
Les procédés de soudage

SOMMAIRE :

1. DEFINITION	24
2. PRESENTATION DES PRINCIPAUX PROCEDES DE SOUDAGE POUR LES METAUX.....	24
2.1. <i>Quelques exemples.....</i>	<i>24</i>
2.2. <i>Procédé de soudage de mon étude : soudage à arc submergé (SAW : Submerged Arc Welding).....</i>	<i>25</i>
3. LES DIFFERENTES PARTIES D'UN CORDON DE SOUDURE.....	26
4. DEFAUTS DE SOUDURE	27
5. TENUE MECANIQUE D'UN JOINT SOUDE.....	30
6. LA FISSURE DE TYPE IV	31

1. Définition

Le soudage est l'opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler (continuité de la nature des matériaux assemblés : matériaux métalliques, matières plastiques, etc.), soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base (matériau constitutif des éléments à souder).

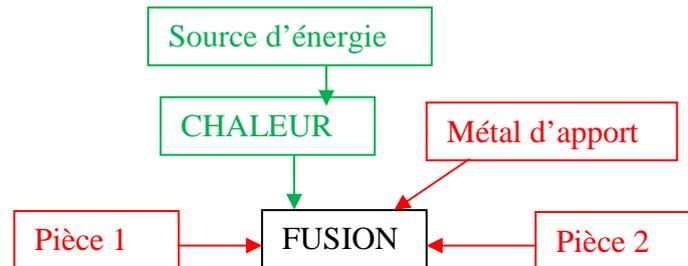


Figure 2-1 : Principe d'une soudure

Les procédés de soudage sont de plus en plus employés car ils permettent d'obtenir une structure 10% plus légère que celle obtenue par assemblage boulonné [www.otua.fr]. Le soudage assure une continuité métallique de la pièce lui conférant ainsi des caractéristiques, au niveau de l'assemblage, équivalentes à celles du métal assemblé. Il répond donc à la problématique de garantir la possibilité d'imposer des sollicitations élevées. Il est durable car insensible aux variations de température, aux conditions climatiques...pour finir il garantit l'étanchéité de la pièce à souder. En outre, on maîtrise de plus en plus ce système d'assemblage en contrôlant par contrôle non destructif les défauts qui peuvent apparaître. L'inconvénient réside toutefois dans la nécessité d'un opérateur qualifié car cette tâche demande expérience, précision et savoir-faire.

L'acier est le métal le plus facile à souder, car on peut utiliser avec lui toute une gamme de procédés de soudage. Dans l'ère industrielle, c'est l'acier qui a le plus bénéficié du soudage.

2. Présentation des principaux procédés de soudage pour les métaux

2.1. Quelques exemples

Il existe différents procédés pour réaliser une soudure, ces derniers sont résumés sur la Figure 2-2.

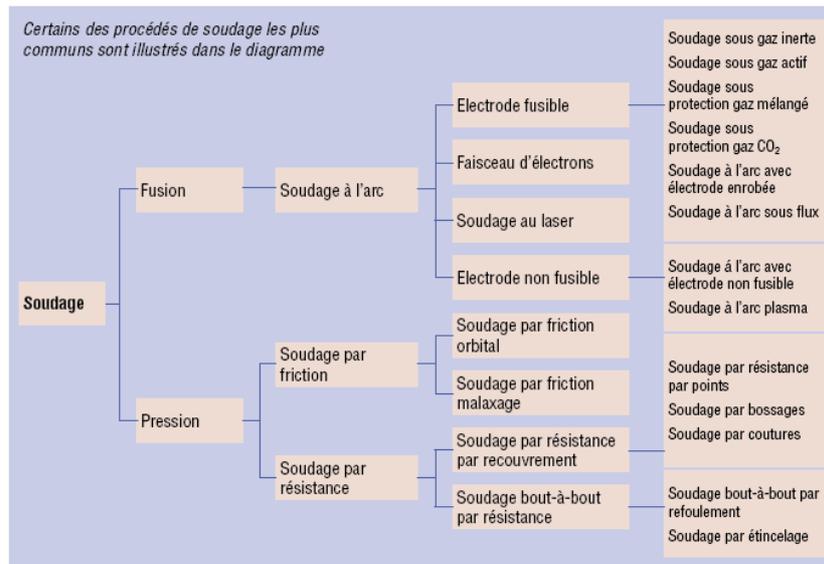


Figure 2-2 : Différents procédés de soudage [STRUERS]

Le plus ancien procédé de soudage s'appelle le soudage à forge, il consistait à chauffer les bords des pièces à souder jusqu'à ce qu'ils deviennent blancs (ceci signifie que la température est d'environ 1000°C) puis à les assembler en les juxtaposant et en les martelant.

2.2. Procédé de soudage de mon étude : soudage à arc submergé (SAW : Submerged Arc Welding)

Le joint soudé de mon étude a été réalisé par SAW (Figures 2-3 et 2-4) pour toutes les passes.



Figure 2-3 : Soudage SAW (sous flux en poudre).

L'arc électrique jaillit sous le flux en poudre. Quand le flux fond, le cordon de soudure apparaît [www.otua.org]

Ce procédé mis au point aux États-Unis arriva en Europe en 1935 et apporta un mode de soudage à la mesure des constructions de l'industrie lourde. La source de chaleur est un arc électrique qui jaillit entre un fil d'électrode nu (diamètre 1,2 à 6 mm), alimenté soit en courant continu, soit en courant alternatif, et la pièce à souder, sous un lit de flux en poudre (appelé

aussi fondant) [www.smgr.com]. L'alimentation en flux est assurée séparément par une goulotte placée en avant du fil, alors que l'excès de flux est récupéré en arrière par un aspirateur. À l'amorçage, l'arc éclate au sein de la poudre. Il se crée alors une cavité remplie de gaz (CO et CO₂) qui est entourée de flux fondu. Ce dernier étant conducteur, une partie de l'énergie est transmise au bain par effet joule. Le courant continu plus généralement utilisé ne cède la place au courant alternatif que dans le cas où les intensités de soudage dépassent environ 600A et notamment, évite les inconvénients et déboires causés par le soufflage magnétique. Dans notre étude, l'intensité du courant est de 420A et le courant est alternatif. Le soudage à l'arc submergé s'applique principalement au soudage des aciers sur des tôles épaisses et sur une longue distance. De façon générale, il n'est utilisé que pour le soudage d'épaisseur supérieure à 5 mm. Du fait que l'arc ne soit pas visible, le soudage à l'arc submergé est surtout utilisé de manière automatique, rarement semi-automatique. Un avantage que procure ce procédé est qu'il peut être totalement automatisé, l'opérateur fixe le courant, la vitesse de course et l'alimentation du fil [www.smgr.com]. Convenant bien sur chantier à cause du flux recouvrant le bain et de l'absence de rayonnement, il a de nombreuses applications en construction navale, d'appareils sous pression, de poutres, de tubes de gros diamètre et également en rechargement où le fil peut être double (arc tandem) ou même remplacé par un feuillard de diverses largeurs. Pour améliorer la précision de la soudure, on peut également ajouter un système laser de guidage des têtes de soudage qui veille au positionnement exact des soudures intérieures et extérieures et au recouvrement optimal de celles-ci [www.smgr.com].

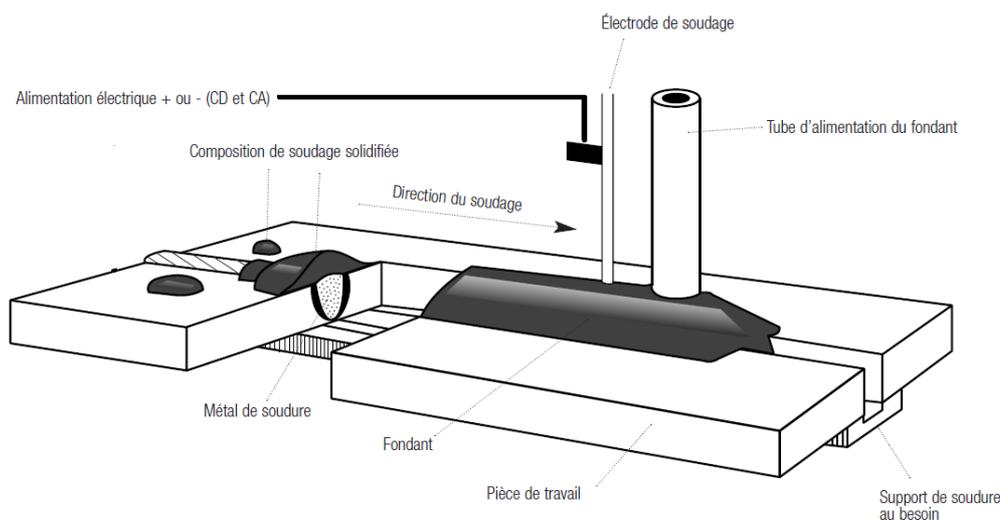


Figure 2-4 : Schéma de fonctionnement d'un soudage SAW [Godin 2000]

3. Les différentes parties d'un cordon de soudure

Un cordon de soudure est composé de différentes parties (cf. Figure 2-5) :

- le métal de base est le matériau constitutif des éléments à souder ;
- le métal d'apport est la matière dont est constituée l'électrode utilisée dans le processus de soudage ;
- la racine désigne l'endroit de l'assemblage jusqu'où le métal d'apport a pénétré (aspect envers sur la Figure 2-5) ;
- la face représente la surface extérieure de la soudure (finition sur la Figure 2-5) ;

— le pied correspond à la ligne de séparation, sur la face de la soudure, entre le métal de base et le métal d'apport ;

— la zone affectée thermiquement (ou ZAT) est la partie du matériau de base qui n'est pas rentrée en fusion avec le métal d'apport mais qui, par contre, a subi un échauffement et un refroidissement très rapides au passage de l'arc de soudage conduisant à une modification de la microstructure du métal de base. Dans le cas des aciers, cette zone se traduit par un durcissement du matériau et peut dès lors acquérir un comportement fragile. Cette zone peut être divisée en trois sous-zones : une zone à gros grains (CGHAZ), une zone à grains fins (FGHAZ) et une zone intercritique (ICHAZ).

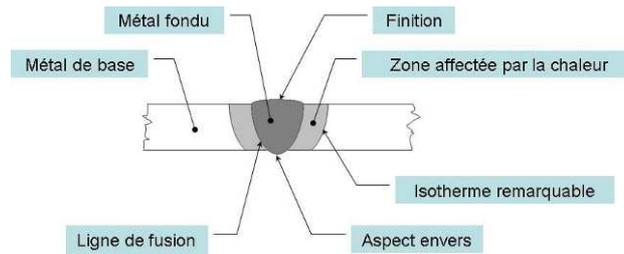


Figure 2-5 : Les différentes zones d'un joint soudé

4. Défauts de soudure

Lors d'une opération de soudage, de nombreux paramètres tels que l'énergie de soudage, le gaz, le fil utilisé, la vitesse d'avance, peuvent intervenir sur la qualité du cordon. Ainsi de mauvais réglages ou un matériel inadapté peuvent entraîner l'apparition de nombreux défauts. En effet, lorsque l'on chauffe le métal certains mécanismes comme la diffusion sont activés. Il peut alors apparaître un phénomène appelé ségrégation pendant lequel des impuretés ou éléments d'alliage migrent aux joints de grains, ce qui facilite la rupture fragile intergranulaire. Pour éviter ce problème, on effectue parfois un recuit de la pièce (chauffage de toute la pièce afin d'homogénéiser l'ensemble). Lors du soudage, on peut également trouver des porosités qui sont des défauts sphériques creux qui peuvent être ou non débouchants. Ces porosités sont causées par les courants d'air, le manque de gaz, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder. Dans le cas de porosités non débouchantes, elles peuvent être appelées soufflures (Figure 2-6), alors que dans le cas de porosités débouchantes, elles prennent le nom de piqûres.

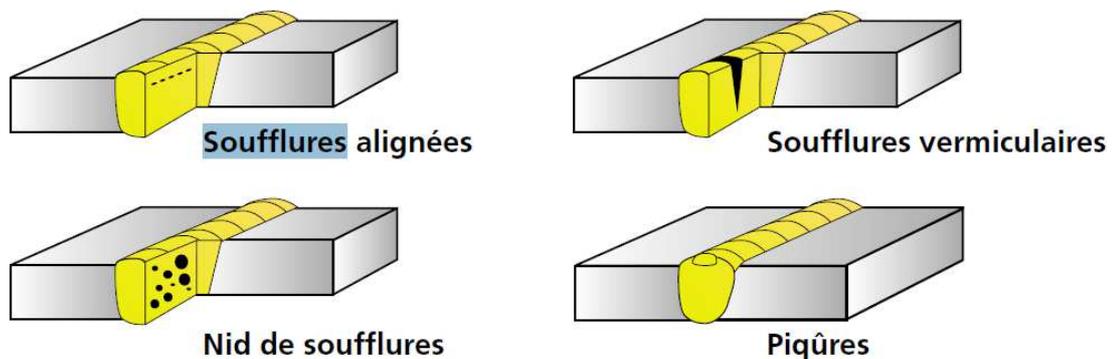


Figure 2-6 : Les différents types de soufflures [CSMOFMI, les défauts de soudure]

On peut également voir apparaître des inclusions qui sont des composés étrangers à la soudure et peuvent contenir du Tungstène (cas du soudage TIG) ou du laitier (soudage à l'électrode enrobée ou baguette) ou encore des oxydes. Suite au retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide peut apparaître à la surface ou à l'intérieur du cordon, on parle alors de retassures. Ce type de défaut est inacceptable si l'étanchéité n'est pas assurée. Au cours d'une soudure, le métal peut également déborder du côté envers du cordon dans le cas de l'excès, on parle alors d'excès de pénétration (Figure 2-7). Ces défauts proviennent de mauvaises conditions opératoires (vitesse trop grande, intensité du courant insuffisante, carence en métal d'apport). Ils créent un affaiblissement plus ou moins important du joint et un risque de corrosion ultérieure.

Excès de pénétration

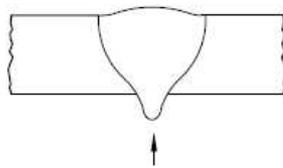


Figure 2-7 : Un excès de pénétration [CSMOFMI, les défauts de soudure]

A l'opposé il peut y avoir un manque de pénétration ou un collage. On distingue le collage noir où l'interface entre le métal de base et la soudure est vide et le collage blanc, où l'interface est cette fois-ci comblée par des oxydes fondus. Ils créent un affaiblissement plus ou moins important du joint et un risque de corrosion ultérieure.

Pendant une soudure, il peut apparaître des fissures que l'on classe en deux catégories :

- La fissuration à froid est essentiellement due à l'hydrogène dissout dans le métal fondu et qui a diffusé dans la ZAT. Au voisinage du métal fondu, les ions H^+ contenus dans l'eau de refroidissement vont interagir avec le métal fondu et diffuser en son sein. Ces fissures se forment à basse température, souvent plusieurs heures après le soudage, le plus souvent dans la ZAT. Elles sont fines, non oxydées et perpendiculaires aux directions des contraintes principales.
- La fissuration à chaud est due, dans certains aciers, à la présence entre les grains d'un film liquide de sulfure de fer ou de phosphore qui apparaît durant le retrait à la solidification. Ce type de défaut se caractérise par des fissures larges, ouvertes, perpendiculaires aux vagues de solidification et généralement oxydées à l'intérieur.

On appelle morsures (Figure 2-8) le défaut où le métal de base est creusé sur une partie du cordon. Ce défaut est dû au retrait du métal au cours du refroidissement. Ce type de défaut est inacceptable si l'étanchéité n'est pas assurée.

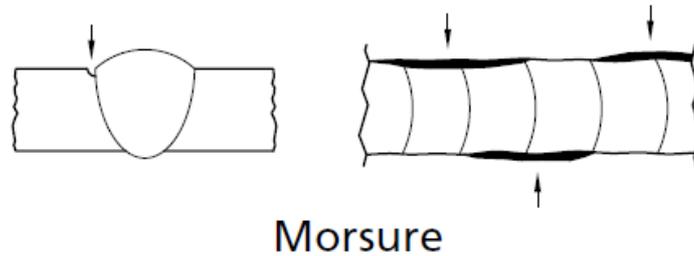


Figure 2-8 : Schéma d'une morsure [CSMOFMI, les défauts de soudure]

Il existe des défauts qui n'apparaissent que dans le métal fondu comme les caniveaux (Figure 2-9). Ils se situent parallèlement à l'axe longitudinal du cordon et sur la ligne de fusion, ils indiquent une inégalité de chauffage.

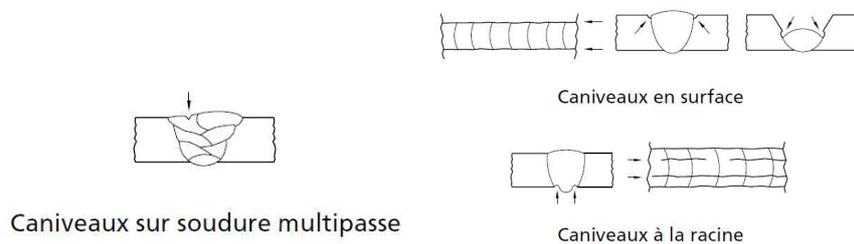


Figure 2-9 : Schémas des différents types de caniveau que l'on peut rencontrer dans une soudure [CSMOFMI, les défauts de soudure]

Le cordon de soudure peut également se creuser longitudinalement (Figure 2-10). Ce défaut est caractéristique d'un manque de métal dû à un écartement trop important des bords à souder ou à l'utilisation d'un fil non adapté (diamètre principalement). C'est le défaut inverse du creusement longitudinal. Il est dû à l'exécution trop lente de la soudure ou à un écartement initial des bords trop faible.

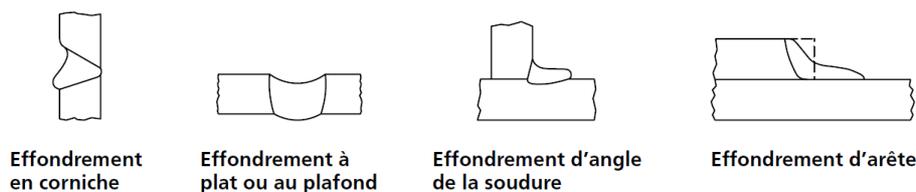


Figure 2-10 : Différents types d'effondrement de cordon de soudure [CSMOFMI, les défauts de soudure]

Durant l'opération de soudage, le cordon a tendance à se percer (Figure 2-11), ce défaut est dû à un excès d'énergie lors de l'opération de soudage et donc à un volume de métal fondu trop important. Le cordon perd donc son étanchéité et le trou créé peut être source de fissure puis de rupture de l'assemblage.

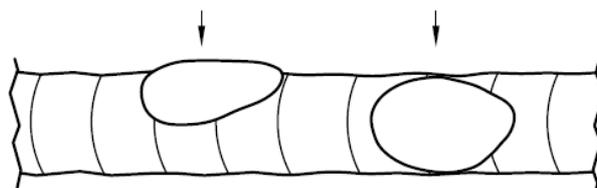


Figure 2-11 : Perçage du cordon de soudure [CSMOFMI, les défauts de soudure]

Le recouvrement incomplet ou interrompu de la pièce peut être dû à la perte de l'arc ou à un défaut de positionnement de la torche. Il est important dans ce cas de réaliser une retouche au TIG. Durant le procédé de soudage, des billes de métal, plus ou moins adhérentes sur les pièces et les outillages de soudage, peuvent être expulsées en dehors du cordon. Ce défaut, inévitable à l'amorçage et lié au procédé, est facilement supprimé par un brossage ou un décapage. A la fin de la procédure de soudage, on peut trouver des résidus de fil. Ils proviennent d'une fusion incomplète du fil d'apport. Bien qu'acceptable, il est important de couper ces résidus pour des raisons de présentation.

La Figure 2-12 récapitule tous les défauts susceptibles d'être présents dans un joint soudé.

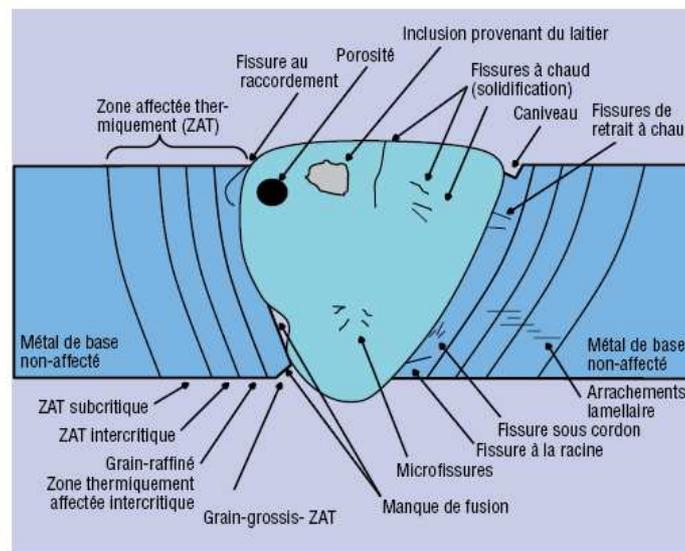


Figure 2-12 : Schéma récapitulatif des différentes régions de la ZAT dans une soudure à passe unique et les défauts éventuels rencontrés [STRUERS]

5. Tenue mécanique d'un joint soudé

Les modifications métallurgiques impactent la tenue mécanique du joint soudé. Aussi faut-il s'assurer d'obtenir une tenue mécanique suffisante et tenir compte des soudures dans le calcul et le dimensionnement des structures soudées. En effet, les caractéristiques mécaniques qui sont notamment modifiées concernent la limite d'élasticité, la contrainte à rupture. En revanche le coefficient de Poisson et le module de Young ne sont que très peu modifiés. L'opération de soudage engendre de plus l'apparition de contraintes résiduelles dues au retrait créé par l'opération de soudage sur les pièces. D'autre part, la tenue à la fatigue et en fluage des assemblages soudés est une problématique fondamentale dans la conception des appareils soudés. Enfin, dans la plupart des structures fabriquées par soudage, cette zone est la région privilégiée pour la naissance et la propagation de fissures. La vitesse de propagation de

fissures est accélérée dans la ZAT car le taux de triaxialité ($\frac{1}{3} \frac{(tr \underline{\sigma})}{\sigma_{\text{éq}}}$) (avec $\sigma_{\text{éq}}$ la contrainte équivalente de Von Mises) est plus élevé que dans cette zone.

6. La fissure de type IV

Nous avons vu que plusieurs types de fissures étaient susceptibles d'apparaître dans une soudure. Quatre sont principalement recensées dans les matériaux du même type que le P91. Elles sont classées selon la zone du cordon de soudure dans laquelle elles apparaissent et la façon dont elles se propagent. Les fissures de type I restent dans le métal d'apport tandis que celles de type II naissent dans le métal fondu et se développent jusque dans la ZAT. Les fissures de type III apparaissent dans la CGHAZ. Enfin celles de type IV se développent dans la zone intercritique (ICHAZ) de la ZAT. C'est dans cette zone qu'apparaissent les fissures pendant un essai de fluage. Ce dernier type de fissure est inévitable dans une soudure mais son effet néfaste peut être minimisé.

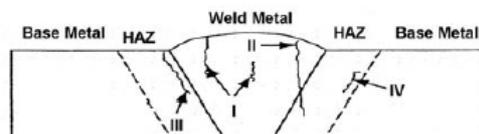


Figure 2-14 : Les différents types de fissures dans un joint soudé [Laha 2007]

Les fissures de type IV sont celles qui sont susceptibles de limiter le plus la durée de vie à 525°C d'une pièce (certaines normes recommandent une réduction de 10% de la résistance au fluage et cette diminution peut atteindre 40% à 625°C [Allen 2007]; ce facteur de réduction peut atteindre 50% pour des essais de plus de 100 000 heures). Ces fissures apparaissent après environ 50 000 heures d'essai. Leur développement doit être ainsi surveillé dans les centrales nucléaires ou thermiques à flammes actuelles (pour les pièces de chaudière par exemple) qui utilisent des aciers du même type que le P91 et qui ont une durée de vie supérieure à 30 ans. Pour être plus résistant aux fissures de type IV, il faut que la ligne de fusion fasse un petit angle avec la direction des contraintes principales [Albert 2003]. Il faut également limiter la largeur de la ZAT. On peut également supprimer ce type de fissure [Abe 2007] dans les aciers à 9% de chrome (classe de matériau dont le P91 fait partie) en ajoutant du bore dans la ZAT ce qui va permettre de stabiliser, en les empêchant de coalescer, certains précipités présents dans cette zone. Ceci permet alors d'augmenter la résistance au fluage. Notons toutefois que pour des applications nucléaires, l'utilisation d'un acier qui contient du bore n'est pas recommandée car 20% de ^{10}B que contient le bore naturel se décomposent selon une réaction α et donnent de l'hélium et du lithium qui peuvent influencer les propriétés mécaniques de cet acier [Klueh 2007]. Selon les mêmes auteurs dès qu'un acier contient 0,005% de bore ce phénomène a lieu.

