

9/84

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**Département Génie-Mécanique**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

THEME

**Etude du rechargement des pièces usées**

**des engins de terrassement**

Proposé et suivi par :

Mr. ELEOD ANDRAS  
Professeur à l'E. N. P. A.

Etudié par :

A. BENGUEDOUAR

PROMOTION : JANVIER 1984

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**Département Génie-Mécanique**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

THEME

Etude du rechargement des pièces usées  
des engins de terrassement

Proposé et suivi par :  
Mr. ELEOD ANDRAS  
Professeur à l' E. N. P. A.

Etudié par :  
A. BENGUEDOUAR

PROMOTION : JANVIER 1984

## REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis d'exprimer mes remerciements très respectueux à mon professeur **Eléod Andras** qui a dirigé ce travail.

Je tiens à assurer les professeurs qui m'ont fait le grand honneur de juger ce travail, de ma respectueuse gratitude.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de cette étude.

---

## DEDICACES

Je dédie ce travail à :

- mon père,
- ma mère,
- mes frères : Salah licencié en SOCIOLOGIE, Saïd, Hichem, et Foued,
- mes sœurs,
- mes oncles en particulier à Mahmoud et Abdelmajid,
- toute la famille,
- tous mes camarades plus particulièrement à : Achouri, Derouiche, Salhi et Seddik.H.

A. Benguedouar

# Table des matières

	Page
Chapitre 1 - Introduction .....	1
Chapitre 2	
2.1. Rôle des engins de terrassement .....	2
2.2. Classification des engins de terrassement .....	3
2.3. Classification des pièces usées .....	11
2.4. Possibilités de réparation .....	13
Chap. 3. Procédés de rechargement .....	15
3.1. Définition .....	15
3.2. Procédés de rechargement utilisés .....	15
3.3. Rechargement au chalumeau .....	16
3.4. Rechargement manuel à l'arc .....	17
a - Rechargement manuel à l'électrode enrobée .....	17
b - Rechargement semi-automatique .....	20
3.4. Rechargement automatique .....	26
3.4.1. Soudage automatique sous flux .....	27
3.4.2. Soudage sous flux avec plusieurs électrodes .....	28
3.4.3. Soudage automatique sous flux avec feuillets .....	29
3.4.4. Soudage T.I.G. automatique .....	29
3.4.5. Soudage M.I.G. automatique .....	32
3.5. Régulation de la longueur d'arc .....	33
Chap. 4	
4.1. Etude du matériau des pièces usées .....	37
4.1.1. Soudabilité de l'acier de base .....	38
4.2. Etude du rechargement .....	45
4.2.1. Influence des éléments d'alliage et des impuretés sur le rechargement .....	46
4.2.2. Présentation macrographique d'un cordon de rechargement .....	47
4.2.3. Transformation en refroidissement continu (diagrammes T.T.T) .....	52

4.2.4. Rechargements hétérogènes . . . . .	54
4.2.5. Phénomènes de fissuration des rechargements . . . . .	56
4.2.6. Structure métallurgique optimale . . . . .	59
Chap. 5. Paramètres et contrôles . . . . .	62
5.1. Paramètres de rechargement . . . . .	62
5.2. Choix des électrodes et des paramètres de rechargement . . . . .	63
5.3. Polarité des électrodes . . . . .	67
5.4. Détermination des durées de refroidissement $\Delta t_{500}^{800}$ . . . . .	67
5.5. Préparation des pièces avant rechargement . . . . .	69
5.6. Ordre de dépôt des cordons . . . . .	70
5.7. Choix des installations . . . . .	71
5.8. Contrôle de la qualité du rechargement . . . . .	73
5.9. Examen microscopique . . . . .	76
Chap. 6. Prix de revient des rechargements . . . . .	77
6.1. Préparation des pièces . . . . .	77
6.2. Temps consacré au rechargement . . . . .	78
6.3. Quantité de métal déposé . . . . .	82
6.4. Consommation d'énergie . . . . .	84

# 1\_ INTRODUCTION

Les engins mécaniques de terrassement, que nous nous proposons d'étudier la réparation de leurs pièces usées, sont destinés à travailler le sol. Ils sont considérés depuis longtemps déjà comme les bonnes à tout faire du chantier de terrassement et qu'ils constituent, la base de tout chantier mécanisé.

Les engins mécaniques de terrassement, ont porté un grand intérêt croissant dans les milieux les plus divers à l'organisation rationnelle des chantiers mécanisés.

Si elle est bien connue et intelligemment appliquée, la mécanisation donne des résultats économiques remarquables. C'est ainsi par exemple, dans notre pays l'utilisation de ces engins est devenue indispensable, vu le développement que l'Algérie veut qu'il soit accéléré

Pour construire des usines, des bâtiments ou des routes etc... On voit qu'il est nécessaire d'avoir un grand nombre d'engins de terrassement, ce qui est le cas actuellement en Algérie, d'où la nécessité de chercher un moyen le plus économique que possible pour l'entretien de ces machines.

Parmi les possibilités d'entretien, il y a la réparation des pièces usées, en rechargeant la partie usée par une ou plusieurs couches plus dures et plus résistantes à l'usure et au choc que le métal de base. Ce rechargement constitue le sujet de notre étude.

## 2-1- Rôle des engins de terrassement

Les engins de terrassement sont destinés aux travaux de terrassement et d'excavation.

Certains d'eux permettent le refoulement de la terre, de la roche désagrégée ainsi que des troncs d'arbres, comme ils permettent de déraciner les arbres et les souches.

D'autres permettent de creuser, déplacer et niveler la terre et d'autres opèrent l'excavation, le chargement des matières excavées et le déchargement.

Il ya des types d'engins qui regroupent plusieurs fonctions ils excavent la terre, la chargent en même temps dans leur benne, la transportent, la déchargent et la nivèlent selon l'épaisseur voulue par le réglage de la lame en hauteur. Ces derniers sont les scrapers à vidage par l'arrière et à vidage par l'avant.

Avant l'existence de ces engins, les travaux des chantiers étaient très durs, car pour réaliser un projet de génie civil ou de travaux publics il faut dans la plus part des cas excaver la terre ou la niveler, si ce travail s'exécute manuellement, il sera très difficile et très coûteux, d'où l'importance des engins de terrassement.

Les engins de terrassement ont plusieurs avantages :

- facilitent beaucoup les travaux de chantiers
- Permettent d'exécuter les travaux dans un temps relativement court.
- Permettent le développement rapide du pays.
- Remplacent un grand nombre de main-d'oeuvre
- Diminuent fortement le coût des travaux d'excavation.
- Donnent des précisions de travail mieux que celles données par les travaux manuels.

## 2.2 Classification des engins de terrassement

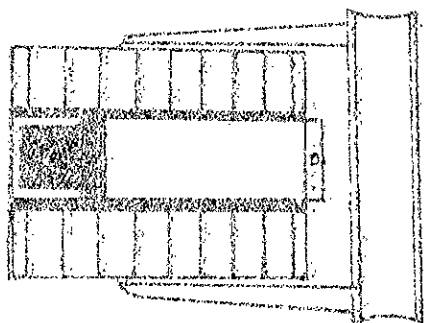
Les engins de terrassement sont classés en trois catégories :

### A) Engins refouleurs

#### 1. Bulldozer

Comporte essentiellement une lame refoulante droite ou légèrement courbe disposée à l'avant du tracteur, perpendiculairement à l'axe longitudinal de la machine.

Le bulldozer sert à déplacer par refoulement la terre, la roche désagrégée, aussi bien que les troncs d'arbres, etc ...



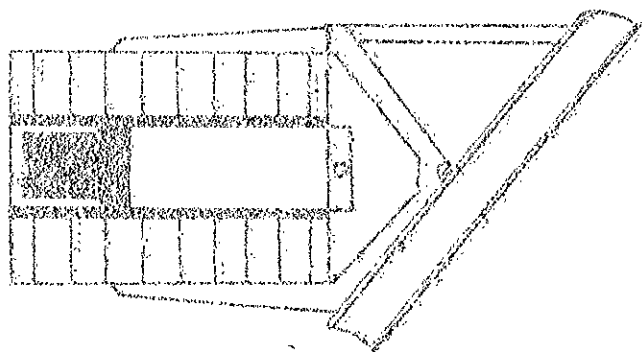
#### 2. L'Angledozer

Cet appareil a la même construction que celle du bulldozer, mais sa lame peut être fixée à des angles divers, par rapport à l'axe longitudinal du tracteur, comme elle est plus longue que celle du bulldozer, mais placée de biais.

L'angle dozer s'emploie surtout pour l'excavation et le déplacement des terres le long d'une côte.



En plaçant sa lame perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'appareil on peut l'utiliser comme bulldozer.



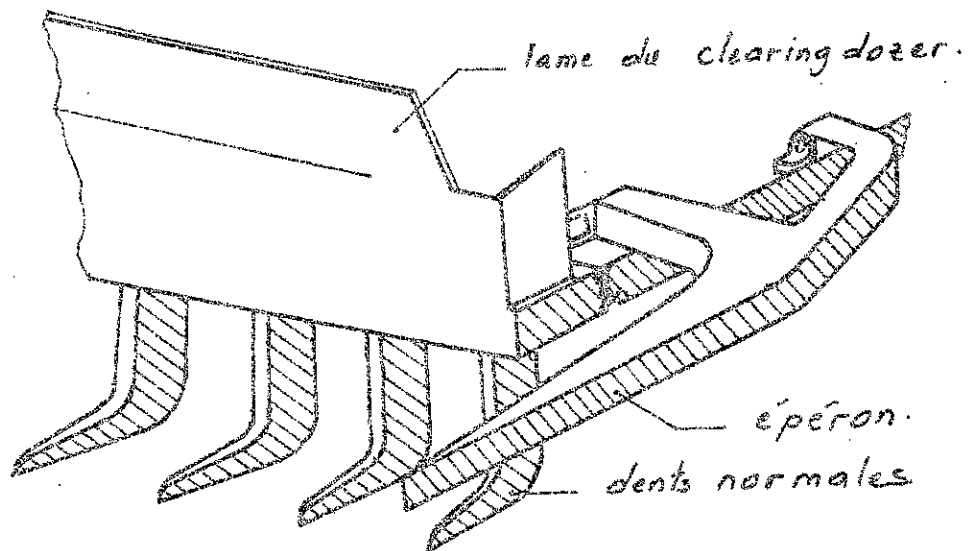
### 3. Le tilt dozer

Le tilt dozer n'est autre qu'un bulldozer, mais sa lame peut pivoter dans son plan, et permet une attaque en saut de terrain à excaver. Mais l'usure de la lame est plus rapide que dans le cas du bulldozer.

### 4. Le clearing dozer

Le clearing dozer est un appareil destiné au débroussaillage et au déboisement. Sa lame est essentiellement lourde et munie de dents amovibles. Ces dents pénètrent dans le sol, soulèvent les roches et les souches déracinent les petits arbres ou coupe les racines pour faciliter l'arrachement des grands arbres.

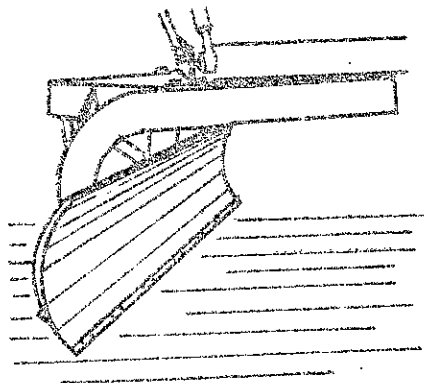
Le clearing dozer peut être muni d'un épéron spécial sur le côté de la lame. En le faisant pénétrer dans le haut d'une souche et en faisant tourner le tracteur sur place on arrive à fondre le chicot, même s'il est de grand diamètre. Le bulldozer peut facilement l'extraire ensuite, morceau par morceau.



## 5 - Le grader à lame

C'est un engin à 4 roues, il sert à creuser, à déplacer et à niveler la terre. Son élément principal est une lame de profil incurvé, dont la longueur détermine le modèle et la puissance de l'engin.

La partie inférieure de la lame et parfois les bords latéraux sont munis de parties rapportées interchangeables en acier dur, fixées par des rivets.



## B) Les scrapers, engins de transport et d'excavation

Les appareils appelés scrapers sont des remorques capables de procéder elles-mêmes à l'excavation de

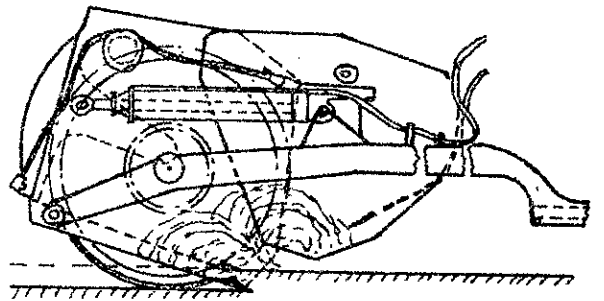
la matière qu'elles rassemblent, puis transportent dans leur bennes pour la déverser ensuite.

On en distingue de nombreux types, on ne parlera que de celles qui existent en Algérie:

## 1. Scraper à vidage par l'arrière

C'est un godet racleur monté sur deux roues, parfois sur chenilles. Au moment de l'excavation les roues touchent légèrement le sol, tandis que le godet creuse et se remplit, quand il est plein, les roues s'abaissent et le soulèvent. Il perd contact avec le sol et prend sa position de transport.

Pour vider l'engin on le fait rouler à grande vitesse jusqu'à lieu de déversement puis on le bouscule vers l'arrière pour le vidage.



La partie excavatrice est terminée par une lame tranchante assemblée au godet par rivetage.

## 2. Scraper à vidage par l'avant

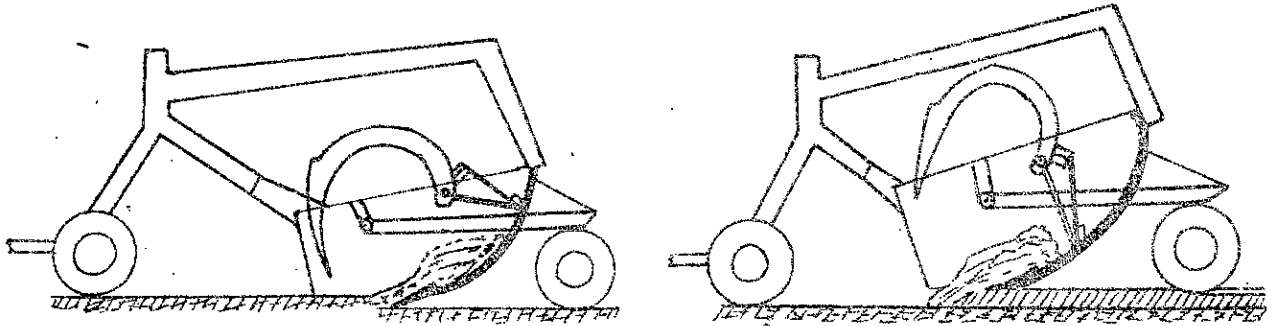
Son principe est un peu différent de celui que nous venons de décrire, car ici pour toutes les opérations l'appareil repose toujours sur ses roues.

Avec ce type de scraper on peut transporter la matière excavée, comme on peut l'étaler en couches uniformes à l'épaisseur voulue, grâce au réglage en hauteur de la lame.

Cet engin peut aussi niveler avec assez de précision, comme il peut excaver et ramasser la matière excavée dans son godet.

La profondeur à laquelle on abaisse la lame détermine la profondeur de coupe.

Sa lame est terminée à sa partie inférieure par un couteau démontable fixé par rivetage.



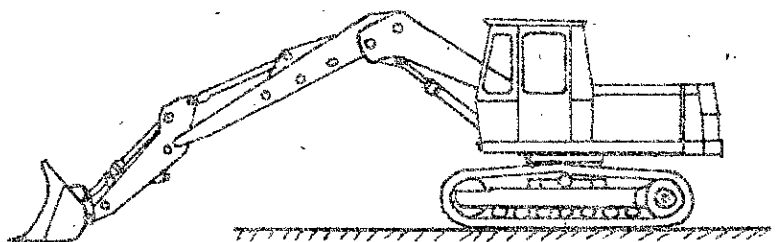
## C) Les excavateurs pour chargement stationnaire

### 1. Pelle en butte

Les éléments essentiels de la pelle en butte sont : la flèche, le bras de godet, le godet et le mécanisme d'avancement des bras de godet.

La pelle en butte est une machine d'excavation qui offre les possibilités de travail les plus étendues, dans les sols les plus divers. C'est un excellent engin d'excavation, son efficacité est due à la grande puissance appliquée au godet et d'autre part au mouvement de va-et-vient qui permet d'excaver aussi bien dans la roche désagrégée à la dynamite que dans le sable.

La pelle en butte permet l'excavation en hauteur, au dessus de l'aire d'assise de la machine, ainsi que le ramassage et le chargement en carrière.



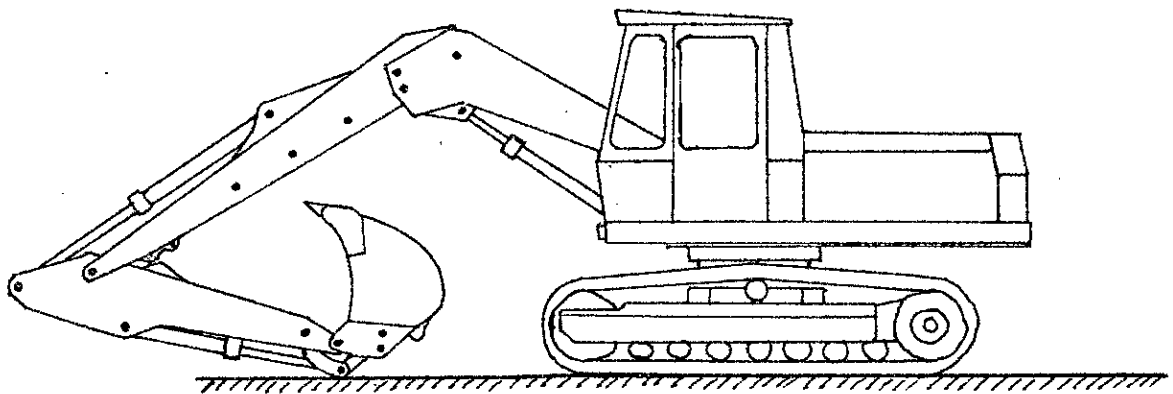
## 2 - Pelle rétrocaveuse

L'équipement de cette pelle se compose: du bras de godet pivotant, du godet et de la flèche.

Les mouvements appliqués au godet s'effectuent hydrauliquement. Le commandement est assuré par le conducteur de l'engin, de la cabine de conduite.

De toutes les machines d'excavation décrites, la pelle rétrocaveuse est la seule dont la flèche s'abaisse et se soulève à chaque opération. Ce genre de pelle possède certaines qualités de la pelle en butte, elle sert de creuser en dessous de la surface d'appui de la machine, ou à son niveau.

Le godet a une arête tranchante en acier coulé, le reste du godet soumis à de moindres efforts est en toles rivetées ou soudées.



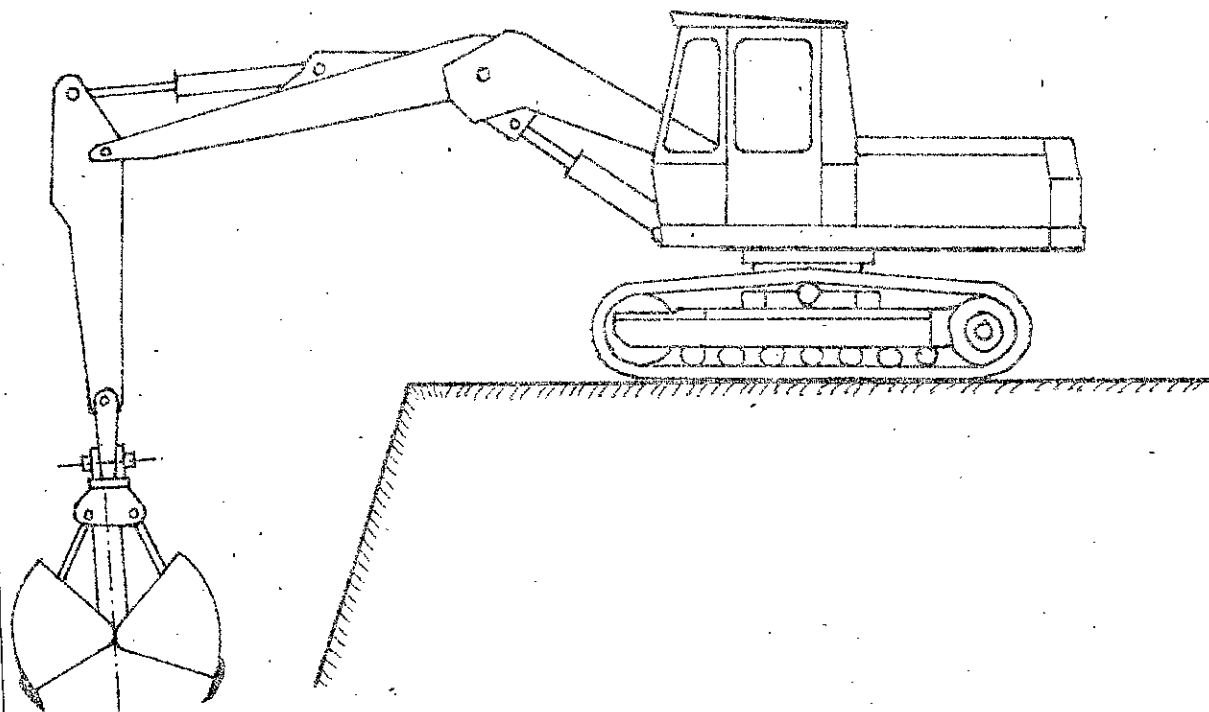
## 3 - Excavateur à grappin

Cet engin a la même construction que celle de la pelle rétrocaveuse, mais, la seule différence est que le godet est remplacé par un grappin, qui se compose de deux coquilles dont les parties inférieures sont terminées par des lames, ou des dents rapportées,

permettant de creuser la terre.

Avant l'excavation, les coquilles sont ouvertes. Au moment de l'opération d'excavation, le godet se ferme au furet et à mesure qu'il s'enfonce dans la terre en ramassant la matière excavée.

Pour le vidage, le godet est soulevé de la fouille et la giration commence, en arrivant au point de déversement, le grappin s'ouvre et se vide. Là l'opération peut commencer.



#### 4 - Pelleuse chargeuse

Sa fonction est de charger en marche les matières excavées dans des engins de transport, et opérer le déchargement et parfois excaver la terre.

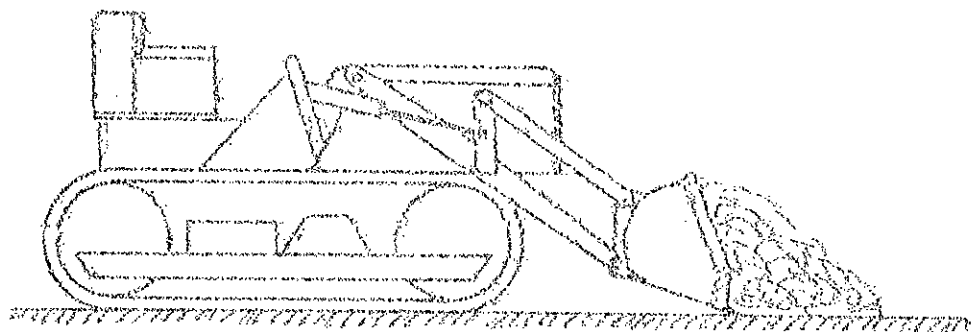
C'est un engin qui se monte sur un tracteur à chenilles rendu rigide ou sur un tracteur à roues.

Le chargement ou l'excavation se fait par l'avancement du tracteur ou par le va-et-vient.

qu'imprimant au godet les vérous hydrauliques.  
Ce mouvement d'attaque est très efficace.

Par cet engin on peut effectuer le déversement  
à la hauteur voulue.

Le godet est muni d'une lame terminée par  
des dents soudées ou fixées par boulons.



## 2.3 Classification des pièces usées

Les pièces usées sont classées en trois catégories :

- 1- La lame est monobloc
- 2- La lame est terminée par une pièce rapportée sous forme de couteau.
- 3- La lame est terminée par plusieurs dents équi-distantes.

1- Si la lame est monobloc, qui est le cas pour certains engins de terrassement. Le coût d'entretien est très élevé, car après l'usure de la lame, elle est changée entièrement. Pour cela il est beaucoup mieux de recharger la partie usée, que de la changer.



2- La lame est terminée à sa partie inférieure par une seule pièce qui est soit, encastrée dans la lame et fixée par des rivets à têtes noyées - voir fig (A) - ou, soudée à la lame - fig (B) -



fig. A

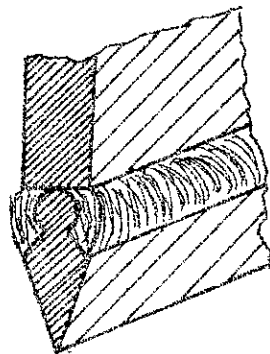


fig. B



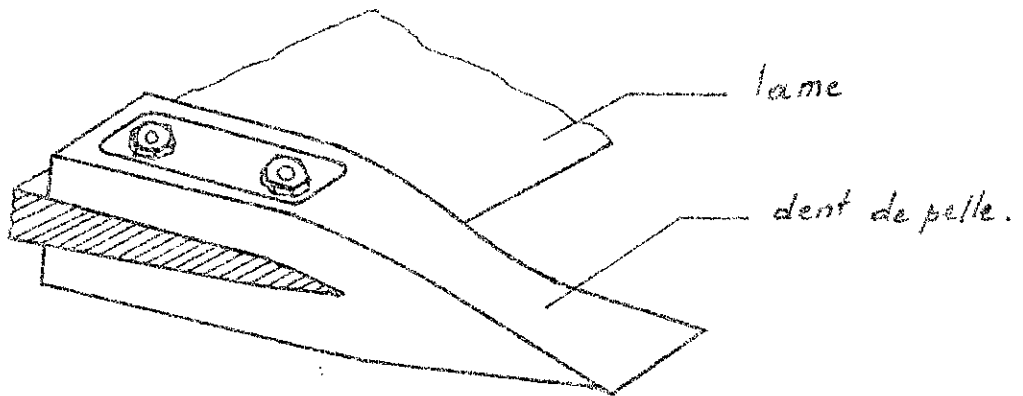
Ce tranchant a une longueur allant jusqu'à 4 m selon le type et la puissance de l'engin. et une largeur à peu près de 20 cm et une épaisseur entre 3,5 et 4 cm dans la plus part des cas.

Cette pièce est fabriquée essentiellement en acier de dureté supérieure à celle du matériau de la partie supérieure restante de la lame.

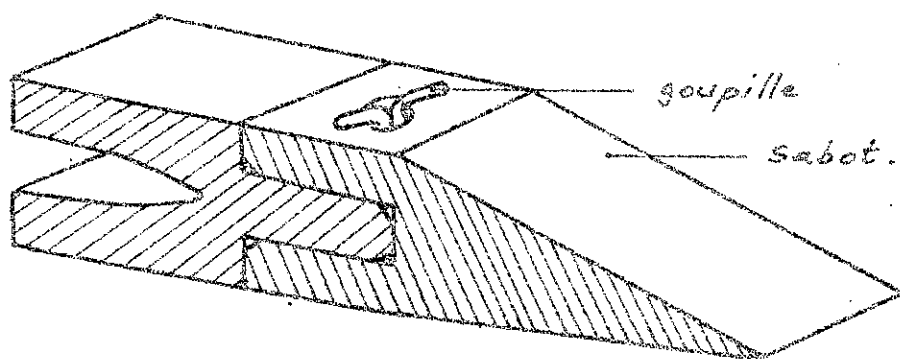
3- Pour certains engins, la partie inférieure de la lame est terminée par des dents tranchantes.

On distingue deux types de dents :

a) La dent est constituée d'une seule pièce fixée à la lame par deux boulons.



b) La dent est constituée de deux pièces, une assemblée à la lame par boulons ou fixée par soudage, et l'autre appelée sabot, assemblée à la première par goupillage. Cette dernière construction est mauvaise, car au cours du travail l'engin est en mouvement et la lame subit des chocs, ce qui fait agrandir progressivement le trou où loge la goupille, jusqu'à la cassure du sabot au niveau du trou.



Il est donc mieux d'avoir un sabot en une seule pièce et le recharger par 2 ou 3 couches de métal dur qu'avoir un, en deux pièces qui peuvent être jetées après leur cassure.

## 2.4 Possibilités de réparation

Parmi les différentes possibilités de réparation des pièces usées nous citons quelques unes :

- 1.- Si le couteau est encastré dans la partie inférieure de la lame et fixé par des rivets, on peut le changer après son usure par une pièce de même matériau et mêmes caractéristiques mécaniques.
- 2.- Si le godet est terminé par plusieurs dents appelées sabots, fixés sur la lame par des boulons, la réparation du godet après l'usure des sabots se fait par remplacement de ces derniers par d'autres nouveaux.
- 3.- Enfin si la partie tranchante est une pièce rapportée soudée à la lame, après son usure il faut la couper au niveau de la soudure pour la changer.

## Conclusion

On remarque que toutes ces possibilités entraînent une grande perte de matière car, chaque fois que la pièce est usée, on la jette pour la remplacer par une autre, ce qui conduit à des frais de réparation importants. D'autre part on sait que l'Algérie importe actuellement presque tous les types d'engins de terrassement utilisés dans ce pays. Donc toute pièce de rechange est importée de l'extérieur, même si l'engin est fabriqué en Algérie tels que les pelles, les dents de leur godets sont importées de l'extérieur, ce qui augmente de plus les frais de réparation.

En plus de ça, pour acheter les pièces de rechange, il faut les commander de l'étranger et attendre l'arrivée de cette commande, et pendant toute cette période d'attente, il y a des engins qui sont en panne, alors les pertes seront énormes et la productivité sera plus basse.

Pour éviter tous ces problèmes, on a cherché à développer une méthode plus économique et plus concrète, c'est la réparation à l'aide de la soudure par superposition. Cette méthode consiste à déposer sur le couteau de la lame ou sur le bout de la dent, deux ou trois couches de matériaux beaucoup plus dur que le métal de base, résistance aux chocs, à l'usure par abrasion et à la corrosion. C'est le rechargement anti-usure

### 3. Procédés de rechargement

#### 3.1. Définition

On entend par rechargement l'action de déposer une ou plusieurs couches de métal fondu sur la surface du métal de base pour obtenir une couche superficielle de bonne résistance à l'usure par abrasion et aux chocs.

Les rechargements s'effectuent :

- Soit sur une pièce neuve, établie aux dimensions voulues pour qu'après rechargement et usinage les dimensions exigées pour la pièce soient obtenues.
- Soit sur pièce usée, mais que l'on désire précisément remettre en service après l'avoir revêtue d'un métal mieux, à même de résister à l'usure ultérieure

#### 3.2. Procédés de rechargement utilisés

- Rechargement au chalumeau
- Rechargement à l'arc manuel, à l'électrode enrobée et semi-automatique.
- Rechargement à l'arc automatique.
- Rechargement par induction.
- Rechargement au chalumeau à poudre.
- Rechargement au plasma.
- Rechargement à l'arc avec électrode vibrante.

Les procédés les plus utilisés sont les trois premiers tandis que tous les autres sont des procédés spéciaux qui demandent une installation spéciale et leurs utilisations sont limitées.

Voilà pourquoi on n'étudiera que les trois premiers procédés : au chalumeau, à l'arc manuel à l'électrode enrobée et semi-automatique et enfin le rechargement à l'arc automatique.



- En utilisant une flamme carburante, il est possible d'augmenter la teneur en carbone de la couche superficielle, donc augmenter sa dureté.

- Utilise une installation très simple et de prix faible.

### Inconvénients

- Les pièces sont chauffées sur une zone assez large ce qui conduit à des déformations importantes.

- Les retraits sont grands à cause de la grande quantité de chaleur donnée par le chalumeau.

- Il n'est pas possible d'automatiser le procédé.

- Il n'est pas possible de régler la teneur en carbone de la soudure.

## 3/4 - Rechargement manuel à l'arc

### a) Rechargement manuel à l'électrode enrobée

Le procédé de soudage manuel à l'arc, utilise l'électrode enrobée de longueur limitée, généralement de 450 mm et cette limitation en longueur ne permet pas d'avoir de longs cordons. Si par exemple, on veut recharger une pièce de longueur 2 m, une électrode ne permet pas d'avoir un cordon de longueur arrivant jusqu'à 2 m et la coupure de soudure pour changer l'électrode cause des discontinuités dans le cordon, qui font partie des défauts de la soudure. Pour cette raison le soudage manuel à l'arc n'est utilisé que pour le rechargement des petites pièces telles que les dents de pelles et en petite série.

Le nombre de pièces déterminant la série soudée à l'arc manuel à l'électrode enrobée est donné à partir du coût de travail.

L'utilisation du soudage manuel à l'arc à l'électrode enrobée est cependant limitée par sa faible productivité.

La vitesse moyenne de soudage est de l'ordre de 17 cm par minute et la consommation de l'électrode de 450 mm de long dure environ une minute.

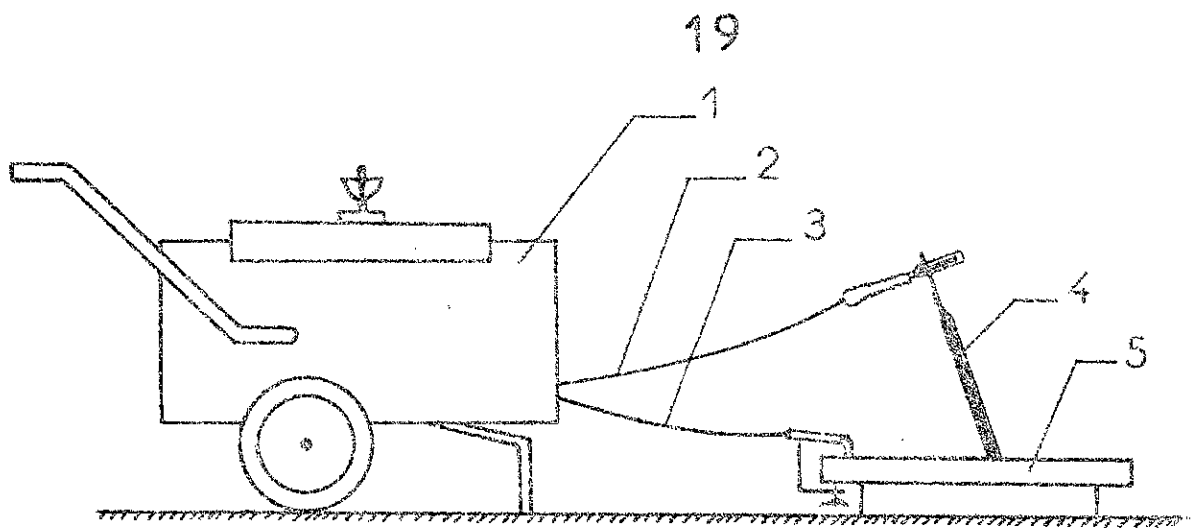
Son avantage est son faible coût en équipement et sa possibilité d'utilisation des installations portatives, ainsi que les possibilités qu'il offre de souder des joints des différents types, en toutes positions et pour une gamme très étendue d'épaisseurs.

Son inconvénient est qu'il exige des opérateurs adroits, pour obtenir des soudures de qualité. De plus on doit prévoir l'enlèvement du laitier de protection après le soudage.

L'électrode utilisée est une baguette de faible longueur, enrobée de flux protecteur pour stabiliser l'arc, produire une couche de gaz et de flux pour protéger l'arc et le métal de la contamination atmosphérique, contrôler les réactions entre la soudure et le métal et introduire éventuellement des éléments d'addition dans la soudure.

Pour souder avec cette électrode, on utilise une installation simple, un poste de soudage, un porte électrode lié à un fil conducteur de courant sortant du poste, l'autre fil, appelé fil de masse, est lié à la pièce à souder ou à recharger.

En mettant l'électrode et la pièce en contact, on crée un circuit de soudage. Au moment où l'on écarte l'électrode de la pièce, l'air qui se trouve entre l'électrode et la pièce s'ionise et devient électroconducteur, ainsi s'établit un arc électrique.



- 1- Poste.
- 2- Câble de soudage et pince porte electrode
- 3- Câble de masse et prise de masse.
- 4- Electrode enrobée.
- 5- Pièce à souder.

Dans certains cas, les rechargements anti-usure exécutés à l'arc sont de qualité inférieure à ceux exécutés au chalumeau pour les raisons suivantes :

- Un mélange du métal de base et du métal déposé se produit dans une plus grande mesure que dans les rechargements au chalumeau, surtout s'il n'y en a qu'une couche de métal d'apport.
- Il est impossible de forger et par conséquent de former à chaud le rechargement à l'arc car celui-ci se refroidit trop rapidement.
- Pour les aciers de base contenant plus que 0,3% de carbone, le refroidissement trop rapide favorise les fissures, il faut alors procéder un préchauffage au chalumeau.
- Dans le cas de rechargements de faible surface, le soudeur au chalumeau reste beaucoup mieux maître de son dépôt que le soudeur à l'arc.

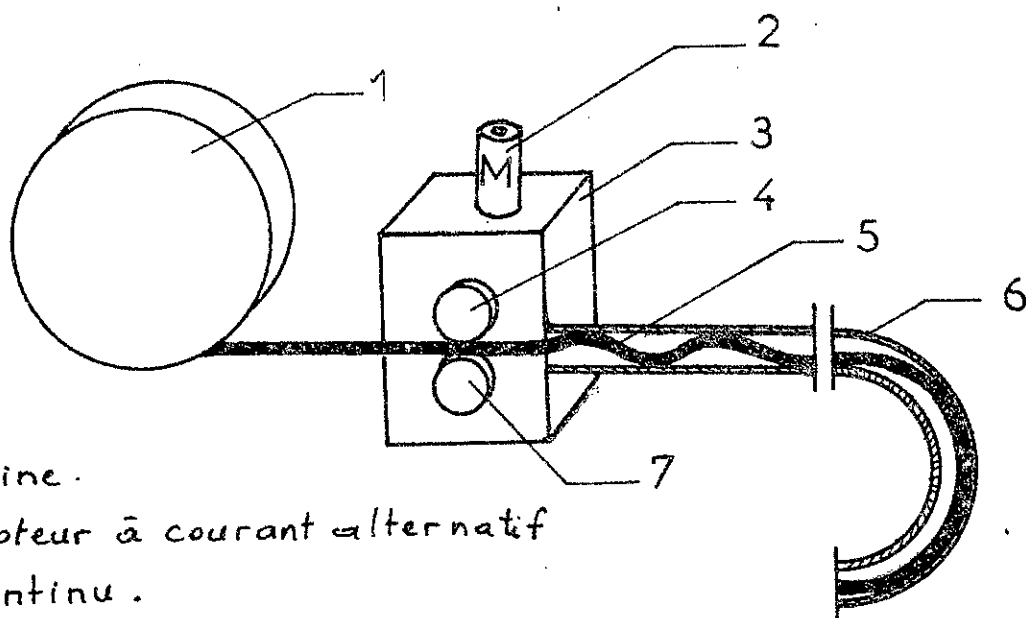
Enfin si la pièce à recharger est massive et la quantité de métal à déposer est importante et si la surface à recharger peut rester brûlée, le rechargement s'exécute toujours à l'arc.



## b) Rechargement semi-automatique

Les procédés de soudage semi-automatiques sont caractérisés par l'emploi de fils fusibles continus, pleins ou fourrés.

L'amenee du fil fusible est mécanisée, alors que pour l'avancement de l'arc l'opérateur procède comme en soudage à l'électrode enrobée. Le vidage automatique du fil depuis la bobine est réalisé grâce à un mécanisme d'entraînement qui comporte un moteur électrique et une boîte de vitesse, la vitesse de dévidage est donc contrôlée par un appareillage propre.



1. bobine.

2. Moteur à courant alternatif ou continu.

3. Mécanisme de translation contenant une boîte à vitesse.

4. Galet menant.

5. Fil fusible.

6. Gaine flexible.

7. Galet de pression.

Les procédés semi-automatiques sont bien adaptés aux travaux de rechargement et de revêtement métallique.

## Composition des installations semi-automatiques

Les installations du soudage semi-automatique se composent des éléments suivants :

- Un générateur de courant de soudage.
- Une source de gaz (pour les procédés utilisant un flux gazeux).
- Groupe de refroidissement (si la lance ou torche est refroidie artificiellement).
- Faisceau de raccordement.
- Moto-évideur.
- Lance de soudage (pistolet ou torche).
- Accessoires.
- Matériels complémentaires.

Une des parties essentielles de la machine semi-automatique est constituée par une gaine flexible qui comporte une spirale, une tresse métallique et un revêtement en caoutchouc. Le fil fusible avance en traversant le canal intérieur de cette gaine. Le courant de soudage, le gaz protecteur et l'eau de refroidissement sont amenés d'une façon indépendante.

## Avantages

- Les avantages d'utilisation des procédés semi-automatiques sont :
- possibilité de rechargement de l'ensemble des métaux en toutes épaisseurs
  - Avantages économiques, qui valent au soudage semi-automatique d'être généralement préféré à l'électrode enrobée, lorsque le prix de revient est un élément décisif dans le choix du procédé de rechargement.

- Encombrement et poids des installations assez limités pour permettre un facile déplacement.

- Facilité de former rapidement de bons opérateurs, qu'ils aient ou non soudé à l'électrode avant d'aborder le semi-automatique.

- Grande vitesse de soudage.

- Arc visible.

- Excellentes caractéristiques mécaniques des dépôts.

- Facilité d'emploi.

- Absence de laitier à éliminer après soudage.

## Inconvénients

- Le soudage semi-automatique utilise un gaz inerte comme gaz de protection tel que l'argon, l'hélium et leurs mélanges.

Les gaz inertes ne sont pas solubles dans le métal du bain de fusion et ne se combinent pas avec le métal fondu ni avec ses oxydes. Ils ne font que protéger l'arc et le bain de fusion contre l'action des gaz de l'air ambiant.

### b.1. Soudage TIG semi-automatique

Le soudage TIG est un procédé dans lequel la chaleur nécessaire à la fusion du métal constituant la soudure est fournie par un arc électrique amorcé et maintenu entre une électrode de Tungstène qui ne fond pas aux températures de soudage ( $3500^{\circ}\text{C}$ ) et la pièce.

Le bain de fusion, l'arc et l'extrémité de l'électrode sont protégés contre l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air par l'écoulement continu autour de l'électrode d'un gaz inerte (hélium ou argon ou hélium + argon)

Le métal d'apport est indépendant de la torche de

soudage et se présente sous forme de fil continu.

La méthode de rechargement est en général de droite à gauche. Le mode opératoire se rapproche beaucoup de celui du chalumeau.

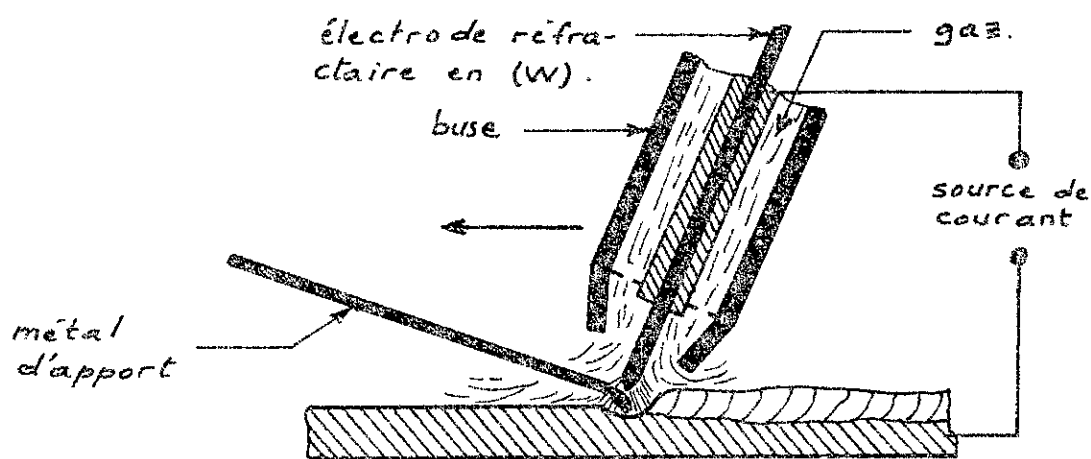
Plus qu'en rechargement à l'arc il y a lieu de veiller à un bon départ de l'opération, ainsi que de soigner la terminaison pour éviter toute crique.

### Avantages du procédé

Les cordons réalisés sont de très haute qualité. L'état de surface du cordon de rechargement est de très bel aspect (propre et brillant) et le bain de fusion n'est pas pollué au cours du rechargement.

### Inconvénients du procédé

La préparation des surfaces à recharger doit être soignée. Le métal d'apport et les pièces découpés, d'où un prix élevé. Le rendement énergétique de l'arc est peu élevé (40%).



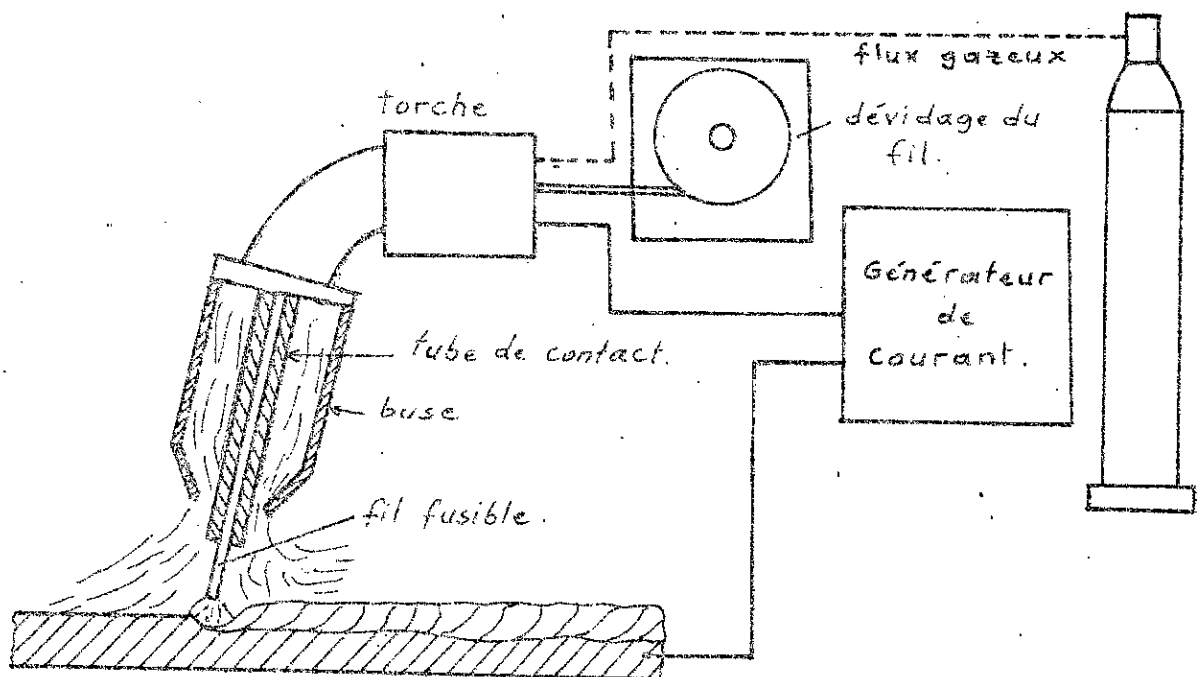
— Schéma de principe du rechargement

T.I.G semi-automatique —

## b.2 - Soudage M.I.G ou M.A.G semi-automatique

Les procédés M.I.G (Métal. Inert. Gas) et M.A.G (Métal Active Gas) sont des procédés dans lesquels la fusion du métal destiné à former le rechargement est produite principalement par la chaleur d'un arc établi et maintenu entre un fil électrode consommable et la pièce.

La seule différence entre le procédé M.I.G et le procédé M.A.G est que le procédé M.A.G utilise un gaz de protection actif, donc des réactions chimiques interviennent dans le plasma de l'arc, dans les gouttes au cours du transfert et au niveau du bain de fusion. Quant au procédé M.I.G, le gaz de protection utilisé est un gaz inerte.



Soudage M.I.G ou M.A.G schéma de l'installation et de principe

## Avantages du procédé

Au regard du soudage à l'arc avec l'électrode enrobée, la productivité du procédé est nettement supérieure. Le procédé peut être automatisé et l'état des soudures ne demande aucune finition. On peut souder pratiquement tous les matériaux soudables, en toutes positions.

## Inconvénients du procédé

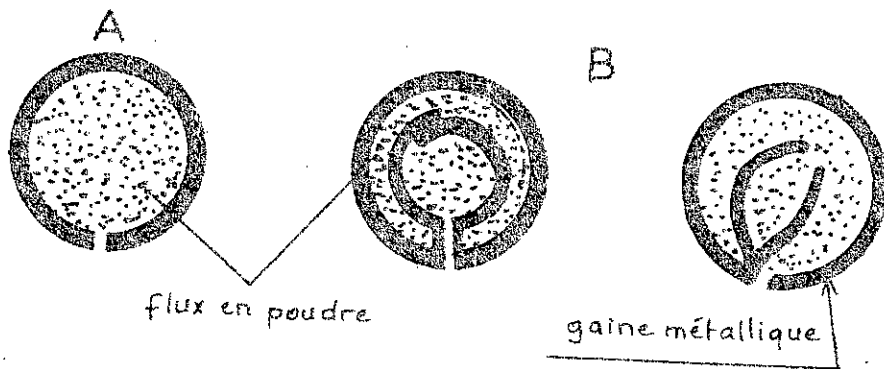
Il réclame de la part du soudeur une bonne qualification; sous certains régimes, le risque de collage est réel et pas toujours décélable, d'où la difficulté d'un choix judicieux des paramètres. D'autre part, le soudage avec protection gazeuse doit se faire dans une atmosphère calme, à l'abri du vent et des courants d'air violents, ce qui pose des problèmes sur les chantiers.

### b 3 - Soudage semi-automatique avec fil fourré

Ce procédé de soudage à l'air libre (open arc) est caractérisé par l'emploi d'un fil tubulaire, mais dont l'âme contient tous les éléments assurant la parfaite qualité du dépôt métallique sans qu'il ait besoin de faire intervenir une protection gazeuse.

Au fur et à mesure de la fusion du fil électrode certains constituants du flux sont vaporisés dans l'arc et dans l'espace environnant pour former une atmosphère dense et efficace que l'air ambiant ne pénètre pratiquement pas.

Simultanément les produits non vaporisés rejoignent le bain de soudure pour y jouer les rôles de fondant ou de désoxydant.



Différents types de fils fourrés (A: tubulaire, B: feuillard)

### 3.4 - Rechargement automatique

Le soudage automatique est plus performant et donne des soudures de qualité meilleure que le soudage manuel.

Dans le cas des cordons de longueur dépassant 2 m, ainsi que dans le cas du rechargement d'une série de pièces suffisamment grande (dents de pelles), l'automatisation du soudage se trouve nécessaire et plus économique.

En soudage automatique, toutes les opérations principales sont automatisées : amorçage de l'arc, avance de l'arc, extinction. Elles sont effectuées par des appareils automatiques appelés tracteurs de soudage ou têtes mobiles.

Il ne reste à l'opérateur que de régler l'appareil, de surveiller le travail, de brancher et de débrancher l'installation.

Ce procédé ne réclame pratiquement aucune opération de finition car il présente un bel aspect du cordon.

Parmi ses avantages : la vitesse élevée de dépôt des cordons, le bel aspect de leur surface et la profondeur de pénétration. L'automatisation du soudage permet

de diminuer la main-d'œuvre nécessaire et de réduire la durée de fabrication ainsi que d'améliorer la qualité de fabrication et en diminuer le prix de revient.

### 3.4.1 Soudage automatique sous flux

Ce procédé utilise un fil-electrode nu bobiné recouvert en général d'une pellicule de cuivre qui le protège contre la corrosion superficielle.

Le flux apporté sous forme de poudre recouvre complètement le bain de soudage et l'extrémité du fil-electrode. L'arc se trouve donc entièrement couvert par le flux ce qui donne au procédé la plupart de ses avantages parmi lesquels ceux qui suivent :

- Le soudeur n'a besoin d'aucune protection contre l'éclat de l'arc.
- Le procédé est propre, la fumée produite étant peu abondante et le laitier se détache facilement.
- Le flux fondu reste sur la soudure sous la forme d'un laitier vitrifié, le poids de flux étant à peu près égal à celui du fil. Au dessous de ce laitier la soudure a un aspect de surface lisse, presque sans ondulations.

Mais le procédé ne reste pas sans inconvénients :

- La préparation des pièces à souder doit être faite avec grande précision tout le long du joint, afin d'éviter l'apparition de défauts tels que des manques de fusion, des manques de pénétration et des effondrements.
- Les positions possibles de soudage sont limitées par la viscosité du laitier.
- L'intensité de soudage est liée au débit du fil-electrode, ce qui peut conduire à certaines difficultés dans le choix des paramètres de soudage.



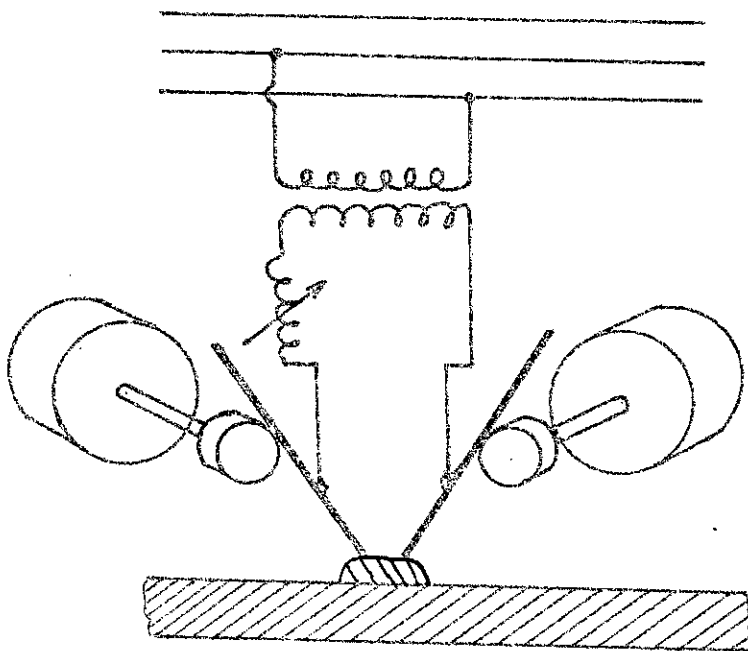
### 3.4.2 Soudage sous flux avec plusieurs fils - électrodes

En soudage automatique sous flux on peut utiliser plusieurs fils - électrodes qui permettent d'étendre le domaine d'emploi du procédé, on parle alors de soudage à électrodes multiples.

Deux électrodes peuvent être placées en série, étant reliées à la même source de courant et espacées de 6 à 10 mm ou 30 à 60 mm en cas de fortes intensités.

Si elles sont disposées côte à côte, on peut recharger par une seule passe une surface large. Cette méthode en série permet d'avoir un taux de dépôt important et une pénétration faible.

Le courant utilisé de préférence est le courant alternatif parce que des arcs multiples de même polarité en courant continu s'attirent. En montage en série des deux fils qui sont alimentés par une seule source, les deux arcs jaillissent en série. Etant de polarité contraire, ils tendent à s'éloigner l'un de l'autre.



- Soudage sous flux à 2 fils en série -

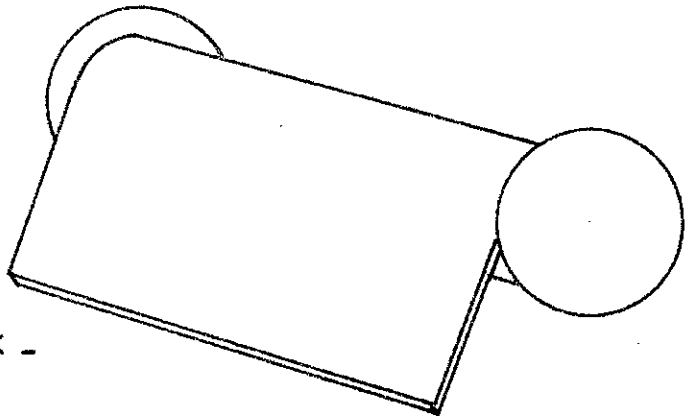
### 3.4\_3 Soudage automatique sous flux avec feuillards

Il est possible d'utiliser pour le rechargement automatique sous flux une électrode ruban ou feuillard afin d'avoir une large passe. La durée de rechargement se trouve beaucoup plus courte que celle du rechargement avec fil-électrode.

On a constaté que l'arc au cours du soudage se promène le long de toute la longueur de l'électrode.

Dans notre cas ce procédé ne peut être appliqué que pour le rechargement des lames.

- Feuillard pour soudage sous flux -



### 3.4\_4 Soudage T.I.G automatique

Si toutes les opérations manuelles du soudeur, telles que le déplacement de la torche le long du cordon, le balancement de cette torche, etc... sont assurées par des organes mécaniques, le rôle du soudeur se bornant à présenter les pièces sur la machine, à la mettre en marche, à surveiller sa marche en corrigeant, si besoin est, les paramètres du soudage, à arrêter la machine et à évacuer la pièce lorsque le soudage est terminé, on a atteint le stade du

Soudage mécanisé.

Lorsque l'on retire à l'opérateur les fonctions qu'il conservait ci-dessus, le soudage est devenu entièrement automatique.

Le but de l'automatisation est :

- Diminuer le temps total d'exécution par augmentation de la vitesse de soudage, par réduction des temps morts, par exécution simultanée de plusieurs soudures.
- Le remplacement d'heures de travail humain par des heures de machine quand on voit que ce remplacement constitue une économie.
- Amélioration de la qualité de soudure
- Meilleur aspect des cordons de soudure.
- possibilité d'utiliser une main d'œuvre de qualification plus modeste.

### Installation du soudage T.I.G automatique

L'installation est composée des éléments suivants :

- a. source de courant.
- b. la torche.
- c. le porte torche coulissant formant avec la torche la tête de soudage.
- d. le moteur de régulation de la longueur d'arc.
- e. le support mobile (ou chariot) d'entraînement de la tête de soudage.
- f. le dévidoir du fil d'apport et sa gaine.
- g. le moteur à vitesse variable du dévidoir
- h. la bobine de fil d'apport.
- i. les fils de prise de tension à l'arc.
- j. le coffret de commande du courant de soudage

muni d'un dispositif de réglage.

l. le coffret de commande de vitesse de fil.

m. le coffret de commande de séquence.

n. la source de gaz.

o. le circuit de refroidissement de la torche.

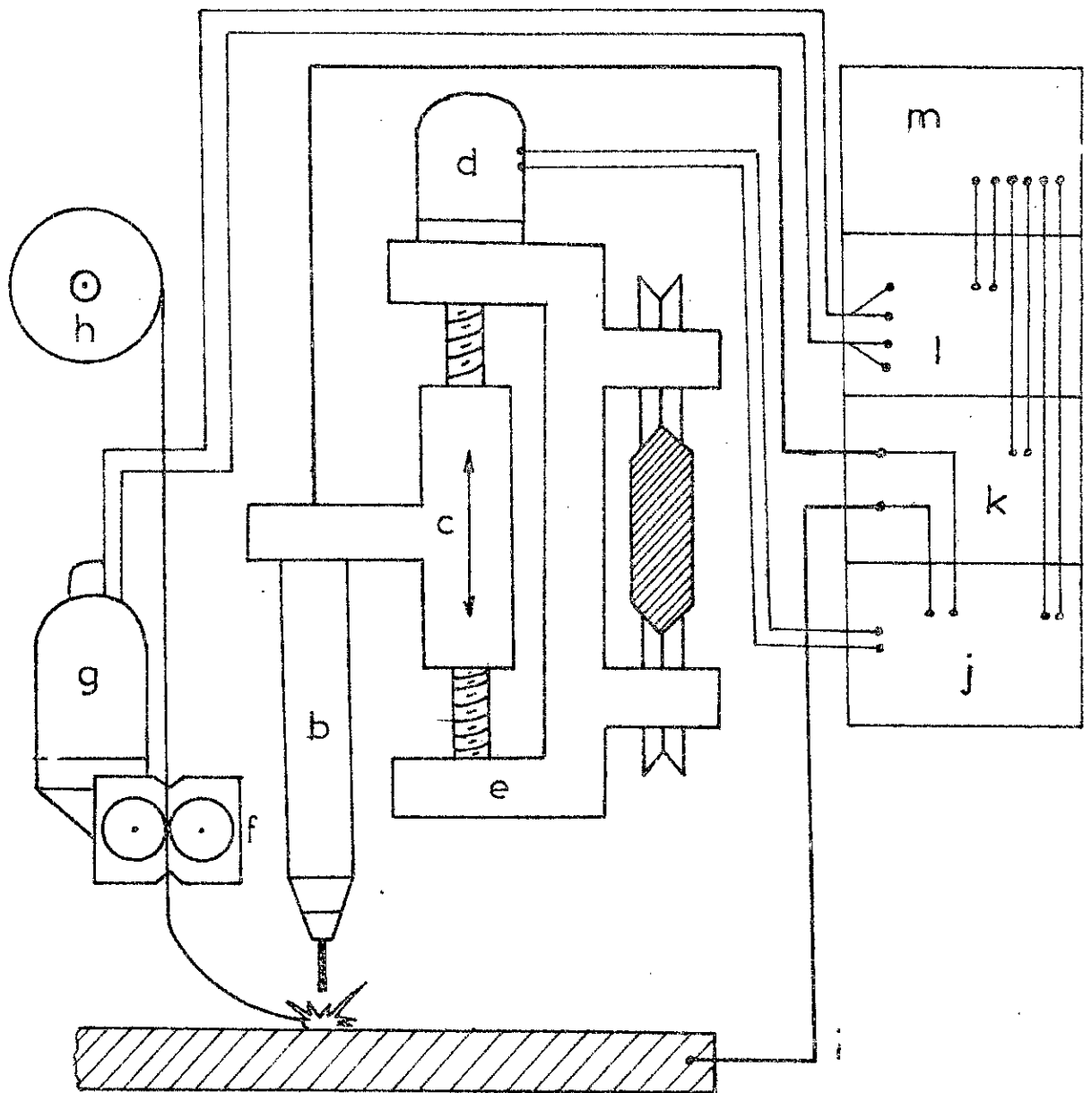


Schéma d'installation du procédé T.I.G  
automatique

### 3.4\_5 Soudage M.I.G automatique

En ce qui concerne l'automatisation du procédé M.I.G la définition est proche ou presque la même que celle du procédé T.I.G automatique.

Les propriétés particulières de ce procédé sont:

- Facilité de réglage des paramètres de soudage et autorégulation de la longueur d'arc.
- Existence de deux modes principaux de transfert du métal fondu à travers l'arc (par courts-circuits ou par pulvérisation).
- En soudage par courts-circuits, possibilité de souder en position, de souder des toles relativement minces (jusqu'à 0,8 mm), et de souder des toles oxydées.
- En soudage par pulvérisation: importance et forme favorable de la pénétration, possibilité de souder de fortes épaisseurs, vitesse de fusion élevée grâce à la forte densité de courant. Mais la grande pénétration dans les procédés de rechargements est un inconvénient, car on évite la forte pénétration afin de diminuer la mesure de mélange du métal de base avec le métal rapporté.
- Absence de laitier à éliminer.
- Emploi de gaz ( $CO_2$ ) ou de mélange de gaz peu onéreux.
- Amorçage de l'arc instantané et sans défaillances.
- Facilité d'éviter le cratère terminal lors de l'exécution de l'arc
- Absence de poussières susceptibles de gêner la marche des machines automatiques.
- Faible déformation des pièces soudées.
- Emploi d'une main-d'œuvre de qualification modeste.

## 3.5 - Régulation de la longueur d'arc

### 3.5.1 Soudage semi-automatique

En soudage semi-automatique, le gaz et le fil sont alimentés par un conduit flexible jusqu'à une torche tenue à la main.

La vitesse de déroulement du fil fusible est constante, l'arc est auto-régulé.

Quand un arc de longueur ( $l_1$ ) est perturbé, la torche étant brusquement éloignée de la pièce. La longueur d'arc est momentanément augmentée jusqu'à la longueur ( $l_2$ ), ce qui, comme l'indique la figure (3.5.1.1), fait croître la tension et diminuer l'intensité de courant. La figure (3.5.1.2) montre qu'une diminution d'intensité provoque une diminution du taux de fusion (la vitesse du fil étant constante), ce qui détruit l'équilibre entre le taux de fusion et la vitesse de fil, cette dernière devenant la plus grande des deux. L'extrémité de l'électrode, par conséquent, se rapproche de la pièce et la longueur d'arc d'équilibre est retrouvée.

Si la longueur ( $l_1$ ) est diminuée jusqu'à la longueur ( $l_0$ ), la tension diminue et l'intensité de courant augmente, le taux de fusion se trouve donc augmenté. L'extrémité du fil fond avec une vitesse plus grande que la vitesse de déroulement jusqu'à l'obtention de la longueur ( $l_1$ ) de l'équilibre de l'arc.

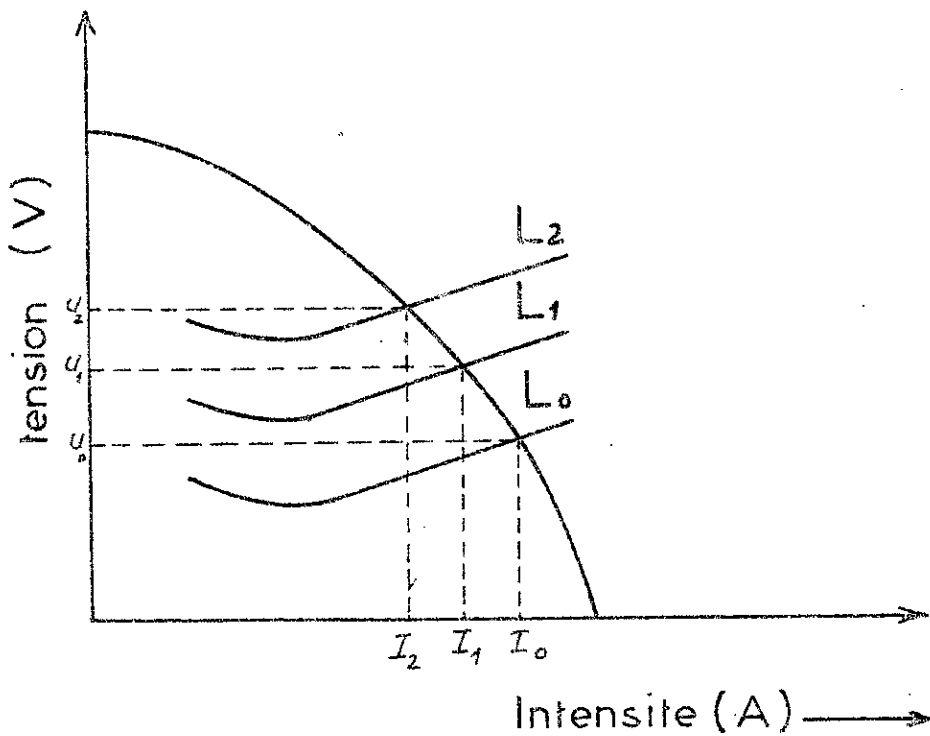


Fig.3.5.1.1 - Courbe tension - intensité d'un arc de longueur croissante  $L_2 > L_1 > L_0$

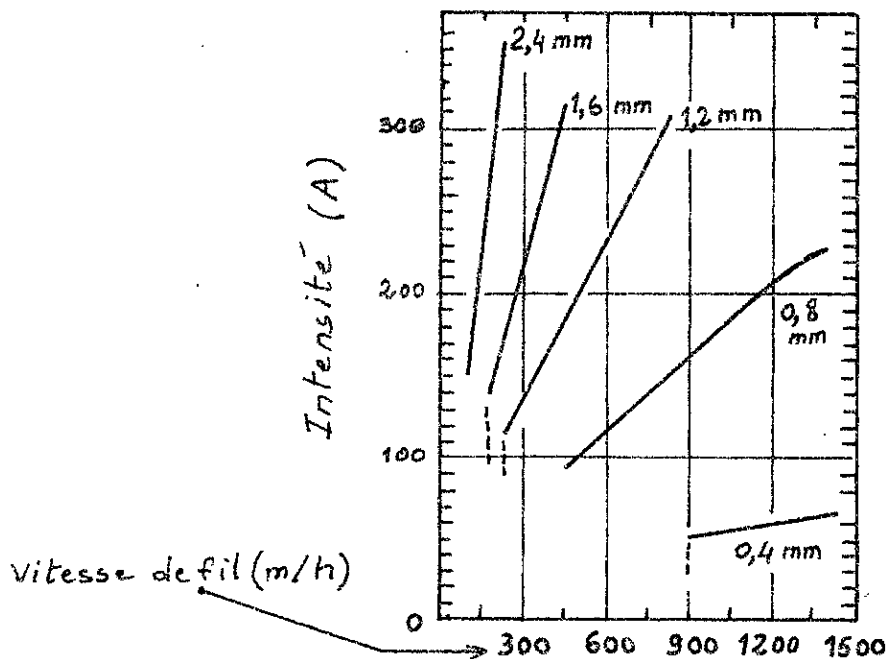


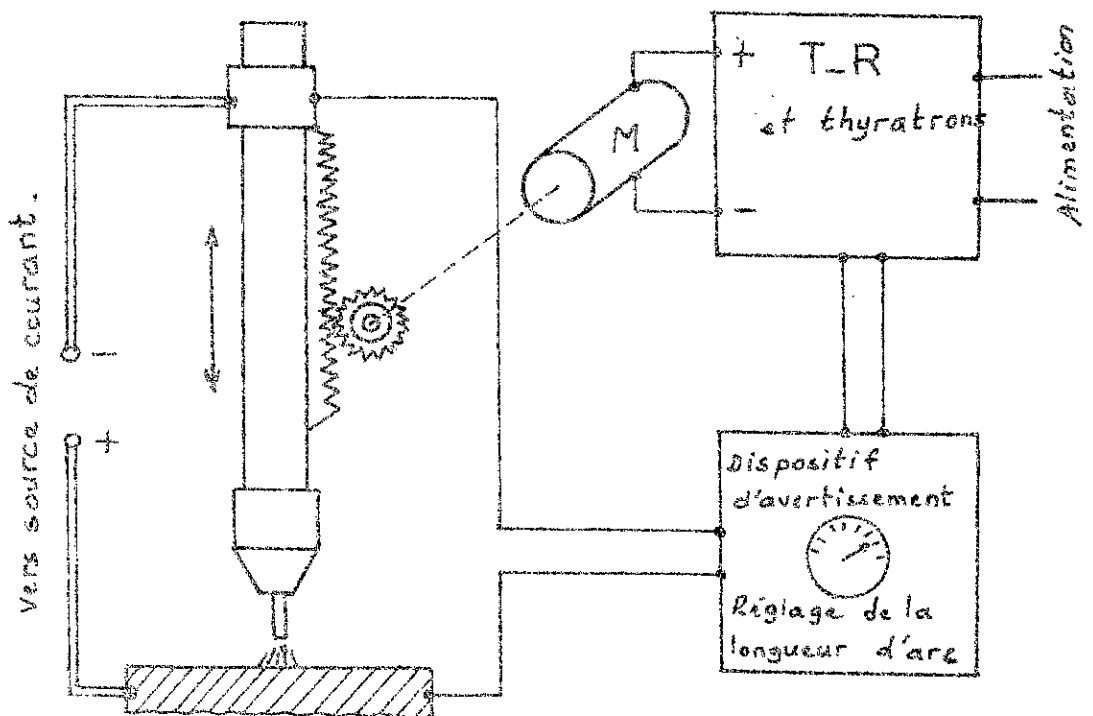
Fig 3.5.1.2 - Courbes caractéristiques de taux de fusion pour différents diamètres de fils.

### 3.5.2 Soudage automatique

Avec une tête de soudage automatique, la régulation de la longueur d'arc est assurée par un dispositif appelé contrôleur de longueur d'arc, le rôle de ce dernier est de modifier la distance de l'électrode à la pièce de façon telle que la longueur d'arc soit constante.

En raison de la rapidité des phénomènes à corriger, ce servo-mécanisme doit avoir des temps de réponse très courts.

En soudage T.I.G automatique, la régulation est assurée par le déplacement de l'électrode en tungstène à l'aide d'un moteur qui ne marche que lorsque la régulation est nécessaire.



- Schéma du contrôleur de longueur d'arc en soudage T.I.G automatique -



En soudage automatique avec fil-electrode fusible la régulation de la longueur d'arc est assurée par la variation de la vitesse de dévidage du fil, c'est à dire que le moteur entraînant les galets de dévidage ralentit lorsque la longueur d'arc est diminuée et accélère lorsque la longueur d'arc est augmentée. Si la longueur d'arc est équilibrée, la vitesse du moteur reste constante.

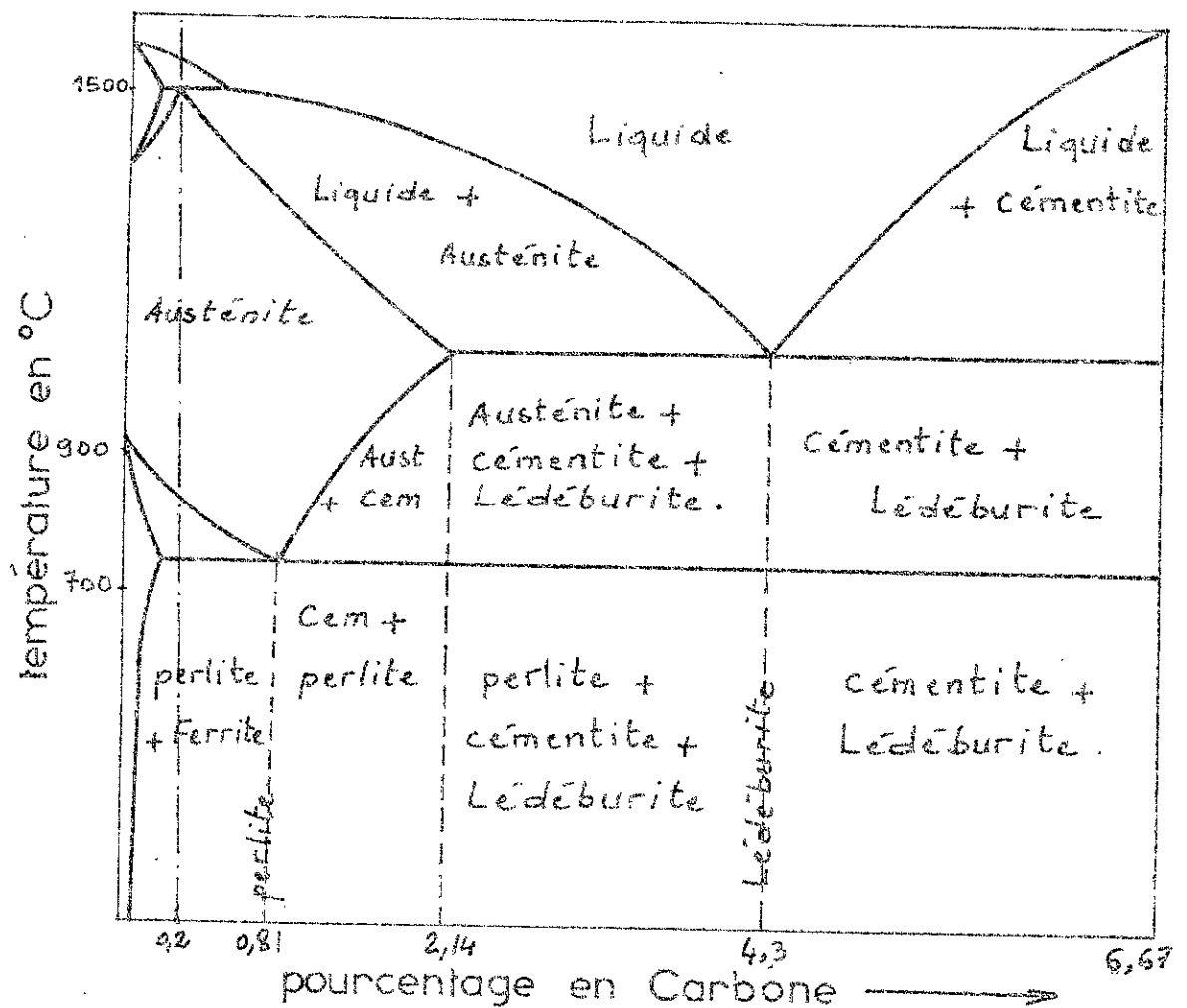
Le schéma du contrôleur de la longueur d'arc est comme celui du soudage T.I.G automatique.

## ch.4

## 4.1 Etude du matériau des pièces usées

La lame est fabriquée en acier ordinaire au carbone dont le pourcentage de carbone est d'environ 0,2%.

Cette pièce est obtenue par laminage, par déformation plastique à chaud à la température 900° ou 1000°C. Durant le laminage la lame est refroidie à l'air ce qui donne à l'acier un recuit de normalisation d'où l'obtention de la structure ferritique-perlitique.



— Diagramme d'équilibre Fer-Carbone —

La dent est fabriquée en acier au carbone coulé dont le pourcentage de carbone est 0,2%, cet acier est refroidi à l'air, ce qui permet de transformer l'austénite en ferrite et perlite d'où la structure ferritique perlitique de cet acier. Cette transformation est montrée par la figure ci-dessus.

#### 4.1.1 Soudabilité de l'acier de base

Depuis l'apparition des premiers procédés de soudage, le terme soudabilité a été employé en de multiples occasions, pour qualifier le comportement d'un matériau pendant ou après soudage.

La soudabilité est définie par le Comité I.S.O

##### 4.1.1.1 Définition

On dit qu'un matériau est soudable à un degré donné, par un procédé et pour un type d'application donnés, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondantes à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'établir la continuité métallique par la construction des joints soudés, qui par leurs propriétés locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont aux caractéristiques requises et choisies comme base de jugement.

On peut envisager la soudabilité sous trois aspects :

- soudabilité opératoire.
- soudabilité métallurgique.
- soudabilité constructive ou globale.

### 4.1.1.2 Soudabilité opératoire

Elle précise la possibilité d'assurer la continuité de la matière entre les pièces à assembler, donc la soudabilité opératoire donne les possibilités du choix du procédé, type de joint, séquences de soudage etc...

### 4.1.1.3 Soudabilité métallurgique

Elle est nommée aussi soudabilité locale. Elle rend compte de la possibilité d'obtention, pour un matériau donné, d'un assemblage aussi homogène que possible, en conservant les propriétés mécaniques et chimiques du métal de base.

La notion de soudabilité métallurgique revient à prendre en compte les modifications du métal de base à la suite du cycle thermique de soudage, la composition chimique et les caractéristiques mécaniques de la zone fondue.

La soudabilité métallurgique est liée à la structure allotropique de la zone affectée par la chaleur, ainsi que celle de la zone fondue (structure fragile, fissures, etc...) et à la présence de contraintes résiduelles élevées capables d'augmenter les risques de fissuration.

### 4.1.1.4 Soudabilité globale

Elle forme un tout avec les soudabilités opératoire et métallurgique, elle est liée à la conception mécanique de la pièce soudée.

Il ya un certain nombre de facteurs qui déterminent la soudabilité globale ; le choix du matériau,

Ses caractéristiques mécaniques et chimiques, les possibilités de déformation de la pièce soudée et la limite d'élasticité (plus la limite d'élasticité diminue, plus la soudabilité augmente).

#### 4.1.1.5 Notions sur le carbone équivalent (C.E)

En connaissant la composition chimique du matériau de base, il est possible de préjuger sa soudabilité globale, grâce à des formules dites "teneur en carbone équivalent". Le carbone étant choisi comme élément de base. Il est affecté à chaque élément d'addition (Cr, Mn, Mo, etc...) un coefficient de pondération.

La formule ci-dessous est une formule simple pouvant être utilisée dans la pratique courante (du cahier de charge S.N.C.F).

$$C.E = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Cu}{13}$$

Cette formule pratique n'est valable que pour des pourcentages d'éléments d'addition inférieurs aux valeurs ci-dessous.

$$\begin{array}{ll} \%C = 0,5\% & ; \quad \%Mn = 1,6\% \\ \%Ni = 3,5\% & ; \quad \%Mo = 0,6\% \\ \%Cr = 1\% & ; \quad \%Cu = 1\% \end{array}$$

La commission de l'Institut International de Soudure a adopté une formule légèrement différente :

$$C.E = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%V + \%Mo}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15}$$

Connaissant le C.E de l'acier il est facile de :

- rejeter ou d'accepter l'acier de base.
- Soit de prendre toutes les précautions technologiques permettant de réaliser une opération de soudage rationnelle (préchauffage, diamètre de l'électrode, plan de soudage, etc...).

Les valeurs de C.E suivantes, déterminent la soudabilité métallurgique.

- \*  $C.E < 0,4 \Rightarrow$  Acier parfaitement soudable à froid, si le pourcentage de carbone est inférieur à 0,23%.
- \*  $0,45 < C.E < 0,7 \Rightarrow$  Acier moyennement soudable, à condition de préchauffer de  $100^\circ$  à  $400^\circ C$  suivant l'épaisseur.
- \*  $C.E > 0,7 \Rightarrow$  les aciers deviennent difficilement soudables, donc mauvaise sécurité dans la réalisation.

Pour déterminer le degré de soudabilité de l'acier de base, il est donc nécessaire de calculer son (C.E).

En ce qui concerne le matériau des pièces usées des engins de terrassement, il contient 0,2% de carbone

alors : 
$$C.E = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Cu}{13}$$

$$C.E = 0,2\%$$

L'acier de base est alors parfaitement soudable, car le  $C.E < 0,4$  et  $\%C < 0,23$ .

Mais l'épaisseur des pièces a aussi une influence sur la soudabilité, d'où on a adopté une formule de carbone équivalent compensé (C.E.C).

-Carbone équivalent compensé (C.E.C)

$$C.E.C = C.E + 0,0254 e.$$

$e$  : épaisseur de la pièce à souder en [cm].

Toute pièce en acier présentant un C.E.C  $> 0,5$  est douteuse en soudage.

-Calcul de C.E.C des pièces à recharger :

L'épaisseur des lames à recharger est entre 35 mm et 40 mm. En prenant le cas le plus défavorable.

$e = 4$  cm. et on a : C.E = 0,2 %.

$$C.E.C = C.E + 0,0254 \cdot e.$$

$$C.E.C = 0,2 + 0,0254 \times 4 = 0,3016.$$

$$C.E.C = 0,3016 \%$$

donc la soudabilité de l'acier de base reste parfaite.

Pour trouver l'épaisseur limite pour laquelle l'acier reste toujours soudable on applique cette dernière formule. on sait que si C.E.C  $< 0,5$  l'acier est parfaitement soudable.

$$C.E.C = C.E + 0,0254 e.$$

$$0,5 = 0,2 + 0,0254 \cdot e_l \Rightarrow 0,0254 \cdot e_l = 0,3$$

$$\Rightarrow e_l = \frac{0,3}{0,0254} \Rightarrow e_l = 11,81 \text{ cm.}$$

prenons :  $e_l = 11 \text{ cm.}$

D'après cette formule, même si l'épaisseur arrive jusqu'à 11 cm il n'est pas nécessaire de prévoir un préchauffage à la pièce à recharger, même pour les sabots et les dents des pelles, le rechargement se fait sans préchauffage car, la gamme d'épaisseur à laquelle l'acier reste bien soudable est très étendue elle arrive jusqu'à 110 mm.

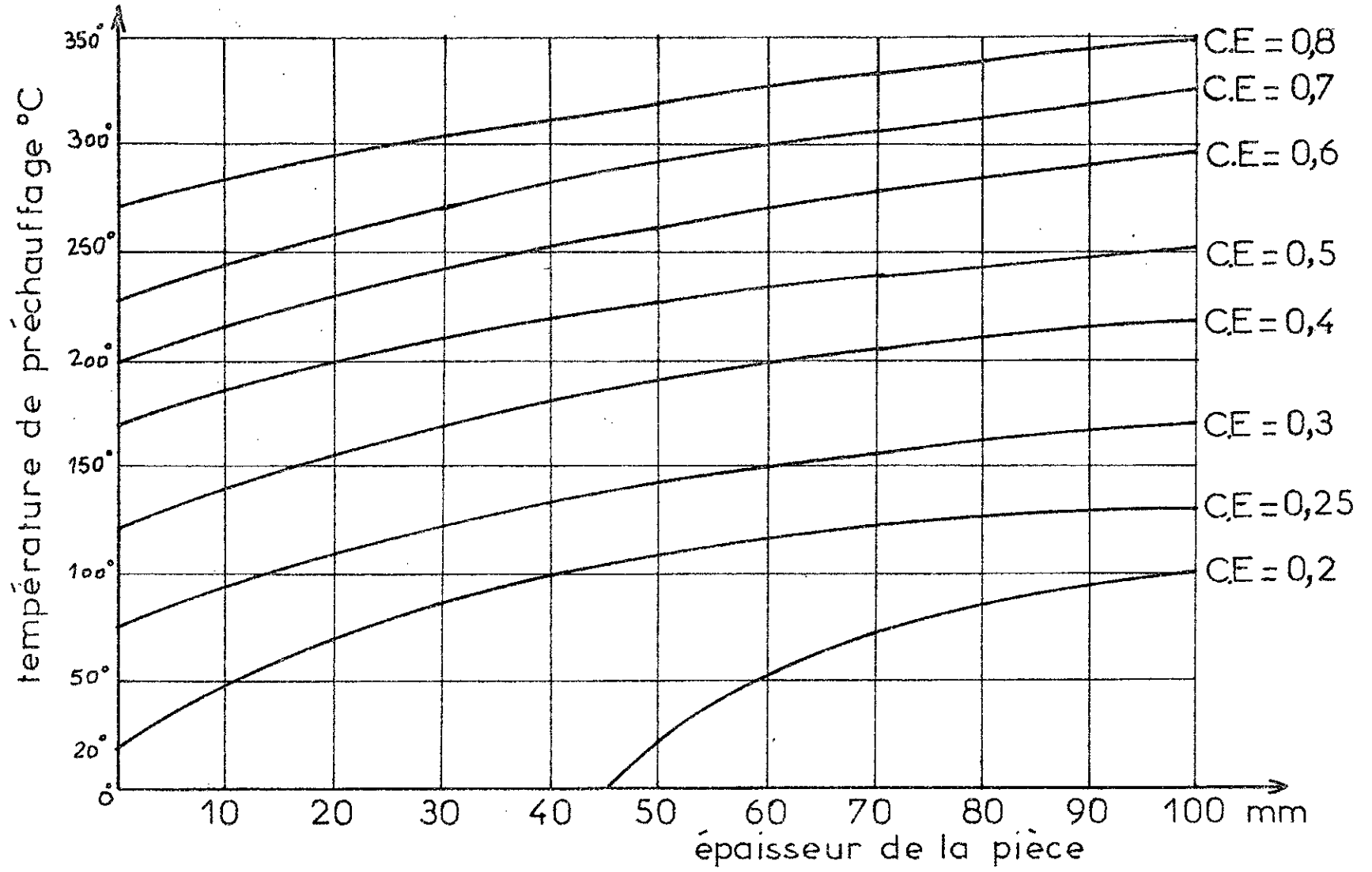
#### - Détermination de la température de préchauffage par méthode graphique

Il y a une méthode plus pratique qui se présente dans un ensemble de graphes donnant la température de préchauffage en fonction de l'épaisseur pour un C.E. donné de l'acier de base, donc le degré de soudabilité de l'acier.

Par cette méthode on peut savoir si le rechargement nécessite un préchauffage ou non, aussi bien dans le cas des dents (qui sont plus épaisses) que dans le cas des lames.

Dans notre cas l'épaisseur des pièces à recharger ne dépasse pas les 50 mm, même pour les dents. Connaissant le C.E. (0,2% dans notre cas) on trouve que le rechargement ne nécessite aucun préchauffage par lecture directe sur le graphe suivant.





## 4.2 . Etude du rechargement

Aux rechargements anti-usure le matériau déposé doit être choisi de telle manière qu'il satisfasse aux conditions suivantes :

- Résistance à l'usure abrasive.
- Résistance aux chocs.
- Résistance à la corrosion.

Pour cela on a choisi un matériau rapporté de structure martensitique ou ferrito-martensitique, qui contient un pourcentage suffisamment élevé de chrome.

Les aciers martensitiques sont des alliages se rattachant au type Fer-chrome pour le rechargement anti-usure, dont la composition est telle qu'ils traversent au cours de leur refroidissement, à partir du solidus, un domaine de température dans lequel ils se transforment complètement de ferrite delta en austénite.

Pratiquement tous ces aciers sont auto-trempants, ce qui veut dire que, l'austénite ne se transforme pas en ferrite  $\alpha$  et carbures au cours du refroidissement à l'air, depuis le domaine austénitique. L'austénite reste stable dans ces conditions jusqu'à une température dite "point Ms", à partir de laquelle, elle se transforme sans diffusion en martensite. Cette transformation martensitique se termine à une température dite "Point Me".

Ces températures s'abaissent lorsque la teneur en Cr augmente et lorsque d'autres éléments d'alliage sont présents dans l'acier.

Si l'acier de rechargement a 5% de Cr, il a déjà une résistance à l'oxydation, nettement supérieure à celle des aciers ordinaires. Cette propriété est bonne pour protéger l'acier de base contre la corrosion due à l'oxygène de l'atmosphère et à l'humidité.

## 4.2.1 Influence des éléments d'alliage et des impuretés sur le rechargement

### -Influence du carbone:

Permet d'accroître la résistance à la rupture et la dureté. Son rôle est actif, il favorise lors du cycle thermique, la présence d'une structure martensitique, dans le métal de base de la zone affectée par la chaleur. Son action est renforcée par la présence d'autres éléments d'addition, tels que le Cr, le Mo, le Mn, le Ni, etc. Au-delà de 0,8% de carbone, le soudage des aciers est à rejeter.

### -Influence du chrome:

Il entre dans la composition des aciers résistant à l'usure. Il augmente la résistance à la rupture des aciers faiblement alliés. A forte teneur (13%) et allié au carbone à faible teneur (< 0,25%), il entre dans la composition des aciers martensitiques.

### -Influence du Nickel:

Il améliore les caractéristiques générales des aciers et entre dans la composition des aciers inoxydables lorsqu'il est allié au Cr.

### -Influence du Manganèse:

Il augmente de manière sensible les caractéristiques mécaniques de l'acier. Dans le métal d'apport, il a un rôle désoxydant. A fort pourcentage (13%), l'acier devient très résistant aux chocs et à l'usure.

### -Influence du Molybdène:

Pour des teneurs inférieures à 1%, il accroît la résistance à chaud ou diminue la fragilité. Dans les aciers inoxydables, il améliore la tenue à la corrosion.

### -Influence du Silicium:

Au-delà de 0,5%, la soudabilité est mise en cause. En teneur de 0,04 à 0,25%, il permet la désoxydation, donc de calmer l'acier.

### -Influence du Vanadium:

Il permet avec d'autres éléments, un accroissement des caractéristiques de traction, avec une teneur d'environ 0,08 %.

### -Influence de l'Aluminium:

L'Aluminium est un élément désoxydant, plus énergique, il est ajouté dans le cordon pour avoir un acier calmé à l'Aluminium. Les oxydes d'Al sont légers, donc ils viennent surnager à la surface avec le laitier.

### -Influence des impuretés (S et P):

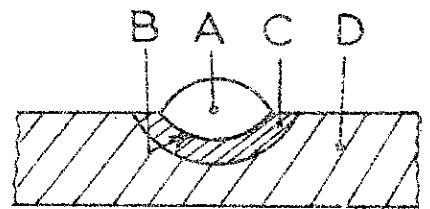
Le soufre et le phosphore sont très défavorables dans le cordon de rechargement. Leurs actions sont:

augmentation de la fragilité de l'acier, risque de soufflures ou de criques. A la température de fusion du fer (1539°C), le sulfure de fer  $FeS$ , les phosphures  $Fe_3P$ ,  $Fe_2P$  et  $FeP$ , sont très solubles dans le fer. En principe la teneur du phosphore et du soufre ne doit pas dépasser 0,04% de S et 0,04% de P. Des teneurs de 0,07% de chacun, commencent à poser des problèmes au rechargement.

## 4.2.2 Présentation macrographique d'un cordon de rechargement

On distingue quatre zones principales, disposées symétriquement par rapport au plan médian d'un cordon:

- A- Zone fondue.
- B- Zone de liaison.
- C- Zone affectée par la chaleur.
- D- Zone non affectée.



### 4.2.2.1 Zone fondue

Au centre du cordon se trouve la zone fondue, c'est celle où, durant l'exécution du rechargement, l'état liquide a été obtenu. L'état fondu a été momentané, la solidification

est intervenue par l'éloignement de la source de chaleur.

Dans le cas du rechargement la zone fondue est obtenue par une seule passe (une couche) ou par plusieurs couches.

Durant l'opération de rechargement, le métal fondu est le siège de divers réactions, qui font évaluer sa composition chimique, d'une manière variable selon le procédé considéré.

#### 4.2.2.11 Influence de $N_2$ , $O_2$ et $H_2$ sur le métal fondu

L'échauffement de l'air pendant le rechargement conduit à la dissociation des molécules d'oxygène, d'azote et d'hydrogène en atomes et en ions. Très actifs à l'état atomique, ces éléments forment des composés chimiques avec les éléments constitutifs de l'acier. Un composé chimique est d'autant plus soluble dans le fer que la température est plus élevée et que l'acier contient moins de carbone.

##### - Influence de l'oxygène:

À la température de fusion, l'oxygène atomique se combine avec le fer pour donner un oxyde ferreux  $FeO$ , qui se dissout dans le fer à 0,21% d'oxygène. À l'état dissous l'action de l'oxygène est sensible sur les caractéristiques mécaniques (résistance à la rupture et résilience diminuent). Sous forme d'oxydes, il compromet la compacité du cordon de rechargement et la capacité de déformation de la pièce.

##### - Influence de l'Azote:

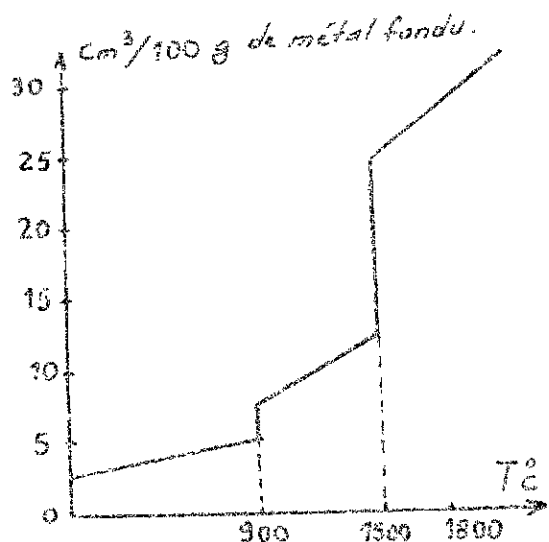
L'Azote se combine avec le fer et donne des nitrures de fer  $Fe_4N$  et  $Fe_2N$ , qui agissent sur la résilience et l'aptitude du métal au durcissement structural.

Ces nitrures se dissolvent dans le fer à 0,044% d'azote.

##### - Influence de l'Hydrogène:

Qu'il s'agisse de rechargement à l'arc sous atmosphère gazeuse, sous flux ou avec électrode enrobée, l'atmosphère de l'arc est susceptible de contenir de l'hydrogène qui joue un rôle défavorable, surtout dans le rechargement des aciers, où le  $H^+$  est

susceptible de se dissoudre dans le métal fondu d'autant plus que la température est élevée comme l'indique la courbe de sieverts suivante :



- Solubilité de l'hydrogène dans le fer en fonction de la température -

La zone fondue continue à absorber l'hydrogène jusqu'à la saturation 30 cm<sup>3</sup>/100 g de métal fondu.

L'hydrogène provient de l'humidité absorbée par le flux, les enrobages ou même les pellicules d'oxydes des fils d'apport, ou de la vapeur d'eau de combustion des matières organiques de certains enrobages.

Après un essai de traction effectué sur le métal fondu après rechargement, on peut observer des points sombres situés au centre d'une tache plus claire dûs à la présence de l'hydrogène. Ce phénomène est appelé œil de poisson, qui provoque une certaine dégradation des propriétés mécaniques de l'acier.



#### 4.22.12 Protection du métal fondu

Par la protection du métal fondu on cherche à éloigner les impuretés, pour assurer la pureté du métal de rechargement, pour cela on utilise des procédés physiques et chimiques.

Le procédé physique consiste à :

- sécher et calciner les produits d'apport afin de supprimer

toute trace d'humidité donc d'oxygène et d'hydrogène.

- Éliminer toute trace de rouille, d'huile et d'eau sur la surface des pièces à recharger.

- Créer un milieu protecteur soit par une atmosphère gazeuse ou soit par un milieu liquide (laitier), résultant de la fusion de produits solides (flux ou enrobage).

Le procédé chimique consiste à désoxyder le métal du bain de fusion, ainsi qu'à éliminer les sulfures, les phosphures, les Nitrures et l'hydrogène, au moyen de réactions chimiques qui font apparaître de nouveaux composés chimiques insolubles dans le fer, qui passeront dans le laitier.

Pour la désoxydation on utilise soit un élément pur (C, Al) soit un ferro-alliage (FeMn, FeSi, FeTi, etc.) soit un oxyde salin ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ), soit un gaz réducteur (CO)

L'oxyde ferreux  $\text{FeO}$ , soluble dans le fer, forme des composés chimiques insolubles après réaction:



$\text{MeO}$  et  $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  sont insolubles dans le fer.



$\text{FeS}$  est soluble dans le fer, tandis que  $\text{CaS}$ , à une vitesse de refroidissement faible, monte à la surface et passe dans le laitier.

$\text{CaF}_2$  entre en réaction avec l'azote et l'hydrogène atomiques à haute température et forment le  $\text{NF}$  et le  $\text{HF}$  insolubles dans le fer.

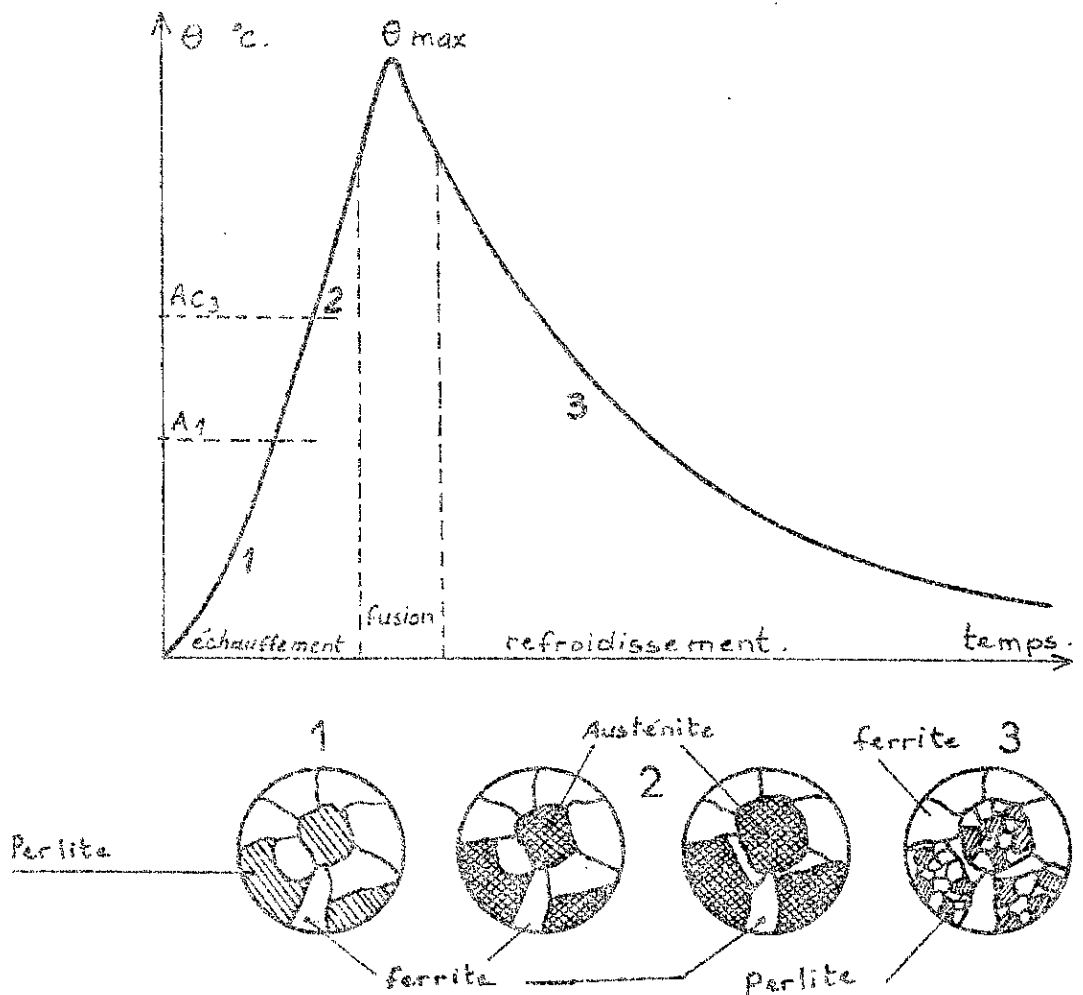
#### 4.2.2.2 Zone affectée par la chaleur (Z.A.C.)

La zone affectée par la chaleur se trouve après la zone fondue, le métal de base subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations modifiant la structure du métal de base. Ces transformations sont liées

à la température maximale atteinte et aux conditions de refroidissement du cordon rechargé.

À la température ambiante, avant le rechargement, le métal de base avait une structure ferritique-perlitique, au cours de chauffage, lorsque la température atteint  $A_{c3}$  la perlite se transforme en austénite. Lorsque la température dépasse le point  $A_1$  (723°C) une partie de la ferrite se transforme progressivement en austénite, d'où le grossissement des grains austénitiques avec la diminution des grains ferritiques.

Au cours du cycle de refroidissement l'austénite se transforme en ferrite et perlite mais les grains austénitiques transformés sont plus fins.



Cycle thermique de soudage et transformations structurales



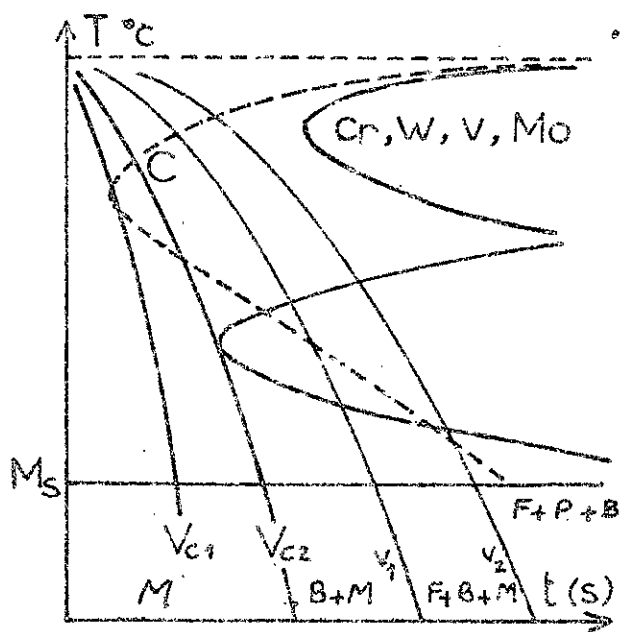
### 4.23 Transformations en refroidissement continu (diagrammes T.T.T)

Généralement par un refroidissement continu plus ou moins rapide on amène les pièces rechargées à la température ambiante.

Ces diagrammes permettent, pour un acier donné, de relier la structure métallographique formée, élément essentiel de la métallurgie de soudage, au cycle thermique subi par la zone affectée par la chaleur, et plus particulièrement la durée de refroidissement ( $\Delta t_{\frac{800}{500}}$ ).

Les diagrammes (T.T.T) nous permettent de déterminer la vitesse critique de refroidissement. C'est à dire la vitesse à laquelle la structure formée est purement Martensitique.

Les éléments d'addition (Cr, W, V, Mo, ...) déplacent les courbes (T.T.T) à droite et les divisent en deux courbes, c'est à dire que la vitesse de refroidissement critique sera diminuée, d'autant plus, que le pourcentage des éléments d'addition est augmenté, jusqu'à l'obtention d'une vitesse critique égale à la vitesse de refroidissement à l'air.



M : Martensite

B : Bainite

F : Ferrite

P : Perlite.

----- : Acier au carbone

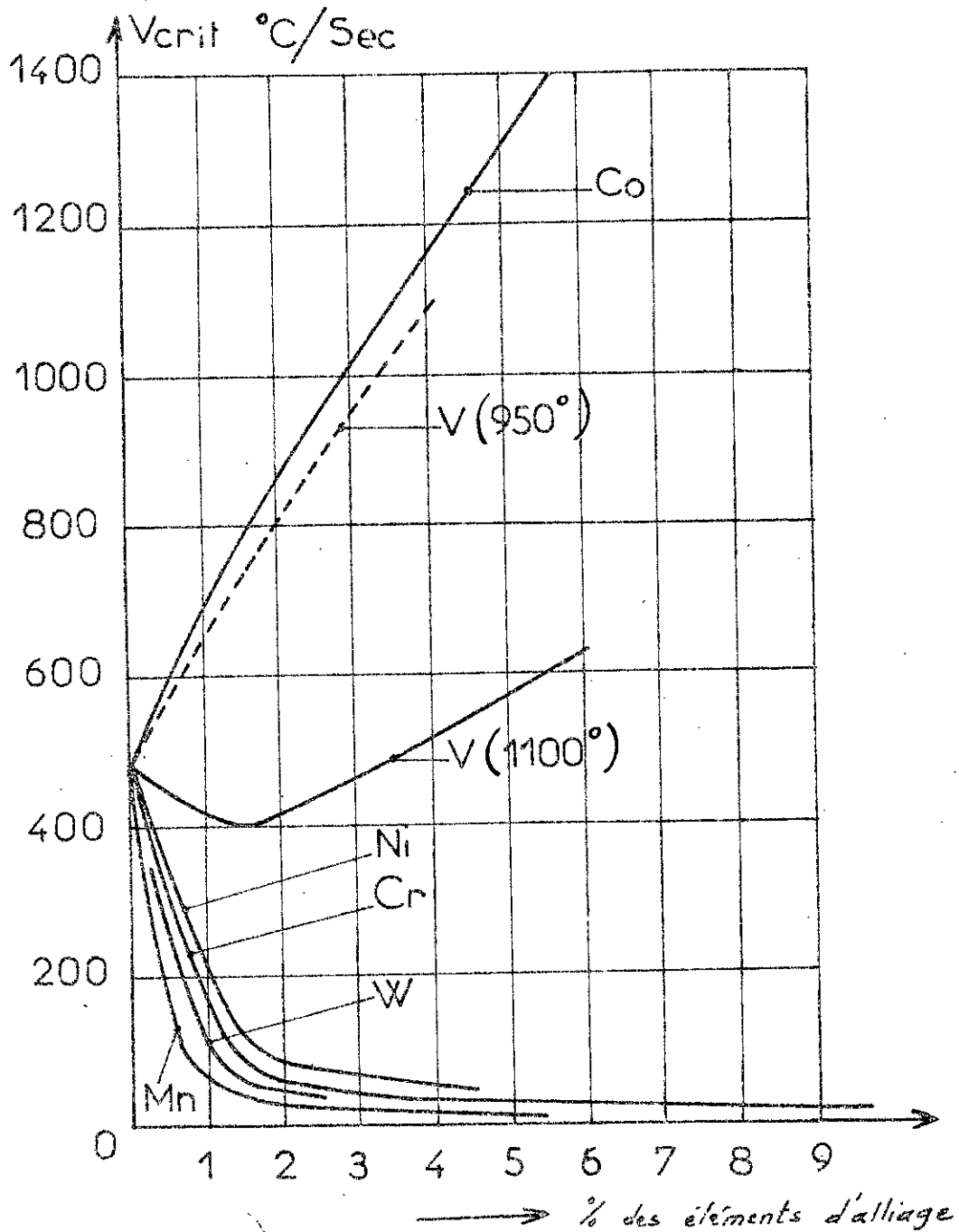
————— : Acier allié

$V_{c1}, V_{c2}$  : vitesses critiques.

$V_2 < V_1 < V_{c2} < V_{c1}$ .

- Diagramme (T.T.T) -

La courbe ci-après permet de déterminer la vitesse de refroidissement de la soudure en fonction du pourcentage des éléments d'addition (Fig. A).



— Fig. A —

## 4.2.4 Rechargements hétérogènes

Le matériau de base et le métal rapporté sont de natures différentes. Le matériau rapporté a une structure martensitique ou ferrito-martensitique, tandis que le matériau de base a une structure ferrito-perlitique.

Au cours du rechargement une proportion de métal rapporté sera mélangée avec le métal de base fondu, en formant une autre structure différente de celle du métal de base et du métal rapporté. Ce phénomène est appelé "dilution".

On définit le rapport de dilution par :

$$d\% = \frac{\text{Masse du métal de base fondu}}{\text{Masse de toute la zone fondue}} \times 100$$

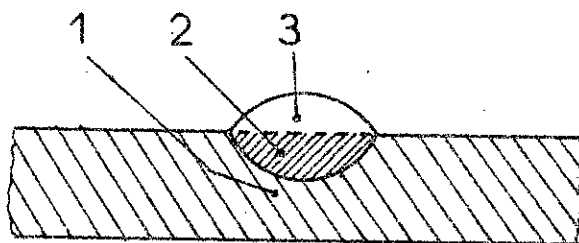


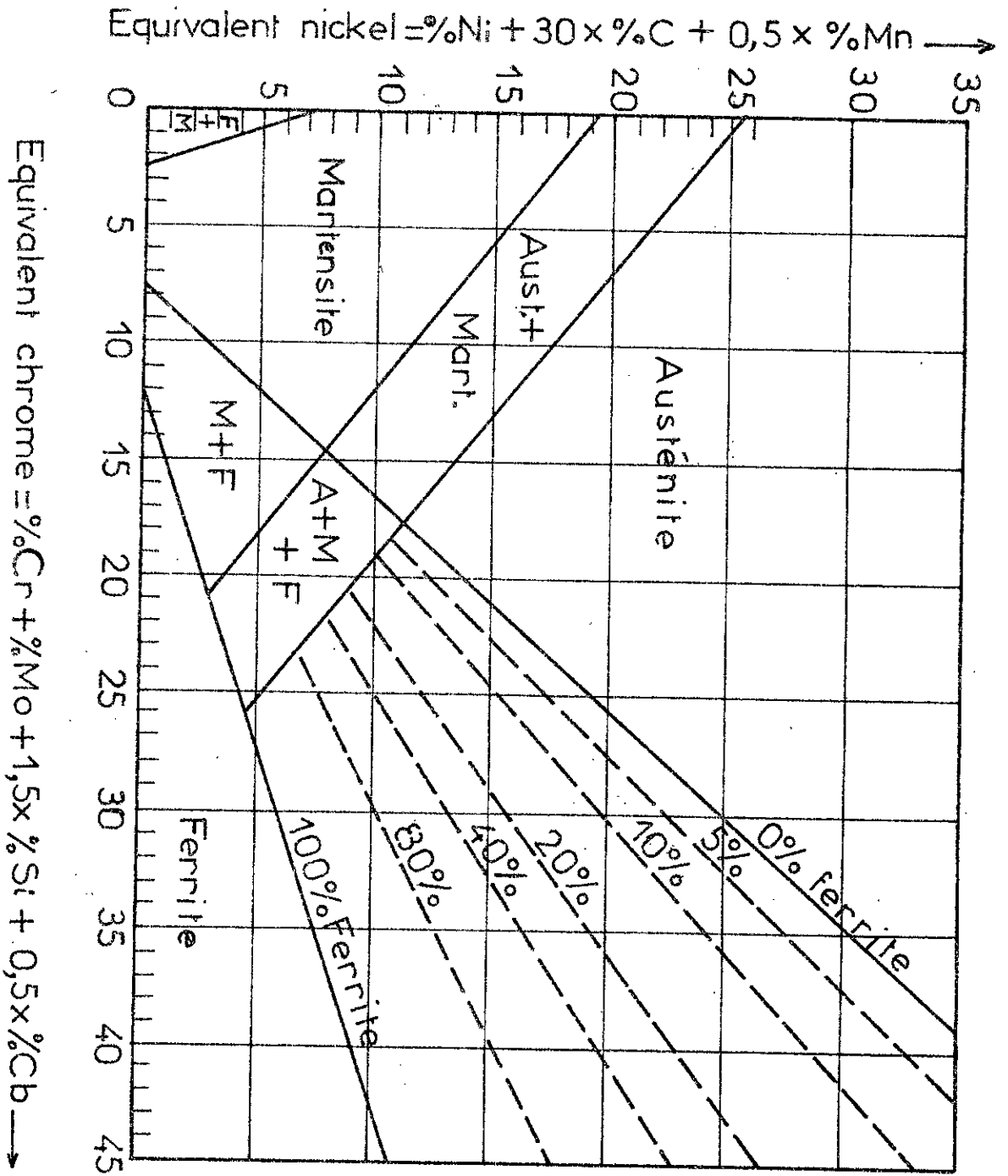
Fig 4.24 a

### Structures résultantes de la dilution:

Dans un rechargement hétérogène, on trouve 3 zones distinctes en allant du métal de base non affecté thermiquement jusqu'au métal fondu le plus éloigné de la ligne de fusion, (fig. 4.2.4 a):

- 1- Le métal de base affecté par la chaleur.
- 2- Une zone fondue affectée par la dilution.
- 3- Le métal fondu constitué de métal d'apport pratiquement pur.

Pour résoudre les problèmes posés par la dilution, en particulier, pour le choix des métaux d'apport, On se rapportera utilement à la représentation de Schaeffler, qui permet de déterminer la constitution physico-chimique du métal fondu, compte tenu de la dilution, en fonction de celles du métal de base et du métal rapporté non dilué.



- Fig 4.24.b -

- Diagramme de Schaeffler -

## 4.2.5 Phénomènes de fissuration des rechargements:

### 4.2.5.1 Fissures à chaud

Elles se forment sous l'effet du retrait, lors du refroidissement de la soudure. Elles sont dues à l'association de plusieurs facteurs:

- Propriétés à chaud du bain de fusion (métal de base + métal d'apport), qui dépendent de la composition chimique de la zone fondue. Le soufre et le phosphore affaiblissent la résistance mécanique de ces zones, pour éviter cet affaiblissement il ne faut pas dépasser les valeurs suivantes:

$$S < 0,04\% ; P < 0,04\% ; Mn/S > 20$$

- Les contraintes dues à une structure de trempe martensitique de la zone affectée par la chaleur et à la limite d'élasticité du métal d'apport.

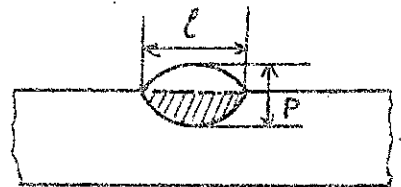
Pour éviter la fissuration de la zone fondue il faut avoir:  $l/p > 0,7$ , avec:  $l$  = largeur du cordon.

$p$  = profondeur du cordon.

- et  $I/U$  ne doit pas être trop important.

avec:  $I$  = intensité de courant.

$U$  = tension.



### 4.2.5.2 Fissures à froid

La fissuration à froid apparaît à basse température dans la zone affectée par la chaleur, parfois quelques heures après le rechargement.

Les fissures à froid naissent surtout lors de la première couche de rechargement. Elles sont dues aux principales causes suivantes:

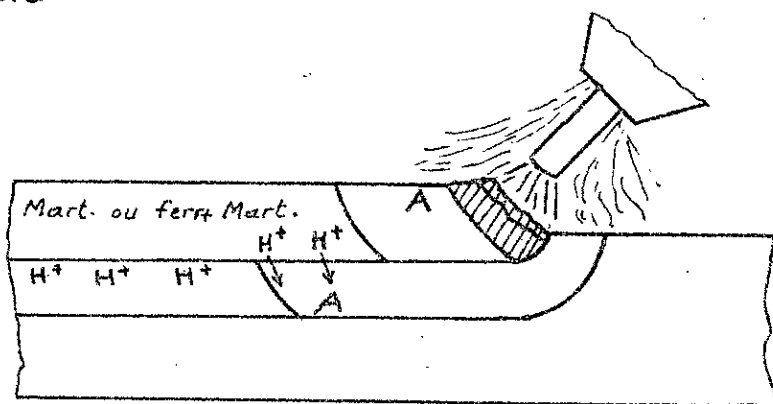
- Structure fragile dans la Z.A.C: Les paramètres de

refroidissement  $\Delta t_{500}^{800}$  influent sur la structure de la zone affectée par la chaleur, si cette durée de refroidissement est faible, c'est à dire refroidissement rapide, alors la structure obtenue à cette zone est fragile. Si la vitesse de refroidissement est convenablement choisie de telle manière que la structure de la Z.A.C. ne sera pas martensitique, la fissuration se trouve évitée.

La présence du chrome à haute teneur dans le métal d'apport, donne au matériau de la zone fondue affectée ou non par la dilution, une bonne résistance aux micro-fissures.

— Présence de l'hydrogène dans la Z.A.C. et la zone fondue:

Au cours du refroidissement, les transformations allotropiques s'effectuent dans la zone où la température a dépassé le point  $Ac_3$ . On sait que l'hydrogène est très soluble dans l'austénite, alors pendant le refroidissement, la zone fondue est déjà transformée avant que la Z.A.C soit transformée de l'austénite à la perlite et la ferrite. Cette différence de structure provoque la migration de l'hydrogène atomique dans la Z.A.C qui est la cause des fissurations à froid.



Mécanisme de diffusion de l'hydrogène dans la Z.A.C. (dépôt d'un acier martensitique ou ferrito-martensitique).

Pour éviter les fissures à froid, il faut avoir une électrode fusible contenant moins d'hydrogène et choisir le procédé de

rechargement qui assure mieux la protection du métal contre l'effet de l'hydrogène.

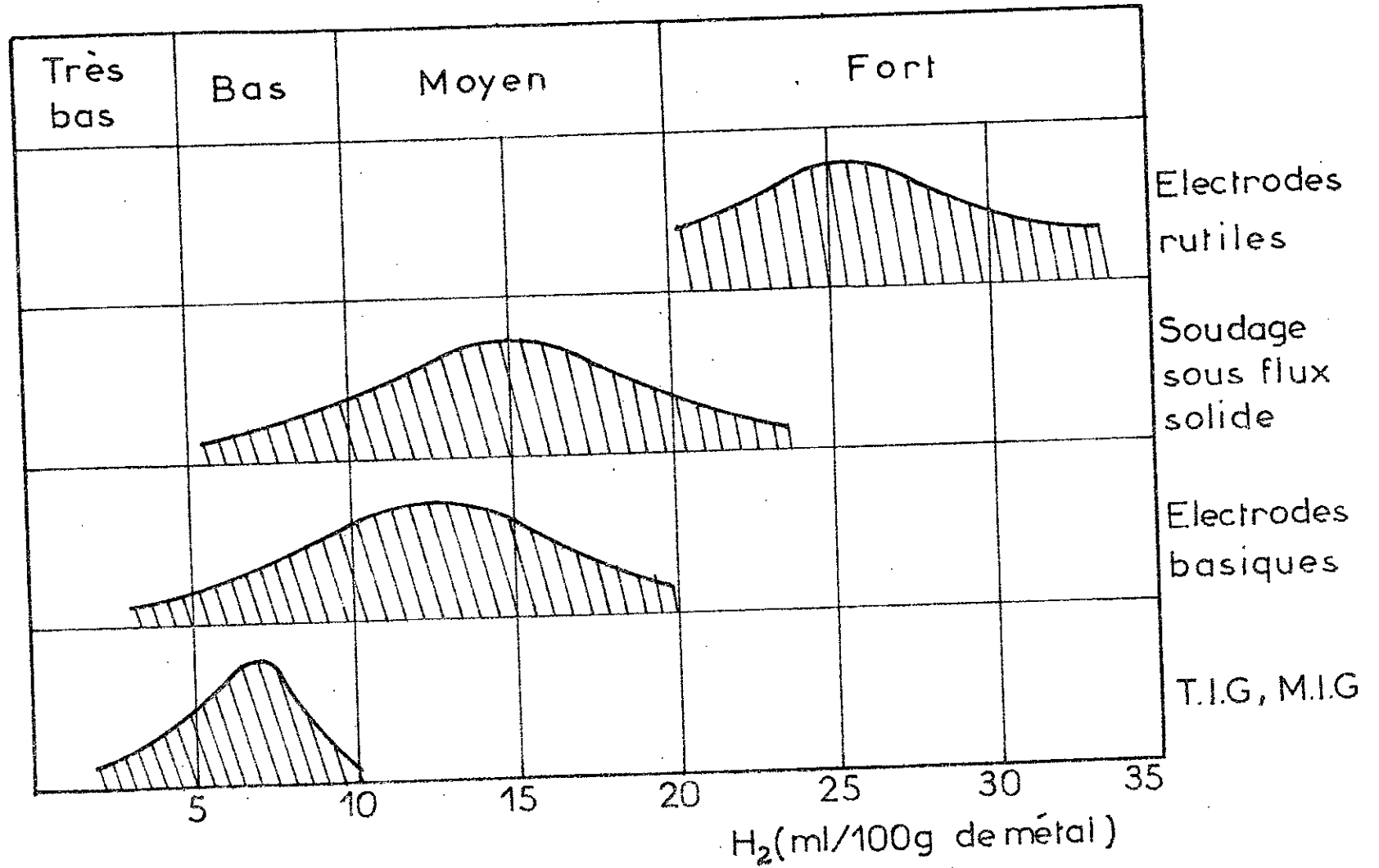


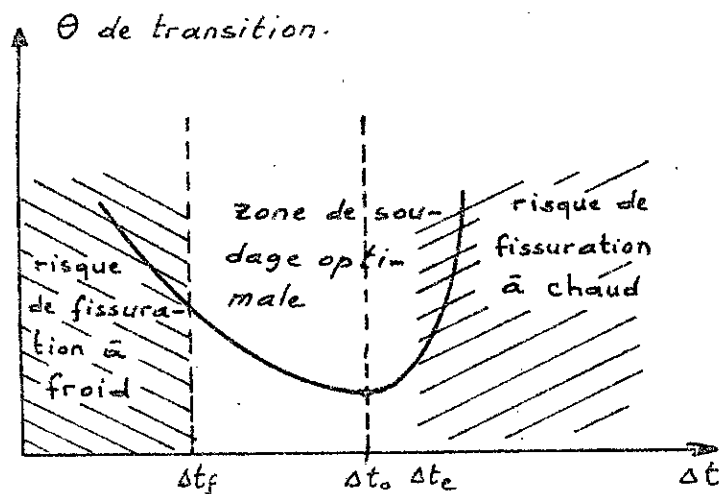
Fig.4.2.5.a. Quantité d'hydrogène dans le métal déposé pour les principaux procédés de rechargement

## 4.2.6 Structure métallurgique optimale

Les propriétés mécaniques de la zone rechargée sont très fortement liées à la structure métallurgique obtenue après l'opération de rechargement.

La durée de refroidissement ( $\Delta t_{500}^{800}$ ) joue un rôle important pour avoir une structure métallurgique convenable.

Si  $\Delta t$  est trop faible, le risque de fissuration à froid augmente et s'il est trop élevé le risque de fissuration à chaud augmente, et dans ces deux cas le risque de rupture fragile se trouve augmenté.





## Conclusion et résultats des études du rechargement

1- La classification des engins de terrassement nous a permis de distinguer deux types de pièces à recharger :

- Les lames, caractérisées par leur longueur et leur épaisseur
- Les dents.

Après l'étude de la soudabilité on a trouvé que ces deux types de pièces sont parfaitement soudables, alors il n'est pas nécessaire de prévoir un préchauffage.

2- Après avoir étudié les dangers de fissuration à froid on a constaté que le procédé M.I.G est le meilleur procédé qui assure la protection du métal fondu contre l'influence de l'hydrogène et permet d'éviter sa migration dans le fer : Voir - fig. 4.2.5.a -

Avec le procédé M.I.G. automatique, on recharge les lames en utilisant des fils pleins ou fourrés ou des feuillards comme électrodes fusibles.

Pour le rechargement des dents on utilise le procédé M.I.G. semi-automatique.

3- Le rechargement anti-usure est un soudage hétérogène. La structure des cordons de rechargement doit être martensitique ou austéno-martensitique ou ferrito-martensitique (selon la structure du métal déposé).

Il est possible de choisir la composition des électrodes par le diagramme de schaeffler.

4- D'après l'étude des influences des éléments d'addition on

a constaté que le chrome est l'élément le plus intéressant aux rechargements anti-usure. Pour cela on choisira des électrodes qui contiennent un pourcentage de chrome entre 5% et 14%.

5- Après avoir étudié la fissuration à chaud, on a constaté que cette dernière, limite la profondeur du cordon selon la relation :

$$\frac{l}{p} > 0,7 ; \text{ ou } \frac{p}{l} < 1,5$$

## Chap. 5 - Paramètres et contrôles

### 5.1 Paramètres de rechargement

Les principaux paramètres de rechargement sont :

- **Energie de soudage** : Elle ne doit être ni trop faible, ni trop élevée. L'énergie dépensée pendant le rechargement est donnée par la formule

$$E_d = \eta E_n$$

avec :  $\eta$  : rendement d'arc.

$E_n$  : énergie nominale.

$$E_n = \frac{UI}{V}$$

$U$  : tension d'arc.

$I$  : intensité de courant

$V$  : vitesse de rechargement.

- **Tension d'arc** : Elle agit sur la largeur du dépôt, cette dernière augmente quand la tension croît.

- **Dimension de l'électrode ou du fil** : Plus le diamètre du fil est faible plus la pénétration est grande. Pour cela on adoptera des diamètres des fils assez grands pour ne pas avoir une grande pénétration.

- **Nature du flux** : On utilise un flux gazeux inerte qui peut être de l'argon ou de l'hélium ou un mélange des deux. Les différentes sortes d'argon livré sont données par le tableau ci-dessous. (plus la pureté est grande plus le prix est élevé).

degré de pureté	Extra	1 <sup>ere</sup>	2 <sup>eme</sup>
Argon, mini	99,99	99,98	99,95
oxygène, maxi	0,001	0,003	0,005
Azote, maxi	0,008	0,01	0,04.

L'hélium livré selon les normes techniques doit avoir la composition suivante :

Marque	Hélium	Azote
1 <sup>ère</sup>	98,6 à 99,7	0,3 à 1,4
2 <sup>ème</sup>	98,5 à 99,5	0,5 à 1,5

L'existence de l'azote en teneur arrivant jusqu'à 1,5 dans l'hélium nous oblige de préférer l'argon comme gaz de protection, car comme on a déjà vu l'azote est un élément défavorable dans le cordon de la soudure.

La consommation d'argon durant le rechargement dépend du diamètre de l'électrode et constitue habituellement 120 à 600 dm<sup>3</sup>/h. La consommation d'hélium dépasse celle d'argon d'environ 30 à 40%.

- Intensité de courant : L'intensité de courant influe sur la pénétration de la soudure. Plus l'intensité est élevée plus la pénétration est grande. Une intensité trop élevée conduit à la fissuration à chaud ( $l/p$  est faible), tandis qu'une intensité trop faible conduit à une fusion incomplète (risque de collage).




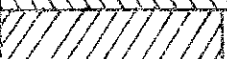

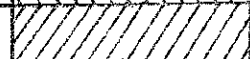
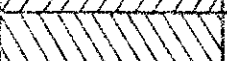
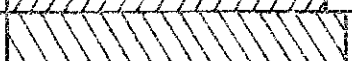
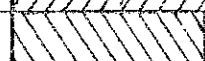
- Vitesse de rechargement :

Une vitesse lente peut être la cause des déformations dues à un échauffement excessif.

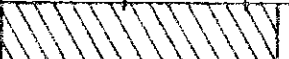


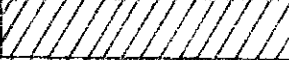
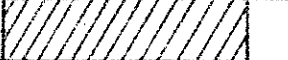
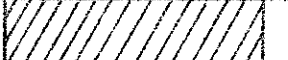
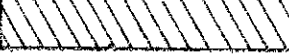
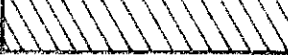

La largeur du cordon est inversement proportionnelle à la vitesse de déplacement de la torche de rechargement.

## 5.2 - Choix des électrodes et des paramètres de rechargement

Les tableaux ci-après nous donnent plusieurs types d'électrodes avec leurs caractéristiques, ainsi que les paramètres de rechargement.

Nature de l'électrode		Fil plein	Fil fourré	Fil fourré
Désignation de l'électrode		NERTALIC 560	SAFUNI 113	SAFUNI SU 156
Structure		Martensitique	Ferrito-martensitique	Martensitique
Composition chimique en %	C	0,45	0,1	0,45
	Si	3	0,8 - 1	1
	Mn	0,4	1	1,2
	Cr	9,5	13 - 14	5
	Mo	—	—	0,9
	Autres	—	—	W:1,4
Dureté		600 Hv	370 HB	600 Hv
Paramètres	Diamètre (mm)	1,2	2,4	2,4
	Tension (V)	30	30 (+ au fil)	30 (+ au fil)
	Vitesse du fil ou taux de dépôt.	9 m/mn	8 Kg/h	8 Kg/h
	Intensité (A)	260	350	350.
Traitement thermique		Néant	Néant	Néant
Poids de la bobine (Kg)		15	25	25
Résistance à l'usure		M B E	M B E	M B E
	Abrasion			
	Chocs			
	Corrosion			

M = moyenne; B = Bonne; E = Excellente.

Nature de l'électrode		Fil plein	Fil fourré	Fil fourré
Désignation de l'électrode		NERTALIC 57	TUBRODE 15.23	TUBRODE 15.74
Structure		Ferrito-martensitique.	Martensitique	Martensitique
Composition chimique en %	C	0,04	0,3	0,25
	Si	0,3	0,3	0,5
	Mn	0,5	0,5	0,5
	Cr	13	13	13
	Mo	—	—	—
	Autres	S<0,03 P<0,03	—	—
Dureté		370 HB	50_55 HRC	50_55 HRC
Paramètres	Diamètre (mm)	1,6	2,4	2,4
	Tension (V)	30	30	30
	Vitesse du fil ou taux de dépôt.	6 m/mn	9 kg/h	9 kg/h
	Intensité (A)	320	400	400
Traitement thermique.		Néant	Néant	Néant
Poids de la bobine (kg)		15	12,5 et 23	12,5 et 23
Résistance à l'usure		M B E	M B E	M B E
	Abrasion			
	Chocs			
	Corrosion			

E = excéllente ; B = bonne ; M = moyenne.

Nature de l'électrode		Fil fourré	Fil fourré	Feuillard
Désignation de l'électrode.		SAFDUAL 56	TUBROD 15.50	OK Band 11.81
Structure		Martensitique	Austéno-martensitique	Ferrito-martensitique
Composition chimique en %	C	0,40	0,5	< 0,12
	Si	0,8	1,5	—
	Mn	1,5	2,5	—
	Cr	5,20	5	17
	Mo	0,70	1	—
	Autres	—	—	—
Dureté		500 HB.	50-55 HRC.	330 HB.
Paramètres	Diamètre (mm)	1,6	2,4	largeur = 60 mm, $e_p = 0,5$
	Tension (V)	28	32	28
	Vitesse du fil ou taux de dépôt.	6 Kg/h	5,8 Kg/h	7,9 m/h
	Intensité (A)	250-300	400	750
Traitement thermique.		Néant.	Néant	Néant
Poids de la bobine (kg)		14	12,5 et 23	—
Résistance à l'usure		M B E	M B E	M B E
	Abrasion			
	Chocs			
Corrosion				

M = Moyenne ; B = bonne ; E = excellente.

### 5.3 Polarité des électrodes

Aux rechargements anti-usure, on cherche à éviter la forte pénétration pour qu'on n'ait pas de risque de fissuration ou de retrait, car plus la pénétration est grande plus les risques de fissuration et de retrait sont grands. Pour cela on doit relier l'électrode pendant le rechargement au pôle négatif (-) et la pièce à recharger au pôle positif (+) si le courant est continu. C'est à dire que la polarité de l'électrode est directe. Sauf dans le cas où le constructeur des électrodes impose la polarité inverse, (+) à l'électrode.

### 5.4 Détermination des durées de refroidissement $\Delta t_{800-500}$

Les durées de refroidissement sont données par plusieurs méthodes : analytique, par lecture sur abaque à quatre quadrants, par utilisation des abaques expérimentaux ou par utilisation des abaques généraux.

On n'étudiera que la méthode analytique.

L'épaisseur des parties à recharger ne dépasse pas 15 mm, donc on applique la formule des tôles minces ( $e \leq 20$  mm) pour déterminer la durée de refroidissement  $\Delta t_{500}^{800}$ .

$$\Delta t_{500}^{800} = \left(\frac{E_d}{e}\right)^2 \times \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \alpha} \times \left[ \left( \frac{1}{(P_c)_f \times (500 - \theta_0)} \right)^2 - \left( \frac{1}{(P_c)_d \times (800 - \theta_0)} \right)^2 \right] \dots (5.1)$$

Avec :

$E_d$  : énergie dissipée en [J/cm]

$$E_d = E_n \cdot \eta \dots (5.2)$$



- $\eta$  : rendement de l'arc . Pour le rechargement avec les procédés M.I.G :  $\eta = 0,85$  .
- $E_n$  : énergie nominale en (J/cm) .

$$E_n = \frac{U \cdot I}{V} \quad (5.3)$$

avec :

$U$  = tension de l'arc (V) .

$I$  = intensité de courant de soudage (A) .

$V$  = vitesse de soudage . (cm/s) .

- $\alpha$  : coefficient de diffusivité thermique .  
 $\alpha = 0,054$  (cm<sup>2</sup>/s) .

- $e$  = épaisseur [cm] .  $e = 1,5$  cm

- $(P_c)_d$  : capacité calorifique en début de transformation  
 $(P_c)_d = 4,77$  J/cm<sup>3</sup>.°C .

- $(P_c)_f$  : capacité calorifique en fin de transformation  
 $(P_c)_f = 5,27$  J/cm<sup>3</sup>.°C .

- $\theta_0$  = température de préchauffage en [°C] .  
soit  $\theta_0 = 20$  °C .

Faisons le calcul pour une électrode ayant les paramètres suivants :

$$U = 30 \text{ V} ; I = 300 \text{ A} ; V = 28 \text{ cm/mn} .$$

L'énergie dissipée est :

$$E_d = E_n \cdot \eta \quad \text{or} \quad E_n = \frac{I \cdot U}{V}$$

$$\text{d'où : } E_d = \frac{U \cdot I}{V} \cdot \eta \quad ; \quad v = \frac{28}{60} = 0,467 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$E_d = \frac{30 \times 300}{0,467} \times 0,85 = 16392,9 \text{ J/cm}$$

$$E_d = 16393 \text{ J/cm}$$

l'épaisseur  $e = 1,5 \text{ cm}$ .

en remplaçant toutes ces valeurs dans la formule (5.1)

on aura :

$$\Delta t_{500}^{800} = \left( \frac{16393}{1,5} \right)^2 \times \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 0,054} \times \left[ \left( \frac{1}{5,27 \times (500-20)} \right)^2 - \left( \frac{1}{4,77 \times (800-20)} \right)^2 \right]$$

$$\Delta t_{500}^{800} = 14,8 \text{ s}$$

Si l'on souhaite une structure brute de rechargement (c'est à dire sans traitement thermique), à la Zone Affectée par la Chaleur, proche de celle du métal de base (donc éviter la trempe martensitique par conséquent éviter les fissures), on constate d'après la pratique qu'il faut avoir un  $\Delta t_{800-500} > 13 \text{ s}$ .

Si  $\Delta t_{800-500} < 13 \text{ s}$ , il faut préchauffer la pièce à recharger. Alors dans notre cas, d'après le calcul ci-dessus, on a trouvé que  $\Delta t_{800-500} = 14,8 \text{ s}$  donc supérieur à  $13 \text{ s}$ , alors aucun préchauffage ne sera prévu.

Après ce temps de refroidissement entre  $800$  et  $500^\circ\text{C}$  la structure formée après rechargement dans la zone affectée par la chaleur est ferrito-perlitique.

(voir soudage R. Varisellaz. page 74).

## 5.5 Préparation des pièces avant rechargement

Le soin à apporter à la préparation des surfaces à recharger est de faire un usinage préalable à chaque pièce usée devant être rechargée, soit par meulage ou par fraisage des bords d'attaque.

On opère un usinage préalable pour rendre la pièce plate à un bord d'attaque droit exempt de toute ondulation.

de forme, ainsi que pour débarrasser la pièce de toute pellicule d'oxyde, de rouille et de peau d'écaillage.

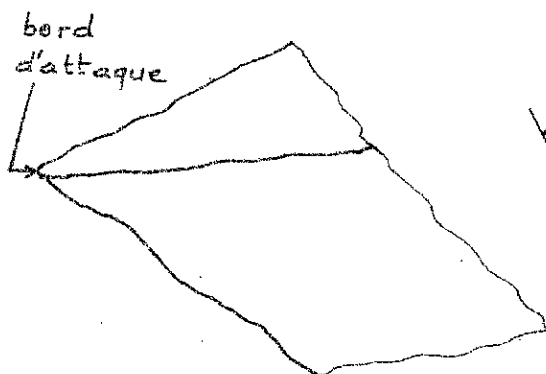


Fig. 5.1

Pièce avant usinage

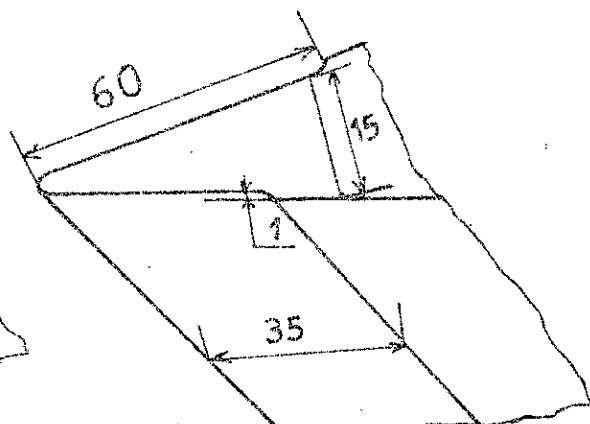


Fig. 5.2

Pièce usée après usinage

## 5.6 Ordre de dépôt des cordons

On adoptera un nombre de passes à effectuer longitudinalement sur chaque pièce de 10 passes:

- 6 passes sur la surface supérieure
- 3 passes sur la surface inférieure
- 1 passe sur le bord d'attaque de la pièce.

L'ordre de rechargement est donné par la figure (5-5).

(d'après le catalogue, (Messer Griesheim) Alliages spéciaux pour le soudage et le rechargement d'entretien et de réparation)

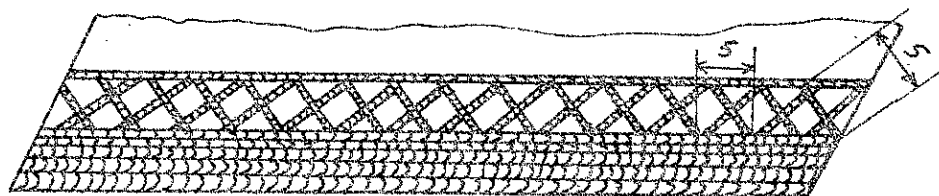


Fig. 5.3 Rechargement d'une lame.

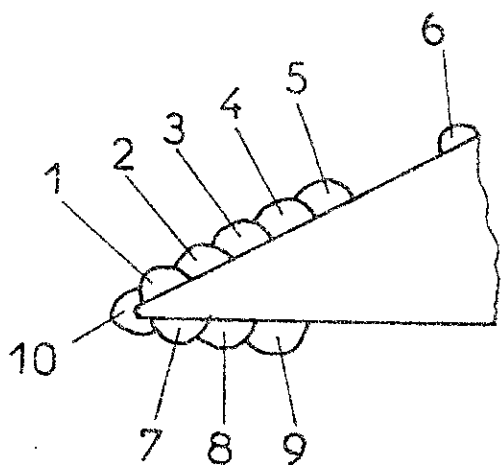


Fig. 5.5 Ordre de rechargement.

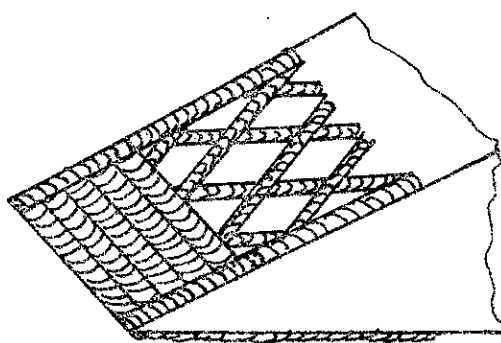


Fig. 5.4

Rechargement d'une dent.

## 5.7. Choix des installations

### 5.7.1. Installation semi-automatique

La composition de l'installation semi-automatique est déjà vue au paragraphe (3.4.b).

#### —choix du générateur de courant

On choisit le SAFMIG 180BL (d'après guide du soudage semi-automatique et automatique M.I.G et M.A.G, S.A.F)

Ce générateur convient mieux pour le rechargement, car on cherche à avoir une pénétration faible pour diminuer d'autant que possible la dilution, et pour avoir une faible pénétration il faut que l'intensité de soudage ne soit pas élevée.

#### —Choix du moto-évideur

On choisit un moto-évideur DEVISAF 1B.

Ce type de moto-évideur a les caractéristiques suivantes:

- Un variateur-régulateur électronique (régulation de la vitesse du fil),

- Possibilité d'adjonction d'un dresseur de fil,
- Adaptation pour bobines de différents diamètres,
- Permet la lecture directe de la vitesse du fil en m/mn sur un cadran.

### - Choix de la lance de rechargement

On choisit une lance pistolet P14 (guide de soudage semi-automatique et automatique M.I.G et M.A.G, S.A.F.), dont la forme est comme celle d'un arme pistolet. Cette lance comporte un fût rectiligne et une crosse. Une telle disposition se trouve avantageuse en rechargement.

### - Choix de la source de gaz

- C'est une bouteille métallique contenant le gaz pur ou le mélange gazeux.

## 5.7.2. Installation automatique

On choisit l'installation DEVIMATIC 6 sur chariot CTP2 (voir catalogue S.A.F.).

Cette installation présente les caractéristiques suivantes:

- Alimentation sous 42 volts, tension de sécurité,
- fonctionnement à vitesse de dévidage du fil constante,
- Cycle d'amorçage et d'arrêt de l'arc entièrement automatique,
- Standardisation des pas de fixation de tous les éléments.

L'installation contient:

- 1- Groupe moto-réducteur platine.
- 2- Boîtier de commande et de régulation.
- 3- Support boîtiers
- 4- Platine débitmètre
- 5- Support dévidoir

- 6\_ Torche de soudage .
- 7\_ Glissière de positionnement .
- 8\_ Dé de liaison .
- 9\_ Chariot CTP2 .
- 10\_ Boîtier mouvement
- 11\_ Motorisation CTP 2
- 12\_ Poutre CTP 2

### Groupe moto-réducteur platine d'entraînement du fil-électrode

— Le moteur : Il est du type à courant continu, l'inducteur est un aimant permanent, cette solution garantit la stabilité de la vitesse en fonction de l'échauffement du moteur.

— La platine d'entraînement : Comporte deux ensembles de galet-moteur et contre-galet. La platine est complétée d'un dresseur de fil à l'entrée.

La gamme des vitesses de dévidage : Elle s'étend de 2,5 à 25 mètres par minute .

Les diamètres de fil :

- fils pleins : 0,6 ; 0,8 ; 1,0 ; 1,2 et 1,6 mm
- fils fourrés : 1,2 ; 1,6 ; 2,4 mm .

Cette installation permet l'utilisation d'une intensité de courant allant jusqu'à 400 Ampères et une tension pouvant arriver jusqu'à 50 volts, le poste est à courant continu.

### 5.8. Contrôle de la qualité du rechargement

Le contrôle doit s'effectuer à trois stades bien distincts :

- Contrôle avant rechargement.
- Contrôle pendant rechargement.
- Contrôle après rechargement.

### 5.8.1-Contrôle avant rechargement

Il concerne toutes les mesures à prendre afin d'assurer une bonne exécution du rechargement.

Ce contrôle portera sur les points suivants:

1\_métal d'apport : Il s'agit de vérifier que le produit livré est conforme aux spécifications de la commande donc vérifier :

- \_ l'analyse chimique du matériau ,
- \_ les propriétés mécaniques du matériau,
- \_ les défauts physiques éventuels.

2\_qualification du programme de rechargement :

Il est nécessaire d'examiner les possibilités de rechargement. Cet examen sera effectué par le bureau de méthode, en relation avec les responsables soudeurs et le bureau d'études.

3\_contrôle de la préparation des pièces : Contrôler si les surfaces à recharger sont bien préparées (dépourvues de toute rouille et peau d'écaillage).

### 5.8.2-Contrôle pendant rechargement

Il aura surtout pour but de vérifier que les conditions d'exécution prévues sont effectivement respectées. En particulier:

- \_ les électrodes (nature, diamètre),
- \_ la nature du courant et intensités,
- \_ la disposition des passes.

### 5.8.3-Contrôle après rechargement

Le rechargement étant exécuté, il s'agit d'en apprécier sa qualité. Plusieurs procédés peuvent être mis en oeuvre :

- \_ Contrôles destructifs,
- \_ Contrôles semi-destructifs,
- \_ Contrôles non destructifs.

### 5.8.2.1 - Contrôle destructif

Il consiste à prélever une ou plusieurs pièces sur lesquelles seront prélevées des éprouvettes afin d'y exécuter un contrôle de texture, des essais mécaniques. Ce type de contrôle s'applique surtout dans le cas de rechargement de série.

### 5.8.2.2 - Contrôle semi-destructif

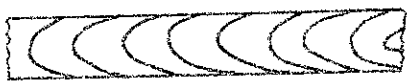
Il consiste à apprécier la qualité d'un cordon rechargé, en fraisant ou perçant ce dernier. Cette méthode permet de contrôler la pénétration et les défauts physiques (fissures, soufflures, etc.).

### 5.8.2.3 - Contrôle non destructif

#### Contrôle visuel

Il portera surtout sur les points suivants :

- la présence éventuelle de caniveaux,
- la forme des stries (fonction des vitesses de rechargement) (voir fig. 5.5),
- la pénétration.



- vitesse rapide -



- vitesse lente -

- Fig. 5.5 -

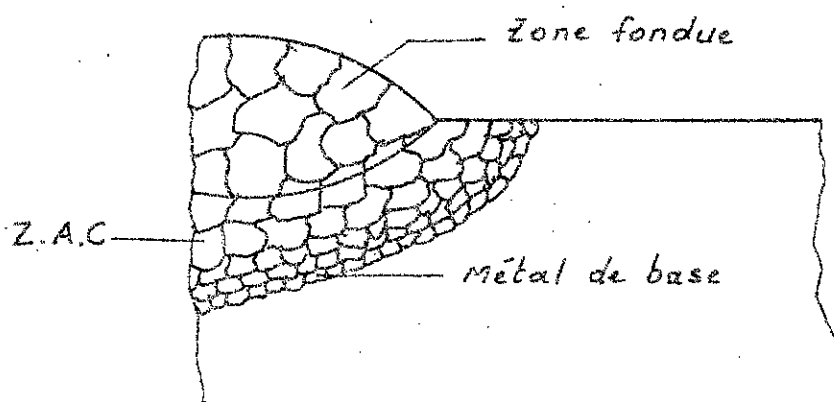
L'examen visuel se fait soit à l'œil nu, soit à l'aide d'une loupe.



## 5.9. Examen microscopique

L'examen microscopique est l'un des essais les plus utiles qui puissent être appliqués aux soudures. Ce type d'essai permet de découvrir, les défauts physiques après rechargement tels que les fissures et les soufflures, ainsi que les inclusions les plus fines telles que les sulfures et les phosphures.

On fait des essais micrographiques pour examiner la zone de liaison, c'est à dire contrôler la structure du métal déposé et celle du métal de base, donc s'assurer qu'il y a régularité de structure c'est à dire après les grains fins du métal de base on trouve les moyens grains de la zone de liaison puis les gros grains de la zone fondue.



- Fig. 5.6 - Microstructure d'un cordon de rechargement

En allant du métal de base à la zone fondue, si on trouve après un essai micrographique qu'il y avait une irrégularité de grossissement des grains, c'est à dire passage de grains fins aux gros grains, la zone de liaison est alors fragile. Cette dernière est l'une des causes des fissurations.

## Chap.6\_Prix de revient des rechargements

Le prix de revient des rechargements dépend des facteurs suivants :

- préparation des pièces à recharger et leur mise en position,
- quantité de métal d'apport et de flux protecteur,
- temps consacré au rechargement,
- consommation d'électricité,
- amortissement des matériels et frais généraux.

### 6.1\_Préparation des pièces

La préparation des pièces comprend : l'usinage préalable, le nettoyage et la mise en position.

Pour une lame de longueur 2 m, si l'usinage se fait par meulage où l'avance de la meule est d'environ 0,6 m/mn, si on considère que l'usinage sera exécuté en 5 passes et la largeur de la meule est 40 mm et si on admet une vitesse de retour de la meule de 2 m/mn;

Le temps total d'usinage de la pièce sera :

$$t = \frac{2}{0,6} \times 5 + 5 \Rightarrow t = 21,67 \text{ mn.}$$

Avec le temps perdu au positionnement, le temps total sera :

Si on admet que le positionnement dure 5 mn pour cette pièce on a alors :

$$t_u = 21,67 + 5 \Rightarrow t_u = 26,67 \text{ mn.}$$

Au temps d'usinage et de positionnement de la pièce pour l'usinage il peut s'ajouter le temps de nettoyage de la pièce des grains laissés par la meule et des pellicules de rouille, soit un temps de 3 mn.

D'où le temps total de préparation sera :

$$T_p = t_u + 3 \Rightarrow T_p = 26,67 + 3 = 29,67 \text{ mn}$$

d'où :

$$T_p = 29 \text{ mn } 38 \text{ s}$$

Pour la préparation d'une dent, le temps d'usinage est de: 1 mn, le temps de positionnement de la pièce: 2 mn et le temps de nettoyage: 1 mn

Enfin le temps de préparation de la dent sera :

$$T_p = 1 + 2 + 1 \Rightarrow T_p = 4 \text{ mn}$$

## 6.2 - Temps consacré au rechargement

Grâce à l'étude des temps de rechargement on peut planifier la production. Le temps total de rechargement comprend: le temps de base,  $t_b$  ou temps de fusion qui est le temps pur de rechargement et les temps morts qui comprennent: le temps de préparation,  $t_p$ ; le temps de manipulation,  $t_m$  et le temps de service,  $t_s$ .

### 6.2.1 - Temps de base: $t_b$ (temps de fusion)

Le temps de fusion est lié à la vitesse de soudage.

Au rechargement automatique la vitesse est donnée par la relation suivante:

$$v = \frac{\text{longueur rechargée}}{\text{temps de fusion}}$$

D'où l'on tire le temps de fusion.

Exemple numérique :

Prenons le cas du rechargement de la lame de 2 m de longueur (cas du rechargement automatique).

- Calculons la longueur des cordons rechargés sur cette pièce (voir fig. 5.3)

le nombre de cordons est :

- Cordons longitudinaux : 10

- Cordons superposés : n

$$n = \frac{200}{5} \times 2 = 80 \text{ cordons.}$$

La longueur des cordons sera :

$$l_1 = 10 \times 200 = 2000 \text{ cm} \Rightarrow l_1 = 20 \text{ m.}$$

$$l_2 = 80 \times 5 = 400 \text{ cm} \Rightarrow l_2 = 4 \text{ m.}$$

D'où :  $l = l_1 + l_2 \Rightarrow l = 20 + 4 = 24 \text{ m}$

$$l = 24 \text{ m.}$$

$$v = \frac{l}{t_b} \Rightarrow t_b = \frac{l}{v}$$

Si la vitesse de rechargement adoptée est :

$$v = 28 \text{ cm / mn.}$$

alors on aura :  $t_b = \frac{2400}{28} \times 60 = 5152,86 \text{ s}$

$$t_b = 1 \text{ h } 26 \text{ mn}$$

- Cas du rechargement semi-automatique :

- Rechargement d'une dent :

La vitesse de fusion du fil exprimée en m/mn est fonction de l'intensité du courant de soudage :

Pour un fil de diamètre : 1,6 mm où l'intensité du courant :  $I = 300 \text{ A}$ .

- la vitesse du fil est :  $v_f = 6 \text{ m / mn. (S.A.F.)}$

- la vitesse de la torche est :  $v_t = 28 \text{ cm / mn.}$

- la masse d'un mètre de fil est donnée par le tableau suivant (voir S.A.F. produits de rechargement) :

Diamètre du fil en mm	0,6	0,8	1	1,2	1,6
poids d'un mètre de fil en (g)	2,2	3,9	6,2	8,8	15,7

Donc le poids d'un mètre de fil de  $\phi$  1,6 mm est :

$$P = 15,7 \text{ g/m.}$$

Le taux de dépôt est déterminé par :

$$D = \text{Vitesse du fil} \times \text{poids du fil au mètre.}$$

D'où :

$$D = 6 \times 15,7 = 94,2 \text{ g/mn.}$$

$$D = 94,2 \text{ g/mn.}$$

La masse par cm de la pièce sera :

$$m = \frac{D}{v_t} = \frac{94,2}{28} = 3,36 \text{ g/cm de la pièce.}$$

$$m = 3,36 \text{ g/cm de pièce}$$

— Calcul de la longueur totale des cordons déposés sur une dent (voir fig. 5.4) :

La largeur de la dent est :  $a = 10 \text{ cm.}$

soit :

- 9 cordons en largeur de la dent,
- 2 cordons aux bords de la dent de 20 cm de longueur pour chacun,
- 6 cordons superposés de 5 cm de longueur pour chacun.

La longueur totale sera :

$$l = 9 \times 10 + 2 \times 20 + 6 \times 5 = 160 \text{ cm.}$$

$$l = 160 \text{ cm.}$$

D'où la masse totale du métal déposé sur la dent est :

$$m_t = m \cdot l \Rightarrow m_t = 3,36 \times 160 = 538,29 \text{ g}$$

$$m_t = 538,29 \text{ g}$$

Si le taux de dépôt est :  $D = 6 \text{ Kg/h}$  (référence : S.A.F. Produits de rechargement).

$$D = 6000 \text{ g/h} \Rightarrow D = \frac{6000}{60} \Rightarrow D = 100 \text{ g/mn}$$

$$\text{D'où : } t_b = \frac{m_t}{D} = \frac{538,29}{100} = 5,38 \text{ mn.}$$

$$t_b = 5,38 \text{ mn.}$$

$$t_b = 5 \text{ mn } 23 \text{ S}$$

## 6.2.2 - Temps morts

- Temps de préparation : Ce temps est prévu pour la délivrance du bon de commande, pour la détermination des conditions de rechargement et pour la préparation et le réglage de l'équipement et des accessoires.

- Temps de manipulation : C'est le temps pendant lequel l'ouvrier change la bobine du fil, examine les surfaces rechargées, passe à un autre poste de soudage.

- Temps de service : Ce temps est alloué pour le rangement du poste de travail (changement de bouteilles de gaz, refroidissement de la torche, etc.), pour le repos et pour les besoins naturels du travailleur.

En général, le temps total,  $T$  est déterminé en fonction du temps de base, divisé par un coefficient  $K$  qui tient compte du degré d'organisation du travail :

$$T = t_b / K$$

Pour le rechargement automatique le coefficient  $K$  varie entre 0,6 et 0,8, on adopte un coefficient  $K = 0,75$ .

Le temps total de la lame de 2m sera :

$$T = t_b / K \Rightarrow T = \frac{85,88}{0,75} = 114,51 \text{ mn.}$$

$$T = 1^{\text{h}} 54 \text{ mn } 30 \text{ s}$$

Au rechargement semi-automatique  $K$  peut arriver jusqu'à 0,4. soit  $K = 0,4$ .

Pour le rechargement d'une dent le temps total sera :

$$T = \frac{t_b}{K} = \frac{5,38}{0,4} = 13,45 \text{ mn.}$$

$$T = 13 \text{ mn } 27 \text{ s}$$

### 6.3 Quantité de métal déposé

Elle est fonction des dimensions du cordon.

Une fois la masse est calcul e pour une seule pièce, il n'est pas nécessaire de refaire le calcul pour les autres pièces car les cordons sont de même largeur et de même épaisseur seule la longueur qui varie.

La masse du métal d'apport est exprim e en Kg/m ou en g/m.

Faisons le calcul de la masse d pos e sur la lame de 2m ainsi que son prix.

Soit : le diamètre du fil :  $d = 1,6 \text{ mm}$ ,

la vitesse du fil :  $v_f = 6 \text{ m/mn}$ ,

la vitesse de la torche :  $v_t = 28 \text{ cm/mn}$ .

La masse est calcul e pour les mêmes donn es au paragraphe (6-2.1) en gramme par cm de la pièce, ainsi que la longueur totale des cordons déposés :

$$m = 3,36 \text{ g/cm et } \ell = 2400 \text{ cm.}$$

$$\text{D'où : } m_f = m \cdot \ell \Rightarrow m_f = 3,36 \times 2400 = 8064 \text{ g.}$$

$$m_f = 8,064 \text{ Kg.}$$

La masse de métal déposée par mètre de lame est :

$$M = \frac{8,064}{2} \Rightarrow M = 4,032 \text{ Kg/m}$$

La masse déposée par mètre de cordon est :

$$M' = 3,36 \times 100 \Rightarrow 336 \text{ g/m de cordon.}$$

$$M' = 0,336 \text{ Kg/m de cordon.}$$

Le prix de la masse déposée par m de cordon :  
si le prix d'une bobine pesant 15 Kg est : 200 unités

Alors :

$$x = \frac{200}{15} \times 0,336 = 4,48 \text{ unités}$$

$$x = 4,48 \text{ unités/m de cordon}$$

Le prix par mètre de lame est :

$$x_\ell = \frac{200}{15} \times 4,032 = 53,76 \text{ unités.}$$

$$x_\ell = 53,76 \text{ unités.}$$

Le prix de la masse déposée sur une dent :  
on sait que la longueur des cordons déposés sur la dent est :

$$\ell_d = 1,6 \text{ m.}$$

$$\text{D'où : } x_d = x \cdot \ell_d \Rightarrow x_d = 4,48 \times 1,6$$

$$x_d = 7,168 \text{ unités.}$$



## 6.4 - Consommation d'énergie électrique

La consommation d'électricité n'est pas négligeable, il est donc utile de la calculer avec précision.

Pour évaluer la consommation d'électricité nécessaire aux opérations de rechargement, il faut tenir compte à la fois de la consommation de l'appareil de rechargement à vide et en marche.

- Consommation à vide : Cette consommation est indiquée par le constructeur de l'appareil de soudage, elle se situe entre 0,1 et 0,6 kWh.

Adoptons approximativement :

- pour le rechargement au tomistique, une consommation à vide de 0,1 kWh, pour l'exécution du rechargement d'une lame de 2 m.

- Pour le rechargement semi-automatique une consommation à vide de 0,15 kWh pour chaque dent.

- Consommation en marche :

La consommation en marche est donnée par la formule suivante :

$$\text{Consommation (C)} = P_a \cdot t_b$$

Avec :

$$P_a = \frac{UI}{\eta} + \frac{L}{S} I^2$$

Où :

$\eta$  : est le rendement moyen de l'appareil.

$t_b$  : temps de fusion ou temps de base.

$\frac{L}{S} I^2$  : sont les pertes dans les câbles

• L : longueur des câbles

• S : section des câbles

• I : intensité de courant de soudage.

Pour une longueur des câbles inférieure ou égale à 10 m, ces pertes seront négligées.

On a trouvé pour le rechargement de la lame de 2 m de long un temps de fusion :  $t_b = 85,88$  mn, sous :  $U = 30$  v et  $I = 300$  A.

La longueur du faisceau de raccordement de la machine automatique DEVIMATIC 6, est de 10,17 m, alors les pertes d'énergie dans les câbles seront négligées.

Le rendement moyen de l'appareil est :

$$\eta = 0,6.$$

D'où :

$$C = P_a \cdot t_b = \frac{U \cdot I}{\eta} \cdot t_b = \frac{30 \times 300}{0,6} \cdot \frac{85,88}{60} = 21470 \text{ wh.}$$

$$C = 21,47 \text{ kWh.}$$

Avec les pertes à vide la consommation sera :

$$C = 21,47 + 0,1 \Rightarrow$$

$$C = 21,57 \text{ kWh.}$$

En rechargement semi-automatique de la dent dont on a calculé le temps de fusion :  $t_b = 5,38$  mn, sous :  $U = 30$  v et  $I = 300$  A. Soit  $\eta = 0,6$ .

D'où :

$$C = \frac{U I}{\eta} t_b = \frac{30 \cdot 300}{0,6} \cdot \frac{5,38}{60} = 1345 \text{ wh}$$

$$C = 1,345 \text{ kWh.}$$

Avec les pertes à vide la consommation sera :

$$C = 1,345 + 0,15 \Rightarrow$$

$$C = 1,495 \text{ kWh.}$$

Pour l'amortissement des matériels, beaucoup de problèmes et difficultés se posent lors du calcul. Pour cela on ne calculera pas cette partie, on se limite au calcul du temps de préparation des pièces, temps de rechargement, prix de la masse déposée et enfin la consommation d'énergie. Le prix de revient de la soudure est la somme de ces derniers y compris l'amortissement des matériels et les frais généraux.

## CONCLUSION

Selon les résultats du calcul du prix de revient du rechargement, on peut constater que les frais de rechargement ne sont pas comparables aux pertes dues à l'arrêt des engins qui dure plusieurs semaines, en attendant que la commande des pièces neuves sera livrée.

En plus, la résistance à l'abrasion, aux chocs et à la corrosion apportée par le rechargement anti-usure, permet d'augmenter la durée de vie de ces pièces.

Les installations de rechargement sont simples et déplaçables, elles n'ont besoins que d'un atelier simple et dans certains cas, il n'est pas nécessaire de démonter les pièces usées pour les recharger.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Les engins mécaniques de chantier Adil Gabay 1952
2. Manuel pratique de soudage aux gaz et de coupage thermique L. Mendel 1976
3. Manuel pratique de soudage à l'arc L. Mendel. 1969
4. Le soudage et le coupage des métaux V. Rybakov. 1980
5. Guide du soudage. Soudage à l'arc sous gaz de protection T.I.G., M.I.G., M.A.G. (S.A.F.) tome 5 1971
6. Guide du soudage semi-automatique et automatique NERTALIC. M.I.G. - M.A.G. SAFDUAL SAFUNI (S.A.F.)
7. Guide du soudage automatique UNIONMELT (S.A.F.)
8. Les procédés de soudage. P.T. Houldcroft 1971
9. Soudage. Élément de conception et de réalisation R. Varisellaz 1982
10. Application du soudage aux constructions R. Baus W. Chapreau. 1977
11. Métallurgie du soudage des aciers inoxydables et résistant à chaud. R. Castro et J.J. de Cadenet 1968
12. Technique de l'ingénieur; métaux, alliages, métallurgie.
13. Joints soudés. Contrôle, métallurgie, résistance A. Vallini 1968
14. Produits de rechargement (S.A.F.).
15. Alliages spéciaux pour le soudage et le rechargement. d'entretien et de réparation. Messer Griesheim
16. Electrodes OK fils et flux E.S.A.B. 1980

