

6 INTRODUCTION AU SOUDAGE PAR POINTS

Résumé

Le soudage par points sert à assembler localement deux tôles, en utilisant l'effet Joule. A cet effet, on comprime ces tôles à l'aide d'une paire d'électrodes, généralement en alliage de cuivre, et l'on fait passer par ces mêmes électrodes un courant électrique de forte intensité. La chaleur engendrée par ce courant à l'interface tôle-tôle fait fondre localement le métal, ce qui crée, après solidification, un point de soudure.

Une soudure est réalisée en une à deux secondes, avec un temps effectif de passage du courant de quelques dixièmes de secondes. Les phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une soudure sont à la fois d'origine électrique, thermique, mécanique et métallurgique. La rapidité et la complexité de ces phénomènes en font un procédé extrêmement difficile à modéliser.

Conformément à la géométrie des électrodes, une soudure par point possède - dans le plan des deux tôles - une forme approximativement circulaire. Si la fonction principale d'une soudure est la tenue mécanique, on choisit généralement de caractériser sa qualité par son diamètre de bouton, c'est-à-dire par le diamètre moyen (en millimètres) du rivet restant sur l'une des deux tôles après un essai destructif appelé déboutonnage.

Parmi les différents paramètres de soudage, l'intensité du courant de soudage joue un rôle prépondérant, car elle conditionne directement la taille de la soudure. Le domaine de soudabilité d'un produit est défini comme la plage d'intensité permettant d'obtenir une soudure de qualité satisfaisante, tous les autres paramètres (effort mécanique, durées, etc.) étant fixés préalablement.

L'usage de tôles protégées contre la corrosion se généralise. Dans le cas où ce revêtement est zingué, on constate que le revêtement entraîne une dégradation des électrodes, au fur et à mesure de leur utilisation, ce qui se traduit par un décalage du domaine de soudabilité vers les intensités élevées. On a pris l'habitude de caractériser cette dégradation par le nombre maximal de points de qualité satisfaisante que l'on peut souder avec l'intensité de haut de domaine à électrodes neuves. Ce nombre est appelé la durée de vie des électrodes.

6.1 Généralités

Le soudage par points fait partie de la famille des procédés de "soudage par résistance", au même titre que le soudage à la molette, par bossages, ou en bout. Il est utilisé pour assembler deux tôles (ou plus) dont l'épaisseur est typiquement comprise entre 0,5 et 10 mm. Signalons que ces deux tôles peuvent avoir - même si ce n'est généralement pas le cas au CRDM - des caractéristiques différentes (composition, revêtement), et qu'elles n'ont pas forcément la même épaisseur. Historiquement, ce fut l'Américain Thomson qui eut, en 1877, l'idée d'assembler deux tôles d'acier en utilisant, comme agent de chauffage, l'effet de la traversée de l'assemblage par un courant électrique de forte intensité.

Il s'agit depuis longtemps du procédé d'assemblage numéro un des carrosseries automobiles, une voiture nécessitant en moyenne 4000 points soudés.

6.1.1 Principe

La figure 6.1 représente schématiquement le principe du soudage par points : les deux tôles sont prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'ensemble en contact. Cet assemblage est ensuite traversé par un courant de forte intensité qui crée un noyau fondu au niveau de l'interface tôle-tôle. En refroidissant, ce noyau fondu fixe localement les deux tôles entre elles.

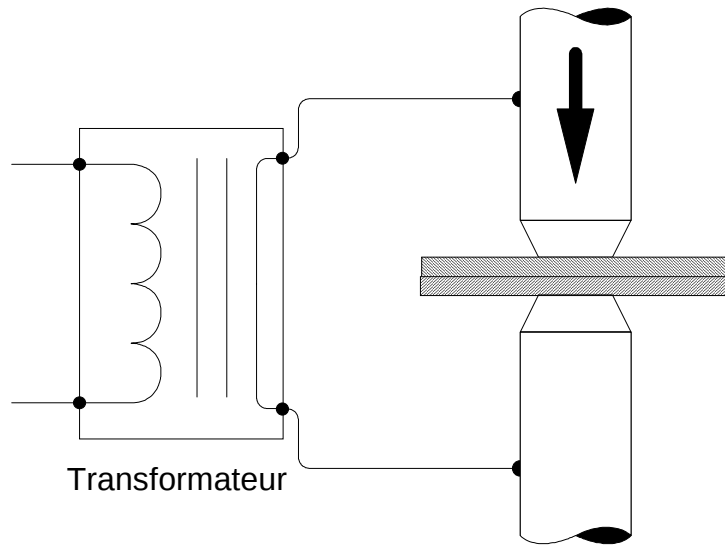


Figure 6.1 : Principe du soudage par points

6.1.2 Déroulement du cycle de soudage

Un cycle de soudage se décompose en quatre phases (voir [Cazes 93]) :

- l'**accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent comprimer les pièces à souder, à l'endroit prévu et sous un effort donné. Dans le cas des machines du CRDM, seule l'électrode supérieure se rapproche, l'autre étant fixe. Cette phase se termine quand la valeur d'effort nominale est atteinte,
- le **soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance, et doit, par effet Joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle-tôle pour qu'une zone fondue apparaisse,
- le **forgeage** : effectué avec maintien de l'effort mais sans passage de courant, il permet au noyau fondu de se refroidir et de se solidifier en restant confiné,
- la **remontée de l'électrode** : l'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à la soudure d'un nouveau point.

Ces quatre phases, ainsi que les évolutions de l'effort mécanique et du courant de soudage tout au long d'un cycle, sont représentées sur la figure 6.2.

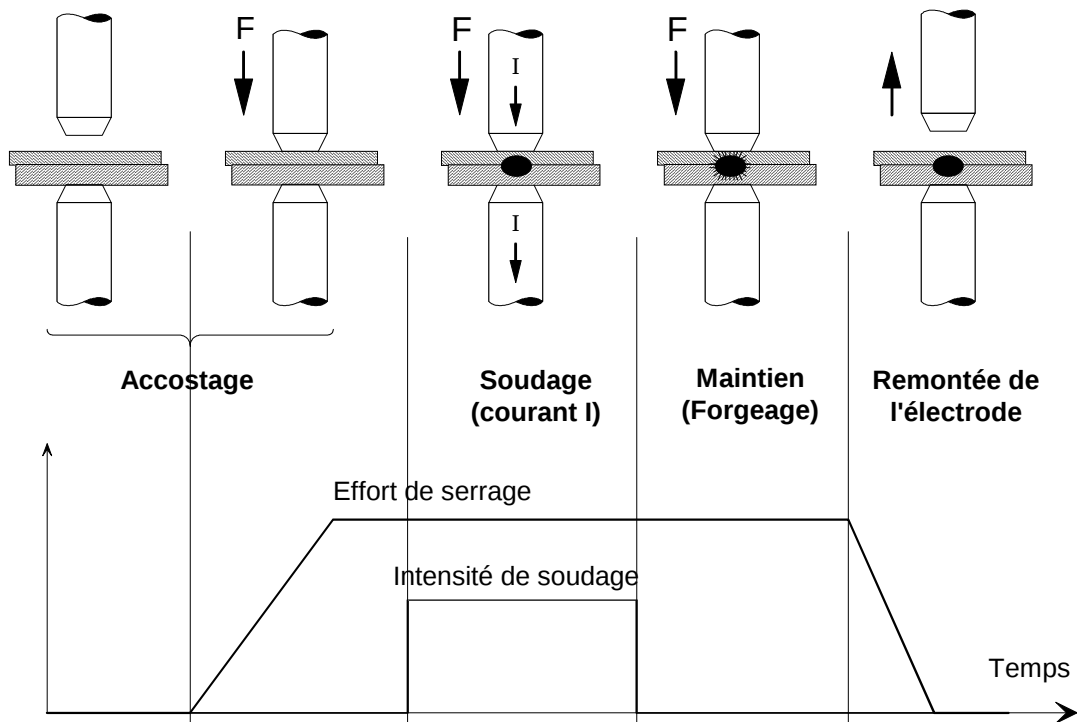


Figure 6.2 : Les différentes phases d'un cycle de soudage

L'allure des courbes d'effort et d'intensité représentées ici est purement qualitative. Dans la pratique, leurs évolutions ne sont jamais linéaires car les valeurs sont fortement perturbées par les évolutions des résistances mécaniques et électriques rencontrées.

6.1.3 Paramètres de soudage

Les paramètres de soudage doivent être adaptés en fonction des caractéristiques des tôles à souder. Par exemple, on conçoit bien que des tôles plus épaisses nécessitent un apport d'énergie plus important, permettant de fondre plus de métal, donc de former un noyau plus gros.

Dans l'ordre chronologique, l'**effort de soudage** est la première variable entrant en jeu puisqu'elle intervient dès la phase d'accostage. La valeur à appliquer (de l'ordre de quelques centaines de daN pour des produits d'épaisseur inférieure à 1 mm) dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique, la courbe de mise en effort n'est pas linéaire comme indiqué sur la figure 6.2, mais dépend des caractéristiques de la machine à souder.

Le **courant de soudage** est évidemment un paramètre décisif, car il intervient au carré dans l'énergie dissipée par effet Joule. L'intensité efficace à délivrer (typiquement entre 5 et 20 kA) dépend, là encore, des propriétés mécaniques, de l'épaisseur des tôles à souder ainsi que de la présence ou non de revêtement. On utilise généralement un courant alternatif monophasé à 50 Hz, dont la valeur moyenne efficace sur une soudure peut être réglée par rapport à la valeur de consigne, par un dispositif électronique adapté. Même si nous ne l'avons pas considéré dans ce travail, il est possible d'utiliser d'autres types de courants, notamment le courant continu, obtenu par redressement et filtrage, à partir d'un générateur 1000 Hz.

Le **temps de soudage** intervient au premier ordre dans l'énergie électrique dissipée. Ce paramètre, d'une valeur typique de quelques dixièmes de seconde, est donc, lui aussi, adapté aux propriétés des tôles à souder. Lorsque le temps de soudage désiré est particulièrement long, on le découpe en "pulsations" - ou "temps chauds" - séparés par des "temps froids".

Le **temps de forgeage** nécessaire à la solidification de la soudure est généralement du même ordre de grandeur que le temps de soudage.

La réalisation d'un point soudé nécessitant environ 1 à 2 secondes, le procédé est adapté aux cadences de production élevées de l'industrie automobile moderne.

6.1.4 Mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle est créée par effet Joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée t en fonction de l'intensité du courant et de la résistance électrique traversée est donnée par la relation :

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + t} R i^2 d\tau \quad (6.1)$$

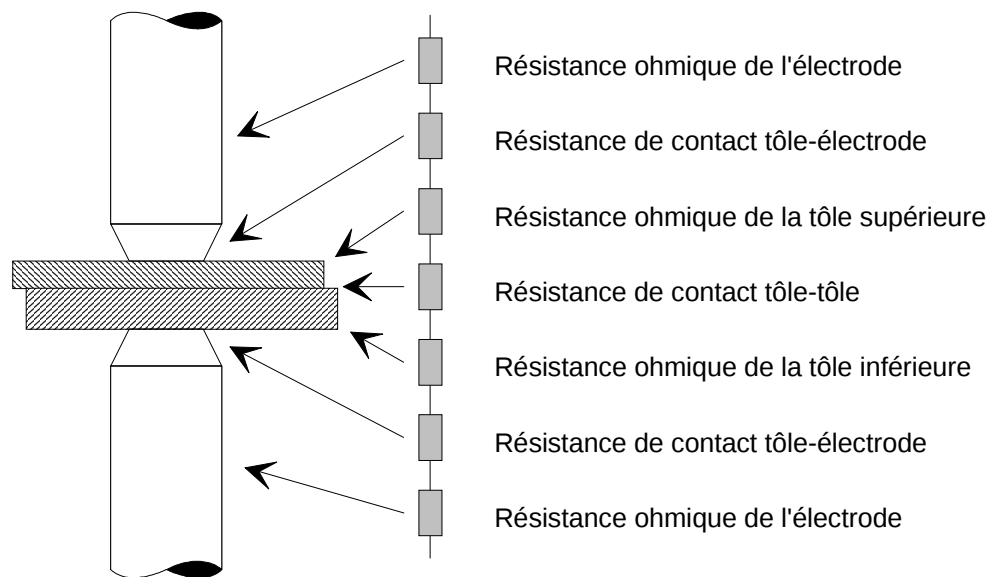


Figure 6.3 : Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues (d'après [Sauvage 94])

Si l'on néglige les phénomènes capacitifs, l'équivalent électrique de l'assemblage de soudage par points est constitué de résistances en série (cf. figure 6.3). Le dégagement de chaleur est donc maximal à l'endroit où la résistance est la plus élevée.

Dans la pratique, les résistances de contact sont, au début d'un cycle de soudage, plus grandes que les résistances ohmiques des tôles et des électrodes. Dans le cas de produits revêtus, il est possible d'utiliser le même modèle que celui de la figure 6.3 (les résistances des revêtements étant alors incluses dans les résistances de contact), ou de compléter le modèle en ajoutant quatre résistances ohmiques du revêtement.

Ces diverses résistances, qui ont une influence directe sur les dégagements de chaleur, donc sur la constitution du noyau fondu, ne sont pas constantes au cours d'un cycle de soudage. Elles dépendent en effet fortement de la température :

- les résistances ohmiques augmentent en fonction de la température,
- les résistances de contact diminuent lorsque la température augmente. En effet, les contacts étant initialement "ponctuels" plutôt que surfaciques, ces résistances dépendent directement, à pression donnée, des caractéristiques mécaniques des matériaux en contact et de leur état de surface : la dureté des matériaux diminuant avec l'échauffement, les surfaces de contact augmentent. Il y a donc une diminution des résistances de contact avec la température.

En début de soudage, les dégagements de chaleur les plus importants sont situés au niveau des différentes discontinuités de l'assemblage :

- à l'interface tôle-tôle, cette chaleur sert à faire fondre le revêtement et l'acier afin de former le noyau fondu,
- aux interfaces électrode - tôle, cette chaleur - qui ne contribue pas à la formation de la soudure - est en partie évacuée par les électrodes, qui, outre une bonne conductivité électrique, doivent par conséquent avoir une conductivité thermique élevée.

La figure 6.4 représente les évolutions des différentes résistances au cours d'un cycle de soudage dans le cas de tôles non revêtues.

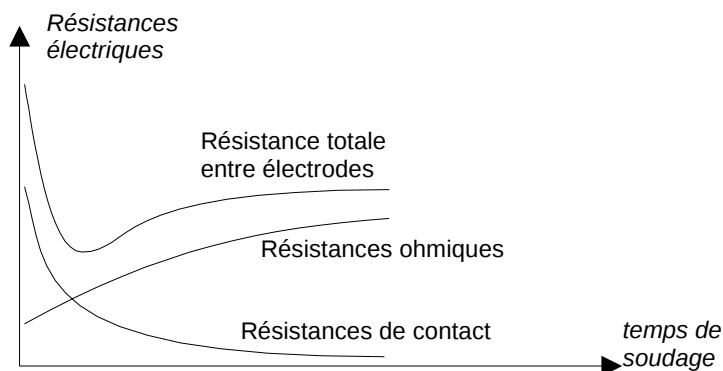


Figure 6.4 : Évolution des résistances en cours de soudage sur tôles nues (voir [Sauvage 94])

L'analyse des évolutions de ces résistances permet de mieux comprendre la cinétique de formation du point : l'échauffement est réalisé en premier lieu au niveau des interfaces, et l'électrode évacue les calories créées à l'interface tôle-électrode. Le noyau fondu s'initie à l'interface tôle-tôle et ne progresse que grâce aux résistances ohmiques des tôles.

Dans le cas de tôles revêtues, le graphe de la figure 6.4 se complique sensiblement, car il faut tenir compte de la résistance ohmique du revêtement ainsi que de sa température de fusion. Il est difficile de définir une tendance générale car certains revêtements ont une résistivité plus faible que celle de l'acier (cas des revêtements à base de zinc), tandis que d'autres ont une résistivité plus élevée (cas des revêtements organiques).

6.1.4 Géométrie d'un point soudé

La géométrie d'un point soudé présente trois particularités (voir figure 6.5) :

- discontinuité de l'assemblage,
- présence d'une entaille concentrant les contraintes en cas de sollicitations mécaniques,
- indentation, par pénétration de l'électrode, des faces externes de l'assemblage.

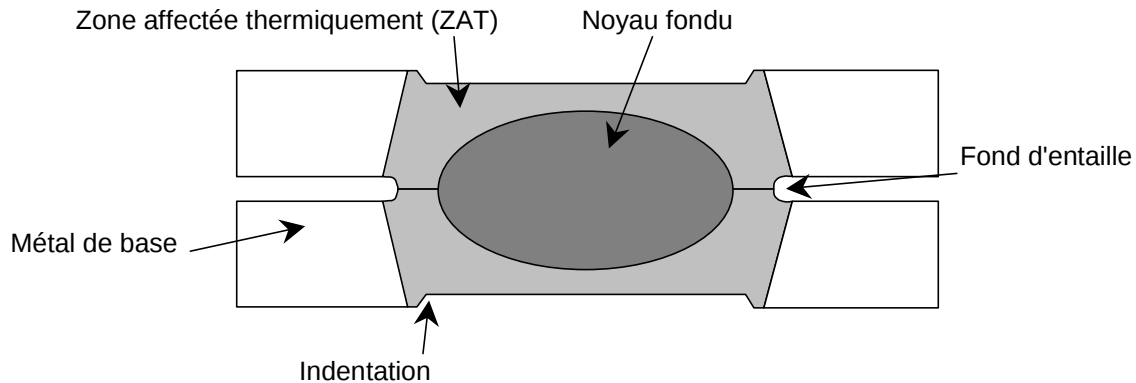


Figure 6.5 : Coupe d'un point soudé

Qualitativement, on constate que les caractéristiques mécaniques de la soudure sont principalement influencées par la taille du noyau fondu, et en particulier par son diamètre dans le plan des deux tôles.

Si la puissance électrique fournie est trop faible, le noyau fondu est trop petit, voire inexistant, et les caractéristiques mécaniques du point soudé risquent d'être insuffisantes. Plus on augmente la puissance fournie, plus la zone fondue est étendue et plus le point est résistant aux contraintes mécaniques. Cependant, passé un certain seuil, le noyau fondu atteint soit le fond d'entaille soit une des faces extérieures de la tôle : sous l'effet de la pression mécanique exercée par les électrodes, on assiste alors à une éjection de métal fondu (phénomène dit "d'expulsion") : la qualité du point soudé s'en trouve dégradée.

Ainsi, pour un type de tôle, une durée de soudage et un effort donnés, il existe une intensité minimale, en dessous de laquelle la tenue mécanique minimale définie par le cahier des charges de l'utilisateur du procédé n'est pas assurée, et une intensité maximale, au-dessus de laquelle il y a expulsion. Nous allons revenir dans le paragraphe suivant sur cette plage d'intensités acceptables, appelée "**domaine de soudabilité**" du produit.

6.2 Caractérisation d'une tôle d'acier revêtues

Par caractérisation d'une tôle, nous entendons ici l'étude de son aptitude au soudage par points dans certaines conditions. Au CRDM, ces études sont généralement faites selon la méthode préconisée par la norme [NF A 87-001]. Il s'agit de déterminer, pour une tôle donnée, son **domaine de soudabilité** et la **durée de vie des électrodes** de soudage.

Dans les deux cas, le critère de qualité d'un point soudé, en termes de résistance mécanique, est le **diamètre de bouton**. La définition du terme *bouton*, donnée dans [NF A 87-001] est le

"rivet de déboutonnage restant sur l'une ou l'autre des tôles après essai destructif du point de soudure" (voir figure 6.6).

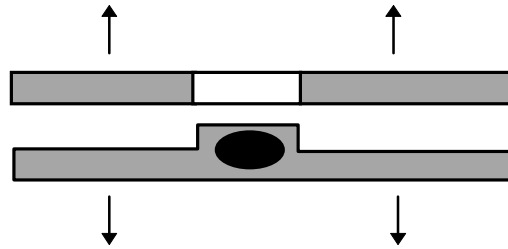


Figure 6.6 : Déboutonnage d'un point soudé

Ce test de déboutonnage peut être réalisé de plusieurs manières (traction pure, traction cisaillement, pelage, etc.).

Les diamètres minimal et maximal du bouton sont ensuite mesurés à l'aide d'un pied à coulisse. Le critère d'acceptabilité porte alors à la fois sur le diamètre minimal¹⁰, et sur la moyenne des deux¹¹.

Cette approche suppose implicitement que le bouton a une forme elliptique et donc que ses diamètres minimal et maximal :

1. sont facilement détectables et mesurables,
2. caractérisent bien la taille de la soudure.

Nous reviendrons dans les chapitres suivants sur cette hypothèse.

Notons cependant que le test destructif ne met pas forcément en évidence un bouton mesurable : on peut observer une rupture en plan de joint ou un "déchirement" de ce bouton.

6.2.1 Le domaine de soudabilité

La norme [NF A 87-001] définit le domaine de soudabilité comme la "*plage d'intensités efficaces du courant de soudage permettant d'obtenir un point de soudure de tenue mécanique satisfaisant aux critères définis auparavant*".

Comme nous l'avons déjà indiqué dans les paragraphes précédents, la taille du noyau fondu est fortement liée à la quantité d'énergie électrique fournie à la soudure, donc à l'intensité efficace utilisée. Si celle-ci est trop faible, le noyau fondu est trop petit voire inexistant, et le **déboutonnage** n'a pas lieu lors du test destructif : il y a **Rupture en Plan de Joint (RPJ)** de la soudure. Au-delà d'un certain seuil d'intensité, il y a déboutonnage, et le diamètre du bouton est caractéristique de la tenue mécanique du point soudé : plus on augmente l'énergie fournie, plus la zone fondue est large et plus le point est résistant aux contraintes mécaniques. Cependant, passé un certain seuil d'intensité, donc d'énergie électrique, le noyau fondu

¹⁰ Qui doit être supérieur à 3 mm pour des tôles d'épaisseur inférieure à 1,25 mm, et supérieur à 5 mm pour des tôles plus épaisses.

¹¹ Qui doit être supérieure à 4 mm pour des tôles d'épaisseur inférieure à 1,25 mm et supérieure à 6 mm pour des tôles plus épaisses.

déborde la zone maintenue entre les électrodes : il y a expulsion, et la taille du noyau fondu s'en trouve diminuée.

En résumé, il s'agit d'étudier les variations du diamètre de bouton, donc de la tenue mécanique de la soudure, en fonction de l'intensité efficace. Ceci est schématisé sur la figure 6.7.

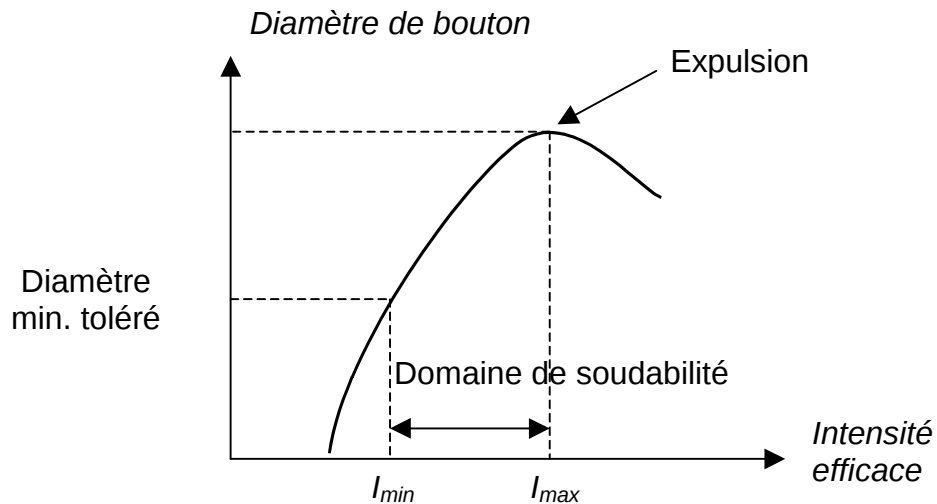


Figure 6.7 : Définition du domaine de soudabilité

Par domaine de soudabilité, on entend ainsi l'intervalle $[I_{min}, I_{max}]$, où I_{min} est la plus petite intensité donnant un diamètre acceptable, et I_{max} est la plus grande intensité ne provoquant pas d'expulsion.

Pour mesurer le diamètre de bouton correspondant à une intensité donnée, on soude deux éprouvettes entre elles en les disposant comme indiqué sur la figure 6.8. Celles-ci sont maintenues dans cette position, avant et pendant le soudage, par un gabarit. La traction se fait en appliquant une force **F** croissante dans le temps jusqu'à rupture de la soudure. L'opérateur note alors, dans la mesure où un bouton apparaît sur l'une des deux tôles, ses diamètres minimal et maximal.

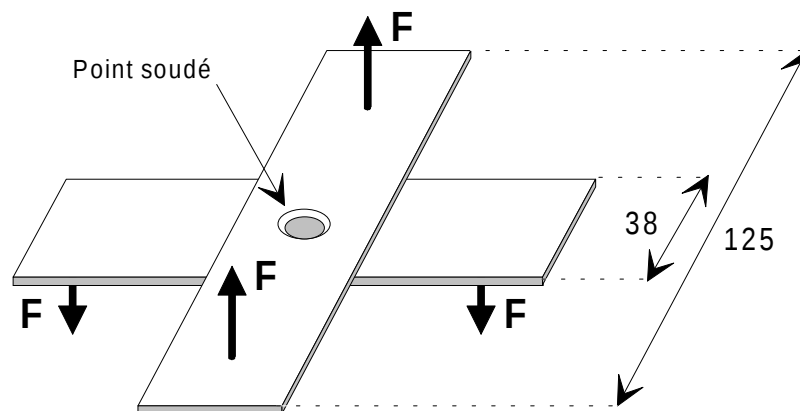


Figure 6.8 : Éprouvettes de traction en croix

Pour fixer les idées, les spécifications des clients de Sollac imposent en général un domaine de soudabilité d'au moins 1,5 kA. Dans le cas contraire, ils estiment que la mise en œuvre du produit est trop problématique.

6.2.2 La dégradation des électrodes

Ce test vise à estimer le nombre de points soudés de bonne qualité (en termes de diamètre minimal acceptable) que l'on peut effectuer avec un jeu d'électrodes en gardant les mêmes réglages de paramètres, et en particulier l'intensité. En effet, on assiste à une dégradation des électrodes en fonction du nombre de points soudés, qui se traduit par une diminution de la qualité des soudures.

Cette dégradation des électrodes est due à une combinaison d'effets mécanique et chimique activés par les températures atteintes au niveau des interfaces électrode - tôle. L'usure des électrodes est particulièrement rapide sur produits revêtus zingués (avec - par ordre de vitesse de dégradation - les revêtements galvanisé-allié, électrozingué et galvanisé), pour lesquels on assiste à la création d'un alliage entre le cuivre des électrodes et le zinc du revêtement (formation de laiton). Cette dégradation entraîne un élargissement de la face active des électrodes et donc, à intensité de soudage égale, une diminution de la densité de courant. L'échauffement est donc de moins en moins localisé, ce qui a pour effet paradoxal de diminuer la taille du noyau fondu, de telle sorte que l'intensité nécessaire pour obtenir une taille de bouton donnée est de plus en plus élevée. Autrement dit, **le domaine de soudabilité du produit se décale vers les hautes intensités**.

On définit alors la **durée de vie des électrodes**, pour certains réglages des paramètres, comme le "*nombre de points de qualité satisfaisante (selon le même critère que pour le domaine de soudabilité) que l'on peut souder avec un jeu d'électrodes en se plaçant à l'intensité haute du domaine de soudabilité correspondant aux électrodes neuves*".

La figure 6.9, qui illustre les notions de décalage du domaine de soudabilité et de durée de vie des électrodes, est tout à fait qualitative. Elle suppose en effet que l'état des électrodes peut être caractérisé par le nombre de points soudés ; or cela dépend également de l'intensité à laquelle ces points ont été soudés. Par ailleurs, l'évolution des limites basses et hautes n'est pas forcément linéaire - ni même monotone. En revanche, la tendance à l'élargissement du domaine de soudabilité est effectivement présente (voir par exemple [Gobez 94]), et résulte du fait qu'avec des électrodes usées, l'expulsion se produit pour des diamètres de boutons plus élevés.

Pour déterminer la durée de vie des électrodes, on utilise des électrodes neuves, et l'on soude des tôles appelées **bandes d'usure** en se plaçant à la limite supérieure du domaine de soudabilité. Suivant la durée de vie estimée a priori, on réalise tous les 200, 100 ou 50 points une **bande de contrôle** de 10 points destinée à subir des essais mécaniques.

En fonction des diamètres de boutons obtenus sur cette bande de contrôle et des mêmes critères de qualité que pour la détermination du domaine de soudabilité, l'opérateur décide soit de poursuivre l'essai en gardant la même intensité efficace, soit d'effectuer un **recalage** de cette intensité. Dans un contexte industriel, l'opération visant à compenser l'usure des

électrodes par une augmentation progressive de l'intensité de soudage est désignée sous le nom de **loi de déphasage**.

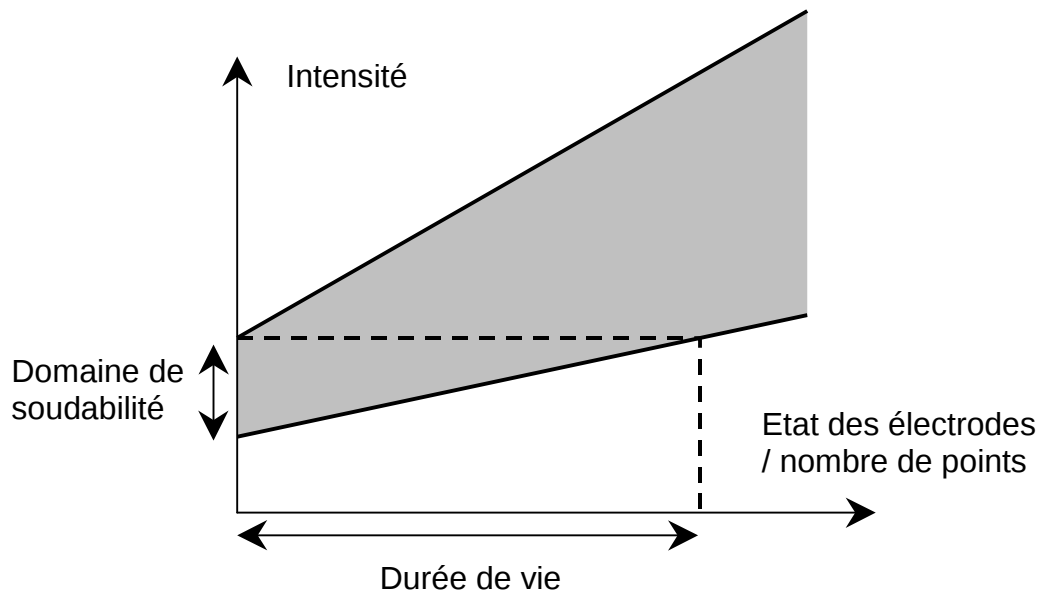


Figure 6.9 : Décalage du domaine de soudabilité vers les intensités hautes avec la dégradation des électrodes

Lors d'un recalage au sens de la norme [NF A 87.001], l'intensité utilisée correspond à la nouvelle limite supérieure du domaine de soudabilité. Il faut donc de nouveau déterminer l'intensité maximale sans expulsion avec les électrodes usées.

L'essai de durée de vie est arrêté - à l'initiative de l'opérateur - lorsqu'il juge, après un ou deux recalages, que le pourcentage d'augmentation du courant est trop élevé, voire que le nombre de points par incrémentation est trop faible, ou que la qualité du point (qu'il estime visuellement) est trop mauvaise.

Pour contrôler la qualité des points de la bande de contrôle, on utilise un dispositif permettant de déboutonner simultanément les 10 points soudés (voir [NF A 87-001]). Ce dispositif, communément appelé les "dents de la mer", est schématisé sur la figure 6.10.

Pour des raisons de symétrie évidentes, on ne considère pas les diamètres des deux points extrêmes comme significatifs. En effet, ils ne sont soumis que d'un seul côté à une force d'écartement. Il peut même arriver qu'ils ne soient pas totalement déboutonnés. Dans ce cas, les deux tôles sont séparées à l'aide d'un marteau et d'un burin.

Suivant le produit, la durée de vie des électrodes est, significativement différente. Ainsi, par exemple sur les produits GA et GZ 2 (Annexe 5) dont nous nous servirons au chapitre 8 pour illustrer les résultats de notre méthode, la durée de vie sans recalage est respectivement égale à 3500 et 400 points.

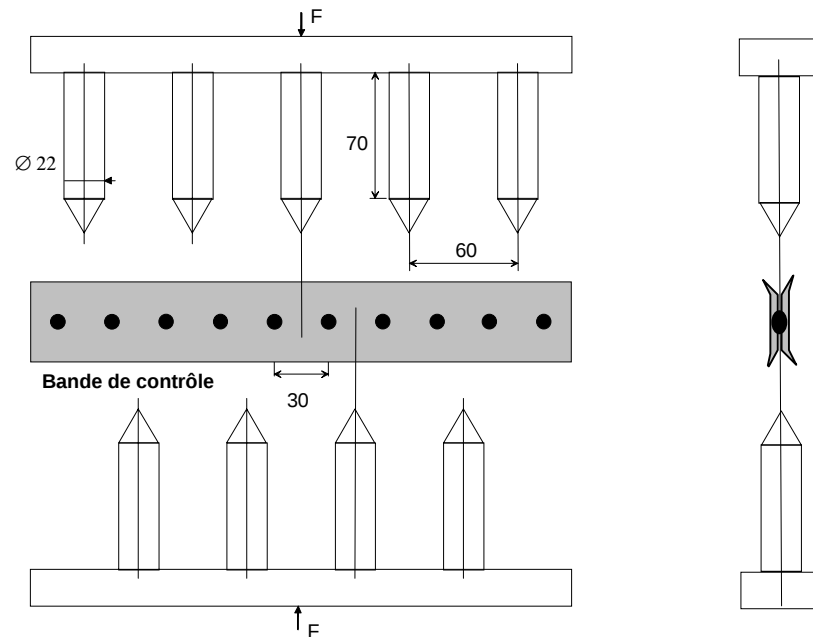


Figure 6.10 : Dispositif de déboutonnage simultané de 10 points de soudure

6.3 Conclusion

Les principes fondamentaux décrits dans ce chapitre d'introduction permettront au lecteur non spécialiste de se familiariser avec le procédé de soudage par points et de mieux appréhender les concepts qui seront présentés dans les deux chapitres suivants.

Précisons tout de même que cette présentation est fortement empreinte de la norme française [NF A 87.001], qui constitue la base de tous les essais standards effectués au CRDM. Il ne s'agit donc pas de la seule manière possible d'appréhender le procédé de soudage par points et la caractérisation de la soudabilité d'un produit.

Par exemple, [Waddell 97] souligne l'intérêt de suivre, en fonction de l'usure des électrodes, l'évolution des limites d'expulsion et de qualité minimale (4 mm). Ceci permet de caractériser plus finement la soudabilité d'un produit et d'estimer une pente de loi de déphasage linéaire : nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 8.

Compte tenu du cadre que nous venons de fixer, nous allons étudier dans le chapitre suivant la signification et les enjeux d'une modélisation du soudage par points.