



LE SOUDAGE PAR RESISTANCE



2, rue Jean Bart - 37510 BALLAN MIRÉ
Tél. : 02.36.16.24.07 Fax : 08.21.48.17.56 Email : info@sdservice.fr

I. PREFACE

Le soudage par résistance est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique (500 à 150.000Ampères) et d'une pression ponctuelle (de moins d'un N à 30.000daN). Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur (sauf en Soudo-brasage).

L'intensité électrique traverse la matière (durant 5ms à 3secondes suivant les épaisseurs et nuances matières) et chauffe la matière jusqu'à sa fusion.

La pression maintient le contact et donc les résistances entre l'électrode et l'assemblage.

Cette technique est donc dépendante de la résistivité (résistance électrique) des matières, de l'épaisseur totale de l'assemblage et du diamètre des électrodes. Ce procédé est majoritairement utilisé dans l'assemblage de tôle d'acier de faible épaisseur (<6mm).

Cette technique bénéficie d'un savoir-faire très important et d'une productivité incomparable (dans le domaine d'application). Pour exemple, un châssis automobile est assemblé à plus de 80% par des points soudés.

- **Avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage :**

- Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité ...).
- Il répond à des sollicitations élevées
- Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatiques, ...)
- Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée (ex. : soudure continue de type molette).

- **Avantage du soudage par résistance, par rapport aux autres procédés**

- Limitation de la pollution, pas de modification structurale, sécurité d'exploitation, pas ou peu de préparation, pas de déformation, pas d'apport (métal ou atmosphère), esthétique du produit fini, prix de revient - peu d'énergie - vitesse d'exécution, amortissement important des machines, qualification élémentaire pour le personnel.

- **Les inconvénients du procédé de soudage**

- Assemblage par recouvrement uniquement
- Epaisseur soudée limitée à la puissance de la machine
- Difficulté de contrôle de la qualité des points soudés

PARTICULARITES DU SOUDAGE PAR RÉSISTANCE

- INTERET DES PROCEDES

Il s'agit d'une soudure autogène, dans laquelle les matériaux fondent sur eux mêmes sans apport extérieur. Le bain de fusion constituant le noyau de point est très localisé et protégé de l'oxydation par l'environnement du creuset, ne nécessitant donc pas de protection, par déploiement d'atmosphère gazeuse extérieure.

La dispersion thermique dans la masse des tôles assemblées est faible, comparée à d'autres procédés tels que l'arc ou la flamme, la température du bain fusion n'excède que peu et durant des temps très courts le point de fusion du matériau. Il induit donc un minimum de tensions résiduelles et de déformations de pièces, d'autant que les électrodes maintiennent l'accostage des pièces durant la dilatation, la fusion et la solidification.

Pour la plupart des matériaux usuels le soudage par points n'entraîne que peu de modification structurale (faible grossissement du grain).
Ce mode de soudage peut sauvegarder l'esthétique du produit fini : mobilier métallique, matériel ferroviaire ou aéronautique.

C'est un procédé fiable et robuste. Le point de soudure, réalisé dans les meilleures conditions, confère à l'assemblage obtenu une résistance considérable à la sollicitation mécanique, qu'il s'agisse de flexions alternées de mises en contraintes permanentes ou de vibrations même à forte fréquence. Les points de soudure ne sont pas ou peu altérables au vieillissement (au niveau du noyau).

Le procédé de soudage par résistance peu s'appliquer avec peu de préparation voire même sans aucune préparation (armatures de béton).

Son prix de revient est attrayant. Les machines à souder sont relativement onéreuses mais s'amortissant à long terme elles assurent une productivité élevée, pouvant s'automatiser facilement (robotique, machines spécifiques).

Elles nécessitent des puissances électriques d'alimentation, intenses, mais en fait consomment peu d'énergie électrique. Leur maintenance est d'un coût relativement modeste.

Il existe 4 différents modes :

- Le soudage par résistance par point
- Le soudage par résistance par bossage
- Le soudage par résistance à la molette
- Le soudage par résistance en bout

II. PRINCIPE DE BASE

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / électrodes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet de joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes.

Rappel de base d'électricité :

Loi de Joule : Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps.

$$W \text{ (en joules)} = R \text{ (Ohm)} \times I^2 \text{ (Ampères)} \times t \text{ (secondes)}$$

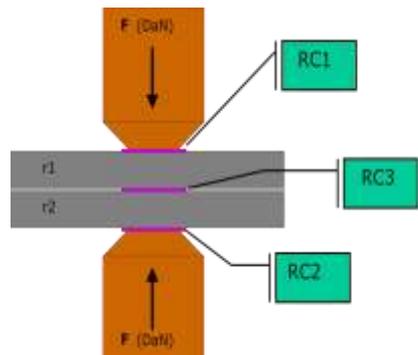
Résistance : La résistance d'un conducteur, à température ambiante, est :

- ✓ proportionnelle à sa longueur
- ✓ inversement proportionnelle à sa section
- ✓ fonction du matériau constitutif de l'âme du conducteur

$$R \text{ (Ohm)} = \rho \text{ (micro-Ohm/cm/cm}^2\text{)} \times L \text{ (cm)} / S \text{ (cm}^2\text{)}$$

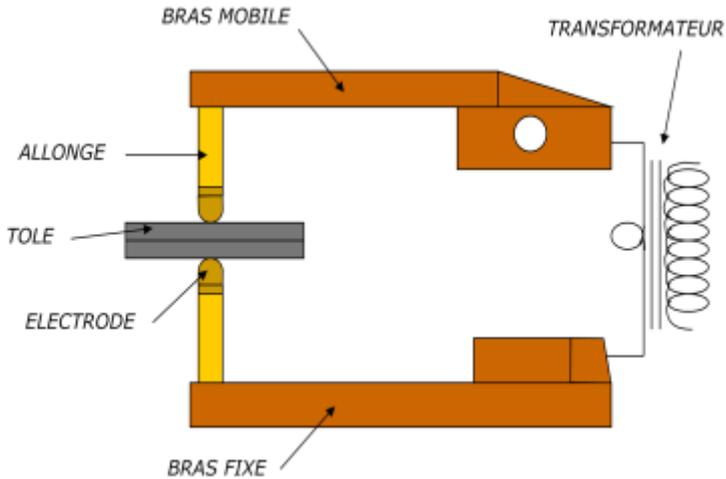
La résistivité est l'opposition d'un matériau au passage du courant électrique. Les électrodes en cuivre présentent une résistivité faible (1,7 micro-ohm/cm/cm² contre 6 pour une tôle standard de 1mm).

Définition de R dans $R = R I^2 t$
RC = Résistance de contact
r = Résistance interne
 $R = RC1 + RC2 + RC3 + r1 + r2$
 $RC1 + RC2 + RC3 > r1 + r2$



III. CONSTITUTION D'UNE MACHINE

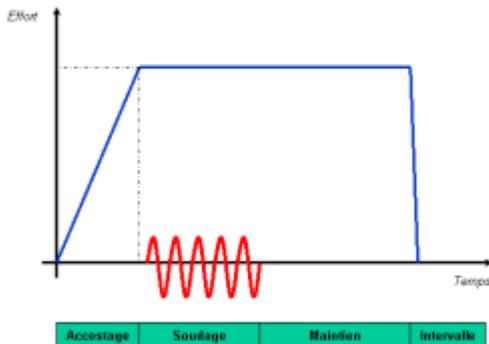
- Un transformateur de courant de soudage (il abaisse la tension, il augmente le courant)
- Un dispositif de mise en pression des électrodes (manuel, pneumatique ou électrique)
- Un dispositif de commande du cycle de soudage (séquenceurs)
- Un circuit de refroidissement



IV. LE CYCLE DE SOUDAGE

Le cycle simple de soudage le plus fréquemment utilisé est le cycle 4 fonctions :

Accostage - Soudage - Maintien - Intervalle



- **L'ACCOSTAGE**

L'accostage est le temps nécessaire à la fermeture de la pince ou de la machine. Lors de cette phase de la séquence on assure la mise en serrage des pointes d'électrodes sur les tôles à assembler et l'on détermine donc la valeur de résistance sur laquelle va s'appliquer l'effet Joule.

Un temps d'accostage trop court provoque :	Un temps d'accostage trop long provoque :
Des points brûlés	Un ralentissement de la cadence
Des éclatements aux électrodes	
Des points sans résistance mécanique	
Une usure anormale des électrodes	

- **L'EFFORT**

Un effort trop important provoque :	Un effort insuffisant provoque :
Une réduction des résistances	Une augmentation des résistances
Des points trop petits ou collés	Des projections de métal en fusion / points brûlés
Un écrasement ou emboutissage des bossages	Une usure anormale des électrodes

- **LE SOUDAGE**

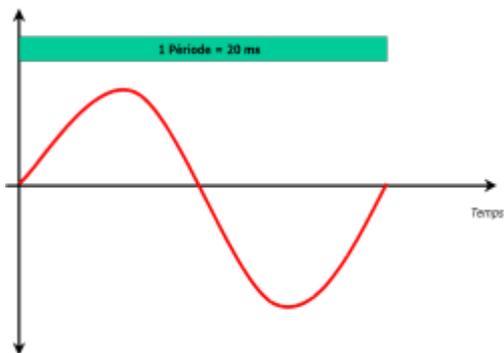
Le soudage est un chauffage obtenu par l'effet Joule d'un courant électrique traversant les pièces à assembler.

L'intensité et le temps de soudage exigent la plus grande précision

Une fluctuation de plus ou moins 5% peut différencier un point bon d'un point mauvais

- **LE TEMPS DE SOUDAGE**

Les temps en soudage par résistance sont exprimés soit en milliseconde, soit en période :



La période correspond à **20ms pour une fréquence réseau de 50Hz** (ou 16,66ms pour 60Hz)

Un temps trop long provoque :	Un temps trop court provoque :
Un cuivrage des tôles	Pas ou peu de fusion
Des projections de métal en fusion	Soudage réalisé mauvais
Une détérioration rapide des électrodes	

- **L'INTENSITE**

Une intensité trop forte provoque :	Une intensité insuffisante provoque :
Un cuivrage des tôles	Pas ou peu de fusion
Des projections de métal en fusion	Soudage réalisé mauvais
Une détérioration rapide des électrodes	

- **LE MAINTIEN**

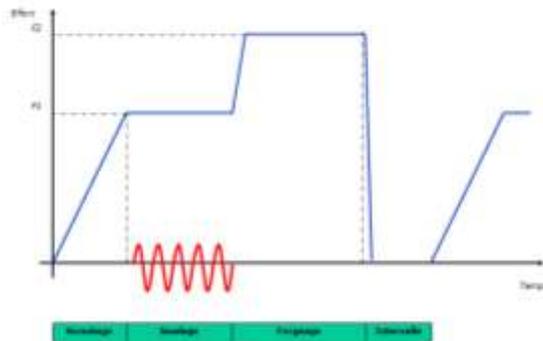
Il permet de contenir l'expansion du point de soudure, favorise son refroidissement et donc limite le soulèvement entre les 2 tôles.

Un maintien trop court provoque :	Un maintien trop long provoque :
Un soulèvement des tôles	Une perte de temps, une production trop lente
Une oxydation	Un point cassant
Retassure (fissure interne)	

- **LE FORGEAGE**

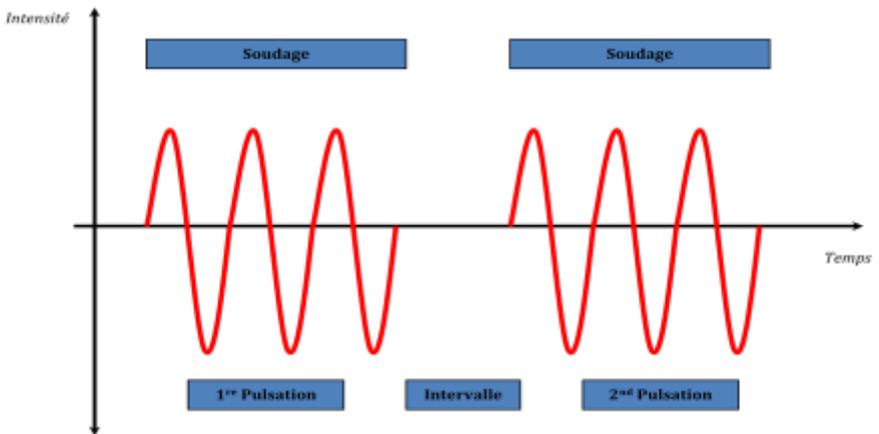
Le forgeage est utilisé **en lieu et place du maintien**, le but de son application est :

- ✓ Diminuer le volume de retassure
- ✓ Affiner le grain du métal
- ✓ Augmenter les caractéristiques mécaniques
- ✓ Limiter les défauts internes



- **LA PULSATION**

Elle est utilisée pour les fortes épaisseurs et permet d'améliorer la durée de vie des électrodes et d'obtenir une meilleure qualité de point soudé.

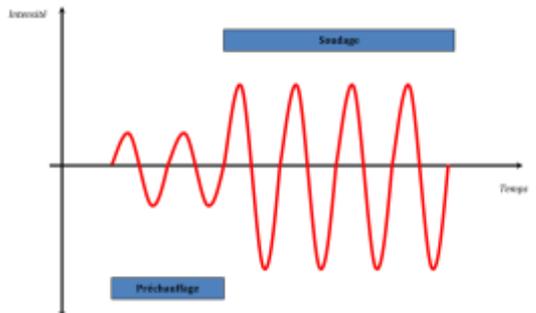


Les autres cycles de soudage peuvent utiliser les fonctions suivantes:

Préchauffe - Upslope - Downslope - Trempe - Revenu - Recuit

- **LE PRECHAUFFAGE**

Il améliore l'accostage des tôles et augmente le volume métal chauffé.



- **L'UPSLOPE**

L'upslope est une montée progressive du courant. Il évite les projections de soudure et est utilisé pour le soudage par bossages sur fortes épaisseur et le soudage à la molette.

- **LE DOWNSLOPE**

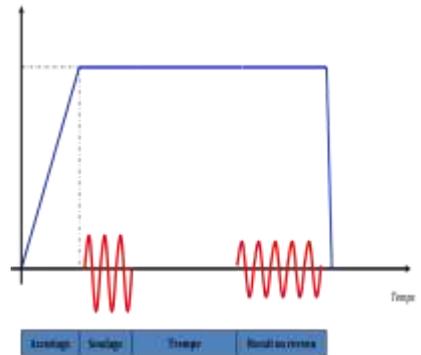
Le downslope est une descente progressive du courant. Il évite un refroidissement trop brutal du point, est utilisé pour les alliages légers ou acier C > 0,2 et peut éviter dans certains cas la trempe et recuit.

- **LA TREMPE**

La trempe est un temps froid (sans intensité) réalisé après la phase de soudage sans relaxation de l'effort.

Elle augmente en principe la dureté et par suite la Résistance de l'acier, mais diminue sa résilience (capacité à résister à la casse) et son allongement.

L'acier devient plus dur mais en même temps plus fragile.



- **LE REVENU**

Le revenu consiste à chauffer l'acier en dessous de la température du début de la transformation à l'échauffement.

Le revenu est un état intermédiaire entre l'état trempé et recuit.

La température de revenu devra être d'autant plus élevée que l'on voudra garder moins de dureté au profit de la résilience.

- **LE RECUIT**

On emploie le recuit à des destinations très différentes du revenu.

Détruire la dureté de l'acier trempé, régénérer un métal cristallin, écroui ou surchauffé, homogénéiser des structures hétérogènes et stabiliser des tensions moléculaires.

Il nécessite dans chaque cas des applications assez différentes de chauffage et de refroidissement.

Le principe consiste à chauffer l'acier au dessus de la température d'austénitisation, opération au cours de laquelle l'acier est porté à une température supérieure à la limite de stabilité de la ferrite.

V. LE POINT ET SON ENVIRONNEMENT

Si l'on effectue une coupe transversale d'un point assurant la soudure entre deux tôles, par des moyens métallographiques (sciage, polissage et attaque chimique) il devient possible d'observer la section du point et de son environnement.



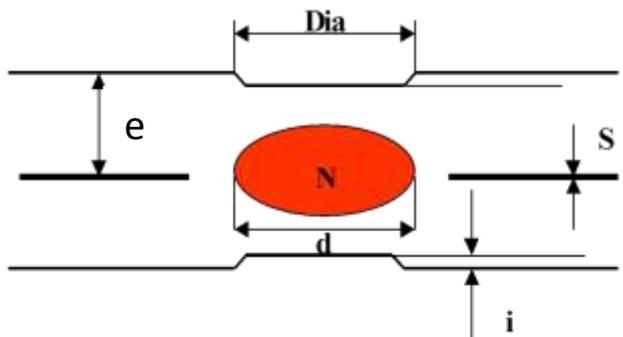
Dia : Diamètre de la face active de l'électrode

d : Diamètre du noyau fondu

i : Indentation

s : Joint de séparation

e : épaisseur des tôles



Les dimensions du noyau soudé sont déterminées en fonction de la résistance mécanique recherchée. Par analogie à d'autres procédés d'assemblage discontinus, tels que le vissage ou le rivetage on conçoit bien que les caractéristiques de résistance du point soudé, devront tendre vers la résistance de base, du matériau assemblé (en fonction de la position, de l'espacement et du nombre de points, de vis ou de rivets...).

En fait, la résistance au « cisaillement » des points soudés est dans la majorité des cas presque équivalente à celle d'une section identique de la tôle de base, voire même supérieure, pour des tôles dont l'épaisseur est inférieure à 1,5mm.

Exemple :

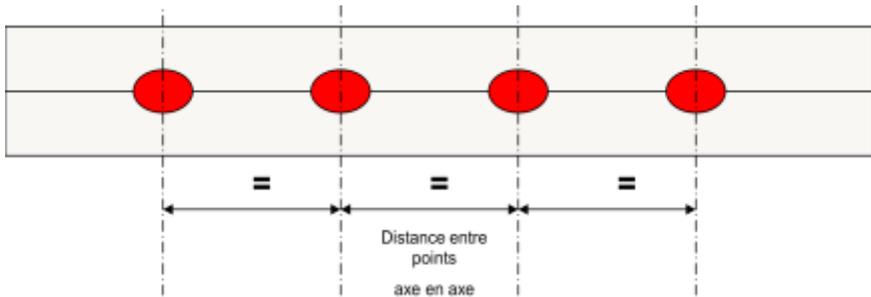
Pour une tôle d'acier doux de 1mm d'épaisseur résistance $50\text{kg}/\text{f}/\text{mm}^2$. La résistance d'une section équivalente serait de $600\text{kg}/\text{f}$. Celle d'un point au cisaillement peut varier de 360 à $650\text{kg}/\text{f}$ suivant que l'on a procédé en soudage lent ou en soudage rapide.

LOCALISATION DES POINTS

La résistance mécanique d'un point à la traction/cisaillement est comparable à la résistance d'une vis ou d'un rivet à l'effet « d'entaille ».

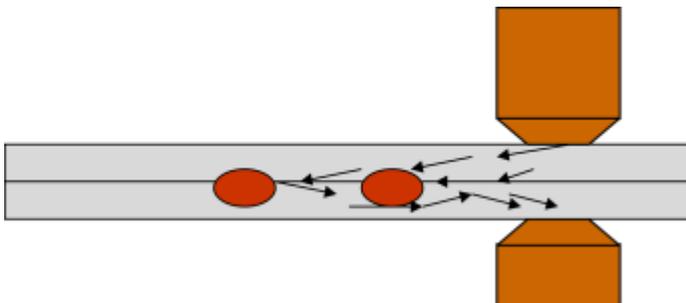
Il doit donc être situé dans un environnement défini d'où la notion de recouvrement, d'entraxe et de distance par rapport au bord des tôles.

Ces règles concernent directement les caractéristiques de résistance mécanique du point, en essais destructifs, mais en outre, elles conditionnent également les paramètres de soudage qui permettent d'obtenir ce point.



- **DISTANCE ENTRE POINTS**

Lorsque l'on réalise l'assemblage de deux pièces par une série de points effectués successivement, dès l'élaboration du deuxième point de série, nous sommes confrontés à des circuits parallèles, le courant de soudage dérive, dans une proportion non négligeable, par le ou les points précédemment réalisés : **c'est l'effet de shunt**



Dans les cas où la plage de positionnement des points est restreinte, la perte par dérivation peut atteindre 20% et plus de l'intensité du courant pré-réglé, il faut alors relever d'autant le réglage du courant de soudage ou se contenter d'un lingot fondu de dimensions plus modestes.

D'une manière générale, on évitera systématiquement les assemblages par le point de soudure unique, ce genre d'assemblage présente une résistance médiocre à la torsion et la présence d'un second point, même de section plus faible, constitue un ancrage, qui peut être suffisant pour palier à la faiblesse du point unique en torsion.

- **RECOUVREMENT**

Nous avons vu dans ce qui précède les rôles de l'effort et du forgeage, en ce qui concerne le maintien du creuset et de la dilatation ; ce maintien n'étant focalisé que dans l'axe d'appui des électrodes.

Un recouvrement trop faible, ne permettrait donc pas de maintenir le soulèvement interface en deçà des 10% de **e**, admissibles pour un point de qualité.

- **DISTANCE AU BORD DES TÔLES**

La dispersion thermique autour de lingot fondu se fait de manière équiaxe, autour de celui-ci. Si, donc le point est situé très près du bord des tôles, l'environnement du lingot atteint très rapidement la surchauffe entre celui-ci et le bord des tôles.

Il peut alors se produire des ruptures du creuset dans cette zone, entraînant une indentation excessive des électrodes et des projections de métal en fusion à l'interface des deux tôles.

VI. LES NUANCES MATIERES

COMPATIBILITE DE SOUDAGE DES METAUX USUELS

(d'après W. Stanley)

METAUX	ALU.	INOX.	ZINC	GALVA.	ACIER	LAITON	CUIVRE	PLOMB	NICKEL	FER BLANC	BRONZE PHOSP.
ALU.	2	6	3	3	4	4	5	5	4	3	3
INOX	6	1	6	2	1	5	5	6	3	2	4
ZINC	3	6	3	3	6	5	5	3	6	3	4
GALVA.	3	2	3	2	2	4	5	4	3	2	4
ACIER	4	1	6	2	1	4	5	5	3	2	3
LAITON	4	5	5	4	4	3	4	6	3	4	3
CUIVRE	5	5	5	5	5	4	6	5	4	5	3
PLOMB	5	6	3	4	5	6	5	3	5	6	5
NICKEL	4	3	6	3	3	3	4	5	1	3	3
FER BLANC	3	2	3	2	2	4	5	6	3	3	4
BRONZE PHOSP.	3	4	4	4	3	3	3	5	3	4	2

1 : Excellent - 2 : Bon - 3 : Passable - 4 : Pauvre - 5 : Très pauvre - 6 : Impraticable

1. LES ACIERS DOUX

L'acier est un alliage de fer et de carbone (à dosage de carbone variable).

Le fer est un métal à structure cristalline changeante en fonction de la température. Le carbone est un semi-conducteur réfractaire à solubilité variable dans le fer, en fonction de la température.

Une opération de soudage par résistance, libère intégralement le carbone, mais suivant la quantité et compte tenu de la brièveté du refroidissement, la redilution de celui-ci ne s'effectue pas harmonieusement dans les différentes phases allotropiques parcourues (Fer α Fer γ Fer δ).

PARAMETRES DE SOUDAGE POUR ACIER DOUX

ep. (mm)	Ø Élect.	Ø Face active	Pas	Recouv.	Tps soudure (~)	Effort (daN)	Intensité (A)	Ø Débout.	R (kgf)
0,25	9,5	3,5	6,5	9,5	3	90	4600	3,3	100
0,5	9,5	4	9,5	11	4	130	6100	4,3	240
0,75	9,5	4,5	12,5	11	6	180	8000	5	440
1	12,7	5	19	12	8	230	9500	5,8	610
1,25	12,7	5,5	22	14	10	290	10500	6,3	825
1,5	12,7	6	27	15	11	320	11000	6,7	900
1,75	12,7	6,5	31	16	14	380	12000	7,5	1250
2	16	7	35	18	17	500	13300	7,9	1460
2,5	16	8	40	20	21	590	14700	8,6	1850
3	16	9	50	22	25	815	17500	10,2	3120
3,5	20	10	57	27	34	925	18200	11,2	3880
4	20	11	66	32	41	1030	18900	11,9	4750
4,5	20	12	80	38	55	1200	19800	13	6000
5	20	13	88	44	70	1320	20900	14,7	6700
6	25	15	110	47	79	1600	22700	17	8250
7	25	17	133	66	116	2000	24400	19	9850
8	30	19	146	73	135	2400	25700	20,8	10800

2. LES TOLES REVETUES

2.1. REVÊTEMENTS LES PLUS COURANTS RENCONTRÉS DANS L'INDUSTRIE

Zinc

- Tôles d'aciers galvanisés
- Tôles électro-zinguées.

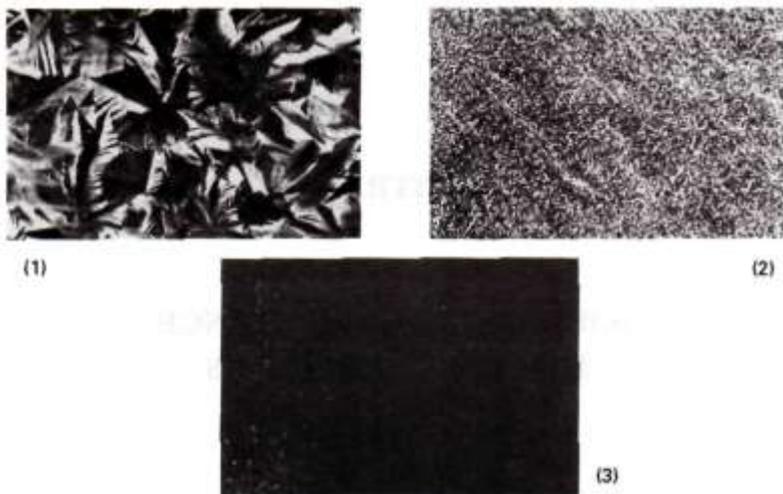
Étain

- Tôle étamée (communément appelée : fer blanc)

Aluminium

- Tôles aluminées ou aluminisées

Il existe de nombreuses autres formules de revêtement par procédé galvanique, chimique ou thermique que nous ne citerons que pour mémoire : cuivrage, nickelage, chromage, bichromatation, plastification, phosphatation, peinture, etc.



*Nota : Galva à chaud épaisseur de Zn contrôlée par soufflage
Reproduction Galva à fleurs (1), à fleurage minimisé (2) ou skinpassé (3)*

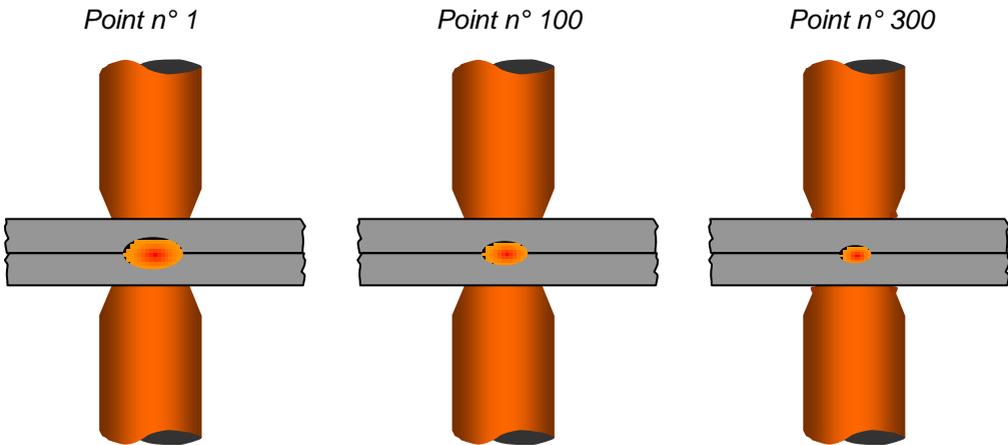
2.2. TÔLES GALVANISÉES

C'est la forme la plus utilisée de tôle revêtue, dans l'industrie en général (plus de 1,6 million de tonnes/an pour la France).

Ce matériau est défini par le poids de zinc (déposé à chaud par trempage) à l'unité de surface, soit au mètre carré, et non par l'épaisseur de la couche déposée (MF A 36 321123). C'est ce qui permet de différencier celui-ci de l'électro-zingué qui lui, se définit par l'épaisseur de Zn déposé (procédé électrolytique).

Pour fixer les idées, le plus régularisé des dépôts galvanisés, soit le SKIN PASSE en faible charge (< 200g/m²) double face présente une couche de Zn, 4 fois plus forte en surface que l'électro-zingué de qualité courante.

Matière	Point de Fusion (°C)	Densité	Coefficient de dilatation	Conductivité thermique	Résistivité (p : μΩ/cm ²)
Zn	418	7,14	39,7 x 10 ⁻⁶	0,27	5,9 μΩ
Acier	1450	7,85	12 x 10 ⁻⁶	0,11	11 μΩ



Evolution simultanée des diamètres des faces actives et noyaux fondus

2.3. PROCESSUS DE L'USURE DES POINTES D'ÉLECTRODES

En surface, c'est-à-dire au contact des faces actives des pointes d'électrodes, le point de fusion du zinc est dépassé de façon fugitive, mais indiscutable ($0^{\circ}\text{C} > 418^{\circ}\text{C}$). La pollution intervient alors de deux manières. Lors des premiers points (de 30 à 50), il subsiste une adhérence de zinc et d'oxyde de zinc sur la face active de l'électrode.

Cette couche initiale modifie bien sûr les conditions de « résistance » électrique. Très souvent, cette pollution entraîne des problèmes de « collages d'électrodes » sur les surfaces soudées. Ces premiers points sont effectués avec des paramètres minimisés en intensité et des temps faiblement accrus. On les considère parfois comme des points de pré conditionnement de l'électrode avant ré ajustage des paramètres de départ d'une campagne.

On accroît donc ensuite, la tension du courant de soudage de manière à compenser l'accroissement de résistance. Ce faisant, la pollution ne va pas se limiter à un simple dépôt, mais le zinc va peu à peu s'allier au cuivre de l'électrode en profondeur. Il va donc se former un alliage cuivre/zinc à la pointe de l'électrode et cette solution d'alliage (laiton) va s'étendre en profondeur, entraînant une diminution de la dureté du métal d'électrode.

Sous l'effet des chocs d'accostages et des efforts de compression, la pointe d'électrode va « s'émauser » et le diamètre de sa face active va s'accroître, entraînant une chute de la densité du courant (A/mm^2), le diamètre du noyau fondu va décroître dans les mêmes proportions jusqu'à l'apparition des premiers points collés.

Ayant constaté qu'il suffit de maintenir une densité de courant constante, en fonction du diamètre de face active, on a tenté de palier à ce problème par l'utilisation de systèmes d'incrémentatation automatique de l'intensité. Et une nouvelle architecture d'électrode en est issue.

PARAMETRES DE SOUDAGE SUR TOLES D'ACIER GALVANISE

(Document CITAG)

Epaisseur unitaire de la tôle d'acier galvanisée (mm)	Ø partie active tronconique (mm)	Effort (1) de soudage daN	Temps de soudage (périodes) (f=50 Hz)	Courant de soudage (± 5%) (Ampères)	Ø du noyau fondu (mm) (± 5%)	Pas minimal des points (mm) (2)	Recouvrement minimal des tôles (mm)
0,5	de 3,5 à 4	de 130 à 200	de 7 à 5	de 8 500 à 9 500	3,6	12	10
0,6	de 4 à 4,3	de 150 à 230	de 7 à 6	de 9 000 à 10 000	4	12	10
0,8	de 4,5 à 5	de 200 à 280	de 10 à 8	de 9 500 à 11 500	4,5	15	12
1	de 5 à 5,5	de 250 à 350	de 12 à 8	de 11 000 à 13 000	5	20	14
1,2	de 5,5 à 6	de 300 à 400	de 14 à 10	de 11 000 à 14 000	5,5	25	15
1,5	de 6 à 6,5	de 350 à 450	de 18 à 14	de 12 000 à 15 500	6	30	16
2	de 7 à 7,5	de 500 à 700	de 28 à 20	de 14 000 à 19 000	7	35	18
2,5	de 8 à 8,5	de 650 à 900	de 40 à 30	de 17 000 à 25 000	8	45	24
3	de 9,5 à 10	de 900 à 1200	de 50 à 40	de 22 000 à 28 000	9,5	55	30
4*	de 12 à 13	de 1250 à 1400	de 80 à 60	de 24 000 à 30 000	12	100	45
5*	de 13 à 14	de 1500 à 1800	de 120 à 80	de 26 000 à 32 000	14	130	50

(1) C'est l'effort minimal net pour le soudage de pièces ne présentant pas de difficultés d'accostage.

(2) C'est la valeur minimale pour laquelle il n'est pas nécessaire d'accroître le courant pour compenser l'effet de shuntage des soudures adjacentes.

2.4. TÔLES ÉLECTRO-ZINGUÉES

Toute l'étude qui précède concerne aussi la tôle électro-zinguée, mais dans une plus faible mesure, compte tenu de la faible épaisseur du revêtement et de sa régularité.

Il convient de préciser aussi que la tenue à la corrosion de pièces en électro-zinguée est plus affectée par le soudage par points que celle de la tôle galvanisée à chaud.

En effet, le dépôt de zinc électrolytique n'étant pas effectué à chaud, il n'existe pas de couche de liaison fer/zinc comme dans le cas du procédé zinzimir et l'adhérence du zinc sur le support acier doux est donc plus fragile au choc thermique.

Le soudage par bossages sur tôles fines est aussi délicat dans la détermination des paramètres. Par contre le soudage par points sur tôles fines est plus facile qu'en Galva. Double point série, peu recommandable, sauf avec des entraxes de points très grands. Le soudage à la molette est possible mais la protection extérieure du cordon de soudure doit être restaurée.

3. LES ALLIAGES LEGERS

L'aluminium s'utilise peu à l'état pur, mais plutôt sous forme d'alliages. Ceux-ci sont nombreux et leurs propriétés tant mécaniques que physiques peuvent s'écarter sensiblement de celles de l'aluminium pur. Voici le tableau des principaux alliages utilisés dans l'industrie et leur correspondance d'appellation normalisée dans les différents pays utilisateurs.

3.1. COMPORTEMENT MÉTALLURGIQUE

On distingue deux catégories d'alliages métallurgiquement différentes :

Les alliages sans durcissement structural

Ils ne sont pas trempant, ils sont à base de deux éléments et susceptibles de voir leurs propriétés mécaniques modifiées par écrouissage.

Ces sont les alliages des séries :

- 5 000 : aluminium magnésium : exemple AG2 à AG6,
- 4 000 : aluminium silicium : exemple AS13 (fonderie, fil apport),
- 3 000 : aluminium magnésium : exemple AMI,
- 1 000 : aluminium plus impurétés : exemple AI à A9.

Les alliages à durcissement structural

Ces alliages à trois composants ou plus, sont susceptibles de voir leurs caractéristiques modifiées soit par vieillissement, soit par traitement thermique (revenu) :

- 7 000 : aluminium, zinc, magnésium : anciennement AZ5G,
- 6 000 : aluminium, silicium, magnésium : anciennement ASG,
- 2 000 : aluminium, cuivre, magnésium : anciennement AU4G.

L'alliage léger est un métal noble, il est tenace, souple, ductile, résistant à la fatigue, à l'effort et à la corrosion.

Il se coupe, se forme, se traite, se coule, se brase et « se soude ».

3.2. LE SOUDAGE PAR POINTS DES ALLIAGES LÉGERS

Le soudage par résistance des alliages légers peut s'effectuer par points, par bossages et à la molette. Notre propos se limitera surtout ici à l'application soudage par points.

NOTION DE PUISSANCE ÉLECTRIQUE

La faible résistivité électrique liée à une forte conductivité thermique explique que le soudage par points des alliages légers nécessite l'utilisation de courants de forte intensité, durant des temps relativement courts.

En effet, si dans le cas des aciers, le soudage peut évoluer d'un mode lent à un mode rapide, il n'en va pas de même pour l'aluminium : le soudage sera toujours rapide. L'intervalle liquidus/solidus est court et il importe de pouvoir disposer de la plus grande précision dans le comptage des temps de séquence, pour souder les alliages légers par résistance.

Nous savons par ailleurs qu'en soudage par points, les résistances de contact sont prépondérantes.

Même si dans le cas de l'aluminium les résistances intrinsèques doivent être prises en compte on s'attachera, tout particulièrement à cerner une constante, du point de vue de ces résistances de contact, par une grande précision en ce qui concerne les accostages et par un soin tout particulier apporté à la préparation des états de surface des pièces et des pointes d'électrodes.

Les résistances de contact peuvent varier en fonction de l'épaisseur de la couche d'alumine qui recouvre naturellement l'alliage léger, c'est dire combien il est difficile de maîtriser ce paramètre.

3.3. PRÉPARATION DES SURFACES DE TÔLES

DÉGRAISSAGE

- à froid, par application de solvants classiques,
- à chaud, également par les procédés à base de solvant habituels, toutefois une réserve sera faite en ce qui concerne certains solvants chlorés qui sont susceptibles, à chaud, exposés aux ultraviolets, d'entraîner la formation de phosgène toxique.

DÉCAPAGE

L'aluminium et ses alliages s'oxydent à l'air et se recouvrent d'une mince pellicule d'alumine (quelques microns). L'alumine étant réfractaire au passage du courant, doit être éliminée avant soudage, afin de maîtriser une fourchette de valeur constante des résistances de contact et, pour éviter par ailleurs, l'incorporation de cette alumine dans le noyau fondu, à l'interface des tôles à assembler. C'est pour cette raison que l'on procède à un décapage des tôles d'alliage léger avant soudage. Ce décapage sera mécanique ou mieux chimique.

- ✓ **Le décapage mécanique** s'effectue localement, en utilisant des abrasifs classiques, toiles ou papiers, il présente l'inconvénient majeur de laisser subsister des stries en relief, susceptibles de retenir des particules abrasives et d'alumine, même après soufflage.

- ✓ **Le décapage chimique** est préférable, il n'altère pas les surfaces et ses effets restent valables de 12 à 24 heures. Il s'effectue dans une succession de bains à chaud (soude caustique, acide nitrique, rinçage à l'eau). Aujourd'hui il est préférable d'utiliser les produits de synthèse spécialisés qu'offre l'industrie chimique, (le plus souvent à base d'acide phosphorique).

PARAMETRES DE SOUDAGE POUR ALLIAGES LEGERS

Ep. (mm)	Rayon (mm)	Effort (daN)	Tps soudage (~)	Intensité (kA)	Pas mini (mm)
0,5	26	200	5	16	10
1	76	280	7	20	15
1,5	76	350	10	25	20
2	102	420	12	30	25
2,5	130	500	14	35	30
3	150	550	16	40	35
4	150	650	18	50	40

4. LES ACIERS INOXYDABLES

Un acier est qualifié d'inoxydable si au contact prolongé de l'eau ou de l'air humide il ne s'oxyde et n'est attaqué par la corrosion. La rouille en elle-même se compose pour l'essentiel d'un mélange d'hydroxyde de fer (FeOH_3) et d'oxydes de fer (FeOx). Le caractère inoxydable se fonde en premier lieu sur le métal d'alliage : le chrome.

Il entraîne la formation d'oxyde de chrome. Il se forme une couche d'oxygène à liaison absorbante à la surface de l'acier, qui induit un état passif.

L'état passif signifie que la structure moléculaire n'admet que très difficilement d'autres liaisons chimiques.

Ce comportement chimique est semblable à celui d'un métal noble (or, platine etc.). Pour obtenir cette passivité, la concentration d'oxygène du milieu joue un rôle décisif, car sans oxygène il ne peut pas se former d'oxydes.

PARAMETRES DE SOUDAGE POUR ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUE

Ep. (mm)	∅ électrode (mm)	Effort (daN)	Tps soudage (~)	Intensité (kA)	Tps maintien (~)
0,5	4	200	3	4,5	8
0,6	4,2	220	4	4,8	10
0,8	4,6	270	5	5,7	10
1	5	350	7	6,8	16
1,2	5,4	470	8	8	20
1,5	6	550	10	9,5	22
1,8	6,6	850	11	12	24
2	7	900	12	14	25
2,4	7,8	1000	13	15	26
2,5	8	1200	14	16	30
3	9	1500	16	18	40

VII. LES ELECTRODES

Le métal employé pour la fabrication des électrodes doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Une très bonne conductivité afin d'opposer la résistance au courant la plus faible possible
- Une bonne conductibilité thermique pour une dissipation rapide de la chaleur.
- Des propriétés mécaniques afin d'éviter la fissuration sous l'effet du martelage.

Il est nécessaire que le métal possède une dureté optimale à chaud, ce qui ne signifie pas dureté maximale que l'on pourrait lui conférer par écrouissage.

Le métal doit être suffisamment dur pour ne pas s'écraser sous l'effort de compression, et conserver cette dureté optimale en cours de service pour que l'électrode ne soit pas sujette à un adoucissement qui la rendrait rapidement inutilisable.

Parmi ces métaux, le plus intéressant par l'étendue de ses possibilités d'utilisation est le cuivre au chrome à faible teneur en zirconium (0,02 à 0,10% Zr). De par sa composition, cet alliage possède les qualités fondamentales précitées. En outre, ses propriétés mécaniques sont encore nettement renforcées du fait que son élaboration particulière lui confère une structure à cristaux orientés en longues fibres.

Par exemple, sa dureté à chaud et sa résistance à l'adoucissement sont sensiblement plus favorables que celles des alliages cuivre-zirconium courants, cuivre-chrome, comme l'illustrent les tableaux en annexe.

Il existe cependant des cas où il est déconseillé, voire impossible, d'employer ce métal : soudage du cuivre, etc.

Pour ces applications particulières les producteurs proposent des électrodes en cuivre électrolytique, en cuprotungstène fritte, en molybdène, en tungstène, ou encore, en graphite.

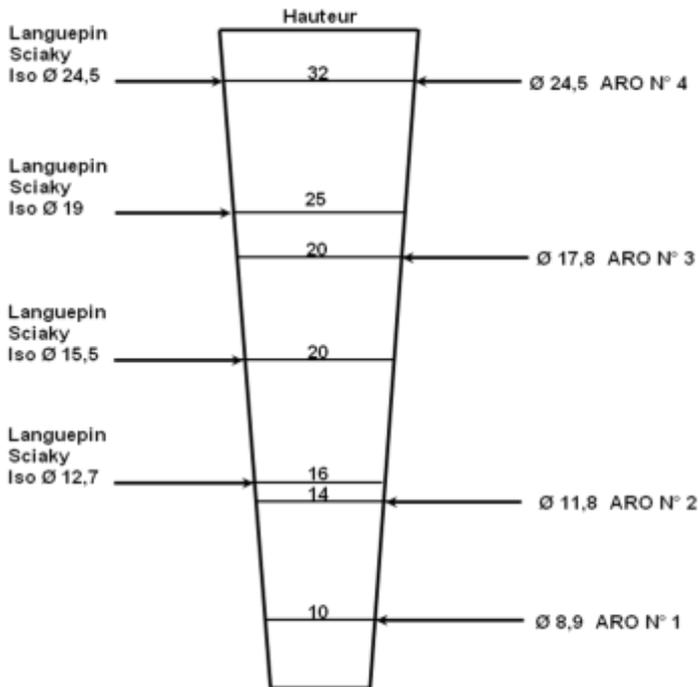


TABLEAU DES SOUDABILITES

(Extrait : Electrodes ARO)

		Alliage de nickel	Nickel	Bronze phosphoreux	Bronze silicieux	Mallechort	Laiton jaune 25-40 % Zn	Laiton rouge 10-25 % Zn	Cuivre	Aluminium et ses alliages	Acier inoxydable	ACIER DOUX			
												Autres revêt.	Galvanisé zingué	Calamine	Decapé
A C I E R D O U X	Decapé	C 3 3 h	C 3 3 h	C 3 3 h	C 3 3 h	C 3 3 h	C 3 3 h	D 3 3 h	D 5 3 h	C 1 3 h	B 4 3 e	B 3 3 cd	B 3 3 cd	C 3 3 b	A 3 3 a
	Calamine			D 3 3 bh	D 3 3 bh	D 3 3 bh				D 1 3 bh	D 4 3 b	D 3 3 bcd	D 3 3 bcd	C 3 3 b	
	Galvanisé zingué	C 3 3 cdh	C 3 3 cd	C 3 3 cd	C 3 3 cd	C 3 3 cd	C 3 3 cdh	D 3 3	D 5 3	D 1 3	B 4 3 cd	C 3 3 cd	C 3 3 cd	B 3 3	
	Autres revêt.	D 3 3 cdh	D 3 3 cd	D 3 3	D 3 3	D 3 3	D 3 3	D 3 3	D 5 3	D 1 3	D 4 3	C 3 3 cd			
Acier inoxydable		C 3 4	C 3 4	C 3 4	C 3 4	C 3 4	D 3 4	D 3 4	D 5 4	D 1 4	A 4 4 e				
Aluminium et ses alliages		D 3 1	D 3 1	C 3 1 eg	C 3 1 eg		C 3 1 eg	D 3 1	D 5 1	B 1 1 eg					
Cuivre		D 3 5	D 3 5	C 3 5 egh	C 3 5 egh	C 3 5 egh	C 3 5 egh	D 3 5	D 5 5 egh						
Laiton rouge 10-25 % Zn		D 3 3	D 3 3	D 3 3	D 3 3	D 3 3	D 3 3	C 3 3							
Laiton jaune 25-40 % Zn		C 3 3 eg	C 3 3 eg	C 3 3 eg	C 3 3 eg	C 3 3 eg	B 3 3 eg								
Mallechort		B 3 3	B 3 3	C 3 3	C 3 3	B 3 3									
Bronze silicieux		C 3 3	C 3 3	C 3 3	B 3 3										
Bronze phosphoreux		C 3 3	C 3 3	C 3 3	B 3 3										
Nickel		B 3 3	B 3 3												
Alliage de nickel		B 3 3													

Possibilité de soudure

Electrode contre

Electrode contre

Indications spéciales

Indications spéciales

a) Emploi dans une gamme très large de qualité et de dimension

b) Soudure non homogène de faible qualité, sablage ou décapage recommandé.

c) L'épaisseur du revêtement doit être uniforme.

d) Les électrodes doivent être tenues propres pour éviter le collage.

e) Fortes intensités et temps courts pour éviter le collage.

f) De faibles épaisseurs peuvent être soudées sous conditions spéciales.

g) Les paramètres de soudure doivent être soigneusement contrôlés.

h) Faible résistance de la soudure.

NATURE DU TRAVAIL AFFECTER		NATURE DU GRAIN A UTILISER	
Soudage	Aciers doux Des aciers inoxydables Des aciers réfractaires Des aciers galvanisés	Des laitons Des bronzes Du nickel et de ses alliages	Alliage cuivre chrome zirconium
	De l'aluminium	De l'acier aluminé	Cuivre électrolytique
	Du cuivre pur	Du cuivre faiblement allié	Pastille de molybdène
	Du cuivre	Du laiton	Pastilles de molybdène coté cuivre et grain Cu-Cr-Zr coté laiton
	Des fils de cuivre De l'acier au silicium	Du tantale	Pastilles de tungstène
	Des contacts électriques		Pastilles de cuprotungstène
	Electrobrasage ou chauffage	De pièces en métaux divers	Pastilles de graphite

DIAMÈTRE DES ÉLECTRODES

A l'examen de la coupe d'un point soudé, il apparaît à l'évidence, qu'il existe un rapport direct entre le diamètre des faces actives des pointes d'électrodes et le diamètre (d) du lingot fondu. Nous avons vu que ce diamètre de la face active de pointe d'électrode, détermine une surface de contact qui sera la section fictive d'un conducteur de résistance « r » au sein des pièces soudées, siège d'un effet Joule, propre à engendrer la fusion du lingot.

Qu'il s'agisse des résistances internes ou des résistances de contact, tout est symétrique dans le cas de deux tôles de même épaisseur, le courant parcourt une portion de métal cylindrique de pointe d'électrode à pointe d'électrode.

Qu'advient-il de cette symétrie des valeurs, lorsque les épaisseurs de tôles sont inégales ?

Afin de mieux illustrer l'interprétation, considérons le cas de deux épaisseurs très différentes 1mm sur 10mm.

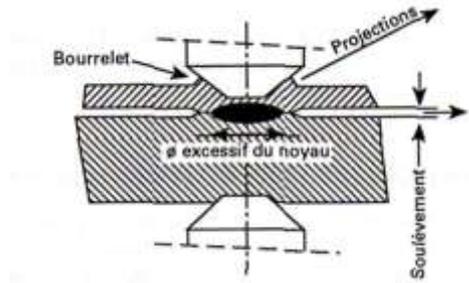
Dans ce cas, la résistance interne de la seconde tôle n'est plus négligeable, elle se trouve décuplée et va donc être le siège d'un second effet Joule, par rapport à celui des résistances de contact.

Cet échauffement supplémentaire, pour peu que la puissance de la machine l'autorise, va entraîner une dispersion thermique plus importante au sein des tôles à assembler et un surdimensionnement du lingot. La tôle la plus fine sera le siège d'une indentation plus

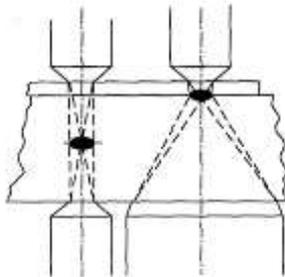
profonde, une rupture du creuset n'est pas à exclure dans ta tôle fine, avec projection de métal en fusion.

Le niveau d'énergie, engendrant l'élévation de température jusqu'à fusion du matériau peut s'apprécier aussi en densité de courant c'est-à-dire en ampère/mm². En adaptant le diamètre des faces actives de pointes d'électrode à l'épaisseur de la tôle soudée, il est possible de modifier la trajectoire du courant au sein des épaisseurs soudées. Le conducteur fictif au sein des tôles à souder n'est plus alors de section cylindrique, il est à section variable. La densité du courant devient également variable et les deux sources d'effet Joule peuvent coïncider à l'interface des tôles.

Le noyau soudé généré suivant cette méthode sera d'un volume correspondant à la plus fine des tôles, il sera obtenu avec des paramètres : intensité, temps, effort, correspondant à la plus fine des deux tôles également.



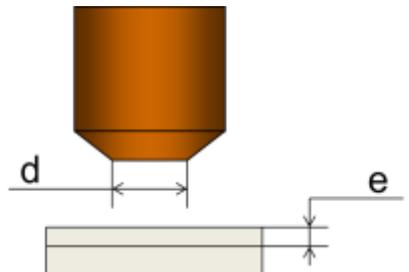
Soudage avec diamètre de faces actives non adapté aux épaisseurs ($e^1 > e^2 \times 3$)



Cheminement du courant dans la masse des laies suivant les formats d'électrodes

Pour ce qui concerne le format le plus classique, les électrodes tronconiques. Il existe une formule pour déterminer les diamètres de faces actives de pointe d'électrode.

$$- \varnothing \text{ (mm)} = (2e + 3)$$



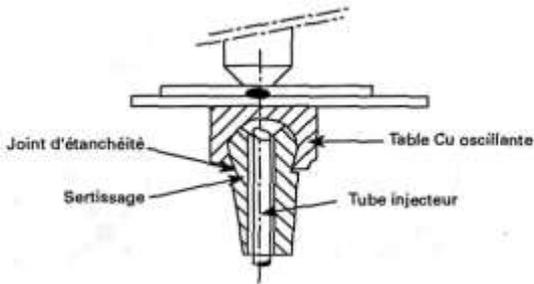
On utilise parfois aussi des formats de pointes d'électrode à face active sphérique. Cette pratique est particulièrement préconisée dans le soudage d'alliages légers ou pour le soudage des tôles d'acier de fortes épaisseurs.

FORMAT PARTICULIER : LES ROTULES

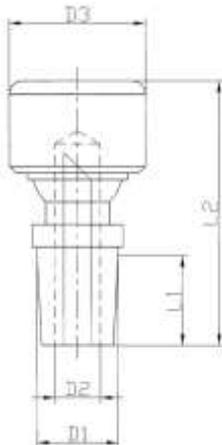
Les rotules sont des électrodes à forte section de contact. Elles sont utilisées dans l'assemblage par points de tôles fines et permettent d'éviter l'indentation sur l'une des faces des tôles assemblées. Nous ferons seulement remarquer que leur préconisation est limitée à des épaisseurs de tôle $e = 1\text{mm}$.

Elles s'utilisent face à une électrode standard. Dans ce cas, la focalisation du courant est déterminée par la face active de l'électrode standard opposée à la rotule. Sur la face de tôle au contact de la rotule, le forgeage est réparti sur toute la surface de contact rotule, évitant ainsi l'indentation d'une électrode, mais non le retrait dû au choc thermique (cas de l'inox).

L'utilisation d'électrodes à rotule est à éviter pour des épaisseurs de tôles supérieures à 1,2 mm et surtout dans le cas d'épaisseurs inégales, si la recherche de qualité d'aspect, concerne la plus fine des deux tôles.



Coupe d'une rotule



D1	D2	D3	L1	L2
8,9	6,5	30	10	49
11,8	8	22	14	40
11,8	8	30	14	53
12,7	8	30	16	55
15,5	9	30	20	59
17,8	11	30	20	59
19	11	30	25	64
24,5	13	50	32	82

Rotule Elbrodur HF (Cu Cr Zr) - Schrub

VIII. LE SOUDAGE PAR BOSSAGES

EXTENSION DU SOUDAGE PAR POINTS DIRECTS

1. DEFINITION

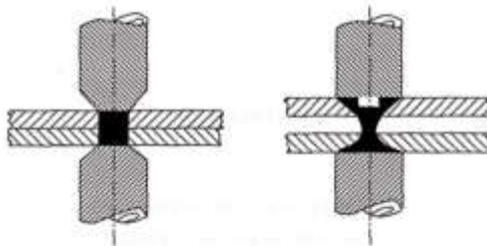
Dans le soudage par points, la localisation de l'effet Joule et du forgeage étaient déterminées par la forme des pointes d'électrodes et l'effort exercé sur ces pointes d'électrodes.

Dans le soudage par bossages, l'effort de forgeage et la section de passage du courant, se déterminent par la mise en contact, de protubérances appelées bossages.

Le dimensionnement de ces protubérances détermine un volume de métal dans les deux parties à assembler, qui correspondra à la localisation d'un noyau soudé. L'effort de serrage global et le transfert du courant destiné à l'obtention de l'effet Joule, sont obtenus à partir d'électrodes de grande surface, couvrant avec dépassement, le ou les bossages.

La cinématique du soudage est très voisine de celle du soudage par points. Un accroissement très rapide de la température dans la zone du bossage et celle qui lui est opposée dans la tôle plane, entraîne simultanément, l'effondrement du bossage et la naissance d'un noyau fondu.

Lorsque l'opération est achevée, la protubérance s'est totalement résorbée dans la tôle qui lui fait face et les deux parties à assembler, sont jointes comme dans le cas du point, par un noyau fondu, forgé.



Images comparatives du soudage par point à gauche et par bossage à droite

L'intérêt majeur de ce procédé, réside dans le fait que l'on peut souder plusieurs bossages simultanément sur un même couple de pièces (dans la limite de capacité de la machine et dans une limite géométrique des pièces à assembler).

Nous avons vu, dans l'analyse du point de soudure sur acier doux, que la génération d'un noyau de métal fondu par effet Joule pouvait s'accommoder d'un courant électrique variable par son intensité et son temps d'application, allant ainsi du soudage lent au soudage rapide ; mais nous étions en présence d'un circuit résistif établi par accostage et de géométrie invariable (aux dilatations près).

Dans le cas du bossage, au contraire, l'établissement du circuit résistif s'effectue par la pointe du ou des bossages et nous sommes en présence de résistances de contact, beaucoup plus

élevées, à l'interface des deux pièces à souder. Les résistances de contact électrodes, sont elles, beaucoup plus faibles, puisque l'amenée d'effort et de courant se fait par électrodes de grande surface.

En outre, pendant toute la durée de la phase chaude du temps de soudage, cette résistance va décroître très rapidement proportionnellement à l'accroissement de section qu'entraîne l'effondrement du bossage. Il s'agira donc d'un soudage rapide.

Un soudage lent entraînerait en effet, un affaiblissement prématuré des caractéristiques mécaniques du bossage et annulerait la possibilité de pénétration et de forgeage dans la tôle qui lui fait face.

Cependant la limite de rapidité sera atteinte plus vite que dans le cas du soudage par points ; en effet, l'élévation de température n'est pas symétrique pendant toute la durée du temps chaud, pour les deux parties à assembler.

Le bossage s'échauffe le premier à sa pointe, se résorbe sur lui-même sans creuset de maintien.

Une montée trop rapide de la température peut entraîner son explosion.

Un certain nombre de règles vont régir le procédé de soudage dit par bossages, elles sont issues directement de l'analyse précédente.

2. NATURE ET FORME DES BOSSAGES

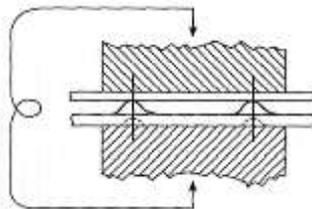
2.1. BOSSAGES ARTIFICIELS

Les bossages artificiels sont préparés dans l'une des deux pièces à assembler. Ils sont caractérisés par leur forme géométrique et leur disposition.

✓ Bossages emboutis

Les plus fréquemment utilisés, pour l'assemblage de pièces en tôle. Ils sont obtenus par l'utilisation de poinçons et matrices, de géométrie déterminée, de forme hémisphérique ou tronconique. Les poinçons et matrices sont le plus souvent intégrés aux outils d'emboutissage et l'obtention de ces bossages est masquée dans l'opération d'emboutissage des pièces elles-mêmes.

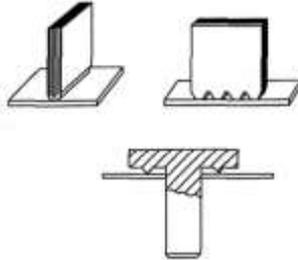
Nota Lorsque l'épaisseur de la tôle dans laquelle sont emboutis les bossages diminue en deçà de 0,8mm, la structure voilée de l'embouti y compris son degré d'écroutissage n'offre plus une résistance mécanique suffisante à l'écrasement lors de l'accostage, on a alors recours à des bossages annulaires.



Bossages emboutis

✓ Bossages estampés ou découpés

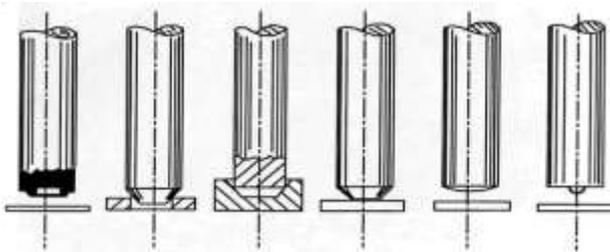
Lorsque la section ou l'épaisseur de la pièce dans laquelle doit être suscité le bossage devient telle qu'il ne peut plus être envisagé d'emboutir, on a recours à du repoussage à froid à très forte pression ou à la découpe par estampage (écrous ou vis à bossages).



Bossages matricés

✓ Bossages usinés

Lorsque le ou les bossages sont effectués dans une pièce de révolution massive, ils sont le plus souvent obtenus par décolletage.



Bossages décolletés

Nota : Pour les raisons évoquées, lorsque les deux pièces à assembler sont confectionnées dans des tôles d'épaisseurs différentes, les bossages seront repoussés dans la plus forte des épaisseurs et leur dimensionnement sera proportionné à la plus faible des épaisseurs. Pour le cas relativement fréquent hélas où les bossages doivent être préparés dans la plus faible des deux épaisseurs, ils seront alors surdimensionnés, proportionnellement à l'épaisseur la plus forte, dans laquelle ils devront se forger.

En tout état de choix, les paramètres optimums de soudage, intensité, temps, efforts, devront correspondre à la section de bossage adoptée et cette inversion de situation pour le bossage ne conduira à de bons résultats que dans une proportion de 1 à 2 pour les épaisseurs respectives des deux foies.

2.2. BOSSAGES NATUREL

Le soudage de profils cylindriques en croix est assimilé à un soudage par bossages. La localisation du soudage à l'intersection des génératrices est ponctuelle et le développement d'un noyau fondu procède du même raisonnement que ce qui précède.

Il fait pour nous l'objet d'une étude particulière - le soudage des ronds et des tubes.

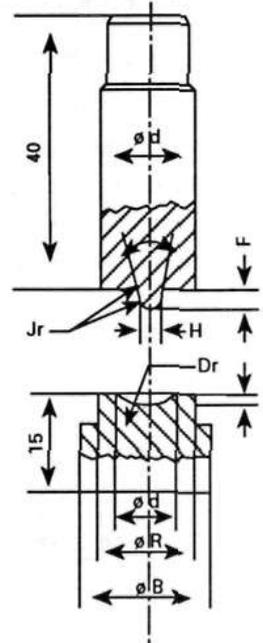
Épais. des tôles mm		Dimensions du bossage		Récouv. R M(m) mm		Barèmes de soudage pour l'acier doux																	
						Pour 1 bossage						Pour 1 à 3 bossages						Pour plus de 3					
						Dimensions du bossage		Récouv.		R		M(m)		mm		mm		mm		mm		mm	
D	h	Pas	R	M	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm						
0.5	2.9	0.35	16	9	4.1	2	68	4 400	198	4	68	3 950	147	5	36	2 900	132						
0.6	3.1	0.6	17	9	4.3	2	78	4 950	200	4	68	4 450	193	6	40	3 100	143						
0.7	3.2	0.65	17	9	4.5	2	88	5 500	227	6	68	4 450	193	6	45	3 300	154						
0.8	3.4	0.7	18	10.5	4.8	2	109	6 600	318	6	68	5 100	237	9	56	3 800	193						
0.9	3.5	0.8	18	10.5	4.9	3	130	7 300	400	7	90	5 400	250	10	65	4 100	260						
1	3.8	0.9	18	10.5	5.1	4	150	8 000	481	8	95	6 000	367	12	73	4 300	327						
1.2	3.7	0.95	19	12.7	5.2	6	181	8 800	590	14	122	6 500	488	16	100	4 800	397						
1.5	3.8	1.1	19	12.7	5.4	8	249	10 300	816	17	165	7 650	715	21	150	5 400	556						
2	4.6	1.22	23	12.7	6.5	11	363	11 650	1 100	23	240	8 650	975	28	213	6 400	794						
2.5	6.1	1.40	32	19	8.5	16	563	14 100	1 740	32	378	10 800	1 560	41	338	8 300	1 315						
3	6.9	1.47	36	20.6	9.7	18	777	14 850	2 177	36	454	11 300	1 905	50	408	9 200	1 633						
3.5	7.6	1.58	41	23.4	10.7	20	845	15 300	2 456	40	499	11 950	2 300	55	454	9 900	1 930						
4	8.5	1.67	46	25	12	22	920	16 100	2 800	44	565	12 450	2 550	60	520	10 950	2 220						

NB: Tolérance pour M ± 0,1

Ref. Le soudage par bossage de Montieur NEGRE
Welding Journal (avril 1961) page 367
Welding Handbook page 413

GÉOMÉTRIE DES POINÇONS MATRICÉS

Epaisseur des tôles	A	B	C ± 0,05	D	E ± 0,025	F ± 0,025	H ± 0,025	J
0,3 à 0,4	9,5	14,5	1,4	0,8	0,4	0,4	0,9	0,12
0,4 à 0,56	9,5	14,5	1,7	1,1	0,45	0,5	1	0,12
0,64	9,5	14,5	2	1,25	0,5	0,65	1,1	0,12
0,8	9,5	14,5	2,4	1,6	0,55	0,75	1,25	0,12
0,9	9,5	14,5	2,1	1,6	0,55	0,75	1,25	0,12
1	9,5	14,5	3	2	0,7	0,9	1,6	0,12
1,25	9,5	14,5	3	2	0,7	0,9	1,6	0,12
1,6	9,5	14,5	4	2,7	0,9	1,1	2,05	0,12
1,8	9,5	14,5	4	2,7	0,9	1,1	2,05	0,12
2	9,5	14,5	4,8	3,25	1,05	1,4	2,55	0,25
2,4	12,5	17,5	5,6	3,75	1,2	1,65	2,8	0,25
2,8	12,5	17,5	6,4	4,35	1,4	1,9	3,5	0,4
3,2	12,5	17,5	7,2	4,9	1,5	2,15	4	0,4
3,6	12,5	17,5	8	5,5	1,7	2,45	4,4	0,4
4	16	20,5	9	6,2	1,8	2,7	4,85	0,4
4,4	16	20,5	9,5	6,7	2	3	5,3	0,4
4,8	16	20,5	10,5	7,25	2,15	3,3	5,6	0,4
5,2	17,5	22	11	7,8	2,3	3,6	6,1	0,5
6,4	20,5	25,5	13,5	9,5	2,8	4,45	7,25	0,6



PARAMÈTRES DU SOUDAGE PAR BOSSAGES

Le courant de soudage est relativement très élevé, étant donné qu'il s'agit de soudage rapide surtout dans le cas des bossages soudés sur des épaisseurs inférieures à 1,5mm.

Remarque :

Nous rappelons ici que le départ d'effet Joule se développe sur une résistance ponctuelle très élevée et en l'absence de métal environnant pour contenir la fusion, il sera donc souhaitable d'appliquer un slope (très limité) au courant de soudage, si le coffret de séquence le permet.

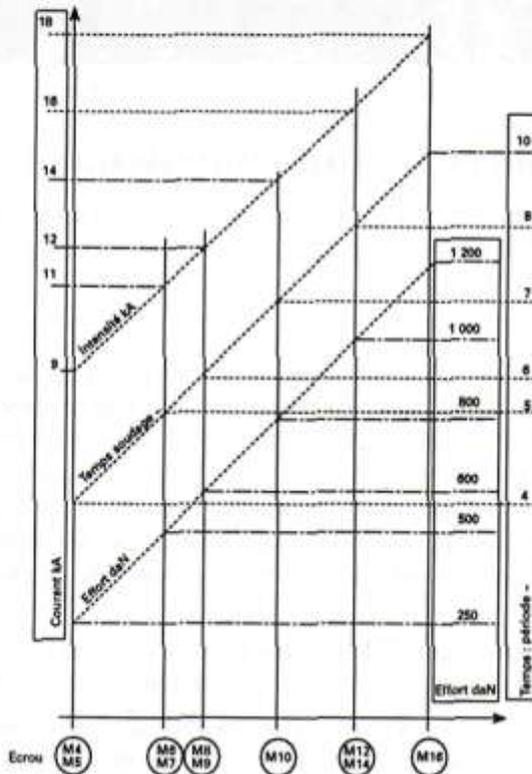
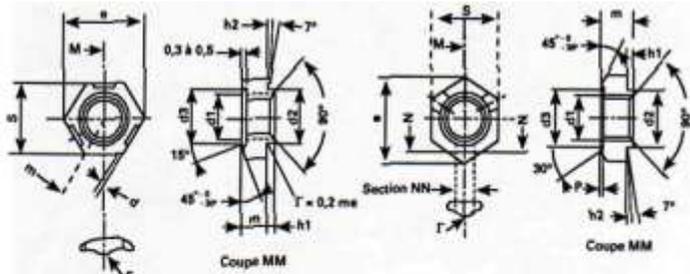
Un cycle de courant de préchauffage est à proscrire car il entraînerait une préchauffe dissymétrique des deux pièces, au profit du ou des seuls bossages, les rendant plastiques prématurément et réduisant leur possibilité de pénétration et de forgeage.

Dans les pièces à bossages, en fortes épaisseurs, ou pour des bossages annulaires pleins de forte section, on a souvent recours aux impulsions, avec intervalles courts.

L'environnement du noyau soudé est plus tempéré (gradient de température plus faible, donc moins de tensions induites dans la structure métallurgique environnante) la chauffe est homogène sur toute la section intéressée et l'appel de puissance, pour la machine et le réseau, est plus limité.

PARAMÈTRES : SOUDAGE D'ÉCROUS A BOSSAGES SUR TÔLE

Il existe dans le monde du soudage une très large panoplie de géométries diverses pour les écrous à bossages et il s'en imagine de jour en jour un peu plus encore. Les données ci-dessous ne concernent que deux écrous du type H à 3 bossages.



NOTA :

- 1) Valeurs de paramètres à pondérer suivant l'épaisseur de la tôle qui les reçoit
- 2) Pour des écrous à 4 bossages appliquer une règle proportionnelle pour intensité et temps de soudage mais n'accroître les efforts que de 20%.

SOUDAGE ECROUS HEXAGONAUX A QUATRES BOSSAGES AVEC CENTRAGE

(SUR TOLE ACIER DOUX)

ø écrou	Ep. tôle mm	Effort de soudage daN	Temps de soudage ~	Courant kA	Couple de torsion m/n			
M4	0,5	200	4	7	30			
	0,6	230		7,5	50			
	0,7	250		8	70			
M5	0,8	300		5	9	80		
	1	350			9,5	90		
M6	0,6	250			6	8	65	
	0,7	300				8,5	75	
	0,8	400				9	90	
M7	1	500				7	9,5	95
	1,2	600					10	100
M8	0,8	500	8				10	100
	1	550					11	105
	1,2	600					12	110
M9	1,5	650		9			12,5	115
	2	750					13	120
	2,5	900					14	125
M10	1	600			10		12	110
	1,2	650					13	115
	1,5	700					13,5	120
	2	800				14	125	
	3	900				16	130	
	4	1 000				18	140	
M12	1,5	750	11			14	120	
	2	800				14,5	125	
	2,5	900				15	130	
M14	3	1 000		12		16	135	
	3,5	1 200				18	140	
	4	1 400				20	150	
M16	2	850			13	15	130	
	2,5	900				16	135	
	3	1 000				17	140	
	3,5	1 200				18	150	
	4	1 400				20	160	
	4,5	1 450				22	170	
5	1 500	24	180					

NOTA ø de perçage : ø de la collerette de centrage + 0,1 jusqu'à M7.

ø de perçage : ø de la collerette de centrage + 0,15 pour M8 et plus.

PARAMETRES DE SOUDAGE POUR VIS TRANSVERSANTES
(SUR TOLE ACIER DOUX)

ø vis	Type bossage	Épaisseur tôle	Effort soudage	Temps soudage	Courant	Résistance attach.	Couple torsion	ø perçage tôle	Pénétration optimum
mm		mm	daN	N	kA	daN	mN	mm	
4 à 5	3 bossages annulaire	0,6	230	4	8	300	40	4,1	X X X X X X
	3 bossages annulaire	0,6	260	4	9	350	40	à 5,1	
	3 bossages annulaire	0,7	230	4	8	350	40		
	3 bossages annulaire	0,7	260	4	8,5	400	50		
	3 bossages annulaire	0,8	250	4	8,5	450	50		
	3 bossages annulaire	0,8	280	4	9	500	80		
6 et 7	3 bossages annulaire	1	300	5	9,5	450	80		6,2 à 7,2
	3 bossages annulaire	1	350	6	12	550	100		
	3 bossages annulaire	0,8	300	6	12	500	60		
	3 bossages annulaire	0,8	350	6	14	600	90		
	3 bossages annulaire	1	400	7	13,5	500	90		
	3 bossages annulaire	1	450	7	16	900	110		
8	3 bossages annulaire	1,2	450	7	18	950	150	8,2	X X X X
	3 bossages annulaire	1,2	500	7	22	1 000	160		
	3 bossages annulaire	1	550	8	14	800	180		
	3 bossages annulaire	1	600	8	16	1 000	200		
	3 bossages annulaire	1,5	650	8	16	900	200		
	3 bossages annulaire	1,5	700	8	17	1 250	250		
10	3 bossages annulaire	2	750	8	18	1 100	250	10,3	X X X
	3 bossages annulaire	2	800	8	20	1 300	300		
	3 bossages annulaire	2,5	900	8	21	1 200	300		
	3 bossages annulaire	2,5	950	8	25	1 400	350		
	3 bossages annulaire	1,5	700	8	18	960	300		
	3 bossages annulaire	1,5	800	8	20	1 250	350		
10	3 bossages annulaire	2	800	8	21	1 200	400	10,3	X X X
	3 bossages annulaire	2	900	8	24	1 350	400		
	3 bossages annulaire	2,5	900	8	25	1 350	400		
	3 bossages annulaire	2,5	1 000	9	27	1 450	450		
	3 bossages annulaire	3	1 000	9	26	1 400	500		
	3 bossages annulaire	3	1 200	10	28	1 600	600		

IX. LE SOUDAGE A LA MOLETTE

1. DEFINITION

Soudage par points répétitifs à intervalle contrôlé.

2. MISE EN ŒUVRE

Conception adaptée, à partir d'une machine de soudage par résistance. Cette opération de soudage peut se réaliser à partir d'une machine à souder par points, utilisée à très grande cadence (300 à 1 000 points/minute). Dans ce cas on choisit une machine, dont le système de mise en serrage présente peu d'inertie. Le déplacement de la pièce en mode manuel est aléatoire et la régularité de positionnement des points dépend uniquement, de la dextérité de l'opérateur.

Afin de palier à ce risque d'irrégularité, on a remplacé les électrodes d'une machine classique, par des disques en alliage de cuivre appelés molettes, dont la mise en rotation peut être, régulée par la machine elle même.

La mise en serrage, puis en rotation synchronisée des molettes, assure le maintien des deux tôles à assembler et leur avancement.

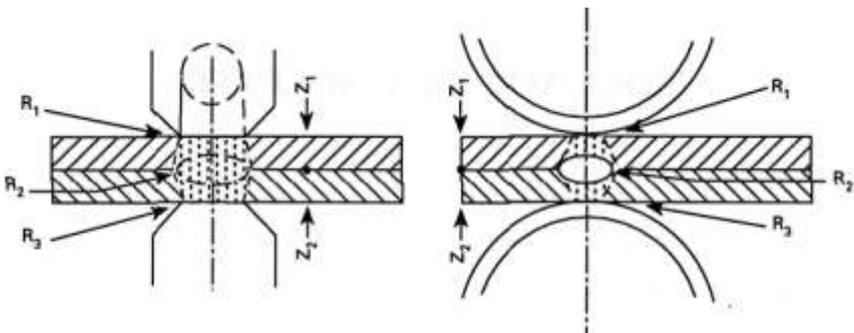
Il suffit alors de proportionner l'enchaînement des temps chauds et froids à la vitesse tangentielle d'entraînement pièce, des deux molettes, pour obtenir des lignes de soudure par points à espacement contrôlable. Bien entendu, la mise en serrage est ininterrompue, durant toute la durée de réalisation de la ligne de soudage.

3. CINÉMATIQUE DU SOUDAGE

L'interprétation de la loi de Joule dans ce cas, est similaire à ce qu'elle était dans le cas du soudage par points.

La résistance globale mise en jeu est constituée de résistances en série de même nature (résistances intrinsèques + résistances de contact).

Les résistances de contacts extérieures molette/tôle, sont plus élevées du fait de la section d'appui, théoriquement linéaire (et sans surface) des molettes.



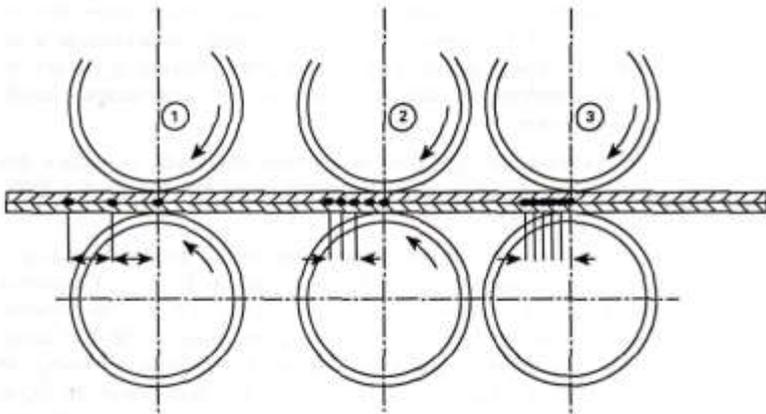
4. EFFET DE SHUNT

Dès que l'on aborde le 2^{ème} point d'une série en mode molette, l'effet de shunt existe bien et les paramètres de puissance de la machine doivent en tenir compte. Cette fuite de courant est d'autant plus sensible que les points sont plus rapprochés. Afin de limiter autant que possible, la dispersion calorifique, le processus de soudage est un mode rapide à base de fortes intensités et de temps chauds plus courts.

Pour des épaisseurs identiques, les intensités sont presque doublées et les temps, donc en toute logique, divisés par quatre (efforts plus élevés, pour accepter la densité d'ampères au contact).

Si l'on réduit peu à peu l'espacement des points, on accroît l'effet de shunt, mais la propagation thermique autour du point effectué contribue à la montée de température du point suivant.

Il s'établit ainsi, une balance énergétique et il devient dès lors possible d'obtenir des cordons à points jointifs et même imbriqués de noyaux à noyaux.



Ce procédé permet de réaliser des cordons de soudage continus parfaitement étanches (construction d'enceintes à volumes internes étanche).

5. SÉQUENCE DE COMMANDE DE SOUDAGE

5.1. ACCOSTAGE

Même définition que dans le cas du soudage par points : établissement du circuit résistif stabilisé, puis mise en rotation des molettes.

5.2. SOUDAGE

Temps d'établissement du courant qui va générer l'effet Joule nécessaire à la fusion (durée d'impulsion ou temps chaud).

5.3. TEMPS FROID

Intervalle entre deux impulsions de courant. C'est ce temps froid qui va déterminer l'intervalle entre deux points, en fonction de la vitesse d'avance tangentielle des molettes.

5.4. FORGEAGE

Il n'y a pas de temps de forgeage proprement dit, géré par la séquence ; le forgeage est confondu et réalisé durant le temps d'intervalle entre deux impulsions. Il s'exerce à effort constant sur les deux tôles à assembler, en dehors de l'axe du point lui-même et de point en point ; la décroissance de température est plus rapide que dans le cas du point puisque la surface de portée tangentielle molette est sans cesse renouvelée donc moins chaude qu'une pointe d'électrode.

Cependant lors d'un soudage étanche à points imbriqués, la surface des points est laissée à l'air libre à température relativement élevée (900 à 1 000°C dans le cas de l'acier doux). Il se forme une « comète » de coloration rouge cerise, qui suit le « sillage » des molettes, le taux d'indentation est admis à plus de 10% de l'épaisseur soudée, surtout pour des épaisseurs de 1,2mm et plus et le cordon présente à l'extérieur une coloration bleue, il est homogène, mais oxydé.

On limite parfois cette oxydation en adaptant un dispositif d'arrosage extérieur, le soudage s'effectue alors sous un film d'eau qui n'est que chassé de façon ponctuelle par les molettes durant le soudage, mais revient et vaporise partiellement sur le cordon de soudure, accélérant ainsi son refroidissement.

6. RÉGLAGE DE LA PUISSANCE

Comme dans le cas du soudage par points, le coffret de séquence doit, en addition au comptage du temps, gérer la valeur efficace du courant de soudage destiné à développer l'effet Joule. Dans la version la plus courante des applications, le soudage se fait à niveau de courant constant.

L'obtention d'une balance thermique stable en début de cordon (cas de soudage étanche) est plus facile si l'on dispose d'un « upslope ». Dans ce cas il s'agit d'un slope enveloppe qui évite la surchauffe du ou des premiers points. Cette surchauffe lorsqu'elle apparaît se traduit par une adhérence de la pièce à la surface de molette (phénomène de collage). Il s'agit alors le plus souvent d'une rupture en surface du circuit résistif, due à une densité d'ampères excessive.

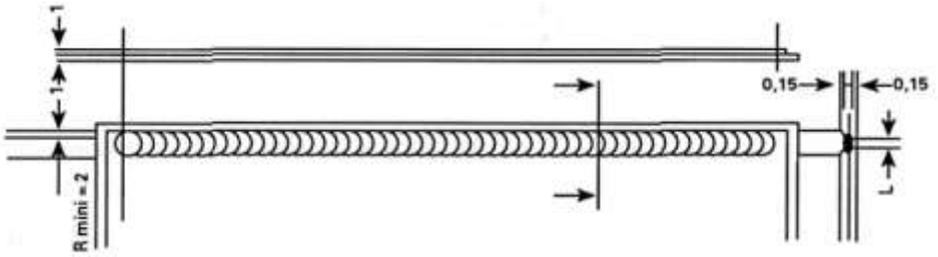
Un slope de toutes les impulsions peut être souhaitable dans certaines applications molette, sur tôles revêtues (voir soudage de l'acier galvanisé).

7. TECHNOLOGIE DU CORDON SOUDÉ

7.1. LARGEUR DU CORDON

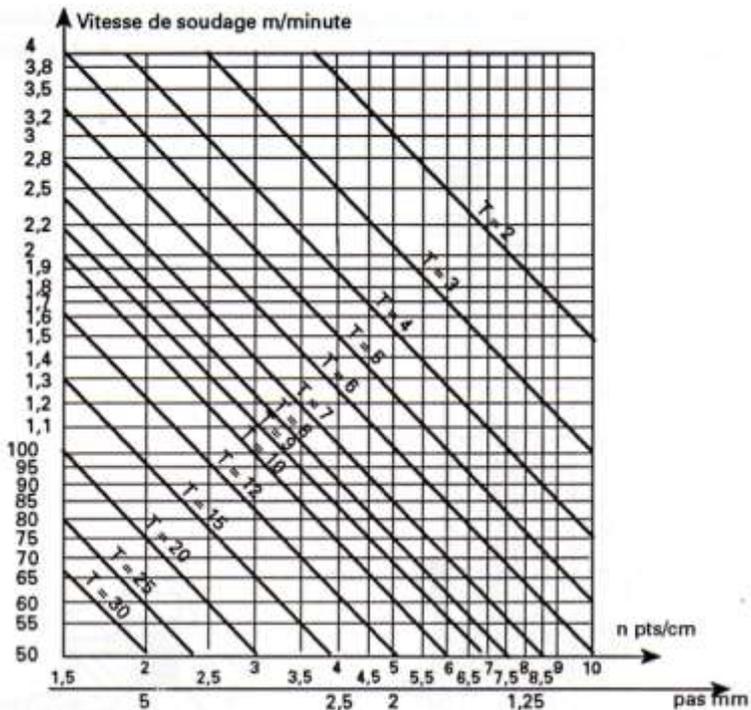
Nous avons vu dans le cas du soudage par points, l'importance du critère diamètre du point et de celui des faces actives de pointes d'électrodes. Il en va de même dans le soudage molette, ce qui revient à dire, dans le cas de points jointifs ou séquentiels, que la largeur du cordon soudé sera conservée constante et d'une valeur précise, proportionnelle à l'épaisseur au contact de la molette, (cas des épaisseurs inégales). La règle empirique retenue sera :

$$L = (2 \times e) + 2\text{mm}, e \text{ étant l'épaisseur de la tôle considérée.}$$

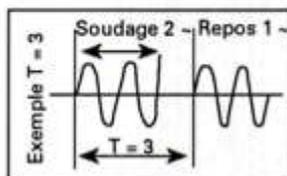


7.2. L'INDENTATION

L'indentation du cordon et le soulèvement des tôles adjacentes, dans le sens transversal du cordon, seront tolérés jusqu'à concurrence de 15% de l'épaisseur soudée. Ces deux critères sont dépendants du profil de la molette (profil à flanc droits ou tronconiques) et de la densité de points.



$$V_{cm/min} = \frac{3000}{nT}$$



EN CONCLUSION

On pourra utiliser une machine à molettes pour du soudage par points, alors qu'une soudeuse par points ne peut pas toujours être utilisée pour du soudage molette.

Soudage par points à la molette arrêtée

Procédé aussi appelé Roll-Spot (le terme Roll-Spot désigne dans certaines littératures l'exécution de points séparés).

Le soudage étanche ou semi-étanche sur certains matériaux s'accommode mal du cycle décrit plus haut.

C'est notamment le cas de certains alliages légers dont ceux contenant du cuivre.

C'est aussi le cas de certains alliages réfractaires à base de nickel. Dans ce cas, la rotation des molettes peut être interrompue et chaque point peut être exécuté molettes arrêtées, avec cycles thermiques plus ou moins complexes, cycles de pression variable, UP et down slope etc. La seule différence avec une machine par point est que l'effort de serrage des tôles n'est jamais relâché.

Nota : dispersion thermique. Le soudage à la molette étanche s'accompagne d'une dispersion thermique importante au sein des tôles à souder.

Suivant la position du cordon par rapport au bord extérieur des tôles assemblées, la propagation des calories se fait de manière symétrique si le cordon se situe en milieu de tôle à recouvrement large.

Dans le cas où le cordon est effectué en bordure de tôles, à faible recouvrement, la dispersion ne peut se faire que vers la masse des tôles, ce qui entraîne une surchauffe de celles-ci côté extérieur.

Cette différence est sensible et peut exiger une paramétrie différente, tant pour la modulation, que pour le niveau de puissance suivant que le « cordon » à effectuer se situe en milieu ou en bordure de pièce (cas des radiateurs plats).

PARAMETRES DE SOUDAGE A LA MOLETTE SUR ACIER DOUX

Epaisseur tôle mm			Effort de soudage daN	Temps chaud sec	Temps froid sec	Vitesse m/min.	Intensité kA	Nombre de points par 10 cm	Slope : + impuls. n° 1
0,3	10	3	160	1	1	2,5	10	60	0
0,4	10	3	175	1	1	2,4	11	62,5	0
0,5	10	3,5	250	2	1	2,3	11	43,5	0
0,6	10	3,5	300	2	1	2,2	11,5	45,4	0
0,7	12	3,8	300	2	1	2,10	12	47,6	1
0,8	12	4,2	350	2	1	2,00	13	50	1
0,9	12	4,4	400	2	2	2,00	14,5	38	1
1	13	4,6	400	2	2	2,00	15	38	1
1,2	13	4,8	500	2	2	2,00	16	38	1
1,4	14	5	600	3	2	1,9	17,5	31,5	2
1,5	16	5,2	600	3	1	1,9	18	39	2
1,6	20	5,6	700	4	2	1,8	18	28	3
1,8	20	6	750	5	2	1,7	19	25	3
2	20	6,2	800	5	1	1,5	20	33	3
2,5	20	7	900	6	2	1,3	22	29	4
3	20	8	1 000	6	2	1,00	23,5	37,5	4

NOTA

- (1) Pour des vitesses d'avance plus élevées, la suppression du temps froid permet le soudage à la pulsation du courant 50 Hz, l'angle de déphasage constituant une modulation naturelle.
- (2) Ces paramètres sont donnés à titre indicatif et leur validité doit être confirmée sur éprouvettes d'essai. C'est en fonction du résultat recherché que l'on pourra ajuster chacun d'eux.

PARAMETRES DE SOUDAGE A LA MOLETTE SUR ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES

Epaisseur tôle mm			Effort de soudage daN	Temps chaud ∞	Temps froid ∞	Vitesse m/min.	Intensité kA	Nombre de points par 10 cm ∞	Slope : + impuls. n° 1 ∞
	Valeur mini	Valeur maxi	Mini			Maxi			
0,3	10	3	200	1	1	2,1	6	71,4	0
0,4	10	3,2	220	1	1	2	6,8	75	0
0,5	10	3,8	300	1	1	1,90	7,4	78,9	0
0,6	12	4	350	2	1	1,70	8	58,8	1
0,7	12	4,2	400	2	1	1,70	9	58,8	1
0,8	12	4,6	450	2	2	1,60	9,8	46,8	1
0,9	14	4,8	500	2	2	1,60	10,5	46,8	1
1	14	5	600	2	2	1,60	12	46,8	1
1,2	14	6	700	2	2	1,50	13	50	1
1,4	16	6,3	800	3	2	1,40	13,7	42,8	2
1,5	20	6,5	850	3	2	1,30	14	46,1	2
1,6	20	6,9	900	4	3	1,35	14,5	31,7	2
1,8	20	7,2	980	4	3	1,25	14,8	34,3	3
2	20	7,5	1000	4	3	1	15	28,6	3
2,5	20	9	1200	5	3	0,90	15,5	41,7	3
3	20	10	1500	5	3	0,90	16	41,7	3

NOTA

(1) Paramètres indicatifs, modifiables en fonction du résultat recherché.

(2) Profil de molette : on préconise souvent pour des épaisseurs inférieures à 1 mm d'utiliser une face active de molette bombée avec rayon de 80 à 100 mm.

(3) Pour des épaisseurs supérieures à 1,5 mm, un arrosage extérieur peut limiter l'oxydation du cordon en surface.

X. LA METALLURGIE EN SOUDAGE PAR RESISTANCE

Nous avons mentionné traitant de la résistance dynamique, la similitude du comportement, en soudage, d'un métal, allant jusqu'à le comparer à celui d'un « tissu vivant ». L'image est forte et les processus de « transformation » sont en fait, beaucoup moins sophistiqués que ceux de la physiologie.

Afin de mieux comprendre les aspects les plus élémentaires de ces transformations, il nous a paru souhaitable d'analyser quelques aspects élémentaires de la métallurgie.

1. RAPPEL DE PHYSICO-CHIMIE

1.1. CLASSIFICATION DES ÉLÉMENTS

- Les métaux
- Les non métaux ou métalloïdes (semi-conducteurs)
- Les gaz rares

1.2. DÉFINITION D'UN MÉTAL

Un métal est à l'état solide à la température ordinaire, exception faite du mercure, il présente à l'observation un éclat dit métallique, si on lui fait subir un traitement de polissage. Il conduit plus ou moins la chaleur et l'électricité ; ces deux propriétés étant indissociables et inhérentes à la population électronique de leurs atomes.

Mécaniquement, un métal est ductile (déformable) dur et tenace (propriétés mécaniques). La combinaison chimique d'un métal à de l'oxygène donne des oxydes. La combinaison d'un métal à de l'hydrogène produit des hydrures.

2. ORDONNANCEMENT DE LA MATIÈRE

La structure interne de la matière se présente en gros, sous forme : atomique, moléculaire ou cristalline, l'atome est constitué d'un noyau; lui même, composé du proton à charge positive et de particules inertes qu'on appelle neutrons ; le proton détermine la masse de la matière et son classement dans le tableau périodique de MENDELEEF.

Autour de ce noyau gravitent à distances relatives et vitesses très grandes, des particules plus petites, à charge négative, appelées électrons, dont la masse est environ 1/1850 de celle du noyau. Les orbites réparties dans l'espace, appelées couches électroniques (K, L, M, N, O, P, Q) sont à population d'électrons variables.

(K= 2, L =8, M=18, N = 32, O = 21, P = 9, Q = 2)

Le nombre de ces couches est variable (de 1 à 7 : périodicité).

Un atome ainsi défini, est électriquement neutre (équilibre des charges).

La couche extérieure dont le nombre idéal d'électrons serait 8 est responsable des propriétés physiques et chimiques de la matière.

2.1. STRUCTURE ATOMIQUE

Les gaz rares de l'air comme le néon, l'argon le krypton possèdent une couche extérieure complète à 8 électrons, ils sont donc parfaitement neutres et n'entrent dans aucune combinaison, on les appelle parfois gaz atomiques ou monoatomiques.

2.2. STRUCTURE MOLÉCULAIRE DES CORPS SIMPLES

Les corps simples sont constitués par des associations d'atomes, exemple (figure 16.1 et 16.2): 2 atomes de chlore se lient pour constituer une molécule de gaz chlore ou 2 atomes d'oxygène constituent la molécule d'oxygène (la molécule d'ozone est constituée de trois atomes d'oxygène).

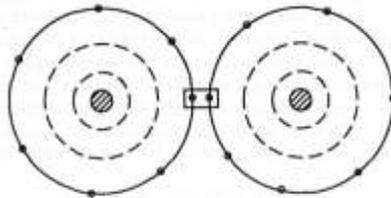


Figure 16.1 - Constitution d'une molécule de gaz - chlore -

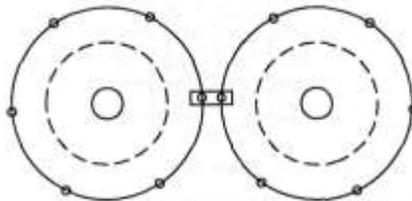


Figure 16.2 - Image d'une molécule d'oxygène

2.3. STRUCTURE MOLÉCULAIRE DES CORPS COMPOSÉS

L'atome d'oxygène à 6 électrons périphériques tendra à compléter sa couche L à 8 électrons, en s'associant à deux atomes d'hydrogène, pour constituer une molécule d'eau corps stable et isolant.

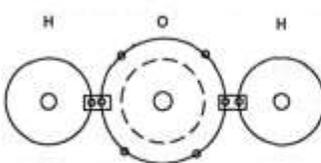


Figure 16.3 - Molécule d'eau (H₂O)

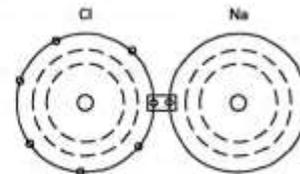
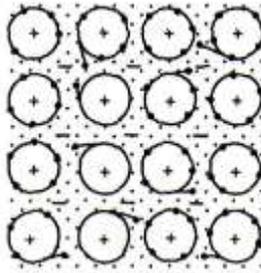


Figure 16.4 - Molécule de sel de sodium (Cl Na)

3. STRUCTURE CRISTALLINE DES MÉTAUX

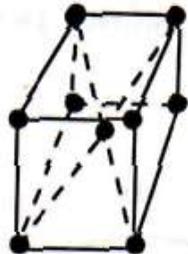
Les atomes d'un métal pur sont le siège de forces attractives et ont tendance à se lier entre eux, dans l'espace, pour constituer des cristaux à géométrie variable, suivant leur nature et les contraintes extérieures auxquelles ils sont soumis- Ces contraintes peuvent être d'ordre mécanique, thermique ou électrique. La fusion d'un métal par échauffement entraîne une agitation intense des atomes qui le composent. Lors d'un refroidissement ultérieur l'agitation de ces atomes, va peu à peu se calmer et ils vont figer leur position au sein d'une structure solide suivant une architecture que l'on appelle maille ou réseau.



3.1. CLASSIFICATION DES RÉSEAUX CRISTALLINS

Pour simplifier la représentation de ces réseaux on a schématisé trois types de systèmes cristallins.

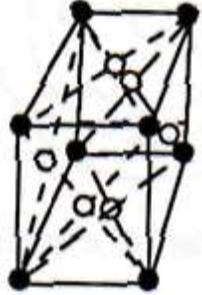
3.1.1. Le système cubique centré



Exemple : chrome, molybdène, fer, W, Nb.

Constituée de 8 atomes liés aux arêtes angulaires d'un cube fictif, plus un atome, situé dans la masse du cube à l'intersection de ses diagonales, (total : 2 atomes par maille).

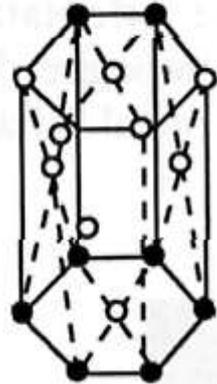
3.1.2. Le système cubique à faces centrées



Exemple : Cu, Alu, Mn, Fery, Ag, Au, Ni, Pb.

Constitué de 8 atomes liés aux arêtes angulaires d'un cube fictif, plus 1 atome par milieu de face extérieure, soit $6/2$ (total : 4 atomes par maille).

3.1.3. Le système hexagonal compact



Exemple : Mg, Zn etc.

12 atomes occupant les arêtes angulaires d'un volume hexagonal.

3 atomes, centrés toutes les deux faces latérales.

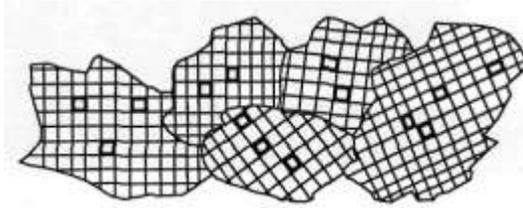
2 atomes respectivement situés au centre des faces supérieure et inférieure du barreau hexagonal.

(total : 6 atomes par maille).

3.1.4. Définitions

a. Grain de métal

C'est un agrégat de cristaux orientés dans le même sens.



Structure cristalline et granulaire des métaux

b. Joints

Zones ou pavés délimitant des agrégats différemment orientés. On notera que l'élasticité ou la fragilité d'un métal sont fonction de sa structure cristalline. Un échauffement du métal entraîne un grossissement de son grain. La solidification d'un métal fondu a pour conséquence la germination et la croissance progressive d'un édifice cristallin. La structure de cet édifice est basaltique au départ, puis progressivement équiaxe vers le centre du lingot au noyau de point

c. Elasticité « ductilité »

Sous l'effet de contraintes mécaniques à froid on induit une déformation des grains. En deçà de la limite élastique, une relaxation de la contrainte entraîne un retour à l'état initial. Une contrainte plus accentuée au delà de la limite d'élasticité aura pour conséquence un glissement sur certains plans cristallins et une morphologie différente du grain, la déformation est définitive même si l'on relaxe la contrainte.

Il pourra s'ensuivre une orientation différente du grain, c'est le phénomène d'écrouissage qui s'accompagne d'un renforcement de certaines des caractéristiques mécaniques du métal (charge de rupture), nous avons une diminution de l'allongement.

Le réchauffage d'un métal préalablement écroui entraîne une recristallisation et annule donc l'effet d'écrouissage.

d. Alliages

Ce sont des mélanges de corps différents; un métal peut s'allier à d'autres métaux et ceci dans des proportions variables : métal faiblement allié ou fortement allié.

L'alliage tend à se comporter comme le métal de base pur, mais les atomes du corps B viennent s'insérer dans le corps A, les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques de l'ensemble sont alors modifiées.

Exemple :

La température de fusion d'un métal est d'autant plus élevée que son degré de pureté est grand. A l'inverse, un alliage fond ou se transforme à température plus basse qu'un métal pur.

e. Changement d'état

Les corps peuvent revêtir trois états physiques différents : solides, liquides ou gazeux. A la température ambiante, un métal est à l'état solide (sauf le mercure). Le passage d'un état à un autre ou changement d'état peut être obtenu par des contraintes de pression ou de température. En ce qui concerne les métaux et les aspects métallurgiques de leur soudure,

nous ne considérons que les états liquides/solidus. Le passage d'un état à un autre n'est pas instantané (intervalles de transformation).

En ce qui concerne l'acier doux, (alliage de fer et de carbone) outre le passage à l'état liquide inhérent à la naissance d'un noyau de point, il se produit d'autres transformations dans les métaux à assembler, à des niveaux de température intermédiaires, qui concernent la structure du métal. Ces transformations à l'état solide peuvent être affectées dans une opération de soudage par résistance.

XI. METAUX FERREUX : ACIERS

1. RÉSUMÉ SOMMAIRE DE LA SIDÉRURGIE ÉLÉMENTAIRE DU FER

1.1. MINÉRAI DE FER

Le fer n'existe dans la nature, que sous forme de combinaisons chimiques que l'on appelle oxydes, sulfures, etc. mélangés à d'autres éléments minéraux, et constituant les minerais. Les minerais sont extraits et préalablement affinés par concassage, lavage, décantation et divers autres traitements mécaniques.

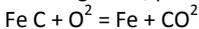
1.2. EXTRACTION CHIMIQUE ET PRODUCTION DE FONTE

Réduction à chaud, des oxydes par le carbone dans les hauts fourneaux : combustion provoquée du coke sidérurgique et des oxydes en milieu pauvre en oxygène. En fait, le métal ainsi obtenu contient encore un taux important d'impuretés : soufre, phosphore, manganèse, silicium etc. ainsi qu'une grosse quantité de carbone. C'est de la fonte brute. Cette fonte liquide est recueillie dans des poches de transfert et acheminée vers un second stade de traitement, pour en extraire de l'acier.

1.3. ÉLABORATION DES ACIERS PAR RÉDUCTION DU CARBONE

Les poches de transfert sont soit entretenues en température, soit réchauffées et leur contenu de fonte brute (fer + carbone) est reversé dans des cornues appelées convertisseurs ou des fours de traitement.

Le carbone et les impuretés, étant alors à l'état de dilution dans le fer, sera éliminé sous forme de dégagements gazeux, par soufflage d'oxygène pur, dans le bain de fusion.

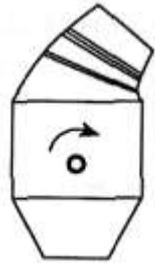


Une deuxième coulée d'extraction sera alors effectuée dans des lingotières, solidifiée, écoutée par chutage et enfin laminée ou forgée en produits bruts d'acier.

En fait, cette sidérurgie traditionnelle est peu à peu supplantée par des procédés plus modernes, tels que les fours électriques et une forte proportion (80%) de la matière première proposée aujourd'hui aux industries de transformation provient soit du procédé dit en coulée continue soit des refontes de ferrailles avec réincorporation de métaux nobles tels que niobium, titane, vanadium qui améliorent sensiblement les propriétés physiques de l'acier.

2. CLASSIFICATION DES ACIERS PRODUITS SIDÉRURGIQUES

Une première classification peut s'envisager à partir de la composition des aciers, c'est-à-dire leur teneur en éléments divers, mais surtout en carbone.



Convertisseur à oxygène

2.1. FONTES

Pour une teneur de 4,3 à 6% de carbone : fontes grises.

Pour une teneur de 1,7 à 4,3% de carbone : fontes blanches.

Ces matériaux sont essentiellement utilisés pour la confection de pièces moulées (pas d'application en soudage par résistance).

2.2. ACIER

Pour une teneur de 0,6 à 0,7% de carbone : aciers très durs voire extra durs.

Ces matériaux ne sont plus guère utilisés en mécanique, que sous forme d'aciers faiblement alliés à d'autres métaux, pour en réduire la fragilité et en relever les caractéristiques mécaniques :

- pour une teneur de 0,4 à 0,6% de carbone : aciers durs
- pour une teneur de 0,30 à 0,40% de carbone : aciers mi-durs

Matériaux utilisables pour la confection de pièces à usage mécanique, très difficilement soudables par résistance.

- pour une teneur de 0,15 à 0,25% de carbone : aciers doux couramment appelés aciers au carbone.

Matériau de base essentiellement utilisé par les industries de transformation des « métaux en feuilles » aisément soudable par tous procédés, résistance entre autres.

- pour une teneur de 0,05 à 0,12% de carbone : aciers extra doux

Matériau de très grande ductilité, présentant des propriétés électromagnétiques intéressantes, pour leur faible rémanence, aisément soudable par tout procédé.

3. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUE DU FER PUR

Température de fusion : 1 534°C

Température d'ébullition : 2 980°C

Densité : 7,9

Résistance mécanique à la rupture : 32 à 38 kgf/mm²

Résistivité : 11 μΩ.cm

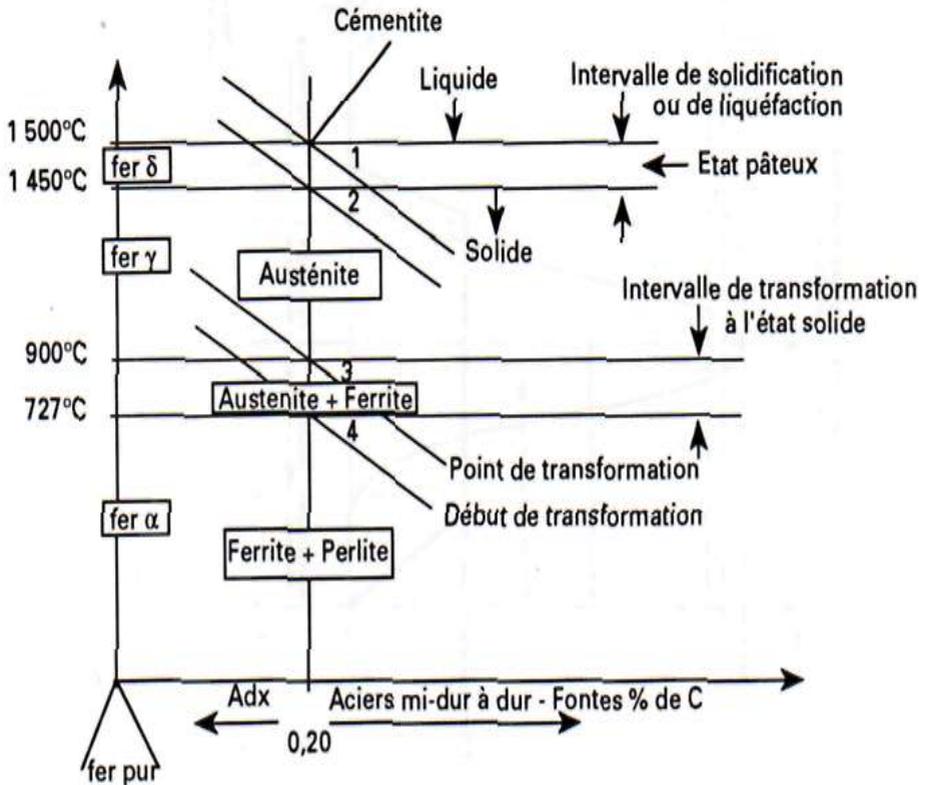
Conductivité thermique : 80,2 W·m⁻¹·K⁻¹

Interprétation :

Jusque vers 700°C l'acier est magnétique et ne contient que très peu de carbone en solution (0,03 à 0,05%). La solution solide de carbone dans le fer est appelée ferrite et cristallise sous forme *cubique centrée*.

Entre 727°C et 870°C les constituants évoluent pour donner de l'austénite qui cristallise sous forme *cubique à face centrée*. Cette austénite est saturée par 1,7% de carbone à 1 150°C, une nouvelle architecture apparaît, l'acier cristallise à nouveau sous forme cubique centrée.

Vers 1 500°C l'arrangement cristallin disparaît, l'acier prend un état pâteux, puis liquide.



Evolution des niveaux de transformation avec la variation de teneur en carbone

4.2. REFROIDISSEMENT

Si l'on supprime alors l'apport calorifique, un cycle de refroidissement plus ou moins rapide va commencer et on pourra observer une courbe des températures similaire, par rapport au temps, si le refroidissement est suffisamment lent.

La solidification de l'acier va débuter vers 1 500°C le carbone qui avait été intégralement libéré, va de nouveau se réinsérer dans les cristallisations successives, en fonction de sa solubilité dans les différentes architectures de cristaux.

Mais si le facteur temps de refroidissement est minimisé (cas du soudage par résistance) la diffusion des éléments n'aura pas le temps de s'effectuer et la structure obtenue sera hors d'équilibre et ne correspondra plus à celle du diagramme d'équilibre.

5. CYCLE THERMIQUE SPÉCIFIQUE DU SOUDAGE PAR RÉSTANCE

En conclusion

En fonction des températures atteintes au chauffage, des vitesses d'échauffement et de refroidissement les structures obtenues dans les métaux à souder seront variables, et entraîneront des propriétés mécaniques en service différentes.

A titre d'exemple si l'on refroidit brutalement un acier dont la teneur en carbone est supérieure à 0,20% l'austénite n'a pas le temps de se transformer en ferrite + perlite. La diffusion du carbone est minimisée, les structures ne sont plus en équilibre.

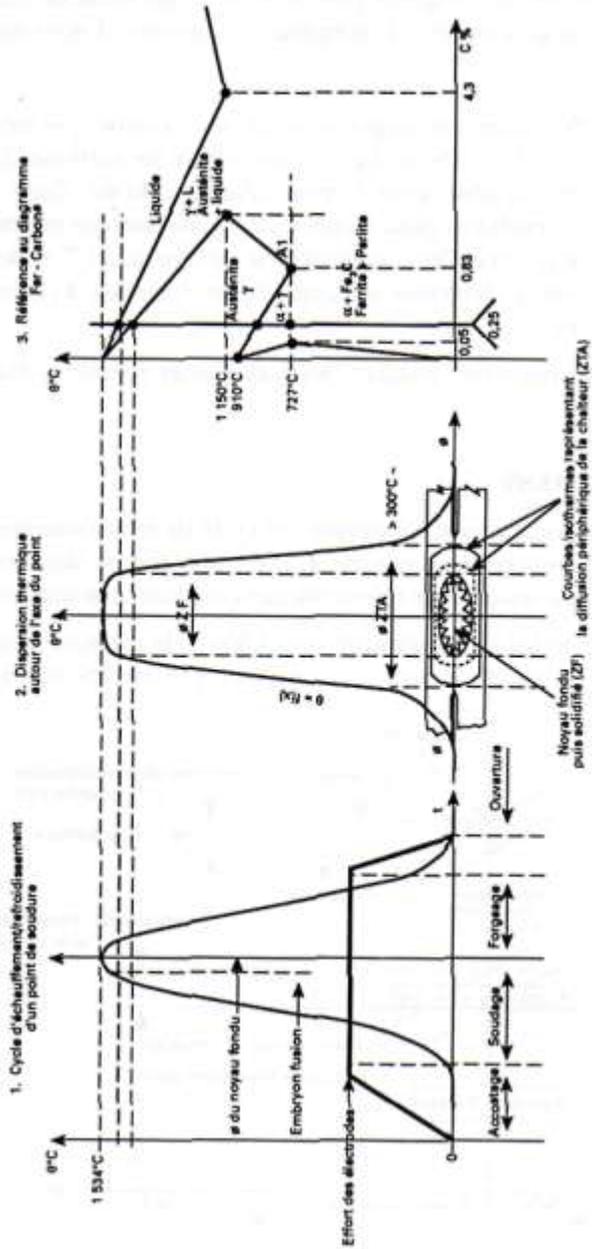
C'est notamment ce qui se produit en soudage par résistance avec maintien ou forgeage. Il s'agit d'un phénomène de trempe avec apparition de martensite.

6. TRAITEMENTS THERMIQUES

Le soudage par résistance, nous l'avons vu, correspond à un cycle thermique très accéléré, tant du point de vue échauffement, que du point de vue refroidissement. S'il s'applique à des tôles d'acier doux, de nuance, très inférieure, à 0,20% de carbone, la vitesse de refroidissement, perturbe peu la structure après fusion. L'orientation cristalline est basaltique à la périphérie du noyau, le grain du métal est grossi, mais le comportement du point soudé est bon en résistance mécanique. S'il s'agit de tôles fortes, (ép. > 1,5mm) le cycle est plus lent et donc plus favorable.

Toutefois, les produits laminés, actuellement utilisés dans les industries de transformation, peuvent dépasser sensiblement les 0,20% de carbone ou leur équivalence et dans les aciers faiblement alliés, certains sont faiblement trempants.

Dans ce cas, on peut utiliser les machines de soudure, pour appliquer sur le point effectué des traitements thermiques variables afin d'atténuer les inconvénients précités (grossissement de grain et fragilisation par le carbone).



Relation de la formation du noyau de point soudé par résistance

6.1. PRÉCHAUFFAGE

Dans la soudure de pièces en tôles de fortes épaisseurs, nous l'avons évoqué, il est souvent souhaitable de parfaire l'accostage par une préchauffe des tôles. Les calories, alors accumulées dans la zone environnant le creuset vont contribuer à réduire la vitesse de refroidissement lors du forgeage, augmentant ainsi les intervalles de transformation.

6.2. LES POST-CHAUFFAGES

Définition :

Interruption du cycle de refroidissement par une nouvelle injection thermique, les électrodes de la machine étant maintenues en effort sur le point.

6.2.1. RECUIT

Dans une opération de recuit, la température du noyau et de son environnement, est relevée au dessus du niveau A3, du diagramme, (c'est-à-dire à plus de 900°C). On obtient une régénération des grains qui correspond généralement à un affinement de la structure. Dans ce cas, le nouveau cycle de refroidissement doit être suffisamment lent.

6.2.2. REVENU

Dans une opération de revenu la température du noyau et de son environnement, est relevée légèrement au dessous du point A1, c'est-à-dire à environ 700°C. Ce traitement a pour but d'éliminer les effets néfastes de la trempe, il provoque en même temps un détentionnement si le temps de maintien est assez long.

Nota : Dans certains cas d'assemblage, (fer à béton) si la contrainte de déformation des « étriers » et la plus faible résistance mécanique des points sont peu préjudiciables à la qualité requise, pour l'assemblage, la simple suppression du temps de maintien, peut atténuer de façon significative les effets de trempe éventuelle.

7. ÉLÉMENTS D'IMPURETÉ DANS LES ACIERS

Les éléments dits d'impureté, dans les aciers, demeurent pour une faible proportion de l'analyse, dans le métal, à l'élaboration (S, Ph, Pb, Si, H etc.). Certains sont souhaitables, d'autres non. Ces éléments viennent s'intercaler dans le grain du métal à la solidification. Cette insertion se nomme ségrégation.

Elle altère les cohésions inter cristallines et donc les propriétés mécaniques du matériau : peu si elles sont disséminées, ou prou, si elles sont concentrées.

7.1. LE SOUFRE ET LE PLOMB

Sont des éléments d'impureté que l'on laisse souvent subsister (en proportion très faible) dans les aciers de décolletage (matériaux autolubrifiants, susceptibles d'usinage rapide). Lors d'une réchauffe ultérieure (cas du soudage par résistance).

La présence de ces éléments va donner lieu à formation de sulfure et phosphure de fer qui sont des éléments de fragilisation (grossissement du grain).

7.2. L'HYDROGÈNE

L'acier à l'état liquide peut dissoudre beaucoup d'hydrogène. L'hydrogène en excès dans le métal en fusion ne s'élimine que partiellement lors du refroidissement et se trouve piégé dans le réseau cristallin de l'acier.

Cette substance de poches gazeuses peut entraîner une fissuration à froid différée (formation d'œil de poisson). Cet inconvénient est rarissime dans les matériaux en feuille, susceptibles d'être soudés par résistance.

7.3. ACIERS EFFERVESCENTS

Si des oxydes sont restés emprisonnés lors de la solidification initiale à l'air, lors d'une nouvelle fusion au moment du soudage nous aurons un dégagement gazeux du type : $Fe O + C + Fe + \dots$ qui provoque des défauts de compacités dans la soudure.

7.4. ACIERS CALMÉS

On supprime cette effervescence par l'adjonction à la coulée d'une faible quantité d'aluminium de silicium ou de manganèse.

Outre son rôle calmant, il est à noter que le manganèse est susceptible de neutraliser un excès de soufre.

8. ANCIENNE DÉSIGNATION CONVENTIONNELLE DES ACIERS

Cette standardisation est aujourd'hui remplacée par la norme EN 10 025.

8.1. C + NOMBRE X - ACIER CONTENANT X CENTIÈMES % DE CARBONE.

XC + Nombre acier de formule et caractéristiques plus précises. XC + Nombre + S, acier dito bien soudable

Exemple : XC 18 S acier doux à 0,18% de C soudable

8.2. ACIERS FAIBLEMENT ALLIÉS : 30 CAD 6-12

Acier à 0,30% de carbone contenant 1,5% de chrome (facteur 4) et 1,2% d'aluminium (facteur 10) la teneur du 3^{ème} élément non chiffrée, (molybdène).

Élément	Symbole	Coefficient X	Élément	Symbole	Coefficient X
Alu	A	10	Plomb	Pb	10
Chrome	G	4	Silicium	S	4
Cobalt	K	4	Soufre	F	10
Manganèse	M	4	Titane	T	10
Molybdène	D	10	Tungstène	W	10
Nickel	N	4	Vanadium	V	10

8.3. ACIERS FORTEMENT ALLIÉS : UN ÉLÉMENT AU MOINS A + DE 5% Z

Exemple : Z6 CN18-10, acier inoxydable à 0,06% de carbone, 18% de chrome et 10% de nickel.

Exemple : Z10 CNT 18-10, acier réfractaire austénitique à 0,10% de C, 18% Cr, 10% nickel + titane (4%).

9. CATÉGORIES D'ACIER - NOTIONS D'ALLIAGES

En fait, la soudabilité d'un acier se détermine essentiellement par sa teneur en carbone, les autres éléments de l'analyse affectent aussi la soudabilité mais dans une proportion moindre. On retiendra que d'une façon générale lorsque le carbone entre pour plus de 0,30% dans la composition d'un acier, il n'est plus soudable.

9.1. ACIERS AU CARBONE

Ce sont des aciers, qui peuvent contenir à l'état de traces : manganèse, silicium, soufre, phosphore etc. et dont le carbone est inférieur à 1,7% (au delà de 1,7% de C > domaine des fontes).

9.2. ACIERS FAIBLEMENT ALLIÉS

Aciers situés aussi dans la limite des 1,7% de C, mais comprenant outre les traces d'impuretés du précédent, un métal d'addition dans une proportion n'excédant pas 5 % et leur conférant des propriétés physiques différentes, ductilité, dureté, résistance à la corrosion

(Cr, Ni, vanadium, Mo, Zirconium).

9.3. ACIERS FORTEMENT ALLIÉS

Aciers identiques aux précédents, mais dont l'un des composants additionnels excède au moins 5%.

9.4. FORMULE DITE DE CARBONE ÉQUIVALENT

Concerne surtout les aciers faiblement alliés.

C Mn Si Ni Cr C (équivalent) : $C/1 + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5$

On assimile l'influence de ces différents composants, dans la proportion de leurs influences possibles, sur la structure cristalline de l'acier (Action comparée dans ses effets à celle du C).

10. ALLIAGES ACIER/CHROME

Aciers au Chrome (difficilement soudables par résistance)

10.1. ACIERS AU CHROME 4 A 6%

Résistants à la chaleur et à la corrosion (utilisation en réfractaires). Caractéristiques mécaniques en fonction de leur carbone.

Il se forme à leur surface une pellicule de Cr imperméable. Ils sont trempant à l'air donc pas soudables.

10.2. ACIERS AU CHROME 13% (MARTENSITIQUE AU Cr

Bonne résistance à la corrosion, caractéristiques mécaniques élevées, mais sont trempants à l'air et exigent donc un post-chauffage long après soudage - a et b sont soudables, dans la limite de leur carbone ; mais un échantillonnage préalable de soudabilité est particulièrement recommandé.

10.3. FERRITIQUES AU Or : 12 A 27% DE Or ET C < 0,35%.

Sont trempants à l'air donc difficilement soudables et ne peuvent être régénérés par traitement thermique sur machine lorsqu'ils ont été transformés par la chauffe.

10.4. ACIERS AU NICKEL CHROME

10.4.1. Aciers austénitiques (18 à 26% de Cr, 18 à 22% de Ni)

Carbone de 0,02% à 0,15% suivant nuance (en plus, peuvent comporter des éléments d'alliage tels que : Ti, Co, Mo, Mn.). Identification : amagnétiques.

Se soudent aussi facilement que l'acier doux. Ces aciers conservent leur structure austénitique au refroidissement, jusqu'à la température ambiante et ne prennent pas la trempe ils exigent un courant de soudage moins élevé pour la chauffe, (en raison de leur résistivité plus grande) que les aciers au carbone.

Par contre en raison de leurs caractéristiques mécaniques supérieures à celles de l'acier au carbone, ils exigent des efforts de forgeage > de l'ordre de 20% au moins.

10.4.2. Aciers austéno-ferritiques

Dito les précédents, mais avec une teneur en nickel beaucoup plus faible, qui n'assure donc plus une structure austénitique pure, mais une structure mixte (ferrite + austénite.) Ces aciers offrent une très bonne résistance à la corrosion. Ils sont magnétiques, mais ont une nette tendance à fragiliser au soudage. Pour des raisons de prix on retrouvera souvent cette catégorie de matériau dans des industries telles que l'électroménager ou l'accessoire automobile.

Les plus grandes précautions seront prises au point de vue réglage des machines, (pressions élevées, O actif d'électrodes, séquences : temps et I).

10.4.3. Corrosion inter-granulaire

Le carbone contenu dans les aciers de la catégorie ci-dessus est susceptible de former des carbures de chrome. Ces carbures de chrome localisés dans les joints du grain, peuvent en réduire la cohésion. L'appauvrissement chrome résultant pour l'alliage peut altérer la résistance à la corrosion de l'assemblage en service.

Exemple de corrosion inter granulaire :

Tambours de machines à laver dessoudés après un an de stockage, sans avoir jamais tourné, en milieu agressif.

10.4.4. Passivation

On limitera sensiblement les risques de corrosion, après soudage, en effectuant un décapage des points de soudure et une passivation éliminant les traces de brunissage ou bleuissement sur et autour des points de soudure.

Un polissage mécanique peut jouer un rôle similaire.

10.4.5. Écrouissage et fragilisation mécanique

D'une façon générale, les aciers austénitiques s'écrouissent à froid (laminage, pliage, emboutissage), augmentant ainsi leur dureté et résistance mécanique. C'est pourquoi leur forgeage en soudure exige des efforts de compression plus importants. Dans certains cas l'écrouissage à froid peut entraîner une transformation partiellement martensitique (pliage, estampage).

11. ACIERS AU MANGANÈSE :

(12 à 14% Mn et 1 à 1,4% carbone)

Résistance et dureté très grandes, dureté en surface, ductilité en profondeur, (pièces de fatigue sur engins T.P.).

(Matériel ferroviaire) - résistance 95kg/mm² et allongement 45%.

Ces aciers de type austénitique sont susceptibles de fragilisation au soudage. Il en existe des dérivés à bas carbone qui sont dit soudables, mais dans le domaine du soudage par résistance un essai préalable est toujours recommandé.

12. ACIERS AU SILICIUM

Teneur en silicium variable, conférant à ces aciers des propriétés particulières dans le domaine électromagnétique. Soudabilité très variable en fonction du taux de carbone, essai préalable recommandé.

XII. SOUDO-BRASAGE PAR RESISTANCE

1. DEFINITION DU BRASAGE

Assemblage des pièces métalliques par fusion à l'interface d'un alliage, à température de fusion inférieure à celle du métal constituant les pièces à assembler : cet alliage ayant la particularité de « mouiller » le métal de base des pièces et présentant après solidification des propriétés d'adhérence, de ténacité mécanique et de continuité électrique.

La fusion de l'alliage appelé « brasure » apport ou métal d'apport, est généralement obtenue par un effet calorifique d'origine variée : chalumeau à gaz, four, générateur d'induction ou « machine de soudage par résistance ». Les machines de soudage par résistance, sont parfois utilisées comme moyen de chauffage, car elles sont particulièrement bien adaptées à certaines de ces applications :

- apport calorifique intense, rapide et contrôlable,
- localisation de réchauffement,
- maintien du positionnement des pièces à souder durant l'opération de fusion du métal d'apport.

Le brasage est classé suivant deux catégories :

- **LE BRASAGE FORT**, à partir d'alliages d'apport dont le point de fusion est supérieur à 450°C

- **LE BRASAGE TENDRE**, utilise des alliages d'apport dont le point de fusion est inférieur à 450°C

2. CONDITIONS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU BRASAGE

L'alliage de brasure est pré-inséré entre les pièces à assembler.

La température de l'ensemble est élevée jusqu'au point de fusion de l'alliage, très inférieur à celui du métal des pièces à assembler. Cette température est maintenue jusqu'à fusion totale de l'alliage. Celui-ci mouille les surfaces de contact et se répartit intégralement par capillarité. Le chauffage est alors interrompu et la solidification du film de brasure intervient rapidement conférant à l'ensemble les « propriétés » souhaitées.

Le mouillage ne peut s'étendre à l'intégralité des surfaces de contact, qu'en l'absence de tout élément polluant le bain de fusion, il faut notamment prévenir la formation d'oxydes métalliques durant l'opération de chauffage. La désoxydation est réalisée par l'adjonction d'un « flux décapant ».

Il s'agit le plus souvent d'un mélange chimique sous forme de poudre, de pâte, de liquide ou de gaz, qui conserve ses propriétés désoxydantes, au delà de la température de fusion de l'alliage de liaison.

L'adjonction de flux chimique est difficile à doser et sa présence en excès après solidification de l'alliage est fréquemment une source de corrosion, il faut donc le neutraliser. Les pièces brasées sont généralement décapées, rincées et séchées après les opérations de brasage.

Il existe deux exceptions à ce mode opératoire :

- les alliages contenant du phosphore,
- les flux gazeux.

2.1. ALLIAGES AU PHOSPHORE

Lorsque l'opération de brasage est effectuée sur des pièces en *cuivre*, l'alliage de brasure utilisé (à base d'argent) peut contenir du phosphore. Le phosphore libéré lors de la fusion, joue le rôle désoxydant et après solidification, il ne subsiste pas de réactivité à la corrosion. Il n'est donc pas indispensable de décapier les pièces ainsi brasées.

2.2. LES FLUX GAZEUX

Principalement utilisés dans les fours à atmosphère, ne laissent pas subsister de substance corrosive dans les pièces ainsi brasées (atmosphère d'hydrogène, azote, CO, CO², H₄).

3. UTILISATION DE MACHINES A SOUDER PAR RÉSISTANCE EN BRASAGE : DOMAINES D'APPLICATIONS

3.1. MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Pour l'assemblage de pièces en cuivre ou en alliage de cuivre, compte tenu de la faible résistivité du métal et des faibles résistances de contact, il devient très vite nécessaire d'utiliser des machines de très forte puissance en soudage direct par résistance. On peut alors avoir recours à une solution de soudo-brasage par résistance.

Exemple :

Barres de jonction électrique en fortes épaisseurs de cuivre.

3.2. OUTILLAGE - CHARPENTE (mise à la terre)

Dans l'assemblage de métaux à structure cristallographique différente ou dont les points de fusion sont très différents, il n'y a pas nécessairement de solution possible en soudé forgé direct, on peut alors avoir recours à une solution de soudo-brasage.

Exemple :

Assemblage d'une tresse cuivre sur profil en acier.

Assemblage d'un outil en acier rapide sur un support en acier courant (assemblage d'une pastille carbure sur support acier doux).

3.3. RELAIS - DISJONCTEURS - COMMUTATION

Assemblage de composants électriques : pastilles de contact à base d'argent, sur supports cuivre, laiton, bronze ou autre.

3.4. ARTICLE DITS « DE PARIS »

Montages en joaillerie/bijouterie : fermoirs de sacs, boucles, broches, bagues, boutons de manchette, etc.

3.5. PRÉPOSITIONNEMENT

Lunetteries, monture de lunettes.

3.6. MOBILIER CHIRURGICAL

Soudage orthogonal de tubes en inox à parois fines.

4. MODE OPÉRATOIRE

La faiblesse des résistances internes, la faiblesse des résistances de contact, la diversité des métaux assemblés, systèmes cristallographiques incompatibles ou points de fusion très différents, structures fragiles et altérables à la température, conduit à une recherche parfois sophistiquée de la technologie d'application.

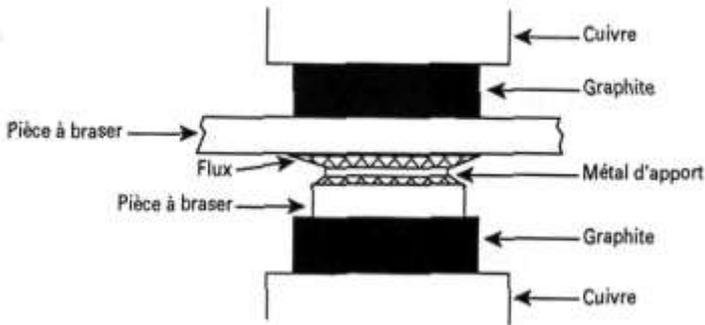
4.1. PREMIER PRINCIPE : TRANSFERT DES RÉSISTANCES

Les résistances internes et de contact étant faibles, on recrée artificiellement des résistances en remplaçant le matériau usuel des électrodes, à base de cuivre, par des métaux de résistivité plus élevée.

Exemple,- Tungstène, molybdène, cupro-tungstène, graphite.

La forte résistivité de ces matériaux assure malgré tout une continuité du circuit électrique secondaire des machines, mais ces matériaux sont le siège d'une dissipation d'énergie calorifique utilisée, tant en interne qu'au niveau du contact électrodes/pièce. Les calories engendrées vont alors migrer vers la jonction par conductivité donc dans la masse des pièces à chauffer. La température de celles-ci va s'élever rapidement jusqu'au point de fusion de la brasure, insérée en série, sans toutefois atteindre le point de fusion du matériau des pièces à assembler.

L'apport de métal va se liquéfier, mouillant les deux interfaces, grâce à la présence du flux désoxydant. L'interruption du courant, va alors initier, un cycle de refroidissement et l'effort de serrage de la machine ne sera relâché qu'après solidification du film de brasure et donc naissance d'une ténacité pour le joint brasé.



4.2. DEUXIÈME PRINCIPE

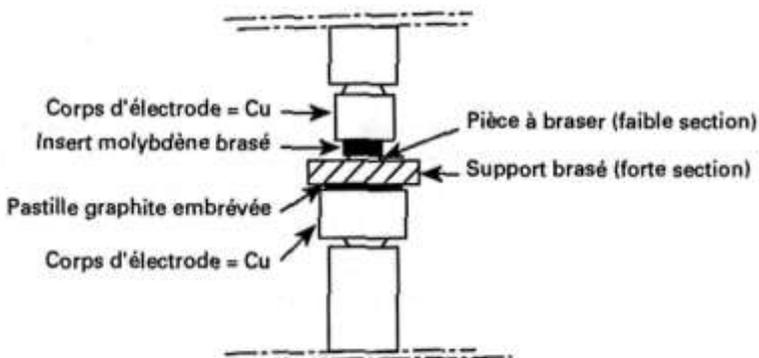
Lorsque l'opération de brasage est destinée à lier deux pièces de même nature métallique mais de volumes respectifs très différents, il est parfois difficile de porter la brasure à son point de fusion, sans surchauffe prématurée de la pièce du volume le plus faible. Plusieurs solutions différentes peuvent être envisagées.

4.2.1. Chauffage direct avec électrodes de résistivités différentes

L'électrode au contact de la pièce de plus forte section, sera choisie dans une matière de plus forte résistivité, de manière à générer un flux thermique plus important. L'électrode au contact de la pièce de plus faible section, sera construite dans un métal de plus faible résistivité, de manière à générer un flux thermique plus modéré, n'entraînant pas la surchauffe de cette pièce de volume plus faible.

• *Électrodes à conductivités thermiques différentes*

Dans l'électro-brasage on utilise parfois le graphite, sous forme de mise rapportée sur embase d'électrode cuivre. Le graphite bien qu'étant conducteur de l'électricité, n'est pas un métal et se comporte comme un semi-conducteur, il présente une forte résistivité à coefficient de température négatif. C'est un matériau réfractaire à faible conductivité thermique.



Ces électrodes ont la propriété de générer un flux calorifique intense à partir de courants d'intensité modérée. Leur résistance électrique très élevée à froid, décroît avec l'élévation de la température et la courbe de montée de température est exponentielle. L'établissement du courant secondaire nécessite des tensions secondaires supérieures à 3,5volts.

Le refroidissement de ces électrodes est plus lent mais le graphite résiste bien aux chocs thermiques et à des efforts de compression modérés.

Il n'y a pas de « forgeage » dans une opération d'électro-brasage et on utilise donc de faibles efforts de serrage juste suffisants, pour assurer une continuité électrique sans « amorçages » au niveau des surfaces de contact, on évitera toutefois les « frappes d'accostage ».

Si les volumes de pièces à assembler sont similaires et de même métal on pourra utiliser du graphite de part et d'autre.

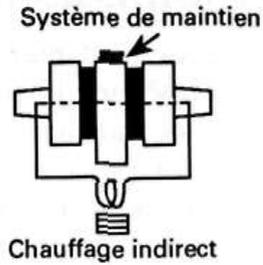
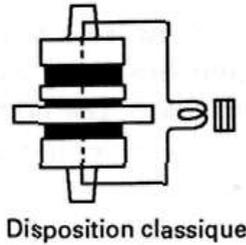
Si les volumes sont différents et ou si les pièces sont de natures métalliques différentes on cherchera une formule de chauffage « différentiel » par l'utilisation d'une électrode au graphite, du côté de la pièce plus difficile à chauffer alors que du côté de la pièce de volume plus faible, on aura parfois avantage à choisir une électrode réfractaire à base métallique (tungstène-molybdène ou cupro-tungstène) générant moins de calories et surtout permettant de refroidir plus vite la pièce de petit volume et le film de brasure du fait de la conductivité thermique.

Nota :

(1) La nécessité d'utiliser un flux désoxydant et la difficulté de son dosage entraînent souvent une pollution des faces d'électrodes d'où la nécessité de nettoyer fréquemment celles-ci. Les flux secs, sous forme de poudres, sont isolants et gênent l'établissement du courant secondaire, il faut alors mettre en œuvre une continuité de contact en insérant par exemple en parallèle au flux, une paillette d'apport de section cylindrique. Dès que le circuit électrique est établi et qu'intervient le début d'échauffement, le flux va s'étendre et mouiller tout l'intervalle entre pièce. Cet intervalle nécessaire à une bonne efficacité de l'effet capillaire est appelé « jeu ». Malgré le mouillage intégral du flux, il n'y aura plus d'isolement électrique et l'élévation de température se poursuivra jusqu'à la fusion de l'apport...

(2) Le flux en poudre, le plus souvent à base de borax est parfois utilisé sous forme de pâte, par une adjonction d'eau distillée.

L'effet isolant est alors très atténué, mais cette pâte est sensible à l'établissement de la tension et peut-être décomposée par électrolyse. D'un aspect initial blanc, elle vire très rapidement à la couleur noire et devient alors totalement isolante. Il faut ré ouvrir la machine et nettoyer énergiquement les faces d'électrodes et les faces de pièces puis recommencer l'opération.



4.2.2. Chauffage indirect

Toujours dans le cas de volumes différents à chauffer ou dans celui de métaux à chaleurs spécifiques très différentes on pourra avoir recours à une solution de chauffage indirect. Dans ce cas, seule la pièce de forte section est chauffée, la transmission de chaleur vers la pièce de faible section s'obtient par conductivité thermique. On s'affranchit automatiquement du risque d'isolement électrique inhérent à la présence de flux même sous forme de poudre.

5. LES PARAMÈTRES DE L'ÉLECTRO-BRASAGE

L'accostage est maintenu bien entendu, mais tes efforts mis en œuvre, n'ayant pas de fonction de forgeage donc sont plus modestes, le temps d'accostage sera limité, sa fonction n'étant que d'éviter une rupture de circuit aux contacts et le martelage des électrodes au toucher pièces.

Le temps de chauffage généralement beaucoup plus long que dans une opération de soudage direct sera prolongé jusqu'à fusion complète du film de brasure (ressuage extérieur) on aura parfois recours, avec avantage, à un chauffage par impulsions successives afin d'éviter les pointe de surchauffe localisés, ainsi que la surchauffe des inscrist de contact (graphite ou métal réfractaire).

Le forgeage est lui indispensable pour assurer un prompt refroidissement de l'ensemble brasé avant de relaxer l'effort et d'ouvrir la machine.

Une surchauffe même très localisée est à éviter à tout prix car elle peut entraîner une neutralisation de l'effet désoxydant du flux et partant un refus de mouillage de la brasure à cet endroit.

L'intensité du courant sera bien entendu dosée par l'utilisation du système déphaseur de la séquence, ceci afin de répartir la chauffe de la manière la plus homogène à toute la section brasée.

6. RÔLE DU REFROIDISSEMENT MACHINE

Le circuit de refroidissement machine joue un rôle important. En effet, il faut impérativement empêcher la remontée des calories dissipées sur les pièces brasées, vers le secondaire de la machine. Les cônes de fixation des électrodes n'y résisteraient pas très longtemps et les contacts entre bras et tubes porte-électrodes, seraient très vite altérés.

En outre, il faut impérativement ramener la température des électrodes à leur niveau initial entre deux opérations de brasage enchaînées.

Enfin, il faut à tout prix éviter la formation d'un « bouchon de vapeur » à l'orifice de l'injecteur d'eau, au contact du fond d'électrode. Une telle situation bloque la fonction de refroidissement et peut entraîner une irrégularité incontrôlable des temps de chauffage.

7. AVANTAGE DU PROCÉDÉ

L'électro-brasage par résistance est, dans la plupart des cas, le plus rapide des modes de chauffage comparé à d'autres moyens tels que le four, la flamme ou l'induction. Sur certaines pièces, les cadences d'assemblage peuvent égaler la productivité du soudage par résistance pour peu que l'organisation du poste de travail intègre les contraintes de chargement des pièces y compris l'apport et en aval l'évacuation des pièces chaudes après brasage. La rapidité du chauffage et sa localisation permettent de braser dans certains cas, des pièces incompatibles avec tout autre mode de chauffage.

Exemple :

*Brasage de connexions, sur sorties de bobinages de machines statiques ou tournantes.
Moteurs alternateurs transformateurs.*

La proximité immédiate de gainages isolants : vernis, résines, tissus de verre, peut interdire l'utilisation de la flamme ou du four, surtout dans le cas de « brasage fort ».

8. DOMAINES D'APPLICATIONS

8.1. ACIERS

Assemblage de pièces en alliages thermiquement fragiles, plaquettes carbure sur supports outils, ferrites de haut-parleurs, sections étanches, tubulures froids, corps de chauffe sur chaudière.

8.2. BRONZE, LAITONS

Pièces de radiateurs, robinetterie, manomètres, thermostats

8.3. CUIVRE

Jonctions électriques rigides, raboutage de caténares.

8.4. CUIVRE + AUTRES MÉTAUX

Composants électriques de disjoncteurs, sectionneurs, pastillages à contact argent, tresse de liaison sur pièces mobiles.

Jonctions de mise à la terre sur charpentes métalliques, bijouterie, bibeloterie, « articles de Paris »

9. SÉCURITÉ

Des précautions particulières seront nécessaires pour les opérateurs : protection aux brûlures par contact, du fait de la propagation thermique dans les pièces, utilisation de gants.

Absorption des fumées, l'opération d'électro-brasage entraîne souvent la formation de fumées nocives la machine doit donc être impérativement équipée de systèmes d'aspiration efficaces.

XIII. ANNEXES

I. HYGIÈNE ET SÉCURITÉ

La protection du personnel opérant sur ces machines est certes nécessaire (vêtements, lunettes) mais moins lourde que dans le cas de l'arc ou de la flamme (pas ou peu de dégagements gazeux nocifs). La sécurité électromécanique de ces machines est conforme aux directives du Ministère du Travail et normalisée :

- Norme AFNOR Série 82000.
- Décret du Ministère du Travail correspondant à la date de fabrication de la machine.



II. PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES COMPAREES DE METAUX USUELS

	ALU	ACIER DOUX	INOX	CUIVRE	PLOMB	ZINC	NICKEL	MANGANESE
Densité à 20°C	2.7	7.85	7.9	8.95	11.34	7.14	8.8	1.7
Début de fusion (°C)	658	1450	1425	1083	327	419	1455	651
Coef. Dilat. Linéaire	23.10^{-6}	12.10^{-6}	$17.3.10^{-6}$	$16.4.10^{-6}$	$29.3.10^{-6}$	$39.7.10^{-6}$	$13.3.10^{-6}$	$26.3.10^{-6}$
Chaleur spécif. (cal/g°C)	0.23	0.10	0.12	0.09	0.03	0.09	0.11	0.25
Conduction thermique (cal cm/cm ² °C)	0.52	0.11	0.038	0.92	0.083	0.27	0.23	0.19
Résistivité électrique (μΩcm ⁻¹)	2.85	11	70	1.7	20.6	5.9	6.8	4.5
Module d'élasticité (daN/mm ²)	6700	20400	19600	11200	1600	8400	21000	4600

III. COMPARATIF MATIERES DES ELECTRODES

CuCr1Zr	Composition:	Cr : 0,65 %
HF		Zr : 0,08 %
		Cu: le reste
	Dureté: HBS:	160-185
	Conductibilité:	76-86
	T� d'amollissement:	475 C�

CuZr	Composition:	Zr : 0,15 %
N4		Cu: le reste
	Dureté: HBS:	> 110
	Conductibilité:	84-93
	T� d'amollissement:	500 C�

CuCr1Zr	Qualité Cambrage	
HF C	Composition:	Cr : 0,65%
N C		Zr : 0,08%
		Cu : le reste
	Dureté : HBS :	>145
	Conductibilité :	76-86
	T� d'amollissement:	475 C�

CuAg	Composition:	Ag : 0,1%
L		Cu: le reste
	Dureté: HBS:	>90
	Conductibilité :	95-100
	T� d'amollissement:	350 C�

CuCr1Zr	Composition:	Cr : 0,65 %
N		Zr : 0,05 %
		Cu: le reste
	Dureté: HBS:	130-170
	Conductibilité :	81-91
	T� d'amollissement:	475 C�

CuNiSi	Composition:	Ni : 2,5%
D*		Si : 0,6%
		Cu: le reste
	Dureté: HBS:	180-230
	Conductibilité :	43-52
	T� d'amollissement:	475 C�

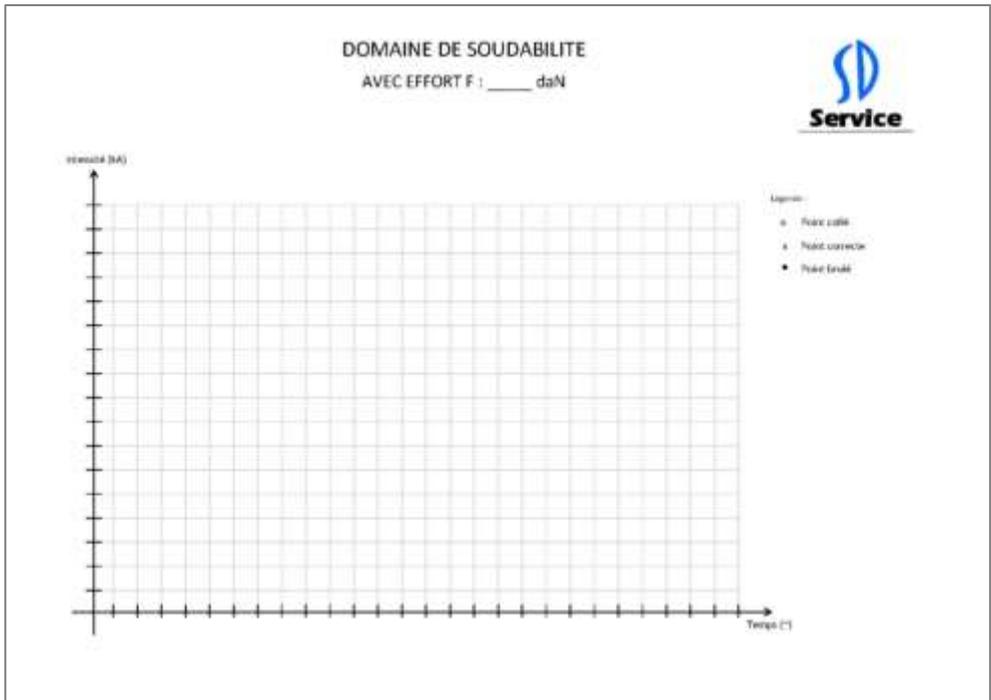
CuCr1Zr	Composition:	Cr : 0,65 %
G		Zr : 0,10 %
		Cu: le reste
	Dureté: HBS:	120-155
	Conductibilité :	76-90
	T� d'amollissement:	475 C�

CuTe	Composition:	TeP
D		Cu: le reste
	Dureté: HBS:	85
	Conductibilité :	>51
	T� d'amollissement:	350 C�

CuCo2Be	Composition:	Co : 2,2%
B		Be : 0,55%
		Cu: le reste
	Dureté: HBS:	220-270
	Conductibilité :	45-55
	T� d'amollissement:	500 C�

CuNi2Be	Composition:	Ni : 1,8%
NIB		Be : 0,4%
		Cu: le reste
	Dureté: HBS:	220
	Conductibilité :	69
	T� d'amollissement:	500 C�

IV. DOMAINE DE SOUDABILITE



V. QUALIFICATION

Norme NF EN 1418 - Soudeurs sur équipements de soudage par résistance

VI. BIBLIOGRAPHIE

- Soudage par résistance, auteur : Claude Drouart
- Le soudage par résistance, auteur : Société ARO
- Les électrodes, auteur : Société SCHRUB
- Produits pour le Soudage : Société SCHRUB

