruptures de passes en cours du soudage (fig 10)

- la rupture de l'une des deux pièces en un faible de celle-ci (fig 11)

d) effet deserrage: si l'on soude bord à bord deux toles T_1 et T_2 les parties solitaires constituent un assemblage rigide alors que la zone de fusion F ne peut se dilater librement. En se refroidissant elle tendra donc à se rapprocher les extrémités de deux tôles qui viendront se chevaucher si un pointage préalable soigné n'a pas été exécuté. Sensible pour des soudures de grande longueur (fig 12)

e) déformation longitudinale également importante avec des joints de grande longueur. Cette déformation est due à la présence, autour du métal en fusion en cours de dépôt dans le joint, des parties (zones) froides qui s'opposent à la libre dilation de ce métal dans le sens du joint, bien que généralement faible, ce retrait peut causer de contraintes résiduelles importantes et gênantes dans leurs effets.

f) déformation due à la flexion de la poutre résultant du retrait du métal dans le cordon (fig 13)

g) l'instabilité des éléments à souder sous l'action des forces de compression (fig 14)

III) Influence des déformations

1) Elles peuvent entraîner le changement des dimensions géométriques et la détérioration de la précision pendant l'usinage. Pour chaque copeau éliminé les tensions internes sont obligées de trouver un nouvel équilibre et cela se fait par de minuscules déformations élastiques successives incompatibles avec tout travail de précision. (fig 15)

2) au jeu des contraintes internes (qui varient d'ailleurs avec la température), il faut ajouter l'action des contraintes due aux sollicitations des charges et surcharges de service (fig 16)

3) Il en résulte également la diminution de la rigidité des effets mécaniques de la construction soudée.

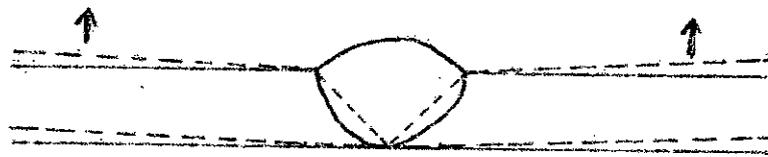


fig 7 DÉFORMATION ANGULAIRE

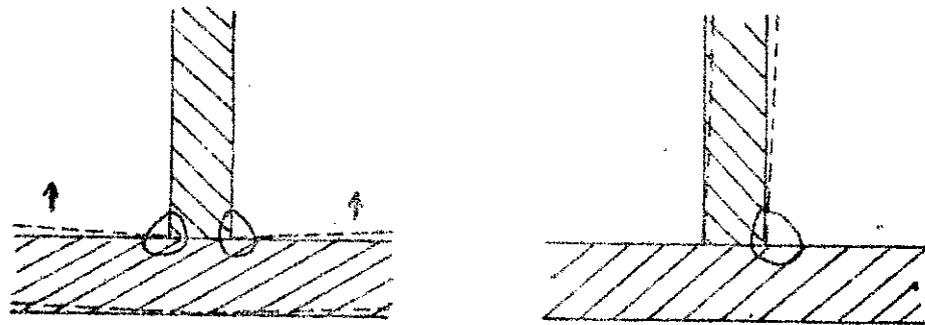


fig 8 EFFET DE SERRAGE

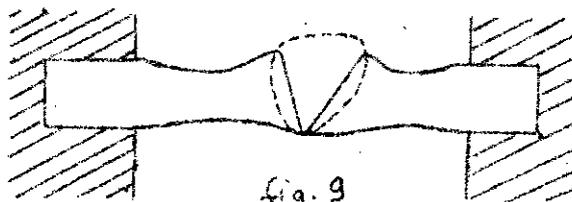


fig. 9

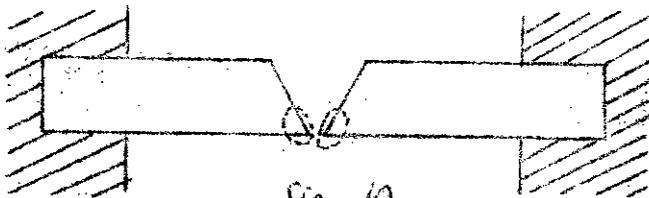


fig. 10

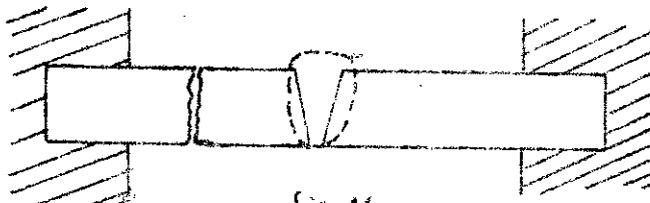


fig. 11

- 4) en tension triaxiale, on peut avoir rupture fragile sans déformation (fig 17)
- 5) en présence des tensions résiduelles de traction, la solidité des constructions soudées sous charge dynamique diminue
- 6) Influence sur l'instabilité locale des éléments des constructions soudées lorsque leurs épaisseurs sont petites.
- 7°) En effet, il existe inévitablement dans toutes constructions soudées des points où les lignes de force tendent à se concentrer; si le matériau est ductile, les points les plus fortement sollicités, une fois parvenue à la limite d'élasticité, cèdent plastiquement en permettant ainsi aux tensions de se répartir uniformément sur la totalité de la section résistante. En l'absence de ductilité, les points qui subissent les plus fortes contraintes, au lieu de se libérer par déformation, parviennent à la rupture avant que les sections voisines aient pu apporter leur aide.
- 8) Pour les constructions soudées, le processus de corrosion est intensifié à cause des tensions de traction et déformations.
- 9) La formation des fissures à froid, dont l'un des facteurs responsable sont les tensions résiduelles.
- 10) Dans la plupart des cas, les déformations rendent plus difficile l'assemblage de la construction soudée (changement de la forme prévue par le constructeur)
- 11) Pour l'usinage des pièces, on prendra une surépaisseur à cause des déformations dues au cours du soudage.

IV Préventions contre ces déformations:

- 1°) Mesure à prendre avant soudage:
 - a) A imposer par avance aux pièces à assembler une déformation égale, mais de sens inverse, à celle résultant de l'opération.A ce titre, il est possible:
 - de disposer en toit deux tôles destinées à être soudées bout à bout.
 - d'augmenter de 3 à 5 degrés, l'angle dièdre formé par deux tôles destinées à être soudées perpendiculairement entre elles.

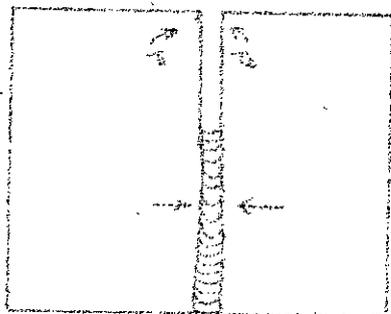


fig. 11

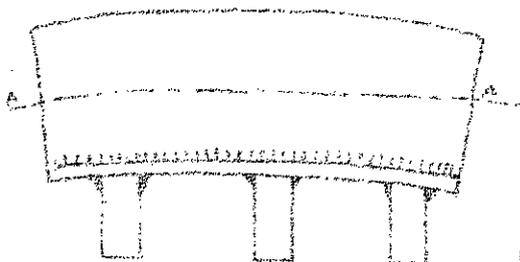
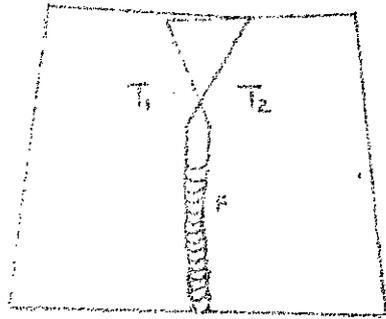


fig. 13

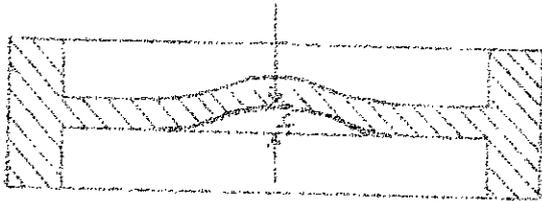
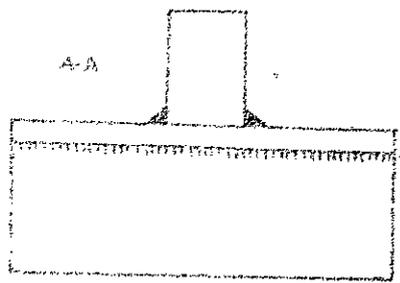


fig. 14

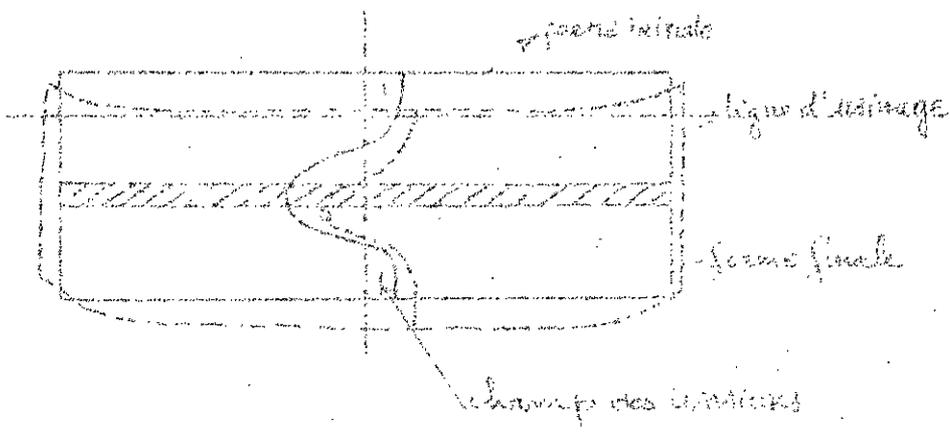


Fig. 15

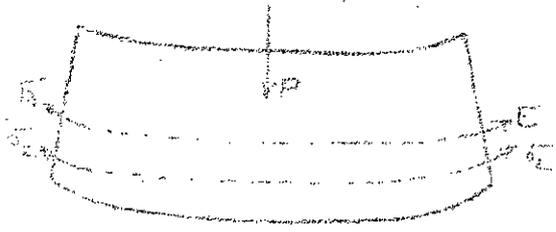


Fig. 16 σ_1 - Tensions dues aux charges extérieures $\sigma_1 < \sigma_r$
 σ_2 - Tensions résiduelles $\sigma_1 + \sigma_2 < \sigma_r$

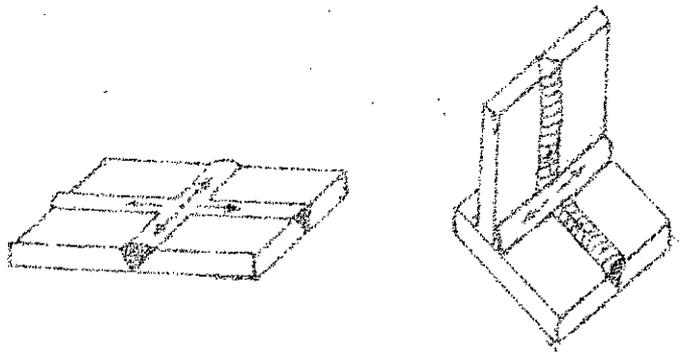


Fig. 17 - TENSIONS TRIAXIALES

- d'imposer à l'une des pièces une déformation préalable permanente, soit par pliage de semelles.
- Soit par emboutissage (soudage d'un flasque redevenant plan après soudage)

b) A utiliser un montage de soudage, ou dispositif auxiliaire capable d'immobiliser les pièces à souder dans des positions relatives bien déterminées certains montages sont conçus pour permettre la dilatation libre et contrôlée d'un ou de plusieurs éléments en cours de soudage. D'autres assurent le bridage des pièces sans cependant s'opposer au libre retrait transversal des soudures.

c) à pratiquer un pointage préalable des pièces l'espace entre deux points est de $30e + 40e$ (e étant l'épaisseur de la tôle).

d) Préchauffage

Le préchauffage des pièces à pour objet de prévenir la formation d'accumulation de tensions internes et permet d'éviter les risques de fissurations des pièces, son utilisation présente deux aspects:

- Dans le premier cas, il s'applique à l'assemblage de matériaux tel que la fonte, dépourvu d'allongement à froid mais présentant une certaine plasticité à chaud.
- Le préchauffage permet également d'éviter la trempe due, associée aux contraintes de retrait, l'effet peut entraîner un risque de fissuration, risque d'ailleurs accru par l'action de l'hydrogène éventuellement apporté par l'enrobage des électrodes.

Dans notre construction métallique, nous avons choisi un acier doux A42 parfaitement soudable à froid (ambiante + 20°C) sur tôles de 35 mm d'épaisseur, sans préchauffage pour des teneurs en carbone n'excédant pas 0,25% avec S+P \leq 0,06%

(Sur tôles de 50mm, on devra préchauffer à 100°C.)

Pour cette raison, nous n'avons pas établi le processus de calcul de température de préchauffage.

2) Au cours de l'exécution:

On cherchera à déterminer les opérations à effectuer pour combattre les effets de la chaleur tant au point de vue déformations que tensions internes. On cherchera tout d'abord à limiter les dégagements de chaleur. Plus l'opération est longue et plus la chaleur dégagée est importante puisqu'il y a perte notable par conduction. D'où l'intérêt des procédés, donnant de grands dégagements de chaleurs instantanés; soudage à l'arc. C'est pour limiter ces effets que l'on exécutera les gros cordons en plusieurs passes, en attendant suffisamment en chaque passe pour que les pièces se refroidissent.

Pour diminuer les tensions de retrait des cordons et donc les déformations et les contraintes internes qu'en résulte, on procède généralement ainsi:

- lorsque le cordon est long, on l'exécute par tronçons en pratiquant le soudage en pas de pèlerin (fig 22)
- lorsqu'on a 2 cordons d'angle à exécuter, on combine leur exécution pour limiter déformations et contraintes en faisant un soudage en pas de pèlerin alterné sur les 2 faces (fig 18)

On peut également citer plusieurs procédés de soudage qui diminuent les déformations,

- Soudures discontinues
- soudures symétriques

3) Après le Soudage:

a) Corriger les déformations en utilisant des "machines de corrections" pour donner la forme géométrique de la pièce.

b) Redressement d'une bosse en pleine tôle: On utilisera un chalumeau chauffeur qui sera dirigé sur le centre de la bosse, en portant le métal au rouge cerise (800 - 850 °C).

Les zones froides adjacentes s'opposent à la dilatation dans le plan de la tôle d'où, au refroidissement, un raccourcissement dû au retrait de la zone chauffée et par voie de conséquence, une réduction de la hauteur de la bosse.

fig 19. PRINCIPE du détensionnement A LA FLAMME
 PAR DÉFORMATION PLASTIQUE PROGRESSIVE DU JOINT

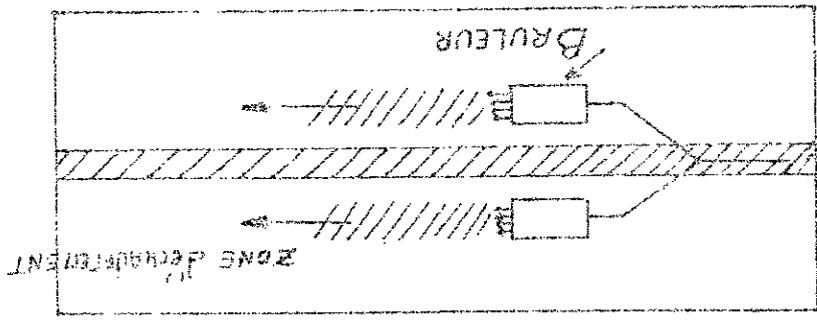
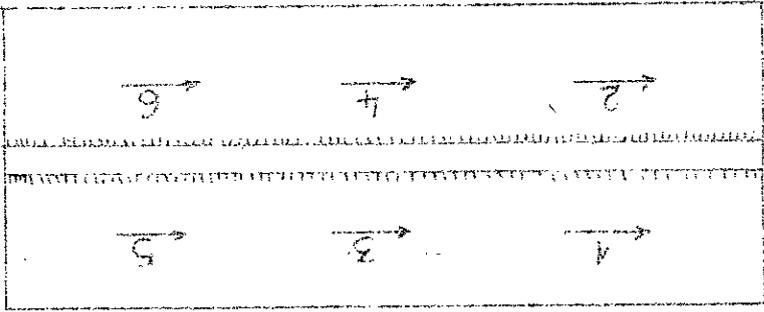


fig 18 Soudage en pas de pélerin Aiguille



Si nécessaire, plusieurs chaudes successives seront opérées jusqu'à disparition totale de la déformation.

Eventuellement, et si l'épaisseur est suffisante, le redressement pourra être accéléré en frappant à chaud à l'aide d'un maillet.

c) Moyens pour éliminer les tensions internes: on utilisera l'étirage de la flamme qui consiste à promener un brûleur à deux flammes à la surface de la pièce de manière à chauffer jusqu'à 200°C environ deux bandes du matériau adjacentes au joint, qui lui, reste froid (voir fig 19). Les zones chauffées, en se dilatant dans le sens parallèle au joint, obligent la portion de soudure placée entre elles à subir par ~~solidarité~~ une déformation plastique. La chaleur intervient uniquement pour provoquer un effet mécanique de traction sur le joint.

Ce traitement est beaucoup plus économique que celui au four et peut être appliqué sur de grandes constructions. La puissance des flammes, leur position exacte, la vitesse d'avancement etc... doivent être réglées en fonction de l'épaisseur et des dimensions de Tôles.

V Calcul des déformations:

Il y a quelques méthodes de calcul de déformations utilisées par l'institut de L'ININGRAD et l'école supérieure de MOSCOU. On choisit la méthode d'"OKERBLOMS"

A) CALCUL des déformations longitudinales

1°) Calcul des déformations longitudinales dues au soudage automatique:

L'énergie courante ou apport thermique spécifique est la quantité de chaleur introduite par centimètre de joint; elle est donnée par la formule suivante:

$$q = \frac{U_s \cdot I_s}{v_s} \cdot \eta$$

U_s = tension d'arc en Volts

I_s = Courant d'arc en ampères

v_s = vitesse en cm/mn

η = rendement

- Energie courante à travers la semelle supérieure et l'âme

$$q_1 = \frac{U_{s1} \cdot I_{s1}}{v_{s1}} \cdot \eta = \frac{32 \times 530}{\frac{38 \times 100}{3600}} \times 0,8 = 12853,89 \text{ J/cm} = 3071,419 \text{ cal/cm}$$

- Energie courante à travers la semelle inférieure et l'âme

$$q_2 = \frac{U_{s2} \cdot I_{s2}}{v_{s2}} \cdot \eta = \frac{35 \times 1263}{\frac{31,5 \times 100}{3600}} \times 0,8 = 20208 \text{ J/cm} = 4828,67 \text{ cal/cm}$$

- Calcul de l'aire Totale

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = 20 \times 1 + 67 \times 1 + 20 \times 2 = 127 \text{ cm}^2$$

$$A = 127 \text{ cm}^2$$

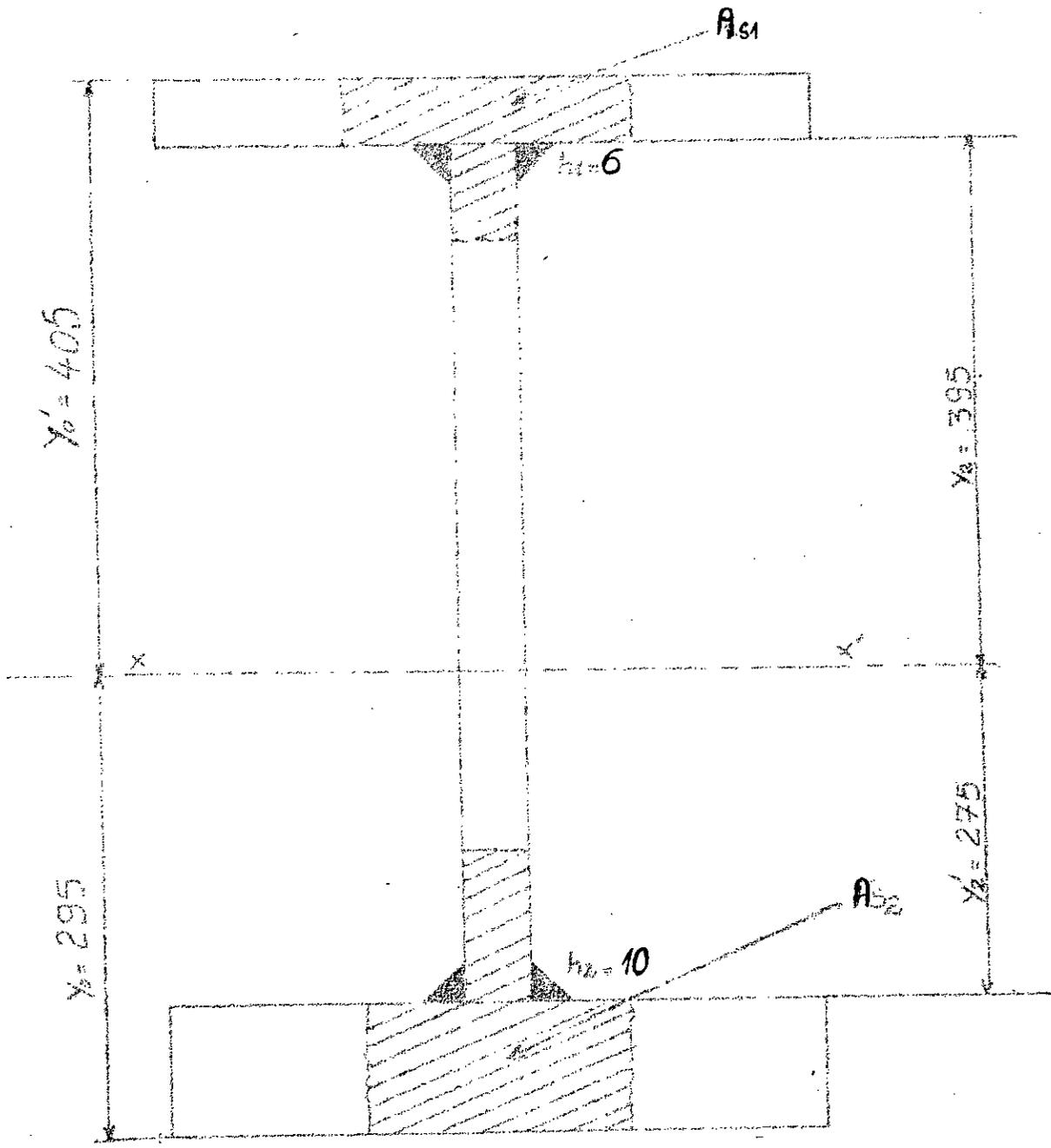
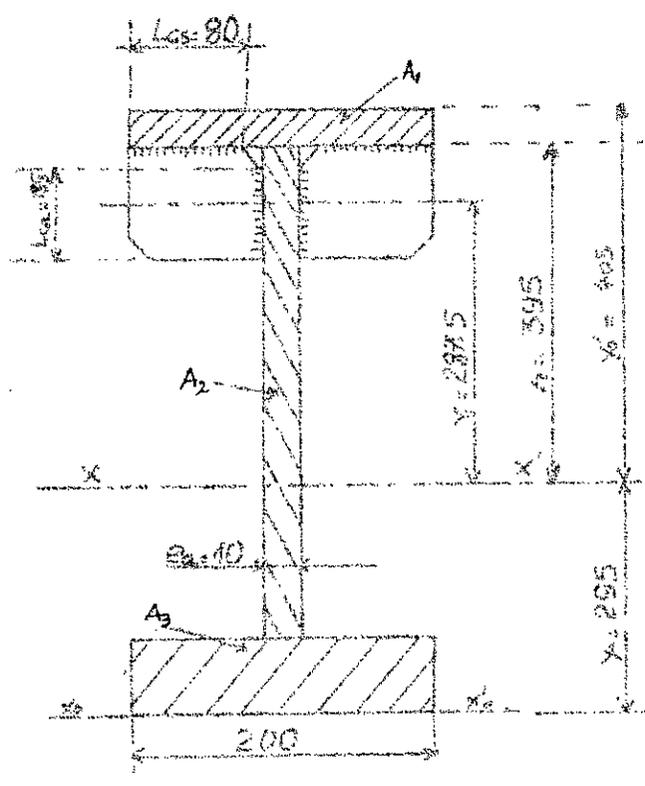
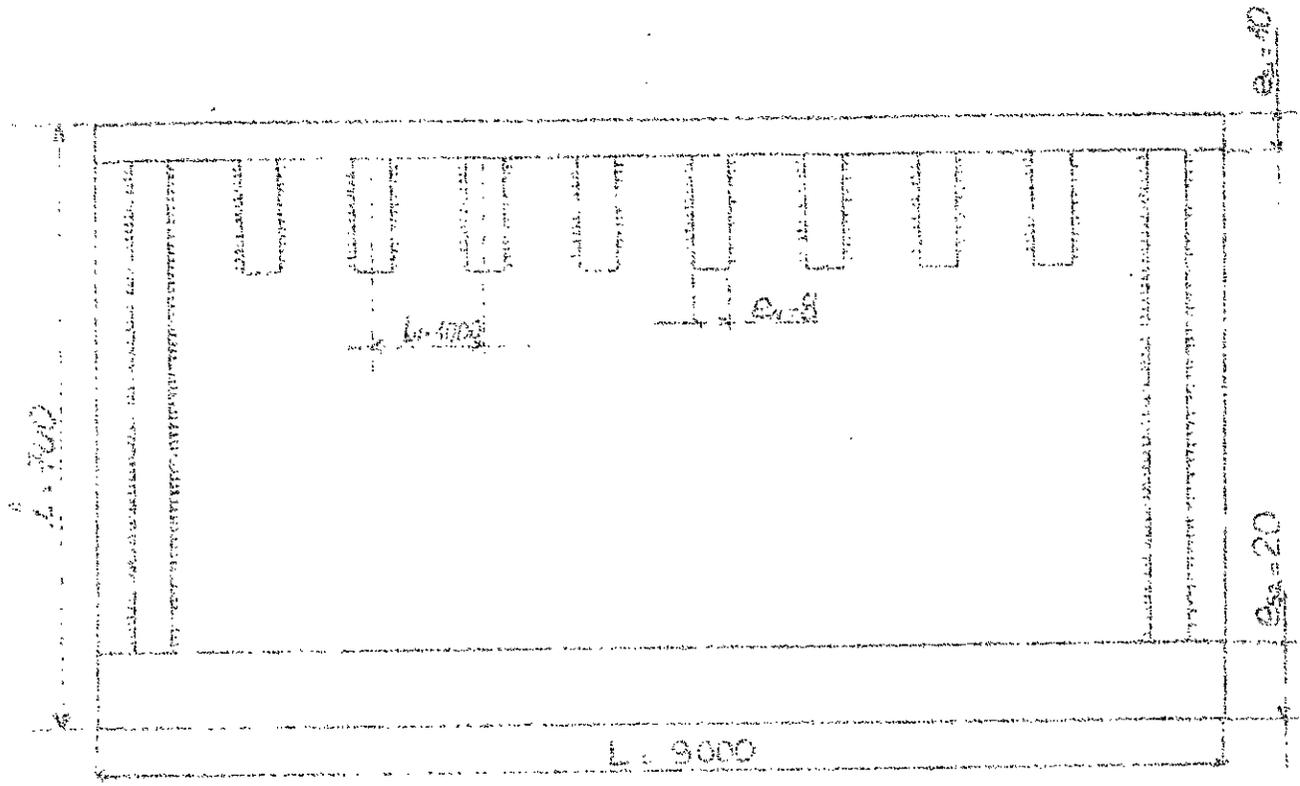


Fig 24 SOUDAGE DES SEMELLES AVEC L'ÂME



$B_r = 20$ SOUDAGE DES NERVURES

- Calcul du moment statique par rapport à l'axe $x_0 x'_0$

$$S_0 = 20 \times 1 \times (67 + 2 + \frac{1}{8}) + 67 \times 1 \times (\frac{67}{2} + 2) + 20 \times 2 \times 1 = 3741,5 \text{ cm}^3$$

$$S_0 = 3741,5 \text{ cm}^3$$

Distance de l'axe $x_0 x'_0$ à l'axe neutre

$$y_0 = \frac{S_0}{A} = \frac{3741,5}{127} = 29,5 \text{ cm}$$

$$y_0 = 29,5 \text{ cm}$$

Calcul du moment d'Inertie par rapport à l'axe xx'

$$I_x = 20 \times 1 \times (40,5 - \frac{1}{2})^2 + \frac{1 \times 67^3}{12} + 1 \times 67 \times (40,5 - 1 - \frac{67}{2})^2 + 20 \times 2 \times (29,5 - 1)^2 = 91965,58 \text{ cm}^4$$

$$I_x = 91965,58 \text{ cm}^4$$

a) Calcul des surfaces de plasticité de traction

- suivant la section supérieure

$$As_1 = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{y_0^2}{I_x} + \frac{340}{a_1}} = \frac{1}{\frac{1}{127} + \frac{29,5^2}{91965,58} + \frac{340}{3071,419}} = 7,378 \text{ cm}^2$$

$$As_1 = 7,378 \text{ cm}^2$$

- suivant la semelle inférieure

$$A_{s2} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{y_2^2}{I_x} + \frac{340}{q_2}} = \frac{1}{\frac{1}{127} + \frac{27,5^2}{91965,58} + \frac{340}{4828,67}} = 11,559 \text{ cm}^2$$

$$A_{s2} = 11,559 \text{ cm}^2$$

Remarque : Pour des éléments de section dépassant $(200 + 250) \text{ cm}^2$
l'aire de déformation plastique de traction sera déterminée ainsi :

$$A_s = \frac{q}{340}$$

m_1, m_2 coefficient d'augmentation de l'énergie courante entraînée par l'exécution du second cordon de la semelle. Ces coefficients sont donc supérieurs à l'unité et sont déterminés en fonction de la cathode, de la surface de plasticité de traction et des épaisseurs des éléments à souder.

$$m_1 = 1 + \frac{(h_1 + e_a)}{A_{s1}} \cdot e_{s1} = 1 + \frac{(0,6 + 1) \times 1}{7,378} = 1,20$$

$$m_2 = 1 + \frac{(h_2 + e_a)}{A_{s2}} \cdot e_{s2} = 1 + \frac{(1,0 + 1)}{11,559} \times 2 = 1,38$$

- Energie courante totale introduite par cm pour souder la semelle supérieure et l'âme est donc :

$$Q_1 = m_1 q_1 = 1,20 \times 3071,419 = 3685,70 \text{ cal/cm}$$

$$Q_1 = 3685,70 \text{ cal/cm}$$

Energie courante totale introduite par cm pour souder la semelle inferieure et l'âme est donc:

$$Q_2 = m_2 q_2 = 1,38 \times 4828,67 = 6663,56 \text{ cal/cm}$$

$$Q_2 = 6663,56 \text{ cal/cm}$$

b) Calcul des retrécissements :

- Si $\frac{Q}{A} \leq 150 \text{ cal/cm}^2$; le retrécissement relatif se calcule à l'aide de formule suivante:

$$\Delta s = - 3,53 \times 10^{-6} \frac{Q}{F}$$

- Si $\frac{Q}{A} > 150 \text{ cal/cm}^2$; le retrécissement relatif sera donne par le graphe de la figure 23

$$\frac{Q_1}{A} = \frac{3685,70}{127} = 29,02 < 150 \text{ cal/cm}^2$$

$$\frac{Q_2}{A} = \frac{6663,56}{127} = 52,46 < 150 \text{ cal/cm}^2$$

le retrécissement relatif sera donc

- suivant la semelle superieur:

$$\Delta s_1 = - 3,53 \times 10^{-6} \frac{Q_1}{A} = - 3,53 \times 10^{-6} \times 29,02 = - 102,445 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

- suivant la semelle inferieure

$$\Delta s_2 = - 3,53 \times 10^{-6} \frac{Q_2}{A} = - 3,53 \times 10^{-6} \times 52,46 = - 185,21 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

Les retrécissements longitudinaux de la poutre devienent alors:

$$\Delta l_1 = L \Delta s_1 = - 900 \times 102,445 \times 10^{-6} = - 0,092 \text{ cm}$$

$$\Delta l_2 = L \Delta s_2 = - 900 \times 185,21 \times 10^{-6} = - 0,166 \text{ cm}$$

c) Calcul des charges fictives qui peuvent entrainer cette déformation:

- suivant la semelle superieure

$$Cs_1 = \frac{\Delta s_1 \cdot A \cdot Y_2}{I_x} = \frac{-102,445 \times 10^{-6} \times 127 \times 39,5}{91955,58} = - 5,6 \times 10^{-6}$$

RETRECISSEMENT RELATIF A

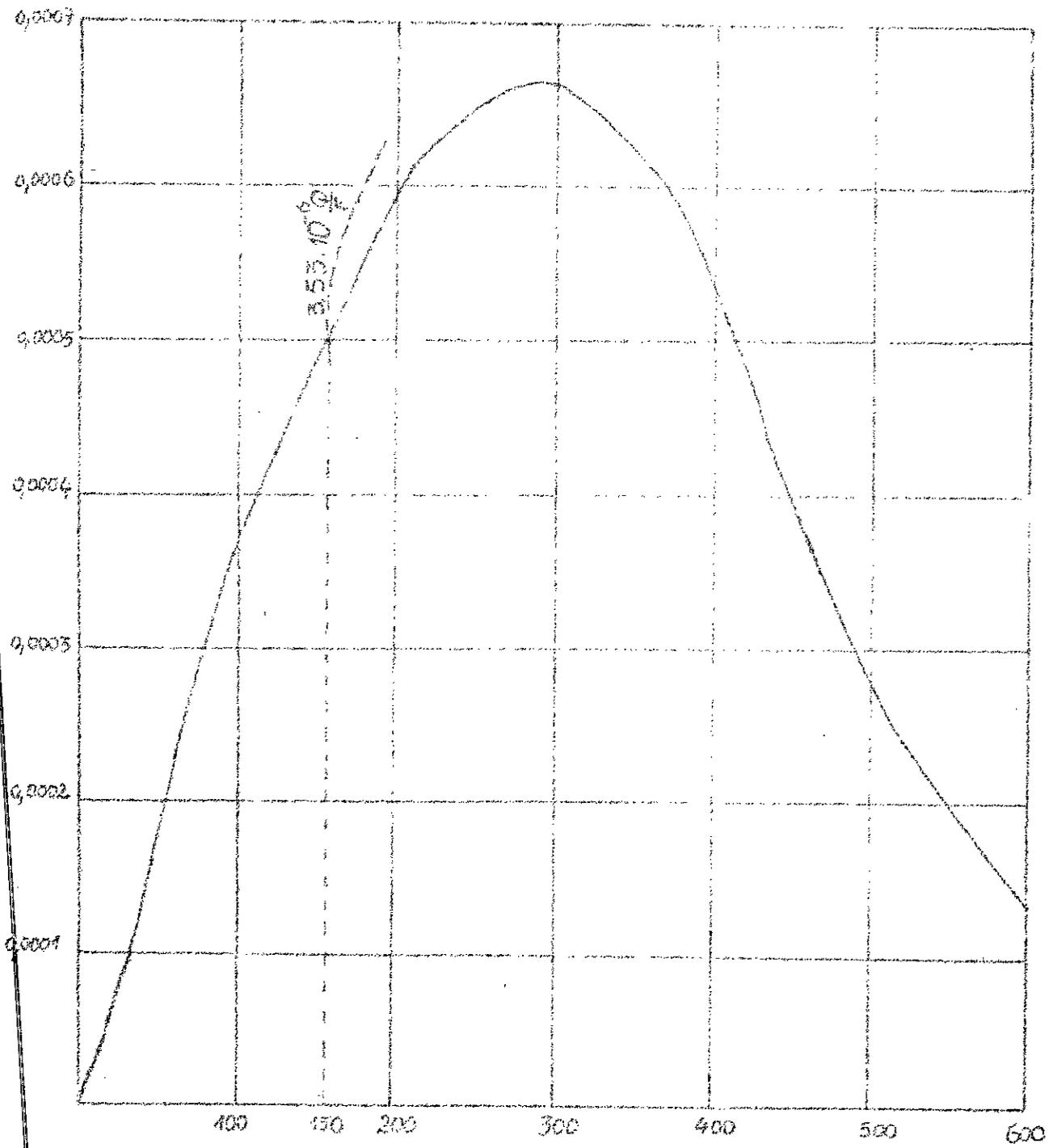


Fig 23. COURBE DONNANT LE RETRECISSEMENT
POUR $\frac{Q}{F} > 150$

- suivant la semelle inferieure

$$C_{s_2} = \frac{\Delta e_2 \cdot A \cdot Y_2'}{I_x} = - \frac{185,21 \times 10^{-6} \times 127 \times 27,5}{91965,58} = - 7,05 \times 10^{-6}$$

La flèche (ou déformée) sera déterminée par la formule suivante:

$$F_I = \left(\frac{C_{s_2} - C_{s_1}}{8} \right) L^2 = \left(\frac{-7,05 + 5,6}{8} \right) \times 10^{-6} \times 900^2 = - 0,15 \text{ cm}$$

$$F_I = - 1,5 \text{ mm}$$

2°) Calcul des déformations dues au soudage des Nervures :

a) L'énergie courante introduite par centimètre de joint est donnée en fonction de la cathète h (cm); OKARBLIC a utilisé cette méthode car la vitesse du soudage à l'arc manuel est variable d'où une énergie courante variable.

$$q_c = 7250 h^2 \quad (\text{cal/cm}) \quad (1)$$

b) L'énergie courante résultant du soudage des Nervures se compose d'une énergie courante suivant la semelle (soudage de la Nervure avec la semelle) et d'une énergie courante suivant l'âme (soudage de la Nervure avec l'âme).

- Énergie courante suivant l'âme

$$q_a = \frac{2 e_a}{2 e_a + e_N} \cdot q_c \quad (\text{cal/cm}) \quad (2)$$

- Énergie courante suivant la semelle

$$q_{s_1} = \frac{2 e_{s_1}}{2 e_{s_1} + e_N} \cdot q_c \quad (\text{cal/cm}) \quad (3)$$

e_a = épaisseur de l'âme

e_N = épaisseur de la Nervure

e_{s_1} = épaisseur de semelle supérieure

L'énergie courante totale lorsqu'on exécute le second cordon de la Nervure suivant la semelle et suivant la Nervure.

- Energie courante suivant l'âme

$$q_{ca} = m_{1a} q_a \quad (4)$$

- Energie courante suivant la semelle

$$q_{cs} = m_{2s} q_{s1} \quad (5)$$

m_{1a} , m_{2s} coefficients d'augmentation de l'energie courante entrainée par l'exécution du second cordon de la Nervure suivant l'âme et suivant la semelle.

$$m_{1a} = 1 + \frac{(h_1 + e_a)}{A_{1a}} e_N \quad (6)$$

$$m_{2s} = 1 + \frac{(h_2 + e_{s1})}{A_{2s}} e_N \quad (7)$$

A_{1a} et A_{2s} : Aires de déformations plastiques de traction

$$A_{1a} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{y_1^2}{I_x} + \frac{340}{q_a}} \quad (8)$$

$$A_{2s} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{y_2^2}{I_x} + \frac{340}{q_s}} \quad (9)$$

y_1 = distance de l'axe neutre xx' jusqu'au milieu de la longueur du cordon de l'âme et de la Nervure

y_2 = distance de l'axe neutre xx' jusqu'au cordon de la semelle et de la Nervure.

c) Calcul des retrecissements :

- retrecissement suivant l'âme:

$$\Delta a = m_a \cdot q_a \cdot \frac{n}{A} \cdot L_{ca} \quad (\text{cm}) \quad (10)$$

n = nombre de Nervure

L_{ca} = longueur du cordon de l'âme et de la Nervure

Q_a = énergie courante totale suivant l'âme

- Retraccinement suivant la semelle:

$$\Delta_s = \mu_s \cdot Q_s \cdot \frac{n}{A} \cdot L_{cs} \quad (11)$$

Q_s = énergie courante totale suivant la semelle

L_{cs} = longueur du cordon de la Nervure et de la semelle.

d) Détermination des angles de déviations et des flèches:

- suivant l'âme

$$\varphi_a = \mu_a \cdot Q_a \cdot \frac{y_1}{I_x} \cdot L_{ca} \quad (12)$$

$$f_a = \varphi_a \cdot L_N \cdot \frac{n_1 (n_1 + 1)}{2} \quad (13)$$

- suivant la semelle

$$\varphi_s = \mu_s \cdot Q_s \cdot \frac{y_2}{I_x} \cdot L_{cs} \quad (14)$$

$$F_s = \varphi_s \cdot L_N \cdot \frac{n_1 (n_1 + 1)}{2} \quad (15)$$

L_N = distance entre deux nervures

n_1 = nombre de paires de Nervures

La flèche totale sera donc:

$$\varphi_N = \varphi_a + \varphi_s \quad (16)$$

$$F_N = f_a + f_s \quad (17)$$

e) Pour déterminer μ , il faut calculer la rigidité relative

- suivant l'ame

$$\mu_a = \frac{A}{x_a \cdot e_a} \quad (18)$$

- suivant la semelle

$$M_s = \frac{A}{x_s s_1} \quad (19)$$

x étant la longueur du métal à l'état de plasticité

x_a, x_s se déterminent par la formule suivante

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

suisvant l'âme : $\sum e = 2e_a + e_N$

suisvant la senelle : $\sum e = 2e_s + e_N$

v_s : vitesse de soudage ($v_s = 6 \text{ m/h}$)

3°) Application numérique :

- Energie courante totale :

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

- Energie courante suisvant l'âme .

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

$$q_a = 3314,28 \text{ cal/cm}$$

- Calcul de l'aire de déformation plastique de traction

$$A_{1a} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{y_1^2}{I_x} + \frac{340}{q_a}} = \frac{1}{\frac{1}{127} + \frac{28,75^2}{91965,58} + \frac{340}{3314,28}} = 8,57 \text{ cm}^2$$

$$A_{1a} = 8,57 \text{ cm}^2$$

- Calcul du coefficient d'augmentation de l'energie courante entraînée par le second cordon de la Nervure et l'âme

$$m_{1a} = 1 + \frac{h_1 + e_a}{A_{1a}} \cdot e_N = 1 + \frac{(0,8 + 1)}{8,37} \times 0,8 = 1,172$$

L'énergie courante devient alors :

$$q_{ca} = m_{1a} q_a = 1,172 \times 3314,28 = 3884,33 \text{ cal/cm}$$

et comme il y a 2 parties symétriques

$$Q_a = 2 \times q_{ca} = 2 \times 3884,33 = 7768,66 \text{ cal/cm}$$

$$Q_a = 7768,66 \text{ cal/cm}$$

- Energie courante suivant la semelle

$$q_s = \frac{2 e_{s1}}{2e_{s1} + e_N} q_c = \frac{2 \times 1}{2 \times 1 + 0,8} \times 4640 = 3314,28 \text{ cal/cm}$$

$$q_s = 3314,28 \text{ cal/cm}$$

$$A_{2s} = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{y_2^2}{I_x} + \frac{340}{q_s}} = \frac{1}{\frac{1}{127} + \frac{39,5^2}{91965,58} + \frac{340}{3314,28}} = 7,847 \text{ cm}^2$$

$$A_{2s} = 7,847 \text{ cm}^2$$

$$m_{2s} = 1 + \frac{h_2 + e_{s1}}{A_{2s}} \cdot e_N = 1 + \frac{(0,8 + 1)}{7,847} \cdot 0,8 = 1,183$$

$$m_{2s} = 1,183$$

L'énergie courante devient alors :

$$q_{cs} = n_{2s} q_s = 1,185 \times 3314,28 = 3920,79 \text{ cal/cm}$$

et comme il y a 2 parties symétriques $Q_s = 2 q_s$

$$Q_s = 7841,58 \text{ cal/cm}$$

- Calcul de la rigidité relative

$$x_a = 8,1 \times 10^{-6} \left(\frac{Q_a}{\sum e} \right)^2 \times v_s = 8,1 \times 10^{-6} \left(\frac{7768,66}{2,8} \right)^2 \times 0,166 = 10,35 \text{ cm}$$

$$x_s = 8,1 \times 10^{-6} \left(\frac{Q_s}{\sum e} \right)^2 \times v_s = 8,1 \times 10^{-6} \left(\frac{7841,58}{2,8} \right)^2 \times 0,166 = 10,545 \text{ cm}$$

$$M_a = \frac{A}{x_a \cdot e_a} = \frac{127}{10,35 \times 1} = 12,27$$

$$M_s = \frac{A}{x_s \cdot e_s} = \frac{127}{10,545 \times 1} = 12,04$$

D'après le graphique de la figure (22) on a :

$$\text{Pour } M_a = 12,27 \longrightarrow \mu_a = -7,3 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cal}$$

$$\text{Pour } M_s = 12,04 \longrightarrow \mu_s = -7,5 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cal}$$

- Calcul du retroussement à l'axe

$$\Delta a = \mu_a \cdot Q_a \cdot \frac{n}{A} \cdot Lc_a = -7,3 \times 10^{-6} \times 7768,66 \times \frac{(8 \times 18,5 + 2 \times 64)}{127} = -0,123 \text{ cm}$$

$$\Delta a = -1,23 \text{ mm}$$

l'angle de déviation est :

$$\varphi_a = \mu_a \cdot Q_a \cdot \frac{y_1}{I_x} \cdot Lc_a = -7,3 \times 10^{-6} \times \frac{7768,66 \times 28,75}{91965,58} \times 18,5 = -328 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

COEFFICIENT $\gamma \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cal}$

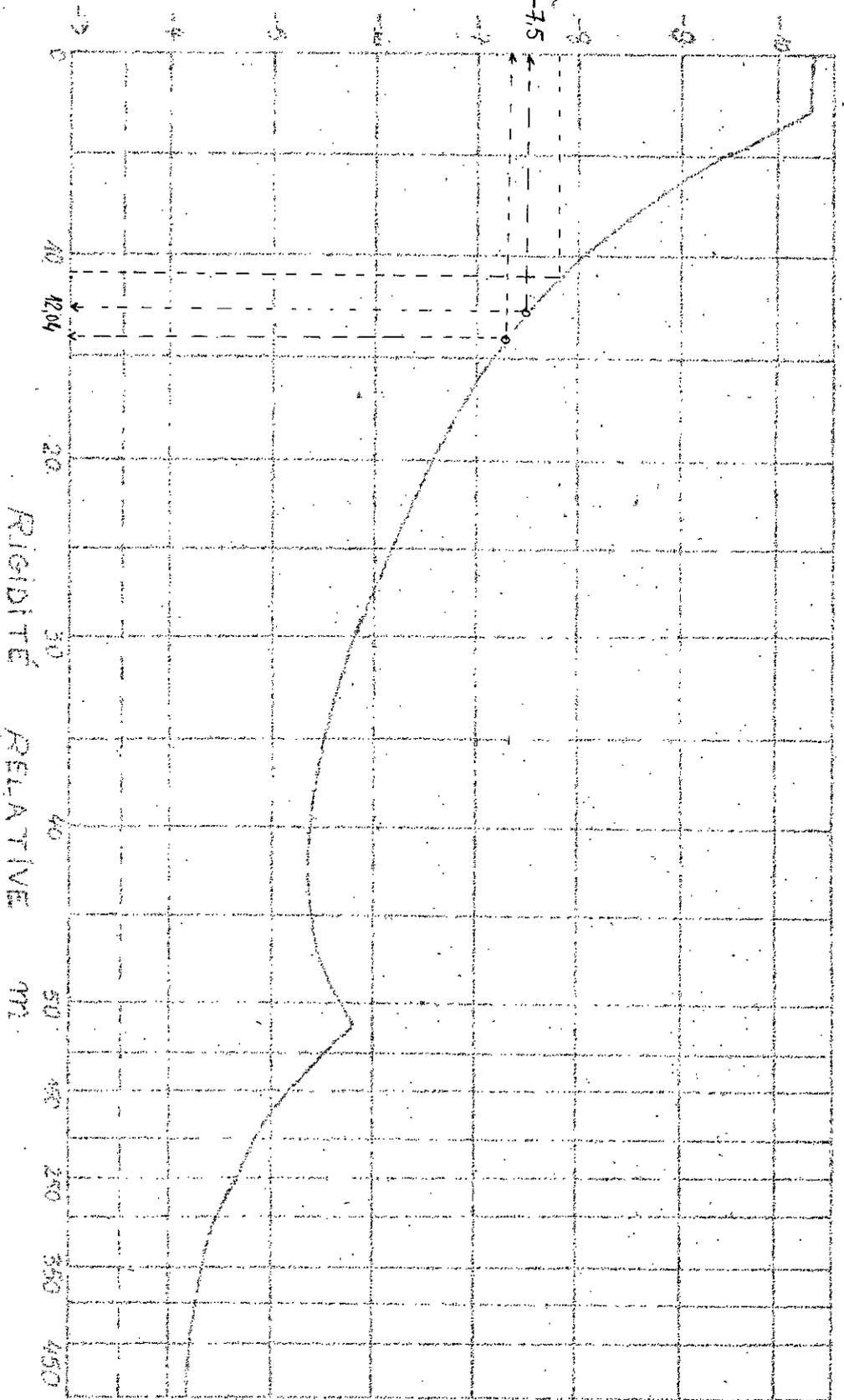


fig. 22

COURBE DOMINANT γ EN FONCTION DE η

$$\psi_a = - 328 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

La flèche est :

$$f_a = \psi_a \cdot L_N \cdot \frac{n_1 (n_1 + 1)}{2} = - 328 \times 10^{-6} \cdot 100 \times 5 \cdot \frac{(5 + 1)}{2} = - 0,49 \text{ cm}$$

$$f_a = - 4,9 \text{ mm}$$

- Rétrécissement suivant la semelle

$$\Delta_s = \mu_s \cdot \frac{Q_s}{A} \cdot n \cdot Lc_s = - 7,5 \times 10^{-6} \times \frac{7841,58}{127} \times 10 \cdot (8 + 8) = - 0,074 \text{ cm}$$

$$\Delta_s = 0,74 \text{ mm}$$

Calcul de l'angle de deviation

$$\begin{aligned} \psi_s &= \mu_s \cdot Q_s \cdot \frac{y_2}{I_x} \cdot Lc_s = - 7,5 \times 10^{-6} \times \frac{7841,58}{91965,58} \times \frac{39,5}{2} \times (8 + 8) = \\ &= - 404,16 \times 10^{-6} \text{ rad} \end{aligned}$$

$$\psi_s = - 404,16 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

La flèche est :

$$f_s = \psi_s \cdot L_N \cdot n_1 \cdot \frac{(n_1 + 1)}{2} = - 404,16 \times 10^{-6} \times 100 \times 5 \times \frac{(5 + 1)}{2} = - 0,606 \text{ cm}$$

$$f_s = - 6,06 \text{ mm}$$

La flèche totale est donc :

$$\psi_N = \psi_a + \psi_s = (-404,16 - 328) \times 10^{-6} = - 732,16 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

$$f_N = f_a + f_s = - 4,9 - 6,06 = - 10,96 \text{ mm}$$

Conclusion : La déformée de la poutre en I sera égale à la somme de la déformée due au soudage automatique et de la déformée due au soudage manuel.

$$F_o = F_I + F_N = - 1,5 - 10,96 = - 12,46 \text{ mm}$$

$$F_o = - 12,46 \text{ mm}$$

B) CALCUL DES DÉFORMATIONS LATÉRALES :

1°) Calcul des déformations latérales dues au soudage automatique:

- On calcul l'angle de déviation et la flèche :
- suivant la semelle supérieure :

$$\text{Tg} \alpha_1 = \frac{0,075 h_1 (b_1 + e_{s1})}{b_1 (0,075 b_1 + e_{s1} + \frac{h_1 e_{s1}}{b_1^3})}$$

$$h_f = 6 \text{ mm (cathéte)}$$

b_1 = la hauteur du cordon . voir fig (25)

$$b_1 = h_1 + \frac{e_a}{2} = 0,6 + \frac{1}{2} = 1,1 \text{ cm}$$

$$\text{Tg} \alpha_1 = \frac{0,075 \times 0,6 (1,1 + 1)}{1,1(0,075 \times 1,1 + 1 + \frac{3 \times 0,6 \times 1}{1,1^3})} = 0,035$$

La flèche est donc

$$f_1 = 0,5 B \text{Tg} \alpha_1 = 0,5 \times 20 \times 0,035 = 0,35 \text{ cm}$$

$$f_1 = 3,5 \text{ mm}$$

- Suivant la semelle inférieure

$$b = h_2 + \frac{e_a}{2} = 1 + \frac{1}{2} = 1,5 \text{ cm}$$

$$Tg\alpha_2 = \frac{0,075 h_2 (b_2 + e_{s2})}{b_2 (0,075 b_2 + e_{s2} + \frac{3 h_2 e_{s2}^3}{b_2^3})}$$

$$Tg\alpha_2 = \frac{0,075 \times 1 \times (1,5 + 2)}{1,5(0,075 \times 1,5 + 2 + \frac{3 \times 1 \times 8}{1,5^3})}$$

La flèche sera donc :

$$f_2 = 0,5 BTg\alpha_2 = 0,5 \times 20 \times 0,019 = 0,19 \text{ cm}$$

$$f_2 = 1,9 \text{ mm}$$

VI Norme de Tolérance :

La norme soviétique (ON II III - B5 - 69) indique que dans cette construction soudée (Poutre en I) avant des déformations dues à la fléxion, la flèche calculée ne doit pas dépasser la valeur de la flèche critique suivante : $f_{cr} \leq \frac{1}{750} L$ (L'étant la longueur de la poutre)

$$f_{cr} \leq \frac{9000}{750} = 12 \text{ mm}$$

$$f_{cr} \leq 12 \text{ mm}$$

Dans notre la flèche totale $f_0 = 12,46 \text{ mm}$ est légèrement supérieur à la flèche critique, ~~évaluée~~, nous allons donc procéder à la correction de cette déformation en utilisant certaines méthodes pratiques qui consistent à la réduire.

- a) On commence par souder les éléments d'épaisseurs épaisses; (dans notre cas: la semelle inférieure)
- b) On ajoute quelques nervures à la semelle inférieure(on prendra 4 nervures supplémentaires)

c) d'après les calculs; on constate une diminution de la flèche de 20% soit $F_0 = 10$ mm

En ce qui concerne les déformations angulaires, la même norme indique que la flèche calculée ne doit pas dépasser la valeur de la flèche critique suivante :

$$f_{cr} \leq 0,01 B \quad (B \text{ étant la largeur de la semelle})$$

$$\text{Soit } f_{cr} \leq 0,01 \times 200 = 2 \text{ mm}$$

$f_1 > f_{cr}$ = à corriger la semelle supérieure

$f_2 < f_{cr}$ = pas de correction

La semelle supérieure doit être corrigée en utilisant la machine de correction (voir fig 26) pour obtenir la forme voulue de la poutre

Remarque: L'assemblage des Nervures sur un élément continu provoque un effet de pliage (ou déformations angulaires). Ces déformations suivant l'âme seront négligeables d'après la formule suivante

$$f'_0 = \frac{H'}{6} \leq 100 + 200 \text{ mm}$$

H' étant la hauteur de l'âme

De même pour les déformations suivant les semelles, qui seront aussi négligeables en tenant compte que la distance entre deux Nervures ne dépasse pas 2 m.

$$L_r \leq 2 \text{ m}$$

Fig. 24

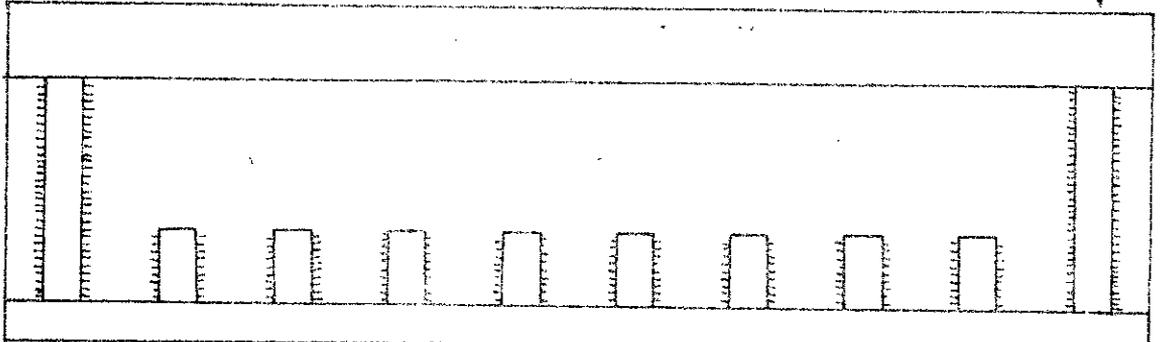
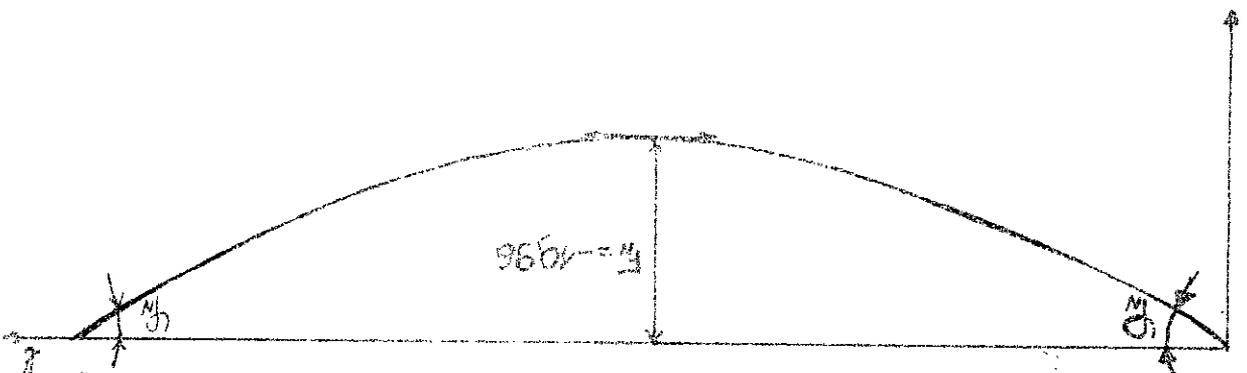
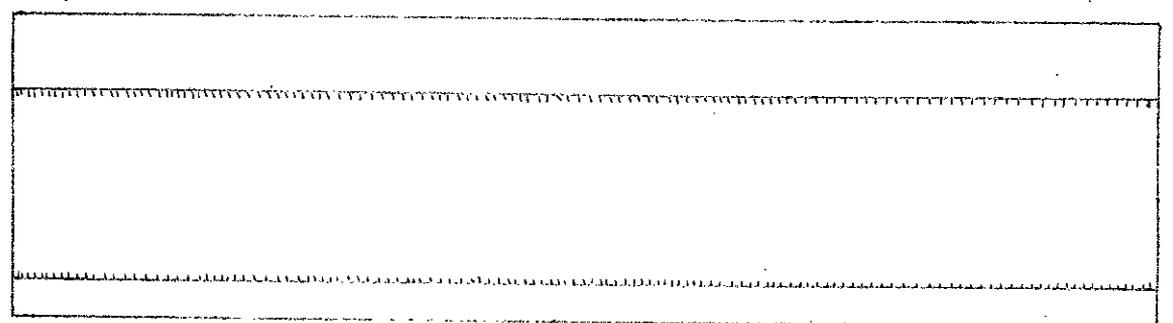
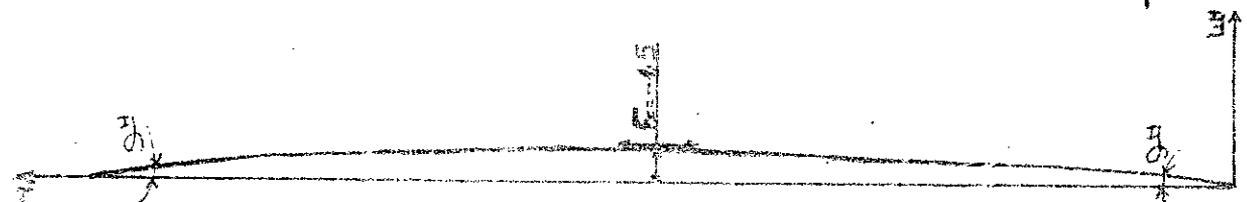
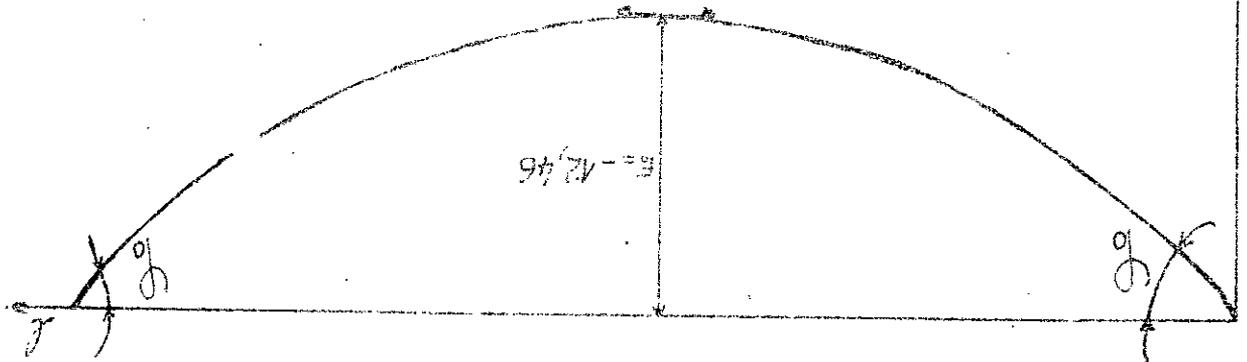


Fig. 24 Courbes des déformées (FLECHES)

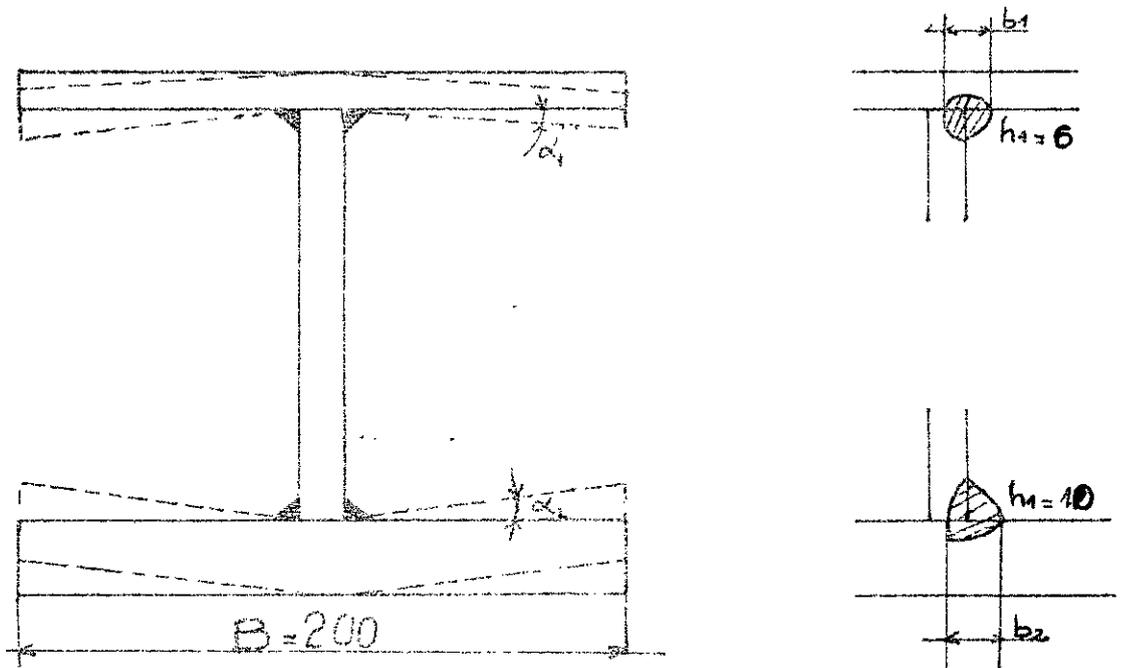


fig.25 DÉFORMATIONS ANGULAIRES

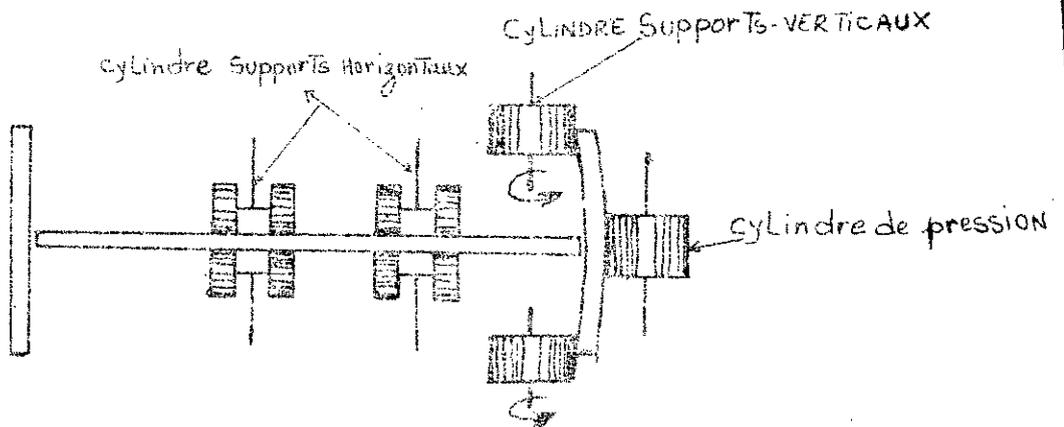


fig.26 MACHINE DE CORRECTION DES DÉFORMATIONS ANGULAIRES

-organisation de L'atelier-

Temps Total d'exécution

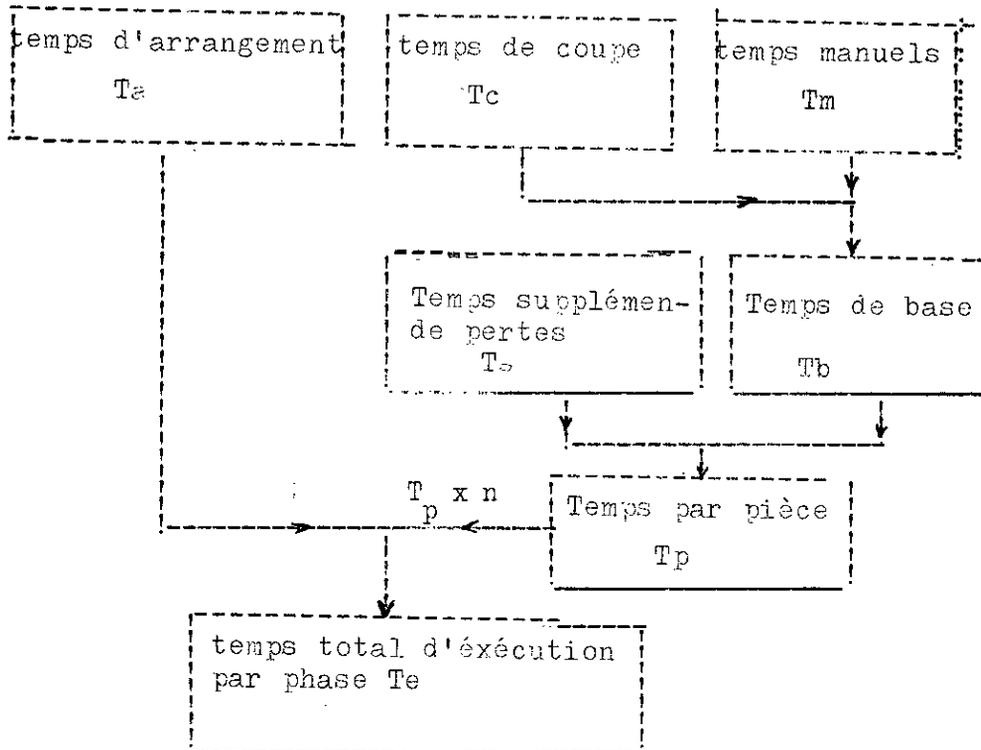
Le temps nécessaire à la fabrication d'une poutre en I se compose de:

- a) les temps de coupe: ce sont les temps nécessaires aux
----- machines pour l'exécution de chaque
opération de la pièce.
- b) les temps d'arrangements ou de préparation: ce sont les
----- temps de préparations de machines, de
la lecture du dessin, de la recherche
de l'outillage etc.... c'est à dire
la mise en train.
- c) les temps manuels ou temps auxiliaires: ils comprennent
----- la mise en position, son serrage,
l'approche de la pièce par l'outil,
des mesures de contrôle et réglages
en cours d'usinage, le desserrage et
l'enlèvement de la pièce, le piquage
du laitier, les changements des
electrodes.
- d) les temps supplémentaires T_s ou temps répartis: les
----- temps supplémentaires de pertes se
composent de temps nécessaires aux
nettoyages, au graissage, à l'évacuation
des copeaux, des absences aux besoins
personnels, de la mise en marche et de
l'arrêt des machines etc.....
Ils varient de 6 à 15% du temps de
base, on prend 15%.

Pour des raisons de commodité de calcul, on calcule le temps
d'arrangement T_a et le temps manuel T_m pour chaque phase pour calculer
le temps d'exécution T_e par phase.

SCHEMA DE LA COMPOSITION DU TEMPS TOTAL

d'exécution



Ta = temps d'arrangement

Tc = temps de coupe

Tm = temps manuels

Tb = temps de base

Tb = Tc + Tm

Ts = temps supplémentaires de pertes

Ts = 6 ÷ 15% de Tb

Tp = Temps par pièce

Tp = Tb + Ts = 1,15 Tb

Te = temps total d'exécution/phase

Te = Ta + Tp

Remarque: on entend temps par pièce; le temps total dans une phase nécessaire à la construction d'une poutre (par exemple: on a considéré le temps au traçage: le temps pour les 28 Nervures nécessaires pour une poutre).

1) Temps au traçage: Le temps total d'exécution des 24 nervures courtes et des 4 nervures longues nécessaires pour une poutre en I, se compose des temps manuels et des temps d'arrangement. On utilisera des tôles de longueur de 9 m et de largeur de 95mm. le traçage de toutes les Nervures s'effectue avec un gabarit et sur une même tôle (c'est à dire une nervure courte de 200 x 95 et une nervure longue de 670x95).

Opération	temps d'arrangement		temps manuels	
		Ta mn	manutention et déplacement	Tm mn
Traçage des Nervures courtes et longues	lecture du dessin déplacement outillage.	6	- mise en position de la tôle - déplacement de l'ouvrier le long de la table - réglage du gabarit - dégagement de la tôle	5 14 5 5

le temps total d'exécution des 28 nervures sera donc:

$$T_p = 1,15 \quad T_b = 1,15 \quad T_m = 1,15 \times (27) = 31,05 \text{ mn}$$

$$T_e = T_a + T_p = 6 + 31,05 = 36,05 \text{ mn}$$

$$T_e = 36,05 \text{ mn}$$

2) Temps au découpage:

a) la longueur à découper pour une nervure courte est:

$$L_{dec} = 95 + 2 \times 15 \quad 2 = 137,42 \text{ mm}$$

la machine a une vitesse de découpage $V_c = 700 \text{ mm/mn}$

$$\text{le temps } T_c = \frac{24 \times L_{dec}}{V_c} = \frac{24 \times 137,42}{700} = 4,71 \text{ mn}$$

b) la longueur à découper pour une nervure longue est

$$L_{dec} = 95 + 2 \times 15 \quad 2 = 137,42 \text{ mm}$$

le temps T_c pour les 4 Nervures longues sera donc:

$$T_c = 4 \times \frac{137,42}{700} = 0,78 \text{ mn}$$

le temps total de coupe sera donc

$$T_c = 4,71 + 0,78 = 5,5 \text{ mn}$$

Opération	mise en train	Ta mn	manutention	Tm mn
Découpage des Nervures	-préparation de la machine -déplacement outillage	6	-mise en position de la tôle -arrêt de la découpeuse entre deux nervures -dégagement des Nervures	3 8 5

le temps total d'exécution des 28 nervures est donc:

$$T_e = (T_c + T_m) \times 1,15 + T_a = (5,5 + 16) \times 1,15 + 6 = 30,7 \text{ mn}$$

3) Temps au pointage (Assemblage des Semelles avec l'âme):

Pour les tôles d'épaisseurs moyennes (4 à 15 mm), l'exécution d'un point demande 0,3 à 0,6 mn. La distance entre deux pointages est donnée par la formule suivante: $l = 30e$

(e étant l'épaisseur de la tôle).

a) Pour le pointage de 3 avec 5 (semelle inférieure avec l'âme), on a 16 points; on prendra un temps $t_c = 0,5 \text{ mn}$ pour un pointage; soit un temps $T_c = 16 \times 0,5 = 8 \text{ mn}$.

le temps total pour les deux parties de la poutre est donc:

$$T_c = 16 \text{ mn}$$

b) le Pointage de 2 avec 3 (semelle supérieure avec l'âme): on a 31 points à exécution; soit un temps T_c Total pour les deux parties

$$T_c = 62 \times 0,5 = 31 \text{ mn}$$

opération	mise en train	La mn	serrage et ranutation	Tm mn
Pointage de 3 avec 5	-lecture du dessin -déplacement outillage -mesure des points	6	-mise en position des tôles -serrage des tôles	5 5
Pointage de 2 avec 3	-déplacement outillage -mesure des points	4	-déplacement du soudeur le long de la poutre	10
Pointage de 3 avec 5	-déplacement outillage -mesure des points	4	-retournement de la poutre -déplacement du soudeur le long de la poutre et changement des électrodes	2 10
Pointage de 3 avec 5	-déplacement outillage -mesure des points	4	-retournement de la poutre -déplacement du soudeur le long de la poutre et changement des électrodes	2 13
Pointage de 2 avec 3	-déplacement outillage -mesure des points	4	-retournement de la poutre -déplacement du soudeur le long de la machine -changement des électrodes -desserrage et dégagement de la poutre	2 10 3 5

le temps total d'exécution pour cette phase sera donc:

$$T_e = (16+31) + 67 \times 1,15 + 20 = 151 \text{ mn}$$

$$T_e = 151 \text{ mn}$$

4) Temps au Soudage:

a) Soudage de la semelle inférieure avec l'âme:
la vitesse de la machine à souder est : $V_c = 38 \text{ m/h}$
le temps de soudage sera donc:

$$T_c = \frac{L}{V_c} = \frac{9 \times 2 \times 60}{38} = 28,42 \text{ mn}$$

b) Soudage de la semelle supérieure avec l'âme:
la vitesse de la machine à souder est de $31,5 \text{ m/h}$

le temps de soudage: $T_c = \frac{L}{V_c} = \frac{9 \times 2 \times 60}{31,5} = 34,28 \text{ mn}$

opération	mise en train	Ta mn	manutention	Tm mn
Soudage de 5 avec 3	réglage de la machine	1	-mise en position de la pou-	1
	déplacement	1	tre	
	outillage		-piquage du laitier etc...	1
Soudage de de 2 avec 3	Réglage de la machine	1	-déplacement de la machine	1
	déplacement	1	-piquage du laitier etc...	1
	outillage			
Soudage de 3 avec 5	Réglage de la machine	1	-Retournement de la poutre	1
	déplacement	1	-piquage du laitier etc...	1
	outillage			
Soudage de 2 avec 3	Réglage de la machine	1	déplacement de la machine	1
	déplacement	1	dégagement de la poutre	5
	outillage			

le temps total d'exécution de la poutre:

$$T_e = (28,42 + 34,28 + 12) \times 1,15 + 8 = 94 \text{ mn}$$

$$T_e = 94 \text{ mn}$$

5) Temps au correction:

la machine a une vitesse $V_c = 0,165 \text{ m/s}$

$$T_c = \frac{9}{0,165} = 0,9 \text{ mn}$$

le temps d'arrangement pour le réglage des épaisseurs et de la mise en train est de 5mn, le temps manuel pour la mise en position de la poutre et son dégagement etc est de 10mn.

le temps d'exécution est:

$$T_e = (0,9 + 10) \times 1,15 + 5 = 17,5 \text{ mn}$$

6) Temps au Pointage des Nervures:

Pour une nervure courte, on a deux points à exécuter; soit au total 48 points, Et pour une nervure longue 3 points; soit au total 12 points.

le temps total de pointage est:

$$T_c = (48 + 12) \times 0,5 = 30 \text{ mn}$$

opération	mise en train	Ta mn	déplacements... etc	Tm mn
Pointage des Nervures courtes Partie gauche	-lecture du dessin -déplacement outillage	5	-mise en position de la poutre et de la Nervure -déplacement du soudeur	5 10
Pointage des Nervures courtes partie droite	-Retournement de la poutre	1	-mise en position de la Nervure -déplacement du soudeur	5 10
Pointage des Nervures supplémentaire partie droite	déplacement outillage	1	-mise en position de la Nervure -déplacement du soudeur	5 10
Pointage des Nervures supplémentaire Partie gauche	Retournement de la poutre	1	-mise en position de la Nervure -déplacement du soudeur	5 10
Pointage des Nervures longues	déplacement outillage	1	-mise en position de la Nervure et déplacement du soudeur	8
Pointage des Nervures longues	Retournement de la poutre	1	-mise en position de la Nervure et déplacement du soudeur -degagement de la poutre	7 3

Le temps d'exécution Te sera donc:

$$Te = (30+78) \times 1,15 + 10 = 134,2 \text{ mn}$$

70) Temps au soudage des Nervures:

Lorsqu'on détermine le Nombre d'électrodes à utiliser pour mètre de cordon, il est facile de calculer le temps de fusion de ces électrodes. Le graphe (fig 27) indique, pour les différentes classes d'électrodes et pour chacun des diamètres les plus courants le temps de fusion à

considérer. Il s'agit bien entendu d'un temps pur toujours largement inférieur au temps total de soudage.

gorge g mm	3	4	5	6	7	8	9	10
cordon convexe g	66	123	190	265	360	470	600	740

Tableau1. Poids du métal à déposer (g/m) Pour les soudures en angle intérieur en fonction de la gorge g

Diamètre (mm)	2,5	3,25	4	5	6	8
Longueur (mm)	350	450	450	450	450	450
Poids Théorique (g)	13,4	29,1	44,1	68,9	99,3	176,3
Poids déposé (g)	10	22	33	52	75	132

Tableau2. Poids du métal déposé par électrode (classe 1 à 5)

Pour I = 250 Ampères; le diamètre de l'électrode $\emptyset = 5\text{mm}$

le temps de fusion $T_f = T_c = 1,5\text{mn}$ pour une électrode de la classe 4 (voir fig 27)

Pour g = 5mm on a un poids à déposer $P_{ad} = 190\text{g/m}$

Pour un diamètre d'électrode $\emptyset = 5\text{mm}$ on a un poids déposé par électrode $P_d = 52\text{g}$

a) la longueur totale à souder pour les 28 nervures est:

$$L = 80 \times 2 + 185 \times 2 \times 24 + 80 \times 4 + 640 \times 2 \times 4 = 19120\text{mm}$$

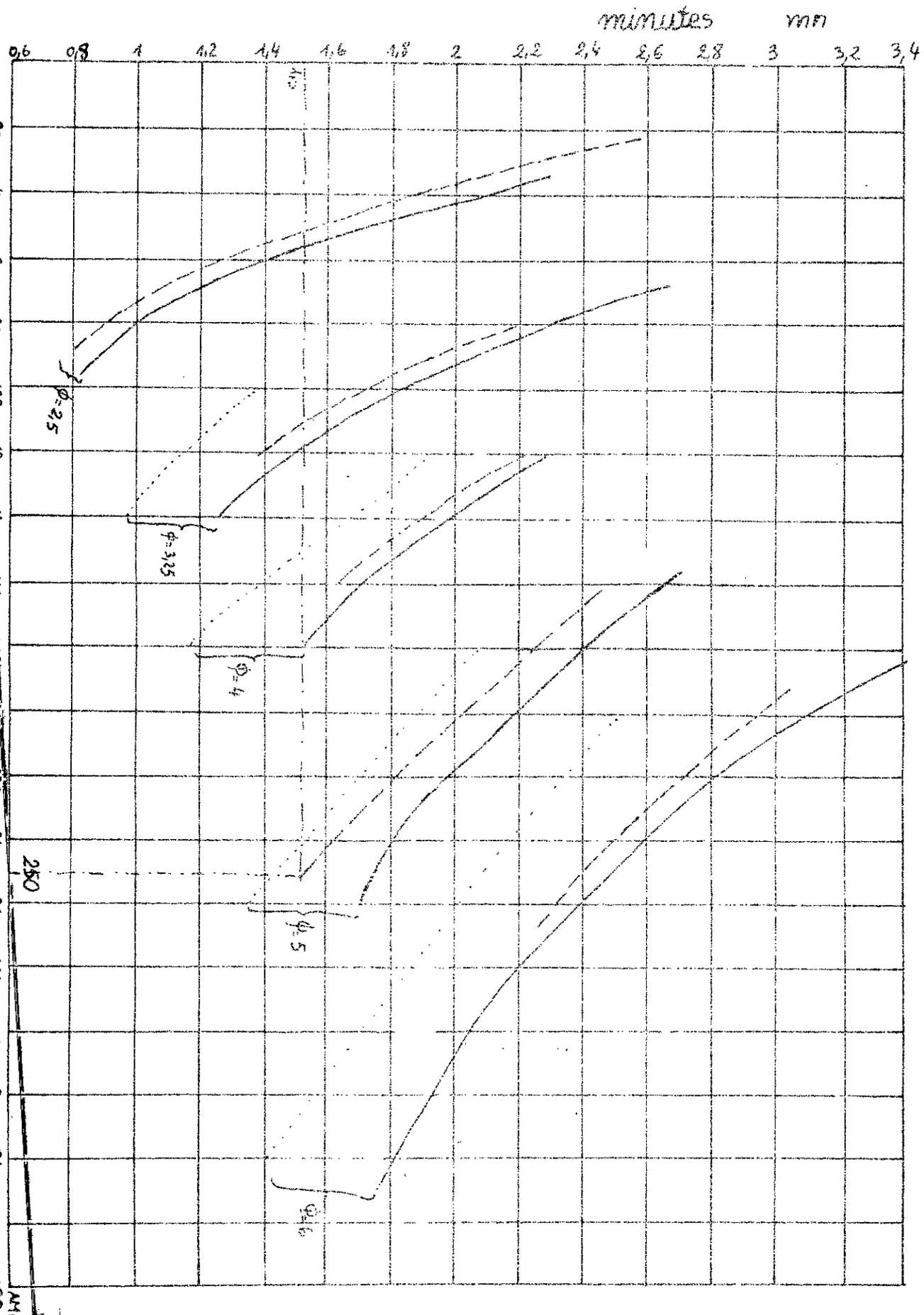
$$L = 19120 \text{ mm}$$

Nombre d'électrodes: $N_e = \frac{190 \times 19,12}{52} = 70$ électrodes

le temps de fusion sera donc:

$$T_f = T_c = 70 \times 1,5 = 105\text{mn}$$

fig. 27



——— classes 1-3-3a-5
 - - - - - classe 4
 classe 2

Voyons maintenant comment le temps de fusion ainsi obtenu peut conduire à l'évaluation du temps de travail réel.

Pour cela, Nous introduisons un facteur de marche ou coefficient d'utilisation d'un poste de soudage le rapport entre le temps de fonctionnement effectif, arc allumé, ou temps d'ustion de l'arc et le temps nécessaire à l'exécution du travail de soudage.

Ce facteur s'exprime le plus souvent en %.

La différence entre le temps total et le temps d'ustion est constituée par les temps morts, qui comprennent principalement:

- a) les changements d'électrode;
- b) les coupures de l'arc enfin de cordon ou pour une cause accidentelle quelconque (allongement excessif de l'arc, défaut de soudage, etc...);
- c) le piquage du laitier;
- d) les arrêts du soudage nécessités par les déplacements du soudeur ou des pièces à souder.

Toute autre chose, le facteur de marche est plus grand:

- avec de grosses électrodes qu'avec des électrodes minces;
- Pour des cordons longs que pour des cordons courts;
- Pour les cordons en une seule passe que pour ceux en plusieurs passes;
- En soudage à plat, qu'en soudage en position difficile;
- A l'atelier, que sur chantier.

Lorsque le poste de soudage débite à son réglage maximum, le facteur de marche ne peut en principe dépasser le maximum conventionnellement admis pour la réception du poste.

Lorsque le poste fonctionne en dessous de son réglage maximum, cette valeur pourrait être dépassée.

Voici les facteurs de marche sur lesquels on peut se baser pour les travaux courants:

Travaux	En Atelier	Sur chantier
Montage charpentes: soudures courtes	30%	20%
soudures longues	35	25%
Toleriers: soudures courtes	27%	20%
soudures longues	32%	25%
Chaudronnerie: soudures courtes	35%	25%
soudures longues	40%	30%
soudures Tôles très épaisses	40 à 50%	35%
Travaux à la chaîne avec Positionneurs	50 à 60%	-

on prend un coefficient de Marche $K = 60\%$

on obtiendrait donc comme temps de travail de soudage pour les 28 Nervures nécessaires pour une poutre: $T_p = \frac{t_c}{K}$

$$T_p = \frac{105 \times 100}{60} = 175 \text{ mn}$$

le temps d'arrangement est égal à 8mn; Donc le temps total d'exécution $T_e = 175 + 8 = 183 \text{ mn}$.

Conclusion: On remarque que les temps d'exécution par phase sont très élevés qui sont dus à un travail manuel; les temps d'arrangements et les temps manuels ont été donné approximativement parcequ'on n'a pas trouvé les abaques des temps.

Tableau récapitulatif des Temps par phase

N° phase	Phase	Ta mn	Tm mn	Tc mn	Te mn
1	Traçage des Nervures	6	27		36,05
2	Découpage des Nervures	6	16	5,5	30,7
3	Assemblage des semelles avec âme (Pointage)	20	67	47	151
4	Soudage des semelles avec âme	8	12	62,7	94
5	correction	5	10	0,9	17,5
6	Pointage des Nervures	10	78	30	134,2
7	Soudage des Nervures	8	70	105	183

Calcul du Nombre de machines

1) Calcul du fond disponible : F_d

Il est donné par la relation : $F_d = Z_0 \cdot K_s \cdot h \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right)$

Z_0 = nombre de jours ouvrables par an = 365 - (52 + d)

d = jours fériés = 13 jours

Z_0 = 300 jours/an

K_s = nombre d'équipe = 1

h = 8 heures/équipe

α = coefficient de réparation ($\alpha = 2$)

$$F_d = 300 \cdot 1 \cdot 8 \cdot \left(1 - \frac{2}{100}\right) = 2352 \text{ heures/an}$$

2) Calcul du Nombre de machines

$$m_{ci} = \frac{F_{nec}}{60 \cdot F_d}$$

F_{nec} = Fond nécessaire = $T_e \times N$

T_e = temps nécessaire à l'exécution d'une pièce dans la phase considérée

N = nombre de pièces/an produits

Tableau donnant le nombre de machine

Phase	Machines	$T_{e_{mn}}$	F_d (h/an)	$F_{nec_{mn}}$	m_{ci}	$m_{r\text{éel}}$
Traçage	Table	36,05	2352	108750	0,76	1
Decoupage	Postes de découpages (ou découpeuses)	30,7	2352	92100	0,65	1
Assemblage des semelles avec âme (Pointage)	- Machines d'assemblage	-	-	-	-	2
	- Postes de soudage	151	2352	453000	3,21	4
Soudage des semelles avec âme	- Machines automatiques de soudage	94	2352	282000	1,99	2
	- Positionneurs	-	-	-	-	2
correction	Machine de correction	17,5	2352	52500	0,37	1
Pointages des Nervures	- Postes de soudage	134,2	2352	402600	2,85	3
	- Positionneurs	-	-	-	-	3
Soudage des Nervures	- Postes de soudage	183	2352	549000	3,69	4
	- Positionneurs	-	-	-	-	2

3) Calcul du Nombre de Pont roulant

$$m_{ci} = \frac{N \cdot i \cdot T_c}{F_d \cdot \beta \cdot 60}$$

i = nombre des operations de transport pour
une pièce

$$i = 14$$

T_c = temps par cycle = 5 an

β = coefficient d'utilisation du fond dispo-
nible du pont roulant

$$= 0,92 + 0,96$$

$$m_{ci} = \frac{3000 \times 14 \times 5}{2352 \times 60 \times 0,92} = 1,61 \quad \text{== Mréel} = 2$$

Calcul de l'effectif

Après avoir calculé le nombre de machines nécessaires à la réalisation du programme annuel, nous allons faire celui de l'effectif. Il se compose comme suit :

- Ouvriers spécialisés : Nos
- Ouvriers auxiliaires : Noa
- Agents Techniques : Nap
- Comptaules : nc
- Deux agents d'entretien

- . Pour le transport, il y a un service global pour toutes les sections
- . l'infirmerie générale pour toutes les sections
- . Cela est valable aussi pour le service continue et securité, gardiennage, administratif etc.

1°) Calcul du Nombre d'ouvriers spécialisés: Nos

a) On peut déjà avancer que le nombre d'ouvriers est égal au nombre de machines soit Nos = 16 ouvriers sur machines, auxquels il faudrait ajouter 4 à 6 ouvriers polyvalents pour toutes les sections prêts à remplacer un absent ou un malade dans n'importe quelle section de soudage. Ces absents peuvent être remplacés par le contremaître. On tiendra compte aussi de 2 ouvriers pour contrôle.

b) vérification par le calcul

Le nombre Nos est donné par :
$$N_{os} = \frac{T_e \cdot N}{50 \cdot F_d(1-K)}$$

T_e = temps par phase

N = 3000 potres/an

F_d = Fond disponible

K = coefficient tenant

compte des absences ou

cougés $K = 0,1$

machines	T_e (mn)	F_d	N_{os}	N_{oR}
Tables (Tracage)	36,05	2352	0,85	1
Découpeuses (Postes de soudage)	30,7	2352	0,72	1
Machine à assembler (Postes de Soudage)	151	2352	3,56	4
Postes de soudage (Positionneurs)	94	2352	2,22	3
Machines de correction	17,5	2352	0,41	1
Postes de soudage (Pointage des Nervures)	134,2	2352	3,16	4
Postes de soudage (soudage des Nervures)	183	2352	4,32	5

$$N_{oR} = 19 \text{ ouvriers}$$

c) Calcul d'ouvriers auxilliaires N_{oa} : cette categorie comprend les contre-maitres, les ajusteurs, les magasiniers, les réparateurs.

Ce nombre est égal de (15 à 25%) N_{os} ; on prend 20%

$$N_{oa} = \frac{19 \times 20}{100} = 3,8$$

$$N_{oa} = 4 \text{ ouvriers}$$

d) Calcul des agents techniques : cette categorie regroupe les agents de réparations, les agents de méthodesetc... Il est egal à (10 à 12%) de ($N_{osR} + N_{oa}$); on prend 10% ($N_{oa} + N_{osR}$)

$$N_{af} = (19 + 4) \times \frac{10}{100} = 2,3 \quad \text{soit } N_{af} = 3 \text{ agents}$$

e) Calcul du Nombre de comptables : Il est égal à 4 a 6% du Nombre Total d'ouvriers

$$N_c = 6\% (N_{OR} + N_{Oa} + N_{af}) = \frac{6}{100} \times (19 + 4 + 3) = 1,56 = 2$$

La nécessité est donc de 2 comptables

Enfin le programme nécessite : 1 ouvrier pour le transport

Emplacement des Machines

Pour déterminer l'emplacement des machines outils dans l'atelier, on a tenu compte de l'encombrement de celles-ci ainsi que des données relatives aux surfaces libres entre les murs et les piliers et les espaces à laisser entre :

- Les murs et les machines outils
- Les machines outils et les piliers
- Deux machines outils consécutives

Ces espaces servent au déplacement du personnel, du matériel aux entretiens des machines et à leurs réparations éventuelles dans l'atelier. (voir Dessin N° 1)

MANUTENTION

Vu les grandes dimensions et surtout les masses importantes des tôles (et poutres), il est indispensable de disposer dans l'atelier étudié, des appareils de manutention capables d'assurer la mise en place des tôles dans les montages et leur acheminement d'un poste de Travail à un autre.

Cette fonction sera assurée par 2 ponts roulants de 5 Tonnes en outre la prise de la machine automatique à souder se fait par l'intermédiaire d'une potence. La potence (3 tonne a un rayon d'action de 5 m).

On utilisera aussi un chariot électrique (autoporteur) sert à ramener les caisses des pièces brutes vers les machines.

- à déplacer les caisses des Nervures
- à intervenir en cas de panne, d'occupation de pont roulant ou de la potence.



oo oo oo oo oo oo oo oo

Pour obtenir la forme de la construction soudée donnée par le dessin (en tenant compte des propriétés géométriques du joint telles que: gorge, cathète, pénétration nécessaire) avec des déformations moindres : il faut;

- choisir un métal de base parfaitement soudable (vérifié par des essais) .
- utiliser de bonnes électrodes (réceptionnées) .
- employer des soudeurs ayant de sérieuses qualités professionnelles .
- contrôler la valeur professionnelle des soudeurs par vérification des soudures aux rayons X; ce contrôle se renouvelant plus ou moins fréquemment suivant l'importance du travail et la valeur des soudeurs .
- surveiller l'atelier ou le chantier de soudage par un technicien soudeur d'une valeur éprouvée qui veillera notamment à ne jamais laisser souder à basse température (au-dessus de 0°), dans le vent, sous la pluie ou la neige et d'une façon générale sous l'influence d'un facteur susceptible de provoquer un refroidissement brutal de la soudure .

On n'a pas tenu compte des temps expérimentaux qui dépendent des qualités des soudeurs; c'est pourquoi certaines valeurs des temps sont un peu exagérées et ceci est dû au manque des abaques de temps .

Enfin dans l'organisation de l'atelier, on répartit les machines et on installe les systèmes de manutention en tenant compte de la sécurité dans le travail .

S O M M A I R E

INTRODUCTION

<u>CHAPITRE PREMIER</u>	1
1 - Etude Métallurgique	
2 - Les déformations dues au soudage	
3 - Influence des déformations	
4 - Préventions contre des déformations	
<u>CHAPITRE DEUXIEME</u>	19
- Calcul des déformations	
<u>CHAPITRE TROISIEME</u>	40
- Temps d'exécution	
<u>CHAPITRE QUATRIEME</u>	52
- Calcul du Nombre de machine	
<u>CHAPITRE CINQUIEME</u>	53
- Calcul des effectifs	
- Manutention	
- Conclusion	
- Sommaire	
- Bibliographie	

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

- 1°) Le soudage manuel à l'arc électrique L. JUCOS
- 2°) Construction métallique - I P. MORIM
- 3°) Joints soudés : Contrôle, métallurgie, résistance A. VALLINI
- 4°) Technologie des métaux P. POLOUKHINE
- 5°) Manuel pratique de Soudage à l'Arc L. MENDEL
- 6°) Cours de Soudage E. BARONINE
- 7°) Aide mémoire sur le soudage Tome 3
Moscou "Machinos Troenie" 1970
VINOKOUTOV
- 8°) Technologie et équipement du soudage par fusion
"Machinos Troenie" 1977
AKOULOV
- 9°) Technologie des constructions d'aciers soudés
"Kiev Boudivelnik" 1970
BAKHNOVSKY

