
RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

Gm. 0509

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

TITRE CONCEPTION ET CALCUL STATIQUE DE
BATI DE FRAISEUSE : construction soudée

DATE : Juin 1986

AUTEUR : Baba KADIAKE
DIRECTEUR : Christian MASCLE
CO-DIRECTEUR : Haki KEITA

A mon père, et à mes frères
qui m'ont beaucoup soutenu dans
mes études.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance, à mon directeur de projet, Mr. Christian MASCLE, et à mon co-directeur, Mr. El hadji Haki KEITA, de m'avoir donné l'occasion de réfléchir profondément sur la conception en initiant ce projet.

Je les remercie vivement pour le soutien qu'ils n'ont jamais cessé de m'apporter.

A mes camarades du génie mécanique, et surtout à ceux du génie civil, je dis merci de m'avoir beaucoup aidé dans la résolution des différents problèmes que j'ai dû rencontrer dans l'exécution de ce travail.

En fin j'exprime ici ma gratitude, à toutes les personnes physiques et morales, qui ont contribué à l'achèvement de ce projet.

SOMMAIRE

Dans cette étude nous nous proposons d'élaborer une méthode de calcul statique d'un bâti, de fraiseuse en construction soudée.

Pour atteindre cet objectif, nous procédons suivant le plan ci-dessous:

- I Introduction : présentation du but de l'étude
- II Comparaison entre bâtis soudés et bâtis coulés
- III Généralités sur les bâtis
- IV Choix du type de bâti.
- V Exposé sur les étapes de conception du bâti.
- VI Calcul du bâti : Généralités
- VII Dimensionnement de la colonne.
- VIII Dimensionnement du socle.
- IX Conclusion sur la première partie.
- X Calcul des contraintes et déformations thermiques, dans un assemblage soudé.
- XI Etude économique de la construction soudée.
- XII Recommandations.
- XIII Conclusion.
- XIV Annexes: Applications numériques - Tableaux des résultats
- XV Bibliographie.

Dans cette étude nous aurions procédé aux calculs, des glissières, mais étant donnée l'importance de ce travail nous avons jugé opportun d'étudier d'abord le comportement statique, du bâti simple.

TABLES DES MATIERES

I. Introduction	1
II. Comparaison entre bâtis soudés et bâtis coulés	3
II.1. Déformation dans le temps.	3
II.2. Utilisation	4
II.3. Défauts des constructions moulées	4
II.4. Avantages de la construction soudée de bâti	4
II.5. Désavantages des bâtis soudés	5
III Généralités sur les bâtis	6
IV Choix du type de bâti	7
IV.1. Les fraiseuses à console	7
IV.2. Fraiseuses à banc fixes	8
IV.3. Choix du type de fraiseuse	9
IV.4. Présentation du bâti choisi	10
IV.4.1. Particularités	12
IV.4.1.1 Constitution du socle	12
IV.4.1.2 Constitution du montant	12
V. Exposé sur les étapes de la conception du bâti	14
V.1. Structure du bâti	14
V.1.1. Le socle.	14
V.1.2. La colonne	15

V. Calcul du bâti: Généralités	16
V.1. Designer pour contraintes et rigidité	16
V.2. Les formules de design	16
V.3. Limitation de l'étude.	17
VI. Dimensionnement de la colonne	18
VI-1. Principe	18
VI-2. Hypothèses de calcul	18
VI-3. Données	19
VI-4. Calcul des réactions	21
VI-5. Calcul de la colonne	25
VI-5.1 Colonne en flexion et compression excentrée combinées	25
VI-5.2. Colonne soumise à la flexion dans le plan xy .	30
VI-5.3. La déformée résultante	30
VII. Dimensionnement du socle	32
VII-1. Préliminaire	32.
VII-2. hypothèses de calcul	32.
VII-3. Méthode de calcul de la base	33
VII-3.1. Dimensionnement des cloisons	33.
VII-3.2. Dimensionnement des parois latérales des plaques supérieures et de fond.	43
VII-3.3. Dimensionnement du support de la console dans la base.	46

VIII.4. Choix du matériau de base.	48
VIII.5. Matériaux disponibles	49
IX. Conclusion sur la première partie	50
X. Calcul des contraintes et déformations thermiques dans un assemblage soudé	55
X.1 Déformations thermiques	55
X.1.1 soudure d'angle	58
X.2. Etude des contraintes	61
X.3. Moyens utilisés pour remédier aux contraintes et déformations thermiques	62.
X.4 Assemblage du bâti	64.
X.4.1 Profondeur de pénétration des dépôts de métal d'apport	67.
X.4.2. Choix de baguettes de soudure, et type de machine à souder employée.	73
X.4.3 Calcul du carbone équivalent	77.
X.4.4. Température de préchauffage	78
X.5. Exemple de calcul de retrait transversal: cas du joint colonne - base	80
XI. Etude économique de la construction soudée	81
XI.1 Caractéristiques économiques des électrodes	81
XI.2. Détermination des coûts	82.

<u>XI-3</u> Application au bâti, de la fraiseuse.	85
<u>XII</u> Recommandations	86
<u>XIII</u> Conclusion	87
<u>XIV</u> Annexes	89
<u>XV</u> Bibliographie	100.

I INTRODUCTION

La plupart des entreprises locales sont dans le besoin de se munir de machines-outils dont l'acquisition leur pose d'énormes problèmes financiers. Jusqu'à date elles s'approvisionnent à partir de marchés des pays développés. La cause essentielle de l'importation massive de ce type de matériel provient du bas niveau de développement des industries de fabrication locales.

Dans le but de lancer ces industries dans la fabrication de machines-outils, le projet de conception d'une fraiseuse de précision en construction soudée a été initié.

Il s'agit de concevoir une fraiseuse devant répondre à une utilisation générale. Elle doit satisfaire l'exécution des travaux de confection de pièces de rechange pour des machines, et entrer dans le processus de fabrication d'équipements nouveaux.

C'est dans le cadre de ce projet global que nous nous faisons le devoir de présenter, dans ce rapport une méthode de conception du bâti de la fraiseuse.

Le bâti doit répondre à une stabilité adéquate et

une rigidité suffisante pour couvrir les erreurs géométriques. pouvant provenir des déformations dues aux efforts statiques d'une part et dynamiques d'autre part.

La construction soudée exige l'utilisation de matériaux quelque peu spéciaux. Cependant le procédé conceptuel tient compte de l'utilisation unique de matériaux disponibles sur le marché local.

Compte tenu de la diversité des types de fraiseuse, et relativement à la méthode conceptuelle, nous procédons d'abord au choix du type de fraiseuse, pour ensuite nous occuper de la conception du bâti choisi.

I COMPARAISON ENTRE BÂTIS SOUDES ET BÂTIS COULÉS.

Les bâtis de machines, outils sont soit coulés à partir de fonte ou d'acier, soit soudés avec des plaques d'acier. Le bâti est très souvent coulé s'il s'avère difficile de le réaliser par soudage, si le poids est relativement important, ou si une vibration intense ou des charges d'impact sont inévitables.

La rigidité statique peut être obtenue avec des bâtis coulés, comme avec des bâtis soudés, avec un poids moindre de matière pour ces derniers.

Pour ce qui est de la rigidité dynamique notamment inférieure à la rigidité statique, dans la zone de résonance, le bâti en acier soudé permet de repousser, étant de plus grande rigidité, la zone de résonance à des valeurs de fréquence plus élevées que les bâtis moulés, mais ceux-ci assurent un amortissement plus grand.

II-1 Déformation dans le temps.

Les bâtis moulés ou soudés se déforment à l'usage et dans le temps. si on ne procède pas par avance à leur stabilisation qui peut s'obtenir par vieillissement ou par

PARTIE 1

opérations mécaniques. La stabilité obtenue est plus assurée. en général avec les bâtis moulés qu'avec les bâtis soudés.

II-2 Utilisation.

On utilise généralement :

- Les bâtis moulés si ceux-ci doivent comporter des glissières non rapportées, ou si le nombre de pièces à exécuter est au moins de cinq, à dix.
- Les bâtis soudés pour des pièces unitaires ou semi-unitaires si de petites déformations dans le temps peuvent être rattrapées ou ne nuisent pas à la précision de l'usinage.

Lors que les éléments de construction sont d'une forme compliquée on a recours à l'acier moulé. Cependant ce procédé perd peu à peu son importance au fur et à mesure que la soudure se perfectionnant est à mesure de le remplacer dans un nombre croissant de cas. Dans la construction de bâti, l'acier ou la fonte joue encore un grand rôle.

II-3 Défauts des constructions moulées.

Le défaut le plus gênant est le manque d'homogénéité bien que ce défaut ne soit pas généralement assez grave pour réduire de façon sensible leur résistance.

II-4 Avantages de la construction soudée des bâtis

- Une économie de poids pouvant aller jusqu'à vingt-cinq pourcent.

- Il est relativement aisé d'effectuer des réparations sur le bâti défectueux.
- Plusieurs types de métaux peuvent être utilisés sur le même bâti dépendamment des caractéristiques - des différentes parties.
- Les changements de conception sont beaucoup moins coûteux
- Les erreurs de design et réalisation sont faciles à corriger

III.5 Désavantages des bâti soudés.

- La fonte coulé absorbe mieux les vibrations que l'acier soudé.
- Le procédé de coulage est mieux adapté à la grande production en série.
- Les bâti pour les machines très lourdes requièrent un poids considérable pour mieux absorber les charges. Il est moins coûteux d'utiliser la fonte coulé à l'acier soudé.

III GENERALITES SUR LES BATIS

Le bâti constitue l'ensemble des bases d'une machine liées très rigidement et supportant, d'usinage et le transfert. Il assure le positionnement stable et précis des unités d'usinage par rapport au transfert, et est l'organe porteur de la pièce à usiner.

Toute la charge statique constituée par le poids des organes portés est reprise par le bâti. Il est ainsi sujet à des déformations donnant lieu à des erreurs géométriques.

Les efforts repris par le bâti ne se limitent pas aux seules charges statiques, mais il est aussi sujet à des charges de nature dynamique. Sa fréquence propre doit être en dehors des fréquences d'exécution engendrées par les usinages.

Le bâti doit être vieilli et vibré pour que toutes les déformations par libération de contrainte soient évitées. Ce qui permettra d'avoir une rigidité dynamique qui assurera une précision suffisante de la fraiseuse.

IV CHOIX DU TYPE DE BATI

Pour chaque type de fraiseuse il y a une diversité de forme et de dimension. Le choix du type de bâti est guidé par différents facteurs qui sont principalement, d'ordre utilitaire, économique et technologique. Nous avons dit tantôt que nous tenons à réaliser la pièce à partir de matériaux disponibles sur le marché local. Il s'agit en fait d'utiliser des plaques d'acier et baguettes de soudure. Compte tenu donc du procédé technologique d'élaboration, nous excluons tout bâti présentant des formes courbes.

Dans le choix, nous nous intéressons à deux catégories de fraiseuses :

- les fraiseuses à console. fig. IV.a et IV.b
- Les fraiseuses à banc fixe fig. IV.c

IV-1 Les fraiseuses à console.

Il y en a deux types principaux :

- fraiseuse à console à taque réduite et montant massif (fig. IV.a)
- fraiseuse à console à taque massive et montant réduit (fig. IV.b)

Elles ont leur bâti formé de caisson généralement coulé, rigide et solidaire du socle soit directement (soudage), soit par l'intermédiaire de boulons très puissants.

Les fraiseuses à taque réduite trouvent un large champ d'application à l'usinage de pièces de moyens encombrement et poids moyens. Une grande variété technologique est offerte avec ces fraiseuses grâce à l'emploi de dispositifs additionnels (diviseurs universels, étaux orientables etc. ...). Elles peuvent être utilisées pour les opérations les plus complexes de fraisage de rainures droites, hélicoïdales sur diverses formes de surface, des roues dentées, des crémaillères, des opérations d'alésage, de perçage.

Les fraiseuse à taque massive sont de petites fraiseuses destinées à l'usinage de petites pièces dans les travaux unitaires et de séries, surtout dans la mécanique de précision et les usines électrotechniques, aussi bien que dans la fabrication des instruments de mesure.

IV.2 Fraiseuses à banc fixe.

Ces fraiseuses sont pourvues d'un banc fixe très rigide muni de glissières planes pour assurer le guidage du chariot transversal. Le montant est généralement solidement boulonné sur le banc. La face du montant comporte des glissières servant le guide de la poupée.

Ces fraiseuses sont simplex, duplex, triplex, suivant que la machine est pourvue respectivement de une, deux, trois

broches. Elles permettent un usinage à grand rendement, et dans de bonnes conditions économiques, les pièces encombrantes et lourdes, et permettent, comme les autres catégories de fraiseuses, d'obtenir une excellente qualité de surface. La hauteur constante de la table concourt à accélérer et à faciliter la préparation du travail. Elles conviennent également pour être intégrées, dans les chaînes de production. Elles permettent le fraisage par reproduction (pour certains types).

IV-3 Choix du type de fraiseuse.

Les figures IV(a, b, etc) montrent très clairement que les deux catégories de fraiseuses ont les mêmes difficultés d'élaboration. La fraiseuse à banc fixe, toutefois demande beaucoup plus de matière du fait qu'elle est généralement conçue pour de grandes pièces. La fraiseuse à socle massif est, nous l'avons dit, prévue pour de petites pièces. La fraiseuse à socle réduit ^{convient} aux différents travaux de réparation, de pièces de précision et à la confection d'autres équipements de dimensions et poids moyens. Elle est aujourd'hui la plus utilisée dans les entreprises locales. Notre choix se porte donc sur la fraiseuse à taque réduite et montant massif (fig. IV a)

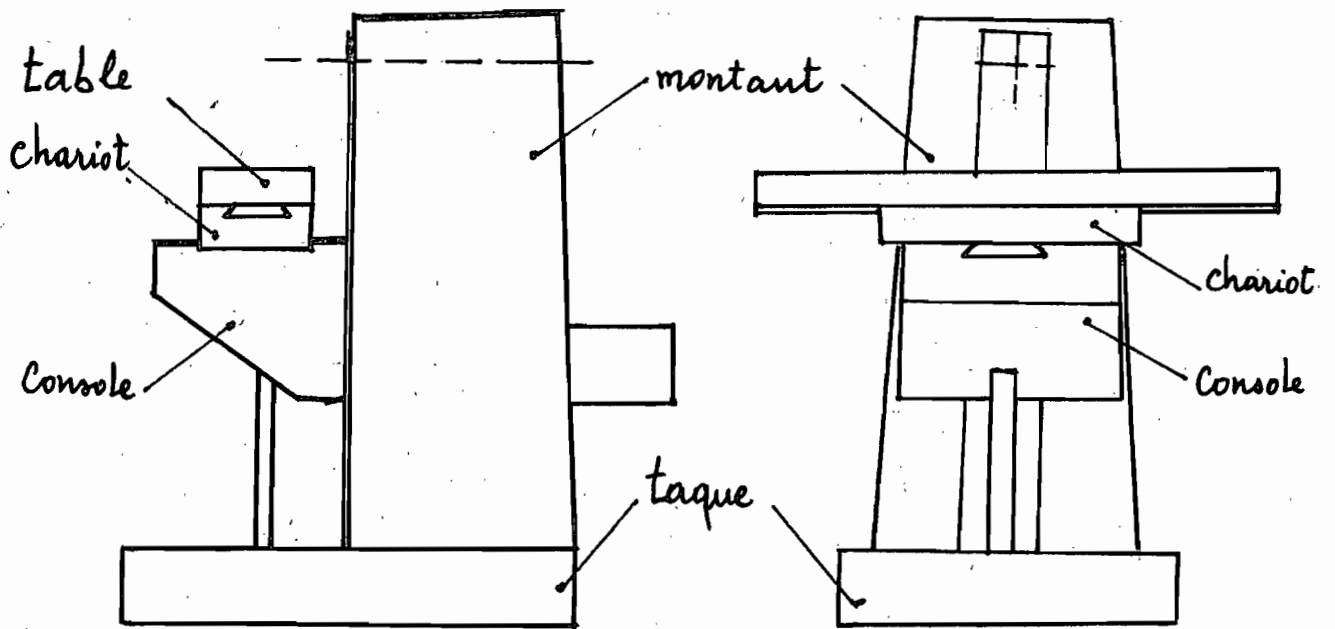


fig II - a. Fraiseuse à console à taque réduite.

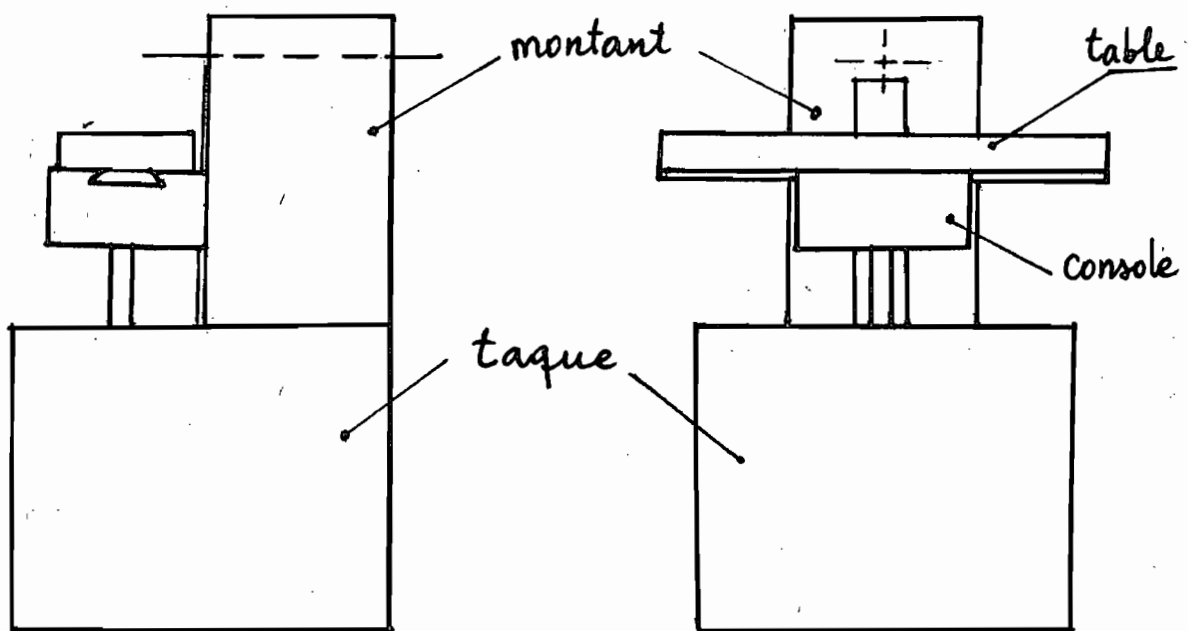


fig II - b. Fraiseuse à console à taque massive.

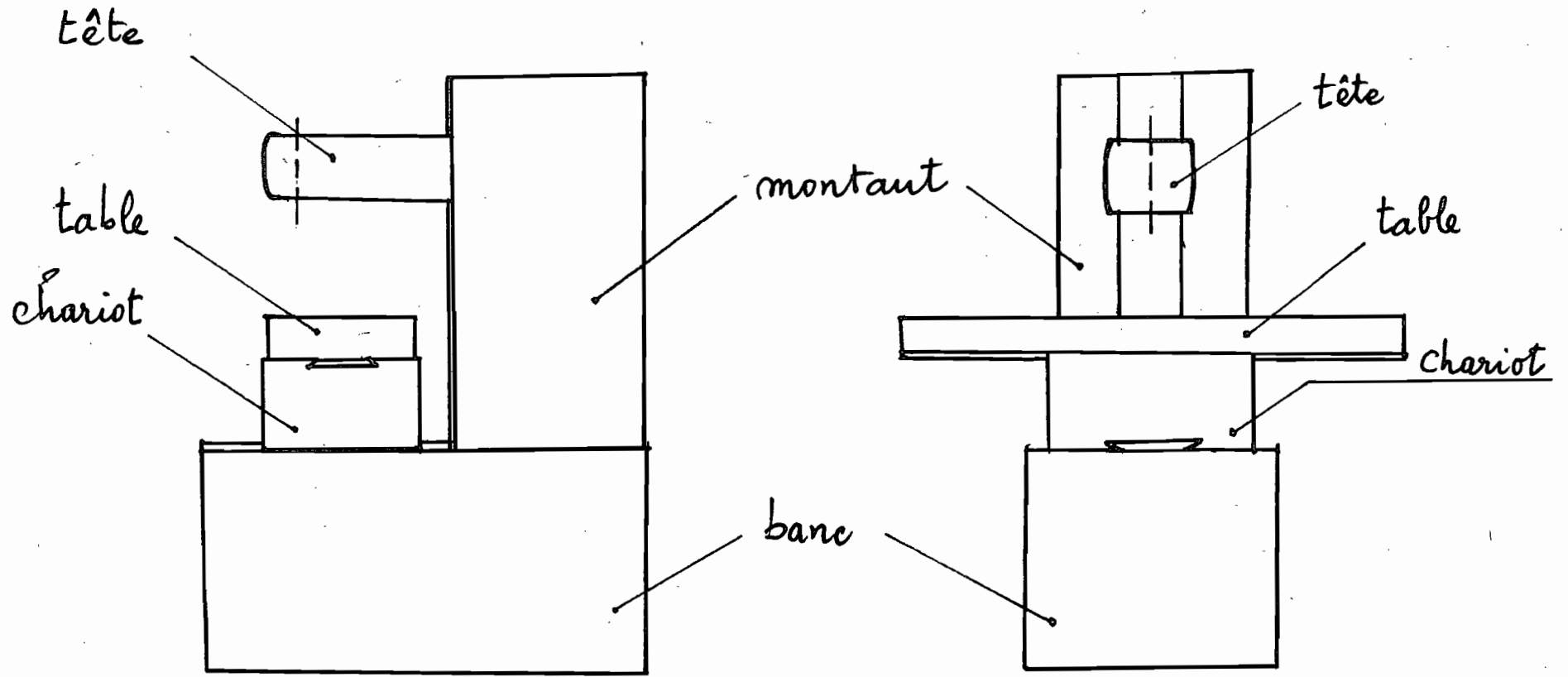


fig IV c. Fraiseuse à banc fixe.

IV.4 Présentation du bâti choisi.

La constitution générale du bâti choisi a été présentée dans le paragraphe précédent. Mais ^{pour} dimensionner une pièce il faut au départ se fixer certaines conditions de base. Les conditions que nous nous fixons, ici sont essentiellement l'encombrement de la fraiseuse. Pour ce faire nous choisissons les dimensions extérieures du bâti comme égales à celles d'un prototype déjà existant (bâti de la fraiseuse universelle à console FV-250E) de l'industrie VERNIER. Une vue d'ensemble est sur le dessin N° 4.

IV.4.1 Particularités.

Le bâti est constitué d'un socle réduit et d'un montant massif.

IV.4.1.1. Constitution du socle.

Le socle est un caisson parallélépipédique de longueur 800 et large de 600 mm, sa hauteur dépendra des résultats de conception.

Il est formé intérieurement de cloisons de rigidité en diagonale, et transversales. Aux quatre coins au droit de la colonne nous prévoyons une tubulure pour l'assemblage des cloisons, et au droit de la vis support de la console, il est prévu une tige pour absorber l'effort de compression. Les détails sont montrés sur le dessin N° 2 ci-joint.

IV.4.1.2. Constitution du montant.

Il représente une raie verticale montée sur le socle, et fixée rigidement sur ce dernier. Nous prévoyons le roudage pour assembler les deux organes. Les dimensions et d'allure générale, du montant sont présentées sur le dessin N° 1. Une vue plus détaillée est illustrée par les coupes du dessin N° 2.

Sur la plaque latérale gauche est prévu un trou carré, de 175×175 pour accueillir le levier de changement de vitesse; et un autre de 118×83 au niveau de l'axe de la broche pour levier d'embrayage de la broche.

Sur la plaque dorsale est exécuté, un trou de 295×195 pour recevoir la boîte de vitesses. Nous prévoyons une transmission de la puissance par un système de courroies. Pour une boîte de vitesses à engrenement direct, le trou se situerait plus haut.

Pour la broche nous faisons l'hypothèse que les paliers sont ceux pour roulement à billes simples. Si la broche a un diamètre de 85 mm ; les catalogues donnent un diamètre extérieur du roulement égal à 180 mm et une largeur de 41 mm . Suivant le même principe nous faisons le calcul des paliers de l'autre portant les engrenages d'embrayage de la broche.

Tout autour de chacun de ces trous est prévu un renforcement pour la fixation, de l'organe à recevoir.

Pour tous les autres détails du bâti nous reléguons la détermination pour une autre étude.

V EXPOSE SUR LES ETAPES DE LA CONCEPTION DU BÂTI.

V.1 STRUCTURE DU BÂTI.

Le bâti est constitué d'un socle support et d'une colonne massive. Le socle est la base du bâti. Il subit des déformations qui varient avec la grandeur et la position, des efforts: Reactions d'inertie, poids des éléments mobiles, efforts de coupe, et qui sont, défauts, de forme. Sa rigidité doit maintenir ces déformations dans les limites de tolérances.

V.1.1 Le socle ou base.

^{tout} Pour tout type de machine la base constitue le point critique pour sa performance. Le problème essentiel est celui de la rigidité. La section transversale de la base doit avoir un moment d'inertie suffisant pour résister aux charges sans une déformation excessive.

La plupart des bases de machine sont soumises à plus d'une force. Il y a donc lieu de tenir compte de chacune et de faire leur somme pour déterminer le moment d'inertie total nécessaire.

Les forces de rotation, les forces statiques, excentriques, les charges cycliques sont aussi sources de problème ad-

ditionnel. Pour les efforts de torsion, les membrures diagonales, la liaison rigide des extrémités donnent une très bonne atténuation.

V-1-8 La colonne ou montant.

Elle exige aussi une attention toute particulière dans la mesure où elle constitue un support aux organes mobiles de la fraiseuse. Relativement à ces dimensions, une diminution du seuil de rigidité conduit à une déformation plus importante; ce qui conduit à de grands défauts d'usinage. Une méthode d'accroître la rigidité de la colonne est la procédure des raidisseurs.

VI CALCUL DU BÂTI: GENERALITES.

L'usinage d'une pièce sur une fraiseuse requiert une certaine qualité de fini de surface. Pour aboutir à ce résultat, la trajectoire de l'outil de coupe par rapport à la pièce doit être conforme à ce qui est rendu nécessaire. Une éventuelle erreur d'usinage ne peut être due qu'à une déformation des organes porteurs de la pièce ou des portes-outils. La conception du bâti revient donc à son dimensionnement pour des niveaux de déformation bien définies.

VI-1 Designer pour contrainte et rigidité.

Toute conception doit nécessairement avoir suffisamment de résistance pour supporter toute charge opératoire ou toute surcharge raisonnable. Si une conception soudée est basée sur les calculs de forces, des formules de design pour charges sont utilisées pour dimensionner les différentes parties.

VI-2 Les formules de design.

Ces formules pour contraintes et rigidité contiennent toujours des termes décrivant une charge, une dimension et une contrainte et déformation, si deux de ces termes sont connus, le troisième peut être calculé. En fait tout problème de design se résout par une de ces méthodes:

1. Détermination de contrainte interne et de déformation cau-

sées par une charge externe sur une partie donnée.

2- Détermination d'une force extérieure qui peut être appliquée à une partie donnée pour toute contrainte ou déformation.

3- Dimensionner une partie pour supporter une charge donnée avec une contrainte et déformation données.

Dans notre conception, nous utilisons la troisième méthode. Nous dimensionnons le bâti pour des déformations admissibles par une machine outil de précision.

Nous nous fixons des dimensions extérieures du bâti, et déterminons les épaisseurs de plaques d'acier nécessaires pour des déformations données. Dans les calculs de déformations du bâti, il ya deux grandes parties à considérer:

- La colonne, et
- La base.

VI - 3 Limitation de l'étude.

La conception du bâti se fait uniquement par l'étude du comportement statique. Pour couvrir un certain niveau de l'aspect dynamique, dont l'importance est grande, nous faisons un certain surdimensionnement des organes porteurs. Nous tenons compte des sollicitations dynamique dans une certaine manière, en procédant à l'emploi de raidisseurs sur les parois de la colonne.

VII DIMENSIONNEMENT DE LA COLONNE.

VII - 1 Principe.

Le bâti est soumis à l'action de deux sollicitations suivantes :

- L'effort de compression dû au poids du bras support.
- Les réactions de contact de la console, transmises par les glissières. Dans le calcul de ces réactions nous faisons l'hypothèse que les glissières sont fixées très rigidement sur la colonne.

VII 2 Hypothèses de calcul.

Pour le dimensionnement de la colonne nous faisons les hypothèses suivantes :

- La liaison glissières - colonne est rigide.
- La colonne est encastrée à sa base sur le socle.
- Il y a aucune possibilité de flambage de la colonne. Sa hauteur est inférieure à la hauteur critique.
- Malgré la variation de la section de la colonne, nous considérons un même axe de symétrie pour toutes les sections.
- Les déformations et les contraintes dans la colonne, sinon dans le bâti sont toujours très faibles. Nous pouvons donc appliquer les théories concernant les petites déformations élastiques linéaires.

- La console a une forme parallélépipédique.
- Le centre, de gravité, de la pièce à usiner coïncide avec celui de la table.
- Le point d'application de la force de coupe coïncide avec le centre de gravité du chariot.
- La vis support est sur la console en son centre de gravité.

VII-3 Données

Nous avons, dit plus haut que les dimensions extérieures du bâti sont choisies par simple relèvement, de celle d'un bâti déjà existant. Dans le calcul il peut cependant y avoir, des changements pour fin de design.

A partir, du schéma en perspective du bâti nous extrayons les données suivantes :

- hauteur de la colonne, H
- Longueurs de la section supérieure, L_1, L_2 ($L_2 > L_1$).
- côté de la section de base, L .
- Longueurs d'une section à la hauteur x , $L_1 x, L_2 x$.
- hauteur de la base, h
- longueurs de la base, l_1, l_2 ($l_2 > l_1$).
- hauteur des cloisons, h_1 .
- hauteurs minimale et maximale du centre de la console, x_1 et x_2 .

- Les distances $y, z, e, b_c, a, a_c, x_1$
- Les poids :
 - W_1 de la table.
 - W_2 du chariot
 - W_3 de la console; W_4 du bras.
 - F_1 de la pièce à usiner.
 - La force de coupe F_2 .

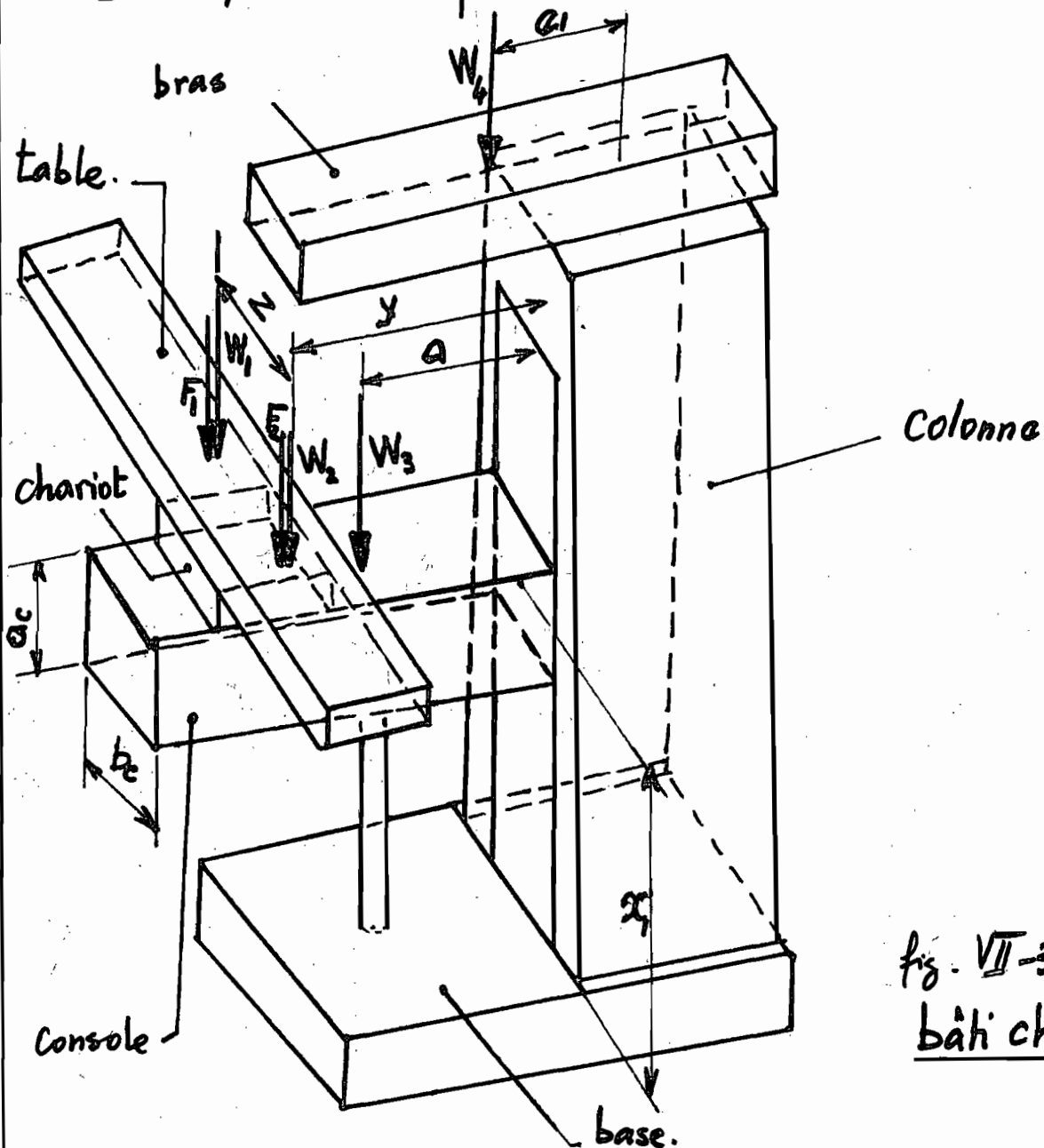


fig. VII-3.1
bâti chargé

VII - 4. Calcul des Réactions.

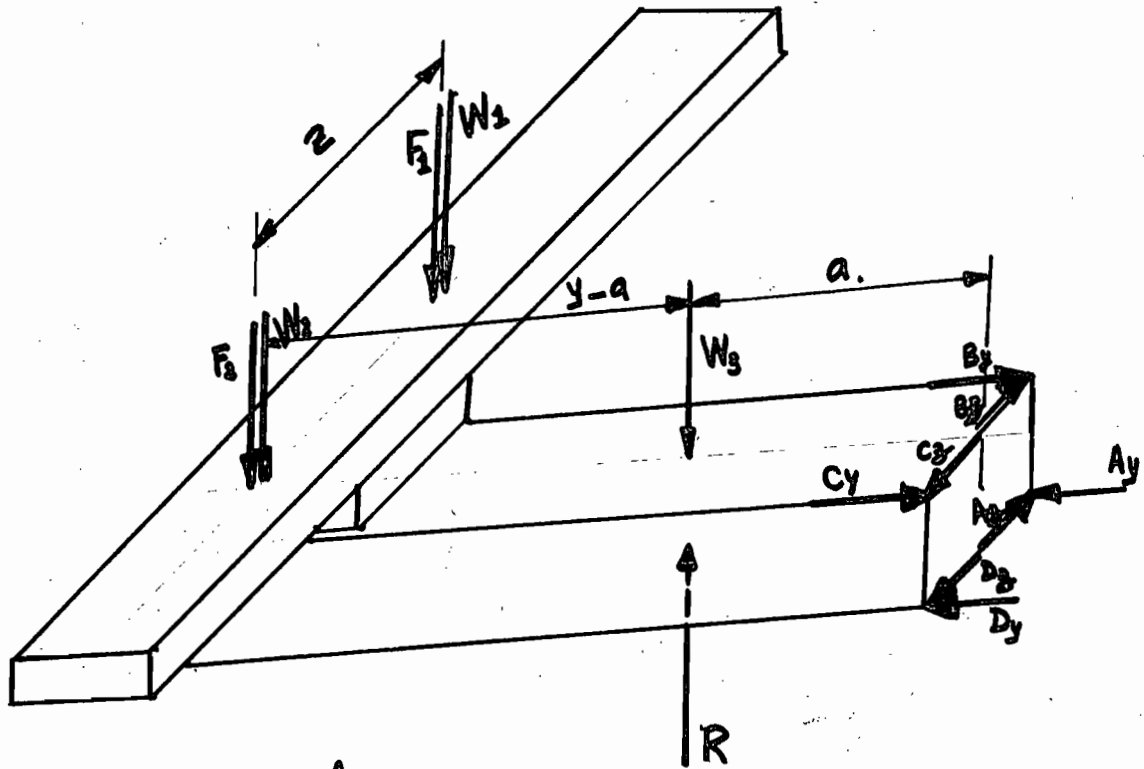


fig. VII - 4. a.

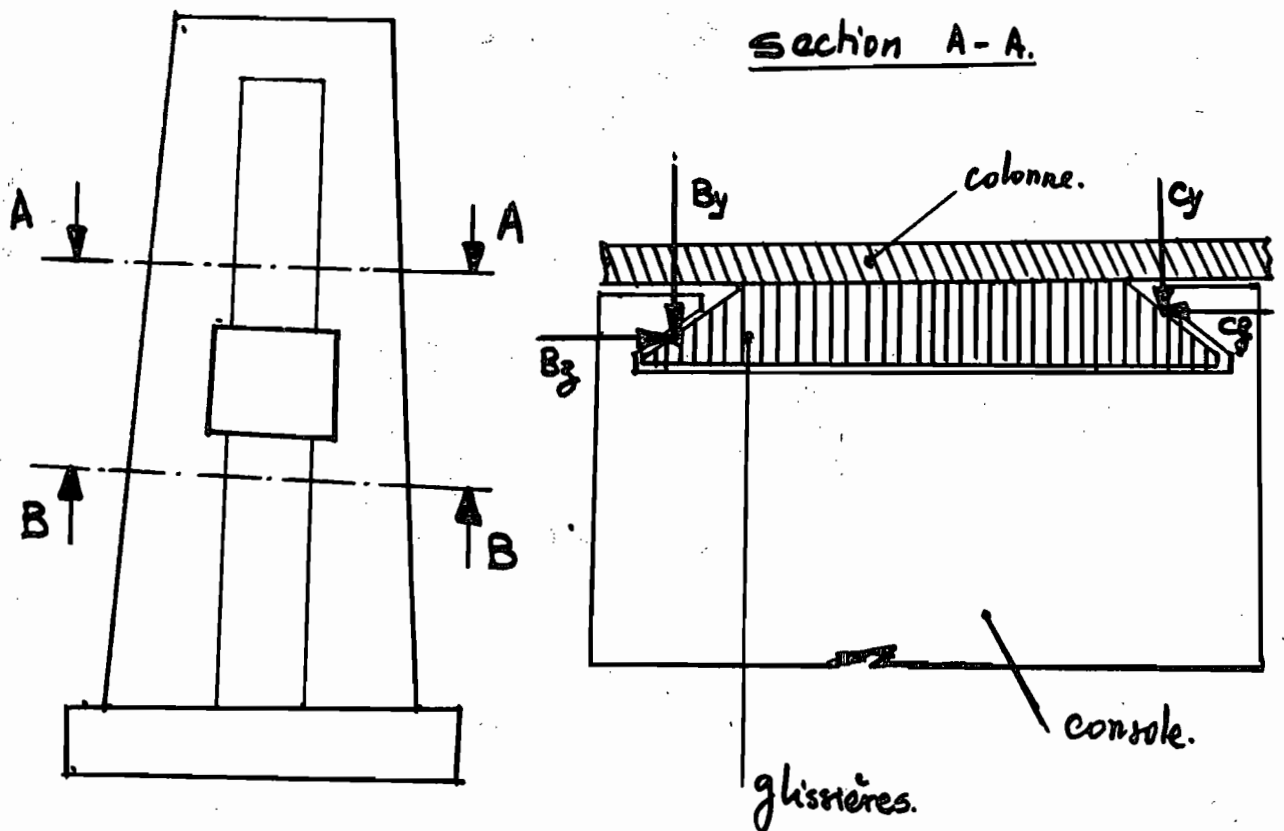
Lorsque la table et le chariot sont à leurs positions extrêmes les forces sur la colonne se situent essentiellement, aux quatre points correspondant aux points d'appuis de la console sur les glissières.

Les réactions aux points A, B, C, D, sont représentées sur la figure VII - 4 - a.

Nous présentons sur la figure VII - 4 - b une vue plus détaillée de la liaison console-glissières. Nous voyons en fait que le calcul d'un système pareil revient, à la considération des moments de flexion de la console, et de son moment de torsion

dans le plan π_3 au point d'attache avec la colonne. fig. VII-4.c.

Le moment de flexion est transmis à la colonne qui fléchit dans le même sens; tandis, que le couple de torsion, dû aux forces W_1 et F_1 fait fléchir la colonne dans le plan. π_3 .



Section B-B.

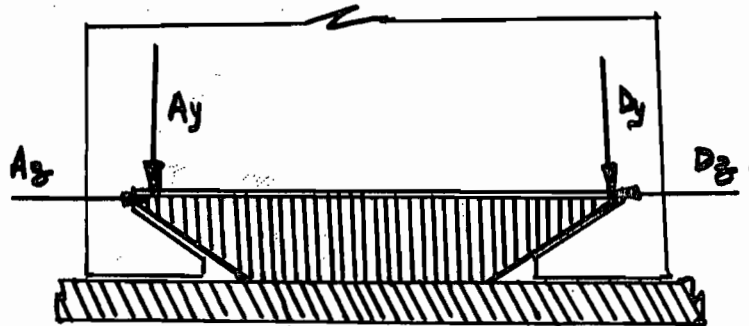


fig. VII-4-b.

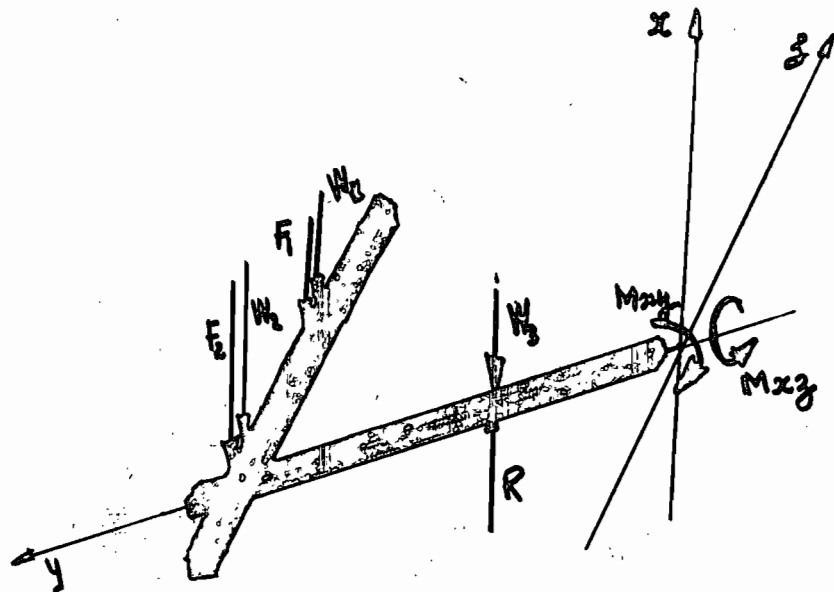


fig. VII-4-c.

L'effort repris par la vis égale la somme des forces appliquées à la console.

$$R = W_1 + W_2 + W_3 + F_1 + F_2. \quad (N)$$

$$M_{xz} = z (W_1 + F_1). \quad (Nmm)$$

$$\begin{aligned} M_{xy} &= (W_1 + W_2 + F_1 + F_2)(y-a) - (R - W_3)a. \\ &= (W_1 + W_2 + F_1 + F_2)(y-2a). \end{aligned}$$

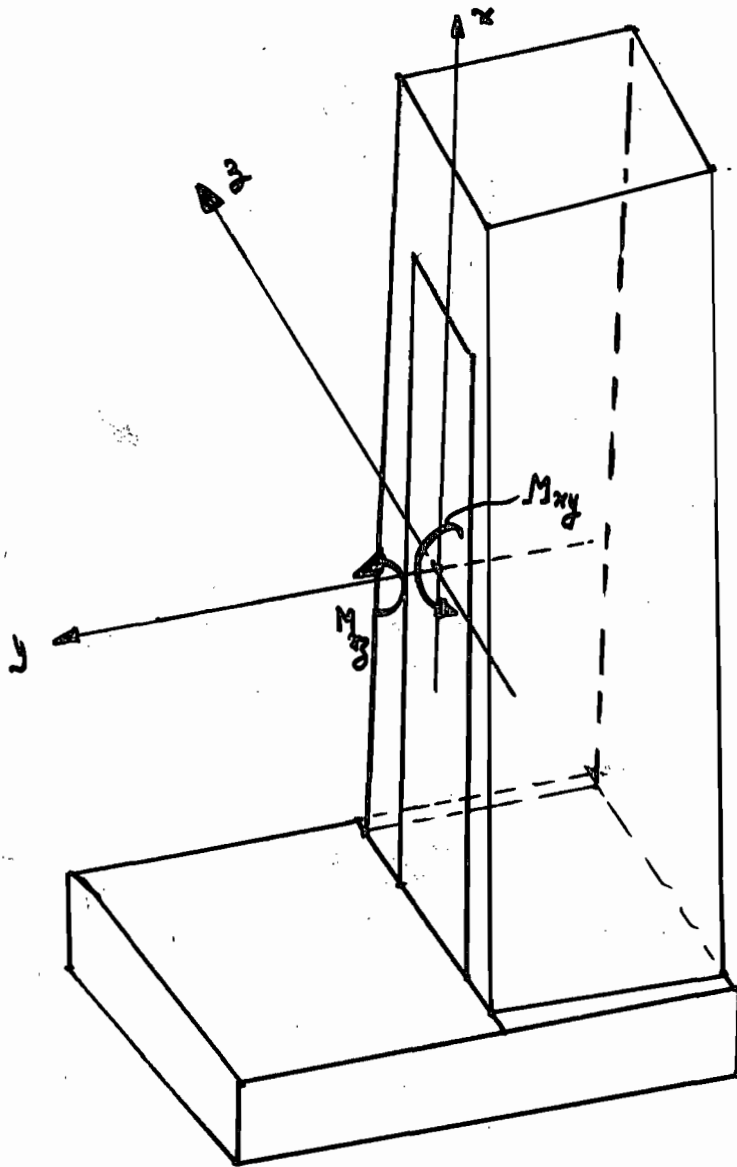


fig. VII - 4 - d : Colonne en double flexion.

VII-5 Calcul de la colonne.

VII-5-a. Colonne en flexion et compression excentrée combinées.

Sous l'effet du moment de flexion M_{xy} et, de la force de compression N_4 correspondant au poids de la tête, la colonne subit une flexion dans le plan xy .

On assimile, la colonne à une poutre eucastrée à une extrémité et comprimée excentriquement à l'autre, et à un couple de flexion.

La déformation se calcule par la méthode de calcul d'une poutre en compression excentrée avec une flèche initiale.

1) Poutre eucastrée sous l'action du moment de flexion.

La colonne est ici à section variable. Le moment d'inertie est fonction de la hauteur de la section.

Lorsque nous traçons le moment d'inertie I d'une section en fonction d'une section, nous obtenons des courbes de la figure VII-5-9. pour différentes valeurs de l'épaisseur. Ces courbes tendent toutes vers des droites de pente négative.

La déformation en flexion est calculée, à partir de l'équation suivante:

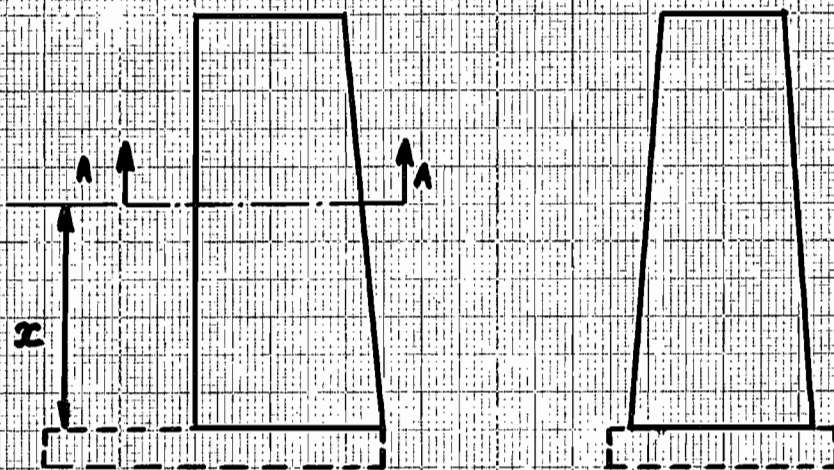
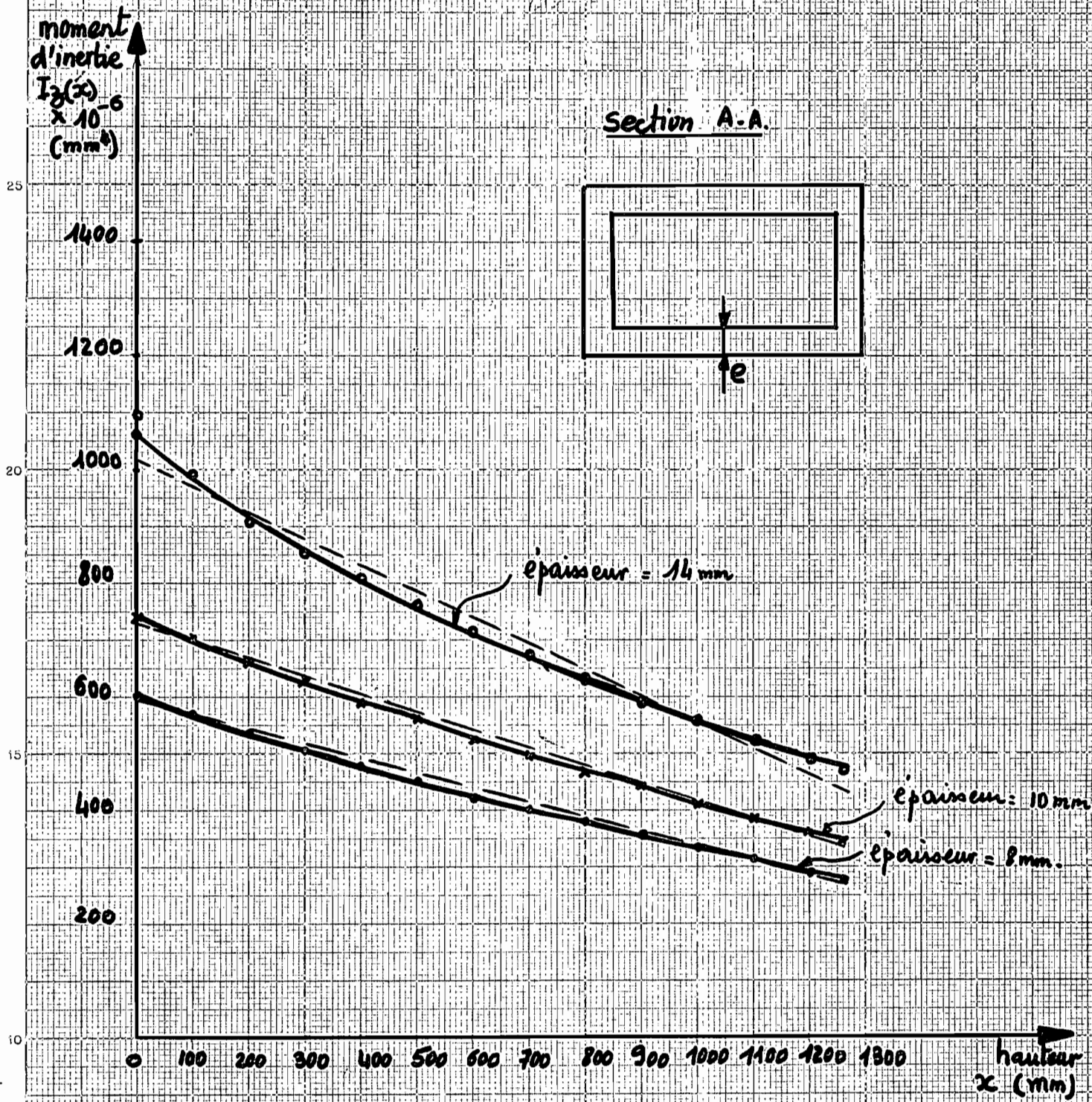


fig VII-5-a.

$$\Delta x = \frac{M_{xy}}{E I_z(x)} x^2.$$

$I_z(x)$ est le moment d'inertie de la section, de hauteur x .
La colonne étant à section variable, nous trouvons.

$$I_z(x) = A_1 x^3 + B_1 x^2 + C_1 x + D_1.$$

où

$$A_1 = e c^2 \left(\frac{2e}{3} + u \right).$$

$$B_1 = e c^2 (2d + v - 2e) + e c u (2d - e).$$

$$C_1 = 2 e d^2 (c + u) + 2 e d e (v - 2e) + c e (2e^2 - v) - 2 e^2 u \left(d - \frac{e}{3} \right).$$

$$D_1 = 2 e d^2 \left(\frac{2}{3} d + v - 2e \right) + (v - 2e) \left(\frac{2e^3}{3} - e d e^2 \right).$$

$$u = -0,175$$

$$v = 490$$

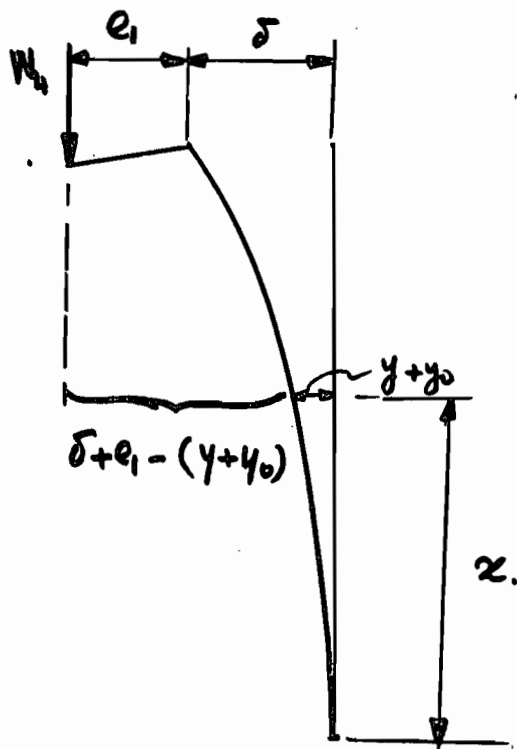
$$c = -0,056$$

$$d = 245.$$

2. Poutre encastree soumise à une compression excentree.

Par hypothese, la colonne n'a aucun risque de flambage locale. Le calcul de la fleche resultante se fait, suivant la consideration suivant:

Il y a eu une deformation initiale due au moment de flexion M_{xy} .



La flèche est déterminée à partir de l'équation différentielle du second ordre obtenue par l'équation simplifiée de l'élastique.

$$\text{Nous avons } E I_2(x) \frac{dy^2}{dx^2} = W_4 [(\delta + e_1) - (y + y_0)].$$

$$y_0 = \frac{M_{xy} x^2}{2 E I_3(x)}.$$

La résolution d'un système pareille est fastidieuse. Nous faisons l'approximation d'une section uniforme.

En effet la courbe du moment d'inertie $I_2(x)$ en fonction de la hauteur x présentée sur la figure III-5-a. tend beaucoup vers une droite.

L'erreur maximum que nous commettons en faisant cette approximation est de l'ordre de 5%. Soit une épaisseur

un écart de 1mm. Ecart qui est en toute rigueur admissible.

Donc nous considérons le moment d'inertie constant pour chaque valeur de l'épaisseur des parois, et égal au moment d'inertie de la section moyenne.

$$I_z = 3.04 \cdot 10^9 - \frac{(380-2e)(210-e)^3(245-e)^3}{3}$$

l'équation différentielle devient alors.

$$\frac{dy^2}{dx^2} + k^2 y = k^2 \left(\delta + e_1 + \frac{M_{xy}}{2EI} x^2 \right).$$

$$\text{avec } k^2 = \frac{W_4}{EI}$$

La solution de cette équation est :

$$y = \left(\delta + e_1 - \frac{M_{xy}}{W_4} \right) (1 - \cos kx) + \frac{M_{xy}}{2EI} x^2$$

Pour trouver le déplacement maximum au sommet de la poutre on pose $y_{x=H} = \delta$. On trouve :

$$\delta = \frac{1 - \cos kH}{\cos kH} \left(e_1 - \frac{M_{xy}}{W_4} \right) + \frac{M_{xy} H^2}{2EI_3 \cos kH}.$$

La flèche par unité de longueur de la poutre est :

$$\frac{\delta}{H} = \frac{1 - \cos kH}{H \cos kH} \left(e_1 - \frac{M_{xy}}{W_4} \right) + \frac{M_{xy} H}{2EI_3 \cos kH} \quad (1)$$

VII-5-8: La colonne soumise à la flexion dans le plan xz .

Lorsque la colonne est soumise à un moment de flexion M_{xz} dans le plan xz , la déformée correspondante à une hauteur x est :

$$\Delta x = \frac{M_{xz}}{2EI_y} x^2.$$

$$\text{avec } I_y = 8,88 \cdot 10^9 - \frac{8(455-20)(190-e)^3}{3}$$

Le déplacement par unité de longueur dû au moment M_{xz} est :

$$\boxed{\frac{\delta_2}{H} = \frac{M_{xz} H}{2EI_y}} \quad (2)$$

VII-5.8. La déformée résultante.

$$\boxed{\frac{\delta}{H} = \sqrt{\left(\frac{\delta_1}{H}\right)^2 + \left(\frac{\delta_2}{H}\right)^2}}$$

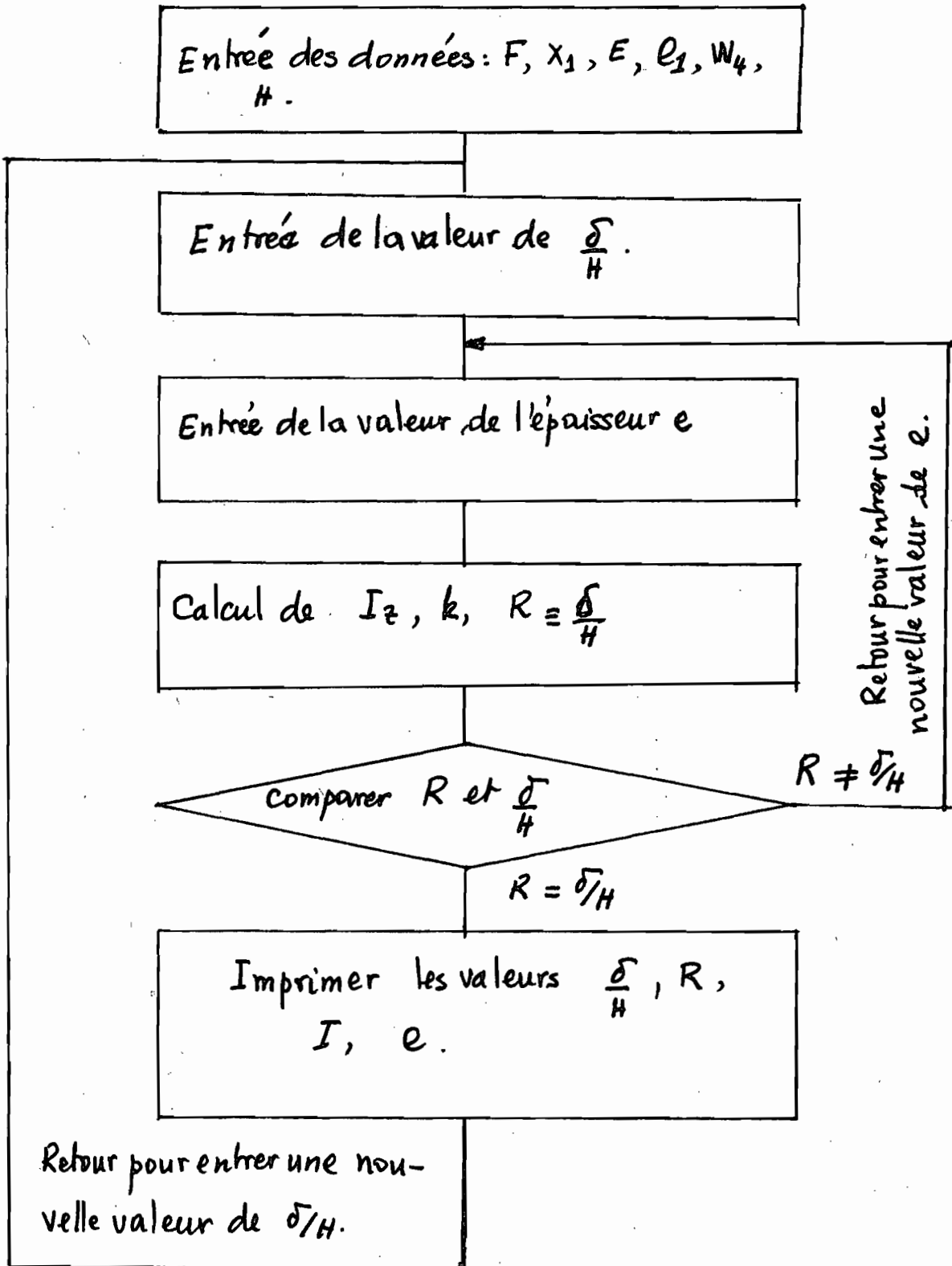
Omer. W. Blodgett, dans "Design of Weldments", donne des valeurs admissibles de $\frac{\delta}{H}$ pour les machines-outils de précision :

$$0,000001 \leq \frac{\delta}{H} \leq 0,00001. \quad (\text{mm/mm}).$$

La méthode de détermination des épaisseurs est résumée par le programme

suivant, dont l'organigramme est présenté, ci-dessous :

ORGANIGRAMME.



VIII DIMENSIONNEMENT DU SOCLE

VIII-1 Préliminaire.

Le calcul de la déformation maximale d'une base soumise à un effort de flexion est très complexe. Le point où la déformation est maximale, doit être d'abord localisé, chose, qui est très difficile. Pour contourner ce problème, on considère, en premier lieu, seulement la flèche, au milieu de la pièce plutôt que la flèche maximale. Cette approche se justifie du fait que la flèche au milieu est toujours, aussi grande, que la flèche maximale. (Une différence de 1 à 2%). En second lieu une simple méthode d'addition des moments, d'inertie requis est utilisée.

Comme, dans le cas du dimensionnement, de la colonne, nous utilisons ici aussi la troisième méthode de conception du paragraphe VI-2.

Nous traitons la base aussi comme, constituée entièrement de tôles d'acier.

VIII-2 Hypothèses, de calcul.

En plus, des hypothèses, du paragraphe VII-2, Nous admettons les hypothèses supplémentaires suivantes:

- Les appuis au sol, ont une rigidité suffisante.

- Les cloisons intérieures sont continues, on ignore les tubulures.
- Nous considérons, que les cloisons intérieures et les parois de la base, ont la même hauteur. Nous négligeons alors les épaisseurs, des plaques supérieure et de fond.
- Le bras support est centré sur la colonne.

VIII - 3 Méthode de calcul de la base.

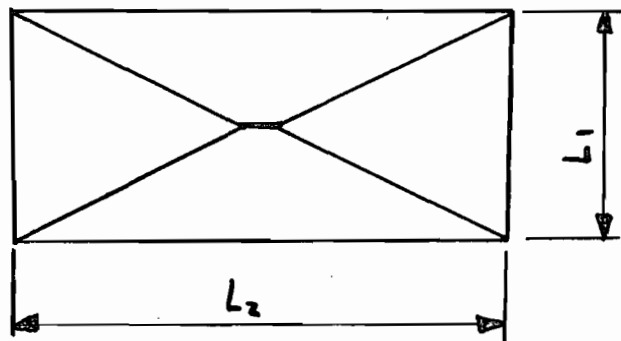
Nous faisons le dimensionnement, de la base par le calcul des cloisons, des parois, et de la tubulure support de la console.

VIII-3-1 Dimensionnement des cloisons.

Toutes les cloisons intérieures à la base ne sont pas chargées identiquement. Celles, qui sont au droit de la colonne sont uniformément chargées tandis que, les autres ont un chargement pas évident. La figure (1), ci-dessous présente une vue interne en perspective de la base.

1) Cloisons au droit de la colonne.

Elles sont soumises à des charges uniformes constituées du poids de la colonne et de celui, du bras. Chaque cloison reçoit une partie du poids du bras, transmis par les parois de la colonne. Cette partie du poids est déterminée par la méthode des trapes tributaires. La section supérieure de la colonne est rectangulaire :



Si W_4 est le poids du porte-lunette (bras), les cloisons au droit des parois latérales de la colonne sont soumises chacune à $\frac{W_4}{2} \left(1 - \frac{L_1}{L_2}\right)$.

Si W_c est le poids de la colonne, chaque cloison est soumise à $\frac{W_c}{4}$, soit au total pour les cloisons au droit des parois latérales, une charge de $\frac{W_4}{2} \left(1 - \frac{L_1}{L_2}\right) + \frac{W_c}{4}$.

En admettant que la charge transmise par la paroi de la colonne est verticale, la cloison aura une charge uniforme $w_4 =$

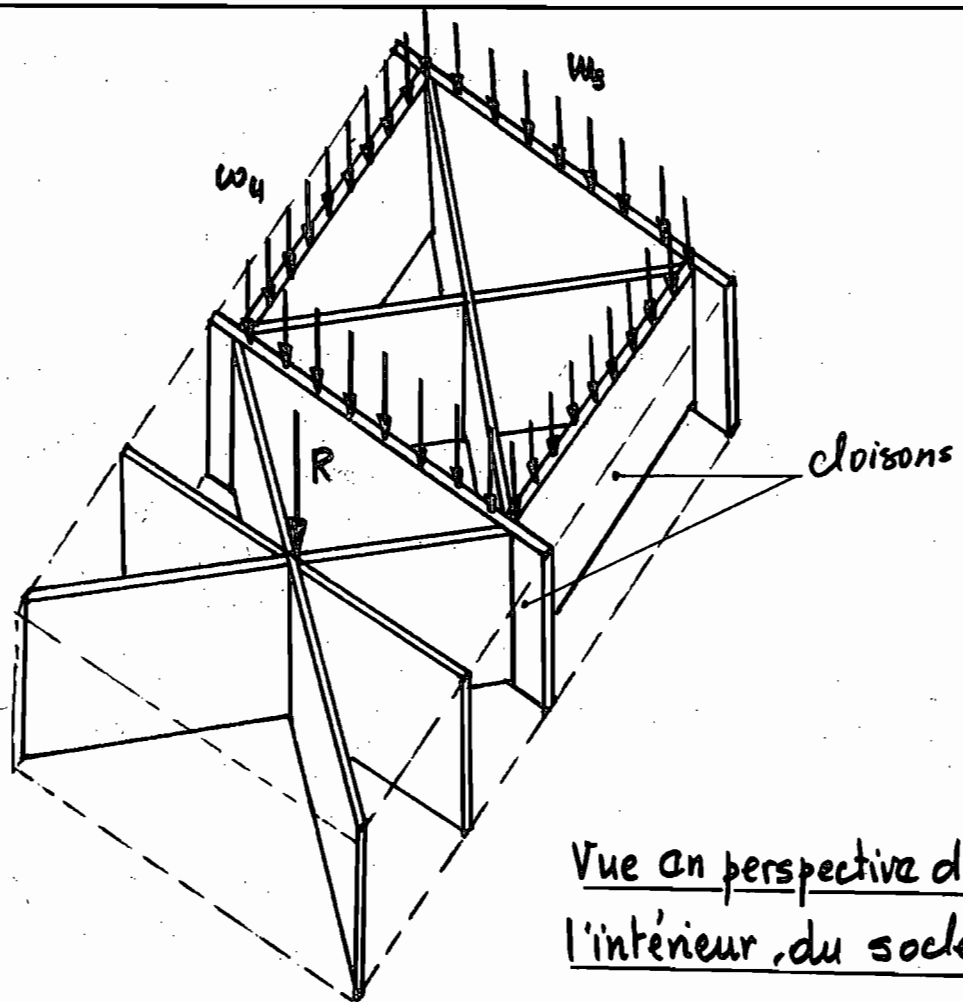
$$w_4 = \frac{W_4}{2L} \left(1 - \frac{L_1}{L_2}\right) + \frac{W_c}{4L} \quad (1)$$

où L est la longueur de la cloison.

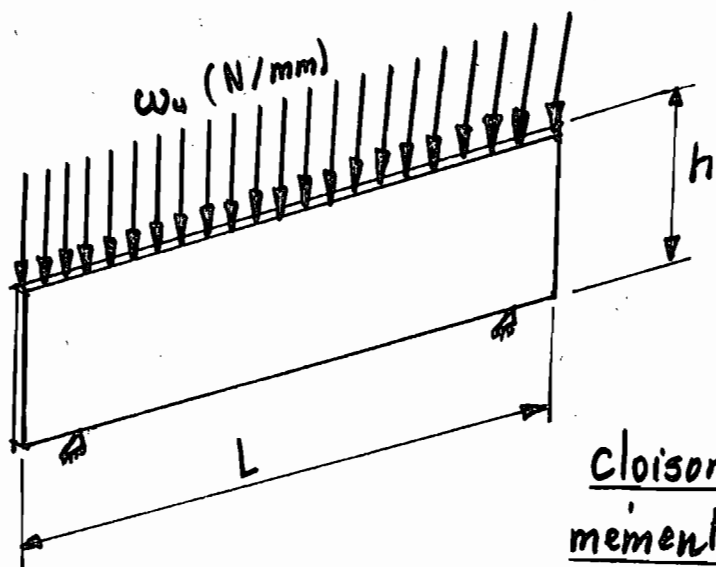
La cloison chargée est représentée sur la figure (2).

Au droit des parois frontale et dorsale de la colonne, la cloison a une charge uniforme w_3 .

$$w_3 = \frac{W_4}{2L} \times \frac{L_1}{L_2} + \frac{W_c}{4L}$$



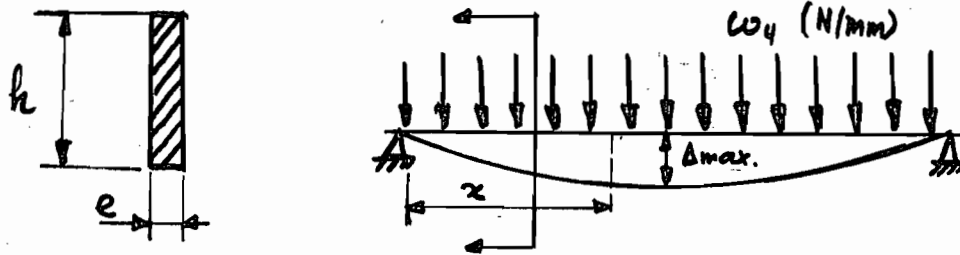
Vue en perspective de l'intérieur du socle.



Cloison uniformément chargée.

fig. (1.)

• Déformation due à la flexion.



La cloison est, considérée, comme une poutre, reposant sur deux appuis simples. Nous considérons par hypothèse que les plaques supérieures et de fond, ainsi que les parois de la base, ont une rigidité négligeable.

La déformée à un point quelconque, d'abscisse x est.

$$\Delta x = \frac{w_y}{24EI} x (L^3 - 2Lx^2 + x^3).$$

La déformée est, maximale, au centre de la cloison et est égale à :

$$\Delta_{max} = \frac{5w_y L^4}{384EI}$$

La déformée maximale par unité de longueur de la cloison est :

$$\boxed{\frac{\Delta_{max}}{L} = \frac{5w_y L^3}{384EI} \quad (2)}$$

Pour une machine outil de précision $\frac{\Delta_{max}}{L} \in [0.000001, 0.00001]$
 A partir de ces valeurs de $\frac{\Delta_{max}}{L}$ on détermine le moment d'inertie

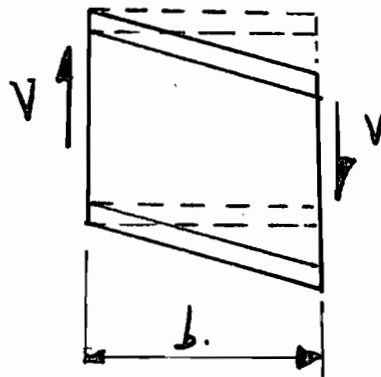
requis pour la section, de la cloison. Et sachant, que :

$$I = \frac{e h^3}{12} \quad (\text{mm}^4)$$

On, calcule aisément l'épaisseur de la cloison par

$$e = \frac{12 I}{h^3} \quad (\text{mm}).$$

• Déformation due au cisaillement.



La déformée due au cisaillement est généralement négligée parce qu'elle représente un très faible pourcentage de la déformée totale. Toutefois nous donnons, ici l'expression -

$$\Delta_{cis} = \frac{\alpha W_y}{2 E_s A} x (L - x).$$

$$\text{Pour } x = \frac{L}{2} \quad \Delta_{cis} = \frac{\alpha W_y L^2}{8 E_s A}.$$

$$\alpha = \frac{a y A}{I e}.$$

où, a est la surface de la section au-dessus

de l'axe neutre. $a = \frac{A}{2} = \frac{h e}{2}$.

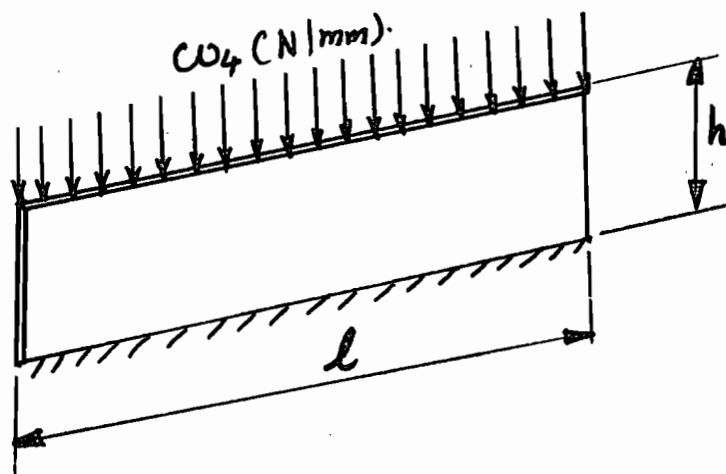
$$\alpha = \frac{A h^2}{8 I} \Rightarrow \Delta u = \frac{\omega_4 L^2 h^2}{64 E s I}$$

le moment d'inertie I est alors

$$I = \frac{\omega_4 L^2 h^2}{64 E s \Delta u} = \frac{\omega_4 L h^2}{64 E s \left(\frac{\Delta u}{L}\right)} \quad (3)$$

A partir de la relation $I = \frac{a h^3}{12}$ et l'équation (3) nous déterminons aisément l'épaisseur nécessaire pour la cloison.

• Déformation due à la compression.



Dans le cas d'une charge uniformément répartie, le calcul de la déformation par compression se fait avec la formule.

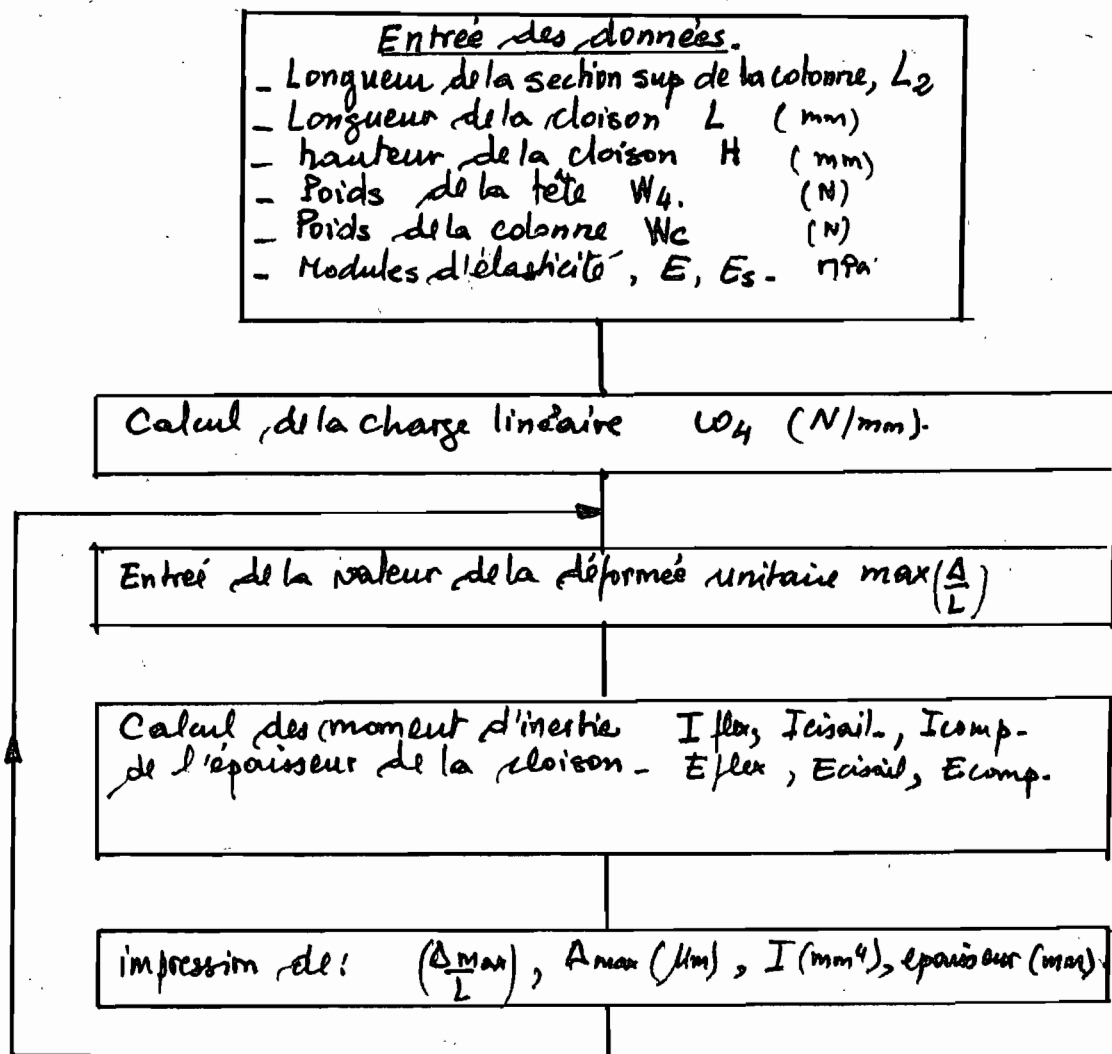
$$\Delta_{comp} = \frac{\omega_4 h}{2 E}$$

Pour une poutre à section rectangulaire nous avons le moment d'inertie $I = \frac{e h^3}{12}$.

$$\frac{\Delta_{comp}}{L} = \frac{w_4 h^4}{12 L E I}$$

$$I = \frac{w_4 h^4}{12 L E \left(\frac{\Delta_{comp}}{L}\right)}$$

A partir de valeurs recommandées pour les flèches, nous déterminons les épaisseurs requises. Nous avons élaboré un programme pour le calcul des épaisseurs correspondant aux déformations en flexion, cisaillement et compression. L'organigramme de ce programme est le suivant:

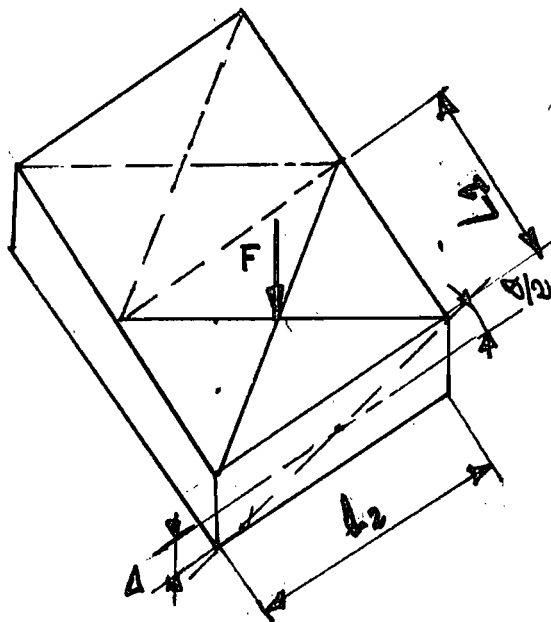


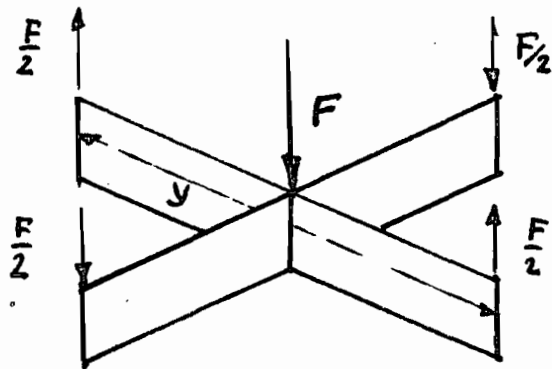
• Déformation due à la torsion.

Le dimensionnement des cloisons est fait aussi par la considération des déformations en torsion dues principalement à la charge concentrée constituée par un certain pourcentage des poids de la console, la table, la pièce à usiner et la composante verticale de la force de coupe. La valeur de cette composante peut aller jusqu'à concurrence du poids total à une position bien centrée de la table. Nous dimensionnons les cloisons dans ces conditions qui sont les plus défavorables.

2.) Choix des cloisons diagonales.

Pour la conception de base de machine, où il l'expérience a montré que les cloisons en diagonales représentent un apport de résistance à la torsion de plus de trente six fois que les cloisons transversales. Nous ferons le dimensionnement par le calcul du déplacement angulaire de la base.





La déformée est $\Delta = \frac{F y^3}{48 EI}$, ce qui donne.
un angle de torsion

$$\theta = \frac{4\Delta}{L_2} = \frac{F y^3}{12 EI L_2}$$

$$y = \sqrt{L_1^2 + L_2^2}$$

Le déplacement angulaire par unité de longueur est:

$$\phi = \frac{\theta}{L_1} = \frac{F(\sqrt{L_1^2 + L_2^2})^3}{12 EI L_1 L_2} \quad (\text{rad/mm.})$$

Pour les machines outils de précision les valeurs recommandées de ϕ varient entre $0.000001^\circ/\text{in}$ et $0.00002^\circ/\text{in}$.

Le moment d'inertie I est égal.

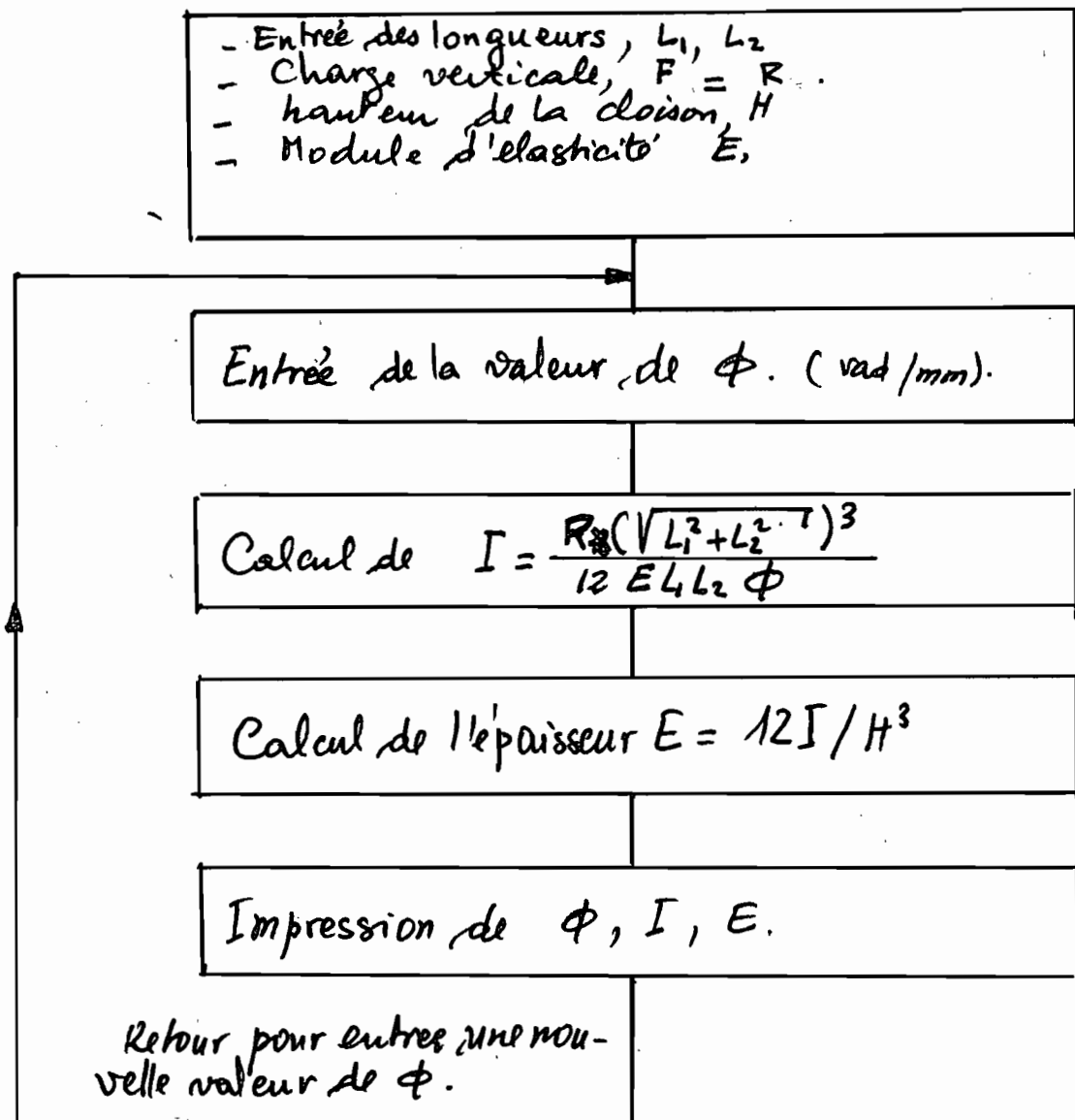
$$I = \frac{F(\sqrt{L_1^2 + L_2^2})^3}{12 EI L_1 L_2 \phi}$$

On calcule l'épaisseur requise par la relation $e = \frac{12 \times I}{h^3}$

Pour un niveau de précision donné nous utilisons la plus grande épaisseur trouvée par les méthodes de calcul de la

flexion, cisaillement et compression. Si l'épaisseur choisie est convenable pour les machines de précision à base en torsion, nous utilisons alors la même épaisseur, aussi bien pour les cloisons transversales que diagonales.

Nous avons établi un programme de dimensionnement des cloisons diagonales et l'organigramme de ce programme est le suivant :



VIII-3-2 Dimensionnement des parois latérales, des plaques supérieures et de fond.

Nous adoptons la même épaisseur pour les parois latérales, de la base et les plaques supérieure et de fond.

La base est entièrement soumise à des charges verticales de flexion: une charge concentrée R et une charge uniforme w_4 , au droit de la colonne. Le problème revient au calcul du moment d'inertie total requis pour la base afin de résister, aux efforts appliqués. Il est évident que la section de la base n'est pas uniforme sur toute sa longueur avec la présence des cloisons. Toutefois, nous la considérons comme constante et égale à celle où la contribution des cloisons est plus faible. Le dimensionnement sera alors beaucoup plus sécuritaire.

Nous considérons que la base repose sur quatre appuis simples, nous la calculons ensuite comme une poutre soumise à des efforts de flexion.

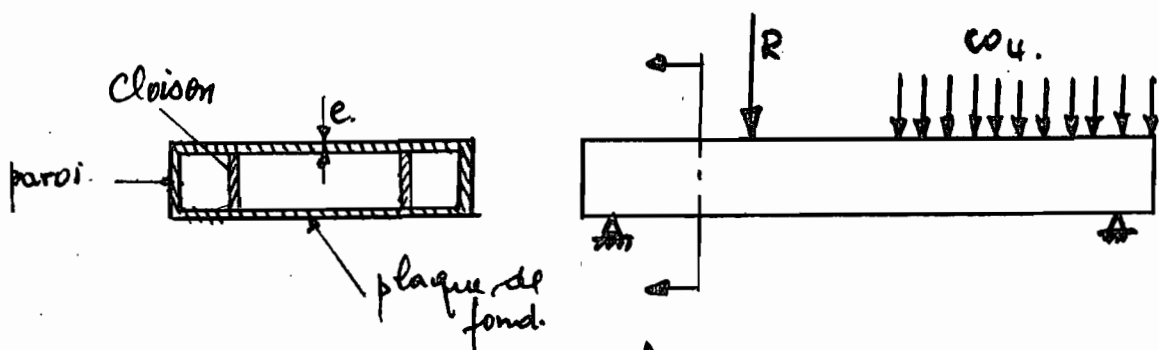
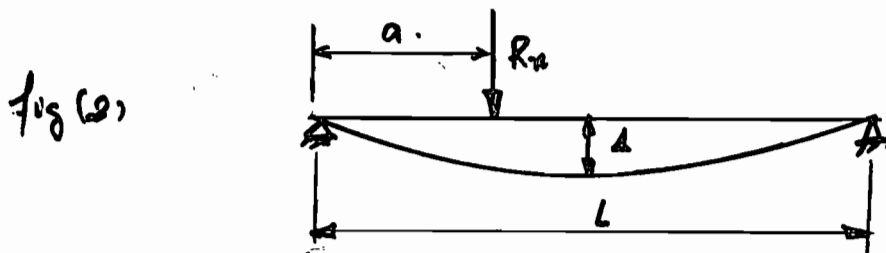


fig. (2)

• Calcul du moment d'inertie.

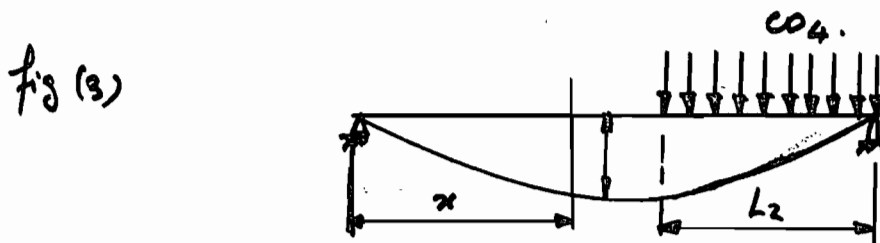
Le moment d'inertie total est la somme du moment d'inertie correspondant à la charge concentrée, et celui correspondant à la charge uniforme.

1) Charge concentrée.



$$I_1 = \frac{R_u L^2}{48 E \left(\frac{\Delta}{L}\right)} (3k_1 - 4k_1^3) \quad \text{où } k_1 = \frac{a}{L}$$

2) Charge uniforme.



$$\Delta_2 = \frac{w_4 L_2^2}{96 EI} (3L^2 - 2L_2^2)$$

$$I_2 = \frac{w_4 k_2^2 L^3 (3 - 2k_2^2)}{96 E \left(\frac{\Delta}{L}\right)} \quad k_2 = \frac{L_2}{L}$$

Avec le programme utilisé pour la méthode de calcul de la déformée due à la flexion, nous calculons les moments d'inertie I_1 et I_2 - Le moment d'inertie requis pour toute la base est $I = I_1 + I_2$. Et pour trouver le moment d'inertie correspondant à la base sans cloisons internes, nous faisons

$$I_p = I - I_c \quad \text{où.}$$

I_p = moment d'inertie des parois et plaques supérieures et de fond.

I_c = moment d'inertie de la section des cloisons. (cf. fig 1).

L'épaisseur de la plaque trouvée par les calculs correspond donc à celle du contour de la section de la base.

VIII - 3.3 Dimensionnement du support de la console dans la base.

La charge transmise par la vis à la base est reprise par un tube cylindrique - Vu la hauteur faible de la base, ce tube peut être considéré comme un poteau trapu. (fig VIII-3.3).

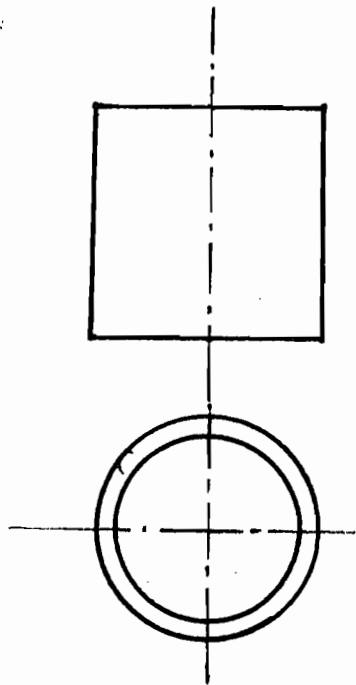


fig VIII - 3.3 .

En théorie de flambement, le dimensionnement conduit à une charge uniforme critique exprimée par la formule suivante:

$$N_{cr} = \frac{Et \left(\frac{\pi a}{l}\right)^2 + \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)a^2} \left(\frac{\pi a}{l}\right)^8}{\left(\frac{\pi a}{l}\right)^6} \quad (N/mm).$$

où
a : rayon moyen du tube
t : épaisseur.
l : hauteur

$\mu =$ Coefficient de poisson $= 0.30.$

Toutefois, pour le cas de poteau trapu, c'est le problème de voilement qu'il faut étudier. On atteint le cas de voilement lorsque toutes les fibres de la section ont atteint la limite élastique. La charge agissant sur la section est, alors :

$$C_y = F_y \times A.$$

$A =$ aire de la section

$F_y =$ limite élastique du matériau $= 300 \text{ MPa}$

Dans notre design nous avons choisi pour ce tube un diamètre extérieur de 90 mm.

Si nous nous référons aux tubes avec des dimensions normalisées, nous obtenons dans le "Handbook of steel Construction" un tube de diamètre extérieur normalisé égal à 88.9 mm pour lequel il existe des épaisseurs normales de 7.95 mm; 6.35 mm; 3.81 mm; 4.78 mm.

Pour chacune de ces épaisseurs la charge critique est :

Épaisseurs (mm)	7.95	6.35	4.78 mm	3.81
Charge critique (kN)	606	494	379	306.

Nous remarquons que toutes ces épaisseurs sont convenables. Toutefois, nous utilisons l'épaisseur de 6.35 mm pour plus de sécurité.

VIII-4 Choix du matériau de base.

Pour une conception en construction soudée, le choix du métal de base est surtout fonction des caractéristiques physiques souhaitées pour l'assemblage. Si le facteur important est la rigidité, ce qui est le cas pour un bâti de machine outil, le choix doit se porter sur un acier soudable de grande résistance.

Soudabilité et résistance des aciers dépendent de leur teneur en carbone. Un acier est plus soudable lorsque sa teneur en carbone est faible, et plus résistant lorsque la teneur en carbone est élevée. Deux conditions nécessaires, mais contradictoires.

Les sidérurgistes ont utilisé la méthode de l'alliage pour augmenter la résistance de l'acier sans pour autant pousser exagérément la teneur en carbone.

Pour une construction de grande résistance l'acier au carbone fin spécial pour traitement thermique est très souvent recommandé.

Nous choisissons dans ce cas l'acier XC 42, dont la trempe augmente la limite élastique jusqu'à 685 MPa.

La composition chimique de Xc. 42:

- Carbone : 0,42 %
- Manganèse : 0,70 %
- Silicium : 0,25 %
- phosphore et soufre : 0,025 %.

VII-5 Matériaux disponibles.

Les entreprises commerciales locales (BERNABE, et DAMETAL), disposent, de plaques d'acier au carbone :

- Acier ordinaire Thomas (tôles noires) en feuille de 2000x1000 pour les épaisseurs de 5/10 à 16 mm.
- Acier Martin (tôles noires) en feuille de 2000x1000 pour les épaisseurs de 10 à 50 mm.

Pour les autres dimensions, ces entreprises, ne font pas de stock, mais, ont la possibilité de s'en procurer, auprès de leurs fournisseurs en cas de commande.

IV Conclusion sur la première partie.

A partir des résultats de calcul présentés en annexe nous pouvons conclure que, l'approche empirique utilisée pour le dimensionnement du bâti, donne des résultats très conforme à la réalité. Bien que, les données soient des valeurs quel que peu estimées, nous trouvons la théorie largement suffisante pour un dimensionnement de bâti.

Par ailleurs si nous considérons de près, les résultats obtenus, nous, trouvons :

- Un poids total de la base = $506 \text{ N} + 1826 \text{ N}$
= 2332 N .
- Le poids de la colonne de = 2390 N

Soit un poids total du bâti de : 4722 N
soit : 480 kg .

Pour les données nous avons un poids de :

console + chariot + table + tête = 570 kg .

Soit un poids approximatif de 1100 kg pour l'ensemble de la fraiseuse. Nous remarquons que bien que nous ayons surdimensionné les autres organes, nous trouvons toujours un poids nettement inférieur au poids de la construction (coulée) qui est de 1760 kg .

Comme nous l'avons souligné tantôt, le dimensionnement du bâti pour une grande précision n'assure pas seul en soit la précision requise de l'usinage. Il faut entre autre assurer, un bon dimensionnement des organes annexes, et à l'usinage, éviter, au maximum la création de bras de levier, aux efforts verticaux. Donc travailler au mieux avec les organes, du transfert bien centrés.

Si pour une conception déjà existante, on se propose d'utiliser un autre matériau, une méthode rapide est celle de la section équivalente.

Les deux tables et les deux figures suivantes, tirées respectivement de "Design of Weldments" et "The procedure handbook of arc welding" permettent, le redimensionnement entier.

Pour compléter cette étude nous parlerons dans une seconde partie de l'étude de l'assemblage soudé du bâti.

1.5-2 / Design Approach

TABLE 1 RIGIDITY	Step 1 Determine the Type of Loading				
	tension	compression short column	long column	bending	torsion
Step 2 Determine this property of the cast member. \rightarrow	Area A	Area A	Moment of Inertia I	Moment of Inertia I	Polar Moment of Inertia J
Step 3 EQUIVALENT FACTORS	Multiply the above property of the cast member by the following factor to get the equivalent value for steel. *				
Grey Iron A S T M 20 A S T M 30 A S T M 40 A S T M 50 A S T M 60	40 % 50 63 67 70	40 % 50 63 67 70	40 % 50 63 67 70	40 % 50 63 67 70	40 % 50 63 67 70
Malleable A47-33 35018 A47-33 32510	83 83	83 83	83 83	83 83	100 100
Meehanite Grade GE Grade GD Grade GC Grade GB Grade GA	40 48 57 60 67	40 48 57 60 67	40 48 57 60 67	40 48 57 60 67	40 48 57 60 67
Cast Steel (.10 - .20%C)	100	100	100	100	100
Magnesium Alloys	22	22	22	22	20
Aluminum Alloys	34	34	34	34	32
$A_s = \frac{E_c}{E_s} A_c$ $A_s = \frac{E_c}{E_s} A_c$ $I_s = \frac{E_c}{E_s} I_c$ $I_s = \frac{E_c}{E_s} I_c$ $J_s = \frac{E_c}{E_s} J_c$					
subscript "s" is for steel; "c" is for casting					

*The factors above are based on published values of moduli of elasticity.

TABLE 2
STRENGTH

Step 1

Determine the Type of Loading

	compression			
tension	short column	bending	torsion	

Step 2

Determine this property of the cast member. \rightarrow

Area	Area	Section Modulus	Polar Section Modulus
A	A	S	$\frac{J}{c}$

Step 3

Multiply the above property of the cast member by the following factor to get the equivalent value for steel. *

EQUIVALENT FACTORS					
Gray Iron	ASTM 20	21%	94%	21%	28%
	ASTM 30	31	123	31	42
	ASTM 40	42	136	42	56
	ASTM 50	52	156	52	70
	ASTM 60	63	167	63	83
Malleable	A47-33 35018	68		68	76
	A47-33 32510	54		54	70
Meehanite	Grade GE	31	125	31	42
	Grade GD	36	136	36	49
	Grade GC	44	164	44	58
	Grade GB	49	174	49	64
	Grade GA	57	199	57	73
Cast Steel	(.10 - .20%C)	75	75	75	75
Magnesium	H-alloy, AZ63, T6, HTA	50	50	50	33
	C-alloy, AZ92, T6, HTA	50	50	50	37
Aluminum Sand Castings	195 T4	40.0	40.0	40.0	43.3
	T6	45.0	45.0	45.0	50.0
	220 T4	57.5	57.5	57.5	55.0
	355 T6	43.7	43.7	43.7	46.6
	T7	47.5	47.5	47.5	46.6
	356 T6	41.2	41.2	41.2	43.3
	T7	42.5	42.5	42.5	40.0

$$A_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} A_c \quad A_c = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} A_s \quad S_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} S_c \quad \left(\frac{J}{c}\right)_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \left(\frac{J}{c}\right)_c$$

subscript "s" is for steel; "c" is for casting

The factors above are based on published values of tensile, compressive and shear strengths using a safety factor of 3 for mild steel and from 4 to 4.8 for the cast materials depending upon ductility.

I Calcul des contraintes et de déformations thermiques dans un assemblage soudé.

I-1 Déformations thermiques.

Les déformations thermiques, dans un assemblage soudé, proviennent essentiellement de contraction et expansion, non uniformes, des métaux de base et d'apport, durant, un cycle de chauffage et de refroidissement du processus. Ces déformations sont affectées par plusieurs facteurs. En effet, durant un cycle du processus, les propriétés physiques et chimiques, sur lesquelles sont basés les calculs, changent avec la température de soudage.

Dans un assemblage soudé les déformations thermiques correspondent aux rétractions. On distingue, habituellement les rétractions longitudinales et transversales. Les cordons de soudure d'un assemblage sont la plupart du temps soit en soudure bout à bout, soit en angle.

Nous présentons dans ce qui suit la méthode de calcul des deux types de cordons.

I-1-1 Soudures bout à bout.

a. Rétrait transversal.

Il représente la partie la plus importante du rétrait

DEUXIEME PARTIE

total dans un assemblage soudé. Il est composé de trois retraits principaux:

- Un retrait (r_1) du métal déposé, résultant de l'allongement transversal de la partie chauffée des pièces assemblées
- Un retrait (r_2) propre du métal déposé.
- Un retrait (r_3) dû au pivotement des pièces dans leur plan.

En pratique, on prend $r_3 = 0,3(r_1 + r_2)$.

ce qui donne un retrait transversal (r_t) de :

$$r_t = 1,3 (r_1 + r_2).$$

Le retrait "q" est proportionnel à la quantité de chaleur apportée, qui est proportionnelle à la section (S) du joint et inversement proportionnelle à l'épaisseur et à la dilatation thermique (λ_1) correspondant à la température T_m obtenue dans l'assemblage

$$Q = k'' \frac{S}{e} \quad k'' = 0,6.$$

Les autres facteurs d'influence, tels que le type d'électrode, le coefficient de conduction, et la technique opératoire peuvent être caractérisés par un coefficient empirique $k' = 50$, pour les électrodes enrobées.

$$r_1 = k' k'' \frac{S}{e} \lambda_1.$$

Le retrait r_2 est proportionnel à la largeur moyenne (L_m) du joint et de la dilatation thermique. λ_2 du métal déposé.

$$r_2 = \lambda_2 L_m.$$

$$r_t = k \left(k' k'' \frac{\Sigma}{e} \lambda_1 + \lambda_2 L_m \right)$$

$\frac{\Sigma}{e}$ de la section du joint est proportionnel à L_m .

$$r_t = K L_m.$$

En première approximation, nous avons

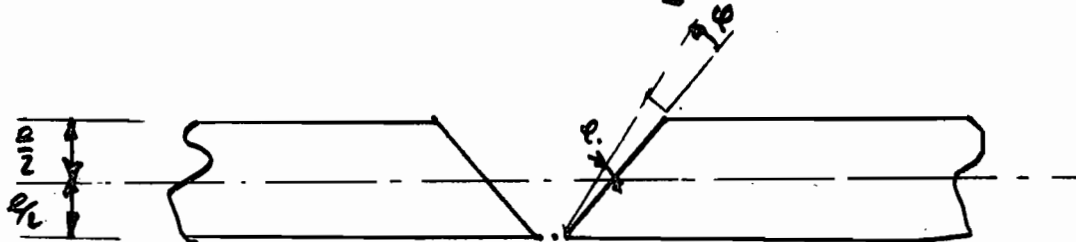
$$r_t = 0,2 L_m.$$

Dans le cas d'une soudure avec chanfrein, en plus du rapprochement et du pivotement des pièces dans leur plan, il se produit une rotation qui fait apparaître un retrait angulaire r_ϕ .

Le retrait transversal à mi-épaisseur de la pièce est :

$$r_t = r_{th} + r_\phi.$$

$$r_\phi = \frac{e}{2} \operatorname{tg} \phi.$$



b. Retrait longitudinal.

Il se produit, dans la direction du cordon de soudure; il est en général très faible, étant donné la présence, dans les pièces soudées, des zones importantes où la température est nettement moins élevée qu'au voisinage de la soudure.

Nous négligeons les effets de ce retrait, dans l'étude du soudage du bâti.

8-1-2 Soudure d'angle.

a. Retrait longitudinal.

Dans ce cas de retrait, la contraction du métal, et la déformation des pièces qui s'échauffent sont deux effets qui s'entravent mutuellement. L'effet de contraction propre du métal est prépondérant.

Il est dû à une force de contraction appliquée à une certaine distance de l'axe neutre. Ce retrait conduit à la formation de la déformée suivante.

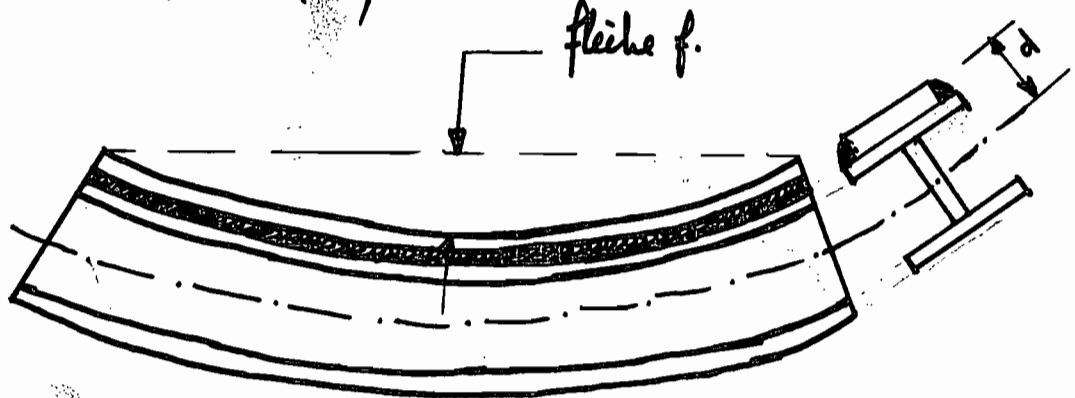


fig 1. a poutre en déformation thermique.

La déformation longitudinale est donnée par l'expression simplifiée -

$$f = \frac{0.005 A d L^2}{I} \quad \text{in}$$

où

A = aire de la section totale du métal d'apport et du métal de base fondu. (en in²)

I = moment d'inertie de la pièce. (in⁴)

L et d. longueurs (in).

L = longueur de la poutre.

soit en unité métrique.

$$f = \frac{0,005 A d L^2}{I} \quad (\text{mm})$$

b Retrait transversal.

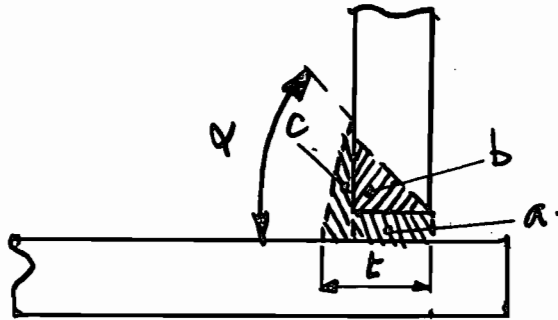
Le retrait transversal pour les soudures d'angle se calcule par la formule.

$$\begin{aligned} r_t &= 0,10 \frac{A}{t} \quad (\text{in.}) \\ &= 0,10 \frac{A}{t} \quad (\text{mm}). \end{aligned}$$

A = a + b + c (mm²) fig. 3. b

t = épaisseur de la soudure en mm.

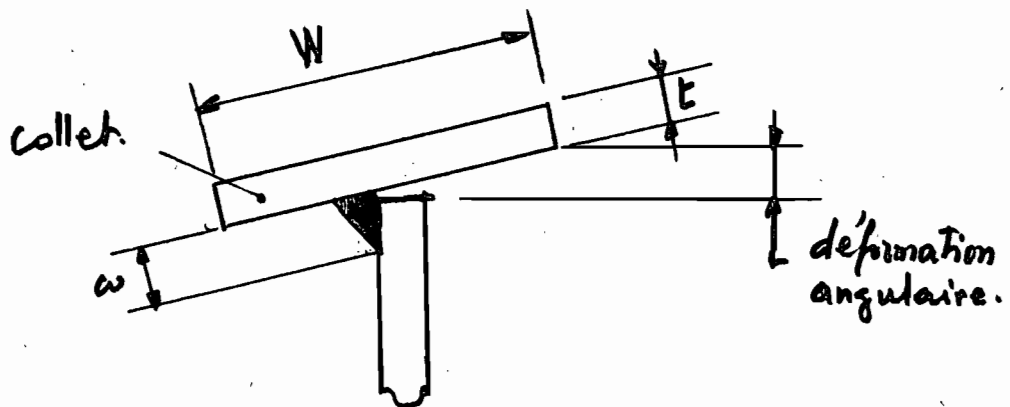
fig 2 b.



c. Déformation angulaire.

En exécutant un cordon d'angle, d'un seul côté, on soumet l'assemblage à une déformation angulaire. Elle varie proportionnellement avec la largeur du collet et la largeur du cordon de soudure, et inversement proportionnellement avec l'épaisseur du collet.

$$\varphi = \frac{0,19 W w^{1,3}}{t^2} \quad (\text{mm})$$



§-2 Etude des contraintes.

Les contraintes thermiques résiduelles proviennent d'un empêchement total, ou partiel, des retraits.

Si ϵ_t est la déformation qu'une pièce doit prendre à une température t , les contraintes uniformes de compression qui permettent de conserver la longueur initiale s'expriment par :

$$\sigma_t = + E_t \epsilon_t.$$

Lorsque la température est inférieure à la température correspondant à la limite élastique : $|\sigma_t| < R_{eT} = \epsilon_{eT} E_T$

Une fois que la température dépasse celle de la limite élastique, l'allongement que la pièce voudrait prendre comporterait une partie élastique ϵ_{eT} et une partie plastique ϵ_{pT} . La contrainte de compression devient alors.

$$\sigma_T = E_t \epsilon_{eT} + m_T E_T (\epsilon_{pT} - \epsilon_{eT}).$$

Lorsque la température de plastification n'est pas atteinte, les contraintes résiduelles sont nulles. Dans le cas où elles existent, ces contraintes atteignent la valeur de la limite élastique du matériau. On peut penser déjà que les constructions soudées sont déjà près de céder avant même d'avoir à supporter les charges de service. Cette crainte logique n'est pas en fait justifiée, et dans la majorité des

des cas, on est en droit de négliger les contraintes internes.

I-3 Moyens utilisés pour remédier aux contraintes et déformations thermiques.

On ne peut pas en pratique éliminer les déformations et contraintes thermiques dans un assemblage soudé. Cependant on peut les contrôler. Le contrôle se fait à deux niveaux : A la conception et à la réalisation. Les principes fondamentaux pour lutter contre les déformations sont les suivants :

1. - A la conception, on doit faire un bon dimensionnement du cordon de soudure. On ne doit pas exagérer la quantité de métal d'apport. A l'exécution le soudeur est tenu à respecter scrupuleusement les dimensions.
2. - Il est préférable d'utiliser une électrode de plus grand diamètre à une électrode petite pour diminuer le nombre de passes qui est source de déformations transversales.
3. - Faire de sorte que le cordon de soudure soit le plus proche de l'axe neutre pour ainsi diminuer l'effet des efforts externes sur le cordon.
4. Une méthode est aussi d'anticiper les effets de défor-

mation en mettant les pièces à une position adéquate - On utilise aussi la méthode de la déformation initiale opposée.

5. Procéder, à un soudage où les contraintes induites par un second cordon s'opposent, aux contraintes de déformations du premier cordon.

6. Il faut dans la mesure du possible minimiser le temps de soudage - Le temps est un facteur affectant les distorsions - Un soudage lent, cause l'échauffement d'un grand volume de métal et conduit, à son expansion.

7. On procède au préchauffage des pièces pour diminuer l'écart de température entre le cordon et la pièce.

8. Le traitement d'égalisation des contraintes, à base température : le métal de base est chauffé, de chaque côté, de la soudure, tandis que cette dernière est maintenue à la température ambiante - Cet effet peut être obtenu avec une différence, de température, de 125 à 150°C, entre le métal de base chauffé et la soudure.

Donc en pratique le meilleur moyen pour réduire les contraintes résiduelles consiste dans l'adoption d'une conception rationnelle de l'assemblage et de la construction.

§-4 Assemblage du bâti.

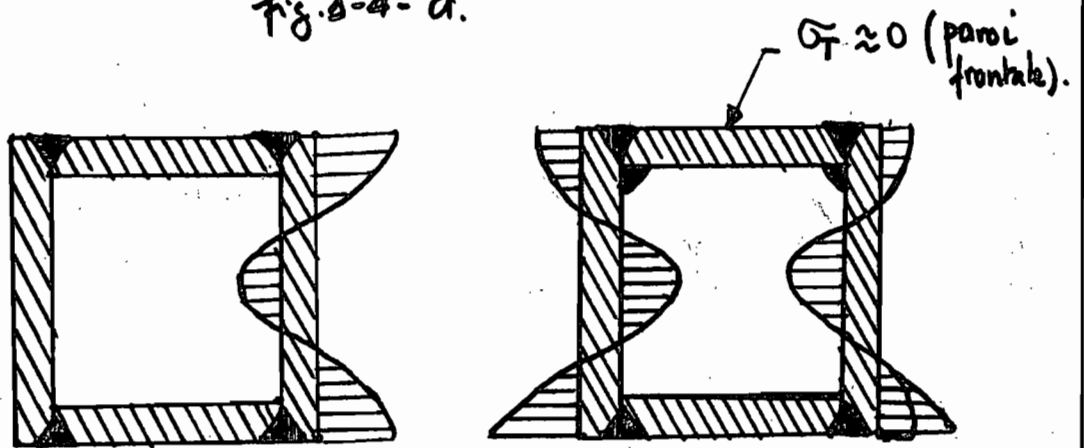
Nous avons, dit tantôt, que les deux principales parties du bâti, sont : La colonne et la base. De même nous préconisons les réaliser en plaques d'acier. Toutefois, il y a lieu de tenir compte de principes fondamentaux pour diminuer les contraintes résiduelles.

Dans l'assemblage, on tient compte du troisième principe, qui veut, que l'on fasse en sorte, que le cordon de soudure soit le plus proche possible de l'axe neutre. Il faut faire tout pour que les pièces soient, assemblées bout-à-bout pour, ainsi diminuer les contraintes transversales.

Une conception techniquement rationnelle est, celle de la fig §-4-b. Cependant elle requiert, des profilés d'acier moulé, qui ne sont pas disponibles pour certaines dimensions. Dans le cas de la colonne du bâti, l'utilisation de profilé est impossible d'autant plus que la section est variable. Quant, aux cornières, leur utilisation exige la réalisation d'au minimum huit cordons de soudures en bout-à-bout. Ce qui n'est pas rationnelle du point de vue de la génération de contraintes. (fig §-4-c). La solution qui reste est, celle de la figure. a., qui, du reste est quelque^{peu} rationnelle. Les, contraintes résiduelles

sont atténués par une reprise, à revers, surtout pour les joints de la plaque frontale supportant les glissières.

fig. 8-4-a.



note: même distribution de contraintes pour les trois autres parois.

profilé en C

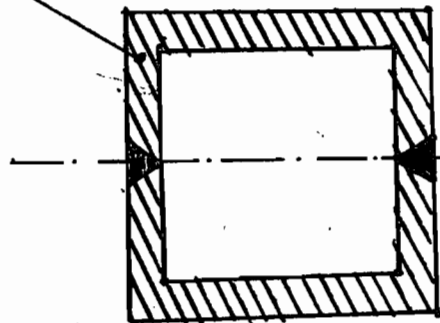
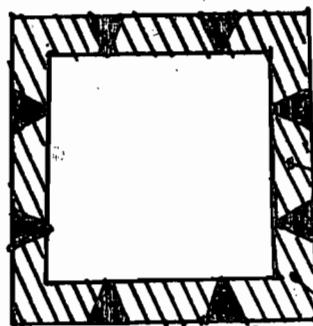


fig 8-4 b.

ligne neutre.

fig 8-4-c.



plaque d'acier.

cornière

L'assemblage de la base est fait de la même manière. Il existe des cornières dont la longueur des ailes convient, mais dont les épaisseurs diffèrent, des épaisseurs de notre conception. Il en existe pour 12 et 13 mm d'épaisseur dont l'utilisation ne serait pas sûrement.

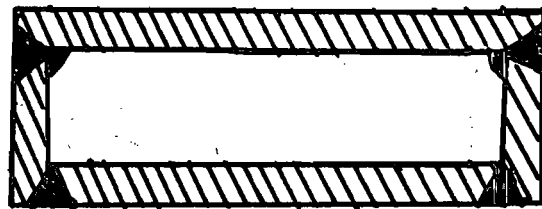


fig E-4-d: Solution rationnelle par l'assemblage des parois de la base.

Le soudage de la colonne sur le socle se fait avec un chanfrein en demi-ve. représenté sur la figure E-4-e. Tandis que la fixation des cloisons de la base et des raidisseurs de la colonne se fait par cordon, d'angle continu des deux coté figure E-4-f.

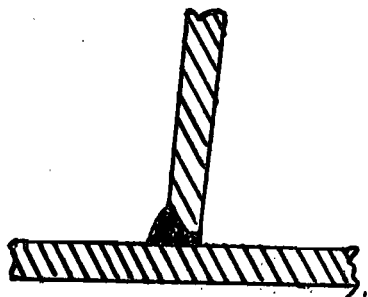


fig E-4-e.

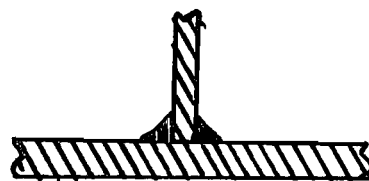


fig E-4-f.

II-4-1 Profondeur de pénétration des dépôts du métal d'apport:

Dans le chapitre 8 nous avons parlé, du type d'assemblage de la colonne et de la base du bâti. Dans ce paragraphe, nous présentons le choix des dimensions des chauffeins pour chaque type de joints.

a. Assemblage des parois: Chauffein en V.

En pratique lorsque l'on se trouve face à un cas où un seul côté est accessible, et que le soudage doit être exécuté de manière à obtenir une bonne pénétration, on utilise, généralement le chauffein en V. Ce type d'assemblage est limité aux pièces de l'épaisseur inférieure à 15 mm en général.

W. Chapeau propose des dimensions de chauffein pour ce type d'assemblage dans "Application du soudage aux constructions".

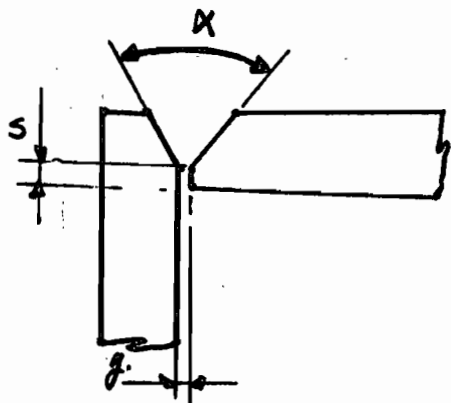


fig. a.

Des extraits des valeurs courantes de ces dimensions, sont rassemblés au tableau suivant:

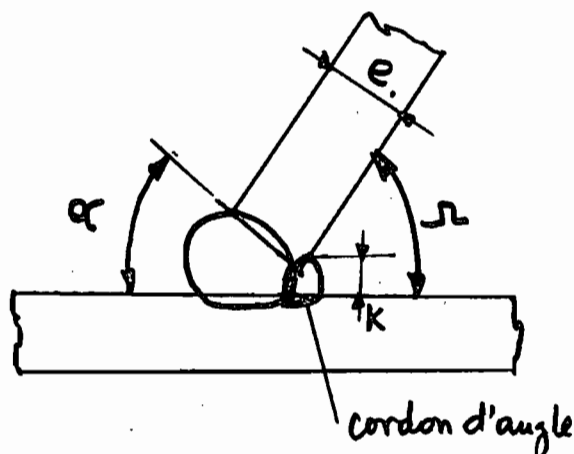
Procédés de soudage.	Positions de soudage	e (mm)	α°	S (mm)	g (mm).
à l'arc et autres	Soudage en toutes positions d'un seul côté	$e < 20$	75°	1.0-2.5	2-4.
à l'arc.	soudage en corniche	$e < 20$	60°	0-3	1-4

La pénétration, du métal d'apport est, ici totale.

b. Assemblage colonne - base: chanfrein $\frac{1}{2}V$.

Les chanfreins en demi-V sont utilisés pour des épaisseurs de pièces comprises entre 5 et 40 mm. Ils sont utilisés dans le cas où les pièces à assembler se rencontrent en angle droit.

Dans le cas, de la colonne où les deux parois latérales et la parois dorsales sont inclinées par rapport à la base d'un angle $\alpha < 90^\circ$; il est recommandé d'éliminer l'angle aigu, en commençant par déposer un cordon à la partie inférieure du joint.



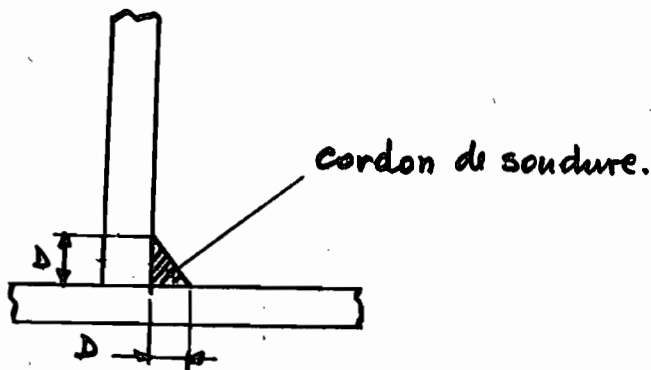
$$K \in \left[\frac{e}{3} + 1.5; 2e \right]$$

Les autres facteurs ont les valeurs suivantes :

Procédé de soudage	Positions, du soudage	e (mm)	α ($^\circ$)	s (mm)	g (mm).
Soudage à l'arc	Soudage à plat $\alpha \in [70; 90]$	$e \leq 15$	50	1 - 1.2	1 - 5.

La pénétration est totale dans ce cas.

c. Soudage des cloisons: Cordon d'angle sans chauffeins



Pour prévoir les contractions du matériau de base au point de soudure les spécifications standards limitent la largeur du cordon D à une valeur maximale. Les contraintes admissibles dans le matériau de base adjacent ne doit pas être dépassées le cordon est contraint à sa capacité maximale admissible.

Ainsi la capacité du cordon de soudure ne dépasse pas la contrainte de cisaillement admissible d'une partie soudée.

Pour une épaisseur minimale de la plaque, la largeur maximale du cordon est donnée par la relation :

$$D = \frac{F_{vb} \times e}{0,707 \times F_{vw}} \quad (\text{mm}).$$

où F_{vw} = contrainte admissible en cisaillement dans le cordon de soudure en (MPa).

F_{vb} = contrainte de cisaillement admissible dans le métal de base.

Lorsque le cordon est réalisé sur les deux côtés, comme c'est le cas dans notre étude, la valeur de la largeur trouvée est divisée par deux.

Pour prévenir toute fissure due aux efforts internes, des valeurs de la largeur sont spécifiées en fonction des épaisseurs de plaque.*

épaisseur maximale de plaque (mm)	13	19	38	57	152	> 152
Largeur Δ (mm)	5	6	8	10	13	16

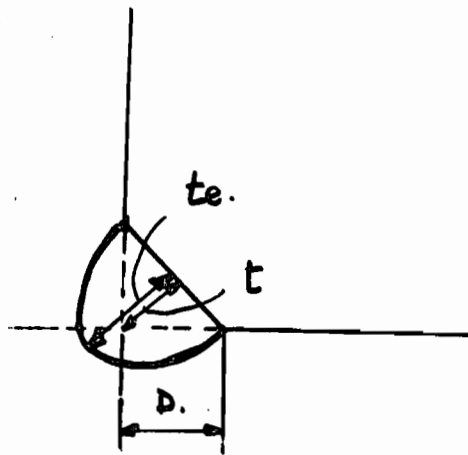
Pour les cloisons la largeur de cordon à choisir est $D = 5$ mm d'autant plus que l'épaisseur est 10 mm pour la plaque de plus petite épaisseur.

* Tableau extrait de "The procedure handbook of arc welding".

la profondeur de pénétration correspondante est donnée par "te" : profondeur effective de pénétration.

$$t_e = D \quad \text{lorsque } D \leq 10 \text{ mm.}$$

$$t_e = 0,707 \times D + 3 \text{ mm.} \quad D \geq 10 \text{ mm.}$$



A partir des dimensions du cordon de soudure, nous déterminons l'électrode de soudure, et les caractéristiques de la machine à souder; nous déterminons la vitesse de soudage, qui, du reste, est très déterminante dans la création de contraintes résiduelles.

Le livre "The Procedure Handbook of Arc Welding" donne ces informations sous forme de tableau pour diverses épaisseurs de plaques et largeurs de cordons. Nous faisons le choix pour le soudage manuel à l'arc. Le soudage automatique donne d'autres valeurs, du diamètre de l'électrode et de l'intensité du courant. Nous étudions cas par cas.

I-4.2 Choix de baguettes de soudure, et type, de machine, à souder employée.

Le choix de ces deux facteurs est essentiellement fonction, des dimensions du cordon de soudure, du type de chauffe, et de la soudabilité, du métal de base.

Les spécifications des électrodes, sont du code AWS (American Welding society) pour les aciers de spécifications ASTM (American society for Testing Materials).

a Soudage des parois de la colonne et de la base.

- position de soudage: toute position.
- soudage d'un seul côté, ou de deux côtés.
- épaisseur $e < 20$ mm. $e = 14$ mm.
- $\alpha = 75^\circ$
- $s = 1,0 - 2,5$ mm.
- $g = 2,4 - 4$ mm.

Le tableau suivant donne pour une épaisseur de $5/8$ in. soit 15 mm une électrode E 6027. pour plus d'un pass.

Pour éviter les contraintes il faut un nombre de passe moins grand soit pour une électrode de diamètre $1/4$ in. La machine à souder doit pouvoir fournir une intensité de courant de 375 A. La vitesse de soudage doit être comprise

entre 12.5 et 14.5 in/min.

L'apport de métal est, dans ces conditions de 0.795 lb/ft.

SHIELDED METAL-ARC (MANUAL)

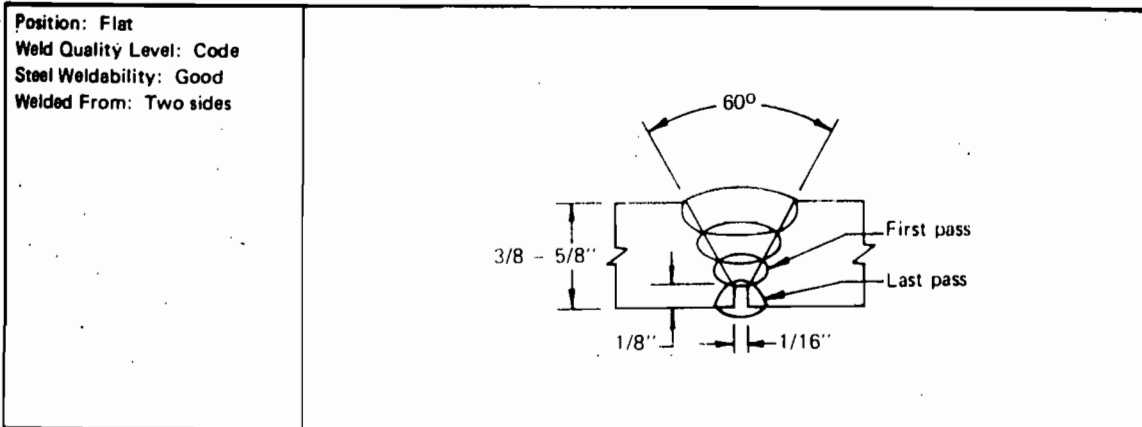


Plate Thickness (in.)	3/8		1/2		5/8		
Pass	1	2 & 3	1	2 & 3	1	2 & 3	4
Electrode Class	E6011	E6027	E6011	E6027	E6011	E6027	E6027
Size	3/16	3/16	1/4	7/32	1/4	1/4	7/32
Current (amp) AC	175	280	275	340	275	375	340
Arc Speed (in./min)	8.0-10.0	14.5-17.5	7.0-9.0	13.5-15.5	7.0-9.0	12.5-14.5	11.5-13.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.148	0.366	0.239	0.480	0.241	0.795	0.235
Total Time (hr/ft of weld)	0.0472		0.0526		0.0706		

Back gouge first pass before welding last pass.

En unités métriques:

- Electrode. classe E6027.
- diamètre électrode 6 mm.
- Intensité du courant 375 Ampères. (AC)
- Vitesse de soudage 5.3 - 6.0 mm/s.
- poids du métal d'apport. 5,75 kg/m.

b Soudage de la colonne sur la base.

Soudage avec chauffe au $\frac{1}{2}$ V

- épaisseur $e = 14 \text{ mm.}$
- $\beta = 1 - 1.2 \text{ mm.}$
- $\gamma = 1 - 5 \text{ mm.}$
- soudage d'un seul côté.
- $\alpha = 50^\circ$

SHIELDED METAL-ARC (MANUAL)

Position: Horizontal Weld Quality Level: Code Steel Weldability: Fair Welded From: One side								
Plate Thickness (in.)	3/8		1/2		5/8		3/4	
Pass	1	2-5	1	2-7	1	2-9	1	2-11
Electrode Class	E7018		E7018		E7018		E7018	
Size (in.)	3/16		3/16		3/16		3/16	
Current (amp) DC(+)	240		240		240		240	
Arc Speed (in./min)	4.5-5.5	8.5-9.5	4.5-5.5	7.5-8.5	4.5-5.5	6.7-7.4	5.5-6.5	6.2-6.8
Electrode Req'd (lb/ft)	0.867		1.35		1.75		2.42	
Total Time (hr/ft of weld)	0.118		0.182		0.270		0.345	

Pour une épaisseur de plaque de 15 mm.

- Electrode de classe = E 7018
- diamètre électrode = 5 mm.
- Intensité du courant = 240 A (DC+).
- Vitesse soudage = 2.8 - 3.1 mm/s.
- poids du métal d'apport = 12,7 kg / m.

c Soudage des Cloisons.

- épaisseur de la plaque 10 mm.
- position horizontale.
- largeur du cordon 5 mm.

SHIELDED METAL-ARC (MANUAL)

Position: Horizontal Weld Quality Level: Commercial Steel Weldability: Good							
Weld Size, L (in.)	3/16		1/4		9/32	5/16	3/8
Plate Thickness (in.)	1/4		5/16		3/8		1/2
Pass	1	1	1	1	1	1	1
Electrode Class	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024	E7024
Size	5/32	3/16	3/16	7/32	1/4	1/4	1/4
Current (amp) AC	230	270	275	325	375	375	375
Arc Speed (in./min)	13.5-15.0	15.0-17.0	14.0-15.0	16.0-18.0	16.0-18.0	13.0-14.0	10.5-11.5
Electrode Req'd (lb/ft)	0.160	0.168	0.20	0.21	0.23	0.30	0.41
Total Time (hr/ft of weld)	0.0141	0.0125	0.0138	0.0118	0.0118	0.0148	0.0182

Pour une épaisseur de plaque de 3/8 in = 10 mm.
 nous avons les caractéristiques suivantes:

- Electrode classe E7024
- diamètre Electrode = 6 mm.
- Intensité du courant = 375 A (AC).
- vitesse de soudage = 6.8 mm/s - 7.6 mm/s.
- poids du métal d'apport = 1.66 kg/m.

d. Caractéristiques mécaniques des électrodes de soudure.

Les caractéristiques des classes d'électrodes choisies se présentent sur le tableau ci-dessous. A partir de ces caractéristiques, nous pouvons faire l'équivalence pour différentes normes.

Les électrodes disponibles sur le marché local sont de norme (AFNOR) françaises. Pour utiliser quelque électrode de cette norme nous exigeons l'équivalence des caractéristiques mécaniques.

TABLE 6-11. Typical Mechanical Properties of Mild-Steel Deposited Weld Metal

Electrode Classification	Condition							
	As-Welded				Stress-Relieved at 1150° F			
	Tensile Strength (psi)	Yield Strength (psi)	Elong. in 2 in. (%)	Impact* (ft-lb)	Tensile Strength (psi)	Yield Strength (psi)	Elong. in 2 in. (%)	Impact* (ft-lb)
E6010	69,000	60,000	26	55 (1)	65,000	51,000	32	75
E6011	70,000	63,000	25	50 (1)	65,000	51,000	30	90
E6012	72,000	64,000	21	43	71,000	62,000	23	47
E6013	74,000	62,000	24	55	74,000	58,000	28	
E6020	67,000	57,000	27	50				
E6027	66,000	58,000	28	40 (1)	66,000	57,000	30	80
E7014	73,000	67,000	24	55	73,000	65,000	26	48
E7015	75,000	68,000	27	90				
E7016	75,000	68,000	27	90	71,000	60,000	32	120
E7018	74,000	65,000	29	80 (1)	72,000	58,000	31	120
E7024	86,000	78,000	23	38	80,000	73,000	27	38
E7028	85,000	78,000	26	26 (2)	81,000	73,000	26	85

* Charpy V-notch at 70°F. except where noted.

(1) Charpy V-notch at -20°F.

(2) Charpy V-notch at 0°F.

8.4.3 Calcul du carbone équivalent.

La soudabilité d'un acier est déterminée par sa composition chimique. Il existe une formule simple établie par les autrichiens, donnant la limite d'une bonne soudabilité. Par cette formule, on calcule le Carbone équivalent compensé (CEC). Si le carbone équivalent compensé est inférieur à 0,50, l'acier est réputé soudable sans précautions spéciales.

$$CEC = \frac{\%C}{13} + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%P}{2} + 0,025e$$

où e = épaisseur de la tôle.

cette relation est applicable pour les valeurs suivantes à la limite:

$$\%C : 0,50$$

$$\%Mn = 1,6$$

$$\%Ni = 3,5$$

$$\%Mo : 0,6$$

$$\%Cr : 1$$

$$\%Cu : 1$$

Pour l'acier XC 42.

$$CEC = 0,91$$

$$C = 0,42\%$$

$$Mn = 0,70\%$$

$$\text{silicium} = 0,25\%$$

$$\text{P et S} = 0,035\%$$

$$CEC > 0,50.$$

Il faut un préchauffage pour le soudage de cet acier.

8.4-4 Température de préchauffage.

Pour l'acier XC 42 le tableau 1, donne les limites de la température de préchauffage : entre 100 et 350°C.

Pour plus de détail le tableau 2, donne la température de préchauffage en fonction du % en carbone et de l'épaisseur de la tôle.

Pour une épaisseur de 15 mm la température de préchauffage pour le XC 42 se situe entre 220 et 275°C, soit en moyenne une température de préchauffage de 250°C.

QUELQUES VALEURS DE TEMPÉRATURES DE PRÉCHAUFFAGE EN FONCTION DE LA COMPOSITION DE L'ACIER

Tableau 1

Il est rappelé que le choix de la température est fonction de la masse de la pièce. Page 75. Pour les désignations AFNOR voir Annexe N° 14.

Familles d'aciers	Désignations AFNOR	Compositions de base (en %)	Températures de préchauffage recommandées	Observations très générales
1 Aciers au Carbone	XC 18 XC 32 XC 38 XC 42 XC 48 XC 80	C : 0,15 - 0,20 C : 0,30 - 0,35 C : 0,35 - 0,40 C : 0,40 - 0,45 C : 0,45 - 0,50 C : 0,75 - 0,85	Pas nécessaire 80-250°C 100-300°C 100-350°C 150-350°C 300-400°C	Voir tableau en annexe n° 4 pour le détail du choix en fonction de l'épaisseur.
2 Aciers au Silicium	45 S 8	C : 0,4 ; Si = 1,6	à éviter	Soudabilité métallurgique médiocre.
3 Aciers au Chrome	100 C 6 Z 12 C 13	C : 1,00 ; Cr = 1,4 C < 0,15 ; Cr = 12-14	600-800°C 500-600°C	Soudabilité métallurgique difficile. Nécessité d'un refroidissement très lent. Page 282.
4 Aciers au Chrome-Molybdène	18 CD 4 25 CD 4 42 CD 4	C = 0,15-0,20 ; Cr = 0,8 ; Mo = 0,20 C = 0,25 ; Cr = 0,8 ; Mo = 0,20 C = 0,42 ; Cr = 0,8 ; Mo = 0,20	200-300°C 250-375°C 300-450°C	Nécessité de traitements thermiques ultérieurs. Page 277.
5 Aciers au Nickel-Chrome	10 NC 6 10 NC 12 35 NC 6 30 NC 11 35 NC 15	C ≥ 0,12 ; Ni = 1,4 ; Cr = 0,90 C = 0,10 ; Ni = 4 ; Cr = 0,90 C = 0,35 ; Ni = 1,5 ; Cr = 0,9 C = 0,30 ; Ni = 2,7 ; Cr = 0,8 C = 0,35 ; Ni = 4,5 ; Cr = 1,7	200-375°C 250-400°C 350-450°C 480-600°C 500-650°C	Soudabilité métallurgique très difficile. Nécessité d'un refroidissement très lent ; parfois de traitements thermiques. Page 278.
6 Aciers au Nickel-Chrome Molybdène	30 NCD 8 30 NCD 12 35 NCD 16	C ≥ 0,30 ; Ni = 2,2 ; Cr = 0,55 C = 0,30 ; Ni = 3,0 ; Cr = 0,90 C = 0,35 ; Ni = 4,0 ; Cr = 1,8	350-500°C 400-550°C 500-650°C	-- d° --
7 Aciers au Manganèse	Z 18 M 2 Z 120 M 12	C = 0,20 ; Mn = 2,0 ; C = 1,25 ; Mn = 12,0	150-260°C formellement déconseillée	L'échauffement de la pièce doit rester inférieur à 250°C. Page 278.
8 Aciers inoxydables et réfractaires	Z6 CN 18-10 Z6 CND 18-12 Z6 CN 25-20	C ≤ 0,05 ; Cr = 18 ; Ni = 10 C ≤ 0,08 ; Cr = 18 ; Ni = 12 C ≤ 0,07 ; Cr = 25 ; Ni = 20	sans préchauffage Page 284.	Les nuances à % de carbone plus élevé peuvent nécessiter un préchauffage.

Tableau 2: Température de préchauffage.
pour tôle en acier au carbone.

EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA TOLE ET DE LEUR TENEUR EN CARBONE (soudabilité métallurgique) ET INFLUENCE DE LA SOUDABILITÉ CONSTRUCTIVE EXCLUE, voir page 75

Teneur en Carbone	Épaisseur de la tôle (mm.)					
	5 mm.	10 mm.	15 mm.	25 mm.	35 mm.	50 mm.
0,20 %	(1) (3)	(1) (3)	(1) (3)	(1) (3)	(1) (3)	(1)
0,25 %	(1) (3)	(1) (2) (3)	(1) (2) (3)	(1) (2) (3)	(1) (2)	<100°C
0,30 %	(1) (2) (3)	80°C (2) (3)	100°C (2)	150°C (4)	180°C (4)	200°C (4)
0,35 %	(1) (2) (3)	100°C (2)	150°C (2)	200°C (4)	225°C (4)	250°C (4)
0,40 %	100°C	200°C	220°C (4)	250°C (4)	275°C (4)	300°C (4)
0,45 %	150°C (4)	250°C (4)	275°C (4)	300°C (4)	325°C (4)	350°C (4)
0,50 %	200°C (4)	300°C (4)	325°C (4)	350°C (4)	350°C (4)	350°C (4)
0,60 %	300°C (4)	350°C (4)	350°C (4)	350°C (4)	375°C (4)	400°C (4)
à						
0,80 %	300°C (4)	350°C (4)	400°C (4)	400°C (4)	400°C (4)	400°C (4)
> 0,8 % (4)	Le soudage de tels aciers n'est pas recommandé, même avec préchauffage (voir remarque E).					

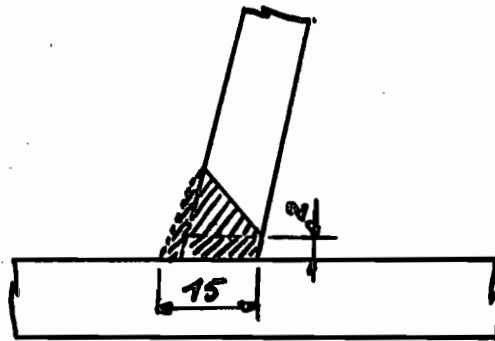
X.5

Exemple de calcul de retrait transversal:
Cas des joint colonne-base.

Le type de joint est représenté par la fig. 1.6, de la page 60. Pour déterminer le retrait transversal nous utilisons la formule empirique :

$$r_t = 0,10 \cdot \frac{A}{E}$$

En considérant la forme exacte du joint pour les parois latérales et le socle



$$A \approx 28 + 8 + 98 = 134$$

$$r_t = \underline{0,89 \text{ mm.}}$$

Le retrait transversal est donc dans l'ordre de 1mm, ce qui n'est pas en pratique exagéré. Pour prévoir ce phénomène on pratique généralement un surdimensionnement des pièces à assembler.

L'étude des retraits dans tous les autres joints est similaire à celle que nous venons de faire.

XI Etude économique de la construction soudée

Pour faire l'étude économique d'une construction soudée il faut étudier trois facteurs principaux:

- Caractéristiques économiques des électrodes,
- Le coût, provenant de la main-d'œuvre, et
- Le coût du matériau de base.

XI-1 Caractéristiques économiques des électrodes.

Il s'agit de la détermination expérimentale, pour une électrode, des valeurs suivantes:

- Le temps de fusion T_f (en secondes).
- Le poids de métal déposé (en grammes)
- rendement en métal (en %).
- vitesse de sondage (en cm/mn.).

a Le temps de fusion est essentiellement fonction:

- du type d'électrode (nature et épaisseur de l'enrobage).
- du diamètre de l'électrode.
- de l'intensité de soudage.
- de la nature du courant de soudage.

b Rendement en métal.

C'est le rapport entre le poids de métal déposé et le poids de métal fondu.

$$R^{\circ} = \frac{P_{md.}}{P_{mf}} \times 100.$$

c. La vitesse de soudage:

$$V_s = \frac{P_{md} \times 60}{T_f} \quad (g / mn).$$

ou

$$V_s = \frac{\text{Longueur soudée} \times 60}{T_f} \quad (cm / mn).$$

d. Cadence de travail du soudeur.

$$C_s = \frac{\text{temps total de fusion des électrodes}}{\text{temps total de l'opération de soudage.}}$$

XI - 2 Détermination des coûts.

On définit les préparations de soudage (forme de chanfrein, diamètre d'électrode à utiliser, intensité de soudage...)

On détermine soit le volume, soit le poids de métal déposé. Connaissant ces deux éléments primordiaux, il sera plus aisé de déterminer le prix de revient de l'opération de soudage.

Il y a deux méthodes plus répandues :

- Recherche du prix au mètre linéaire de soudure ; fonction de l'épaisseur de tôle, de la forme des chanfreins, des valeurs de gorge recherchées en soudure d'angle.
- Recherche du prix au kg de métal déposé (plus précise et plus rapide). Nous utilisons ce second cas pour les calculs du prix de revient du bâti.

On utilise la formule de calcul suivante :

soit :

P_T = prix du kilogramme de métal déposé

P_x = prix de l'électrode.

P_{md} = poids de métal déposé g / électrode.

T_f = temps de fusion en seconde d'une électrode.

P_{mo} = Prix de l'heure de soudure.

, nous avons :

$$\text{- Prix de matière} = \frac{1000 \times P_x}{P_{md}}$$

a Main d'œuvre.

Le prix de la main d'œuvre est déterminé en fonction de la cadence de travail du soudeur (C_s).

$$\text{Prix main d'œuvre} = 0,28 \frac{P_{mo} \times T_f}{P_{md} \times C_s}$$

Donc le prix du kg de métal déposé est :

$$P_T = \frac{1000 \times P_x}{P_{md}} + 0,28 \frac{P_{m0} \times T_f}{P_{md} \times C_s}$$

Par le calcul du poids total de métal déposé pour un assemblage donné, on détermine le prix total du métal d'apport. (P_T).

b Coût du matériau de base.

Sachant le nombre d'unités du matériau de base utilisé, et le prix unitaire, on trouve le prix du matériau de l'assemblé par un simple produit des deux facteurs.

$$P_m = \text{Prix unitaire} \times \text{nombre d'unités}$$

A ces deux coûts, s'ajoute le coût de préparation du métal de base (usinage) et le coût provenant du contrôle après soudage. Nous estimons ces coûts égaux 20% de la somme des deux précédents.

Donc le coût de l'assemblage serait égale

$$P_a = 1,2 \times (P_T + P_m)$$

XI-3 Application au bâti de la fraiseuse.

Les relations de calcul économique précédemment établies sont directement applicable à l'évaluation, du coût de réalisation, du bâti de la fraiseuse, moyennant l'addition des coûts provenant de la préparation de l'assemblage et du coût, provenant des contrôles.

Ne possédant pas de coût exact de matériau utilisé nous ne sommes pas en mesure de présenter le coût exact de la réalisation du bâti. Toutefois il faut remarquer un aspect fondamental a été présenté en conclusion de la première partie, il s'agit de l'économie, important de matière qui provient de la réalisation soudée du bâti.

Pour des données réelles, nous utilisons directement la méthode de calcul du prix de revient pour déterminer le coût du bâti. Le poids du métal déposé est déterminé, à partir, du dimensionnement des cordons de soudure.

L'étude que nous venons de présenter ne règle pas en soit la totalité, du dimensionnement, d'un bâti de fraiseuse. En complément à cette étude statique il faut:

- 1. Etudier le système de fixation au sol du bâti, dimensionner soigneusement les vérins et étudier leur fixation sur la base.
2. dans la conception et le calcul des glissières, il faut vérifier l'épaisseur de la paroi frontale de la colonne.
3. Dimensionner les paliers, dans le calculs de la broche.
4. Pour vérifier la théorie de dimensionnement que nous venons de présenter, nous recommandons la réalisation d'un modèle du bâti pour des données bien précises, et sur lequel, des mesures expérimentales doivent être effectuées pour déterminer les les déformations et contraintes.
5. - Mesurer les concentrations de contraintes aussi bien sur le modèle que sur tout prototype, dans les cordons de soudure et les grandes ouvertures pratiquées sur la colonne.
6. Réaliser l'étude dynamique du bâti. En effet tout le problème dynamique du bâti reste à traiter. La réalisation du modèle pourra servir pour les essais dynamique.
7. En plus du respect scrupuleux des dimensions des cordons, des matériaux, il est recommandé de suivre les règles de sondage.

XIII Conclusion.

Dans cette étude nous avons présenté un outil simple et efficace pour la conception d'un bâti de fraiseuse. Il reste cependant, que, cette étude est loin d'être suffisante pour une conception complète du bâti.

A travers la théorie et les calculs numériques présentés en annexes nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

1. Pour le calcul, d'une colonne à section variable, l'utilisation des formules empiriques de la théorie de l'élasticité rencontre en pratique quelques difficultés. Une méthode salutaire serait la théorie des éléments finis avec l'avènement des ordinateurs. Pour résoudre le problème avec les formules empiriques nous avons dû procéder à des hypothèses et approximations. Toutefois nous faisons remarquer qu'une conception est généralement faite à base d'hypothèses et de simplifications, et que seules les vérifications expérimentales peuvent confirmer leur admissibilité.

2. Pour le calcul de la base nous avons procédé à l'étude du cloisonnement intérieur d'une part et au dimensionnement des parois d'autre part. Dépendamment de l'encombrement permis, on peut utiliser, une base, à hauteur plus grande avec épaisseur des parois faible; ou une à hauteur faible avec grande épaisseur des parois. En

effet les tableaux A.2.1 présentés en Annexes témoignent clairement cette affirmation.

Dans le cas d'une re conception par utilisation d'un acier à la place d'une fonte ou vice versa, nous avons présenté dans la conclusion de la partie 1 la méthode de l'épaisseur équivalente avec des tableaux et nomogrammes.

Nous pourrions a priori utiliser cette méthode si nous avions des dispositions de toutes les dimensions du bâti équivalent en fonte coulée.

Nous n'avons pas poussé très loin l'étude du soudage du bâti, étude qui, avons le, fait, l'objet d'un travail sérieux d'un bureau d'étude. Toutefois le dimensionnement, des cordons de soudure, et le choix des électrodes, ainsi que de certaines caractéristiques du matériel de soudage, ont été en pratique sérieusement élaborés.

Nous espérons que notre étude servira tant soit peu dans la poursuite de l'étude et la réalisation du projet global de construction d'une fraiseuse de précision dans le Sénégal.

Thies, le 06 juin 1986

B. KADIAKE

XIV ANNEXES Applications numériques.

Nous présentons dans cette partie annexe une application de la théorie de calcul de dimensionnement établie dans les chapitres précédents.

Les données que nous utilisons ici ne sont que des valeurs, estimées bien que proches de la réalité. Pour une conception donnée, il y a lieu de tenir compte des données réelles.

Données:

$$a = 275 \text{ mm.}; \quad y_{\text{max}} = 580 \text{ mm.}$$

$$e_1 = 300 \text{ mm}; \quad z_{\text{max}} = 360 \text{ mm.}$$

$$W_1 = 150 \text{ kg} = 1500 \text{ N}$$

$$W_2 = 60 \text{ kg} = 600 \text{ N}$$

$$W_3 = 200 \text{ kg} = 2000 \text{ N}$$

$$W_4 = 150 \text{ kg} = 1500 \text{ N}$$

$$F_1 = 100 \text{ kg} = 1000 \text{ N}$$

$$F_2 = 350 \text{ kg} = 3500 \text{ N}$$

Certaines valeurs comme les dimensions et la force de coupe ont été relevées sur un prototype: "Le Vernier FV 250 E" sur lequel nous avons relevé les dimensions extérieures du bâti.

A.1.2. Dimensionnement de la colonne au flexion
dans les deux plans xy et xz.

Tableau A.1-1.

flèche par unité de longueur $\times 10^6$	flèche $\times 10^6$ (m) ³	moment d'inertie (mm ⁴) $\times 10^6$	Epaisseur.
1.0	1.26	2700	92
1.5	1.89	2604	84
2.0	2.52	1966	50
2.5	3.15	15.62	36
3.0	3.78	12 85	28
3.5	4.41	1114	23.5
4.0	5.04	972	20.0
4.5	5.67	866	17.5
5.0	6.30	769	15.3
5.5	6.93	701	13.8
6.0	7.56	641	12.5
6.5	8.19	594	11.5
7.0	8.82	551	10.6
7.5	9.45	518	9.9
8.0	10.08	484	9.2
8.5	10.71	454	8.6
9.0	11.34	430	8.1
9.5	11.97	410	7.7
10.0	12.60	384	7.3.

A-1-2. Choix de l'épaisseur des parois de la Colonne.

Dans le tableau A-1-1 nous trouvons les épaisseurs de parois requises pour différents niveaux de précision. Pour le choix de l'épaisseur il y a donc lieu de se fixer une déformation admissible pour une conception définie. Toutes les valeurs du tableau sont acceptables pour une machine outil de précision, cependant le niveau de précision diffère.

Pour la fraiseuse, comme, pour toute autre machine la précision est influencée par d'autres facteurs, comme la précision de la table, de la console, et surtout des organes porte-outils.

Nous faisons notre conception pour un niveau moyen de ~~conception~~ déformation qui permet entre autre l'usinage de pièce de grande précision.

Ce niveau de précision nous fournit une épaisseur de plaque de l'ordre de 14 mm.

$$\underline{\underline{a = 14 \text{ mm.}}}$$

Le poids W_c de la colonne est alors.

$$\underline{\underline{W_c = 2390 \text{ N.}}}$$

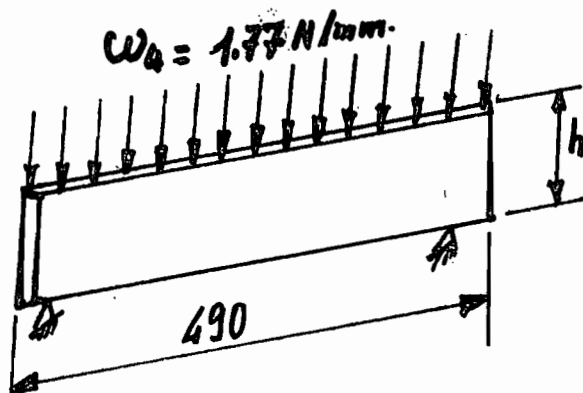
A.2. Dimensionnement de la base

A.2.1. Calcul de l'épaisseur des cloisons au droit de la colonne.

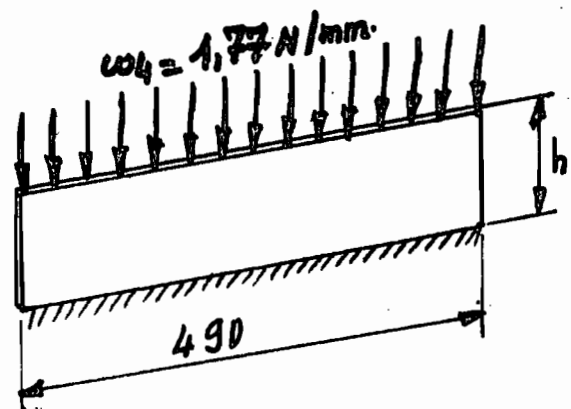
Nous avons dit dans le chapitre VIII que le calcul des cloisons au droit de la colonne se fait par la considération des déformations en flexion, compression et cisaillement.

Dans chacun de ces cas nous voyons que l'épaisseur est inversement proportionnelle à la hauteur des cloisons. Nous considérons alors différentes hauteurs de cloisons, et choisissons la hauteur qui nous donnera une valeur adéquate de l'épaisseur pour une bonne précision. Les tableaux suivant donnent les épaisseurs en fonctions de la hauteur h de la cloison. Nous n'indiquons pas ici les moments d'inertie.

Cloison en flexion.



Cloison en compression.



Tableaux A. 2: Epaisseurs requises des cloisons au droit de la colonne.

1. $h = 140 \text{ mm.}$

flèche par unité de longueur $\times 10^6$	flèche $\times 10^4 \text{ (m)}$	Epaisseur pour la flexion (mm)	Epaisseur pour la compression (mm)	Epaisseur pour le cisaillement (mm).
1.0	0,49	56.3	2.4	14.5
1.5	0,74	37.6	1.6	9.7
2.0	0,98	28.2	1.2	7.2
2.5	1.23	22.5	1.0	5.8
3.0	1.47	18.8	0.8	4.8
3.5	1.72	16.1	0.7	4.1
4.0	1.96	14.1	0.6	3.6
4.5	2.21	12.5	0.6	3.2
5.0	2.45	11.3	0.5	2.9
5.5	2.70	10.2	0.4	2.6
6.0	2.94	9.4	0.4	2.4
6.5	3.19	8.7	0.4	2.2
7.0	3.43	8.0	0.3	2.1
7.5	3.68	7.5	0.3	1.9
8.0	3.92	7.0	0.3	1.8
8.5	4.17	6.6	0.3	1.7
9.0	4.41	6.3	0.3	1.6
9.5	4.66	5.9	0.3	1.5
10.0	4.90	5.6	0.2	1.4.

2. $h = 160 \text{ mm.}$

flèche par unité de longueur $\times 10^6$	flèche $\times 10^6$ (mm)	Épaisseur pour la flexion (mm)	Épaisseur pour la compression (mm)	Épaisseur pour le cisaillement (mm).
1.0	0.49	37.7	2.7	12.7
1.5	0.74	25.2	1.8	8.5
2.0	0.98	18.9	1.4	6.3
2.5	1.23	15.1	1.1	5.1
3.0	1.47	12.6	0.9	4.2
3.5	1.72	10.8	0.8	3.6
4.0	1.96	9.4	0.7	3.2
4.5	2.21	8.4	0.6	2.8
5.0	2.45	7.5	0.5	2.5
5.5	2.70	6.9	0.5	2.3
6.0	2.94	6.3	0.5	2.1
6.5	3.19	5.8	0.4	2.0
7.0	3.43	5.4	0.4	1.8
7.5	3.68	5.0	0.4	1.7
8.0	3.92	4.7	0.3	1.6
8.5	4.17	4.4	0.3	1.5
9.0	4.41	4.2	0.3	1.4
9.5	4.66	4.0	0.3	1.3
10.0	4.90	3.8	0.3	1.3.

$$3 - h = 180 \text{ mm.}$$

flèche par unité de longueur $\times 10^6$	flèche $\times 10^6$ (mm)	Épaisseur pour la flexion (mm)	Épaisseur pour la compression (mm)	Épaisseur pour le cisaillement (mm).
1.0	0.49	26.5	3.1	11.3
1.5	0.74	17.7	2.1	7.5
2.0	0.98	13.3	1.5	5.6
2.5	1.23	10.6	1.2	4.5
3.0	1.47	8.8	1.0	3.8
3.5	1.72	7.6	0.9	3.2
4.0	1.96	6.6	0.8	2.8
4.5	2.21	5.9	0.7	2.5
5.0	2.45	5.3	0.6	2.3
5.5	2.70	4.8	0.6	2.0
6.0	2.94	4.4	0.5	1.9
6.5	3.19	4.1	0.5	1.7
7.0	3.43	3.8	0.4	1.6
7.5	3.68	3.5	0.4	1.5
8.0	3.92	3.3	0.4	1.4
8.5	4.17	3.1	0.4	1.3
9.0	4.41	2.9	0.3	1.3
9.5	4.66	2.8	0.3	1.2
10.0	4.90	2.7	0.3	1.1

Sur les trois tableaux A-2 précédent, nous voyons clairement la variation, de l'épaisseur, avec la hauteur, de la cloison. Ces résultats, nous font penser qu'il faut utiliser une hauteur plus grande de la base pour minimiser la valeur de l'épaisseur.

Toujours pour un niveau moyen de précision, nous trouvons plus judicieux d'utiliser une épaisseur, de 8 mm pour une hauteur de 160 mm.

$$\begin{array}{l} e = 8 \text{ mm} \\ h = 160 \text{ mm.} \end{array}$$

note: Lorsque la hauteur devient, très grande, la déformation, due à la compression, devient prépondérante, il faut donc dans ce cas la choisir, comme référence pour le dimensionnement.

A.2.2 Calcul de l'épaisseur des cloisons diagonales.

La force maximale reprise et transmise par la vis est trouvée égale à la somme des forces verticales appliquées à la console $R = 8600 \text{ N}$

Pour une hauteur de 160mm le programme de calcul établi à partir de l'organigramme présenté précédemment donne les résultats suivants:

Tableau A2-2. Epaisseurs requises pour les cloisons diagonales.

angle de torsion ϕ par unité de longueur (°/10) $\times 10^0$	ϕ (rad/mm) $\times 10^{10}$	moment d'inertie I (mm ⁴) $\times 10^6$	Epaisseur (mm).
1.0	6.84	4.83	14.2
1.5	10.3	3.22	9.4
2.0	13.7	2.42	7.1
3.0	20.6	1.61	4.7
4.0	27.5	1.21	3.5
5.0	34.4	0.97	2.8
6.0	41.2	0.81	2.4
7.0	48.1	0.69	2.0
8.0	55.0	0.60	1.8
9.0	61.8	0.54	1.6
10.0	68.7	0.48	1.4.

Les valeurs requises pour l'épaisseur des cloisons diagonales sont relativement petites. Nous prenons la même épaisseur $e = 8\text{ mm}$ que pour les cloisons au droit de la colonne, ceci pour uniformiser les cloisons intérieures de la base d'autant, aussi qu'une épaisseur de 8 mm assure une bonne précision.

A-2-3. Calcul des parois de la base.

La théorie de ce calcul est présentée dans le paragraphe VIII - 3 - b. Avec le programme de calcul de la déformée en flexion, nous trouvons les valeurs suivantes:

flèche par unité de longueur $\times 10^6$	flèche (m) $\times 10^6$	moment d'inertie $(\text{mm}^4) \times 10^6$	Epaisseur (mm).
1,0	1,0	726	50,90
1,5	1,5	483	38,25
2,0	2,0	362	30,90
2,5	2,5	289	25,95
3,0	3,0	240	22,40
3,5	3,5	206	19,8
4,0	4,0	180	17,7
4,5	4,5	159.	15,9
5,0	5,0	143	14,5
5,5	5,5	130.	13,4

6.0	6.0	119	12.4
6.5	6.5	109	11.5
7.0	7.0	101	10.7
7.5	7.5	94	10.0
8.0	8.0	88	9.5
8.5	8.5	83	9.0
9.0	9.0	78	8.5
9.5	9.5	74	8.1
10.0	10.0	70	7.7.

Les calculs donnent des épaisseurs, du même ordre que celles trouvées dans le cas de la colonne (Tableau A-1-1). Pour une précision moyenne, nous trouvons une épaisseur de 14 mm identique à celle trouvée dans le cas de la colonne. Colonne et base auront des parois de même épaisseur 14 mm; tandis que les cloisons 8 mm.

En considérant les épaisseurs des parois, la base aura une ^{une h} hauteur nette de 188 mm. Cette valeur, ne nécessite pas une reprise des calculs d'autant plus qu'elle est loin de la valeur de la hauteur, qui implique la considération de la déformation par compression.

XV BIBLIOGRAPHIE

R. BAUS, - W. CHAPEAU

"Application du soudage aux constructions"
Eyrolles.

Ch MASSONNET- S. CESCOTTO

"mécanique de matériaux"
sciences et lettres - Liège.

THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY

"The Procedure Handbook Of Arc Welding"
Cleveland, Ohio. 12^e édition Juin 1973.

Omer W. BLODGETT.

"Design of Weldments"
Cleveland, Ohio.

Mohamad GONEID

"méthode de conception et de calcul statique des
bâti des machines-outils."

Thèse N° 334 (1979).

Hainrich GERLING

"Les machines - outils"
Eyrolles.

La SOUDURE AUTOGENE FRANÇAISE (SAF).

"Guide de l'utilisateur du soudage manuel."

notions de technologie et de métallurgie

matériels et produits 2^e édition 1970

P. DANKO-A. POPOV

"Exercices et problèmes de mathématiques
supérieures." Partie II.

Mir - Mosco 1977.

S. TIMOSHENKO

"Résistance des matériaux - 1"

Dunod.

B. H. AMSTEAD

Phillip F. OSWALD

Mynon L. BEGEMAN

"Manufacturing Processes. 7^e édition."