

## Remarques préliminaires

Des équipements de protection individuelle de qualité sont nécessaires pour souder. Les risques de lésions ne sont pas à prendre à la légère.

- De bons gants de soudure
- Une cagoule avec soit des carreaux adaptés au procédé de soudage, soit, si elle est électronique, des réglages adaptés au procédé de soudage
- Dans le cas de la cagoule électronique, un déclenchement très rapide
- Des protections oculaires et auditives pour le meulage
- Des chaussures montantes sans lacets avec un pantalon les recouvrant. Idéalement des bottes en cuir de chantier, avec un pantalon en coton ou toile ignifugé. Cela évite de se brûler au troisième de degré en sautant comme un kangourou à cause d'une boulette tombée dans la chaussure. Ne riez pas : la boulette tombera toujours dans la chaussure, quelle que soit sa trajectoire initiale.
- Une veste de soudure ou, à défaut, manchettes ET tablier de soudeur

## Qu'est-ce que la soudure ?

Il est coutume de dire que la soudure, dans le domaine de la métallurgie, c'est la méthode d'assemblage que l'on utilise lorsqu'on a plus d'autre choix. La raison est la suivante : la procédé consiste à conduire deux pièces à leur température de liquéfaction, tout en apportant un métal extérieur. Cela permet d'obtenir une quasi-homogénéité de matière entre les deux pièces, et donc une continuité physique. Mais cela a pour inconvénient majeur de modifier les caractéristiques initiales du matériau, du fait de la chauffe localisée générée par le procédé. Nous reviendrons sur cet aspect là.

### *Principe*

Pour emmener le métal à son point de fusion en un lieu localisé, on utilise communément un courant électrique. Il est produit par une génératrice (aussi appelée unité centrale sur les postes à souder industriels). Il va circuler entre, d'une part, la pièce à souder et, d'autre part, l'électrode, par le biais d'un arc électrique.

Il y a deux types d'électrodes :

- les électrodes fusibles : elles fondent durant le soudage, emmenant ainsi le métal d'apport
- les électrodes non fusibles : elles créent l'arc électrique et le maintiennent, le métal d'apport est apporté dans le bain de fusion par un autre biais

On reviendra plus en détail sur ce sujet en évoquant les procédés.

Quel que soit le procédé, quel que soit le métal à souder, l'ennemi numéro en soudure, c'est l'oxygène. Il réagit en effet avec tous les métaux (ferreux et non ferreux) : il est actif. Et nocif. C'est la raison pour laquelle tous les procédés procèdent à une protection gazeuse. Cette protection peut être neutre ou active. En d'autres termes, selon les gaz utilisés, on cherchera ou non à obtenir une réaction moléculaire entre le métal en fusion et le gaz. Dans tous les cas : l'oxygène est votre ennemi !

Nota : c'est la raison pour laquelle on blanchit une tôle rouillée avant de la souder. Arrivé à son point de fusion, le  $Fe_2O_3$  va libérer son oxygène.

### *Les principaux assemblages et positions*

Nous allons, par souci de simplicité, identifier les deux assemblages les plus fréquents. Nous n'évoquerons pas ici les tubes : c'est un sport à part entière.

L'angle :

Deux tôles à  $90^\circ$  - cela peut-être plus, mais si c'est moins, gare à pouvoir fusionner correctement les tôles !

On peut avoir à souder ce type d'assemblage dans différentes positions :

- à plat

- en verticale montante
- en plafond

Le bout à bout, ou bord à bord :

Deux tôles, généralement chanfreinées, mises côte à côte. On peut souder ces tôles de quatre manières :

- à plat
- en verticale montante (chanfrein vertical, de bas en haut)
- en corniche chanfrein horizontal, de gauche à droite ou de droite à gauche)
- en plafond (l'assemblage est au-dessus de votre tête et vous jouez avec du métal en fusion. Une idée brillante en somme.)

Il y a évidemment d'autres assemblages (à clin, en angle ouvert, etc) et d'autres positions (à 45°, verticale à 135° ou à 45°, à la mords moi le nœud, et toutes les configurations intermédiaires)

Notez ici que dans tous les cas, nous avons parlé de verticale montante, et jamais verticale descendante.

« Une descendante ce n'est pas une soudure » nous disait un vieux routard de la soudure en navale. Et il avait raison : vu que sur une descendante on va chercher à contrôler la descente de son bain de fusion, et que la force gravitationnelle joue très bien son rôle avec du métal liquide, le métal d'apport risque de glisser sur les tôles, et non de fusionner les tôles. Vous aurez alors ce qu'on appelle un collage. Autant mettre du scotch, ça va plus vite et on se brûle moins.

## Les procédés

### *Électrode enrobée*

C'est ce que l'on appelle communément « la baguette », mais comme on est pas boulangers, on va l'appeler par son vrai petit nom.

Ce procédé est le plus simple à mettre en œuvre (la gestion électronique du courant a permis de réduire considérablement la taille des postes), le moins onéreux (pas de consommables ni de mécaniques complexes et des génératrices peu coûteuses), et sans doute le plus permissif en termes de conditions de soudage (eau, rouille, vent).

Singulièrement, sa brutalité apparente (ça crache, ça projette, ça fait du bruit) a pour contrepartie une technicité très conséquente. Dans sa maîtrise technique, c'est l'un des procédés les plus délicats, et qui requiert une certaine expérience (ou une grande dextérité quand on est bien né!). Cela vaut notamment pour le travail en position.

Les esprits à la fois observateurs et critiques souligneront que l'on a parlé de protection gazeuse précédemment, et qu'ici, nul gaz. Fraude ? Que nenni ! L'électrode enrobée porte bien mieux son nom que lorsqu'on la dénomme baguette. L'électrode fusible, que l'on nomme âme, constitue principalement le métal d'apport. L'arc électrique, conduit par l'âme, fait fondre cette dernière, laquelle se dépose, en fusion, dans le métal de base en fusion également. L'enrobage, quant à lui, se décompose en protection gazeuse et en laitier. Je ne m'étendrai pas sur le laitier qui remplit différentes fonctions (protection gazeuse partielle, maintien en température, etc). La protection gazeuse vient donc de l'enrobage lorsqu'il est porté à une certaine température.

L'électrode enrobée peut être utilisée en polarité standard (le – à la masse, le + à la torche). Le flux d'électrons généré permet d'avoir un bain assez large (ce que l'on nomme le mouillage), mais avec une pénétration (la fusion proprement dite) plus faible. Autrement dit, on a un arc électrique large, avec pour contrepartie de ne pas pénétrer profondément. C'est cette configuration qui est généralement utilisée pour tous les angles, ainsi que pour toutes les passes des bout à bout, sauf la première, que l'on nomme passe de pénétration. Dans ce cas, si l'on veut une pénétration directe (autrement dit un joli bourrelet de soudure à l'envers de nos tôles), on change de polarité : le + à la masse, le – à la torche. Le faisceau d'électron circule dans l'autre sens : moins bon mouillage des bords du chanfrein, mais meilleure pénétration. Pour ceux qui prennent le document en cours, on parle de soudure.

Il existe un certain nombre de types d'électrodes. Les plus communes sont les électrodes rutiles et les électrodes basiques. Les premières sont celles que l'on trouve dans le commerce : elles sont peu chères, sont peu hydrophiles (dans H<sub>2</sub>O, il y a O), ne nécessitent pas de recommandations particulières. Pour aller vite, elles permettent de réparer un portail.

Les électrodes basiques sont moins communes. C'est avec elles qu'étaient soudés les navires autrefois.

Sans faire de pub, la OK48 de ESAB est la référence historique dans le domaine. Les qualités mécaniques sont sans commune mesure avec les rutilés : meilleure résistance mécanique, meilleure pénétration, etc... Contrepartie : elles adorent l'humidité et l'hydrogène. Il faut donc soit les étuver avant usage (les cycles d'étuvage sont indiqués sur les paquets), soit acheter des packs sous vide qu'il faut, idéalement, finir dans la journée ou on est reparti pour un cycle d'étuvage. Autre contrepartie : elles nécessitent une tension à vide relativement élevée pour l'amorçage ( $U_a = 60V - 70V$ ). Il faut donc un poste adapté, sinon ça va coller sévère à l'amorçage.

On ne soude JAMAIS, jamais, jamais, un châssis qui sera sous contrainte avec de la rutilé. Genre jamais. C'est presque interdit de ne serait-ce qu'y penser.

Il existe des électrodes inox. Elles sont rutilés. La nuance 309L permet de souder ensemble acier et l'inox.

### Réglages

Pour la basique, on considère que les réglages suivants fonctionnent bien :

- à plat : diamètre de l'âme l'électrode x 40
- en position : diamètre de l'âme l'électrode x 30

Le diamètre en question est indiqué sur les paquets : 1,6, 2, 2,5, 3,2, 4 pour les tailles les plus courantes. La conséquence, étant donné qu'il est difficile de trouver de la basique en diamètre inférieur à 2,5, c'est que ça chauffe dur. 100 ampères, ça dépote pas mal.

Pour la rutilé, ça dépend vraiment de la qualité des électrodes, mais on travaille en général plus « froid », donc avec un ampérage plus faible.

### *Le semi-automatique*

S'il est commun de commencer à l'électrode enrobée, les procédés ont historiquement évolué pour répondre principalement à des contraintes techniques de production :

- rapidité d'exécution
- homogénéité qualitative
- augmentation du taux de dépôt

C'est ce qui a créé les procédés semi-automatiques.

Principe de fonctionnement :

On a un fil de soudage, sous forme de bobine, qui va jouer le rôle d'électrode fusible. Le fil est convoyé par des galets d'entraînements à travers une torche, laquelle a en son extrémité un tube contact, qui va permettre de transmettre le courant de la génératrice au fil. L'arc électrique situé entre le fil conducteur et la pièce à souder va faire fondre le métal et le fil. À mesure qu'il fond, il est alimenté par le dévidage de la bobine. C'est ce que l'on nomme la vitesse de fil. Le gaz est emmené directement en sortie de torche également, laquelle contient en plus du tube contact un diffuseur et une buse pour diriger le gaz.

Le réglage est bien moins simple que pour l'électrode enrobée, puisqu'il s'agit de trouver le point d'équilibre entre la vitesse de fil et l'intensité de l'arc électrique pour obtenir le cordon de soudure de la taille souhaitée. Trop de fil : ce dernier n'a pas le temps de fondre, ça tape, c'est erratique. Trop d'intensité : le fil fond trop vite, se dépose en gouttes, c'est erratique, et vous risquez de fusionner votre vil avec votre tube contact. Cela a pour inconvénient de limiter radicalement la sortie du fil par votre torche. Tout est en équilibre mais le cordon est ridicule ? Il faut augmenter de manière synergique les paramètres. Le cordon vous permettrait de souder deux containers ensemble ? Il faut procéder à l'inverse.

Ce sont des principes généraux, car naturellement chaque matériau soudé aura sa spécificité.

Chaque procédé et chaque matériau, va avoir son propre gaz, son propre métal d'apport, ses propres galets d'entraînement (sous la contrainte des galets d'entraînement l'aluminium s'écrase, le fil fourré glisse, etc). Une bobine de 15kg de fil fourré inox va par exemple coûter 500 euros environ, mais une bobine de fil plein acier en coûtera 30. Une bouteille de gaz sans abonnement de 2,3m<sup>3</sup> (qui fait la journée en soudant fort) coûte à elle seule 400 euros, et la recharge de gaz entre 70 et 150 euros.

Par ailleurs, le taux de dépôt est dépendant de la taille de fil. Celui-ci est généralement conditionné en 0,6mm, 0,8mm, 1mm, 1,2mm, 1,4mm. Pour chaque fil, ce sont des galets de bonne taille, une gaine de bonne taille...et une intensité de soudage adaptée ! Car comme pour l'électrode enrobée, le courant de

soudage est dépendant du métal d'apport que l'on doit faire fondre. Pour faire vite, avec un très bon poste en 220v, on fait péniblement fondre du 1,2, taille de fil utilisée généralement en atelier professionnel, et pas très longtemps. Et ne pensez pas que le « poste fil fourré sans gaz » de brico-merdo vous permettra de faire quoi que ce soit. Un bon poste en 220 c'est 1500 euros minimum. Point. Même pas on discute du sujet (« Ouais mais Robert, le voisin de la tante de la belle sœur de mon oncle a chopé son poste chez Leroi-merdouille et ça marche bien qu'il m'a dit ». Robert, c'est robert. Il a soudé un écrou à une cornière. Dis-lui de construire un bateau avec et va naviguer avec lui. Si tu reviens, je commencerai à oser regarder le poste).

Moralité : si le procédé semi-automatique permet de travailler vite et bien (c'est objectivement d'une efficacité redoutable), il est très coûteux, et il faut impérativement évaluer ses besoins avant d'investir dans un tel procédé. Vous êtes mis en garde !

## MAG

De son petit nom : métal active gaz. C'est un procédé utilisé pour l'acier et l'inox. Le nom indique de quoi il en retourne : il s'agit de la nature du gaz de protection qui est utilisé. En règle générale, c'est un mélange d'argon (ou plus rarement d'hélium) et de CO<sub>2</sub>. Le CO<sub>2</sub> remplit un certain nombre de fonctions métallurgiques que je ne vais pas détailler ici. Le MAG permet de souder l'acier et l'inox.

Pour l'inox au semi-automatique, sauf cas particulier, on a 98% d'argon pour 2% de CO<sub>2</sub>.

Pour l'acier, communément, on a entre 12 et 25% de CO<sub>2</sub>

## MIG

Pareil, sauf que c'est pas pareil. Le gaz est inerte. Le MIG n'est utilisé que pour l'aluminium. Généralement, on est à 100% argon ou sur un mélange argon/hélium. Cela va dépendre de la nuance d'aluminium, des épaisseurs, etc

## Le TIG

De son nom : Tungsten Inert Gas. Autrement dit, on a du tungstène, on a de l'inerte, et on a du gaz. L'inerte n'étant pas nécessairement le soudeur à la fin du repas de chantier.

C'est un procédé qui utilise de l'argon pur (mes souvenirs ne parviennent à me rappeler si d'autres gaz sont utilisables). L'électrode en tungstène est non fusible : elle est là pour transmettre le courant de la génératrice, et lorsque maintenue à une certaine distance de la pièce, un arc électrique se forme qui permettra de fusionner le métal de base. Le tungstène est conducteur et a, en outre, l'excellente idée d'avoir un point de fusion à 3422°C. Plutôt bien pour des points de fusion des métaux de base à environ 1400°C.

Avec le TIG, on soude l'acier, l'inox et l'aluminium. La polarité est inversée : on a donc la masse au plus, et la torche au moins. Comme pour l'électrode enrobée, cela permet d'avoir un arc ciblé, précis.

Pour l'acier et l'inox :

La pointe de tungstène est bien affûtée, on compte environ 25A par mm d'épaisseur à souder. On crée l'arc électrique soit par la haute fréquence du poste (on appuie sur la gâchette), soit en « lift arc » : on touche la pointe sur la pièce, on lève un petit peu, on stabilise l'arc. Une fois l'arc créé, on attend un peu que le métal de base fusionne, puis on emmène le métal d'apport dans le bain de fusion, avec l'autre main. Inutile de préciser que le fait d'avoir deux mains droites est très avantageux. En avoir deux gauches rend l'exercice périlleux...

Note technique : la nature du métal d'apport (le métal emmené par la main gauche qui tremble) doit correspondre directement à la nuance de métal que l'on soude.

Pour l'alu, deux différences. La première, c'est qu'il va vous falloir un poste en courant alternatif : phase haute pour casser la couche d'alumine, phase basse pour fusionner le métal. Le prix du poste est donc multiplié par 3.... Deuxième différence : la pointe de tungstène est arrondie, et un temps de montée en température de la tôle avant d'avoir un bain de fusion supérieure.

Dans les deux cas, inutile d'insister sur le fait que, comme pour le MIG/MAG, tout coûte cher. Le gaz, certes. Mais pas seulement :

- Pour chaque nuance de métal, il faut le métal d'apport adéquat.

- Plus on soude des fortes épaisseurs, plus notre bain de fusion est important, plus il faut apporter de métal. Pour cela, chaque nuance de métal d'apport est conditionnée en différentes tailles : 1,6mm, 2mm, 2,4mm etc...
- Mais du coup, il faut des pointes de tungstène plus larges...
- et un porte-électrode plus grand..
- et un diffuseur plus grand !

Point positif : sur de faibles épaisseurs, il est possible de travailler sans métal d'apport. En outre, vu que l'on gère comme on veut la taille du bain de fusion (via l'intensité de courant), cela permet de travailler sur des plages très étendues de courant : on peut souder à 5A autant qu'à 300A. La contrainte est donc de ce point de vue moindre qu'avec un fil ou une électrode à faire fondre.

## Métallurgie et soudage

### *Le geste*

Mine de rien, la soudure, ça demande de s'appliquer. Vraiment. Et d'être un brin minutieux. Après, nous ne sommes pas tous égaux. Retour sur le vieux briscard de la soudure : « Ben en soudure, y'a trois types de personnes. Y'a les bons. Eux, yzont ça dans les paluches. Y'a ceux qui bossent et qui y arrivent. Et y'a ceux qui auraient dû être peintres ». Fin de citation. Si tout ceci n'est peut-être pas entièrement exact, une chose est sûre cependant : il faut être RÉ-GU-LIER. C'est réellement le maître mot. Régulier veut dire deux choses :

- dans l'avance (j'avance toujours à la même vitesse)
- dans le geste (je fais toujours le même geste). Je ne rentre pas dans le détail de la gestuelle pour les passes de pénétration, pour les plafonds, pour les multipasses. Désolé, cela va un peu au-delà de l'objectif de ce document.

Une deuxième chose est sûre (mais qui découle de la première) : on reste TOUJOURS dans le bain de fusion. Le bain de fusion c'est généralement la goutte bien orange (ou verte, ça dépend des cagoules) qu'on se traîne derrière notre électrode. L'idée, c'est d'accompagner le ce bain. C'est votre point de repère, c'est lui qui vous dit quoi faire, c'est lui qui dit quelle taille fera votre cordon, c'est votre cheval, votre bataille. Car vous aurez remarqué que la foutue cagoule que vous portez, empêche un tant soit peu de voir correctement ce que vous faites. En dehors de la petite loupiote que représente vos 200A une fois vos yeux protégés par la cagoule, on est dans le noir. C'est là que le bain de fusion, c'est votre pote. Il se rétrécit ? C'est que vous allez plus vite. Il augmente en largeur ? Vous êtes en train de vous endormir sur votre soudure. Sur une montante il commence à être trop liquide ? Baissez vos réglages. Je n'insiste pas. Notez cependant que pour l'électrode enrobée, vous avez le laitier qui vient un peu brouiller les cartes. Ne vous laissez pas influencer, gardez votre droite ligne de conduite : regardez la goutte orange. C'est elle et elle seule que vous devez écouter. Et c'est dans ce bain de fusion que l'on doit rester (pour notre métal d'apport en tig, avec le fil en MIG/MAG, avec notre électrode en électrode enrobée). Si vous en sortez, c'est que vous avez voulu aller plus vite que la soudure, et forcément...vous n'aurez pas fusionné cet endroit.

Troisième certitude : on doit garder un arc électrique constant. On ne s'éloigne pas, on ne se rapproche pas, on reste constant. La constance, en plus d'être mignonne (et sympa en plus, la fille du voisin), permet de faire de jolies soudures, et surtout sans défaut. Le pourquoi du comment est simple : vous avez un arc électrique (pour ceux qui on balancé leur poste à électrode enrobée du quatrième étage par colère connaîtront la différence entre arc électrique et court-circuit : Collage = Court-circuit = ça soude moins bien). L'arc est situé entre votre pièce à souder et votre électrode (fusible ou non) et partage généreusement son espace avec le milieu : l'air. L'air, pour le courant, c'est de la résistance. Donc plus on éloigne l'électrode, plus on augmente la résistance, et vu qu'on peut affirmer sans trop se mouiller que  $U=RI$ , et qu'en général  $U$  est une constante, et bien  $I$  chute. On modifie donc l'intensité de soudage. Ça servait bien à quelque chose de passer deux heures à bien régler son poste, n'est-ce pas. L'incidence métallurgique est naturellement une variation qualitative de la pénétration, une variation quantitative du dépôt, un fil qui fusionne moins bien pour le MIG/MAG, une perte d'arc pour le TIG. On a donc une soudure de bien moins bonne qualité. Mais les ennuis peuvent être plus sérieux encore : dans le cas de l'électrode enrobée, l'oxygène finit par faire son

chemin, et là c'est défaut éliminatoire assuré (nous reviendrons dessus ultérieurement).

La bonne distance est de 1-2mm pour le TIG et l'électrode enrobée, et 1-2cm de fil à dépasser pour le MIG/MAG (ce qu'on appelle le stick-out). Pour le MIG/MAG, selon les fils et les procédés, il peut toutefois y avoir de grandes disparités.

### *Quelques positions*

On parle toujours soudure.... On va évoquer la position des électrodes et leur sens d'avance. Pour faire simple, à la louche et grosso modo en même temps, on considère sur un angle à plat et plafond que l'on a :

- 45° entre la partie verticale de la tôle et l'électrode
- 45° entre la partie à plat de la tôle et l'électrode
- 45° d'inclinaison (si l'on est droitier, le bout de l'électrode étant en un point fixe, on bascule l'électrode vers la droite, inversement si gaucher)

Une fois qu'on a fait ça, on est content, parce que l'on va passer les prochaines 5 minutes à essayer de conserver cette position le plus rigoureusement possible. Merci Constance. Reste qu'on ne sait pas dans quelle direction partir !

Pour l'électrode enrobée, c'est simple : on tire. Si on est droitier, on va donc vers la droite. C'est ce qu'on appelle souder en tiré.

MIG/MAG : c'est compliqué. Ça dépend. Parfois on peut partir à droite (fil fourré rutile), parfois non (MIG alu). Dans ce cas, on part à gauche : on soude donc en poussé. Idem généralement pour le fil plein acier, très commun dans l'industrie.

Pour le TIG : c'est pousser.

Pour les montantes, on garde nos 45° de chaque côté, mais l'électrode sera parallèle au sol.

Pour les bout à bout, même principe : 90° de chaque côté, et 45° d'inclinaison à plat comme au plafond ou en corniche, perpendiculaire à la tôle pour les montantes.

### *Remarques sur la métallurgie*

C'est une partie qui peut s'avérer aride, et être d'une abyssale profondeur. Il existe des ingénieurs soudeurs, ce n'est pas pour rien. On va néanmoins tenter d'indiquer quelques éléments qui sont importants à connaître lorsque l'on soude. Ça ne mange pas de pain (surtout pas de baguette). Pour à la fois simplifier et rendre cette partie pertinente, nous allons nous partir d'un constat relativement commun :

« une soudure, ça casse toujours à côté de la soudure ».

Oui. Et non. Une soudure peut fissurer à chaud. Autrement dit, durant la période de refroidissement, une fissure longitudinale va apparaître au milieu de la soudure et sur sa longueur. Les causes peuvent être chimiques (impuretés dans le métal), mécaniques (un bridage trop dur) ou liées au soudeur (vitesse d'avance trop rapide, paramètres excessifs en particulier pour l'aluminium).

Mais elle peut aussi fissurer à froid, plusieurs heures ou jours après le soudage. On parlait d'hydrogène ? Et bien c'en est une des causes possibles. Pour les acier à forte teneur en carbone, nécessitant un traitement thermique spécifique, le non respect de ce traitement peut entraîner également ces fissurations à froid.

Revenons à notre soudure qui « casse toujours à côté de la soudure ». On va ici davantage nous intéresser à l'acier standard, et laisser de côté inox et alu. Si l'on regarde de près, la soudure a cédé non pas précisément sur la soudure elle-même, mais dans une zone périphérique de couleur bien différente, sur le début d'un joli dégradé. Méfions-nous du beau : ce joli dégradé n'est pas notre pote. Son nom à lui, c'est ZAT : zone affectée thermiquement.

Lorsque l'on a chauffé notre tôle en soudant, la chaleur de notre bain de fusion s'est propagée, ce qui est cool, parce que ça respecte les lois de la physique des matériaux. Si ça arrêta de le faire, notre monde changerait radicalement. Nous sommes donc contents, sauf que le changement de couleur est une indication de la modification des propriétés chimiques du matériau. En gros, on vient de lui faire un recuit non maîtrisé, avec refroidissement brutal (la tôle est en contact avec l'air ambiant). Si les alliages qui constituent notre métal d'apport permettent de limiter les effets néfastes d'une telle pratique, il n'en va pas de

même pour la tôle en périphérie de la soudure.

D'un point de vue métallurgique, on vient de faire deux choses qu'il ne faut pas faire :

- on vient de faire voler en éclat les belles liaisons fer/carbone de la fonderie
- ce faisant, on en a créé des assemblages moléculaires de plus grande dimension (c'est ce que l'on nomme les grains). Plus vos grains sont petits, plus vous avez de liaisons entre vos éléments, plus votre matériau est résistant. Et plus vos grains sont gros, moins vous avez de surface de contact entre eux, plus le matériau est fragile.

La ZAT, ce sont des grains de plus grande taille. Leur taille va décroissante de la lisière de la soudure à la tôle de base non altérée. Tout s'explique. C'est donc la raison pour laquelle les ruptures ont tendance à apparaître en périphérie directe de la soudure

Ajoutons que dans le cas des aciers très carbonés (tôles à haute limite d'élasticité, acier refondu, acier de vieux bateau, de tour Eiffel, etc), tous les atomes ne pourront se lier durant la phase de refroidissement, et des agrégats de fer vont se former. C'est donc pire. Il faut garder en tête que le pourcentage de carbone pour du fer/carbone c'est entre 0,02 et 2%. Au de là, c'est de la fonte (et à 2%, bonjour les compétences de champion du monde pour souder).

On fait comment du coup ? Ben...on met des rivets. On relit les premières lignes de ce document : on ne soude que si on ne peut pas faire autrement ! Que diable, faut tout répéter, c'est pénible à la fin.

On a des jokers dans notre jeu de cartes. Déjà en choisissant ses tôles. Pour faire vite, une tôle a des propriétés mécaniques (limite d'élasticité, limite de rupture, dureté, etc). On a les moyens de calculer les contraintes que l'on va créer sur un acier en suivant scrupuleusement des paramètres de soudage définis.

Si donc je veux des propriétés mécaniques XYZ, je ne vais pas choisir une tôle aux propriétés XYZ. Ce serait trop simple, autant que contreproductif ! On va déterminer quel type de matériau permettra à ma zone la plus altérée par la soudure (la ZAT) d'atteindre les propriétés XYZ. On suit donc le vieil adage selon lequel une chaîne est aussi forte que son maillon le plus faible. Inutile de préciser que la tôle que l'on va devoir choisir aura des qualités bien supérieures à la tôle aux qualités XYZ, et coûtera donc.... Bon, on ne va pas faire un dessin.

Autre atout que l'on a (parfois) : le choix du procédé. On a évoqué tout à l'heure, le taux de dépôt et le rendement bien supérieurs dans le cas du semi-automatique. Cela n'a pas qu'un intérêt économique. Plus on dépose, plus on peut avancer vite, plus on avance vite, moins on chauffe plus longtemps... C'est ce qu'on va nommer l'énergie linéaire de soudage. Cela va être constitué du rapport entre la vitesse de soudage et l'énergie dispensée à la tôle à paramètres donnés sur une distance donnée. Électrode enrobée : tât de dépôt faible, donc vitesse d'avance faible, grosse énergie linéaire de soudage. MAG : bon tât de dépôt, donc bon rendement, vitesse rapide, faible énergie linéaire de soudage. Le TIG est quant à lui assez proche de l'électrode enrobée. Conclusion : en choisissant certains procédés plutôt que d'autres, on peut limiter l'importance de la ZAT et la taille de ses grains, si l'on est dans une configuration qui impose ce type de précaution.

La déformation est elle aussi une affaire de chaleur. Supposons deux tôles bridées. Un jour, je décide de les souder ensemble en continu. Au TIG parce que le rendu il est trop beau. Et pis ça va en mettre plein les mirettes à robert et son poste semi-automatique. On oublie la contrainte budgétaire (on a beau avancer moins vite, le gaz lui s'en va à la même vitesse), celle de temps (vitesse d'avance 1/3 inférieure à celle du semi-automatique, donc trois fois plus de temps). Durant le soudage, la tôle monte en température. Comme chacun le sait, le métal se dilate. Pas d'inquiétude, il ne manquera pas de le faire. Là où il est le plus chaud, dans notre cher bain de fusion, il est liquide, et donc peut se dilater autant qu'il veut. Par contre, au refroidissement on a un problème : dès 1400°, l'acier est solide. De plus, toutes les tôles sont bridées. Or, si le métal se dilate en chauffant, il se contracte en refroidissant. On va donc perdre en surface de tôle. Point. Pour mettre un peu de piment d'énergie linéaire de soudage dans la recette, nos soudures TIG seraient peut-être hyper classes, nous permettant de la ramener sévère à l'apéro, n'empêche qu'avec l'énergie qu'on aura balancé, nos tôles pourront être récupérées pour être vendues en tôles ondulées.

On comprend ainsi que quel que soit le type de soudage, le procédé, le métal, le soudeur champion du monde ou notre robert bien aimé, la tôle est têtue dans son obéissance aveugle aux lois de la physique : elle va déformer. Par contre, en soudant au semi-automatique, avec des cordons fins, par chenillages opposés (20 cm de soudure à gauche, 20cm de soudure côté opposé à droite, etc ), sur une méthodologie proche de

celle du démontage d'une culasse, alors oui, nous aurions pu limiter les déformations. En dégourdissant la tôle après soudage également. Non, pas la libérer pour aller faire le tour du pâté de maison à pinces, mais en la chauffant au chalumeau au niveau des soudures pour répartir les contraintes de la chauffe initiale liée à la soudure. On parvient ainsi à limiter les déformations, à les répartir, mais en aucun cas à les éliminer. Pour information, les bordés de gros navires en 25mm voire 35mm, déforment énormément au soudage. Bon, les vérins de 50 tonnes ramènent le truc à peu près bien, et il y en a 20 alignés... Sur ces mêmes navires, les tôles de 5mm sont des cloisons (celles de 10mm aussi, mais elles sont partiellement structurelles). Et tout ça, et bien ça déforme allègrement. Le boulot, dans ce cas, consiste principalement à avoir les moyens de redressement appropriés. Ce qui signifie : on ne peut pas réellement lutter contre les déformations (même si pour du soudage plus pointu, on anticipe la déformation par une préparation des pièces adéquates). CQFD

### *Les défauts*

Les défauts en soudure répondent à des normes ISO. Ils sont donc intégralement répertoriés, classés (ISO 6520) avec dans certains cas des critères d'acceptation, lesquels dépendent de critères de qualité (ISO 5817). Nous allons rapidement aborder quelques défauts communs.

Soufflures : c'est notre ennemi l'oxygène qui en est généralement la cause, du fait le plus souvent d'un défaut de gaz. Les soufflures peuvent être débouchantes ou non. Quand elles le sont, elles se présentent sous forme de gryère : plein de petits trous. C'est joli, et quelque part c'est un peu le concept de structure en nid d'abeille. Par contre c'est pas étanche...

Manque de fusion : c'est ce qu'on nomme aussi collage. On a apporté du métal, mais on n'a pas fusionné les tôles ensemble. Pas de continuité de matière donc, et risque certain, à terme, d'arrachement.

Morsures et caniveaux : lorsqu'on a attaqué un peu la tôle, en périphérie de la soudure, par un petit écart. Ça fait comme un petit trou. On a creusé, mais pas rempli ensuite. La morsure c'est ce défaut localisé, le caniveau c'est sur toute la longueur. Résultat : l'eau va y prendre ses aises, avec pour conséquence corrosion, rupture, apocalypse, mort. Ou peut-être juste les deux premiers. S'appliquer davantage et/ou revoir à la baisse ses paramètres de soudage peut y remédier.

Défauts de géométrie : le but est d'obtenir un cordon rigoureusement géométrique, avec dans le cas d'un angle par exemple, autant de matière d'un côté que de l'autre. Sur une coupe de profil on doit avoir un joli triangle rectangle isocèle. Sur un bout à bout, on veut obtenir deux droites parallèles en délimitation de cordon, et avec un volume homogène légèrement bombé. Bon, il y a l'idéal et le monde réel. Faut pas déconner.

Passe roulée : le métal revient sur lui même. Cela arrive à plat, et souvent au plafond. Angle de torche ou d'électrode à revoir, vitesse possiblement. Bref, le soudeur doit bosser pour ne pas finir peintre. Ce défaut a pour conséquence de fragiliser l'ensemble, à la fois par sa géométrie et par la cavité créée que l'eau se fera un plaisir de remplir.

Je vous invite, pour explorer plus avant les défauts, à consulter les normes citées plus haut.

## **Épilogue**

J'arrête ici ce document, en espérant qu'il ait permis d'éclairer deux ou trois zones d'ombres pour le domaine de la soudure. Je n'ai pas cherché à être exhaustif, ni à aller dans les détails les plus précis, je remercie donc par avant les spécialistes de leur indulgence. L'objectif étant que chaque personne ayant un peu de soudure à faire ait de quoi poser ses pieds, et avec un peu de chance se poser les bonnes questions. Bonne route, et bonnes soudures !