

2/99

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur  
Ecole Nationale Polytechnique



*Département : Métallurgie*

**SUJET:**

**Caractérisation du comportement mécanique  
de joint soudé par friction Pilotée.**

*Proposé Par :*

**K. NACIB**

*Réalisé Par :*

**RABAH**

**FERHOUM**

*Dirigé Par :*

**F. HELLAL**

**A. DAIMELLAH**

**Promotion Juin 1999**

ENP 10, Avenue Hassein Badi-El-Harrach - Alger

## DEDICACE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail :

A ceux qui ont donné le meilleur d'eux même pour voir ce jour arriver

À toi mon père à qui je dois tout ce bonheur

A toi ma mère, toi qui m'est la plus chère au monde

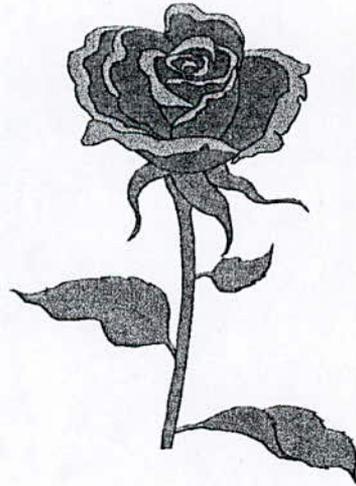
A mes frères Ali, Ahmed, Said et Nassim

A mes sœurs Fatiha et Cherifa

A mon oncle Rabah

A Monsieur K. NACIB

A tous mes amis qui sont pour moi des frères : Meziane, Rachid, Chabane, Hachimi, Mohand, Kahina, Farida, Leila, Karima, Ali, Azzedine, Lounes, Hakim, Farhi, Djamel, Mustapha, Nacer, Smail, Réda, Omar.....



## REMERCIEMENTS

Notre travail s'est effectué au laboratoire du génie des matériaux de L'EMP sous la direction de Monsieur **K. NACIB** à qui nous tenons à exprimer notre profonde gratitude pour son abnégation dans le suivi permanent de notre travail. Nous remercions également nos encadreurs **M F. HELLAL** et **M A. DAIMELLAH** pour l'aide et le suivi de notre travail au niveau de L'Ecole Nationale Polytechnique.

Nous tenons à remercier toute l'équipe scientifique et technique au niveau du laboratoire du génie des matériaux de L'EMP.

Nous ne saurons oublier de remercier chaleureusement tout les enseignants du département de métallurgie de L'ENP pour le riche savoir qu'ils nous ont transmis dans cette merveilleuse discipline qui est la science des matériaux.



## SOMMAIRE



### INTRODUCTION

CHAPITRE I : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
I.1 Soudage par friction.....	2
I.1.1 Principe de soudage par friction.....	2
I.1.2 Caractéristiques de procédé.....	2
I.1.3 Principales étapes du soudage par friction.....	3
I.1.4 Les principaux modes du procédé.....	4
I.1.4.1 Soudage par entraînement direct.....	4
A. Cycle de soudage.....	4
B. Différentes phases de la soudure.....	5
B.1 Phase d'accostage.....	5
B.2 Phase de friction.....	5
B.3 Phase d'arrêt.....	5
B.4 Retard de forgeage.....	5
B.5 Phase de forgeage.....	6
C. Paramètres de soudage par entraînement direct.....	7
C.1 Pendant la phase d'échauffement.....	7
C.2 Pendant la phase de forgeage.....	8
I.1.4.2 Soudage par accumulation d'énergie.....	10
A. Cycle du soudage.....	10
B. Paramètres de soudage par accumulation d'énergie... ..	11
B.1 Energie de soudage.....	11
B.2 Masse du volant d'énergie.....	11
B.3 Vitesse de soudage.....	11
B.4 Pression de soudage.....	11
B.5 Pression de forgeage.....	11
B.6 Temps de soudage.....	11
B.7 Temps de maintien après soudage.....	12
I.1.4.3 Comparaison entre les deux procédés.....	13
I.1.5 Avantages et limitations du procédé.....	14

I.1.6 Mise en œuvre de soudage par friction.....	14
I.1.6.1 Préparation des pièces.....	14
I.1.6.2 Soudabilité.....	15
I.1.6.3 Caractéristiques des soudures.....	16
I.1.7 Influence des paramètres de soudage par friction.....	16
I.1.7.1 Influence sur le couple.....	17
I.1.7.2 Influence sur la température au voisinage du joint.....	18
I.1.7.3 Influence du temps (tr).....	19
I.1.7.4 Influence sur la consommation du métal.....	19
I.1.7.5 Influence sur la zone affectée thermiquement( ZAT).....	20
I.1.8 Contrôle du procédé.....	20
I.1.9 Applications.....	21
I.2 Généralités sur les aciers et les principaux traitements thermiques.....	22
I.2.1 Généralités sur les aciers.....	22
A- Les aciers de construction faiblement alliés.....	22
B- Les aciers au carbone.....	23
I.2.2 Les traitements thermiques.....	25
I.2.2.1 Introduction.....	25
I.2.2.2 Recuit de l'acier.....	26
I.2.2.3 Trempe de l'acier.....	26
I.2.2.4 Revenu de l'acier.....	27
<b>CHAPITRE II: PARTIE EXPERIMENTALE.....</b>	<b>30</b>
II.1 Identification du métal de base.....	30
II.1.1 Choix du métal de base.....	30
II.1.2 Caractéristiques et emplois des deux nuances.....	30
II.1.3 La composition chimique selon NFA.....	30
II.2 Conception du dispositif de soudage.....	30
II.2.1 Caractéristiques du tour parallèle RAMO-T37.....	31
II.2.2 Unité hydraulique.....	31

II.2.3 Montage spécifique.....	31
II.2.4 Instrument de mesure.....	32
II.2.4.1 Caractéristique du capteur force.....	32
II.2.4.2 Compliments de la chaîne de mesure.....	32
II.2.4.3 Etalonnage du capteur force.....	33
II.3 Géométries des éprouvettes.....	33
II.3.1 Choix des diamètres .....	33
II.3.2 Préparation des pièces élémentaires.....	33
II.4 Soudage des deux nuances d'aciers.....	36
II.4.1 Soudage de la nuance 42CD4.....	36
II.4.2 Soudage de la nuance XC48.....	36
II.5 Essais mécaniques.....	36
II.5.1 Mesure de dureté rockwell	
II.5.1.1 Principe.....	36
II.5.1.2 Condition d'essai.....	36
II.5.2 Mesure de micro- dureté.....	37
II.5.2.1 Condition d'essai.....	37
A. Polissage.....	37
B. Attaque chimique.....	37
II.5.2.2 Mode opératoire.....	37
II.5.2.3 Réalisation d'essai.....	37
II.5.3 Essai de traction.....	37
II.5.3.1 Principe.....	37
II.5.3.2 Usinages des éprouvettes selon la norme N.F.A...38	
II.5.3.3 Condition d'exécution d'essai.....	38
II.5.3.4 Réalisation des essais de traction.....	38
II.5.4 Essais de résilience.....	38
II.5.4.1 Exécution d'essai.....	38
II.5.4.2 Usinage des éprouvettes.....	39
II.5.4.3 Types d'éprouvettes.....	39
II.5.4.4 Réalisation des essais de résilience.....	39

Chapitre III Résultats et Interprétation.....	40
III 1 Resultats.....	40
III 1 1 résultats d'essais de dureté.....	40
III 1 1 Résultats d'essais de micro dureté.....	40
III 1 3 Resultas d'essais de traction.....	43
III 1 4 resultats d'essai de resilience.....	50
III. 2 Interpretations.....	51

Conclusion

**Mots clés :** Soudage par friction, recuit, revenu, trempe, dureté, résilience, traction.

**TITRE :** Caractérisation du comportement mécanique d'un joint soudé par friction pilotée

**RESUME :** Ce travail a pour objet l'étude de comportement mécanique d'un joint soudé par friction . Il est divisé en trois chapitres : le premier chapitre est une synthèse bibliographique des différents aspects de ce procédé d'assemblage en phase solide, le deuxième chapitre est une étude expérimentale de l'opération de soudage, ainsi que les essais mécaniques et le troisième chapitre c'est les résultats et l'interprétations.

**TITLE :** Caractérisation of the mecanic behaviour a joint welded by friction

**ABSTRACT :** This work has as subject to study the mecanic behaviour of bonding by friction . it is devided by three units ; the first unit is bibliographical resume of different aspects of this joining methode in solid part, the second one consist in experimental study of the bonding operation, however the mecanical tests. The third part contains the results and they explanations.

العنوان : مميزات التصرف الميكانيكي لوصلة ملحمة بمفعول الإحتكاك المقاد

الملخص :

يهدف هذا العمل إلى دراسة التصرف الميكانيكي لقطعة ملحمة بمفعول الإحتكاك. و ينقسم إلى ثلاثة فصول :

الأول منها عبارة عن حوصلة مرجعية لمختلف مظاهر هذه الطريقة في التجميع في المرحلة الصلبة، أما في الفصل الثاني فيمثل دراسة تجريبية لعمية التلحيم، إضافة إلى الإختبارات الميكانيكية. أما الفصل الثالث، فهو ملخص إلى مختلف النتائج و تفسيراتها.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

## *INTRODUCTION*

## *INTRODUCTION*

Le soudage par friction des métaux est connu depuis longtemps. On le considérait comme une curiosité d'atelier ou un phénomène indésirable lorsque, accidentellement, deux pièces prévues pour frotter l'une sur l'autre finissaient par s'assembler en raison d'un échauffement excessif dû à une lubrification déficiente [1,2,3,4].

Depuis 1945 le soudage par friction est utilisé pour les matières thermoplastiques. Des tentatives ont été faites peu après 1945 par **KLOPSTOCK** pour souder des métaux par ce procédé mais sans succès. Il a été développé sous sa forme industrielle en **UNION SOVIETIQUE** par **KLOPSTOCK** et **VILL** vers 1956 puis en **GRANDE BRETAGNE** et aux **ETATS UNIS** quelques années plus tard[1].

La soudure par friction consiste à assembler deux éléments métalliques par soudure à l'état pâteux, la chaleur nécessaire pour créer la liaison étant obtenue par frottement entre les Faces à souder[7].

C'est surtout dans les domaines aéronautique, électrique et l'industrie automobile que se sont développées les recherches et les applications du soudage par friction.

Notre contribution consiste à étudier le principe de soudage par friction, ainsi que l'influence des paramètres de soudage sur la zone affectée thermiquement (**ZAT**) afin de réaliser un assemblage pour le comparer à une pièce non soudée afin de démontrer son intérêt dans l'industrie.

*Chapitre I*

*Partie Bibliographique*

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1 Le soudage par friction

Le soudage par friction est un procédé d'assemblage en phase solide où on obtient la liaison par diffusion. Il se caractérise par l'absence d'apport extérieur : métaux, flux ...

Dans l'industrie, c'est un procédé automatisé majoritairement utilisé pour des composants symétriques. La jonction réalisée se caractérise par l'absence de zone fondue, la très faible étendue de la zone affectée thermiquement (ZAT) et la présence de deux bourrelets[2,3,4].

#### I-1-1. Principe du soudage par friction

Le principe du soudage par friction consiste à transformer l'énergie cinétique d'une pièce mise en rotation, en énergie calorifique produite par friction à l'interface des pièces à assembler. La quantité de chaleur générée à l'interface porte rapidement les pièces à la température de soudage, sans atteindre la fusion du métal. Lorsque le mouvement de rotation s'arrête, on applique une pression axiale pour compléter l'assemblage par forgeage.

Le soudage par entraînement direct et le soudage par accumulation d'énergie sont les deux principaux modes du procédé de soudage par friction[2,3,5].

#### I-1-2. Caractéristiques du procédé

Pendant la première phase de l'opération, les surfaces en frottement s'échauffent, chassant les corps qui risquent de contaminer le joint, les aspérités, les pellicules d'oxydes sont brisées et les surfaces se trouvent alors dans un état apte au soudage par pression. Une fois que le processus d'adhérence et de rupture se produit, les théories de frottement généralement admises ne peuvent plus s'appliquer parce que la chaleur est engendrée par déformation plastique dans une couche d'épaisseur finie. On constate que les variations de la vitesse de rotation ont des effets inverses suivant qu'elles se produisent pendant les phases d'accostage et de friction ou durant la phase de forgeage.

Une augmentation de la vitesse de rotation sans changement de la force axiale réduit la durée des deux premières phases. Suivant le refoulement qui se produit, on peut prolonger la troisième phase en augmentant la vitesse, parce qu'en accélérant le dégagement de chaleur, on

diminue l'épaisseur de métal déformé plastiquement. La résultante de ces deux effets est que pour un même refoulement, la durée totale de soudage passe par un minimum.

VILL résume comme suit les effets de la vitesse :

$$T_1 + T_2 = A \sqrt{n}, \quad T_3 = B n + C.$$

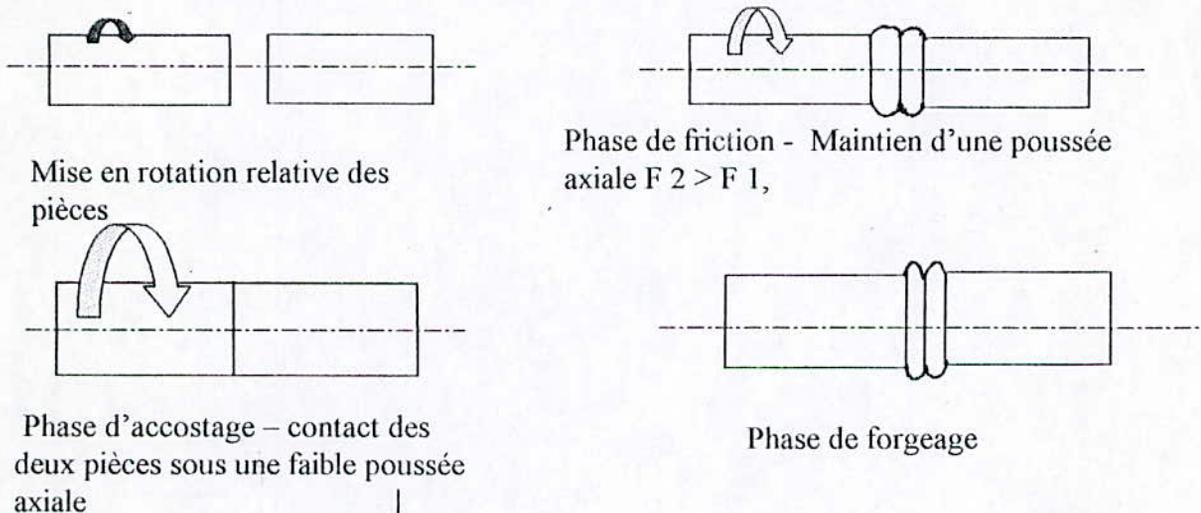
$T_1, T_2$  et  $T_3$  étant les durées des phases 1, 2 et 3 respectivement ; A, B et C étant des constantes et n la vitesse de rotation en tours par minute [6].

### I-1-3 Principales étapes du soudage par friction

Durant le soudage par friction on distingue deux périodes comme la montre la FIG I.1

La période de frottement qui assure l'échauffement des pièces à souder et qui correspond aux phases d'accostage et de friction

La période de forgeage qui assure la formation de la liaison



FIGI.1 : Description des différentes phases du cycle de soudage .

On peut séparer la période de frottement en quatre phases distinctes. Au début du cycle de soudage, il se produit un **frottement sec** entre les deux surfaces, l'augmentation de température provoque la formation d'une couche plastifiée sur toute l'interface, ce qui entraîne la diminution du couple de frottement et nouvelle distribution de la pression, c'est la **phase transitoire**. Le système présente assez rapidement une auto-régulation qui marque le début de la **phase d'équilibre** ou le couple de frottement en particulier est constant, ce qui conduit à une augmentation linéaire de la consommation de matière en fonction du temps. La diminution de la vitesse de rotation marque le début de la **phase de décélération** Durant cette phase, la

couche plastifiée se concentre en une zone annulaire qui se déplace vers la périphérie des pièces et qui augmente de volume lorsque la vitesse diminue[2].

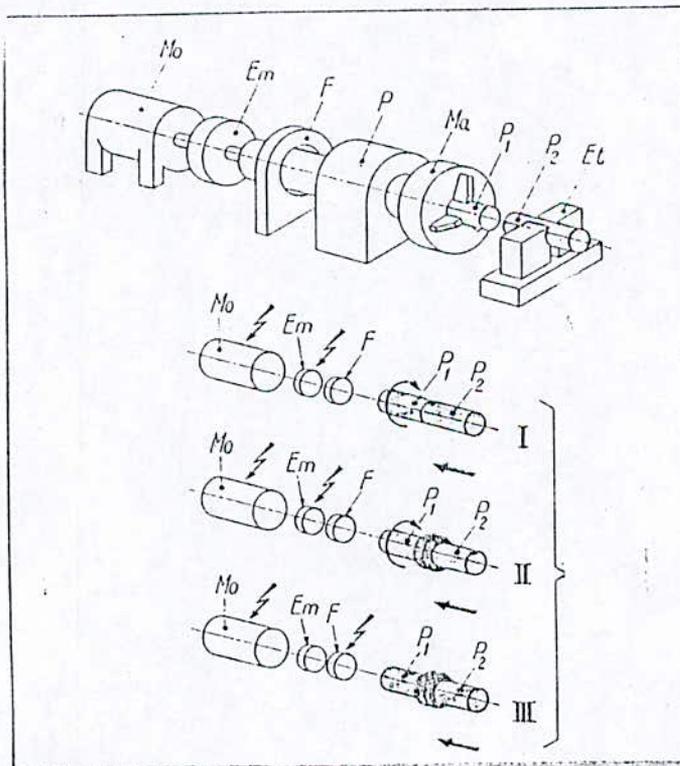
**I-1-4 Les principaux modes du procédé**

Il existe plusieurs modes de soudage par friction mais le soudage par entraînement direct et par accumulation d'énergie sont notamment les plus connus[4,7]

**I-2-4-1 Soudage par entraînement direct ou continu**

**A – cycle de soudage**

Dans ce procédé, une des pièces à souder est fixée sur le mandrin qui l'entraîne à la vitesse désirée par l'intermédiaire d'un moteur approprié. La deuxième pièce à souder est montée sur un chariot qui se déplace axialement lors du soudage, le chariot est avancé avec un effort constant ou progressivement croissant, vers la pièce tournante produisant ainsi la chaleur de friction. Les zones en contact s'échauffent ; ce processus dure pendant un temps prédéterminé ou jusqu'à ce qu'une consommation de matière donnée soit atteinte. La rotation s'arrête par la mise en œuvre d'un frein. La force axiale est augmentée pour réaliser le soudage par forgeage.



I: Accostage  
 II: friction  
 III: forgeage

**FIG I.2 : Soudage par entraînement direct**

## **B- Les différentes phases de l'opération de soudage**

### **B-1 La phase d'accostage**

C'est la phase où il y'a contact des deux pièces, elle se caractérise par :

- Une vitesse de rotation ;
- Un effort d'accostage ;
- Un temps d'accostage.

### **B-2 La phase de friction**

C'est une étape après la phase d'accostage qui correspond au chauffage des pièces à souder. Elle caractérise par :

- Une vitesse de rotation identique a' celle d'accostage ;
- Une pression de friction ;
- Un temps de friction ;
- Une consommation matière (bourrelet).

### **B-3 La phase d'arrêt**

Elle correspond à la fin de la phase de friction. C'est le temps nécessaire pour que la vitesse de rotation devienne nulle.

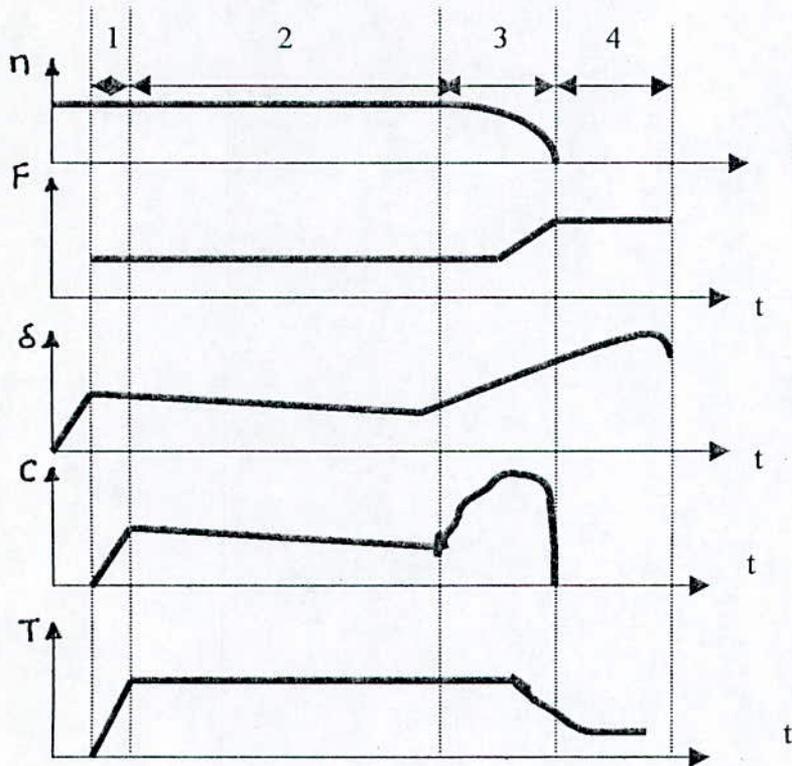
### **B-4 Retard de forgeage**

C'est le temps entre la fin de la phase d'arrêt et le début de la phase de forgeage, ce temps doit être le plus court possible [12]

### B-5 La phase de forgeage

C'est la phase finale du cycle de soudage, aux cours de cette phase, les pièces commencent à refroidir. Elle se caractérise par :

- Une pression de forgeage qui est en général supérieure à la pression de friction ;



- 1- Phase initiale ;
- 2- Phase de friction ;
- 3- Phase de transition ;
- 4- Phase de forgeage.

*n*: vitesse de rotation  
*F*: force axiale  
*δ*: consommation de matière  
*c*: couple de frottement  
*T*: Température du soudage

**FIG I.3 : Différentes phases et variation des paramètres de soudage continu par friction**

## **C- Paramètres du soudage par entraînement direct**

### **C-1 Pendant la phase d'échauffement.**

**.Vitesse de rotation :** Il existe une vitesse de rotation pendant la friction pour laquelle le couple passe par un maximum, lorsque les sections à souder sont pleines, l'efficacité de la friction varie de l'axe vers la périphérie, avec un rendement amoindri au centre et à la périphérie ( pour une vitesse angulaire réglée sur un diamètre moyen ). Il est donc nécessaire que la chaleur produite ait le temps de diffuser radialement pour que l'échauffement soit uniforme. Par contre, le soudage de sections tubulaires est particulièrement favorisé par le phénomène. La vitesse de rotation optimale dépend de la nature des matériaux. Elle se situe d'une manière générale entre 1 et 2 m/s.

### **. L'effort d'échauffement :**

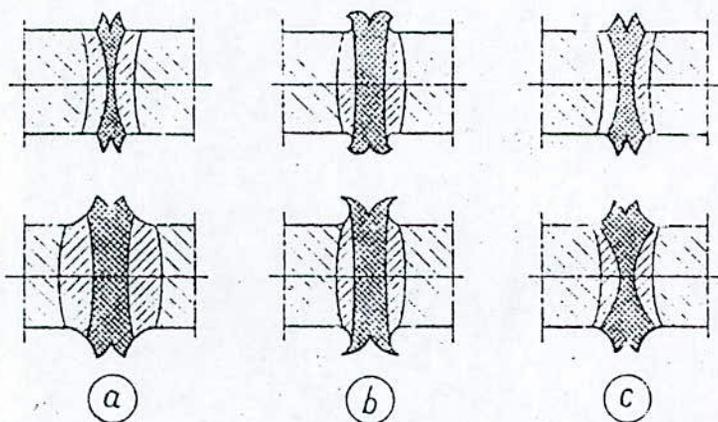
Pour une vitesse constante, le couple passe également par un maximum en fonction de la pression appliquée. Le réglage de l'effort permet donc d'optimiser le flux de chaleur et par suite l'efficacité de l'échauffement dont la durée sera finalement raccourcie.

Un effort important entraîne une grande consommation de matière. Les réglages de vitesse et d'effort de la phase d'échauffement ne sont pas critiques et donnent lieu à un phénomène stable se traduisant par un couple de friction constant [12].

### . Le temps de chauffe :

Les effets de la durée de la chauffe à la fin de laquelle la rotation est interrompue sont mis en évidence par la FIG : I.4

Un temps trop court fournit une zone affectée thermiquement irrégulière ; par contre, un temps trop long entraîne une consommation de métal surabondante[4].



a : faible énergie (grande vitesse : 3m/s, faible pression 2 daN/mm<sup>2</sup>)

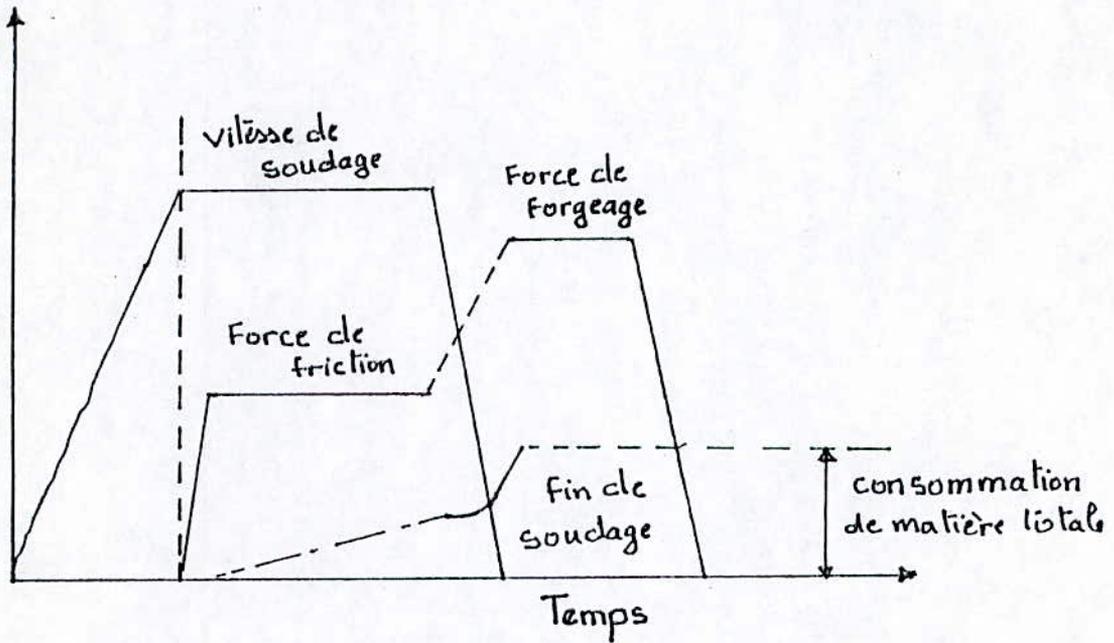
b : énergie moyenne (vitesse optimale 2m/s, pression normale 5 daN/mm<sup>2</sup>)

c : forte énergie (faible vitesse 1 m/s, forte pression 10 daN/ mm<sup>2</sup>)

**FIG. I.4 : effet du temps et de l'énergie sur la forme de la soudure.[12]**

**C-2 Pendant la phase de forgeage :**

- L'effort de forgeage est défini par des considérations métallurgiques identiques à celle des autres procédés.
- Le temps de forgeage : c'est un temps très court, il est de l'ordre de quelques secondes.



**Fig. I. 5 :** les relations caractéristiques entre paramètres dans le cas du soudage par entraînement direct[4]

### I-1-4-2 Soudage par accumulation d'énergie

#### A - cycle du soudage

Il se conduit sur une machine ressemblant fort à une machine continue aux différences près suivantes (FIG) I.6)

- Le frein de broche est supprimé ;
- Un volant d'inertie est associé au mandrin rotatif ;
- L'effort appliqué à la table mobile est notablement supérieur ;
- La vitesse nominale du mandrin est également supérieure.

L'opération de soudage est produite comme suit :

- Mise en place des pièces ;
- La mise en rotation de la broche équipé de son volant à une vitesse prédéterminée au moyen du moteur et éventuellement de l'embrayage mais sans contact entre les pièces.
- Le débrayage de la broche qui continue de tourner sur sa lancée.
- Avance de la table avec application de l'effort.

I. Accostage  
II. friction  
III. forgeage

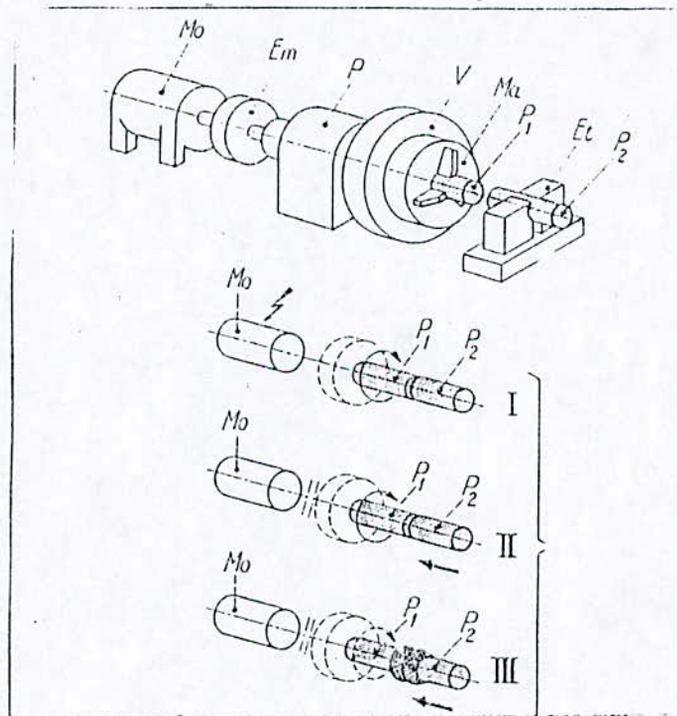


FIG.I.6 : Soudage par accumulation d'énergie [4] .

**B- paramètres de soudage par accumulation d'énergie**

Les paramètres qui tiennent compte de la nature des matériaux et des sections en présence sont[4] :

**B-1- énergie de soudage**

C'est l'énergie nécessaire qu'il faille emmagasiner pour réaliser un soudage. Cette énergie est la combinaison de la masse du volant d'inertie associé à la vitesse de rotation de soudage.

**B-2- masse du volant d'inertie**

Masse, solidarisée à la broche tournante de la machine qui, lancée à la vitesse de soudage, donne l'énergie de soudage .

**B-3-Vitesse de soudage**

Vitesse pour laquelle l'équipage tournant accumule l'énergie nécessaire au soudage.

**B-4-Pression de soudage**

Pression qu'il faut appliquer sur les faces à souder pour réaliser un soudage. Cette pression est appliquée quand l'équipage tournant à atteint la vitesse de soudage jusqu'à l'arrêt de l'équipage tournant.

**B-5-Pression de forgeage**

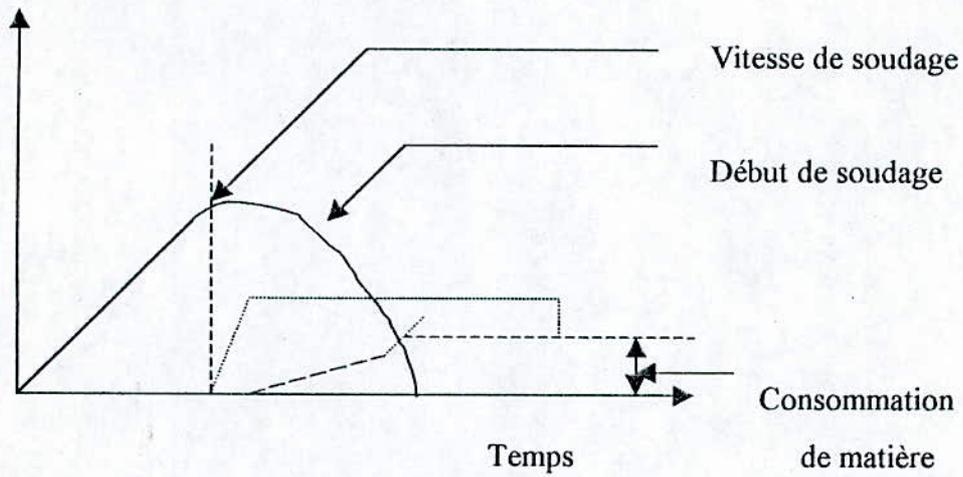
Pression complémentaire à la pression de soudage pour l'obtention d'un bon corroyage de la zone soudée. Cette pression est appliquée à une vitesse donnée pendant la décélération de la broche

**B-6- Temps de soudage**

Temps mis par la broche tournante pour s'arrêter, à partir de l'application de la force de soudage.

### B-7- Temps de maintien après soudage

Temps pendant lequel la force de forgeage est maintenue après l'arrêt de la broche. Les relations caractéristiques entre les paramètres du processus sont présentes en figure(6)[4].



**FIG I.7 : Les relations caractéristiques entre paramètres de soudage par accumulation d'énergie[12]**

### I-1-4-3 Comparaison entre les deux procédés

Le tableau ci- dessous donne les avantages et les limitations du procédé de soudage par friction.

	Soudage continu	Accumulation d'énergie
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Réglage large des paramètres de soudage ;</li> <li>-Bonne reproductibilité;</li> <li>-Dureté acceptable dans le cordon ;</li> <li>- A section soudée identique, puissance et poids plus faibles qu'une machine à accumulation d'énergie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rapidité du cycle de soudage ;</li> <li>- Faible ZAT ;</li> <li>-Bonne reproductivité.</li> </ul>
Limitations	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Temps de soudage long ;</li> <li>- Large ZAT ;</li> <li>- Difficulté d'utiliser les essais non destructifs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Risque de non-homogénéité de chauffage au centre ;</li> <li>Réglage pointu de l'énergie de soudage ;</li> <li>Dureté dans le cordon élevée due au refroidissement rapide ;</li> <li>Nécessite d'une tolérance serrée des pièces avant soudage ;</li> <li>-Difficulté d'utiliser les essais non destructifs.</li> </ul>

### I-1-5 Avantages principaux et limitations du soudage par friction

Parmi les avantages on peut citer :

- Pas besoin de métal d'apport ni d'atmosphères protectrice ;
- Pas de préparation particulière des surfaces soudées ;
- Possibilités de souder des matériaux hétérogènes ;
- Faible ZAT ;
- Robustesse matérielle et reproductibilité des résultats ;
- Pas de main d'œuvre spécialisée ;
- Bon rendement énergétique ;

Parmi les limites nous citerons :

- nécessite de mettre en rotation l'une des pièces à assembler
- Les matériaux à souder ne doivent pas avoir la propriété d'être lubrifiés à sec ; les matériaux contenant : Du graphite, du sulfure de fer, Pb .....tels que fonte grise, bronze, laiton, ...etc. ne peuvent pas être soudés par ce procédé[8].

### I-1-6 Mise en oeuvre du soudage par friction

#### I-1-6-1 Préparation des pièces

Du point de vue géométrie, tous les assemblages de révolution sont réalisables par friction.

Lorsque les sections ne sont pas égales, il peut être nécessaire de réaliser sur la plus grande pièce une préparation visant à obtenir la symétrie et permettre une meilleure répartition thermique ainsi qu'un fluage équilibré.

Dans la pratique les conditions d'emploi sont pour les plus importantes :

- La possibilité d'appliquer aux deux pièces un serrage suffisant et de leur transmettre le couple de friction.

- Des pièces suffisamment rigides pour donner lieu à un processus stable en évitant les flexions parasites.

- Une meilleure symétrie possible, avec préparation si besoin de l'une des pièces pour s'approcher du meilleur équilibre thermique[7].

### I-1-6-2 Soudabilité

Le procédé de soudage s'applique à un grand nombre de matériaux semblables et dissemblables ainsi que le montre le tableau(1).

Il présente, de ce fait, par rapport aux soudages à l'arc, un avantage substantiel[7].

Metaux	Aluminium	Alliages d'Al	Laiton	Bronze	Oxyde de cadmium	Fonte grise	Cobalt	Cuivre	Cuivre - nickel	Invar (alliage Fe-Ni)	Plomb trempé	Magnésium	Alliages de Mg	Molybdène	Monel	Nickel	Nimonic	Niobium	Argent	Alliages d'Ag	Acier	Acier coulé	Acier spécial	Acier inoxydable	Tantale	Thorium	Titane	Tungstène	Carbures de W	Uranium	Vanadium	Alliages de Zr	
Aluminium	■	■						■				■	■			■					■		■									■	
Alliages d'Al	■	■										■	■								■	●		■									■
Laiton			■					■														■		■									
Bronze			■	■				■														■		■									
Oxyde de cadmium								●														■		■									
Fonte grise																						■		■									
Cobalt							■															■		■									
Cuivre	■		■		●			■												■		■		■									■
Cuivre - nickel								■	■															■									
Invar (alliage Fe-Ni)			■																					■									
Plomb trempé											■																						
Magnésium	■	■										■	■											■									
Alliages de Mg	■	■										■	■											■									
Molybdène														■										■									
Monel														■									■										
Nickel	■														■								■										
Nimonic																■							■										
Niobium																							■										
Argent									■															■									
Alliages d'Ag																						■											
Acier	■	●		■		■		■													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Acier coulé			■												■							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Acier spécial																						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Acier inoxydable	■	■						■	■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Tantale																								■									
Thorium																								■			●						
Titane	■													■	■	■							■			■		■					
Tungstène																																	●
Carbures de W																							■										
Uranium																																	●
Vanadium																																	
Alliages de Zr	■							■																■									

■ bonne soudabilité    ▣ soudable    ● soudure délicate    impossible ou non essayé

### **I.1.6.3 Caractéristiques des soudures**

L'expulsion à l'extérieur du joint des parties initialement en contact a les caractéristiques suivantes :

- Toute préparation des surfaces à souder est éliminée ;
- Une soudure saine des faces en contact par formation de liaisons métalliques est obtenue ;
- Les zones affectées par la chaleur et déformées plastiquement sont étroites et les caractéristiques des matériaux de base ne sont pas dégradées ;
- Le plan de joint présente un grain plus fin que les métaux de base.

### **I-1-7 Influence des paramètres de soudage par friction**

Les paramètres de soudage par friction (la vitesse de rotation – la force axiale de friction et de forgeage - le temps de friction– le temps entre l'arrêt de la rotation et le début de forgeage) ont une influence sur la température du joint, le couple de friction et la consommation de matière[8]

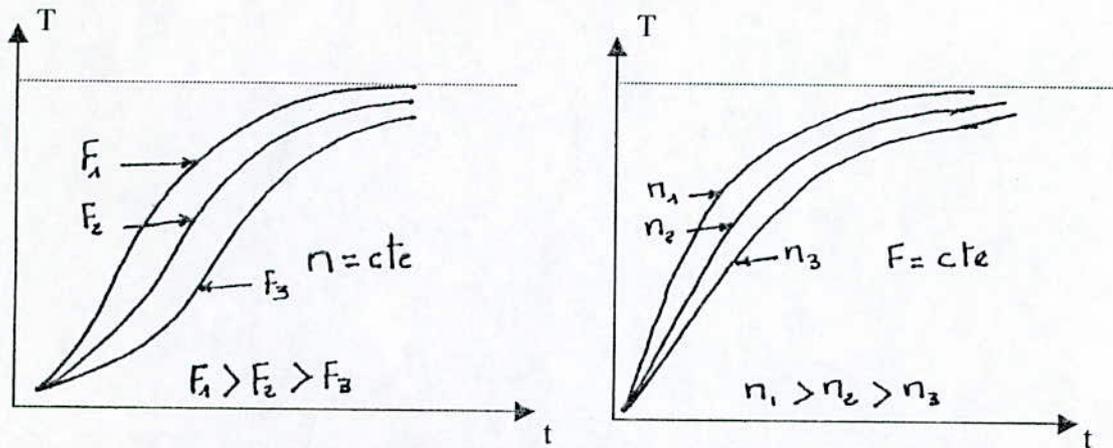
#### **I-1-7-1 Influence sur la température au voisinage du joint**

Les thermocouples, les pyromètres avec fibre optique sont parmi les moyens utilisés pour mesurer la température.

La température croît très rapidement au début du soudage pour atteindre environ 1000, elle tend ensuite asymptotiquement vers une valeur d'équilibre dont la valeur dépend des conditions de soudage. C'est d'ailleurs cette caractéristique qui permet de réaliser le soudage par friction.

A une vitesse de rotation constante la température d'équilibre est atteinte d'autant plus rapidement que la force axiale est grande. A force axiale constante, la température d'équilibre atteinte est légèrement plus élevée lorsque la vitesse de rotation croît.

Lorsque le temps de friction augmente, la température d'équilibre augmente légèrement.

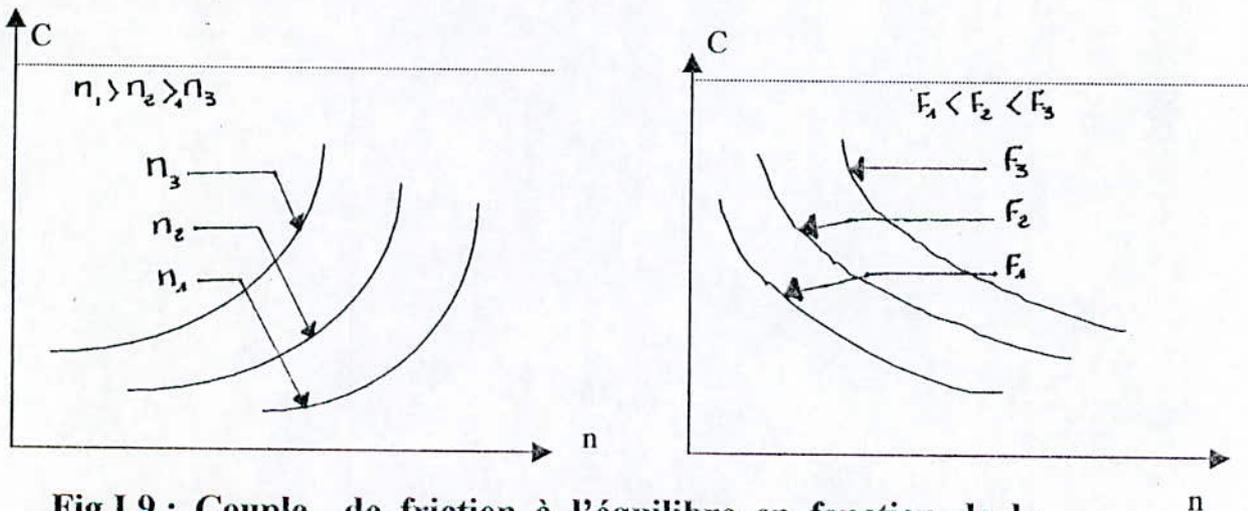


**Fig. I. 8 : Température de l'interface en fonction du temps pour différentes forces axiales et différentes vitesses .**

**I-1-7-2 Influence sur le couple**

Les paramètres de soudage par friction ont une grande influence sur le couple tel que :

- L'augmentation de la force axiale  $F$  entraîne une augmentation du couple, car cela augmente la friction tout le long des phases de soudage ;
- L'augmentation de la vitesse de rotation  $n$ , à force axiale constante, entraîne une réduction du couple car le coefficient de frottement se trouve réduit avec effet variable selon les différentes phases de soudage. Cela voudrait dire qu'une augmentation de vitesse n'entraîne pas forcément un accroissement de l'énergie calorifique du soudage.
- L'augmentation du temps de friction n'entraîne pas généralement une diminution sensible du couple.



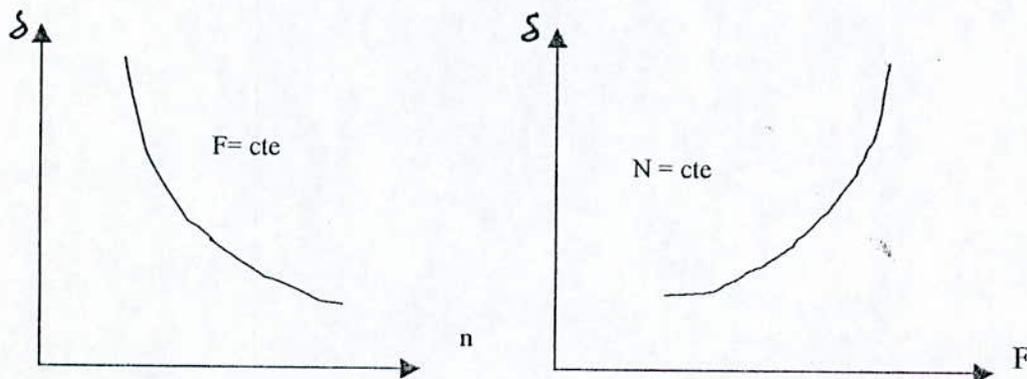
**Fig.I.9 : Couple de friction à l'équilibre en fonction de la force axiale et de la vitesse de rotation**

### I-1-7-3 Influence sur la consommation de métal

La consommation matière totale est plus importante pour les faibles vitesses de rotation. Cette influence relativement marquée est essentiellement due à la consommation matière propre à la phase de friction. Cette évolution est consécutive à l'augmentation du coefficient de friction avec la diminution de la vitesse linéaire moyenne. De même, la consommation matière est plus grande lorsque la pression des différentes phases (accostage, friction, forgeage) augmente. Ce résultat est du à la fois à l'évolution du gradient thermique dans la zone affectée thermiquement et à un écoulement plastique plus important sous l'application d'une contrainte plus élevée.

Il est possible de visualiser l'écoulement du métal à l'interface des pièces en examinant les traces des inserts placés dans une des pièces à souder, on constate que :

- Le matériau s'écoule radialement ;
- La consommation du métal diminue lorsque la vitesse augmente à force constante ;
- La déformation croit lorsque la force axiale ou le temps de friction augmentent, à une vitesse constante  $n = \text{cte}$ .



**Fig.I.10 :Variation de la consommation du métal en fonction des paramètres de soudage**

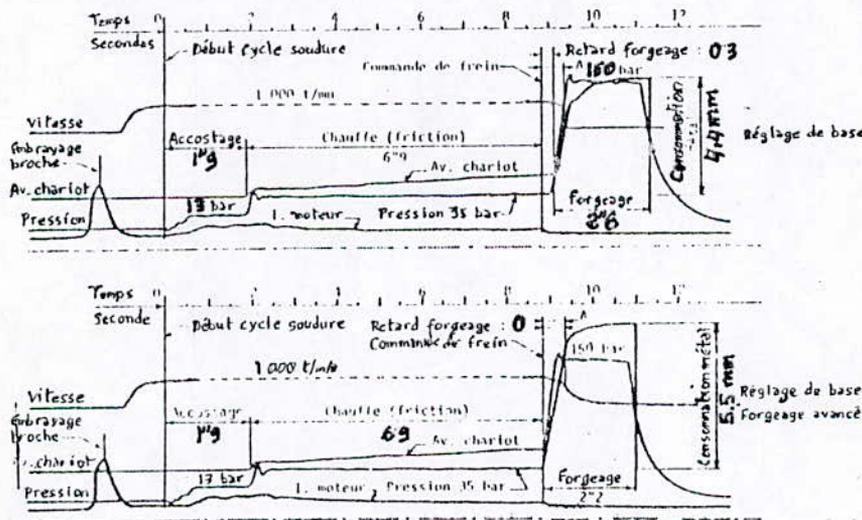
**I-1-7-4 Influence du temps entre l'arrêt de rotation et le moment de forgeage(tr) :**

L'influence du temps entre l'arrêt de rotation et le moment de forgeage à une importance considérable. Ce temps constitue un moment optimum du cycle de soudage ou la température de l'interface atteint celle nécessaire pour le forgeage. Il est un compromis entre le refroidissement de l'interface et la condition de forgeage.

Si le temps (tr) est très court, la température de l'interface peut être importante et la consommation de métal élevée ; Ainsi par exemple sur un cycle total de 12 secondes la consommation du métal peut être de 1.2mm en choisissant convenablement ce temps (fig.I.10)

Si le temps (tr) est long, la température de l'interface risque de chuter à une valeur incompatible avec un bon forgeage.

Donc il est très important de Régler de ce temps avec une grande précision sur nos machines, et cela d'une façon indépendante du cycle.



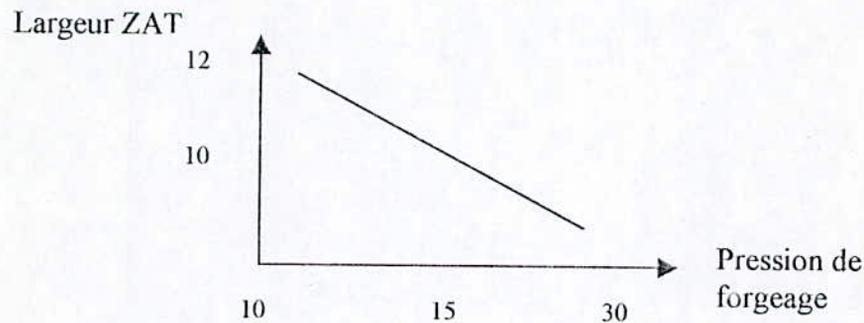
**FIG.I.11 :Variation de la consommation du métal en fonction du temps (tr)**

Finalement pour obtenir une structure fine des grains on augmente la force axiale.

- La largeur de la ZAT croit lorsque le temps de friction augmente ;
- Cette largeur décroît lorsque la force axiale augmente ;
- La limite de séparation des bourrelets devient plus profonde quand le temps le temps d'arrêt de la broche décroît. Ceci montre l'influence du temps d'arrêt de la broche sur la morphologie des bourrelets.

### I-1-7-5 Influence sur la zone affectée thermiquement (ZAT)

Quels que soient les paramètres de soudage, les liaisons présentent la même évolution structurale caractéristique du traitement thermomécanique subi localement par le matériau. Seule la largeur de la zone affectée thermiquement varie en fonction des paramètres de soudage. Elle diminue lorsque la pression de friction et de forgeage augmentent et lorsque le temps de friction diminue.



**Fg I.12 : Evolution de la largeur de la zone affectée thermiquement en fonction de la pression de forgeage**

La structure au niveau de l'interface de la soudure, on trouve généralement pour les aciers une structure en fines aiguilles, du type bainitique revenu.

La structure dans la ZAT hors de l'interface on trouve généralement une structure hétérogène, essentiellement du type bainito- martensitique revenu avec des bandes de ferrite.

#### I.1.7 Contrôle du procédé de soudage par friction

Le contrôle du procédé de soudage par friction basé sur deux critères :

L'une concernant l'étude théorique du processus de soudage par friction pour une meilleure compréhension des phénomènes thermo- mécaniques associés ; le but étant de mettre en évidence les facteurs qui interviennent dans la production de la chaleur, la répartition des températures et l'écoulement du métal plastique au cours de soudage.

L'autre concernant l'étude technologique et l'analyse pratique des résultats pour la mise en évidence des paramètres les plus importants à contrôler. Cela est réalisé à l'aide d'un ordinateur qui contrôle la séquence de la machine et enregistre les paramètres les plus

intéressants, pour une évaluation quantitative de leur incidence sur les qualités définitives du joint.

### I-1-8 APPLICATIONS

Le soudage par friction est utilisé pour des diamètres de pièces allant de 5 mm à plus de 50 mm. La température de soudage qui est relativement basse dans des joints d'excellente qualité avec de nombreux métaux. En général, une pièce est maintenue fixe alors que l'autre est mise en rotation. Il est cependant possible d'utiliser une pièce intercalaire mise en rotation entre deux pièces fixes, si bien qu'on fait deux soudures en une opération.

Cela permet de souder des pièces longues ou peu maniables sans les mettre en rotation. La rotation simultanée et opposée des deux pièces est possible dans le cas des petits diamètres, mais pour ces tailles il existe d'autres procédés de soudage mieux adaptés.

La majorité des applications se situe dans le domaine de production mécanique. Dans l'industrie automobile on a :

- pièces primaires de forge ;
- transmission (cardan, arbres) ;
- tiges de soupapes ;
- arbres de compresseur ou de pompe ;
- embouts de cylindres et des tubulures ;

Dans l'industrie électrique pour des liaisons composites de métaux dissemblables, par exemple les cosses électriques (Cu - Al )

Dans l'industrie aéronautique on peut citer les axes de turbines et les compresseurs hauts pression pour réacteur aéronautique [5, 6, 8 ].

## I.2 Généralités sur les aciers et les principaux traitements thermiques

### I.2.1 Généralités sur les aciers

#### A- les aciers de construction faiblement alliés

Les aciers à faible teneur en carbone et en éléments d'alliage s'emploient essentiellement pour des constructions métalliques soudées et rivées, la construction navale, la fabrication des wagons, des pipe lines de pétrole et de gaz, etc. Après avoir subi le laminage, ces aciers ont des caractéristiques mécaniques nettement supérieures à celles des aciers au carbone. Ils ont de plus une bonne soudabilité et certains d'entre eux ont une tenue plus élevée à la corrosion atmosphérique.

Les éléments d'alliages, en se dissolvant dans la ferrite, affinent le grain et, en augmentant l'aptitude de l'austénite à la surfusion, contribuent à l'affinage de la phase de carbure. La charge à la rupture et la limite d'élasticité se trouvent ainsi accrues, la plasticité et la ductilité étant suffisantes.

Le meilleur ensemble des caractéristiques mécaniques s'obtient en réalisant une addition simultanée de plusieurs éléments d'alliage.

Les aciers faiblement alliés sont livrés assez souvent après normalisation ou après normalisation et revenu à haute température. La normalisation augmente la charge de rupture et la limite d'élasticité et, en affinant le grain, améliore la plasticité et la ductilité en diminuant par là la susceptibilité à la rupture fragile[11].

#### A.1- Caractéristiques mécaniques minimales de l'acier 42CD4

	Re <sub>0.2</sub>	Rm	A <sub>5d</sub>	Dureté HB	K <sub>cu</sub>	δ <sub>D</sub>
Recuit 850 C°	50	77	15	220	/	35
TH840C° Revenu 200 C°	150	190	4	500	2	65
T.H 840 Revenu 550 C°	100	115	9	350	4	52

Re<sub>0.2</sub> : limite élastique conventionnelle à 0.2 en da N/ mm<sup>2</sup> ;

R<sub>m</sub> : résistance à la rupture en da N/ mm<sup>2</sup> ;

A<sub>5d</sub> : Allongement à la rupture pour des éprouvettes rondes ayant une longueur initiale entre repères L<sub>0</sub> liée au diamètre de la partie calibrée par la relation L<sub>0</sub> = 5d ;

K<sub>CU</sub> : résilience en daJ/ cm<sup>2</sup> pour une éprouvette entaillé en U ;

## A.2-Influence des éléments d'additions

### Influence du chrome :

Le chrome est un élément alphagène et carburigène, il rétrécit le domaine austénitique. Jusqu'à 7 à 8 % de Cr, le point A<sub>3</sub> est abaissé puis il est relevé pour des taux supérieurs, mais l'abaissement du point A<sub>4</sub> étant rapide ceci engendre la réduction du domaine de stabilité de l'austénite. Pour des concentrations en Cr < 5% le seul carbure qui précipite est la cémentite alliée (Fe Cr)<sub>3</sub>C. Le pouvoir carburigène du Cr est supérieur à celui du manganèse avec un coefficient de partage moyen entre la cémentite et la ferrite. L'action du chrome sur les conditions de la transformation perlitique est identique à celle de silicium mais de façon moins marquée. Par son effet alphagène, le relèvement du point A<sub>3</sub> à un effet nuisible sur la résilience de la ferrite[11].

### Influence du molybdène

Comme le chrome, le molybdène est à la fois alphagène et carburigène. Il rétrécit le domaine austénitique. Son pouvoir carburigène est élevé supérieur à ceux du manganèse et du chrome. Le seul carbure stable au-dessous de 700 C° pour un taux en Mo inférieur à 1 % est la cémentite alliée (Fe, Mo)<sub>3</sub>C. Le coefficient de partage X/X c.e.m est moyen. L'action sur les conditions de la transformation perlitique est semblable à celle du chrome mais avec une intensité plus importante.

## B- Les aciers au carbone

### B.1- Définition

On appelle aciers au carbone les alliages fer- carbone qui contiennent jusqu'à 2 %C. Leurs propriétés sont déterminées essentiellement par la teneur en carbone.

Les aciers au carbone hypoeutectoides s'emploient dans plusieurs cas sous forme de laminés et de pièces forgées sans traitement thermique spécial. Lorsqu'il faut obtenir des propriétés mécaniques élevées, ces aciers subissent un traitement thermique ou thermo- chimique.

Les aciers eutectoides et hypereutectoides utilisés pour la fabrication des outils de coupe, des matrices et des instruments de mesure sont soumis généralement à un traitement thermique.

### B.2- Propriétés des aciers au carbone

Les propriétés des aciers au carbone varient avec la teneur en carbone.

Ils se travaillent bien à l'outil, sont très malléables à chaud et résistent bien aux efforts de traction, compression, et cisaillement.

La dureté et la résistance à la traction augmentent avec le pourcentage de carbone ;

La résistance aux chocs et la malléabilité (pourcentage d'allongement) diminuent quand la teneur en carbone augmente[9].

### B.3 Caractéristique mécaniques de la nuance XC48

Nuance	Traitement de référence en degrés Celsius			Caractéristiques mécaniques			
	normalisé	Trempe E : eau H : huile	revenu	E Kgf/m	R Kgf/ mm <sup>2</sup>	A 5d	KCU à 20 C° Kgf/mm
XC48	840				68		
	870	/	/	38	78	17	/
	/	H 830	550	65	83 98	10	3

### Applications des aciers XC 48

La nuance XC48 peut être choisie pour l'exécution de pièces qui doivent supporter des contraintes extérieures sévères en service, et qui, en particulier, travaillent « en fatigue ». La limite élastique en traction peut atteindre 65 daN/mm<sup>2</sup> lorsqu'on le trempe à l'huile et revenu à 550 C°[9].

*a revoir*

### Influence des éléments C, Mn, Si, Cr et Mo sur les propriétés mécaniques des aciers

Les effets des éléments C, Mn, Si, Cr et Mo sur les propriétés mécaniques des aciers sont relatés dans le tableau suivant :

Propriétés	C	Cr	Mo	Mn	Si	Effet cumulatif
Charge de rupture	++	++	++	++	+	C, Cr, Mo, Mn, Si
dureté	++	++	++	++	+	C, Cr, Mo, Mn, Si
ductilité	-	+	+	+		Cr, Mo, Mn
Résistance à la chaleur et la corrosion		++	+	-	-	Mo, Cr
Soudabilité	-		+	+	-	Mo, Mn
usinage	-	-		-	-	
élasticité	+	+	+	+	++	C, Cr, Mo, Mn, Si
résilience	-	+	+	+		Cr, Mo, Mn
magnétisme		+			-	Cr
Forgeabilité			+	+		Mo, Mn

**Tableau I-3 : Influence des éléments C, Mn, Si, Cr et Mo sur les propriétés mécaniques des aciers[9].**

## I.2.2- Les traitements thermiques

### I.2.2.1 Introduction

Sous le terme de traitement thermique on entend la modification de la structure, et donc les propriétés de l'alliage, obtenue par chauffage jusqu'à une température définie et par un maintien à cette température suivi d'un refroidissement à vitesse imposée.

Il existe plusieurs types de traitements thermiques (recuit, trempe et revenu) qui modifient d'une manière variée la structure et les propriétés de l'acier et qui sont imposés en fonction des prescriptions auxquelles doivent satisfaire les ébauches (pièces coulées, forgées, laminées, etc.) et les produits finis[11].

Ce n'est qu'à l'aide d'un traitement thermique qu'on peut conférer à un acier des caractéristiques mécaniques élevées susceptibles d'assurer le fonctionnement normal des éléments de machines et des outils actuels.

### **I.2.2.2 Recuit de l'acier**

Le recuit consiste à chauffer un acier au dessus des températures de transformation de phases et en suite à le refroidir lentement.

Un refroidissement lent amène l'acier en un état proche de l'équilibre de phases et de structure. Ce traitement thermique permet d'obtenir les structures suivantes : Ferrite + perlite pour les aciers hypoeutectoides, perlite pour l'acier eutectoïde et cémentite + perlite pour les aciers hypereutectoides. La dureté et la résistance d'un acier recuit sont faibles.

La recristallisation de phases produite par le recuit rend le grain plus fin et élimine la structure de Widmanstaatten

Le recuit industriel est dans la plupart des cas une opération préparatoire du traitement thermique appliqué aux pièces coulées, forgées et laminées.

En diminuant la résistance et la dureté, le recuit améliore l'usinabilité.

Un grain plus fin, des contraintes internes atténuées et une meilleure homogénéité structurale résultant du recuit contribuent à l'amélioration de la plasticité et de la ductilité par rapport à celles obtenues par coulée, forgeage ou laminage.

C'est pourquoi le recuit s'emploie pour de nombreuses pièces coulées de grosses dimensions en tant que traitement terminal[11].

### **I.2.2.3 Trempe de l'acier**

On appelle trempe un chauffage à la température de 30 à 50 C° supérieure à celle de Ac3 (pour des aciers hypoeutectoides) ou de Ac3 (pour les aciers hypereutectoides), le maintien à cette température jusqu'à l'achèvement des transformations de phases et le refroidissement à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe (pour les aciers au carbone le plus souvent dans l'eau, pour les aciers alliés dans l'huile ou dans un bain de trempe d'une autre nature).

La trempe n'est pas un traitement thermique définitif. Pour diminuer la fragilité et les contraintes qu'elle produit et obtenir des propriétés mécaniques imposées, l'acier après trempe subit le revenu.

Le but de la trempe et du revenu appliqués à un acier à outils, est surtout d'augmenter la dureté, la tenue à l'usure, la résistance. Dans le cas d'un acier de construction, c'est d'augmenter

la résistance ( $R$ ,  $R_{0.002}$ ), la dureté (HB) et d'obtenir une plasticité (A, Z) et une résistance (K) élevées, ainsi qu'une forte tenue à l'usure pour certaines pièces.

### Choix de la température

La température de trempe est fonction de la composition chimique de l'acier et en premier lieu, de sa teneur en carbone.

Les aciers hypoeutectoides doivent être chauffés de 30 à 50 °C au-dessus de  $A_{c3}$  (FIG)

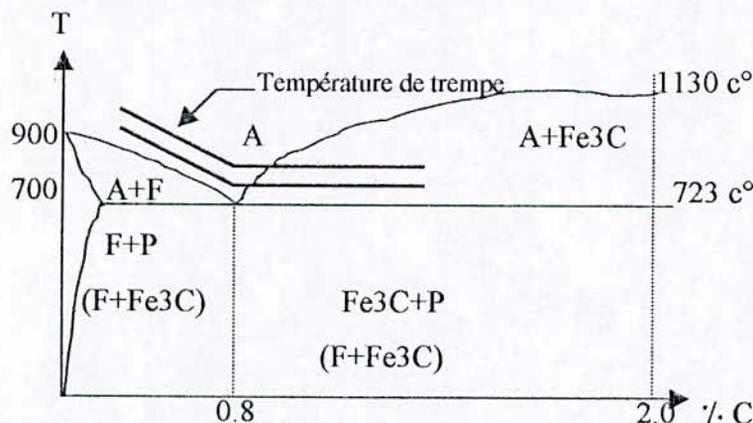


FIG.13 : Une partie du diagramme d'équilibre Fer- Cémentite

Un acier à structure initiale perlite + ferrite comporte alors une structure austénitique qui se transforme en martensite lorsqu'on refroidit à une vitesse plus grande que la vitesse critique de la trempe.

Un acier hypoeutectoïde chauffé au-dessus de  $A_{c1}$  mais au-dessous de  $A_{c3}$  (c'est-à-dire dans l'intervalle  $A_{c1}$ -  $A_{c3}$ ) garde après trempe, en plus de la martensite, les plages de ferrite qui n'ont pas subi au chauffage de transformation austénitique. La présence de ferrite diminue la dureté de l'acier après trempe et ses propriétés mécaniques après revenu. Aussi ce mode de trempe incomplète ne s'emploie-t-il pas généralement pour les aciers hypoeutectoides.

Le chauffage de l'acier bien au-dessus de  $A_{c3}$  provoque le grossissement du grain d'austénite qui, au refroidissement, aboutit à l'apparition de la martensite aciculaire à gros grains et à la dégradation de la ductilité.

#### I.2.2.4 Revenu de l'acier

On appelle revenu le chauffage de l'acier trempé à une température inférieure à  $A_{c1}$ , le maintien à cette température puis un refroidissement.

Le revenu est une opération finale de traitement thermique. Son but est l'obtention des propriétés mécaniques requises.

De plus, il supprime complètement ou partiellement les contraintes internes dues à la trempe. Cette suppression des contraintes est d'autant plus complète que la température de revenu est plus élevée.

L'affaiblissement des contraintes est le plus intense lorsque le maintien atteint 15 à 30 mn. Les contraintes décroissent jusqu'à une valeur minimale susceptible d'être obtenue par le revenu à la température considérée.

La vitesse de refroidissement après revenu exerce également une action importante sur la valeur des contraintes résiduelles. Plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles. Un refroidissement rapide dans l'eau à partir de 600 C° produit des contraintes thermiques nouvelles. Le refroidissement à l'air engendre à la surface, des contraintes de compression 7 fois inférieures et le refroidissement dans l'huile 2.5 fois inférieures à celles produites par l'eau.

Le revenu à basse température s'effectue avec un chauffage à 150 ou 250 C°. Ce revenu diminue les contraintes internes, transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Il augmente la résistance et améliore quelque peu la ductilité sans altérer sensiblement la dureté. Après revenu à basse température, un acier trempé garde une dureté comprise entre 58 et 62 HRC, et donc une tenue à l'usure élevée. Pourtant, dans le cas d'un cœur non ductile la pièce ne supporte pas de charges dynamiques.

Le revenu à température intermédiaire se fait entre 350 et 500 C° et s'emploie pour des ressorts de types variés. Il permet d'obtenir une limite d'élasticité maximale et élevé quelque peu la ductilité. La structure assurée par ce traitement est la troosite de revenu dont la dureté varie de 40 à 50 HRC. La température de revenu doit être choisie de façon qu'elle ne provoque pas de fragilité de revenu irréversible.

Le revenu à haute température se fait entre 550 et 650 C°. Il donne à l'acier la structure de sorbite de revenu. Le revenu à haute température supprime presque complètement les contraintes internes et accroît nettement la résilience.

Le tableau I-1 résumant le mode opératoire des traitements thermiques appliqués aux alliages ferreux et les modifications des caractéristiques mécaniques[11].

Principaux traitements thermiques		
Nom	Mode opératoire	Modification des caractéristiques
trempe	Chauffer la pièce à une température T de trempe. Puis refroidir rapidement, par immersion dans un fluide : air, eau , gaz. La température T est supérieure à la température Ac3 du point de transformation.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance (Re) &gt;</li> <li>- Dureté H &gt;</li> <li>- Allongement A / &lt;</li> <li>- Résilience K &lt;</li> </ul>
Revenu Ne s'applique qu'aux aciers trempés	Chauffer la pièce à une température T plus faible que la température de trempe, et la laisser refroidir lentement de préférence.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Re &lt;</li> <li>- H &lt;</li> <li>- A / &gt;</li> <li>- K &gt;</li> </ul>
Recuit	Chauffer le métal à une température T1 supérieure ou au moins égale à la température de trempe. Refroidissement dans le four.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Re &lt;      H &lt;</li> <li>- A / &gt;      K &gt;</li> </ul> <p>Le recuit supprime :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les effets de la trempe</li> <li>- L'écrouissage</li> <li>- Les tensions internes</li> </ul>

**Tableau I-4 : Principaux traitements thermiques et leurs mode opératoire[10].**

*Chapitre II*

*Partie Expérimentale*

## CHAPITRE II- PARTIE EXPERIMENTALE

### II-1 Identification de métal de base :

#### II-1-1 Choix du métal de base

- Sa bonne soudabilité ;
- Sa disponibilité sur le marché.

#### II-1-2 Caractéristiques et emplois des deux nuances

**XC48** : Aciers non alliés à trempabilité limitée, pièces de faible et moyenne section modérément sollicitée : Bielles, arbres, boulonnerie traitée .

**42CD4** : Pièces de section moyenne et forte : gros arbres, vilebrequins, bielles très sollicitées .

#### II-1-3 La composition chimique selon la norme AFN

	%C	%MO	%Cr	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni
<b>XC48</b>	0.45			0.5	0.1			
	- 0.51	/	/	- 0.8	- 0.4	0.035	0.035	/
<b>42CD4</b>	0.39	0.15	0.9	0.6	0.1			
	- 0.45	- 0.25	- 1.2	- 0.9	- 0.4	0.035	0.035	/

### II-2 Conception du dispositif de soudage

Comme le soudage par friction est méconnu au niveau de nos ateliers de fabrication , et dans le cas de notre étude , nous avons mis en œuvre un dispositif pour soudage de pièces cylindriques (diamètres =14 mm). Pour cela nous avons adopté un tour parallèle (Type RAMO – T37) .

### II-2-1 Caractéristiques du tour parallèle RAMO- T37

Ce tour est caractérisé par :

- Puissance maximale : 7ch ;
- Moteur asynchrone triphasé de 220/ 380 v ;
- Gammes des vitesses : 18 vitesses allant de 40 à 2000 tr/ mn ;
- Hauteur : 1125 mm;
- Largeur : 740 mm ;
- Longueur : 1680 mm;
- Poids : 1140 kg

### II-2-2 Unité hydraulique

Elle comprend :

- Une pompe : élément indépendant , simple et robuste fournissent la pression hydraulique nécessaire .
- Un tuyau souple transmettant l'huile sous pression de la pompe au vérin. Sa grande flexibilité lui permet de s'adapter avec tous les montages.

Un vérin caractérisé par :

- force maximale 10.1 KN;
- course 260 mm;
- diamètre tige - piston 38.1mm;
- Diamètre extérieur du vérin 57mm.
- Poids net 5.7Kg.

On a utilisé un raccord à branchement rapide pour la liaison des éléments de l'unité hydraulique.

### II-2-3 Montage spécifique

Il comporte :

- Une équerre inférieure reposant sur le bâti du tour; elle coulisse transversalement sur une course de 155 mm et se fixe à l'aide d'une bride (Annexe1,5).
- Une équerre supérieure liée perpendiculairement à l'équerre inférieure grâce à deux nervures . (Annexe 2,6) ; elle comporte un ensemble de pièces assemblées par des liaisons démontables (Vis CHC) citées ci-dessous :
- Un porte douille (Annexe 3) ;
- Une douille (Annexe 4) ;

- Une bague d'arrêt (Annexe 7) [12] .

## **II-2-4 Instrument de mesure**

A fin de mettre en évidence les paramètres de cette adaptation , un capteur force **type 8200** de **BRUEL** et **KJEAR instruments** a été utilisé pour la mesure des différentes forces exercées en compression durant les phases du cycle de soudage .

Il est le premier maillon de la chaîne de mesure du signal électrique étalonné, au préalable , a fin d'avoir une concordance entre les valeurs mesurés et celles effectives .

### **II-2-4-1 Caractéristiques du capteur force**

Le capteur force permet la mesure des forces dynamiques , statiques de courte durée , et les forces d'impact ; il est caractérisé par :

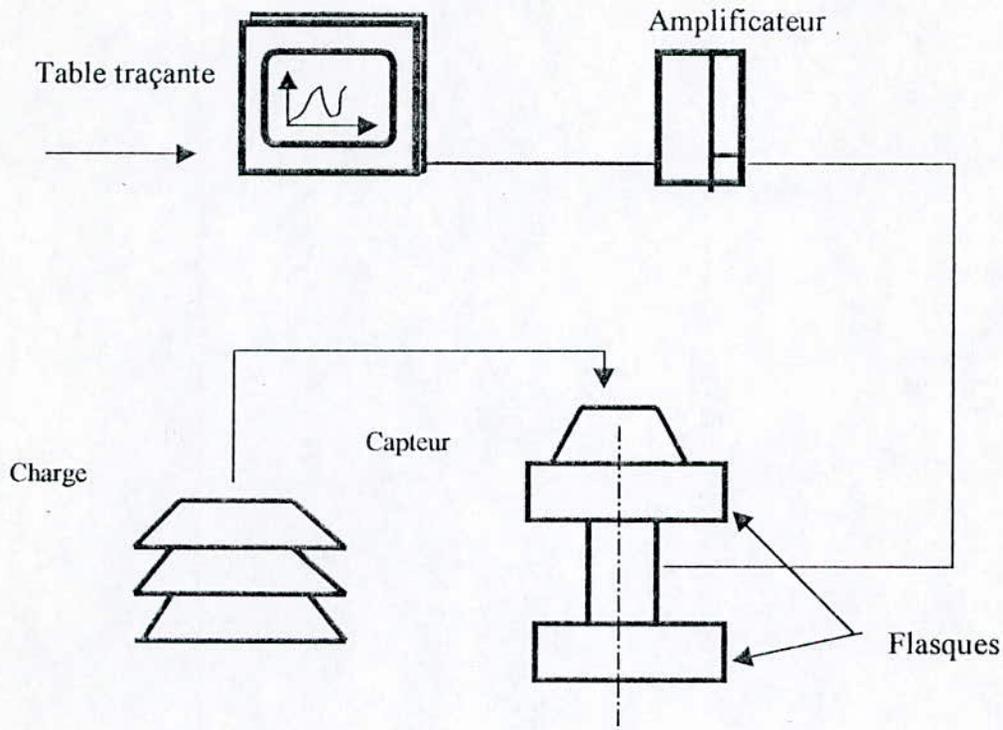
- Un effort maximal exercé dans les deux cas , traction et compression respectivement 1000 N, 5000N ;
- Une déformation de 1\100 mm pour une force égale à l'effort maximal ;
- Son poids est de 21 grammes pour une épaisseur de 13mm.

### **II-2-4-2 Compléments de la chaîne de mesure**

- Un amplificateur de charge type 2651 alimenté par un générateur de tension , permettent la conversion de la charge électrique engendrée par le capteur force en une tension proportionnelle .
- Une table traçante afin d'enregistrer les forces mesurées . Elle à pour avantage de visualiser les différentes phases du cycle et éventuellement de déterminer le temps nécessaire à l'achèvement du cycle de soudage [12]

### II-2-4-3 Etalonnage du capteur force

L'opération d'étalonnage débute par l'emplacement du matériel selon le schéma suivant :



Une fois tous les maillons de la chaîne sont connectés entre eux, on procédera à l'étalonnage en exerçant différentes charges centrées sur le flasque supérieur, et en respectant la limite de charge imposée par le constructeur [2].

#### Résultats d'étalonnage

Pour une fréquence de 0.003 HZ réglée à partir de l'amplificateur, la valeur de l'effort correspondant à un signal de 0.1 mv est de 1.525 N.

### II-3 Géométrie des éprouvettes

#### II-3-1 Choix des diamètres

Le diamètre des pièces est choisi selon la gamme des pinces utilisées pour la fixation. Nous avons choisi un diamètre de 14 mm pour la nuance 42CD4 et le même diamètre pour la nuance XC48.

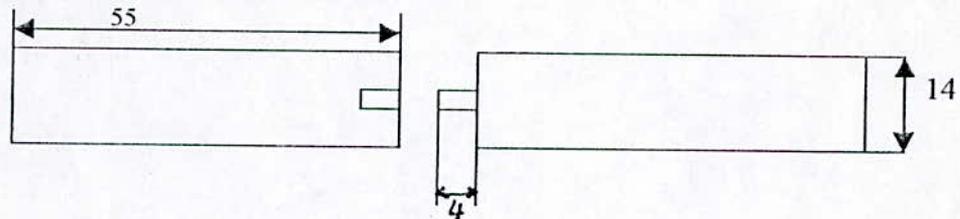
#### II-3-2 Préparation des pièces élémentaires

Nous avons usiné pour chaque nuance des pièces cylindriques ayant une forme permettant d'assurer une coaxialité entre la pièce fixe et celle tournante.

Avant soudage , toutes les pièces ont été exemptées des produits gras ( graisses, huiles ..... etc.) et des bavures d'usinage .

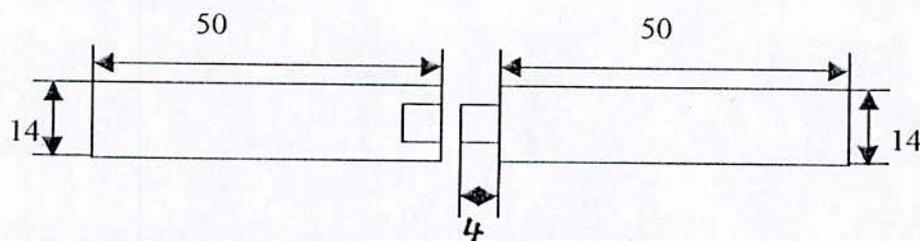
On a fait l'usinage sur la machine tour on a obtenu les pièces suivantes :

**Pour l'essai de traction :**



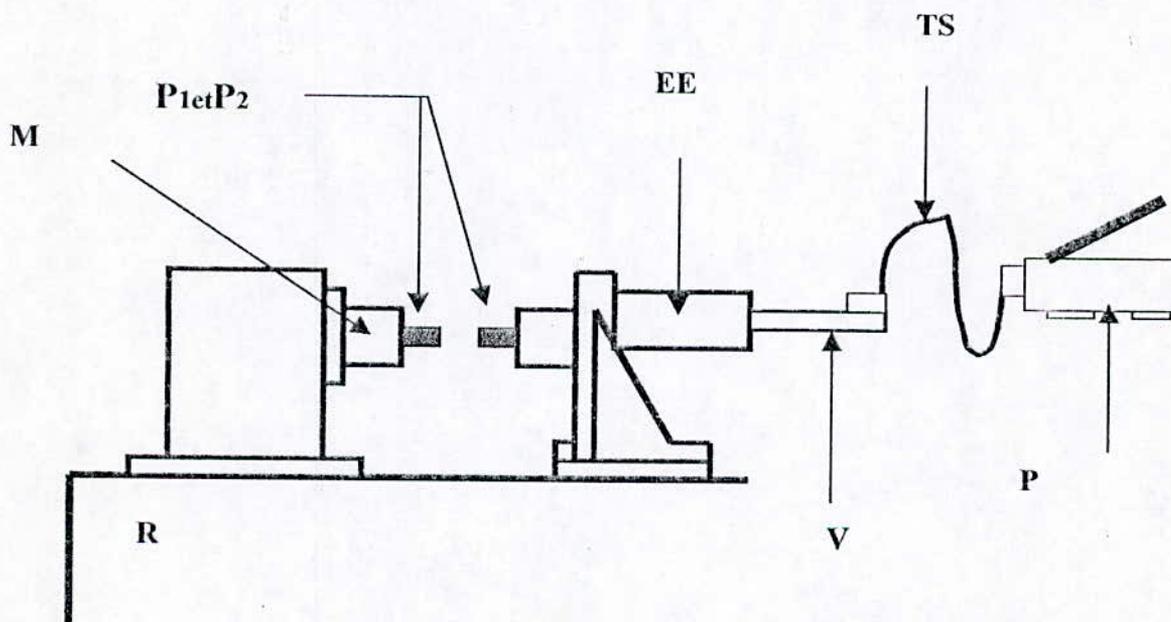
**FIGII.2 :Eprouvette de traction avant soudage**

**Pour l'essai de résilience**



**FIGII.3 :Eprouvette de résilience avant soudage**

Après la réalisation des épreuves de traction et de résilience on commence l'opération de soudage sur la machine tour suivante :



EE : ensemble de l'équerre

P1 : pièce mandrin

P2 : pièce fixe

M : mandrin

R : tour parallèle

P : pompe

V : vérin

TS : tuyau souple

**Schéma du banc de soudage [12].**

## II.4 Soudage des deux nuances d'aciers

### II.4.1 Soudage de la nuance 42CD4

Cette nuance ferritique se caractérise par la teneur en carbone 0.42% et la présence des éléments d'additions alphas et gamma tels que le chrome et le molybdène.

Pour cette nuance «42CD4 » nous avons choisi une vitesse de rotation égale à 800 tr /mn . Les efforts nominaux appliqués pour cette vitesse de rotation sont successivement :

- Effort d'accostage 94N ;
- Effort de friction 129N ;
- Effort de forgeage 512N.

### II.4.2 Soudage de la nuance XC48

Le XC48 est un acier non allié, se caractérise par la forte teneur en carbone.

Pour cette nuance nous avons choisi une vitesse de rotation égale à 1000 tr / mn.

Les efforts appliqués pour cette vitesse de rotation sont successivement :

- Effort d'accostage 50N ;
- Effort de friction 105N ;
- Effort de forgeage 328 N.

Après L'opération de soudage on supprime le bourrelet formé sur la même machine de tour.

## II.5 ESSAIS MECANIKUES

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristiques des métaux et alliages.

- Résistance du métal au choc : essai de résilience
- La plasticité et l'élasticité : essai de traction
- La résistance aux efforts de pénétration : essai de dureté

### II.5.1 Mesure de dureté Rockwell sur l'éprouvette 42CD4 soudée et non soudée

#### II.5.1.1 Principe

La dureté est la faculté de résistance qu'offre un corps à sa pénétration par un autre corps

Elle est caractérisée par un nombre qui dépend du genre d'essai exécuté

#### II.5.1.2. Conditions d'essais

- L'essai est effectué à température ambiante ;

- La charge appliquée sans choc ;
- On a préparé la surface pour éviter toute altération ;
- La pièce est posée sur un support rigide.

### II.5.2 Mesure de micro- dureté $H_v = F(d)$ de la nuance 42CD4 soudée

Ces essais correspondent à des charges inférieures à 1.96 N. Le pénétrateur est de type VICKERS. La mesure de la dimension de l'empreinte est réalisée à l'aide d'un microscope (x 100).

L'établissement du profil de la micro dureté a pour but de confirmer et de compléter l'examen micrographique, le profil de la taille moyenne des grains.

#### II.5.2.1 Conditions d'essais

##### A- Polissage

Nous avons procédé à un polissage des échantillons avec du papier abrasif de granulométrie croissante 800 – 1000 – 1200.

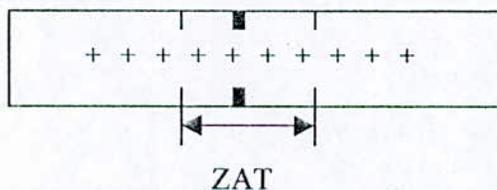
##### B- Attaque chimique

Une attaque chimique au nital (5 %) suivie d'un rinçage à l'eau distillée.

La charge appliquée pour cet essai est de 300g.

#### II.5.2.2 Mode opératoire

Un balayage de la micro dureté en allant de métal de base jusqu'à la ZAT comme indiqué sur la figure ci- dessous :



#### II.5.2.3 Réalisation d'essai

Les essais de micro- dureté ont été réalisés au laboratoire de génie des matériaux de l'EMP

### II.5.3 Essai de traction

#### II.5.3.1 Principe

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction et généralement jusqu'à rupture, pour déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques. On impose en général une déformation croissante à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de  $L_0$  et on mesure simultanément l'effort  $F$  et l'allongement  $L-L_0$

### II.5.3.2 Usinages des éprouvettes selon la norme N.F.A

Les éprouvettes sont usinées en utilisant des moyens mécaniques appropriés en prenant les précautions nécessaires pour éviter l'écrouissage ou un échauffement excessif du matériau, les dimensions des éprouvettes fixées par la norme N.F.A sont schématisées par la FIG II.5

Les éprouvettes sont usinées de telle façon que l'axe de la soudure demeure à mi-longueur de la partie calibrée de l'éprouvette.

Après l'usinage des éprouvettes, un traitement thermique a été effectué sur l'une des éprouvettes de la nuance 42CD4.

- Chauffage à 850°C+ refroidissement à l'huile ;
- Revenu à 750°C+ refroidissement à l'air.

Les autres éprouvettes n'ont subi aucun traitement thermique.

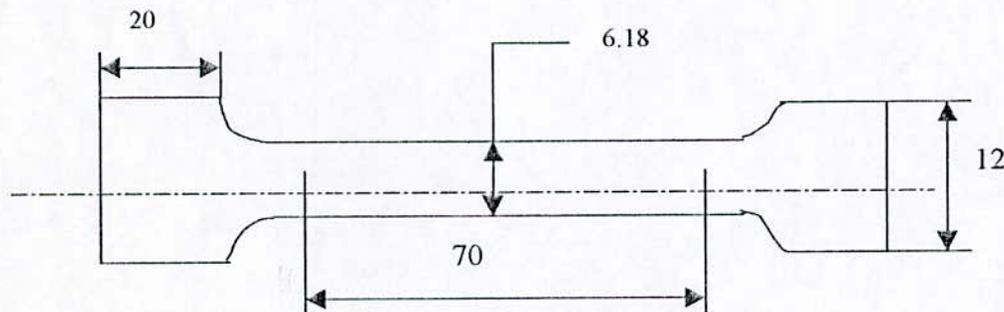


FIG. II.5: éprouvette de traction selon la norme NFA

### II.5.3.3 Condition d'exécution de l'essai

La charge devra être appliquée à l'éprouvette progressivement et de façon continue dans la direction perpendiculaire à l'axe de la soudure jusqu'à la rupture.

### II.5.3.4 Réalisation des essais de traction

Les essais de traction ont été réalisés au laboratoire de génie matériaux de EMP avec une machine de traction liée à une table traçante, la puissance utilisée est de 40 N/mm<sup>2</sup>.

## II.5.4 Essai de résilience

### II.5.4.1 Exécution de l'essai

- Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie de départ  $W_0 = 300$  joules.
- On libère le couteau, dans sa chute, en passant à la verticale, il brise l'éprouvette.
- On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée  $W_1$ .

- On calcule la différence  $W_0 - W_1 = W$  (énergie absorbée)

### II.5.4.2 Usinage des éprouvettes

#### Remarque :

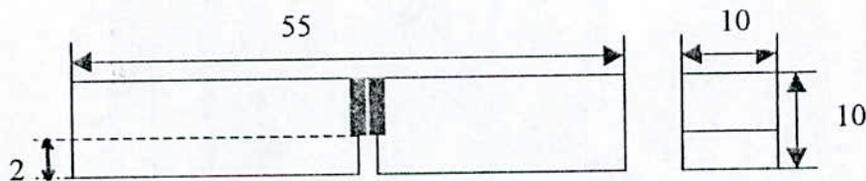
Pour la nuance 42CD4 on a fait un recuit de  $750^{\circ}\text{C}$  pendant 8 heures à cause de difficulté d'usinage des éprouvettes Charpy U.

Les éprouvettes sont usinées de telle manière que l'axe de la soudure demeure à mi-longueur de l'éprouvette. Après l'usinage aucun traitement thermique n'est appliqué aux éprouvettes.

### II.5.4.3 Types d'éprouvettes

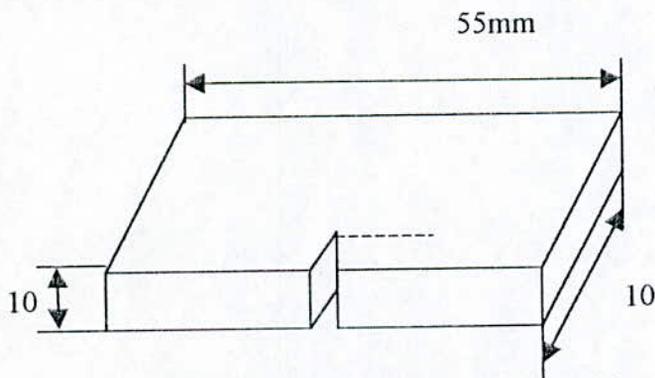
Les éprouvettes soudées sont usinées à 55mm de longueur et une section carrée de 10mm de côté. Elle présentent, au milieu de leur longueur, une entaille en U de 5mm de profondeur, avec un rayon à fond d'entaille de 1mm.

Le plan de symétrie de l'entaille est perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'éprouvette.



**FIGII.6 : Eprouvette de résilience soudée selon la norme N.F.A03.156**

Les éprouvettes non soudées utilisées dans cette expérience sont entaillées en V selon la norme N.F.A 03.161.



**FIGII.7 éprouvette de résilience selon la norme N.F.A 03.161**

### II.5.4.4 Réalisation des essais de résilience

Les essais de résilience ont été réalisés dans le laboratoire de génie des matériaux à l'EMP

## *Chapitre III*

### *Résultats et Interprétations*

## CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### III.1 Résultats

Dans ce chapitre on a présenté les résultats des essais mécaniques (dureté, micro-dureté, résilience et traction).

#### III.1.1 Résultats d'essais de dureté rockwell

Les essais de dureté effectués au laboratoire de génie des matériaux à l'EMP. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous pour la nuance d'acier 42CD4 soudée.

**TABLEAU III.1** : Résultats de la dureté rockwell.

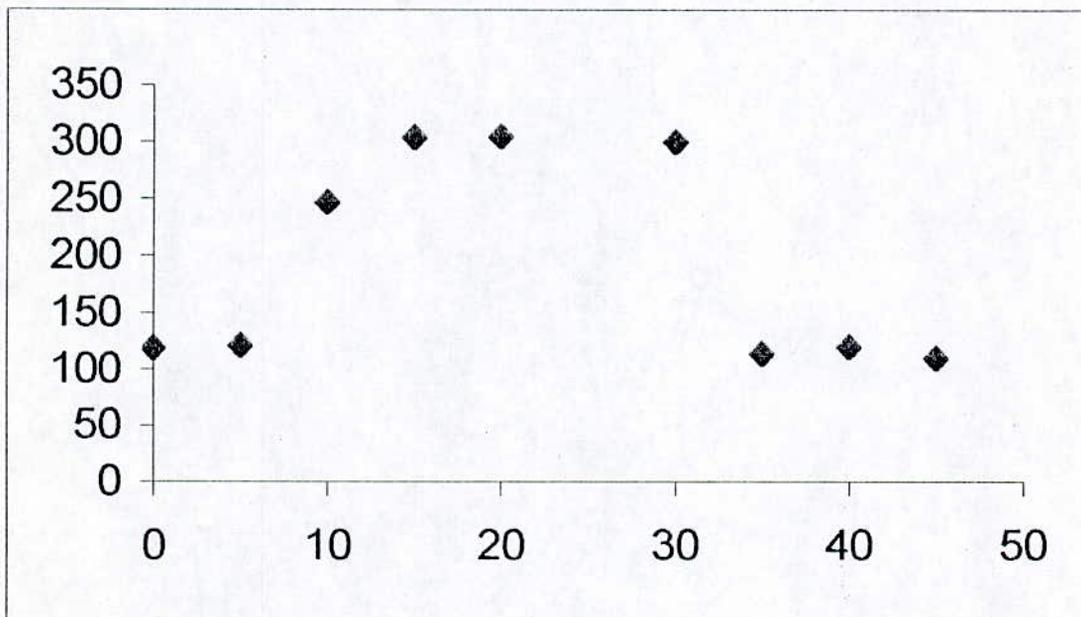
Matière	Livraison (recuit)			Soudé par friction		
	HRC	Vickers HV	Résistance à la traction	HRC	Vickers HV	Résistance a la traction
42CD4	43	430	144 Kg\mm <sup>2</sup>	40	390	132Kg\mm <sup>2</sup>

#### III.1.2 Résultats d'essais de micro- dureté

Les essais de micro dureté ont été effectués au laboratoire de génie des matériaux à l'EMP. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau ci-dessous. La charge appliquée est de 300g au niveau de substrat et de la zone affectée thermiquement.

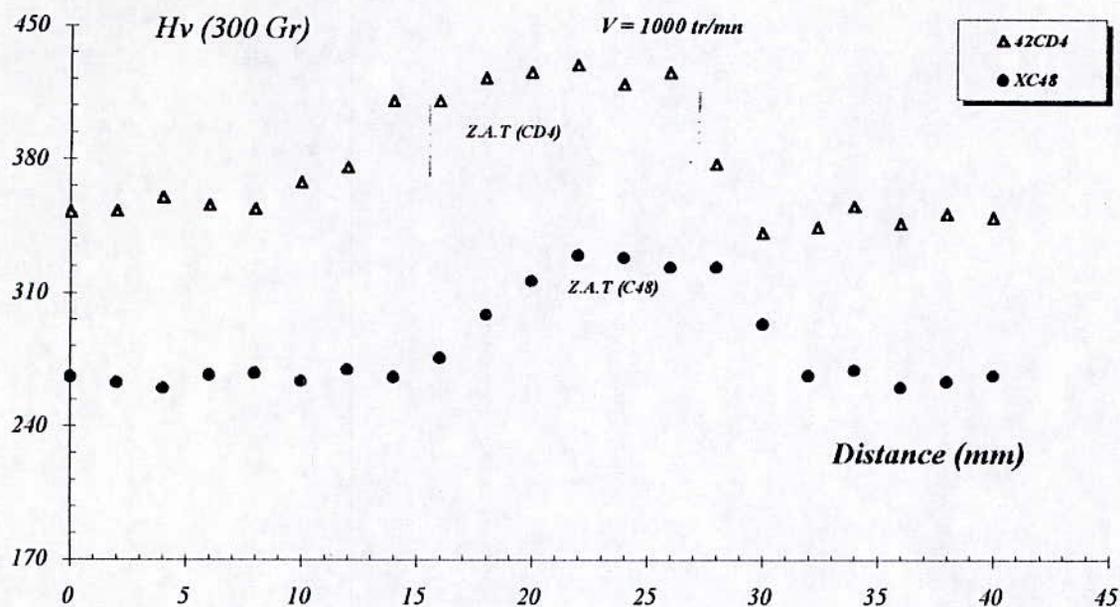
**TABLEAU III.2 :** Présentant les résultats de la micro- dureté de la nuance 42CD4 soudée

\	Substrat		Zone affectée thermiquement			Substrat	
	<b>D</b>	43	42	30	27	27	44
<b>Hv</b>	120.3	126.1	247.2	305.1	305.1	114.9	120.3



**FIG.III.1 :** Courbe de micro dureté de la nuance 42CD4 soudée

La figure ci dessous présente la superposition des deux courbes de micro dureté pour les deux nuances d'aciers 42CD4 et XC48 à une même vitesse de rotation  $V=1000\text{tr/mn}$ .



**FIGIII.2 : Variation de la micro dureté en fonction de la distance pour les deux nuances d'aciers**

### III.1.3 RESULTATS D'ESSAI DE TRACTION

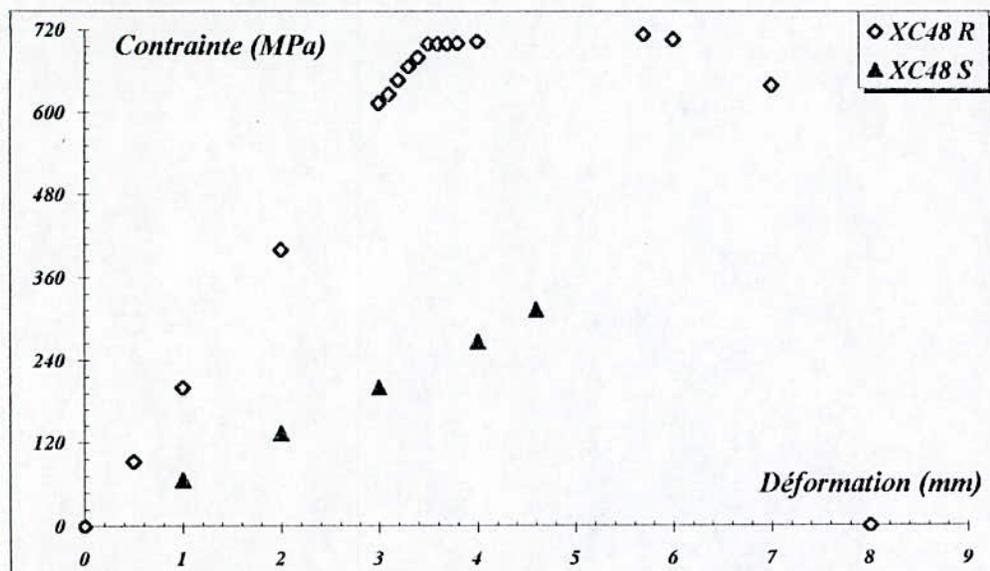
Les essais de traction ont été réalisés au laboratoire de génie des matériaux à l'EMP, avec une machine d'une puissance maximale de 600 daN/mm<sup>2</sup> le compte rendue des teste effectuée est indiquée dans le tableau ci- dessous.

Les résultats de l'essai de traction pour l'acier XC48 ayant subi le soudage et la nuance non soudée sont donnés dans le tableau III.3

**TABLEAU III.3** : Résultats d'essai de traction pour la nuance XC 48.

XC48					
XC48 S			XC48 R		
Déf. (mm)	F (kN)	(MPa)	Déf. (mm)	F (kN)	(MPa)
1	2	66,7111408	0	0	0
2	4	133,422282	0,5	2,8	93,3955971
3	6	200,133422	1	6	200,133422
4	8	266,844563	2	12	400,266845
4,6	9,4	313,542362	3	18,4	613,742495
			3,1	18,8	627,084723
			3,2	19,4	647,098065
			3,3	20	667,111408
			3,4	20,4	680,453636
			3,5	21	700,466978
			3,6	21	700,466978
			3,7	21,01	700,800534
			3,8	21,02	701,134089
			4	21,1	703,802535
			5,7	21,4	713,809206
			6	21,2	707,138092
			7	19,2	640,426951
			8	16	533,689126

La courbe ci dessous présente la superposition des deux courbes de traction de l'acier XC48 ayant subi de soudage et l'acier non soudée.



**FIG III.2 : Courbes de traction (contraintes – déformation) pour la nuance XC48 (R) et (S).**

Le tableau ci dessous présente les résultats d'essai de traction sur l'éprouvette soudée de la nuance 42CD4

**TABLEAU III.4 : Résultats d'essai de traction pour la nuance 42 CD 4 (S)**

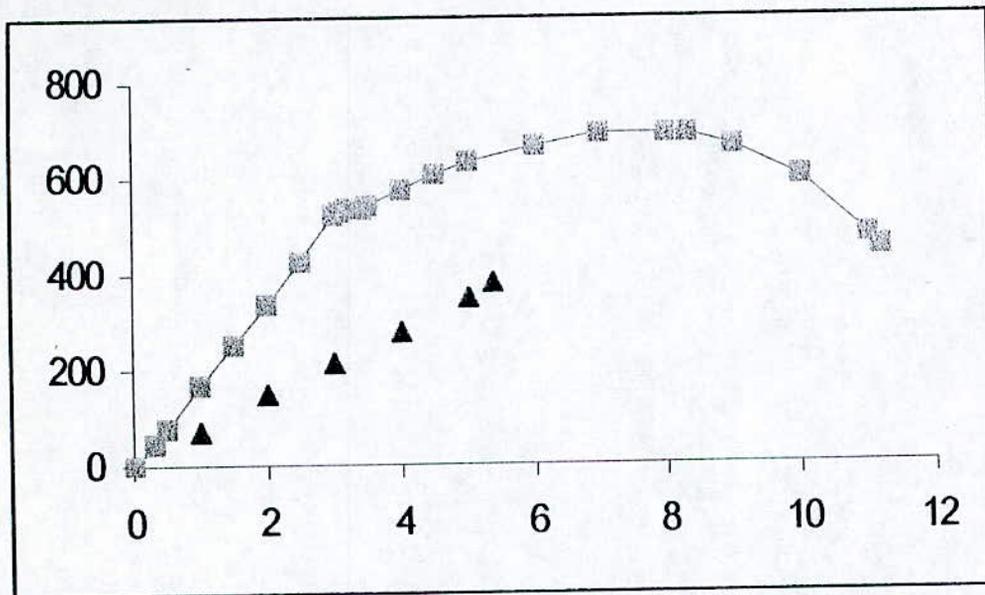
42 C.D. 4 (S)		
Déf (mm)	F (KN)	(Mpa)
1	2.2	73.4
2	4.4	146.8
3	6.4	213.5
4	8.4	280.2
5	10.4	346.9
5.4	11.36	378.9

Les résultats de l'essai de traction pour l'acier 42CD4 n'ayant pas subi de soudage sont donnés dans le tableau suivant :

**TABLEAU III.5** : Résultats d'essai de traction pour la nuance 42 CD 4 (R )

42 CD 4		
Déf (mm)	F (kN )	Mpa
0	0	0
0.3	1.4	46.7
0.5	2.4	80
1	5	166.8
1.5	7.6	253.3
2	10	333.6
2.5	12.8	426.9
3	15.6	520.3
3.1	15.8	527
3.2	16	533.7
3.3	16	533.7
3.4	16	533.7
3.5	16.2	540.4
4	17.2	573.7
4.5	18.2	607
5	19	633.7
6	20	667.1
7	20.6	687.1
8	20.7	690.5
8.3	20.6	687.1
9	20	667.1
10	18	600.4
11	14.4	480.3
11.2	13.6	453.63

L'allure ci dessous présente la superposition des deux courbe de traction de la nuance 42CD4 ayant subi le soudage et la nuance non soudée.



- ▲ : nuance soudée
- : nuance non soudée

**FIG III.3 : Courbes de traction de la nuance 42CD4 (R ) et (S )**

Les résultats de l'essai de traction pour l'éprouvette 42CD4 soudée ayant subi un traitement thermique (Chauffage à 850C°+trempé à l'huile puis un revenu à 750 C° + refroidissement à l'air) sont présentés dans le tableau III.6

**TABLEAU III. 6 : Résultats d'essai de traction de la nuance 42 CD 4 (éprouvette non soudée) traitée thermiquement**

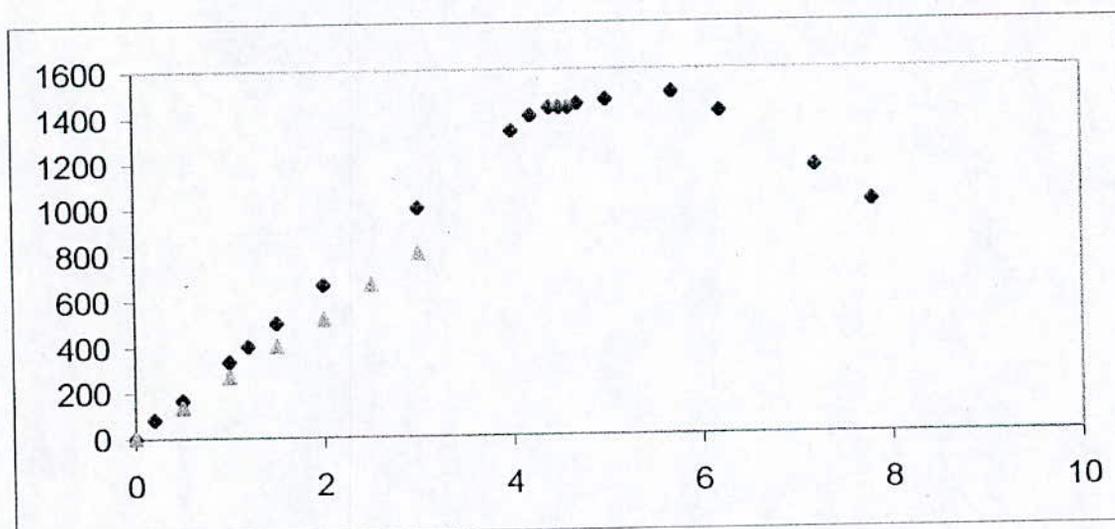
F(kN)	(MPa)	l (mm)	$(l/l_0) \times 100$
0	0	0	0
2.5	83.93	0.2	0.33
5	166.78	0.5	0.83
10	333.56	1	1.67
12	400.27	1.2	2
15	500.33	1.5	2.5
20	667.11	2	3.33
30	1000.667	3	5
40	1334.29	4	6.67
42	1400.93	4.2	7
43	1434.29	4.4	7.33
43	1434.29	4.5	7.5
43	1434.29	4.6	7.7
43.5	1450.96	4.7	7.83
44	1467.64	5	8.33
45	1501.00	5.7	9.5
42.5	1417.117	6.2	10.33
35.1	1170.78	7.2	12
30.5	1017.34	7.8	13

Les résultats de l'essai de traction pour la nuance 42CD4 (soudée) ayant subi un traitement thermique sont présenté dans le tableau III.7

**TABLEAU III.7 :** Résultats d'essai de traction de la nuance 42 CD 4 (éprouvette soudée) traitée thermiquement

F (kN)	(M Pa)	$\Delta l / l_0$ (mm)	$\Delta l / l_0$ (mm)
0	0	0	0
4	133.42	0.5	0.83
8	266.84	1	1.67
12	400.26	1.5	2.5
15.5	517.11	2	3.33
20	667.11	2.5	4.17
24	800.53	3	5

Les courbes ci dessous présente la superposition des deux courbes de traction de la nuance 42CD4 (soudée et non soudée) ayant subi le traitement thermique.



**FIGIII.4 :** Courbes de traction de la nuance 42CD4 (R ) et (S ) ayant subit un traitement thermique.

L'allure ci dessous présente la superposition des deux courbes de traction de la même nuance d'acier souder l'une des éprouvette subi un traitement thermique l'autre n'a pas subi le traitement thermique

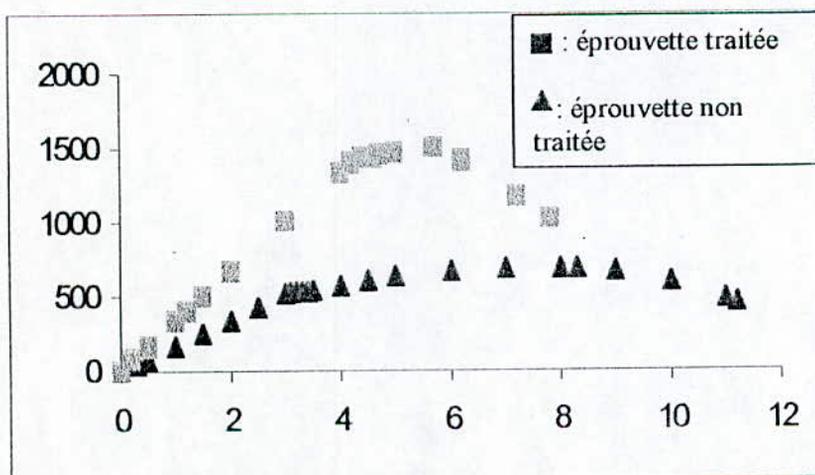


■ : éprouvette n'ayant pas subi le traitement

▲ : éprouvette subi le traitement

**FIG.III.5 : Courbe de traction de la nuance 42CD4 souder**

L'allure ci dessous présente la superposition des deux courbes de traction de la même nuance 42CD4 (non soudée) l'une subi un traitement thermique, l'autre n'a pas subi le traitement.



**FIG.III.6 : courbe de traction de l'acier 42CD4 non soudée**

Calcul à partir des courbes de traction les caractéristiques mécaniques des nuances d'aciers utiliser :

**TABLEAU III.8** : Les valeurs des caractéristiques mécaniques des deux nuances d'aciers.

XC 48 (R )	XC 48 (S )
R <sub>m</sub> = 714 M Pa R <sub>p</sub> = 534 M Pa R <sub>e 0.2</sub> = 680 MPa A = 8.7	R <sub>p</sub> = 313 MPa A = 0
42 CD 4 (R )	42 CD 4 (S )
R <sub>m</sub> = 690 MPa R <sub>p</sub> = 453 MPa R <sub>e 0.2</sub> = 580 MPa A = 14.5	R <sub>p</sub> = 378 MPa A = 0
42 CD 4 (R ) traitée	42 CD 4 (S ) traitée
R <sub>m</sub> = 1501 MPa R <sub>p</sub> = 1017 MPa R <sub>e 0.2</sub> = 1434 MPa A = 6.1	R <sub>p</sub> = 800 MPa A = 0

### III.1.4 Résultats d'essai de résilience

Les résultats de résilience sont exprimés en Joules par centimètre carré. Tous les résultats sont donnés dans les tableaux ci-dessous.

**Tableau III.9** : Résultats d'essai de résilience de la nuance XC48 soudée.

Eprouvette charpy U XC48	Résilience J/ cm <sup>2</sup>	Moyenne une résilience
1	8	
2	23.2	

**Tableau III.10 : Résultats d'essai de résilience de la nuance XC48 non soudée**

Eprouvette charpy V XC48 (R)	Résilience J/cm <sup>2</sup>	Moyenne une résilience J/cm <sup>2</sup>
3	52	52

**Tableau III.11 : Résultats d'essai de résilience de la nuance 42CD4 soudée**

Eprouvette charpy U 42CD4(S)	Résilience J/cm <sup>2</sup>	Moyenne des résiliences J/ cm <sup>2</sup>
1	116	109
2	102	

**Tableau III.12 : Résultats d'essai de résilience pour la nuance 42CD4 non soudée**

Eprouvette de résilience 42CD4 (R )	Résilience J/ cm <sup>2</sup>	Moyenne des résiliences J/ cm <sup>2</sup>
3	140	140

## III-2 Interprétations

### III-2-1 LES essais de traction

les courbes de traction des deux nuances d'aciers 42CD4 et XC48 montrent deux types d'allure :

- Pour les éprouvettes non soudées, on a un domaine élastique et un domaine plastique ;
- Par contre pour celles qui ont été soudées, on observe un seul domaine (comportement fragile).

Toutes les éprouvettes soudées des deux nuances présentent un comportement fragile. La rupture se produit au niveau du joint.

L'interprétation de l'allure des courbes de traction pour les aciers soudés peut être probablement interprétée par le fait que la rupture se produit avant la striction (par la propagation d'une microfissure jusqu'à la surface de l'éprouvette).

Les résultats des essais de traction ont montré aussi que la résistance à la rupture pour les éprouvettes non soudées est supérieure à celles des éprouvettes soudées, (voir Tableau III-8 ) ce qui explique l'existence d'une grande dureté au niveau de la soudure.

Pour la nuance d'acier 42CD4 ayant subi le traitement thermique, on remarque une amélioration notable des caractéristiques mécaniques :

- Une augmentation de la résistance à la rupture ( $R_p=800\text{Mpa}$  pour l'éprouvette soudée ayant subi le traitement et  $378\text{Mpa}$  pour l'éprouvette soudée n'ayant pas subi le traitement).
- Une amélioration notable de module du Young (Fig III-4 )

### III-1-2 Essai de microdureté

L'établissement des courbes de filiation de microdureté permet de relever les caractéristiques mécaniques (dureté Vickers) et les caractéristiques géométriques telles que les largeurs des zones affectées thermiquement.

Les courbes de micro- dureté (Fig-III-1 et Fig-III-2 ) présentent une montée rapide au niveau des limites des ZAT des deux côtés et une partie presque horizontale au niveau de l'interface et sur toute la largeur de la ZAT.

Cette allure à notre avis est due au fait que la pression de forgeage provoque des déformations qui écrouissent la pièce au niveau de l'interface

### III-1-3 Essai de résilience

La faible valeur de résilience de la nuance d'aciers XC48 soudée n'est pas prise en considération, ceci est dû au mauvais usinage de la rainure (TAB : III.9).

La valeur de la résilience de l'éprouvette de la nuance d'acier XC48 soudée est inférieure à celle de l'éprouvette non soudée ( $K=23.2 \text{ J/cm}^2$  pour l'éprouvette soudée et  $52 \text{ J/cm}^2$  pour l'éprouvette non soudée), ceci est dû à la grande dureté au niveau de la soudure(TAB : III.9, III.10).

Pour la nuance d'acier 42CD4 ayant subi un traitement thermique (recuit à  $750\text{C}^\circ$  pendant 8 heures), on remarque que les valeurs de la résilience des deux éprouvettes soudée et non soudée sont proches ( $109 \text{ J/cm}^2$  pour l'éprouvette soudée et  $140 \text{ J/cm}^2$  pour l'éprouvette non soudée), ceci est dû au fait que l'éprouvette soudée contient des contraintes internes élevées au niveau de la soudure avant le recuit qui seront relaxées après ce traitement, la soudure devient plus malléable et est améliorée (TAB :III.11et III.12).

## *Conclusion*

## CONCLUSION

Actuellement, le soudage a gagné et conquis le champ industriel notamment grâce à la maîtrise de tous ses paramètres et à l'application d'une panoplie de procédés nouveaux capables de pallier les insuffisances des procédés conventionnels et classiques ; citons entre autres le soudage par friction, sujet de notre présente étude.

Le soudage par friction est une technique dont le développement industriel est récent.

Son créneau d'emploi est particulier, mais son développement peut être très important en particulier dans l'industrie mécanique de grande série comme l'automobile.

L'étude du comportement mécanique des joints soudés par friction pilotée de deux nuances d'aciers nous a permis de connaître l'influence des paramètres de soudage sur la qualité du joint.

Les opérations de soudage ont nécessité la mise en œuvre de moyens matériels spécifiques (Tour parallèle ; Unité hydraulique ; Dispositif de centrage des éprouvettes...)

Ces opérations ont donné des assemblages présentant dans l'ensemble une continuité de matière pour les spécimens de même nature.

Les résultats des essais mécaniques ont permis de déduire :

- Une grande micro dureté au niveau de la soudure, 320 Hv pour la nuance d'acier XC48 et 420 Hv pour la nuance 42CD4 ;
- La largeur de la ZAT est faible, environ 1cm ;
- Les éprouvettes soudées ont un comportement fragile ;
- Les traitements thermiques améliorent notablement les caractéristiques mécaniques :
  - augmentation de la résistance à la rupture
  - augmentation de la résilience, la soudure devient plus malléable.
  - diminution de la dureté au niveau du joint

Donc on conclut que le traitement thermique est une opération nécessaire après le soudage par friction.

Enfin il est souhaitable que notre étude soit complétée par d'autres afin de mettre en évidence le phénomène de fissuration qui, à nos jours reste le problème qui a une grande influence dans les assemblages soudés. Il en est de même pour une autre étude sur l'influence des différents paramètres de soudage.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] R. LEGOUIC, précis de soudage brasage et techniques connexes : Coupage, métallisation, rechargement, 1982, 158P.

[2] D. PERRY, G. METAUR, M. GANTOIS, Aspects thermiques et métallurgiques du soudage par friction. Application au soudage « superalliage- Acier », soudage et technique connexes, 1987, pp. 109-121.

[3] R. ELHAIK, intérêt porté par l'industrie automobile au soudage par friction, soudage et technique connexes, Mai- juin 1981, pp. 149-151.

[4] D.E. SPINDER, ce que l'industrie doit connaître du « SOUDAGE PAR FRICTION », souder- N° 1, janvier 1996.

[5] D. PANTELIS, J. P. HOUVION, T. GUENNOUNI, soudage par friction : mécanisme de formation de la liaison à l'interface et modélisation de l'écoulement de la chaleur ( comparaison des résultats calculés et mesurés par thermocouples), soudage et technique connexes, Novembre- Décembre 1981, pp. 396-410.

[6] P.T. HOULDCROFT, Les procédés de soudage, Dunod, PARIS, 1971

[7] R. CAZES, G. SAYEGH, soudage par friction, soudage et technique connexes, B619. 1-B619.14 .

[8] G. SAYEGH, R. CAZES, possibilités et perspectives du soudage par friction, application- Evolution de la technique et perspectives, soudage et technique connexes, Mai- juin 1981, pp. 152- 160.

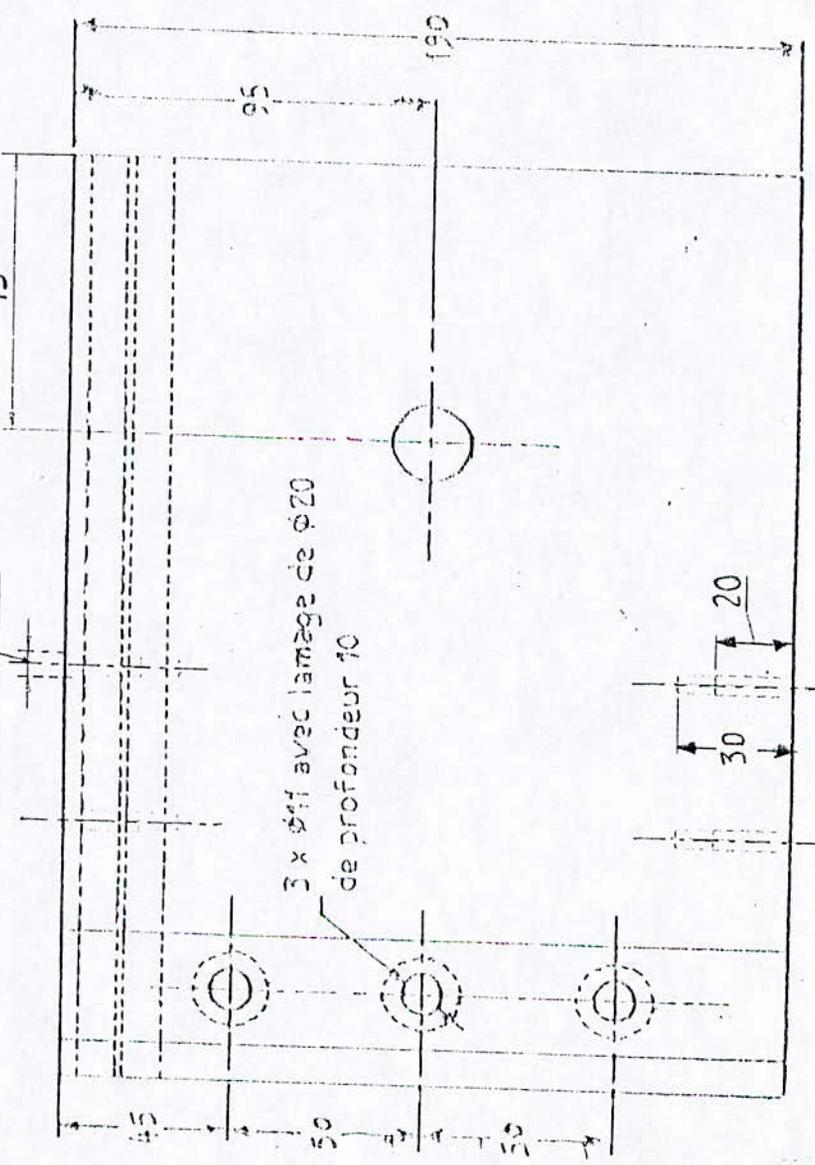
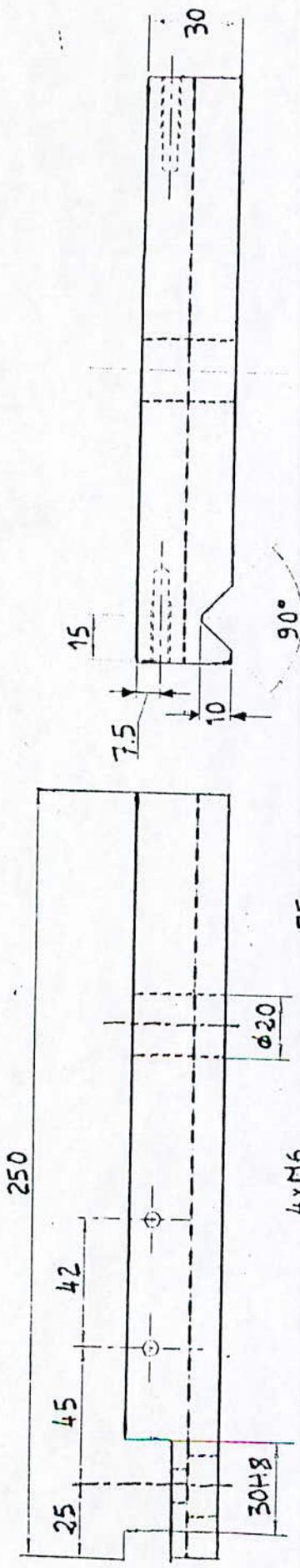
[9] H. LAPLANCHE, R. THIRON, Du choix et de l'emploi des principaux aciers, fontes et alliages ferreux, Editeur PARIS, 1973.

[10] A. CAMPA, Technologie professionnelle générale pour les techniciens, tome II, LES EDITIONS FOUCHERS, PARIS, 1971.

[11] I. LAKHTINE, Métallographie et traitements thermiques des métaux, EDITIONS MIR, MOSCOU, 1971.

[12] Thèse d'ingénieur , Soudage par friction , EMP , 1998

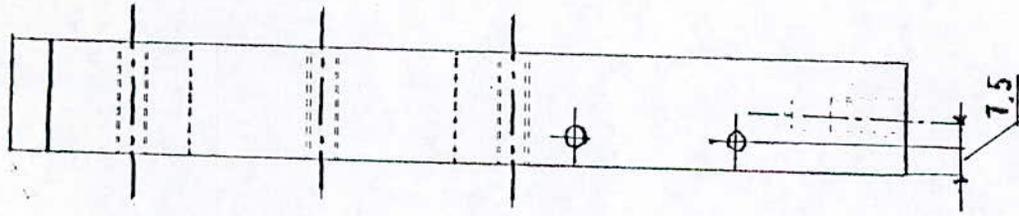
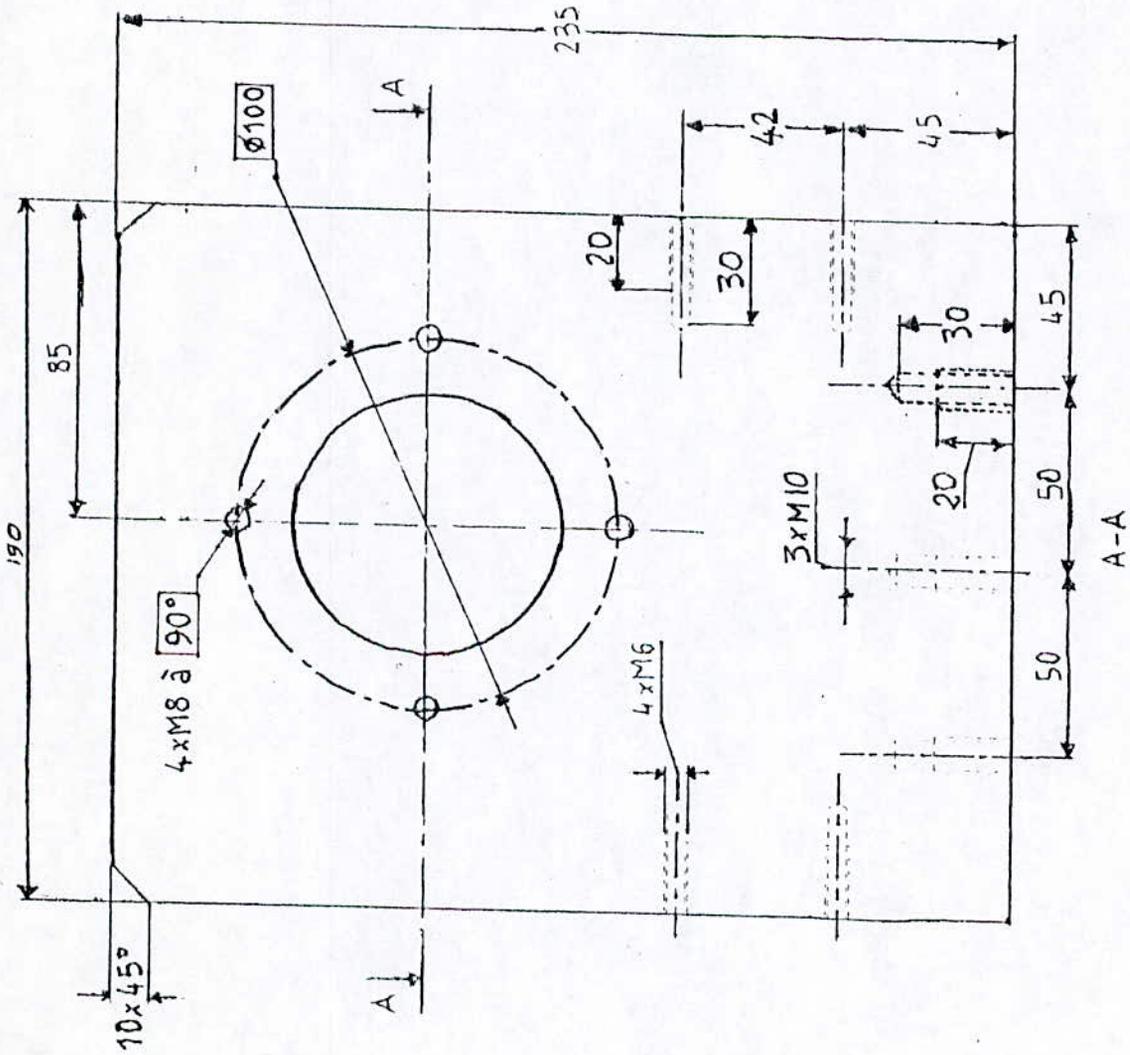
ANNEXES



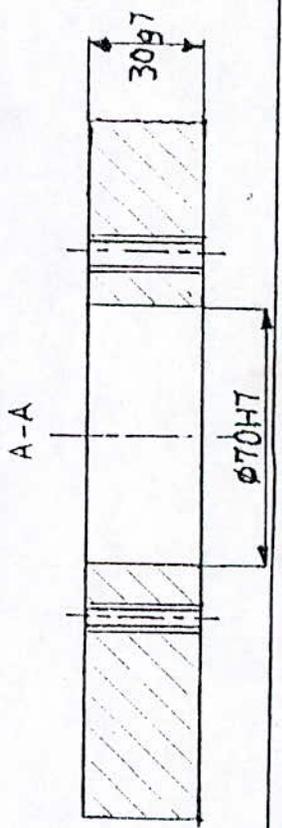
Ech = 1:2	
Matériau	E.N.P
Fer	HOUT

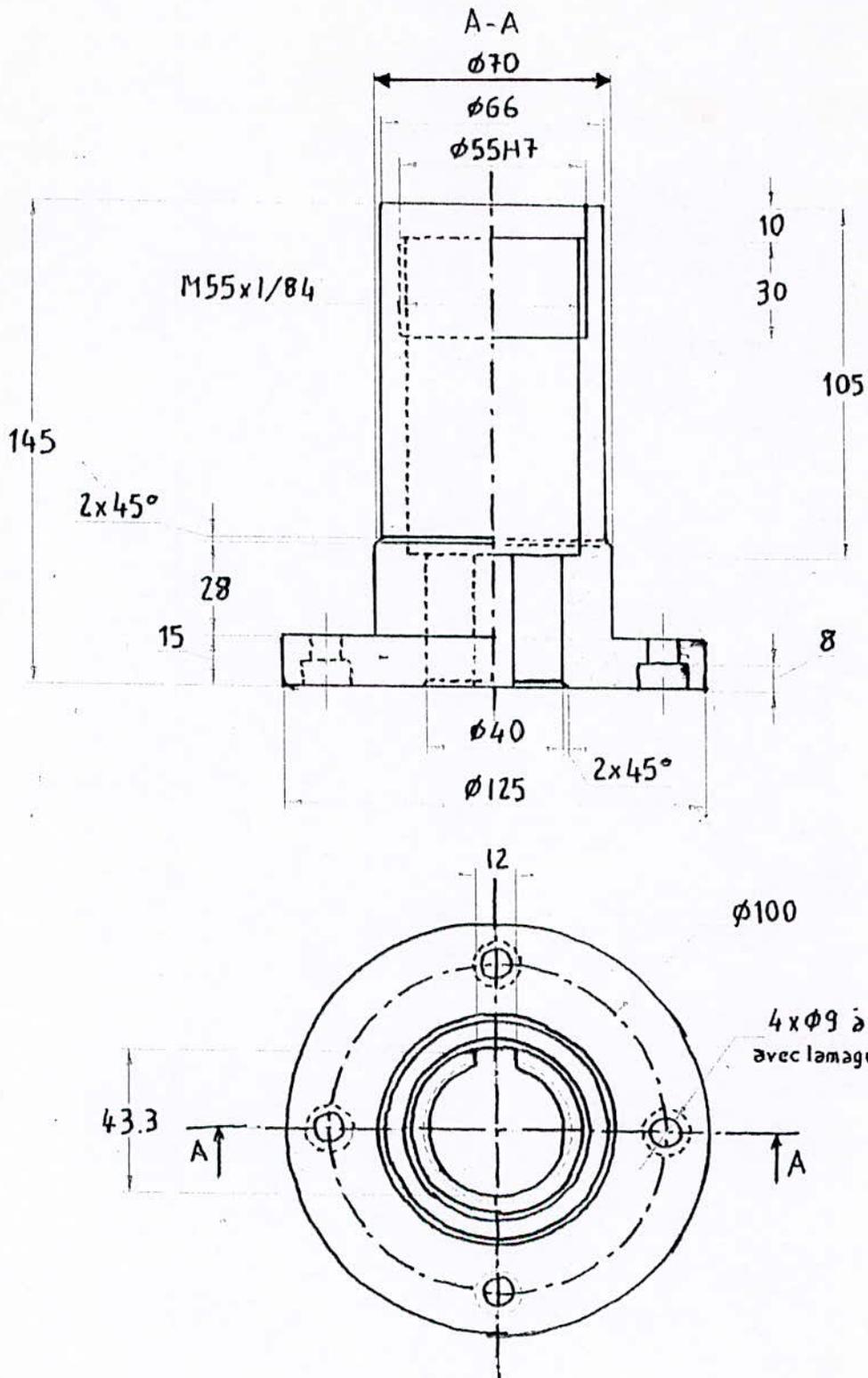
..... EQERRE INFERIEURE

BANC DE SOUDAGE PAR FRICTION



Echelle: 1:2	EQUERRE SUPERIEURE	
Matériau: A33	E.M.P	
Ferroum	BANC DE SOUDAGE PARFUSC	





Ech = 1:2

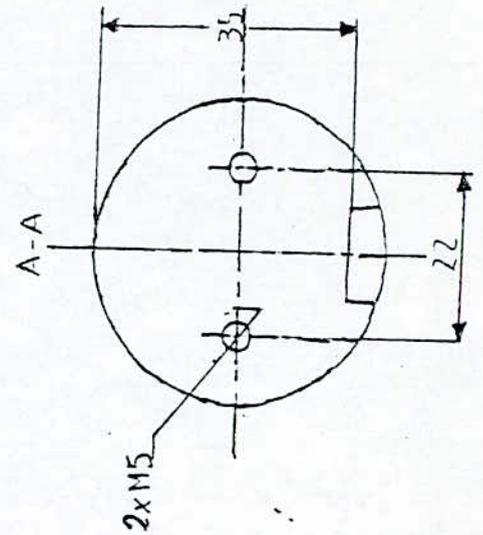
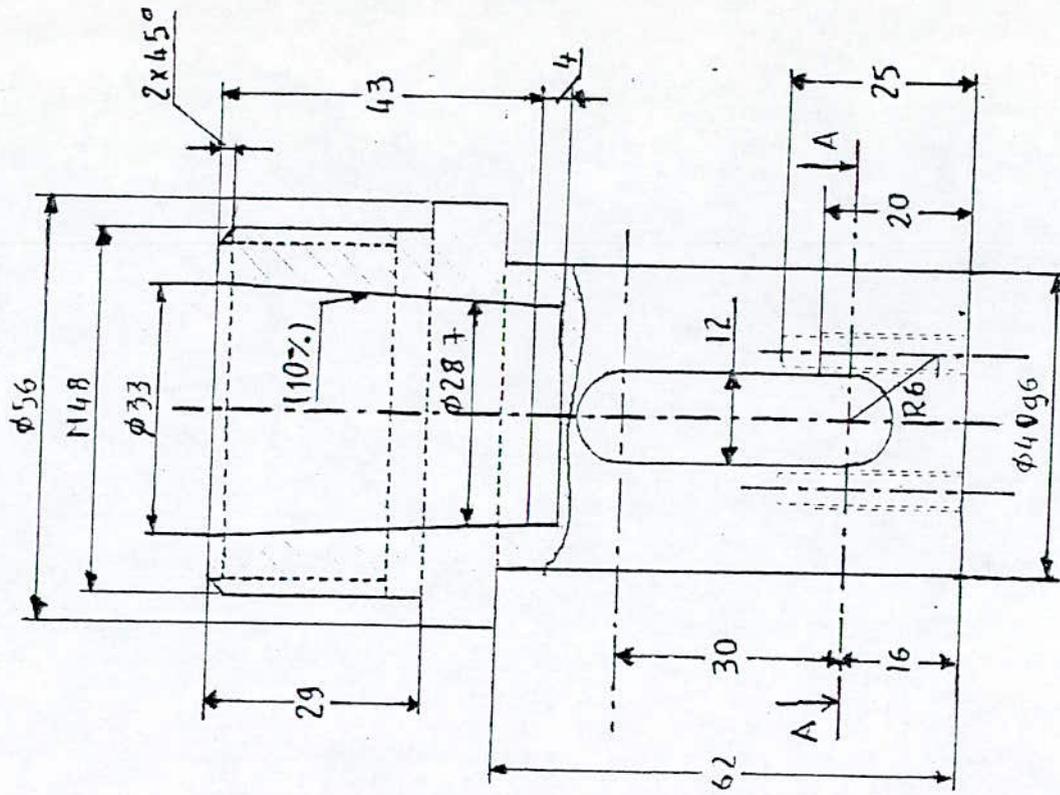
PORTE DOUILLE

Matière XC38

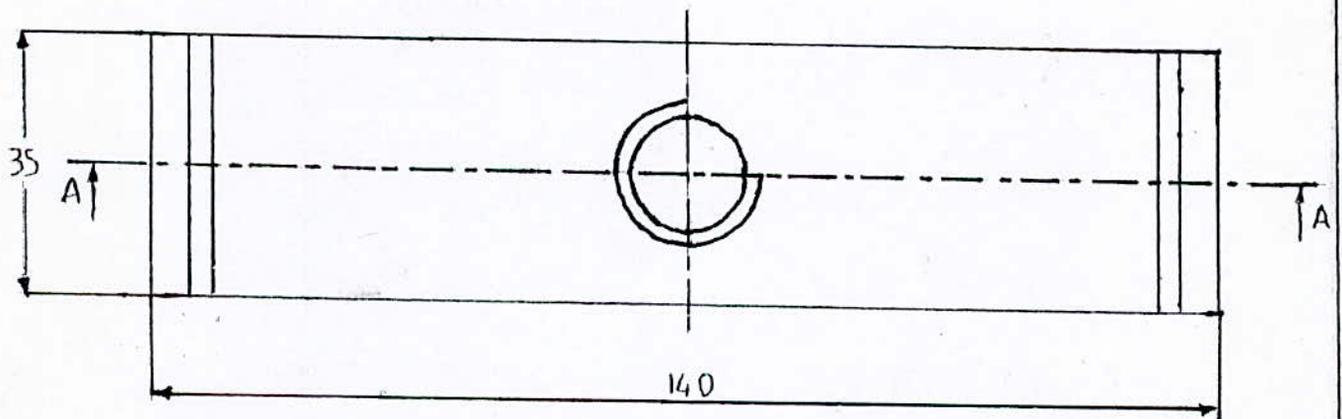
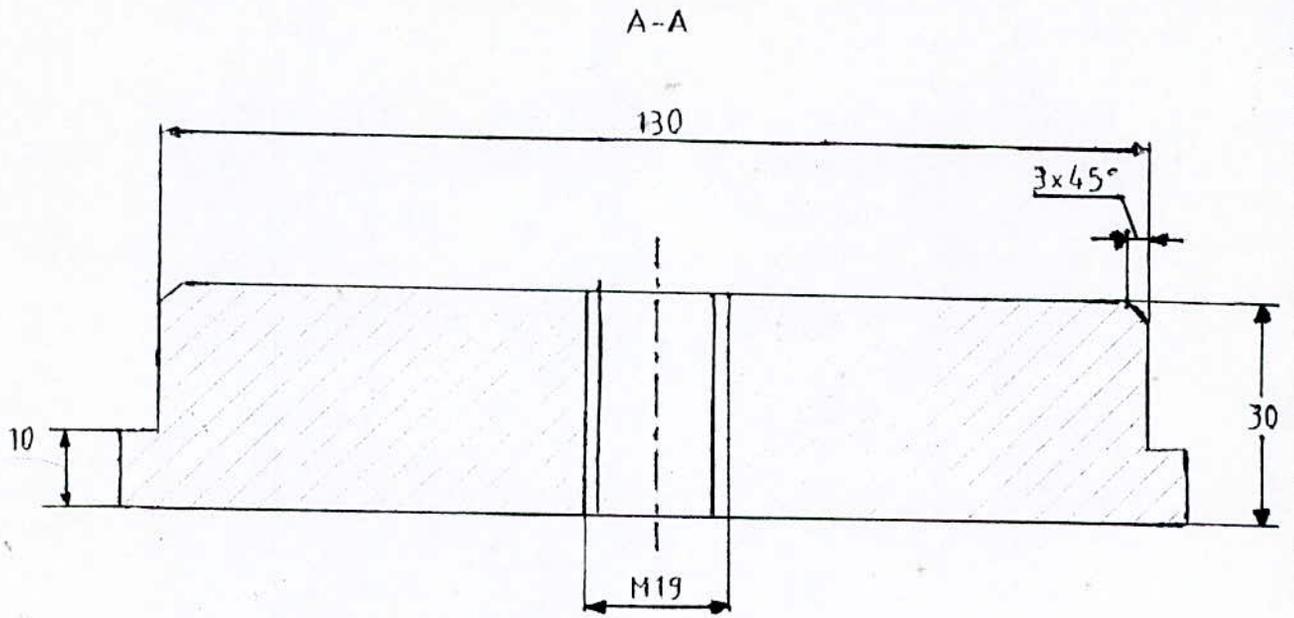
ENP

FERHOUM

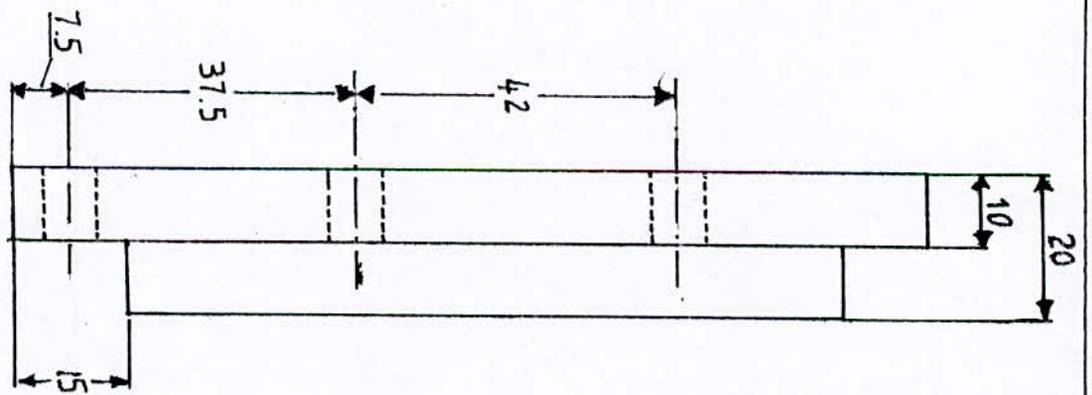
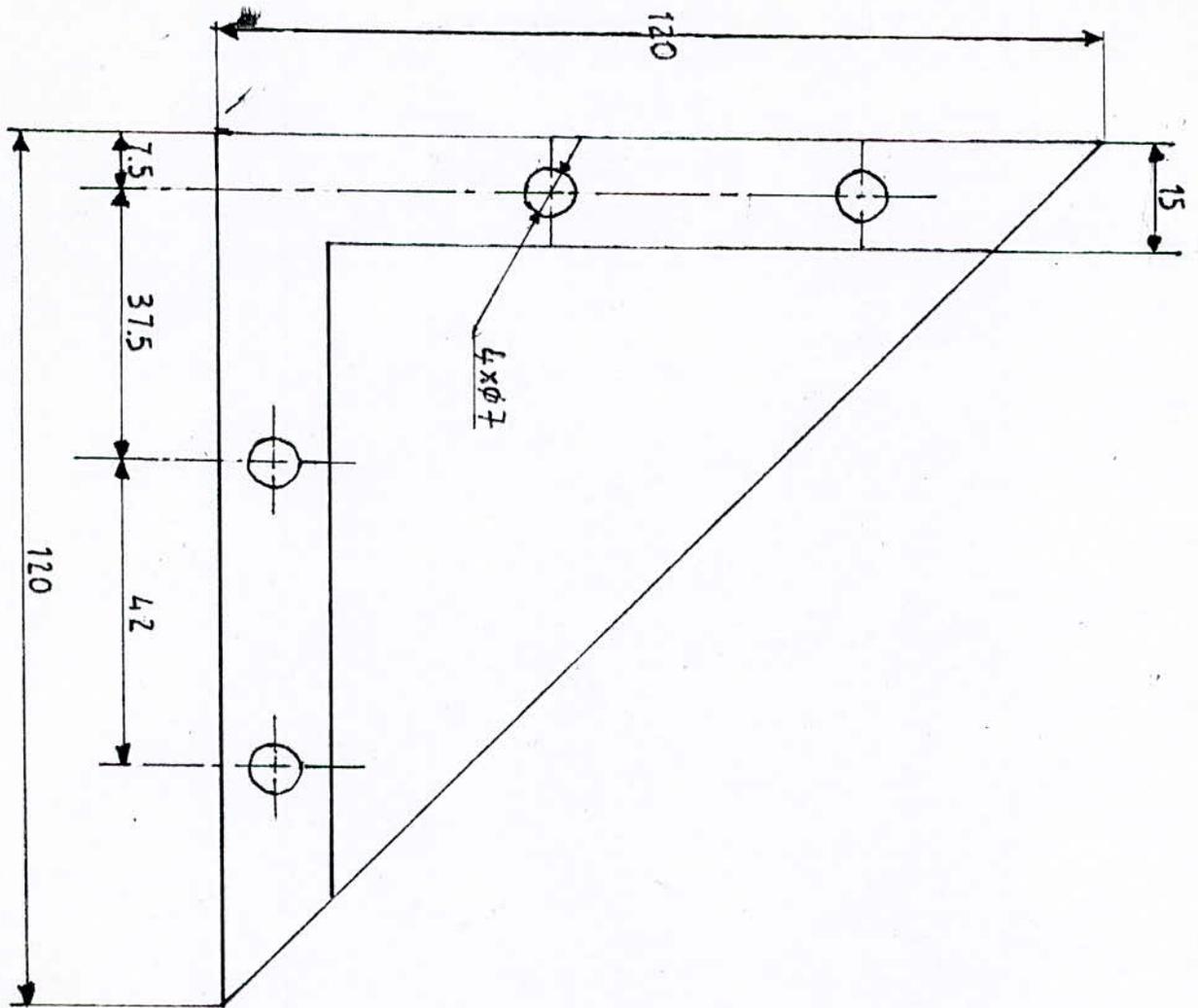
BANC DE SOUDAGE PAR FRICTION



Ech=1:1	DOUILLE
Matière: XC32	E.N.P
Ferhout	BANC DE SOUDAGE PAR FRICTION



Ech = 1:1	BRIDE
Matériau : XC 38	E.M.P
Ferroum	BANC DE SOUDAGE PAR FRICTION



Ech = 1:1

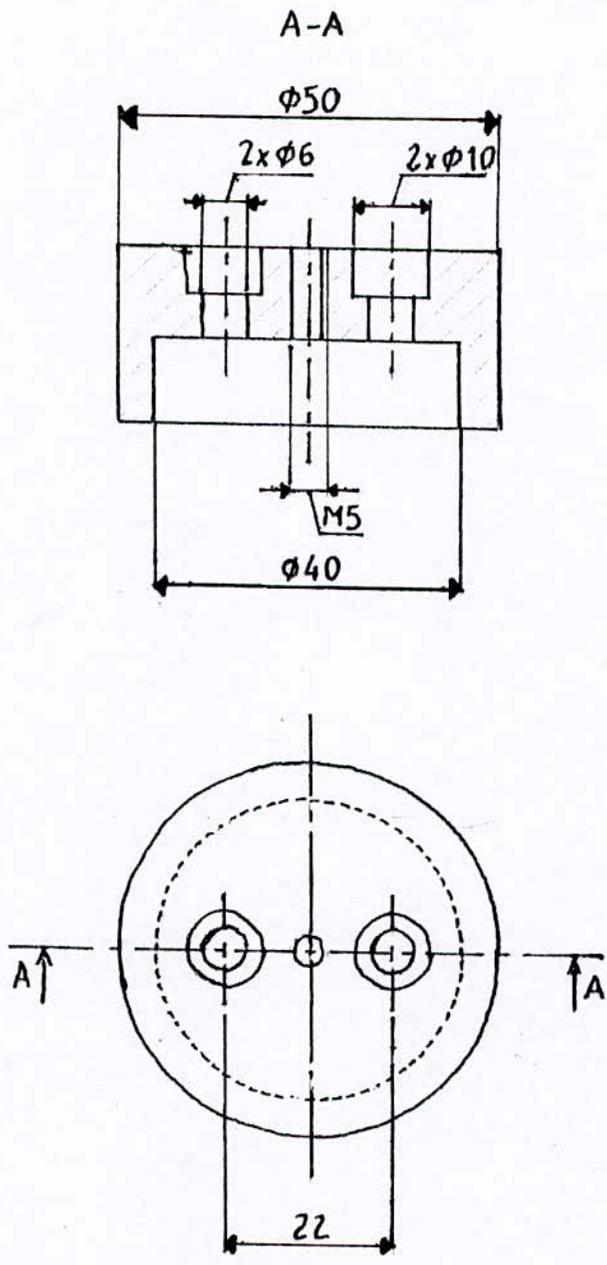
NERVURE

Matière : A33

E.N.P

Ferroun

BANC DE SOUDAGE PAR FRICTION



Ech = 1:1	BAGUE
Matière: XC38	E.N.P
Ferhoum	BANC DE SOUDAG PAR FRICTION