

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

**Faculté : Science de la terre**

**Département :** Metallurgie Et Genie De Materiaux

**Domaine :** Science Et Technologie

**Filière :** MÉTALLURGIE

**Spécialité :** GENIE METALLURGIQUE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Soudage aluminothermique des rails**

Présenté par : M<sup>lle</sup> : SOLTANI Aziza Nedra

Encadrant : Pr : BOUDEBANE Saïd

Grade (Pro)

UBMA

**Jury de Soutenance :**

Pr : BOUDEBANE	Prof	UBMA	Président
Dr BOUCIF Abdenacer	MCA	UBMA	Examineur
Dr BOUDEBANE Azzeddine	MCA	UBMA	Examineur
Dr SNANI Louafi	MCA	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

## **REMERCIEMENT**

*Je souhaiterais remercier tout particulièrement M. **BOUDEBANE Saïd** mon tuteur de projet fin d'études, qui m'a suivi tout au long de ce période et ma conseillé sur l'orientation que celui-ci devait prendre mémoire, qui m'a laisser une large part d'autonomie dans ce travail .*

*Je remercier également l'équipe **d'INFRAFER** pour l'accueil qu'elle m'a réservé, le temps que chacun de ses membres m'a accordé, et plus globalement, pour toutes les informations, références bibliographiques, réflexions, corrections...que chacun m'a apporté qui ont nourrit ce travail.*

*Je remercie également cette entreprise de m'avoir fait découvrir et approché le coté pratique. Je remercie également mes professeurs pour la qualité de l'enseignement qu'ils m'ont prodigué au cours de ces 5 années passées à l'université de Badji Mokhtar Annaba au département de génie métallurgique*

*Je remercie enfin l'ensemble de mes proches qui m'ont supporté (et auront encore certainement à supporter).Je remercie plus particulièrement **M.Azzab ;M.Saadaoui elhocine ; M.Benabdallah Omar ;M.Bennama aboubakr .***

## ***Dédicace***

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce modeste travail à :*

***A Ma tendre Mère FATIHA :*** *Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une Mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

***A Mon très cher Père NACER :*** *Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, L'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

***A mes chers frères: YOUCEF, SALEH, ALA***

***A Mr. SAADAOUI el hocine ;Mr benabdallah Omar ; Mr BENNAMA Aboubakr ,Nesrine ; et Meriem***

***A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études***

***A tous mes amis, et a tous ceux qui me sens chères et que j'ai omis de citer.***

***A toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.***

**NEDRA !**

## **RESUME**

L'amélioration de la tenue en service des structures ferroviaires soudées passe par l'analyse et la compréhension des phénomènes métallurgiques, physiques et mécaniques mis en jeu lors de leur assemblage par soudage. Ce travail portera donc sur la compréhension des aspects théoriques et pratiques du soudage des rails par aluminothermie.

Une foule de facteurs influencent la qualité de la soudure aluminothermique. La soudure est exécutée par un opérateur. Le travail de soudage aluminothermique exige une préparation parfaite et une stricte exécution des différentes étapes de la procédure d'assemblage. Le résultat dépendra de la qualité des mélanges réactifs utilisés, de formation des exécuteurs et du respect des exigences de départ et des étapes technologiques établies.

**Mots clés :** Aluminothermie, rails soudés, phénomènes métallurgiques, physiques et mécaniques, contrôle de la soudure, défauts, qualité de la soudure.

## **ABSTRACT**

Improving the performance of welded railway structures requires the analysis and understanding of metallurgical, physical and mechanical phenomena involved, this work focuses on the reliability of the rails welded by aluminothermy.

A variety of factors influence the quality of the weld. The weld is performed by an operator. The manual welding work is not very extensive but the preparation and execution are indeed described in detail. Operators receive training with instructions and steps to follow, If these are followed correctly, you get a good quality weld less defects.

**Keywords:** Aluminothermy, welded rails, railway structures, metallurgical physics and mechanical phenomena, weld inspection, defects, weld quality.

## ملخص

يتطلب تحسين أداء هياكل السكك الحديدية الملحومة تحليل وفهم الظواهر المعدنية والفيزيائية والميكانيكية المعنية ، ويركز هذا العمل على موثوقية القضبان الملحومة بواسطة الألمنيوم. تؤثر مجموعة متنوعة من العوامل على جودة اللحام. يتم اللحام بواسطة عامل. أعمال اللحام اليدوي ليست مكثفة للغاية ولكن التحضير والتنفيذ موصوفان بالتفصيل بالفعل. يتلقى المشغلون تدريباً مع الإرشادات والخطوات التي يجب اتباعها ، إذا تم اتباعها بشكل صحيح ، فستحصل على لحام بجودة جيدة أقل عيوباً

## الكلمات الرئيسية:

الألمنيوم ، القضبان الملحومة ، هياكل السكك الحديدية ، الفيزياء المعدنية والظواهر الميكانيكية ، فحص اللحام ، العيوب ، جودة اللحام

## TABLE DES MATIERES :

Remerciement.....	I
Dédicace .....	II
Résumé .....	III
Abstarct.....	IV
ملخص.....	V
Table Des Matières.....	VI
Liste des tableaux .....	VII
Liste des figures .....	VII

### CHAPITRE I : Les différents procédés de soudage des métaux

I. Introduction .....	1
I.1. Métallurgie et soudabilité .....	5
I.2. Les procédés de soudage des métaux .....	6
I.3. Les types de soudure.....	10
I.4. Plusieurs problèmes peuvent se poser lors du soudage .....	10
I.5. Domaine d'application du soudage .....	11

### CHAPITRE II : Le soudage aluminothermique des rails

II. Introduction .....	13
II.1. L'importance du rail.....	13
II.2. Les différents types des rails .....	14
II.3. Méthodes de soudage des rails.....	15
II.3.1. Soudage a l'arc en bain de fusion .....	15
II.3.2. Soudage bout à bout par étincelage .....	16
II.3.3. Soudage aluminothermique .....	16
II 3.3.1. Préparation de la soudure .....	19
II.3.3.2. La Composition initiale de la charge aluminothermique .....	19
II.3.3.3 Caractéristiques chimiques spécifiques de la charge aluminothermique.....	19
II.3.3.4.Chronologie d'exécution d'une soudure aluminothermique.....	20
II 3.3.5. Propriétés de la soudure aluminothermique .....	25
II.3.3.6. La norme de soudure aluminothermique .....	26
II 3.3.7. Procédés aluminothermiques .....	26
II 3.3.8. Contrôle de la soudure Aluminothermique.....	28
II.3.3.9 .Durée de vie de la soudure .....	32
II.3.3.10. Défauts de la soudure .....	33
II.3.3.11.Effets des défauts de soudure aluminothermique sur le comportement mécanique des rails .....	38
II.3.3.12. Assurance de la qualité .....	38
II.3.3.13.Evaluation de la qualité de soudure .....	39
II.3.3.14. Autres nuances d'aciers pour la soudure aluminothermique .....	40
II.3.3.15. Quelques solutions pour réduire les défauts .....	40

<b>Conclusion générale .....</b>	<b>42</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>43</b>

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Composition chimique des rails et des soudures

Tableau II.2 : Composition initiale de la charge aluminothermique

Tableau II.3 : Critères visuel d'oxydation

## Liste des figures

Figure I.1 : Cycle thermique en soudage

Figure I.2 : Classification des procédés de soudage

Figure I.3 : Le soudage à l'arc électrique (générique)

Figure I.4 : Soudage TIG

Figure I.5 : Soudage plasma

Figure I.6 : Soudage MIG-MAG

Figure II.7 : Rail en fonte posé sur des plots en pierre

Figure II.8 : Différents types des rails

Figure II.9 : Rail double champignon

Figure II.10: Rail a gorge type Broca

Figure II.11 : Principe de la soudure aluminothermique

Figure II.12: Vue d'une soudure aluminothermique de rail

Figure II.13 : Une soudure bien exécutée juste après l'ébavurage

Figure II.14 : Schéma illustrant le procédé de soudage aluminothermique

Figure II.15 : Réglage des joints

Figure II.16 : Réalisation de la soudure aluminothermique

Figure II.17 : Partie d'une voie de chemin de fer

Figure II.18: Soudure aluminothermique (la finition)

Figure II.19: Soudure contrôlée par un film et source radioactive

Figure II.20: Une bobine d'induction créant un courant de Foucault

Figure II.21: Fissuration à chaud

Figure II.22:Fréquence de ruptures des soudures aluminothermiques

Figure II.23: Rupture des rails

Figure II.24: Défauts de soudure

## **Introduction Générale**

L'aluminothermie est un principe chimique qui permet la production de hautes températures, par une réaction dite exothermique, c'est-à-dire qu'elle produit de la chaleur. Cette réaction est obtenue sur les métaux au moyen d'aluminium en poudre, et est déclenchée par la combustion d'une mèche de magnésium, que l'on met à feu par une étincelle ou une flamme. Une fois amorcé, ce processus ne peut être stoppé, et doit aller à son terme par la combustion complète des métaux mis en œuvre.

La température obtenue est supérieure à la température de fusion des métaux utilisés et approche leur température d'ébullition. Ainsi, elle peut atteindre 1800 à 3500°C selon le métal ou l'alliage exposé à la réaction.

L'aluminothermie permet la fusion entre les métaux, cette propriété est notamment utilisée pour des applications industrielles.

Le soudage aluminothermique est généralement effectué sur des rails de train classiques mais les rails de tram et les profilés spéciaux sont également abordés. Chaque année, quelque 15.000 soudures aluminothermiques sont exécutées sur des rails de train. Les rails ont une teneur moyenne en carbone de 0,7. Cela veut dire qu'ils ont une limite d'élasticité assez élevée. Une erreur dans un rail grandit en une déchirure assez grande pour faire se briser un rail. La plupart des erreurs sont extraites mais quand ce n'est pas le cas, vous pouvez avoir des cassures de rail. Ce travail, dans son ensemble, traite des aspects théoriques et pratiques du soudage des rails par aluminothermie, l'accent sera mis sur l'exploitation de ce type de soudage au sein de l'entreprise Algérienne INFRAFER.

Ce mémoire est constitué de deux chapitres, en plus d'un résumé et d'une introduction générale.

- Dans le chapitre I : nous présentons une étude bibliographique sur les différents procédés de soudage des métaux.
- Dans le chapitre II : la pratique du soudage aluminothermique des rails au sein de l'entreprise INFRAFER.

Outre cela, le mémoire comporte une conclusion et des références bibliographiques

# **CHAPITRE I**

## **Différents procédés de soudage des métaux**

## Introduction

Le soudage consiste à faire fondre les pièces à assembler, le métal de base, ainsi qu'un métal d'apport sous forme de fil ou de baguette. Le chauffage peut être assuré par différentes sources d'énergie, les plus courantes étant la flamme (chalumeau) et l'arc électrique (éclair entre une électrode et le métal), Le soudage a pour l'objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique.

Le soudage est donc une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces ; il constitue un moyen privilégié d'assemblage pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. Il s'applique aussi, dans une moindre mesure et depuis plus récemment, aux matériaux thermoplastiques.

Le soudage nécessite un apport de chaleur. Toutes les sources d'énergie peuvent être utilisées : Chimique (flammes), lumineuse (laser), électrique ou mécanique.

Mais on peut aussi utiliser l'effet joule, l'induction électromagnétique, l'échauffement par friction, un laser, ... Le chauffage doit être suffisant pour faire fondre les métaux (température du liquidus) :

- Bronze : 900 à 1085 °C (selon la composition) ;
- Acier : 1380 à 1 538 °C (1450 C pour l'AISI 321/X6CrNiTi18-10, 1 400 °C pour l'AISI 316L/X2CrNiMo17-12-2)
- Alliage d'aluminium : 500 à 660 °C
- Alliage de nickel : 940 à 1 660 °C (1 350 °C pour de l'Inconel 625, 1 636 °C pour de l'Inconel 718, ...)
- Alliage de titane : 950 à 1 670 C (1 670 °C pour le TA6V).

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux :

- à l'Âge de bronze, on soudait à la poche
- à l'Âge du fer, on soudait à la forge.

L'exemple le plus ancien consiste en des petites boîtes circulaires en or datant de l'Âge du bronze : le joint est constitué de deux surfaces se recouvrant et assemblées par chauffage et martelage. Il a été estimé que ces boîtes ont été fabriquées il y a plus de 2000 ans. Pendant l'Âge du bronze, les Égyptiens et les peuples de l'est méditerranéen ont appris à assembler par soudage des pièces en fer. Plusieurs outils datant approximativement de 3 000 ans ont été retrouvés

Pendant le Moyen-âge, l'art des chaudronniers et forgerons s'est développé et plusieurs objets en fer ont été produit en utilisant la technique du martelage/soudage. Jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, les procédés de soudage évoluent peu. Vers 1850, on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

- Zone fondue : zone portée à l'état liquide et révélée après attaque d'échantillons de coupes prélevés dans la soudure ;
- Zone affectée thermiquement visible (ZAT) : zones situées des deux côtés de la zone fondue dans lesquels la structure micrographique de l'acier du rail a été modifiée de manière visible par la chaleur du procédé de soudage. Cette modification est mise en évidence par un examen macrographique après attaque chimique;
- Zone thermiquement adoucie : c'est une partie de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) caractérisée par une dureté plus basse

## I.1. Métallurgie et soudabilité :

On désigne par soudabilité l'aptitude des métaux à être assemblés par fusion.

Pour les aciers au carbone et faiblement alliés.

1. Parfaitement soudable: teneur de carbone de  $C = 0$  à  $0,25\%$  ;
2. Moyennement soudable  $C = 0,25$  à  $0,45\%$  ;
3. Soudage avec préchauffage  $C = 0,45$  à  $0,65\%$  ;
4. Soudage difficile sous conditions (préchauffage) indispensable

Pourquoi le préchauffage : Refroidissement rapide donc dureté. Le remède; allonger le temps de refroidissement. Il n'est appelé préchauffage qu'à partir de  $100^\circ\text{C}$  avant c'est un dégourdissement. [1]

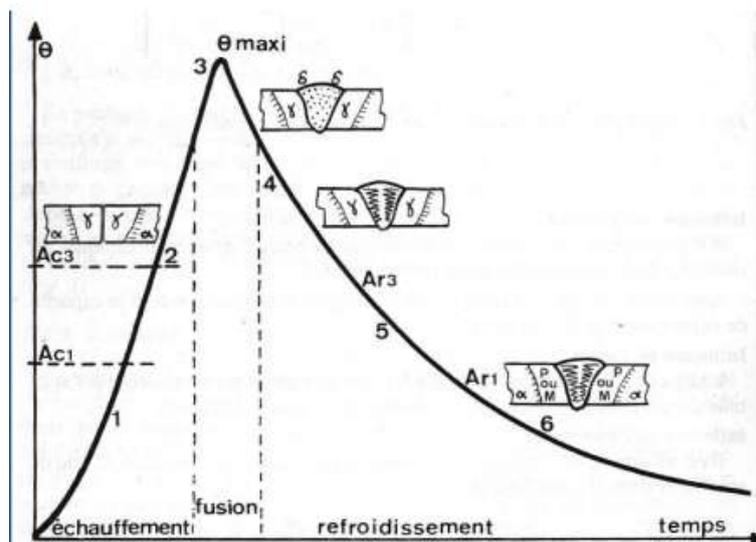


Figure I.1 : Cycle thermique en soudage [2]

- 1 - Dilatation  $Ac_1$  : Détensionnement
- 2 -  $Ac_3$  : Austénitisation (changement de maille)
- 3 - Zone fondue : fusion et dilution du MA et du MB
- 4 - Solidification  $Ar_3$  : formation de dendrites, retrait, contraintes
- 5 - Transformations allotropiques  $Ar_1$ : trempe (martensite), recuit (perlite)
- 6 - Fin de transformation : contraintes résiduelles, déformations, rupture

## I.2. Les procédés de soudage des métaux :

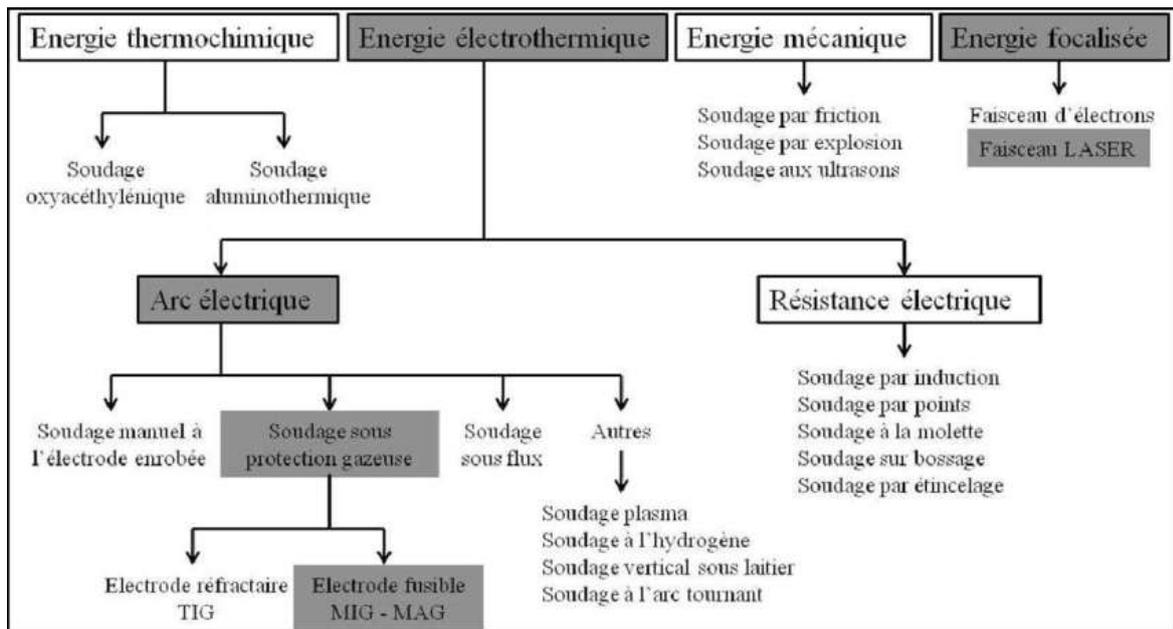


Figure I.2 : Classification des procédés de soudage [3]

Le soudage de métaux est un moyen d'assemblage de pièces de manière permanente. Une technique qui permet la continuité métallique entre les pièces soudées.

Alors les principaux procédés sont [4]

### I.2.1. Le soudage à la poche :

C'est le plus ancien des procédés de soudage. Les pièces à souder sont enfermées dans un moule en céramique et le métal de joint est coulé sur les faces à souder par une perforation dans le moule.

### I.2.2. Le soudage à la forge :

Les bords des pièces à souder sont portés à la température qualifiée de « blanc soudant » (1200 C et plus) estimée à l'œil par le forgeron. Une fois la température requise atteinte, les parties à assembler sont juxtaposées puis martelées. Ce procédé s'apparente au brasage car il n'y a pas à proprement parler de fusion ; ce principe est en partie repris dans le soudage par ultrasons.

### I.2.3. Le soudage à la flamme :

Une flamme est dirigée sur la pièce à souder, le métal d'apport étant apporté dans le bain de fusion sous forme d'une baguette tenue à la main.

### I.2.4. Le soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée :

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par une électrode enrobée fusible et la pièce à souder.

#### **I.2.5. Le soudage à l'arc électrique sous flux pulvérulent :**



**Figure I.3 :** Le soudage à l'arc électrique (générique)

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu ou fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant submergés par un flux pulvérulent.

#### **I.2.6. Le soudage TIG (tungstène inert gaz) :**



**Figure I.4 :** Soudage TIG

Un arc électrique éclate entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder. S'il faut un métal d'apport, celui-ci est apporté dans le bain de fusion à la main (baguette d'apport) ou mécaniquement (bobine de fil d'apport).

#### **I.2.7. Le soudage A-TIG (active tungstène inert gaz) :**

Même procédé que le TIG, à la différence près que les pièces sont revêtues d'un flux qui, au passage de l'arc électrique, provoque un effet constrictif sur l'arc électrique. La concentration d'énergie qui en résulte permet une pénétration plus importante ; pour une

même consommation d'électricité, l'épaisseur soudée est plus importante qu'en TIG traditionnel.

#### **I.2.8. Le soudage plasma :**



**Figure I.5:** Le soudage plasma

Un plasma électrique est maintenu entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder. En cas de besoin d'un métal d'apport, celui-ci est apporté dans le bain de fusion manuellement (baguette d'apport) ou mécaniquement (bobine de fil d'apport).

#### **I.2.9. Le soudage MIG (metal inert gaz) :**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par un un fil-électrode nu qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant environnés d'une atmosphère protectrice chimiquement inerte d'argon ou d'hélium.

#### **I.2.10. Le soudage MAG (metal active gaz) :**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu ou fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant environnés d'une atmosphère protectrice chimiquement active qui peut être du CO<sub>2</sub> ou un mélange argon/CO<sub>2</sub>.

#### **I.2.11. Le Soudage MIG-MAG :**



**Figure I.6 :** Soudage MIG-MAG

Le soudage MIG – MAG est un procédé de soudage semi-automatique. La fusion des métaux est obtenue par l'énergie générée par un arc électrique qui éclate entre un fil électrode fusible et les pièces à assembler. Les acronymes MIG et MAG signifient respectivement *Metal inert gas* et *Metal active gas*. La différence entre les deux tient à la composition du gaz.

Le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu, contrairement au procédé MAG. Le MIG-MAG est utilisé systématiquement lorsqu'on recherche du rendement (soudage en continu) ou de fortes épaisseurs de cordons comme pour les charpentes métalliques.

Le matériel requis est composé généralement d'un poste à souder MIG-MAG avec un dévidoir continu de fil de soudage. Le gaz est conditionné dans des bouteilles reliées à la torche à souder.

#### **I .2.12. Le soudage par effet Joule sous flux protecteur :**

L'effet Joule (échauffement par résistance électrique) est produit entre un fil ou un feuillard qui se dévide mécaniquement dans le bain de fusion formé avec les pièces à souder (ou à revêtir), le bain de fusion étant protégé de l'oxydation par un flux pulvérulent flottant à sa surface. Ce procédé est souvent dénommé « electroslag », ou, si l'on utilise un gaz protecteur inerte, « electrogas ».

#### **I .2.13. Le soudage par résistance :**

Des électrodes non fusibles et refroidies pincent adéquatement deux pièces superposées et conduisent un courant électrique ; la température de fusion est atteinte par effet Joule au droit des pièces à souder et le soudage s'effectue lors du pincement.

#### **I .2.14. Le soudage par étincelage :**

Des étincelles éclatent entre les bords des pièces à souder. Un fois la fusion obtenue, les bords à souder sont vivement rapprochés jusqu'à provoquer l'éjection de la phase liquide et des impuretés éventuelles, puis on maintient l'ensemble sous pression.

#### **I .2.15. Le soudage par faisceau d'électrons :**

Un faisceau d'électrons bombarde les pièces à souder et produit une source de chaleur tridimensionnelle étroite et intense formant un trou ou un tunnel débouchant à travers les matériaux et se déplaçant le long du joint à souder ; la machine et les pièces à assembler sont maintenus dans une enceinte sous vide.

#### **I .2. 16. Le soudage par friction :**

Les bords des pièces à souder sont maintenus pressés l'un contre l'autre et mis en mouvement jusqu'à ce que le frottement provoque la fusion, les pièces sont alors vivement rapprochés et maintenues sous pression.

### **I.2.17. Le soudage par aluminothermie :**

Une réaction exothermique est provoquée au sein d'un mélange approprié d'oxydes métalliques et d'agents réducteurs maintenu entre les bords de pièces à assembler. Une fois la réaction amorcée, le mélange exothermique et les bords des pièces entrent en fusion et forment le joint soudé, contenu généralement dans une coquille réfractaire.

### **I.3. Types de soudures :**

Il existe 3 types de soudures :

- La soudure homogène : les métaux de base ou éventuellement le métal d'apport sont de même nature.
- La soudure hétérogène de type A : association de métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- La soudure hétérogène de type B : les métaux de base et le métal d'apport sont de nature différentes.

### **I.4. Plusieurs problèmes peuvent se poser lors du soudage :**

- Mauvaise fusion du métal, mauvaise pénétration du bain de soudure entre les tôles
- Formation de phases métalliques fragiles lors de la solidification et du refroidissement. provoquant de la fissuration à chaud ou à froid .
- Présence d'inclusions (particules provenant du procédé de soudage) .
- Formation de bulles de gaz, de criques .
- Oxydation du métal, provoquant des amas noirs et irréguliers (rochage)
- En soudage à l'arc, déviation de l'arc par le champ magnétique (soufflage)

Par ailleurs, le chauffage important et le phénomène de retrait à la solidification provoquent des déformations des pièces ainsi que des contraintes résiduelles (tensions internes à la matière).

## **I.5. Domaines d'application du soudage**

Le soudage s'applique à tous les matériaux métalliques et peut être utilisé pour les plastiques.

Ses principaux domaines d'application dans le domaine de l'acier, la mécanique au sens large et la construction, pour lesquels il constitue de loin le moyen d'assemblage le plus répandu.

Dans les ponts métalliques, en France, on utilise le soudage dans 100 % des cas.

À partir d'une certaine épaisseur, il est nécessaire de biseauter le bord des tôles — faire des chanfreins — afin d'avoir une bonne pénétration de la soudure, sinon, on effectue juste un « collage ». Le chanfreinage se fait à la meule ou au chalumeau d'oxycoupage, ou bien avec une machine dédiée (chanfreineuse).

On peut faire plusieurs passes de soudure afin d'avoir un cordon suffisamment épais. Il peut être nécessaire de meuler entre chaque passe afin d'enlever des impuretés.

À haute température, le métal réagit avec l'air, il s'oxyde. Pour éviter cela, on peut projeter une atmosphère protectrice ou bien ajouter un produit qui va former un nuage de vapeur protectrice sous l'effet de la chaleur.

## *Chapitre II*

### *Le soudage aluminothermique des rails*

## II. Introduction

Un rail est une barre d'acier profilée (un produit laminé en acier perlitique (teneur en carbone comprise entre 0,5 et 0,85 %) de dureté HB (Hardness Brinell) variant de 200 à 440). Deux files parallèles de rails mis bout à bout forment une voie ferrée. Ils reposent alors généralement sur des traverses pour conserver un écartement constant. La composition chimique des matériaux pour la confection des rails et leur configuration ont évolué avec l'évolution du chemin de fer à travers les âges.

La figure II.6 présente une vue d'ensemble d'un rail en fonte mis en service au début de l'avènement du transport ferroviaire.



**Figure II.7 :** Rail en fonte posé sur des plots en pierre

### II.1. L'importance du rail

Le chemin de fer ne crée pas la richesse, mais la déplace. On s'accorde à dire qu'il suffit de créer un réseau ferré pour créer la richesse. Il permet un développement économique reposant sur la complémentarité, l'échange et la dépendance réciproquement acceptée. [3]

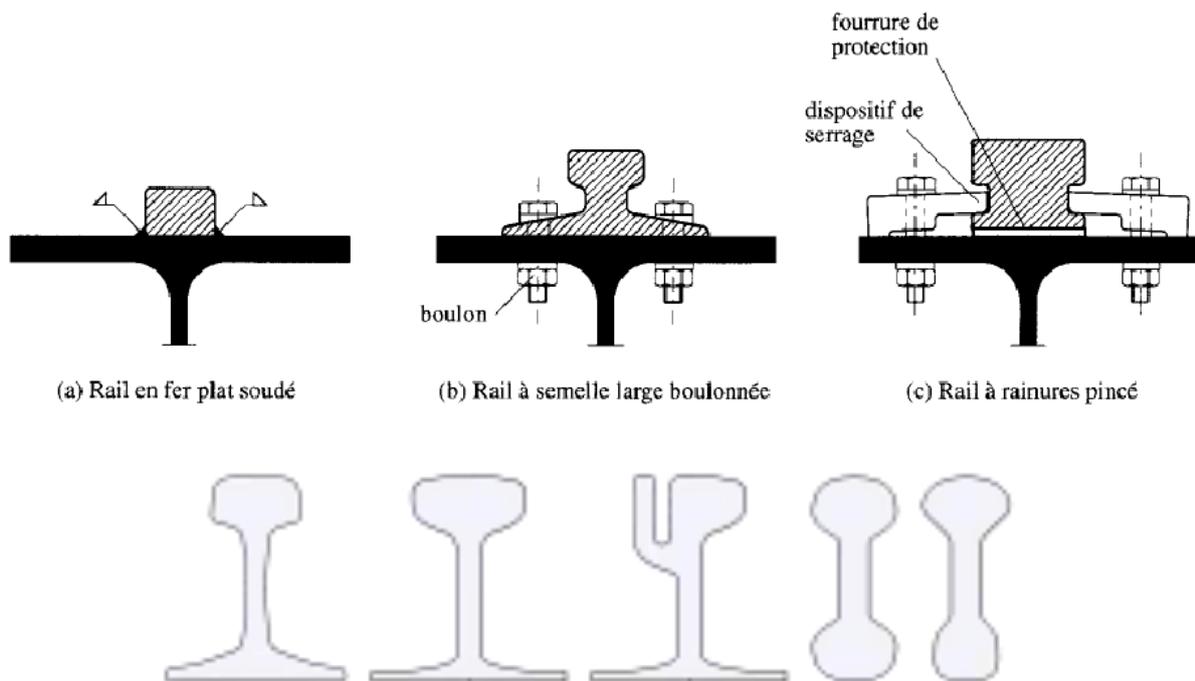
Le secteur ferroviaire a dû évoluer pour s'adapter aux mutations rapides d'un monde de plus en plus interconnecté. Pour survivre et se développer, il lui faut cependant élaborer des stratégies et des initiatives lui permettant d'améliorer ses performances commerciales, dans cette ère nouvelle des technologies intelligentes, l'UNIFE et ses membres s'emploient à « fournir les meilleures technologies pour répondre aux défis de mobilité accrue, à la croissance du volume de transport et à la protection de l'environnement ».

Le rôle économique et social des rails, tout comme celui des chemins de fer, peut être observé très facilement dans le secteur des marchandises .

Le chemin de fer (grâce aux rails) est le seul moyen de transport à pouvoir utiliser l'électricité tous les autres dépendent, et massivement, du pétrole.

## II.2. Les différents types des rails

Rail en fer plat soudé ; rail à semelle large boulonnée ; rail à rainure pincé.



**Figure II.8:** différents types des rails

De gauche à droite : type UIC 60, type Vignole, type Broca ou à gorge, type double champignon symétrique, et asymétrique.



**Figure II.9:** Rail double champignon



**Figure II.10:** Rail à gorge type Broca

Plusieurs méthodes de soudage sont utilisées dans le monde. Gantrail suggère puis utilise celle qui convient le mieux en fonction de l'endroit ainsi que du personnel, des équipements des consommables disponibles. Dans le cas de très grands projets, il faut souvent former du personnel local.

Cependant, les rails sont difficiles à souder, car :

- Ils ont une teneur élevée en carbone pour assurer leur résistance à l'usure.
- Ils ont un équivalent carbone élevé et doivent être soudés en utilisant des techniques spéciales.
- Ils sont considérés comme ayant une section de grande taille peu adaptée au soudage ;

### **II.3. Méthodes de soudage des rails [5]**

Dans l'idéal, les méthodes de soudage nécessitent :

- Dans rails coupés d'équerre (non chanfreinés comme pour le soudage des structures).
- Un préchauffage élevé pour tenir compte de la composition de l'acier.
- Des taux de dépôt de métal élevés.
- Un niveau de défaut acceptable pour la résistance à la fracture de l'acier.

Le soudage à l'arc en coffrage et le soudage aluminothermique remplissent ces critères. Le soudage bout à bout par étincelage ne convient pas à la plupart des rails européens à grande section. Les deux méthodes à l'arc en coffrage et aluminothermique demandent que des opérateurs qualifiés suivent rigoureusement les modes opératoires de soudage ; mais les deux procédés les plus utilisés pour assembler des rails sont la soudure par étincelage et la soudure aluminothermique.

#### **II.3.1. Soudage a l'arc en bain de fusion**

Le soudage à l'arc en coffrage (en bain de fusion) est largement utilisé dans le monde pour souder les rails de grue. Avec cette méthode, les deux extrémités des rails sont découpés d'équerre, placés avec un espace d'environ 20 mm entre eux, préchauffés puis soudés au moyen d'électrodes métalliques manuelles spéciales.

### **II.3.2. Soudage bout à bout par étincelage**

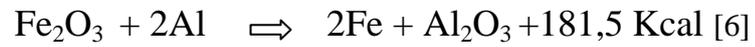
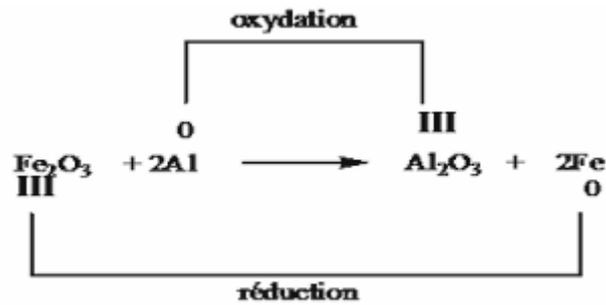
Le soudage bout à bout par étincelage est couramment utilisé pour souder les rails de chemin de fer dans les aciéries avant leur expédition. Il est parfois utilisé pour souder les rails sur site. Il nécessite des milliers d'ampères d'intensité et par conséquent du matériel coûteux. Les extrémités des rails sont chauffées par un courant qui les traverse. Dès qu'elles sont suffisamment chaudes, elles sont forgées ensemble.

Dans ce procédé, la machine à souder aligne les rails, les presse bout à bout et fait passer un courant électrique pour les souder par forgeage. On cisaille ensuite le bourrelet qui se forme lorsque les rails sont pressés l'un contre l'autre et on meule le champignon et le patin du rail. Les caractéristiques géométriques de la soudure sont ensuite vérifiées (à l'aide d'une règle et d'une jauge d'épaisseur). Le procédé comprend aussi un contrôle magnétoscopique de la soudure. La qualité des soudures par étincelage est plus uniforme et le taux de défauts des soudures est inférieur à celui des soudures aluminothermique.

### **II.3.3. Soudage aluminothermique**

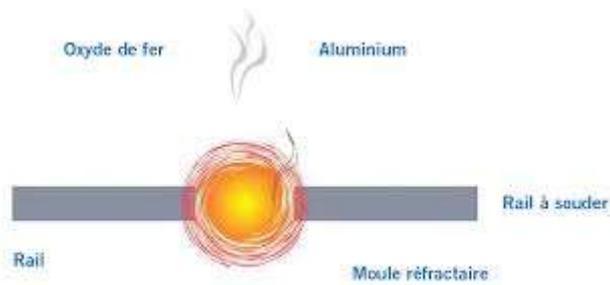
Le soudage aluminothermique est un processus de soudage en vertu duquel un assemblage soudé est réalisé au moyen d'une réaction aluminothermique qui se crée par un mélange chimique de substances poudreuses. Le processus recourt à une réaction exothermique d'une composition de thermite pour chauffer le métal et n'exige aucune source de chaleur ou courant externe. La réaction chimique est une réaction entre une poudre d'aluminium et l'oxyde de fer. Le résultat est que vous obtenez la formation de fer et le produit de déchet oxyde d'aluminium. Le grand avantage d'une soudure aluminothermique est que la contraction est très contrôlable. Si vous coulez une soudure, la contraction thermique se fait toujours de la même manière. Vous obtenez un tassement très prévisible.

La réaction aluminothermique sur une pièce en fer permet le soudage des rails de chemin de fer à partir d'un mélange de poudre d'hématite (oxyde de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et d'aluminium (Al) :



La réaction ne dure que vingt-cinq secondes.

Un autre oxydant utilisé en aluminothermie est l'oxyde de fer noir ou bleu ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la magnétite. La thermite est un type de réaction aluminothermique dans laquelle le métal aluminium est oxydé par l'oxyde d'un autre métal, généralement l'oxyde de fer.



**Figure II.11:** Principe de la soudure aluminothermique[6]



**Figure II.12:** Vue d'une soudure aluminothermique de rail

La figure II.13 présente une soudure aluminothermique d'un rail lors de l'étape de solidification dans le moule. Une soudure aluminothermique bien exécutée avant ébavurage est illustrée par la figure II.4



**Figure II.13:** Une soudure bien exécutée juste après l'ébavurage

Les compositions chimiques des rails et des soudures utilisés sont données dans le tableau :

**Tableau II.1:** Les compositions chimique des rails et des soudures

Ech.	C(%)	Si(%)	Mn(%)	Cr(%)	Al(%)
Soudure	0,73	0,57	0,91	0,2	0,03
Rail	0,735	0,31	1,115	0,03	0,002

### **Influence de la composition chimique du rail :**

Certaines nuances, fortement alliées, peuvent nécessiter un post chauffage résistant, après soudure, afin de diminuer la vitesse de refroidissement, ce qui a l'inconvénient d'élargir la zone affectée par la chaleur (ZAC).

### II .3.3.1. Préparation de la soudure :

Les gabarits utilisés pour le soudage aluminothermique sont réalisés en matériau céramique avec la forme du rail dedans. Ceux-ci sont placés sur le rail et doivent être bien alignés. L'espace entre le gabarit et le rail est rempli de sable ou d'une sorte de pâte pour l'étanchéité. Lorsque le gabarit est en place, le préchauffage peut commencer. Dans le soudage aluminothermique, ce réchauffage se fait par une source externe, à savoir le propane. L'acier doit être échauffé à quelque 700 °C. Comme il est difficile de mesurer la température, on travaille avec des temps d'attente. Après environ 5 minutes, l'acier a atteint la bonne température. [8]

### II .3.3.2. La Composition initiale de la charge aluminothermique :

Le tableau II.2 présente la composition initiale d'une charge aluminothermique.

Désignation de la substance	Concentration (m/m)
Tétraoxyde de trifer (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	50 < X(%) < 70
Aluminium <sup>1</sup>	10 < X(%) < 30
Fer	5 < X(%) < 30
Manganese <sup>1</sup>	0 < X(%) < 4
Carbure de silicium <sup>1</sup>	0 < X(%) < 2
Silice <sup>1</sup>	0,1 < X(%) < 0.5
Cuivre <sup>1</sup>	X(%) ≤ 0,1
Chromium <sup>1</sup>	X(%) < 0,1

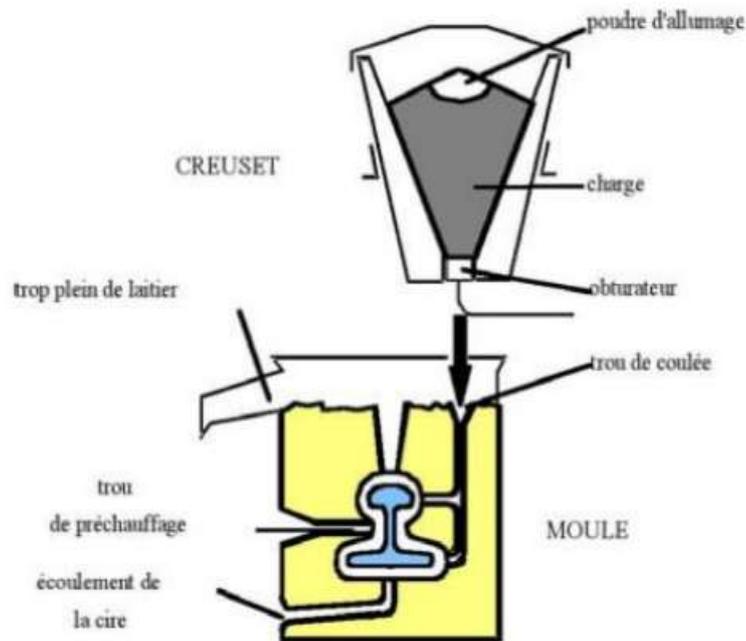
**Tableau II.2:** Composition initiale de la charge aluminothermique [7]

### II.3.3.3 Caractéristiques chimiques spécifiques de la charge aluminothermique

La charge est stable dans les conditions normales, si non exposé à l'humidité. Dans les conditions normales d'utilisation le produit n'est pas explosif.

- Possibilité de réactions dangereuses :
- Réactions dangereuses avec l'eau.

### II.3.3.4. Chronologie d'exécution d'une soudure aluminothermique



**Figure II.14 :** Schéma illustrant le procédé de soudure aluminothermique [6]

Les étapes de réalisation d'une soudure aluminothermique sont les suivantes :

- L'enlèvement du ballast à hauteur du joint ;
- La dépose et repose des fixations nécessaires pour l'exécution de la soudure ;
- La fourniture de tous les matériaux et du moule en fonction du profil et de la dureté du rail .
- La préparation du joint à souder
- La pose du moule
- Le préchauffage du rail
- L'exécution de la coulée
- L'ébavurage de la soudure
- Le meulage de la soudure
- Le nettoyage et le marquage de la soudure
- L'élimination de tous les déchets en dehors du domaine du chemin de fer.

## 1. Réglage du joint :



**Figure II.15:** Réglages du joint

Pendant le réglage du joint, il faut éviter tout choc qui pourrait abimer le rail, les traverses, et/ou les pièces de bois.

En début de chantier, le soudeur doit, par examen des soudures déjà réalisées, contrôler l'exactitude de ses réglages et en déduire éventuellement les corrections nécessaires à la bonne exécution des soudures suivantes.

## 2. Pose du moule :

Le moule doit être centré sur l'axe de la lacune.

Les irrégularités du profil (bavures, restes d'ancien bourrelet, etc.), susceptibles de gêner la mise en place du moule, sont éliminées par meulage.

En cas d'usures différentielles entre les rails à souder, les moules doivent être râpés de manière telle qu'ils soient posés parfaitement à la perpendiculaire. Lorsqu'il existe un trou dans l'âme, celui-ci doit être entièrement situé en dehors du moule.

## 3. Coulée blanche :

Les coulées blanches (fausses coulées) sont utilisées pour le préchauffage du creuset, avant l'exécution de la première soudure de la prestation ou après une longue interruption.

La coulée blanche n'est plus d'application lorsqu'on utilise un procédé de soudure avec creuset jetable.

Les coulées blanches doivent être reçues dans un récipient étanche. Il est interdit de laisser couler le métal sur le sol. Cela peut s'avérer dangereux pour le personnel et pour les câbles enterrés.

#### **4. Préchauffage**

Les paramètres du préchauffage (pression et durée) doivent être scrupuleusement respectés. Ces paramètres dépendent du procédé de soudage.

Le procédé de soudure aluminothermique utilise comme mode de préchauffage un groupe air-essence (PLC) qui procure dans tous les cas un préchauffage particulièrement puissant. Ce procédé utilise des moules préfabriqués luté et un creuset standard (est remplacé par un creuset jetable). Tous les consommables nécessaires à la réalisation d'une soudure sont conditionnés dans un même emballage appelé « kit » ;

Cet appareil fonctionne à l'aide d'un brûleur alimenté par un mélange air-essence sous pressions, de 5 - 8 minutes, à 420 C° ; et le brûleur doit être parfaitement centré vis à vis du joint et du moule et se situer à une hauteur correcte par rapport à la table de roulement du rail.

La ligne de préchauffage (brûleur, tuyaux, détendeurs, manomètres) doit être en parfait état et conforme aux prescriptions établies par Infrabel.

#### **5. La coulée proprement**

Après le préchauffage, le brûleur doit être retiré le plus rapidement possible. Le creuset, qui a été préparé pendant le préchauffage, est placé au-dessus du moule et est allumé avec un allume-charges prévu à cette fin.

La coulée doit avoir lieu dans les 60 secondes après la fin du préchauffage.

Après la coulée, le creuset est retiré. Les creusets ne peuvent jamais être jetés dans de l'eau.

#### **6. Retrait du bac à corindon**

Le bac à corindon ne doit être enlevé qu'après complète solidification de son contenu.

Les corindons ne peuvent jamais être jetés à l'eau.

#### **7. Ebavurage**

L'ébavurage est exécuté obligatoirement à l'aide de l'ébavureuse hydraulique. Cette méthode garantit une meilleure géométrie de la soudure. Les masselottes doivent être éliminées à l'aide d'une meuleuse d'angle.

## 8. Parachèvement de la soudure :

L'adjudicataire est tenu de terminer la soudure réalisée par un meulage de dégrossissage et par un meulage de finition ainsi que par enlèvement des bavures des parties visibles du patin et des parties du champignon non concernées par le roulement.

## 9. Meulage de dégrossissage

Le meulage de dégrossissage doit être réalisé de manière à ne laisser subsister de surépaisseur de métal supérieure à 0,5 mm tant sur le dessus du champignon que sur la face de guidage latérale.

## 10. Meulage de finition

Le meulage de finition consiste à rétablir aussi parfaitement que possible la continuité du profil du champignon selon les règles définies ci-dessous. Le meulage doit être limité à la zone de soudure (30 cm de part et d'autre de la soudure). Le dessus du champignon ainsi que la face latérale doivent être meulés

## 11. Nettoyage de la soudure

Le soudeur doit:

- Eliminer toutes les traces de sable ou de matériaux d'étanchéité ;
- Enlever toutes les bavures (au burin ou à la meule boisseau) ;
- Meuler les diverses aspérités.

Une éclisse spéciale de réparation pour bris de soudure doit pouvoir être appliquée sans difficulté sur la soudure réalisée.



**Figure II.16 : Réalisation** de la soudure aluminothermique

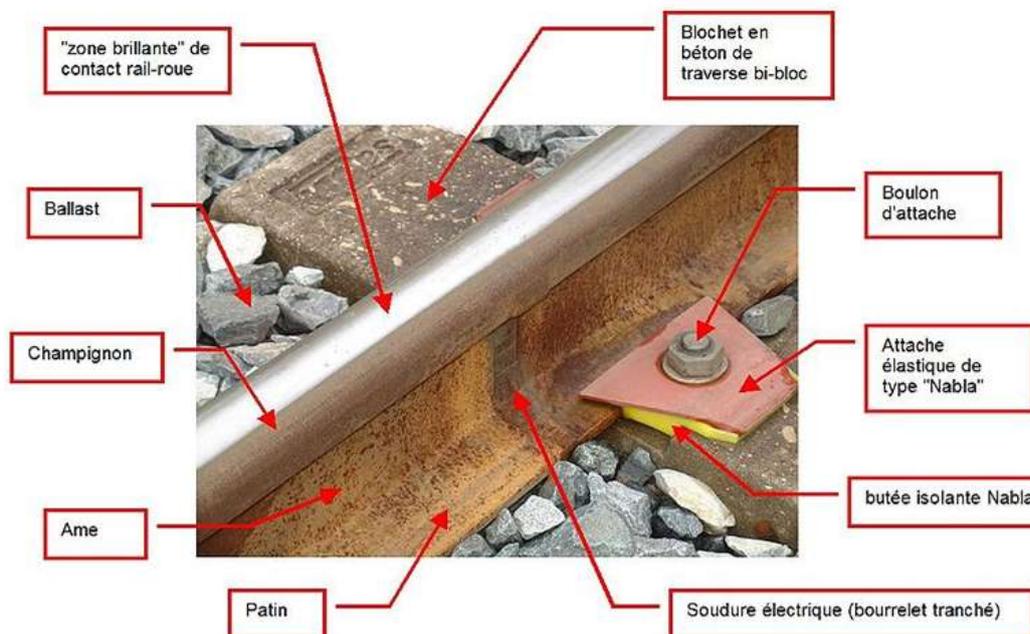
## 12. Marquage de la soudure :

Les soudures réalisées doivent être marquées sur le côté extérieur du champignon par le soudeur responsable de la soudure. Le marquage doit se trouver intégralement sur la soudure de sorte que le marquage disparaisse quand la soudure est retirée de la voie. Lors du marquage, réalisé avec des poinçons de 8 à 10 mm de hauteur, les informations suivantes doivent obligatoirement apparaître dans l'ordre suivant :

- le code du procédé utilisé. Le cahier spécial des charges indique les procédés autorisés et également les codes correspondants.

A titre d'exemple, les codes de quelques procédés :

A PLI	Railtech (plus utilisé)
B SoW5 — Elektro	Thermit
C PLA	Railtech



**Figure II.17:** Partie d'une voie de chemin de fer [6]

Les LRS (Long Rail Soudés) (fig. II.16° constituent des unités élémentaires assez longues qui seront ultérieurement ressoudées entre elles par soudure aluminothermique. (Chaque 18 mètres il y a une

opération de soudure électrique, donc après 12 opérations de soudure électrique “216 mètres“ il y a une soudure aluminothermique.

Cette soudure, pratique et souple, est d’une bonne qualité quoique encore sensiblement inférieure à celle de la soudure électrique, et nécessite un minimum de surveillance en voie.



**Figure II.18:** Soudure aluminothermique (la finition)

### **II.3.3.5. Propriétés de la soudure aluminothermique :**

La soudure aluminothermique permet un assemblage de haute qualité, quasi-inaltérable, exempt de porosité, et très résistant à l’oxydation. Les pièces sont amalgamées de façon totalement homogène. C’est une technique qui permet des soudures particulièrement fiables et pérennes. [9]

De plus, la soudure aluminothermique bénéficie de propriétés générales exceptionnelles, telles que :

- Conductibilité élevée, résistance aux afflux d’intensité et courts-circuits.
- Excellente résistance mécanique.
- Remarquable tenue à l’atmosphère saline.
- La mise en œuvre du processus ne nécessite pas d’énergie autre que celle produite par la réaction chimique elle-même. La réalisation des soudures sur chantier se fait donc en toute autonomie.

- Conditions à éviter :

- La charge peut être initiée à partir de 1200°C.
- Matières incompatibles
- Réaction avec de l’eau, les agents oxydants dégagent de l’hydrogène (H<sub>2</sub>).
- Produit de décomposition danger

- Risque de dégagement de fumées contenant du trioxyde de fer, du manganèse et de l'aluminium durant la soudure. Peut se décomposer à haute température en libérant de l'hydrogène au contact de l'eau.

### **II.3.3.6. La norme de soudure aluminothermique :**

La norme est un document élaboré par consensus au sein d'un organisme de normalisation par sollicitation des représentants de toutes les parties intéressées. Son adoption est précédée d'une enquête publique.

La présente Norme européenne a été adoptée par le CEN le 13 août 2016.

La Norme européenne EN 14730 « Applications ferroviaires-Voie -Soudage des rails par aluminothermie » est composée de deux parties :

- Partie 1 : Approbation des procédés de soudage;
- Partie 2 : Qualification des soudeurs par aluminothermie, agréments des entreprises et réception des soudures.

La présente norme définit la procédure d'approbation pour des procédés de soudage par aluminothermie à l'aide d'essais de laboratoire sur des soudures réalisées en atelier. Cette approbation de laboratoire fournira à l'autorité ferroviaire des informations suffisantes pour des essais en voie, si demandé.

Elle s'applique à l'assemblage de rails Vignole neufs tels que décrits dans l'EN13674-1, de même profil et de même nuance d'acier. [10]

### **II .3.3.7. Procédés aluminothermiques**

Procédés certifiés Railtech [11]

- PLA/PLR - rails ferroviaires
- SRG - rails de tramways
- APR - Rails burbach

### **II .4.3.8. Erreurs et problèmes dans le soudage aluminothermique**

Le processus du soudage aluminothermique semble simple à suivre mais pourtant quelques erreurs ou problèmes fréquents se produisent.

- **Temps d'ébavurage :**

L'une des erreurs les plus délicates possibles dans le soudage exothermique est la mauvaise estimation des temps d'ébavurage. Si l'ébavurage commence trop tôt, vous pouvez vous heurter à de l'acier liquide, ce peut créer des déchirures. Mais si l'on attend trop longtemps, il est possible que l'acier est déjà si dur qu'on ne peut plus le traverser avec la machine.

- **Etanchéité :**

Lorsque les gabarits sont placés autour d'un rail, il reste toujours un peu d'espace entre le gabarit et le rail. Ces espaces sont colmatés avec soit du sable, soit une sorte de pâte spéciale. Le sable doit être bien tassé afin d'optimiser l'étanchéité. Si cela n'est pas le cas, ou si le sable contient des pierres, la soudure échouera. Par exemple, de l'acier liquide peut s'échapper. L'erreur n'est pas toujours l'apanage du soudeur lui-même. Parfois il arrive que le fournisseur du sable ait un problème de qualité (comme les pierres dans le sable).

- **Alignement**

L'alignement des rails est important car les tolérances équivalent à seulement quelques millimètres. C'est pourquoi c'est une affaire de spécialistes. Les rails sont détachés sur quelques traverses et puis remis en place. Puis les gabarits sont déposés par-dessus et le reste de la soudure est effectué. Si l'alignement n'est pas bien exécuté, l'acier liquide risque de s'échapper. Ceci est aussi appelé une coulée.

- **Coulées**

Dans le cas où l'alignement n'est pas bien exécuté ou si les gabarits ne sont pas bien placés, vous avez des coulées. Une belle quantité d'acier liquide veut s'échapper du gabarit. Si cela arrive, il ne vous reste qu'une chose à faire: vous rendre vers un endroit sûr et attendre. Tenter d'éteindre n'aide pas. L'acier liquide peut avoir une mauvaise réaction avec l'eau et cela accroît le risque de brûlures. Dans le cas de coulées, la soudure échoue, ce qui obligera de remplacer la partie complète du rail.

## **II .3.3.8. Contrôle de la soudure Aluminothermique**

### **II.3.3.8.1. Contrôle avant soudage [12]**

Analyse chimique du matériau, mise en évidence de zones d'impuretés dans les zones proches du joint, etc. le soudeur doit aussi vérifier :

- Les kits
- La température ;
- La géométrie du chanfrein s'il existe ;
- Le réglage des moules ;
- La température et l'étendue du préchauffage ;

### **II.3.3.8.2. Contrôle pendant le soudage**

il a surtout pour but de vérifier que les conditions d'exécution sont bien respectées, ainsi que les règles de l'art du soudage.

- La température
- La qualité de l'élimination du laitier
- Différents contrôles visuels

### **II.3.3.8.3. Contrôle Après le soudage**

- **Contrôle destructif**

Utilisé surtout pour des productions en séries, donc assez peu pour nos métiers.

- Macrographies
- Micrographies
- Essais de dureté
- Essais de traction
- Essais de résilience

Il est difficile de savoir si la soudure est bonne ou pas. C'est pourquoi on contrôle de deux manières, à savoir l'inspection visuelle et l'inspection géométrique.

#### **A -Vérification de l'aspect et contrôle visuel superficiel :**

La soudure ne peut pas laisser apparaître des porosités, certainement pas sur la table de roulement, ni sur la surface de bris des pipes verticales, juste au-dessus du patin.

Les pipes verticales doivent être meulées au ras du bossage de la soudure. Il doit être possible de poser un éclissage de renforcement au droit de la soudure. Si cela n'est pas possible, la soudure doit être meulée.

Afin de pouvoir vérifier les points ci-dessus, il ne peut plus y avoir de restes de moule ou du matériel de lutage sur la soudure.

La partie supérieure du champignon et la face latérale traitée en meulage de finition ne doivent pas laisser apparaître de blessures (tranchage, coups de meule intempestifs, fuite de métal,...) et leur longueur ne doit pas dépasser 60 cm.

### **B -Contrôle de la géométrie :**

Le contrôle géométrique porte sur la soudure terminée et meulée.

La qualité du meulage sur la face supérieure ainsi que sur la face latérale intérieure du champignon est vérifiée.

Les tolérances sont mesurées soit à l'aide d'une règle (qui doit être étalonnée annuellement selon la classe 1 de tolérance de planéité DIN 874) de section rectangulaire d'un mètre de long centrée sur l'axe de la soudure et d'un jeu de jauges ; épaisseur, ou soit à l'aide d'une règle électronique de mesure (qui doit également être étalonnée annuellement selon la classe 1 de tolérance de planéité DIN 874) agréée par le maître d'ouvrage.

### **C-Marquage :**

Le marquage de la soudure doit être clairement lisible et doit reprendre dans l'ordre correct les 4 données telles que décrites. Les éventuels zéros en tête doivent également être présents.

Toute soudure incorrectement marquée est refusée.

- **Contrôle non destructifs:** il permet de vérifier la qualité de la soudure sans en la corrompre

### **-Contrôle interne (Contrôle ultrasonores) :**

Santé interne de la soudure : Les soudures destinées à l'inspection par ultrasons doivent être découpées de sorte que le champignon, l'âme et le patin du rail présentant la soudure puissent être examinés par contrôle ultrasonique. Les emplacements de tous les défauts apparents trouvés lors des essais ultrasoniques doivent être enregistrés de façon qu'ils puissent être révélés par une coupe. Les coupes qui doivent se trouver à au moins 5 mm de tous les défauts apparents localisés par la méthode d'essais par ultrasons spécifiée. Pour chaque défaut, la taille doit être déterminée par meulage ou usinage progressif et par des mesures jusqu'à ce que la dimension maximale soit trouvée.

Toute soudure aluminothermique peut être contrôlée aux ultrasons dans la zone du champignon, de l'âme et du patin.

Contrôle ultrasonore d'une soudure au droit du champignon du rail l'auscultation se fait à l'aide d'un palpeur 70° et est réalisée à l'occasion du contrôle ultrasonore périodique du tronçon dans lequel la soudure se situe.

On émet des ultrasons sous un certain angle par rapport à la pièce, perméable aux ultrasons, et on recueille l'onde réfléchi. Si la pièce n'a aucun défaut les ultrasons vont se réfléchir à la face inférieure de cette dernière. Sinon ils vont se réfléchir sur le défaut en question et on recueillera deux ondes réfléchies: l'une sur le défaut, l'autre sur la face inférieure de la pièce. L'analyse de ces signaux permettra de situer les défauts. Cette technique permet de déceler les fissures et les défauts de collage.[ 12]

Pour étalonner l'appareil ultrason, un rail étalon avec trou de diamètre 1,5 mm foré transversalement dans le champignon à une profondeur de 20 mm par rapport à la table de roulement est utilisé. On calibre ensuite l'appareil de manière à ce que l'amplitude maximale de l'écho atteigne 50% de la hauteur d'écran si le contrôle ultrason décèle dans la soudure un défaut dont l'amplitude de l'écho provoqué dépasse 50% de l'écran, la soudure est refusée.

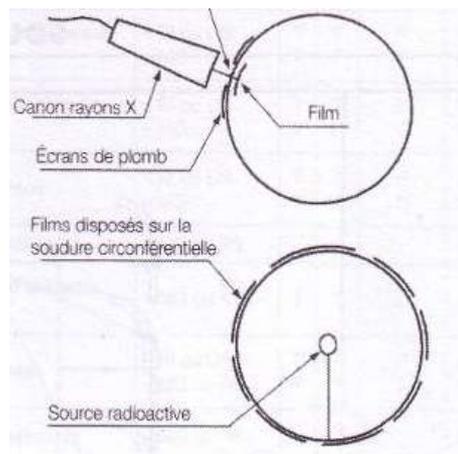
Le contrôle manuel par ultrasons qui se limitait à la partie meulée de la soudure. Le contrôle, tel qu'il était effectué, permettait de détecter des défauts dans le champignon et l'âme du rail mais n'aurait pas permis de détecter la préfissure dans le patin. le CN a plutôt mis un terme à tout contrôle par ultrasons des soudures aluminothermiques. Le contrôle des soudures par étincelage est par contre toujours requis, bien que leur qualité soit plus uniforme et que leur taux de défauts soit plus faible.

L'introduction des creusets jetables a réduit les risques de porosité. Cependant, la multiplicité des étapes pour réaliser une soudure aluminothermique et certaines étapes critiques, particulièrement à l'étape de la préparation et de l'alignement des rails et lors du préchauffage, demeurent des faiblesses de ce procédé et peuvent encore être des sources d'erreurs.

## -Contrôle radiographique

Dans le contrôle non destructif par radiographie, l'intensité de la radiation transmise peut être détectée sur un film radiographique. Ce film est interprété pour détecter d'éventuelles discontinuités dans la soudure. Il y a divers types de défauts de soudure tels que les porosités, les inclusions, les fissures, le manque de pénétration, le manque de fusion etc. On examine notamment la présence de déchirures ou de porosité, si tout est propre et si l'alignement et la hauteur sont corrects.<sup>5</sup>

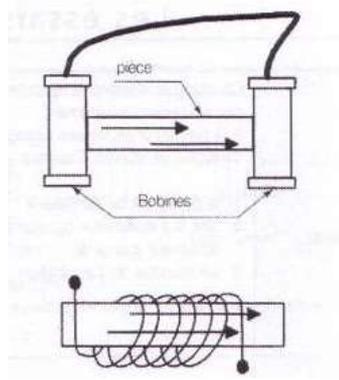
La pièce à contrôler est soumise à un rayonnement X ou  $\gamma$ . En plaçant un film derrière la pièce, celui-ci va être impressionné par les rayonnements traversant. Toutefois l'intensité de celui-ci va différer au droit des défauts. Cela se traduira par une tache plus sombre ou plus claire que la teinte générale du film. Cette technique demande un matériel lourd et présente des risques potentiels pour le personnel.[12]



**Figure II.19:** Soudure contrôlée par un film et source radioactive

### Autres méthodes de contrôle non destructif :

**-Contrôle magnétique (magnétoscopie):** On crée un champ magnétique perpendiculaire au défaut probable. Si la pièce est homogène et que sa perméabilité magnétique est constante, une poudre magnétique déposée à sa surface va se répandre uniformément. Au contraire, à l'endroit d'un défaut, il y a apparition d'un flux de fuite mis en évidence par une concentration de poudre magnétique à cet endroit. Ce phénomène se produit que le défaut débouche ou non en surface.[12]



**Figure II.20:** Une bobine d'induction créant un courant de Foucault

#### **-Ressuage:**

Cette méthode permet de mettre en évidence les défauts débouchant en surface. La surface est nettoyée, puis enduite d'un produit pénétrant, et enfin parfaitement essuyée pour enlever l'excès de liquide. Une mince couche de talc est répandue sur la surface à contrôler laissant apparaître des traces rouges au droit des défauts.

#### **-Fluorescence:**

Même principe que pour la méthode de ressuage; toutefois la composition du liquide est différente. Le talc est remplacé par un renforçateur. La surface éclairée par une lumière ultraviolette fait apparaître des traces jaunes sur fond très noir au droit des défauts.

La fluorescence s'effectue dans les mêmes conditions que le ressuage.

Le talc est remplacé par un renforçateur à base de silice

#### **II.3.3.9 .Durée de vie de la soudure :**

La durée de vie de la soudure est normalement aussi longue que la durée de vie d'un rail de train. En Belgique, en moyenne 25 ans mais cela dépend aussi de la fréquence d'utilisation des lignes ferroviaires où se trouvent les rails. Si le trafic journalier est important, comme sur la ligne ferroviaire entre Bruxelles et Anvers, il se peut que le rail ne dure que 15 ans. Mais sur certaines lignes ferroviaires peu fréquentées, on utilise encore des rails datant des années 70. [13]

### **II.3.3.10. Défauts de la soudure :**

- **Défaut de surface :**

Tout défaut visible sur la surface de la soudure après les opérations de finition classiques ;

- **Défaut interne :**

Tout défaut révélé par une coupe, ou sur le faciès d'une rupture après des essais de flexion ou des essais de fatigue, qui n'a pas déjà été identifié comme un défaut de surface blêmes. [14]

- **Les contraintes dans le rail :**

Elles se développent au niveau du joint durant le refroidissement.

Elles sont occasionnées par la dilatation localisée du métal due aux différences de température d'un point à autre ;

Les contraintes longitudinales dans le rail proviennent principalement des sources suivantes :

- Charge statique — poids des wagons (tare et chargement)
- Surcharge dynamique verticale générée par les charges d'impact sur les roues
- Forces de freinage et d'accélération
- Contraintes thermiques dues aux variations de température
- Contraintes résiduelles résultant de la fabrication ou du soudage du rail

Elles dépendent :

- Des propriétés mécaniques du rail et de et du métal fondu.
- De la forme du joint.
- Des séquences de soudage.
- Du poids des pièces.

Les contraintes thermiques et les contraintes résiduelles qui existent à l'intérieur d'un rail sont en général très difficiles à déterminer avec exactitude. Elles sont mesurées par des méthodes de libération des contraintes qui consistent d'abord à instrumenter une section de rail, couper ou percer le rail, puis mesurer les déformations qu'il subit lors de la coupure. Les contraintes internes se libèrent et disparaissent, mais en mesurant les déformations que la section subit lors de la coupure ou du perçage du rail, on obtient une indication sur le niveau des contraintes qui y existaient. Dans le cas à l'étude, on ne peut qu'estimer théoriquement les contraintes au droit de la soudure et immédiatement dans la zone affectée thermiquement

puisque la défaillance du rail a « libéré » les contraintes; elles sont donc impossibles à mesurer.[19]

Au niveau du patin du rail, la charge de roue et la température provoquent des contraintes de traction dont l'effet est neutralisé par la compression due aux contraintes résiduelles de soudage.( le soudage aluminothermique génère des contraintes résiduelles de traction sur l'âme du rail et de la compression sur le champignon et le patin)

- **Fissuration à froid :**

Elle peut apparaître instantanément et se forme à basse température inférieure et peut également apparaître plusieurs jours après soudage. Elle se rencontre dans la zone affectée thermiquement et plus rarement dans la zone fondue. Elle est très fine , c'est pourquoi elle est redoutée.

Origine de la fissure a froid :

- Présence d'une soudure peu ductile (trempe) ;
- Présence de contraintes ;
- La présence de martensite est liée à la trempabilité du métal. Teneur en carbone du métal déposé :  $\geq 0.25$  % ... Cycle de refroidissement rapide.
- Energie nominale faible ;

Cette fissuration se concentre dans la Z.A.T. et peut être attribuée à trois raisons principales :

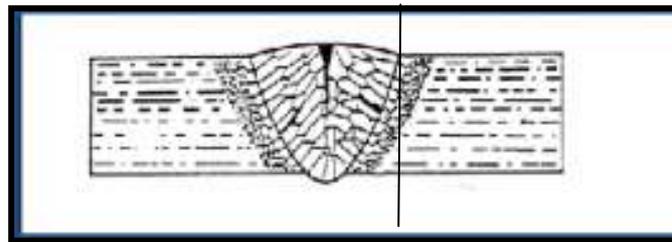
- La présence dans la Z.A.T. d'hydrogène introduit par diffusion à partir du métal d'apport,
- l'existence de contraintes résiduelles ou externes au joint soudé,(La présence : de calamine, d'oxyde, de graisse, d'eau à la surface des rails à souder est une source importante d'hydrogène, et aussi sa solubilité de dans le fer décroît avec la température. Donc l'hydrogène ne se dissout que lorsqu'il y a fusion ensuite il se diffuse.
- la présence dans la Z.A.T. de microstructures susceptibles de fissurer sous l'influence conjuguée des deux facteurs précédents.

- **Fissuration à chaud ;**

Elle se forme à très haute température lors du refroidissement du bain de fusion. La solidification de la soudure se fait par la formation de cristaux partant de la zone de liaison vers le centre et la surface de la soudure (Ces fissures apparaissent tant dans la zone fondue que dans la zone affectée thermiquement et se forment dans le sens longitudinal ou transversal

des soudures). Durant cette solidification des contractions importantes tendent à séparer les cristaux (contraintes de retrait).

La fissuration à chaud elle est due à des phénomènes de micro-ségrégations aux joints de grains créant des zones à bas points de fusion couplées aux contraintes issues des déformations thermiques. Elles sont le résultat de films liquides présents aux joints de grains, notamment en présence de soufre ou de phosphore qui forment des eutectiques à bas points de fusions. Les fissures sont alors intergranulaires.



**Figure II.21:** Fissuration à chaud

Pour éviter la fissuration a chaud en prenant en compte les paramètres cités précédemment ; un préchauffage homogène des pièces diminue les contraintes.

- **La porosité :**

Ce sont des petites bulles de gaz qui n'ont pu se dégager lorsque le bain de fusion était liquide (Flocons).

Leur origine :

Dégagement : D'hydrogène ; d'azote ; De CO ; de gaz sulfureux  $SO_2$  ;

Pour éviter la porosité : Souder sur des pièces propres : Non humides, exemptes de rouille, non grasses, exemptes de calamine ;

-Utiliser une énergie de soudage moyenne : parce que ; énergie trop forte = la quantité de gaz augmente très rapidement.

- **Corrosion inter granulaire :**

Cette corrosion de ségrégation est principalement observable dans le cas des aciers inoxydables austénitiques. Il y a sensibilisation du matériau après des cycles thermiques issus de la fonderie, du traitement thermique ou du soudage. La précipitation aux joints de grains de composés appauvrit, dans les régions adjacentes, la teneur en éléments d'alliage garante du comportement anticorrosifs. La corrosion se localise préférentiellement aux joints de grains, pouvant conduire à la ruine du métal sans perte de masse décelable [Met 3]. Ce risque de

corrosion intergranulaire apparaît, pour les aciers inoxydables, quand le métal a subi un traitement thermique de sensibilisation (entre 500 et 800°C) et qu'il est mis dans un milieu corrosif (solutions sulfuriques, nitriques...). Le traitement de sensibilisation fait précipiter les carbures de chrome Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> aux joints de grains, entraînant un appauvrissement local de la matrice qui conduit à une dépassivation de ces zones (cf. Figure 2). Ces dernières deviennent alors réactives au contact des milieux corrosifs.

- **Fatigue :**

La fatigue est peu affectée par les procédés de soudage à partir du moment où aucune porosité ni défaut (crique, caniveau, morsure). Ainsi, les soudures réalisées gardent de bonnes propriétés de résistance en fatigue du métal de base et améliorent la résistance à la propagation des fissures. La rupture a généralement lieu hors de la zone soudée.

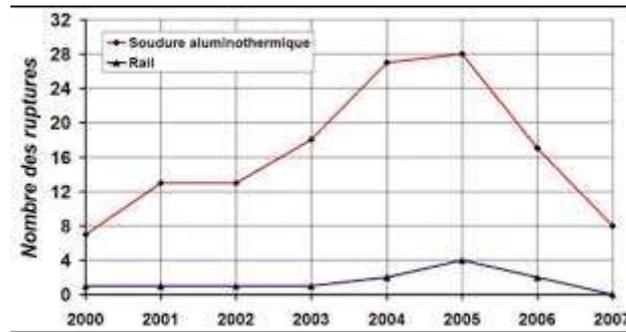
- **Rectitude du joint soudé :**

Il convient d'abord de veiller à ce que les sections au contact des rails à souder présentent des patins parfaitement coïncidents, en particulier en leurs extrémités : si cette condition n'est pas remplie, il en résulte un décalage où va s'introduire une contrainte localisée, qui donnera ultérieurement lieu à fissure et rupture du patin avec propagation au rail.

En outre, l'expérience montre que, si on désire obtenir une table de roulement parfaitement linéaire après les opérations de finissage, il convient que les sections des rails au contact soient en léger « pic ». Les machines sont en général dotées d'un dispositif de positionnement automatique assurant la légère élévation des deux rails ;

- **Rupture de la soudure aluminothermique :**

Les surfaces de rupture, sont compatibles avec une rupture rapide par contrainte excessive. Leur direction indique que la rupture a pris son origine dans la zone de pré-fissure située au niveau du coin inférieur du patin du rail. Une fois amorcée, la rupture s'est produite rapidement, la partie champignon étant la dernière à se rompre. La pré-fissure ne portait aucune trace de croissance récente. Elle n'était pas très foncée, ce que l'on associe habituellement à l'oxydation à haute température, ce qui signifie qu'elle s'est formée après la fabrication de la soudure et s'est vraisemblablement amorcée par suite de contraintes résiduelles créées lors du soudage. L'épaisseur de la couche d'oxyde indique qu'elle existait depuis au moins neuf mois.



**Figure II.22:**Fréquence de ruptures des soudures aluminothermiques

On constate que la soudure aluminothermique croit le nombre des ruptures dans le rail.

Un calcul de la mécanique de la rupture effectué à partir des résultats des essais de résilience et des essais de traction a permis d'établir qu'à la température ambiante qui prévalait au moment de l'accident, la préfissure avait effectivement entraîné une réduction de la résistance du rail à environ 33 p. 100 de la limite d'élasticité initiale. Le désalignement des abouts de rail et l'utilisation d'une plaque d'assise droite ont créé un effet d'entaille favorable à la naissance et à la propagation des fissures. Une plaque d'assise chanfreinée aurait permis une transition plus graduelle entre les deux rails et aurait réduit cet effet.



**Figure II.23:** Rupture des rails

Comme peu de dommages dus au martèlement des roues ont été relevés sur les surfaces de rupture de la soudure, on peut en déduire que la rupture était très récente et que la partie champignon de la soudure s'était détachée peu de temps avant le déraillement. Selon toute vraisemblance, le 15<sup>e</sup> wagon a déraillé lorsque la partie champignon du rail s'est détachée. Les roues du wagon sont ainsi tombées sur la plate-forme vers le côté sud. Les wagons déraillés ont alors obstrué la voie adjacente et ont été percutés par le train 306. Les deux membres de l'équipe du train 306 ont été mortellement blessés lors de la déflagration qui a eu lieu au moment où la locomotive de tête a percuté le 15<sup>e</sup> wagon du train 783.[14]

### **II.3.3.11. Effets des défauts de soudure aluminothermique sur le comportement mécanique des rails :**



**Figure II.24:** Défauts de soudure

Selon les observations, ces défauts peuvent être classés en deux types : défauts d'adhésion (ou défauts de collage) et défauts de porosité (ou défauts de soufflures multiples). Chacun de ces défauts, peut constituer un site privilégié de concentration des contraintes. Selon le niveau de ces contraintes, des éventuels processus d'endommagement risquent de se développer et mettant le rail hors service. [10]

### **II.3.3.12. Assurance de la qualité :**

Comme seules les soudures réalisées par les équipes de production sont contrôlées par des inspections indépendantes, il est fort probable que la soudure a été réalisée par une équipe de zone car les déficiences sont plus susceptibles de rester cachées lorsqu'il n'y a pas de contrôle de la qualité.

Toutefois, comme les soudures sont des éléments critiques dans l'infrastructure ferroviaire, un contrôle de la qualité par du personnel indépendant est primordial pour que des conditions dangereuses ou des méthodes de travail inappropriées soient identifiées rapidement et corrigées.

Même si le règlement n'exigeait pas un contrôle pour déceler les défauts internes des soudures aluminothermiques, le CN auscultait manuellement aux ultrasons la surface meulée des soudures peu de temps après le soudage. Cette mesure de sécurité supplémentaire était unique dans l'industrie et n'était pas appliquée par d'autres compagnies ferroviaires d'Amérique du Nord.

Le soudage aluminothermique est un processus susceptible d'être affecté par des erreurs humaines, car l'exécution d'une soudure requiert 13 opérations distinctes qui doivent

être réalisées dans un ordre précis par des soudeurs bien formés. De plus, les méthodes d'auscultation automatique ne permettent pas de détecter les défauts situés à la base de la soudure, et la probabilité de détecter les fissures au moment où elles émergent dans l'âme du rail est relativement minime car, une fois amorcées, les fissures de ce type se propagent rapidement. À défaut d'un contrôle par ultrasons de tout le pourtour des soudures, et d'un contrôle de la qualité effectué par un personnel indépendant, il est impossible d'identifier les matériaux ou les méthodes de travail non appropriés qui peuvent occasionner des défauts des soudures en voie.

### **II.3.3.13. Evaluation de la qualité de soudure :**

La conservation d'une bonne ductilité est garante de la qualité des assemblages réalisés. La couleur de la soudure peut aussi être utilisée comme indicateur de la qualité de la protection (elle caractérise le degré d'oxydation de la surface) :

Couleur de la soudure	Origine et traitement
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jaune paille clair</li> <li>-Jaune paille foncé</li> <li>-Bleu clair</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxydation de surface ;</li> <li>- Eliminer par un brossage avec une brosse métallique neuve à fil inox.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bleu foncé</li> <li>- Gris bleu</li> <li>-Gris</li> <li>- Blanc</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contamination du métal. La soudure doit être entièrement éliminée et refaite.</li> </ul>

**Tableau II :** Critère visuel d'oxydation

### **II.3.3.14. Autres nuances d'aciers pour la soudure aluminothermique :**

La dureté de la ligne centrale des soudures pour les nuances alliées avec du chrome et pour celles traitées thermiquement est établie en dessous des valeurs de la dureté de la surface de roulement du rail afin d'assurer une structure entièrement perlitique. Le profil de dureté des soudures le long de la ligne centrale du champignon du rail varie selon l'alliage, les soudures plus alliées présentant une dureté relativement plus élevée aux bords de la soudure. Par conséquent, pour parvenir à une dureté moyenne correcte, une dureté de la ligne centrale de la soudure plus basse est exigée.

Indépendamment des problèmes importants liés à la qualité du métal, dont nous parlerons plus loin, le choix de la nuance d'acier est évidemment primordial. Pour l'essentiel, on distingue la nuance dite courante, dont la résistance à la traction, est comprise entre 70 et 85 kg/mm<sup>2</sup>, et la nuance dite naturellement dure, dont la résistance à la traction est comprise entre 90 et 100 kg/mm<sup>2</sup>. [16]

Les aciers inoxydables austénitiques sont facilement soudables et ne présentent pas, en principe, de fragilisation de la Z.A.T. Il peut cependant apparaître une sensibilisation à la corrosion intergranulaire à laquelle on peut remédier grâce à :

- Un choix de traitements thermiques : on évite le domaine critique par hypertrempe (notons que l'on peut désensibiliser le métal par régénération en réchauffant au-delà de 1000°C suivi d'un refroidissement rapide) ;
- Une utilisation de nuances à bas carbone (teneurs voisines de 0.03%), la précipitation des carbures devient négligeable ;
- l'utilisation des nuances stabilisées au titane ou niobium, éléments fortement carburigènes qui évitent la formation de Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.

### **II.3.3.15. Quelques solutions pour réduire les défauts**

Pour prévenir cela on peut alors

- Limiter la teneur en carbone entre 0,15 et 0,20%
- Préchauffer les pièces à assembler (250-300°C) et réchauffer l'assemblage après soudage (300-400°C) afin de réduire l'écart de température entre le métal de base et la zone fondue.

- Faire un traitement complet trempe et revenu (ou un simple revenu de relaxation vers 650-750°C),
- Assurer une bonne protection contre la diffusion de l'hydrogène.
- Il est important comprendre les rôles particulièrement critiques que jouent la zone fondue et les zones affectées thermiquement (Z.A.T.) dans le cadre de réalisations soudées. Ces zones vont être les sources de défauts auxquels il va falloir remédier. Nous nous bornerons ici à rappeler rapidement leurs origines et nous limiterons à des problèmes courants pour les aciers inoxydables.
- En choisissant bien la forme des pièces à souder et la position du joint de soudure ; pour réduire les contraintes résiduelles, on peut effectuer un traitement thermique après soudage : un chauffage modéré suivi d'un refroidissement lent (traitement de recuit).
- Les aciers oxydables présentent finalement peu de problèmes de soudabilité.

Il en déduit que les facteurs influant la soudabilité sont bien sûr le taux de soufre mais aussi celui du phosphore et de l'aluminium [1]

## CONCLUSION GENERALE

L'application du soudage aluminothermique a pour but d'assurer la continuité des rails à assembler, grâce à la continuité qui est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. L'apparition d'une phase liquide suite à une réaction de l'oxyde par l'aluminium, conduit à une soudure des deux bouts de rails. Le respect des différentes étapes de la procédure, assure une soudure de qualité qui est en mesure de durer de nombreuses années.

Le choix de ce procédé de soudage et des paramètres adéquats vise à éviter tous les problèmes pour garantir une soudure la plus résistante possible. L'utilisation de moules réfractaires et l'application du préchauffage des matériaux permet l'assemblage, avec succès, de tous types de rails : Vignoles, rails à gorge, appareils de voie, burbach

Il est nécessaire et de la plus haute importance de vérifier la santé des soudures grâce à des techniques non destructives tels que le contrôle ultrasonique et autres.

Le soudage aluminothermique permet l'installation, en continu, de longs rails soudés tout en étant associé à de nombreux avantages : réduction des défaillances dues aux trous de boulons, réduction de l'usure des équipements, diminution des coûts de maintenance des voies, augmentation de la durée de vie des rails, fiabilisation des circuits de voies et amélioration de la qualité de roulement.

Les avantages de la soudure aluminothermique par rapport aux autres méthodes :

Ce technique de soudage ne nécessite aucun apport d'énergie autre énergie par rapport aux autres méthodes et peut donc s'appliquer facilement sur place et permet également de souder ou réparer rapidement des pièces lourdes.

- Ce procédé présente l'avantage d'éliminer les traditionnels joints de rails et les claquements sonores à chaque passage du tram
- Totalement autonome et inaltérable par la corrosion.
- Excellente conductivité contribue à réduire la résistance de terre.
- Caractéristiques mécaniques optimales.

La compréhension et la maîtrise des paramètres du soudage aluminothermique, qui bien que c'est un procédé connu, le rendent incontournable quand il s'agit de l'assemblage des rails, et surtout adaptable au soudage des grosses pièces en aciers au carbone et en aciers spéciaux tels que les aciers inoxydables par exemple.

## Références bibliographiques:

### -Mémoire et thèse :

[16] Laboratoire de Contrôle et de Caractérisation Mécanique des Matériaux et des Structures (LCCMMS), Département de Génie Mécanique, École Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM), Université Hassan II Casablanca, BP 8 118, Oasis, Route d'El Jadida, Casablanca, Maroc.

[3] Mémoire de magister-électronique-Nafaa Nacereddine Université M'hamed Bougara de Boumerdès

### -Site :

[4] [www .Métallurgie du soudage dossier professeur.pdf](#)

[5] [www .Article soudé des rails-dobbi.](#)

[6] [www .L'Expo permanente : Tous les produits-services et équipements industriels ;](#)

[7] [www .techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-soudage-42512210](#)

[8] [www.mediarail.be/Infrastructure/Voie/Intro.htm](#)

[9] [www.dobbit.be/fr/dossier/EMTbe1915W00\\_00?kw=](#)

[10] [www .soudeurs-conseils-de-soudage-pour-les-rails-vignoles-et-les-rails-gorge-par-voestalpine-schienen-gmbh](#)

[9] [www .gantrail/fr/installation-complete/procedes-de-soudage-des-rails/](#)

[2] [www . maltep-la-soudure-aluminothermique](#)

[11] [www .wikibooks.org/wiki/procédés de Soudages](#)

[14] [www .Rapport d'enquête ferroviaire R99H0010](#)

[8] [Www .Scholar google-mechanics-industry.org/articles](#)

[5] [www.Soudage - Conception d'un assemblage soudé](#)

[10] [www.|norminfo.afnor.org/norme/105736](#)

[1] [Www. Metallurgical-research.org-articles-metal.html](#)

[12] [notech.franceserv./soudure-controle.html](#)

[7] [Www.lavoixdunord.fr/art/region/la-soudure-aluminothermique-des-rails-un-veritable-jna27b0n819507](#)

[3] [www.Accessoires-protection-foudre/SOUDURE-ALUMINOTHERMIQUE-PAR-DOC-29-A.pdf](http://www.Accessoires-protection-foudre/SOUDURE-ALUMINOTHERMIQUE-PAR-DOC-29-A.pdf)

[6] Soudures aluminothermiques de rails [document de l'Infrafer] p:02 et p : 08