

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Réf:.....

*Mémoire de fin d'Etudes*

*En vue de l'obtention du diplôme :*

**MASTER**

Spécialité : Génie des Matériaux

***Thème***

**Le long rail soudé - Procédés de soudage et effets de la température ambiante sur son comportement**

Présenté par : BEN CHEIKH Abdelhafid

Devant le jury :

Président	M. RAOUACHE Elhadj	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj
Examinatrice	Mme. MECHTA Ahlem	MCB	Université de Bordj Bou Arreridj
Promoteur	M. CHIKH Nouredine	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2022/2023

## Résumé

Le long rail soudé (ou LRS) consiste à assurer la continuité de la voie en supprimant les joints de rails sur des longueurs importantes. L'effet de la température peut créer des contraintes et des déformations dans le rail et peut provoquer des désagréments pour les exploitants de la voie.

Une partie de ce travail porte sur la compréhension des aspects théoriques et pratiques du soudage des rails, en général, et par aluminothermie. La seconde partie est consacrée à l'étude du comportement mécanique du rail sous l'effet de l'élévation de la température. Afin d'étudier et d'analyser son comportement, mathématiquement et numériquement, un calcul numérique a été effectué à l'aide du programme ABAQUS et ANSYS, en utilisant la modélisation par éléments finis. Le but de ce travail est de déterminer les contraintes, déformations (ou dilatations). Les résultats numériques sont comparés à ceux théoriques.

**Mots clés :** Rails soudés, Aluminothermie, dilatation, flambage thermique.

## ملخص

سكة القطار الملحومة المستمرة (CWR) تعمل على ضمان استمرارية المسار عن طريق القضاء على الفراغات بين القضبان على طول مسافات طويلة. تأثير درجة الحرارة يمكن أن يؤدي إلى إحداث توتر وتشوهات في السكة، مما يمكن أن يسبب إشكالات لمستخدمي المسار. جزء من هذا العمل يركز على فهم الجوانب النظرية والعملية للحمام السككي بشكل عام، وحمام الألومنيوم بالحرارة بشكل خاص. الجزء الثاني مخصص لدراسة السلوك الميكانيكي للسكة تحت تأثير ارتفاع درجة الحرارة. من أجل دراسة وتحليل سلوكها رياضياً وعددياً، تمت إجراء حساب عددي باستخدام برنامج ABAQUS و كذا ANSYS باستخدام نمذجة العناصر المحددة. الهدف من هذا العمل هو تحديد التوترات والتشوهات (أو التمدد). ومن ثم مقارنة النتائج العددية بالنتائج النظرية.

**كلمات مفتاحية:** السكك الملحومة، لحم الألومنيوم بالحرارة، التمدد، الانحراف الحراري.

## Abstract

The continuous welded rail (CWR) consists of ensuring the continuity of the track by eliminating rail joints over significant lengths. The effect of temperature can create stress and deformations in the rail, potentially causing inconveniences for track operators.

Part of this work focuses on understanding the theoretical and practical aspects of rail welding in general, and thermite welding in particular. The second part is dedicated to the study of the mechanical behavior of the rail under the influence of temperature elevation. To study and analyze its behavior mathematically and numerically, a numerical calculation was performed using the ABAQUS and ANSYS softwares, employing finite element modeling. The aim of this work is to determine the stresses, deformations (or expansions). The numerical results are compared to theoretical ones.

**Keywords:** Welded Rails, Thermite Welding, Expansion, Thermal Buckling.

# REMERCIEMENTS

Tout d'abord Je remercie Dieu de m'avoir donné le courage, le moral et la santé pour mener à terme ce projet.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur Monsieur CHIKH Noureddine qui m'a apporté une aide précieuse. Je lui exprime ma gratitude pour son compréhension et les encouragements qu'il m'a apporté.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury pour leur présence, pour leur lecture attentive de ma thèse ainsi que pour les remarques qu'ils m'adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer mon travail.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

# DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ A mes très chers parents qui m'ont aidé et beaucoup encouragé durant toutes les années d'études.
- ❖ A mon promoteur et aux membres du jury.
- ❖ A mes sœurs et mes frères.
- ❖ Au deux famille BEN CHIKH et KHALDI
- ❖ A tous mes amis.

**BEN CHEIKH Abdelhafid**

## Table des matières

Remerciement.....	I
Dédicace .....	II
Table des matières .....	III
Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	X
Liste des abréviations .....	XI
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I : Généralités sur la voie ferrée</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2 La voie ferrée .....	3
I.2.1 Définition de la voie .....	3
I.2.2 L'analyse de la conception et de la construction de la voie ferrée .....	4
I.3 Le Rail .....	5
I.3.1 Définition .....	5
I.3.2 Le profil du rail .....	5
I.3.3 Principaux types de rails Vignole.....	6
I.3.4 Caractéristiques des rails .....	6
I.3.5 Longueurs des rails .....	6
I.3.6 Perçage des rails .....	7
I.3.7 Qualités des rails .....	7
I.3.8 Coupe des rails .....	7
I.3.9 Les marques d'identification des rails .....	7
I.3.10 Assemblage des rails .....	8
I.4 Les traverses .....	9
I.4.1 Définition .....	9
I.4.2 Rôle des traverses .....	9

I.4.3 Types de traverses .....	9
I.4.3.1 Les traverses en bois.....	9
I.4.3.2 Les traverses en béton armé.....	10
I.5 Systèmes de fixations rails-Traverses .....	10
I.5.1 Définition .....	10
I.5.2 Types de systèmes de fixation de rail .....	11
I.6 Le Ballast .....	11
I.6.1 Caractéristiques physiques du ballast.....	11
I.6.2 Caractéristiques mécaniques ..	12
I.7 Semelle de rail .....	12
1.7.1 Définition .....	12
I.8 La pose de voie .....	13
I.8.1 Définition .....	13
I.8.2 Les étapes de pose de la voie.....	13
I.9 Caractéristiques géométriques de la voie .....	14
I.9.1. Ecartement de la voie .....	15
I.10. Conclusion .....	15

## **CHAPITRE II : Les procédés de soudage des rails**

II.1. Introduction .....	16
II.2 Les procédés de soudage de l'acier .....	16
II.3 Soudage aluminothermique .....	18
II.3.1 Définition .....	18
II.3.2 Le processus de soudage aluminothermique.....	18
II.4 Les défauts de la soudure aluminothermique .....	22
II.5 Les procédés de contrôle de la soudure aluminothermique .....	23
II.5.1 Contrôle avant soudage .....	24
II.5.2 Contrôle pendant le soudage .....	24

II.5.3 Contrôle Après le soudage .....	24
II.6 La norme de soudure aluminothermique .....	26
II.7 Le long rail soudé (LRS) .....	26
II.7.1 Historique et Définition .....	26
II.7.2 Processus de fonctionnement du long rail soudé .....	27
II.7.3 Avantages et inconvénients des LRS .....	28
II.7.4 La libération des LRS .....	29
II.8. Conclusion .....	32

**CHAPITRE III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS**

III.1. Introduction .....	33
III.2 Théorie d'élasticité .....	33
III.3 Notation de l'ingénieur .....	35
III.4 Influence de la température (Thermo élasticité).....	35
III.5 Dilatation et contraintes thermiques .....	36
III.5.1 Dilatations thermiques .....	36
III.5.2 Contraintes thermique.....	36
III.6 Présentation du logiciel Abaqus .....	37
III.6.1 Introduction .....	37
III.6.2 Système d'unités dans le code de calcul ABAQUS .....	37
III.6.3 Organisation de l'interface ABAQUS CAE (complète ABAQUS environnement).....	38
III.6.4 Modules .....	38
III.6.5 Éléments dans ABAQUS.....	39
III.6.6 Différents fichiers pour la simulation sous ABAQUS .....	40
III.7 Présentation du logiciel Ansys .....	41
III.7.1 Introduction.....	41
III.7.2 Interface Workbench sur Ansys.....	41

III.7.3 Simulation sur Ansys .....	42
III.8 Application et résultats obtenus.....	44
III.8.1 Etape 1 : Evaluation de la dilatation thermique d'une poutre encastrée-libre.....	44
III.8.1.1 Modélisation sous Abaqus .....	46
III.8.1.2 Modélisation sous Ansys .....	48
III.8.2 Etape 2 : Comportement du rail encastré des deux côtés sous l'effet de l'augmentation de température l'aide du logiciel Ansys.....	50
III.8.3 Etape 3 : Etude du flambage du rail à l'aide du logiciel Ansys .....	54
III.8.4 Etape 4 : Modélisation de la voie à l'aide du logiciel Ansys .....	57
III.9 Conclusion.....	63
Conclusion générale .....	64
Bibliographies .....	66
Annexes .....	68

# **Liste des figures**

## **Chapitre I**

<i>Figure I.1 : La voie ferrée.....</i>	<i>2</i>
<i>Figure I.2 : Eléments de la voie ferrée .....</i>	<i>3</i>
<i>Figure I.3 : Profil Vignole ... ..</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.4 : Rail de chemin de fer UIC 60.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.5 : Identification des rails .....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.6 : L'éclissage .....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.7 : Traverse en bois.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.8 : Traverse bi-bloc.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.9 : Traverse Mono bloc.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.10 : Fixation du rail.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.11 : Semelle au-dessus de rail.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.12 : Semelle.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.13 : Exemple de pose de la voie.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.14 : Ecartement de la voie .....</i>	<i>14</i>

## **Chapitre II**

<i>Figure II.1 : Soudure en Bout. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figure II.2 : Soudure d'angle. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figure II.3 : Equation de la réaction aluminothermique.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.4 : Représentation de l'intercalaire .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II.5 : Réglage du pointu .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II.6 : Pose du moule .....</i>	<i>18</i>

<i>Figure II.7 : Mise en place du brûleur.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II.8 : Allumage du brûleur.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II.9 : Préparation du creuset.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.10 : Allumage du mélange.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.11 : Enlèvement du creuset.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.12 : Meulage de la soudure.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II.13 Appareil de dilatation pour LGV.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.14 Equation du dilatation du LRS en fonction de la température.....</i>	<i>30</i>

### **Chapitre III**

<i>Figure III.1 : Organisation d'ABAQUS.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.2 : Réalisation de la mise en données d'un problème.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III.3 : Quelques éléments dans Abaqus.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III.4 : Les types d'intégrations et le nombre de nœuds.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure III.5: L'interface de WorkBench.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure III.6 : Les étapes de la réalisation de simulation.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure III.7 : Création d'une géométrie sur Ansys.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III.8 : Maillage quadrilatère.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III.9 : Maillage triangulaire.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III.10 : Un maillage avec les deux méthodes.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III.11: Profil de la section du rail UIC60.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III.12 : Modélisation d'un rail sous Abaqus avec <math>L=1\text{ m}</math>.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure III.13 : Maillage sous Abaqus- élément tétraédrique.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure III.14 : Maillage sous Abaqus- élément hexaédrique.....</i>	<i>45</i>

<i>Figure III.15: Dilatation du rail obtenue par Abaqus (<math>\Delta T= 20\text{ }^{\circ}\text{C}</math>).....</i>	<i>46</i>
<i>Figure III.16 : Dilatation du rail obtenue par Abaqus (<math>\Delta T= 30\text{ }^{\circ}\text{C}</math>).....</i>	<i>46</i>
<i>Figure III.17 : Modélisation du rail sous Ansys : <math>L=1\text{ m}</math>.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure III.18 : Maillage du rail sous Ansys.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure III.19 : Dilatation du rail obtenue par Ansys (<math>\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}</math>).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III.20 : Dilatation du rail obtenue par Ansys (<math>\Delta T=30\text{ }^{\circ}\text{C}</math>).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III.21 : Modélisation du rail sous Ansys : <math>L=10\text{ m}</math>.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III.22 : Maillage du rail sous Ansys : <math>L=10\text{ m}</math>.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III.23 : Force de réaction à l'encastrement obtenue par Ansys pour <math>\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}</math>... </i>	<i>51</i>
<i>Figure III.24 : Force de réaction à l'encastrement obtenue par Ansys pour <math>\Delta T=30\text{ }^{\circ}\text{C}</math>... </i>	<i>51</i>
<i>Figure III.25: Modélisation du rail sous Ansys. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figure III.26 : Maillage du rail. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figure III.27 : 1er mode de flambement.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure III.28 : 2eme mode de flambement.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure III.29 : Modélisation de la voie (Traverse en béton) sous Ansys : <math>L=12\text{ m}</math>.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure III.30 : Maillage de la voie (Traverse en béton) sous Ansys : <math>L=12\text{ m}</math>.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure III.31 : Dilatation du rail obtenue par Ansys pour <math>L=12\text{ m}</math> (<math>\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}</math>).....</i>	<i>58</i>
<i>Figure III.32 : Contrainte normale obtenue par Ansys pour <math>L=12\text{ m}</math> (<math>\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}</math>).....</i>	<i>58</i>
<i>Figure III.33 : Modélisation de la voie (Traverse en métal) sous Ansys : <math>L=12\text{ m}</math>.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure III.34 : Maillage de la voie (Traverse en métal) sous Ansys : <math>L=12\text{ m}</math>.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure III.35 : Dilatation du rail obtenue par Ansys pour (<math>\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}</math>).....</i>	<i>61</i>
<i>Figure III.36 : Contrainte normale obtenue par Ansys pour (<math>\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}</math>).....</i>	<i>61</i>

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre III**

<i>Tableau III.1 : Système d'unités pour la programmation.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau III.2 : Données caractéristiques du rail.....</i>	<i>44</i>
<i>Tableau III.3 : Dilatation d'un rail encastré- libre en fonction de la température, Calculée avec ABAQUS et ANSYS.....</i>	<i>48</i>
<i>Tableau III.4 : Contrainte normale de compression (<math>\sigma_x</math> ou <math>S11</math>) et réaction selon <math>x</math> (<math>F_x</math>), du rail encastré-encastré en fonction de la température (calculée avec ANSYS).....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau III.5 : Evolution de la dilatation et la contrainte dans les rails en fonction de la température pour une voie (traverse en béton).....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau III.6 : Evolution de la dilatation et la contrainte dans les rails en fonction de la température pour une voie (traverse en métal).....</i>	<i>61</i>

## *Liste des abréviations*

### *Chapitre I*

**U33, U50, U35, U55, U39, UIC60 , U80** : Rails unifiés.

**S11, S12, S11, S13, S33, S39, S52**: Rails standard.

**P1P** : Rails de longueur appropriée percés d'un seul côté

**NP** : Rails de longueur appropriée non percés.

**LRS** : Les longs rails soudés.

**Dmax<sup>2</sup>** : Dévers maximum admissible.

**a** : l'écartement de la voie.

**R** : Rayon de la courbe.

**V** : Vitesse.

$\gamma$  : L'accélération.

### *Chapitre II*

**Al** : Aluminium.

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : Oxyde de fer.

**Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>** : Oxyde de fer noir.

**PLC** : Groupe air-essence.

**CEN** : Comité Européen de Normalisation.

### *Chapitre III*

*Cijkl* : Tenseurs de rigidité.

*Sijkl* : Tenseurs de souplesse.

M.E.F : Méthode des éléments finis.

---

## Introduction générale

Dans le vaste réseau des infrastructures d'un pays, les moyens de communications, et notamment les transports, occupent une place prépondérante. Car ils constituent un puissant vecteur de croissance et de développement. Parmi ces moyens, le réseau du chemin de fer joue un rôle important dans le développement des différents secteurs stratégiques du pays.

Le chemin de fer ou transport ferroviaire est un mode de transport guidé caractérisé par une infrastructure spécialisée composée de deux rails parallèles permettant la circulation d'un matériel roulant (trains, tramways et métros). Utilisé pour le déplacement de personnes et de marchandises, il constitue, avec les autres modes de transport (routier, fluvial et aérien), l'un des principaux moyens de transport modernes. Il connaît un développement spectaculaire, et son usage se répand au monde entier pour le trafic de voyageur et pour la marchandise.

Compte tenu de l'augmentation des vitesses et de la fréquence de circulation des trains et afin de réduire les vibrations, les jonctions des rails des chemins de fer sont conçues de manière à obtenir la continuité du chemin de roulement. En général le raccordement des rails est réalisé par les deux procédés suivants :

- Soudage par résistance ;
- Soudage par aluminothermie.

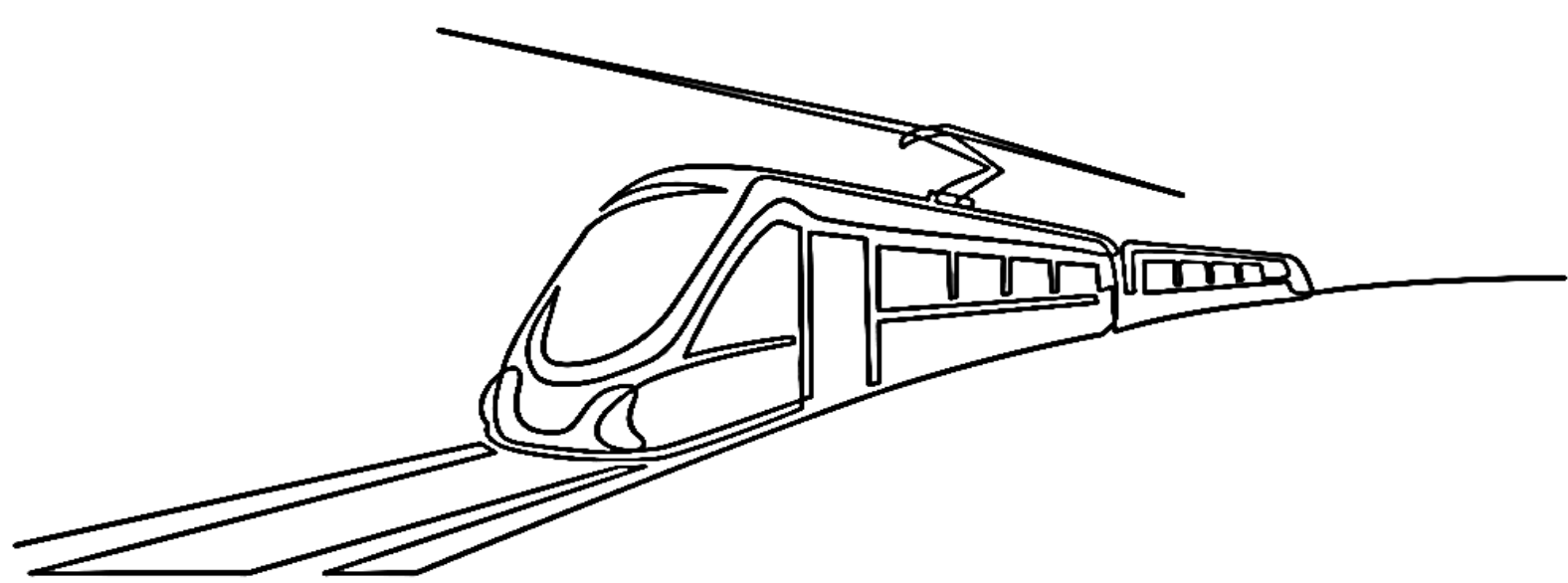
Ce deuxième procédé est le plus répandu actuellement dans les chemins de fer. Cependant, il a été constaté que l'endommagement des rails se produit le plus souvent dans ces zones soudées, ce qui peut avoir de graves conséquences sur la sécurité et le confort au cours du fonctionnement

Les longs rails soudés désignent des rails qui sont assemblés sur les voies à l'aide d'un procédé dit "Soudure Aluminothermique". Ce procédé crée une connexion continue et homogène entre des sections de rail de quelques dizaines voire centaines de mètres et permet ainsi la réalisation d'un unique rail, aussi long que souhaité. Il n'y a pas de limitation en longueur de ce type de rail et ils se terminent généralement de deux manières différentes : ils sont soit interrompus par un joint mécanique à éclisse, soit ils se terminent en aiguille dans un appareil de voie.

Lors des saisons de forte chaleur, l'élévation de la température ambiante affecte le comportement mécanique du rail et pose de sérieux problèmes aux exploitants de la voie. Afin d'étudier et d'analyser son comportement (contraintes, efforts et déformations), théoriquement

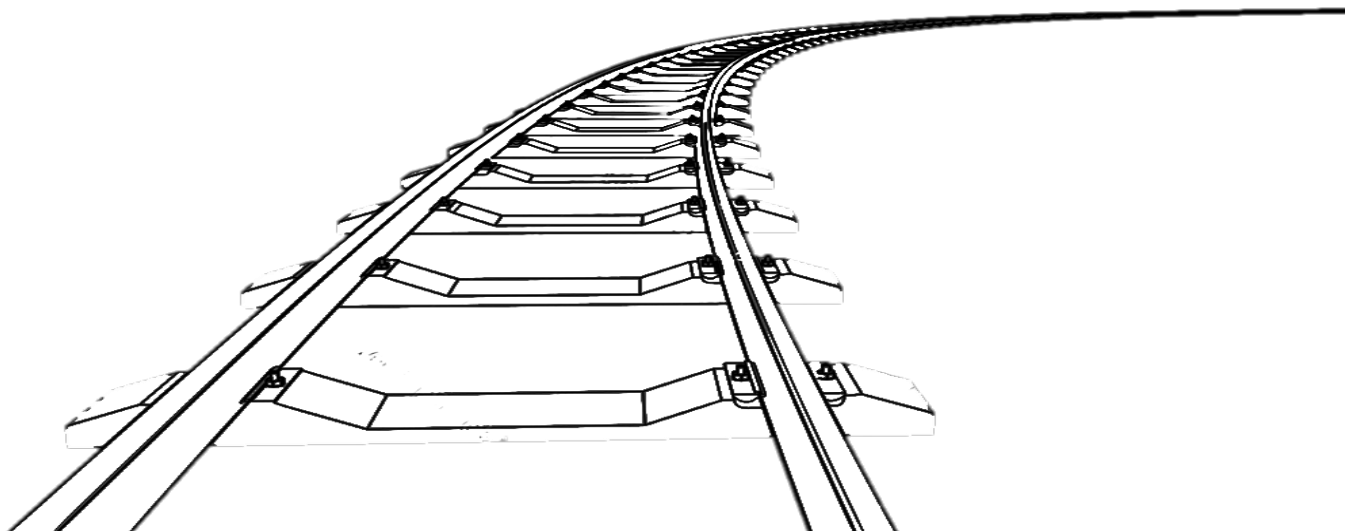
---

et numériquement, un calcul numérique a été effectué à l'aide des programmes ABAQUS et ANSYS, en utilisant la modélisation par éléments finis. Le but de ce travail est de déterminer les contraintes, déformations (ou dilatations). Les résultats numériques sont comparés à ceux théoriques.



# **Chapitre I**

## **Généralités sur la voie ferrée**



### I.1 Introduction

La voie ferrée constitue l'interface majeure entre le terrain et le matériel roulant. Ses fonctions fondamentales sont : le support de la masse roulante et sa répartition sur le sol ; le guidage des roues des véhicules par les deux files de rails. Chaque véhicule étant ainsi guidé, il est possible d'en atteler de nombreux les uns aux autres pour constituer un train.

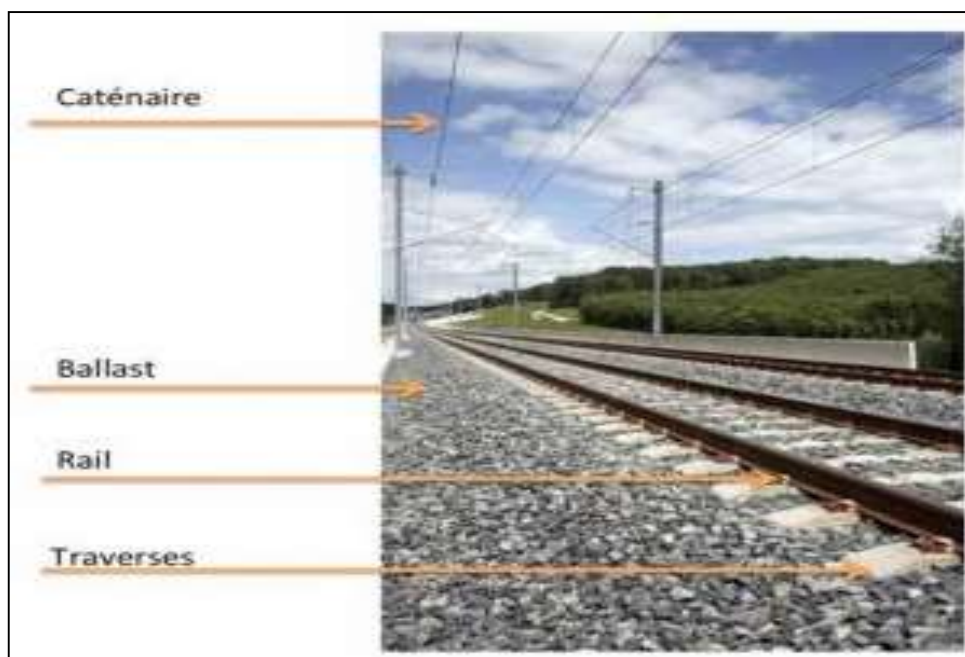
Les technologies mises en œuvre ont évolué, de sorte que les performances du chemin de fer le place au premier rang des transports terrestres en termes de capacité et de vitesse.

La réalisation de notre projet nécessite une étude approfondie sur certaines notions qui touchent non seulement le cadre général du projet, mais aussi sa réalisation. Pour bien assimiler ces différentes notions, Ce chapitre est consacré à présenter les différents éléments constituant la voie ferrée ainsi que ses caractéristiques.

### I.2 La voie ferrée

#### I.2.1 Définition de la voie

La voie ferrée est un système de transport ferroviaire, constituée de la plateforme, le sous ballast, le ballast, les traverses, les rails et les accessoires d'attache et de fixation. La voie ferrée est soumise à des sollicitations statique et dynamique (conditions climatiques et géologiques), exposée à l'action de facteurs aussi destructif tel que : l'humidité, le gel, l'eau, la neige, ... etc. Les rails sont disposés en paires parallèles sur lesquelles les roues des trains roulent pour se déplacer [1].



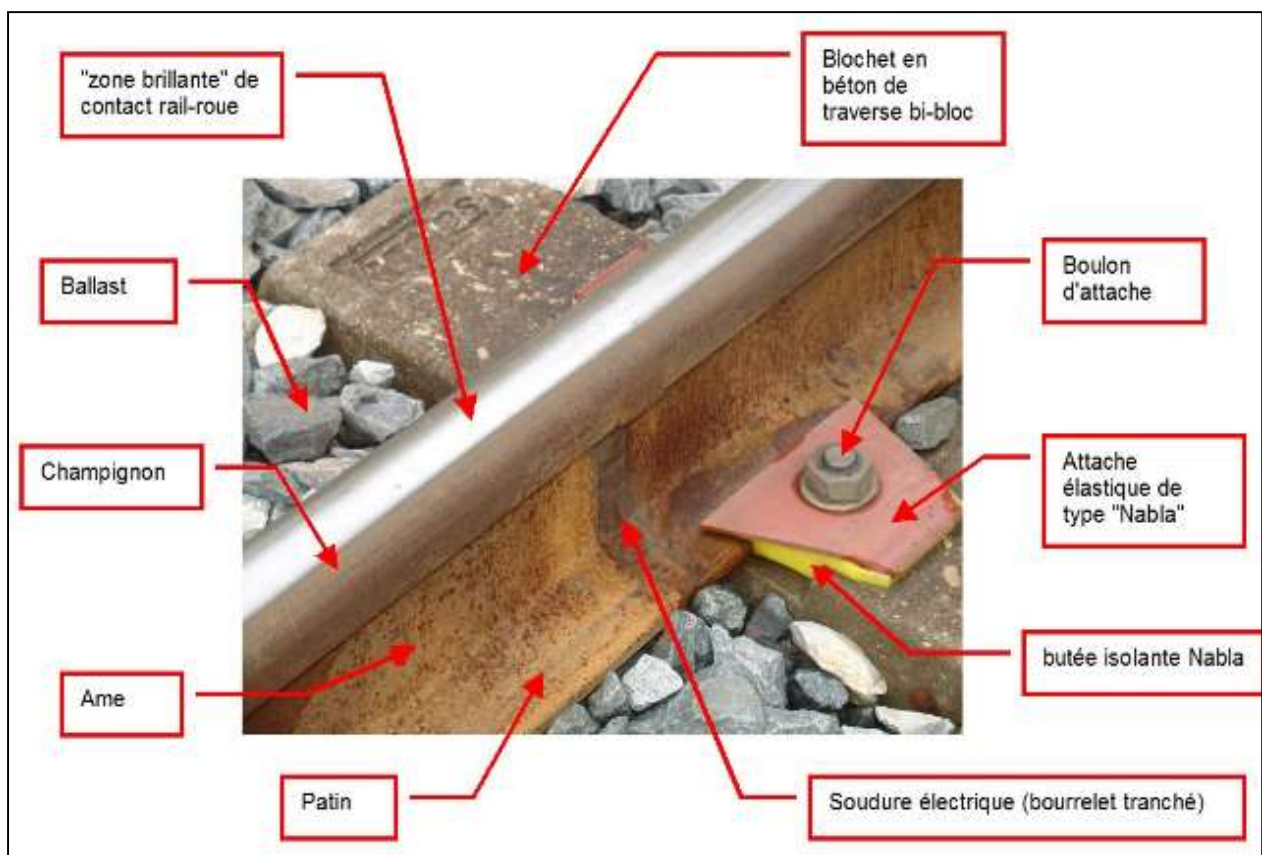
*Figure I.1 : La voie ferrée*

### I.2.2. L'analyse de la conception et de la construction de la voie ferrée

L'analyse de la conception et de la construction de la voie ferrée peut inclure l'étude des différents facteurs qui influencent la planification et la construction de la voie ferrée, tels que les conditions géographiques et climatiques, la circulation et les niveaux de trafic, les normes de sécurité et les considérations budgétaires.

Cette analyse peut également porter sur les différents types de rails utilisés dans la construction de la voie ferrée, tels que les rails en acier, en fonte ou en alliage léger, ainsi que sur les différentes méthodes de fixation des rails aux traverses, telles que les fixations par boulons ou par soudures

Un exemple de source pour une telle analyse pourrait être le manuel de conception et de construction des voies ferrées de l'Union internationale des chemins de fer (UIC), qui fournit des recommandations pour la conception et la construction des voies ferrées dans le monde entier. Il peut également être utile de se référer aux normes internationales en matière de conception et de construction de la voie ferrée telles que les normes américaines ou européennes [1].



*Figure I.2 : Eléments de la voie ferrée*

### I.3 Le Rail

#### I.3.1 Définition

Le rail est une longue barre d'acier profilée servant à la fois de support pour la charge de la roue et permet son guidage et son roulement. Les rails sont mis bout à bout pour former un chemin de fer, on distingue deux types de rails:

- Les rails à patin (ou rail Vignole) ;
- Les rails à double champignon.

Les rails sont caractérisés par :

- Leur profil ;
- La nuance d'acier qui les compose.

Il existe différents profils et nuances de rail [1].

#### I.3.2 Le profil du rail

C'est une coupe transversale du rail qui peut comprendre les trois parties suivantes :

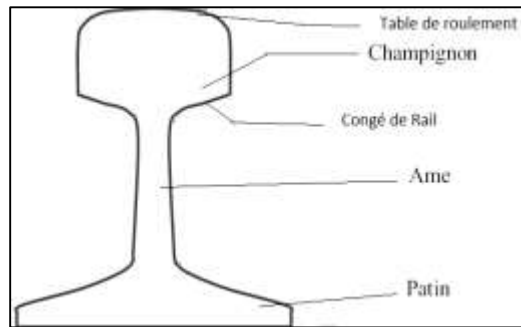
- **Table de roulement** : C'est la partie de contact rail-roue [2].

- **Le champignon** : C'est la partie supérieure du rail, il est caractérisé par sa largeur, sa hauteur, le bombement de sa table de roulement et l'inclinaison de ces forces latérales. La largeur du champignon doit être choisie de façon :

- A permettre un effet de freinage dans les zones où se produisent les contraintes dues au Contact rail –roue.
- A permettre le tracé avec un rayon suffisant les congés de raccordement de l'âme et du champignon.
- A donner une marge d'usure latérale suffisante dans les courbes de faible rayon [2].

- **L'âme et portée d'éclissage** : Leur tracé est caractérisé par l'épaisseur de l'âme, la forme des congés de raccordement avec le champignon et le patin, et l'inclinaison des portées d'éclissage. L'épaisseur de l'âme doit tenir compte des efforts de déversement et les efforts tranchants qu'elle supporte et des sollicitations élevées qui se développent au voisinage des trous d'éclissage.

- **Le patin** : Caractérisé par sa largeur et par l'épaisseur et la forme des ailes, qui sont essentiellement fixées par des considérations d'équilibrage entre la section du patin et celle de champignon et par les possibilités du laminage, sa largeur conditionne la rigidité du rail dans le plan horizontal et détermine le taux de compression sur les traverses [2].



*Figure I.3 : Profil Vignole*

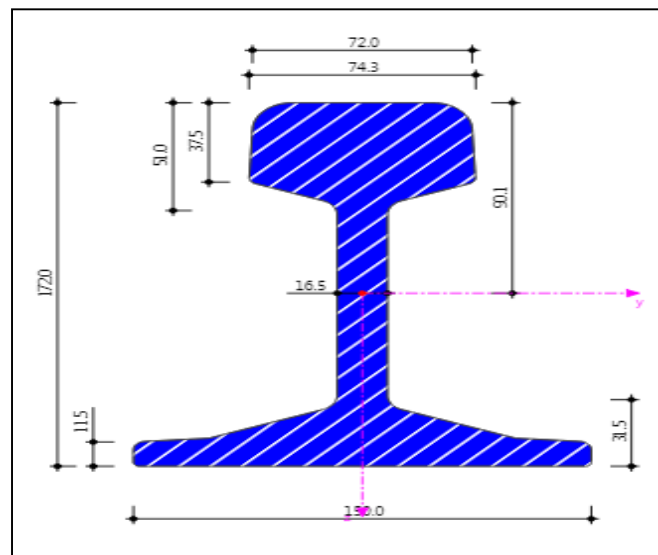
### I.3.3 Principaux types de rails Vignole

- Rails unifiés : U33, U50, U35, U55, U39, UIC60, U80.
- Rails standard : S11, S12, S11, S13, S33, S39, S52 [2]

### I.3.4 Caractéristiques des rails

Les caractéristiques des rails sont :

- Poids au mètre linéaire ;
- Longueur de champignon ;
- Longueur de patin ;
- Hauteur ;
- Épaisseur de l'âme ;
- Inclinaison des portées d'éclissage [1] ;



*Figure I.4 : Rail de chemin de fer UIC 60*

### I.3.5 Longueurs des rails

Les longueurs normales des rails sont : 12 m, 16 m, 24 m, 36 m. Pour les rails recoupés :

- Le rail de 12 m est recoupé à 11 m.

- Le rail de 18 m est recoupé à 16,5 m. Ces rails recoupés sont parfois soudés (22 m et 33m).

Dans les courbes, pour conserver l'équerrage des joints, on emploie des rails courts sur petit rayon. Il convient également de noter que des rails à joints alternés de longueurs variables (36 m, 33 m, 24 m, 18 m) ainsi que des longs rails soudés pouvant atteindre plusieurs kilomètres sont également posés [2].

### I.3.6 Perçage des rails

En voie courante, le perçage de trous dans l'âme des rails correspond à l'une des fonctions suivantes :

- Assurer l'éclissage des rails ;
- Assurer la continuité des circuits de voie [2].

### I.3.7 Qualités des rails

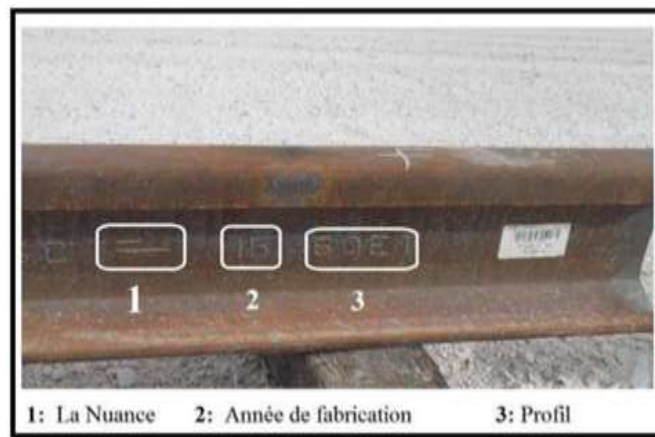
- Rails de qualité naturellement dure : Ces rails ont une dureté et une résistance à l'usure supérieure à celles des rails de qualité courante. Ils sont utilisés prioritairement dans les courbes de faible rayon où l'usure latérale est intense. Ils sont identifiés par leurs marques en relief.
- Rails de réemploi : Certains rails de réemploi comportent une trace de peinture bleue sur l'arrondi du roule, d'environ 1 mètre de longueur, généralement à une seule extrémité. Cette marque indique le sens de roule à retenir lors de la pose [2].

### I.3.8 Coupe des rails

Pour les raccords et les coupes, il faut toujours chercher à avoir le moins de chute possible. On peut commander des rails de longueur appropriée percés d'un seul côté (PIP) ou non percés (NP).

### I.3.9 Les marques d'identification des rails

Les rails comportent dans l'âme des marques en relief complétées par des marques en creux. L'ensemble de ces marques constitue la fiche d'identité du rail. Dans certains cas, les marques peuvent être complétées par un trou de reconnaissance percé à l'about du rail.



*Figure I.5 : Identification des rails*

### I.3.10 Assemblage des rails

Il existe deux types d'assemblages :

#### ▪ L'éclissage

C'est l'assemblage de deux rails consécutifs à l'aide de deux éclisses qui sont constituées par deux plaques laminées, qui s'entrent entre le dessous du champignon et le dessus du patin, il doit satisfaire aux conditions suivantes :

- Relier les rails de façon à qu'ils se comportent comme une poutre continue en alignement et en nivellement.
- Avoir la même qualité d'acier que le rail, c'est-à-dire avoir une résistance à la déformation qui approche d'aussi près que possible celle des rails qu'il assemble.
- Empêcher les mouvements verticaux des extrémités des rails l'une par rapport à l'autre, tout en permettant la dilatation.

Dans ce cas, plus les boulons d'éclisses sont serrés, moins les chocs sont ressentis, mais plus la dilatation du rail est contrariée [3].

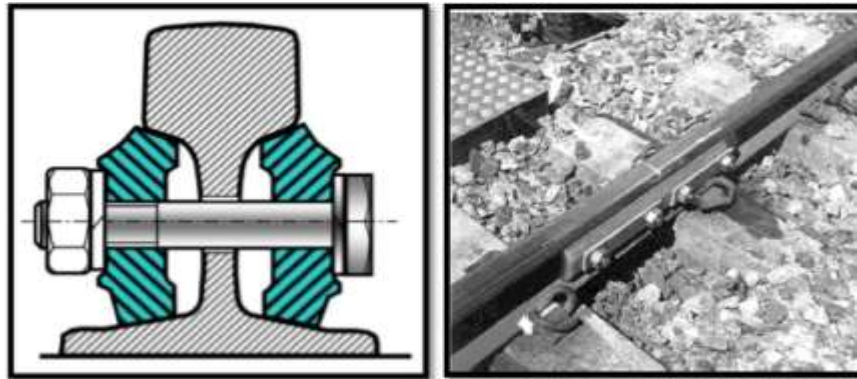
#### ▪ Les longs rails soudés (LRS)

Le long rail soudé est un rail dont la longueur est suffisante pour, au moins, qu'un de ses points reste fixe, quelles que soient les variations de température, il est en état de dilatation ou de contraction totalement ou partiellement contrariée, ce qui n'est pas possible que par suite du double frottement entre rail et traverse et entre traverse et ballast [3][14].

Les variations de température engendrent des contraintes supplémentaires dans les rails, les variations de longueur des rails ne peuvent se manifester qu'aux extrémités du LRS. Bien entendu, il est nécessaire que la fixation du rail sur les traverses soit efficace (Résistance au glissement) [14].

La résistance longitudinale et transversale ainsi que la rigidité du châssis de la voie dans le ballast soient suffisantes.

Les LRS sont désormais largement utilisés dans la plupart des réseaux ferroviaires étant donné que les coûts de construction d'une voie en LRS sont approximativement les mêmes que ceux d'une voie en barres normales [3][14].



*Figure I.6 : L'éclissage*

### I.4 Les traverses

#### I.4.1. Définition

La traverse est un élément fondamental de la voie ferrée. C'est une pièce posée en travers de la voie, sous les rails, pour en maintenir l'écartement et l'inclinaison, et pour transmettre au ballast les charges des véhicules circulant sur les rails [4].

#### I.4.2 Rôle des traverses

Les traverses assurent les rôles suivants :

- Entretoiser les rails et maintenir l'écartement de la voie constant.
- Répartir sur le ballast les charges supportées par la voie [4].

#### I.4.3 Types de traverses

- Les traverses en bois,
- Les traverses en béton armé.

##### I.4.3.1 Les traverses en bois

Les traverses en bois doivent posséder certaines caractéristiques permettant de résister durablement aux différents agents de détérioration qui les affectent.

- **Avantages** : voie souple, peu sonore, absorbant bien les chocs, offrant une liaison facile fer et bois, bien isolantes au point de vue électrique.

- **Inconvénients** : Soumises à des alternances de sécheresse et d'humidité, elles sont exposées à la pourriture. De plus, les reperçages, resabotages, etc. abrègent la durée de vie des traverses [4].



*Figure I.7 : Traverse en bois*

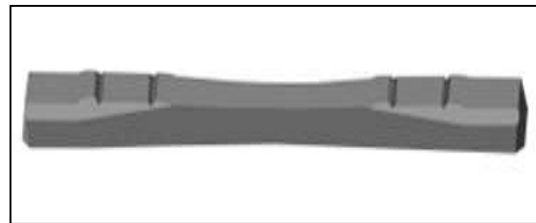
### I.4.3.2 Les traverses en béton armé

Il existe deux types :

**Traverses bi-bloc** : deux blocs de béton ou blochets sont reliés par une entretoise en acier pour maintenir l'écartement. Le double ancrage dans le ballast procure un avantage en termes de stabilité latérale sous l'effet des forces [25].



*Figure I.8 : Traverse bi-bloc*



*Figure I.9 : Traverse Mono bloc*

**Traverses monobloc** : poutres en béton précontraint. Elles offrent une meilleure résistance à la flexion que les traverses bi-bloc et une meilleure répartition des charges verticales, permettant de réduire les défauts de géométrie de la voie (pas de poinçonnement comme pour la traverse bi bloc) [4][25].

## I.5 Systèmes de fixations rails-Traverses

### I.5.1 Définition

Le système de fixation est un ensemble de pièces de chemin de fer conçu pour fixer le rail d'acier et la traverse. Il est connu comme les pièces de connexion. Le système d'attache de rails non seulement maintient le rail dans la jauge, mais empêche également le mouvement latéral du rail [23].

### I.5.2 Types de systèmes de fixation de rail

Pour différentes applications, il existe de nombreux types de systèmes de fixation de rail, tels que le type E, le type SKL, le type NABLA, le type KPO, les systèmes de fixation rapide à clipser, etc [1][23].

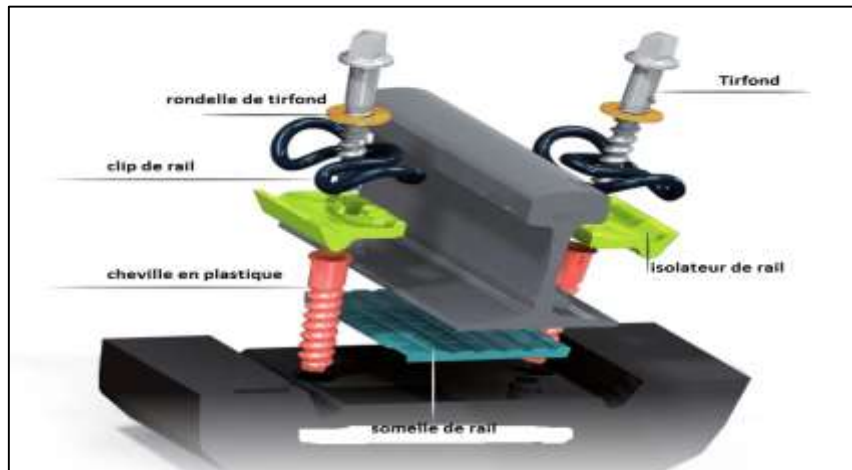


Figure I.10 : Fixation du rail

### I.6 Le Ballast

Le ballast est un granulat de 25/50 mm (utilisée actuellement en Algérie), il provient de concassage de roches dures (granite, quartzite, grès, gneiss, etc. ...). La couche de ballast a une épaisseur de 25 à 30 cm avec le rôle de :

- Répartir sur la plate-forme les charges concentrées qu'elle reçoit des traverses ;
- Amortir une partie très importante de la vibration grâce à ses propriétés rhéologiques ; Assurer, en raison de sa granulométrie, le drainage rapide de la voie ;
- Permettre de rectifier rapidement le nivellement au moyen du bourrage-dressage mécanique ;
- S'opposer par le frottement de ses éléments entre eux et contre les traverses à tout déplacement de la voie. (Le choix de la grosseur du ballast dépend de la nature des traverses) [1][13];

#### I.6.1 Caractéristiques physiques du ballast

Le ballast doit être propre et perméable pour assurer les fonctions mentionnées ci-dessous. Les caractéristiques physiques du ballast ainsi que son degré de pollution influent sur son aptitude à remplir son rôle. Pour être efficace, il doit posséder les propriétés suivantes :

- Être dur afin de résister aux efforts reçus et à l'usure par attrition due aux vibrations ;

- Offrir une certaine élasticité. Cette élasticité, qui permet d'amortir la transmission des charges et d'atténuer l'amplitude des efforts dynamiques, se manifeste par un affaissement de la traverse de 1mm au passage des essieux suivi d'un retour à sa position d'origine ;
- Être dense car un ballast lourd résiste mieux aux sollicitations et aux efforts latéraux de la voie ;
- Être meuble ou mobile pour faciliter le bourrage et les reprises de nivellement;
- Contenir des éléments anguleux. Les arêtes vives et la rugosité de surface contribuent à la cohésion du ballast et au bon maintien de la voie. Aussi, la rugosité de surface du ballast permet d'assurer le blocage des traverses dans le ballast par la pénétration des arêtes vives dans la masse des traverses en bois ;
- Être perméable. Les vides entre les grains du ballast permettent d'assurer un bon écoulement de l'eau. Cette faculté tient compte bien évidemment de la granulométrie du ballast mais également de sa dureté. En effet, le phénomène d'attrition génère des fines pouvant combler progressivement les vides et perturber l'écoulement des eaux [1] [22].

### I.6.2 Caractéristiques mécaniques

- Résistance à l'attrition : sous l'effet des charges concentrées et des vibrations, les granulats du ballast subissent une usure par frottement aux points de contact entre eux.
- Résistance aux chocs : sous l'effet de contraintes transmises au ballast, il se produit un frottement des granulats entre eux, et des chocs engendrés par les traverses et les bourroirs [22].
- La dureté : Afin de résister aux efforts reçus ainsi qu'à l'usure par abrasion du fait de vibrations engendrées par les charges roulantes.
- Résistance à la compression : les contraintes verticales transmises au ballast peuvent lui provoquer des ruptures, en effet, les granulats doivent présenter une résistance à la compression suffisante, elle est mesurée à partir d'un essai en laboratoire [1] [15] [22].

## I.7 Semelle de rail

### 1.7.1 Définition

La semelle de rail est utilisée quand le rail est attaché au béton plutôt qu'à une poutre ou à une traverse. Elle réduit la fatigue sur la traverse en béton résultant de l'impact et des vibrations dus aux passages de trains. Lorsque le train passe, la semelle agit de deux manières. Elle diminue les chocs ou impacts des charges. Elle amortit les vibrations raisonnantes dans les traverses de béton et réduit les déflexions de vibration dans les sections de rails entre les

liens. De plus, la semelle de rail empêche l'abrasion de la traverse et l'usure de la traverse sous le patin de rail [17].

La semelle de rail en caoutchouc est conçue normalement pour des caractéristiques spécifiées de charge-déflexion. La rigidité initiale de la semelle est conçue pour être faible de sorte que sa déformation sous les charges de pied à ressort soit substantielle [3] [17].



*Figure I.11 : Semelle au-dessus de rail*



*Figure I.12 : Semelle*

## I.8 La pose de voie

### I.8.1 Définition

La pose de voie ferrée consiste à installer les rails sur une assise en béton ou en ballast, afin de créer une voie de circulation pour les trains [21].

### I.8.2 Les étapes de pose de la voie

Le processus de pose de voie ferrée implique plusieurs étapes:

1. La préparation du terrain: avant de poser les rails, le terrain doit être préparé en nivelant le sol et en créant une base solide pour la voie.
2. La pose des traverses: les traverses sont des éléments en bois ou en béton qui servent de support aux rails. Elles sont posées sur la base et sont fixées solidement.
3. La fixation des rails: les rails sont installés sur les traverses et sont fixés en place à l'aide de boulons.
4. La pose du ballast: le ballast est un matériau en pierre concassée qui est posé entre les traverses pour maintenir les rails en place et pour permettre l'écoulement de l'eau.
5. Le compactage du ballast: le ballast est compacté à l'aide de machines spéciales pour garantir une bonne stabilité de la voie.
6. La pose des accessoires: les accessoires de voie tels que les aiguillages, les croisements et les signaux sont installés à la fin du processus de pose de voie ferrée.

La pose de voie ferrée est un processus complexe qui nécessite une planification minutieuse et une exécution précise pour garantir la sécurité et la fiabilité de la voie [21].



*Figure I.13 : Exemple de pose de la voie*

### **I.9 Caractéristiques géométriques de la voie**

La géométrie de la voie est l'ensemble des paramètres techniques qui définissent l'assemblage correct des rails et d'établir ses règles d'entretien [15].

Elle englobe la détermination de l'alignement horizontal et vertical correct de voie rectiligne, le suivi du rayon de courbure minimum et admissible pour l'itinéraire, le tracé correct des greffons dans les courbes paraboliques, l'inclinaison relative de la courbe de la piste pour compenser les effets de la force centrifuge [3][15].

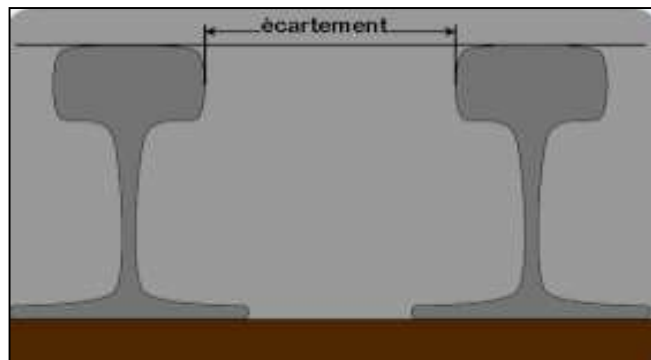
Les paramètres principaux qui caractérisent une voie ferrée sont :

- le type de rail utilisé (poids, longueur, section),
- le mode de pose des rails sur les traverses,
- l'écartement des rails, et les tolérances admises,
- le type et la densité des traverses,
- le tracé en long (rayons de courbure et dévers),
- le tracé en profil (pente ou rampe),
- le support (ballast ou béton),
- la charge admise par mètre courant.
- la vitesse des trains.

Il existe plusieurs normes d'écartement des rails :

- Voie normale : 1435 mm.
- Voie de 1067 mm.
- Voie métrique : 1000 mm.
- Voie étroite : Écartement inférieur à 1 m (souvent 600 mm).
- Voie large : 1520/1524 mm, 1600 mm, 1668 mm, 1676 mm.

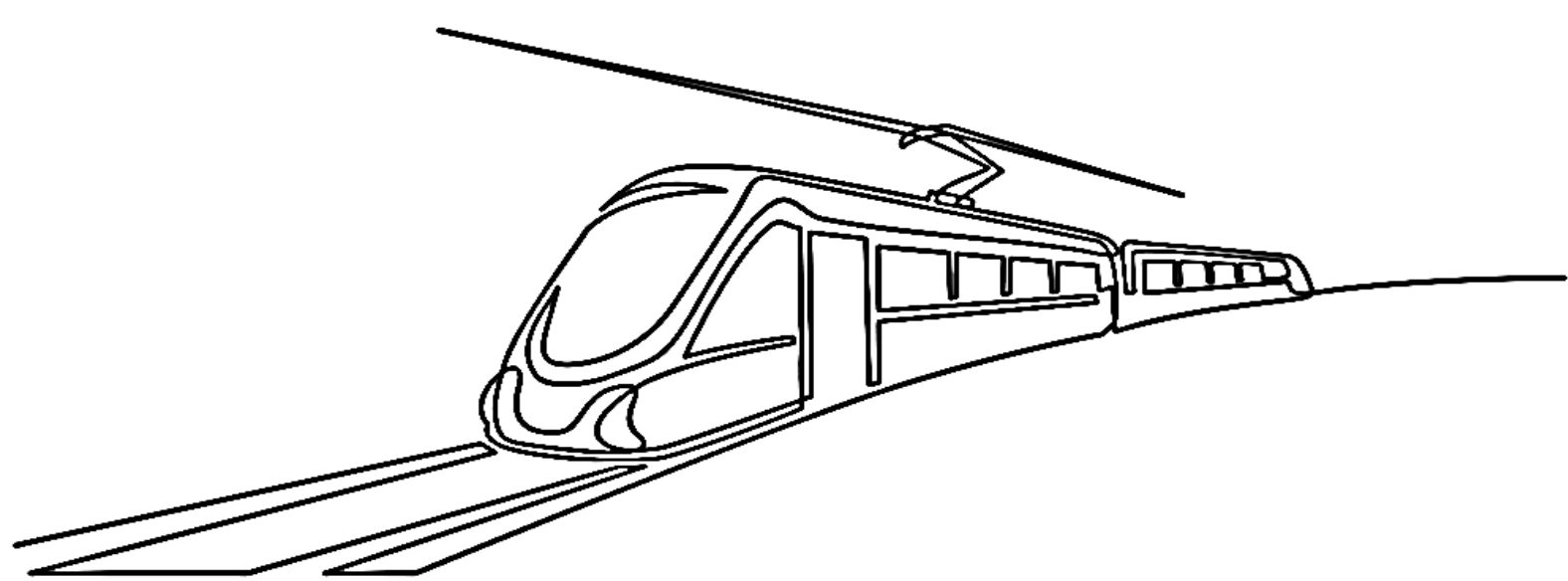
**I.9.1. Écartement de la voie :** Une voie ferrée est caractérisée par l'écartement, qui représente la longueur mesurée entre les deux joues intérieures des rails (selon UIC). L'écartement le plus répandu dans le monde est l'écartement normal de 1435 mm (d'origine anglaise) [3].



*Figure I.14 : Écartement de la voie*

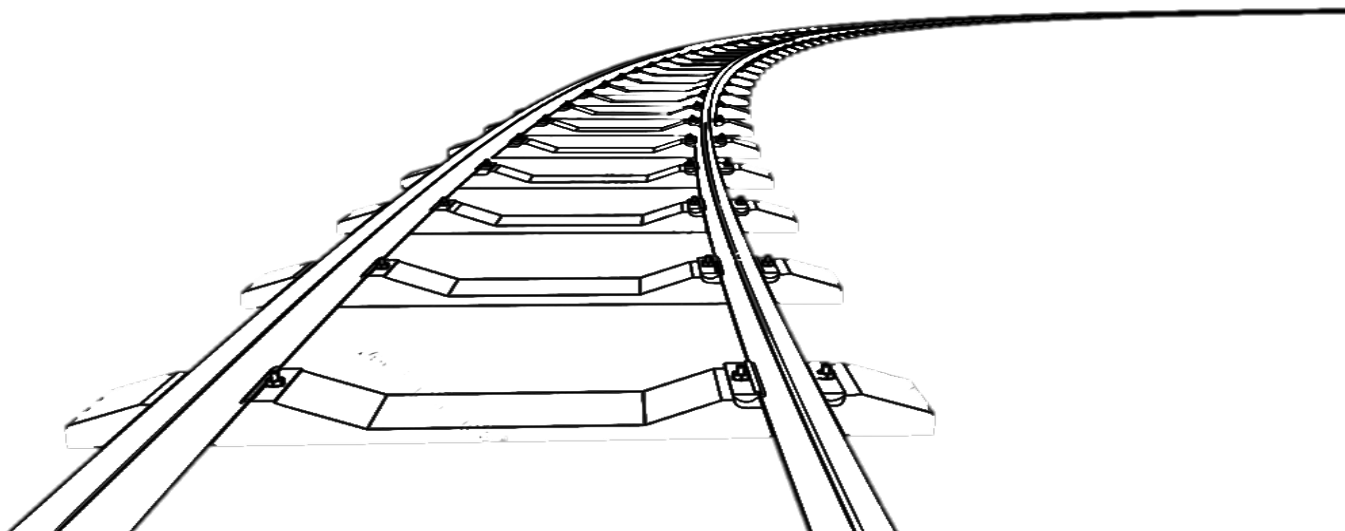
## I.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une présentation des différents éléments constituant la voie ferrée ainsi que ses caractéristiques. Les traverses assurent la transmission de la charge au ballast, et le maintien de l'écartement et de l'inclinaison des rails. La voie ferrée peut aussi être posée sans ballast, directement sur un lit de béton (le cas de certains tunnels). Outre ses fonctions de roulement et de guidage, le rail a souvent une fonction de sécurité : il sert de circuit aux courants de signalisation.



## **Chapitre II**

# **Les procédés de soudage des rails**



### II.1 Introduction

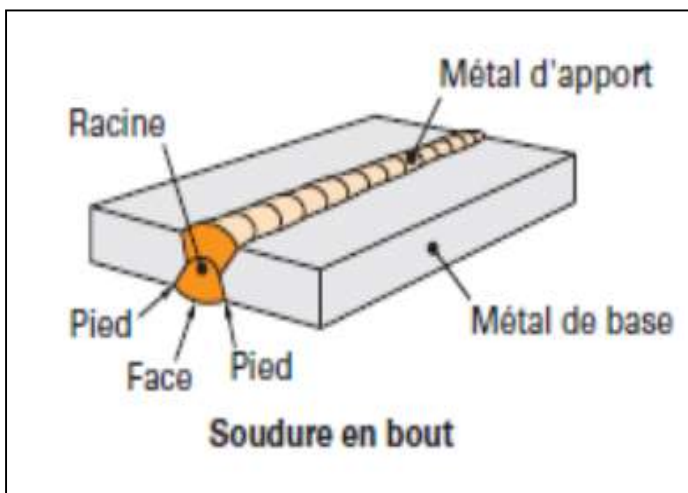
L'amélioration de la tenue en service des structures ferroviaires soudées passe par l'analyse des facteurs qui influencent la qualité de la soudure et la compréhension des phénomènes métallurgiques, physiques et mécaniques mis en jeu lors de leur assemblage par soudage. Ce chapitre portera donc sur la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

### II.2 Les procédés de soudage de l'acier

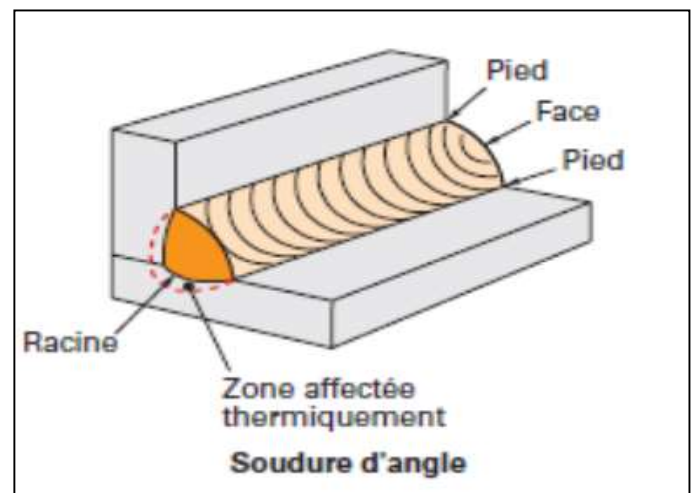
Le soudage est apparu à la fin de 19<sup>ème</sup> siècle comme une opération d'assemblage permanente des matériaux métalliques. Le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

Le soudage de l'acier est un processus qui consiste à joindre deux ou plusieurs pièces d'acier ensemble en utilisant de la chaleur et/ou de la pression pour former une liaison solide entre elles. Le but est de créer une liaison permanente et résistante entre les pièces pour les utiliser comme une seule et même pièce [5].

Le métal de base est le matériau constitutif des éléments à souder et le métal d'apport est la matière dont est constituée l'électrode utilisée dans le processus de soudage (Voir Figure II.1 et Figure II.2).



*Figure II.1 : Soudure en Bout.*



*Figure II.2 : Soudure d'angle.*

Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Dans ce procédé, le métal des pièces à assembler participe à la constitution du joint au même titre que le métal

d'apport. Donc c'est une opération de "fusion localisée" de deux pièces de même nature. Le métal de base se dilue dans le métal d'apport. La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler.

Il existe plusieurs procédés de soudage de l'acier, les plus courants sont:

- a- Soudage à l'arc électrique :** ce procédé utilise un arc électrique pour faire fondre l'acier et former une liaison entre deux pièces. Il peut être effectué avec une électrode enrobée, un fil électrode ou un plasma.
- b- Soudage à l'arc submergé :** ce procédé est similaire au soudage à l'arc électrique, mais utilise un flux en poudre pour protéger l'arc et le métal en fusion de l'air ambiant.
- c- Soudage au gaz :** ce procédé utilise une flamme de gaz pour chauffer les pièces à souder et les faire fondre ensemble. Il est souvent utilisé pour les tôles fines et les tubes.
- d- Soudage par résistance :** ce procédé utilise une source de courant électrique pour chauffer les pièces à souder et former une liaison. Il est souvent utilisé pour les tôles minces.
- e- Soudage par friction :** ce procédé utilise un outil rotatif pour frotter les pièces à souder ensemble, générant de la chaleur et formant une liaison solide.
- f- Soudage laser :** ce procédé utilise un faisceau laser pour chauffer les pièces à souder et les faire fondre ensemble.
- g- Soudage par ultrasons :** ce procédé utilise des ondes sonores à haute fréquence pour chauffer et fondre les pièces à souder ensemble.

Il est important de choisir le procédé de soudage approprié en fonction des propriétés de l'acier à souder et des exigences de l'application. Le choix du procédé de soudage dépendra des propriétés de l'acier à souder, des exigences de l'application et de la qualité de la liaison souhaitée.

Le soudage de l'acier peut être utilisé dans de nombreuses applications industrielles et de construction, notamment pour la fabrication de ponts, de bâtiments, de véhicules et de machines.

## II.3 Soudage aluminothermique

### II.3.1 Définition

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.

La réaction chimique est une réaction entre une poudre d'aluminium (Al) et l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Le résultat est que vous obtenez la formation de fer qu'il permet le soudage des rails et le produit de déchet oxyde d'aluminium (Voir Figure II.3). La réaction ne dure que vingt-cinq secondes

Un autre oxydant utilisé en aluminothermie est l'oxyde de fer noir ou bleu ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la magnétite. La thermitite 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 [5].

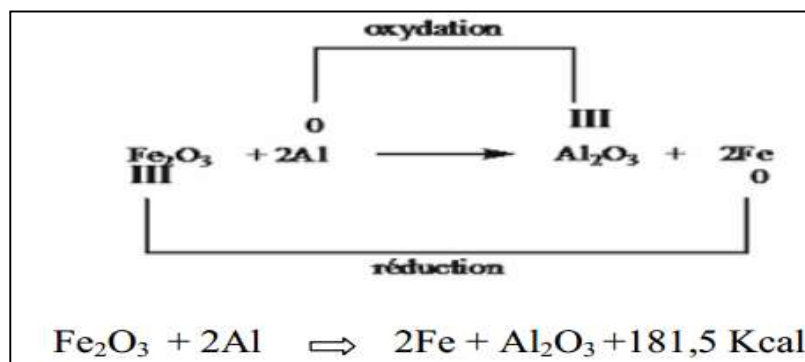


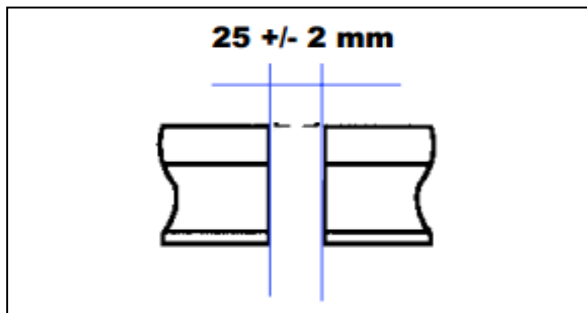
Figure II.3 : Equation de la réaction aluminothermique

### II.3.2 Le processus de soudage aluminothermique

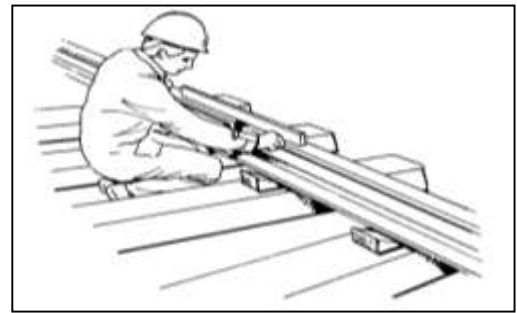
Le processus de soudage commence par le réglage de l'intercalaire qui représente l'espace entre les deux rails à souder. Cette côte se mesure à l'aide d'une jauge d'intercalaire de part et d'autre du rail, au champignon et au patin, avec 4 mesures. Les 4 valeurs obtenues doivent être comprises dans la fourchette 23 à 27 mm (Le faux équerrage ne doit pas être supérieur à 2 mm par rapport à l'intercalaire mesuré dans l'intervalle admis) (Voir Figure II.4) [26].

Après le réglage de l'intercalaire, Les rails doivent former avant soudure une pointe. Elle est nécessaire pour compenser le retrait dû au refroidissement. La valeur de cette pointe doit être ajustée par le soudeur, selon l'état de la voie [6] [26].

La valeur de la flèche sera vérifiée après meulage de finition. La géométrie finale du pointu est définie par le réseau. En aucun cas les rails ne doivent être en creux (Les mesures s'effectuent à 50 mm environ des extrémités de la règle) (Voir Figure II.5) [6]



*Figure II.4 : Représentation de l'intercalaire*



*Figure II.5 : Réglage du pointu*

Le réglage de pointu est suivi par la pose d'un demi-moule, le centrer en haut et en bas par rapport à l'axe de l'intercalaire et de le maintenir en place en serrant la vis papillon positionnée sur l'étrier. Ensuite, mettre en place le second demi-moule, le centrer en haut et en bas par rapport à l'axe de l'intercalaire. Cette dernière, est suivi par le dressage du vis papillon utilisée pour la pose du premier demi-moule et le serrage du serre-joint suffisamment (sans toutefois risquer de briser les moules par un serrage excessif) (Voir Figure II.5)

La force de serrage du serre-joint doit s'appliquer sur la demi hauteur du champignon afin de garantir la qualité du plan de joint des deux demi-moules. Aussi, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de corps étranger à l'intérieur du moule [6].



*Figure II.6 : Pose du moule*

Lorsque le moule est en place, le préchauffage peut commencer. Le préchauffage est une opération très importante. Il a pour but d'obtenir les conditions thermiques indispensables définies pour le procédé qui puisse influencer la durée de vie d'une soudure.

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 (Voir Figure II.7 et II.8) [5] [6].

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.

Après le préchauffage, le brûleur doit être retiré le plus rapidement possible et pour l'arrêt du groupe de préchauffage, il faut respecter la procédure suivante par mesure de sécurité :

- Fermer la (ou les) vanne(s) du réservoir d'essence.
- Attendre l'arrêt de la flamme du brûleur et puis arrêter le moteur [6].



*Figure II.7 : Mise en place du brûleur*



*Figure II.8 : Allumage du brûleur*

Le creuset, qui a été préparé pendant le préchauffage (Voir Figure II.9), est placé au-dessus du moule et il est allumé avec un allume-charges prévu à cette fin. La réaction exothermique résultante produit une température très élevée (plus de 2500°C), qui fait fondre

l'acier de la pièce à souder ainsi que la poudre de mélange aluminothermique (Voir Figure II.10).

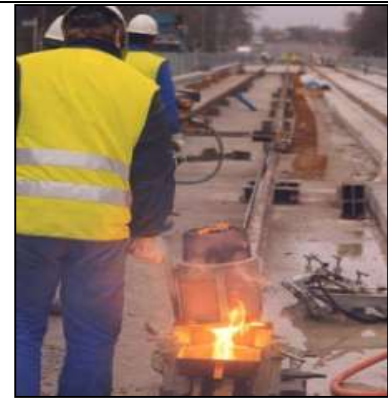
La réaction se développe en quelques secondes et la coulée s'effectue automatiquement après la fin de la réaction. Après la coulée, le creuset et son support sont retirés à l'aide d'une fourche spéciale (jamais manuellement) (Voir Figure II.11) [6].



**Figure II.9 :** Préparation du creuset



**Figure II.10 :** Allumage du mélange



**Figure II.11 :** Enlèvement du creuset

Les creusets ne peuvent jamais être jetés dans de l'eau (En cas de soudage par temps pluvieux, Les produits, ainsi que le champ opératoire (creuset, moules, ...) doivent être protégés efficacement de la pluie).

Le bac à corindon ne doit jamais être retiré avant la fin de solidification complète de son contenu, soit 2 minutes. Il ne faut jamais le déposer ou déverser son contenu sur un sol humide ou gelé, ni sur une traverse, ou pire le jeter dans de l'eau.

Après la solidification complète (3 minutes après la coulée), L'opération de démoulage est obligatoire (doit être commencé environ 5 minutes après la coulée) avant l'ébavurage qui garantit une meilleure géométrie de la soudure.

La soudure réalisée est terminée 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 [5] [6].



*Figure II.12 : Meulage de la soudure*

La mise en service de la soudure est possible qu'après 25 minutes après la coulée, ce qui correspond à une température d'environ 350°C.

### **II.4 Les défauts de la soudure aluminothermique**

Le processus du soudage aluminothermique nécessite une formation et une expertise spéciales pour être exécuté correctement et en toute sécurité. Il semble simple à suivre mais pourtant quelques erreurs ou problèmes fréquents se produisent [20].

- **Inclusions**

Les inclusions d'impuretés peuvent se former pendant le processus de soudage aluminothermique. Les inclusions peuvent provenir de contaminants dans les matériaux utilisés ou de la présence de scories. Ces inclusions peuvent affaiblir la soudure et réduire ses propriétés mécaniques [20].

- **Manque de fusion**

Un manque de fusion se produit lorsque la fusion complète entre les matériaux de soudage n'est pas atteinte. Cela peut se produire en raison d'une mauvaise préparation de la surface, d'une mauvaise quantité de matériau de soudage ou de conditions de soudage inappropriées. Le manque de fusion peut entraîner une soudure faible et fragile [20].

- **Fissuration**

Les fissures peuvent se former dans la soudure aluminothermique en raison de contraintes thermiques ou de contraintes mécaniques. Les différences de coefficient de dilatation thermique entre les matériaux soudés et les variations de température peuvent provoquer des contraintes excessives et conduire à la formation de fissures [20].

- **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 [20].

- **Étanchéité**

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) [20].

- **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 [20].

- **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 [5] [20].

### II.5 Les procédés de contrôle de la soudure aluminothermique

Les procédés de contrôle de la soudure aluminothermique sont importants pour garantir la qualité et la fiabilité de la soudure réalisée.

Ces procédés de contrôle permettent d'identifier les éventuels défauts de la soudure aluminothermique et de s'assurer de sa conformité aux spécifications techniques.

Voici quelques-uns des procédés de contrôle couramment utilisés pour la soudure aluminothermique :

### II.5.1 Contrôle avant soudage

- 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 [5].

### II.5.2 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 vérification doit y compris :

- La température.
- La qualité de l'élimination du laitier.
- Différents contrôles visuels [5].

### II.5.3 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.

### - Contrôle non destructifs

Il permet de vérifier la qualité de la soudure sans l'en corrompre. Il comprend :

- **Contrôle visuel**

Le contrôle visuel est l'une des méthodes les plus courantes pour évaluer la qualité d'une soudure aluminothermique. Un inspecteur qualifié examine visuellement la soudure pour détecter les défauts tels que les fissures, les inclusions, la porosité, les manques de fusion ou les zones non conformes aux spécifications [5].

- **Contrôle par ressuage**

Le contrôle par ressuage, également connu sous le nom de contrôle par ressuage fluorescent ou pénétrant, est une méthode non destructive utilisée pour détecter les défauts de surface et les fissures. Un produit chimique fluorescent est appliqué sur la soudure, et après un certain temps, il est nettoyé. Si des fissures ou des défauts sont présents, le produit chimique reste visible, ce qui permet de les détecter [5].

- **Contrôle par ultrasons**

Le contrôle par ultrasons utilise des ondes sonores à haute fréquence pour inspecter la soudure. Les ondes sonores sont émises à travers la soudure, et si des défauts tels que des fissures ou des inclusions sont présents, les ondes seront réfléchies ou dispersées, ce qui permet de les détecter [2] [5].

- **Contrôle par radiographie**

La radiographie, également appelée contrôle par rayons X ou contrôle par rayonnement gamma, est une méthode de contrôle non destructive utilisée pour détecter les défauts internes d'une soudure. Des rayons X ou des rayons gamma sont dirigés vers la soudure, et une image radiographique est produite. Les défauts tels que les fissures, les inclusions ou les zones de porosité sont visibles sur l'image radiographique [5].

- **Contrôle par magnétoscopie**

La magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructive utilisée pour détecter les défauts de surface et les fissures. La pièce soudée est aimantée, et une suspension de particules magnétiques est appliquée sur la surface. Les particules magnétiques se concentrent autour des défauts, ce qui les rend visibles pour l'inspecteur [5].

Il est important de noter que ces procédés doivent être réalisés par des professionnels qualifiés et formés dans les techniques de contrôle appropriées pour obtenir des résultats précis et fiables.

### II.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'EN136741, de même profil et de même nuance d'acier [5].

### II.7 Le long rail soudé (LRS)

#### II.7.1 Historique et Définition

Depuis les origines du chemin de fer, la dilatation des rails a été source de désagrément pour les exploitants ferroviaires.

Comme, de toute façon, la technologie alors disponible ne permettait pas d'avoir de longs rails, ce problème fut résolu en laissant, aux joints entre les rails, un espace suffisant à leur libre dilatation. Une voie posée selon cette méthode est dite en «**barres normales**».

Cependant, les joints, du fait de cette discontinuité du roulement, entraînent des chocs au passage des roues. Outre l'inconfort ressenti par les passagers, ces chocs entraînent une usure

des constituants du joint ainsi que du ballast sous les traverses supportant le joint et nécessitent un entretien très régulier (Le coût de la maintenance est très élevé).

Les exploitants ont donc toujours cherché une solution pour supprimer les joints. C'est ainsi que, dès les années 1930, fut théorisé le fonctionnement des longs rails soudés ou LRS.

Les longs rails soudés ou LRS, appelés aussi « barres longues », constituent une méthode moderne de pose des voies ferrées qui présente l'intérêt de supprimer la plupart des joints de rails sur des longueurs importantes, souvent de plusieurs kilomètres. C'est la méthode de pose actuelle adoptée pour toutes les lignes à fort trafic, et notamment les lignes à grande vitesse.

Comme les matériaux de l'époque, en particulier les attaches rigides, n'assuraient pas un maintien suffisant et ne permettaient donc pas une mise en œuvre aisée de cette nouvelle technologie. Il fallut attendre la mise au point des attaches élastiques pour reprendre l'expérimentation puis passer à la généralisation du procédé.

### II.7.2 Processus de fonctionnement du long rail soudé

La pose des rails se fait normalement avec des joints de dilatation, les rails, de 18 ou 36 m de long, coulissant librement dans les éclisses (pièces qui assurent la jonction de deux rails successifs).

De plus en plus se développe la technique dite des « barres longues » ou LRS (longs rails soudés), dans laquelle les coupons de rail de 80 m (Dans notre projet 36 m) sont soudés en atelier en longueurs de 320 à 400 mètres (Dans notre projet 288 m). Ces barres sont posées sur de très grandes longueurs, sans limite réelle, les soudures nécessaires étant réalisées sur place par :

- **Soudage par forgeage électrique** : Il est réalisé à poste fixe ou à l'aide de machines mobiles (Soudeuse électrique). Le matériau à rail est chauffé et soudé par courant électrique, aussi le cordon de soudure est réalisé par le matériau que les rails.
- **Soudage aluminothermique** : C'est un processus d'oxydation exothermique de l'aluminium avec du fer ou de l'oxyde ferrique. Des additifs supplémentaires et des matériaux d'alliage spécifiques transforment le fer. Ce type de soudage est pratiqué sur site pour le raccord en voie des barres longues ou des appareils de voie, et il ne nécessite que des moyens légers.

Le libre mouvement du métal en fonction de sa température est bridé par sa fixation ferme aux traverses, elles-mêmes ancrées dans le ballast.

Les mouvements contrariés du métal se transforment en contraintes de compression (lors de températures élevées) ou de tension (lors de basses températures), qui peuvent atteindre jusqu'à 140 tonnes pour une voie armée de rails de 60 kg/m.

Ces contraintes dépendent des variations de températures et de la section du rail, mais sont indépendantes de sa longueur [1] [5].

A l'extrémité du LRS se trouve une zone où la libre dilatation du rail n'est plus totalement compensée, « **la zone de respiration** ». Les mouvements de l'extrémité du rail étant supérieurs à ce qu'un joint peut normalement absorber, on y installe des dispositifs de dilatation spéciaux qui permettent aux rails de coulisser (Voir **Figure II.13**), tout en assurant sans hiatus la continuité du roulement [16].

L'appareil de dilatation est un dispositif de dilatation, il est constitué de deux rails (aiguilles) taillés en biseau venant se plaquer contre deux autres rails usinés (contre-aiguilles) de manière à ce qu'il n'y ait pas de discontinuité dans la surface de roulement. Le couple aiguille/contre-aiguille est maintenu en contact par des coussinets (de glissement) interdisant tout déplacement latéral tout en autorisant un libre déplacement longitudinal (Voir **Figure II.13**) [16].



*Figure II.13 Appareil de dilatation pour LGV.*

### II.7.3 Avantages et inconvénients des LRS

Les principaux avantages des LRS sont :

- Réduction des coûts de maintenance.
- Réduction des défauts et d'usure de rail.

- Diminution du bruit et des émissions sonores.
- Mécanisation plus facile de la pose et de la maintenance de la voie.

Les principaux inconvénients des LRS sont :

- Un risque de déformation par flambement de la voie sous les contraintes de compression excessives lors de périodes de très fortes chaleurs.
- Un risque plus grand par rapport aux barres normales de rupture de rail lors des périodes de grand froid.
- Une utilisation de quantités de ballast plus importantes afin de mieux ancrer les traverses.
- Une technicité plus grande de leur mise en œuvre et de leur entretien, nécessitant un personnel bien formé [1] [4].

### II.7.4 La libération des LRS

Le libre mouvement du métal se transforme en contraintes dépendant des variations de températures (Contraintes de compression lors de températures élevées ou Contraintes de tension lors de basses températures )

Pour limiter ces contraintes, on devrait idéalement poser les barres longues à une température moyenne entre les extrêmes attendus appelée « température de référence ». Cette température de référence est , par exemple, en général de  $30\text{ °C} \pm 5$  en Algérie.

Pour ce faire, la pose de rails est suivie d'une opération appelée « **libération des contraintes** » visant à homogénéiser les contraintes à l'intérieur du rail et à le fixer ensuite conformément à la température de référence souhaitée [24].

La libération désigne l'ensemble des opérations permettant de déterminer la température à laquelle le LRS (Long Rail soudé) ne présente aucune contrainte dans sa partie centrale. Elle est réalisée sur les deux files de rail, sauf dans deux cas particuliers (lors du remplacement continu des rails sur une seule file et lors du remplacement d'un élément de LRS dont la soudure la plus proche de l'extrémité se situe entre 30 et 100 mètres de l'extrémité du LRS).

Cette opération doit être effectuée sur une voie stabilisée. On parle de libération partielle lorsque seule une fraction d'un LRS déjà libéré est concernée [7] [24].

L'homogénéisation des contraintes est obtenue de la façon suivante :

- On détache le rail des traverses,

- On insère des rouleaux sous le rail afin qu'il puisse librement se déplacer dans le sens longitudinal,
- On le met en vibration en le frappant à l'aide de masses caoutchoutées prévues à cet effet.
- L'homogénéisation ne doit pas se rapprocher à moins de 150 m des extrémités du LRS (zone libre) [7] [24].

Ensuite, en fonction de la température réelle du rail :

- Si elle est proche de la température de référence idéale, on refixe les rails tels quel et l'on soude. (Libération à température naturelle)
- Si elle est inférieure (cas le plus fréquent car on évite ce type de travaux par temps chaud), les rails sont mis en traction à l'aide de vérins hydrauliques afin de compenser la différence avec la température de référence puis on refixe les rails et l'on soude. (Libération à l'aide de vérins hydrauliques)
- Si enfin elle est trop élevée, on effectue une libération à température naturelle, mais on devra revenir, lorsque les conditions de températures réelle le permettront, effectuer une nouvelle libération afin d'être conforme à la température de référence idéale. Si cette nouvelle libération n'est pas effectuée à temps, on risque, lors des premiers grands froids suivants, des ruptures du rail dues à de trop fortes contraintes de traction et de circulation [7] [24].

### • Notion de température

La température dont il est question dans la libération n'est pas la température ambiante, mais celle du métal constituant le rail. Celle-ci peut être très différente de la température ambiante.

Elle peut par exemple être très élevée lorsque le soleil chauffe la voie alors que l'air ambiant lui-même reste doux. De même, par temps froid, la température propre du métal est généralement inférieure à la température ambiante [7] [8].

On relève cette température soit :

- En plaquant un thermomètre sur le patin du rail à l'ombre.
- En utilisant un thermomètre introduit sur un coupon de rail de mêmes caractéristiques que le rail constituant le LRS et soumis aux mêmes conditions extérieures [7] [8].

- Calcul des contraintes dans les LRS

**S** : Section du rail (mm<sup>2</sup>).      **F** : Force thermique dans le rail (N).

**ΔT** : Différence de température avec la température d'incorporation (soudure)(°C).

**α** : coefficient de dilatation thermique de l'acier (mm/°C/m)

**E** : Module de Young du matériau constituant le rail (MPa).

$$\sigma = E . \epsilon = E . \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{S}$$
$$\Delta L = \alpha . \Delta T . L$$
$$\sigma = E . \alpha . \Delta T \quad \text{et} \quad F = E . S . \alpha . \Delta T$$

*Figure II.14 Equation du dilatation du LRS en fonction de la température*

Application numérique :

$S = 7\,745 \text{ mm}^2$ .       $\alpha = 0,012 \text{ mm}/^\circ\text{C}/\text{m}$ .

$E = 210\,000 \text{ MPa}$ .       $\sigma = 2,5 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$ .

$\Delta T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$

$F = E . S . \alpha . \Delta T = 19,5 \text{ kN}/^\circ\text{C}$ .

Dilatation du LRS rail non contraint en fonction de la température :

$L = 400 \text{ m}$ .

$\Delta L = 0,012 * 55 * 400 \rightarrow \Delta L = 264 \text{ mm}$ .

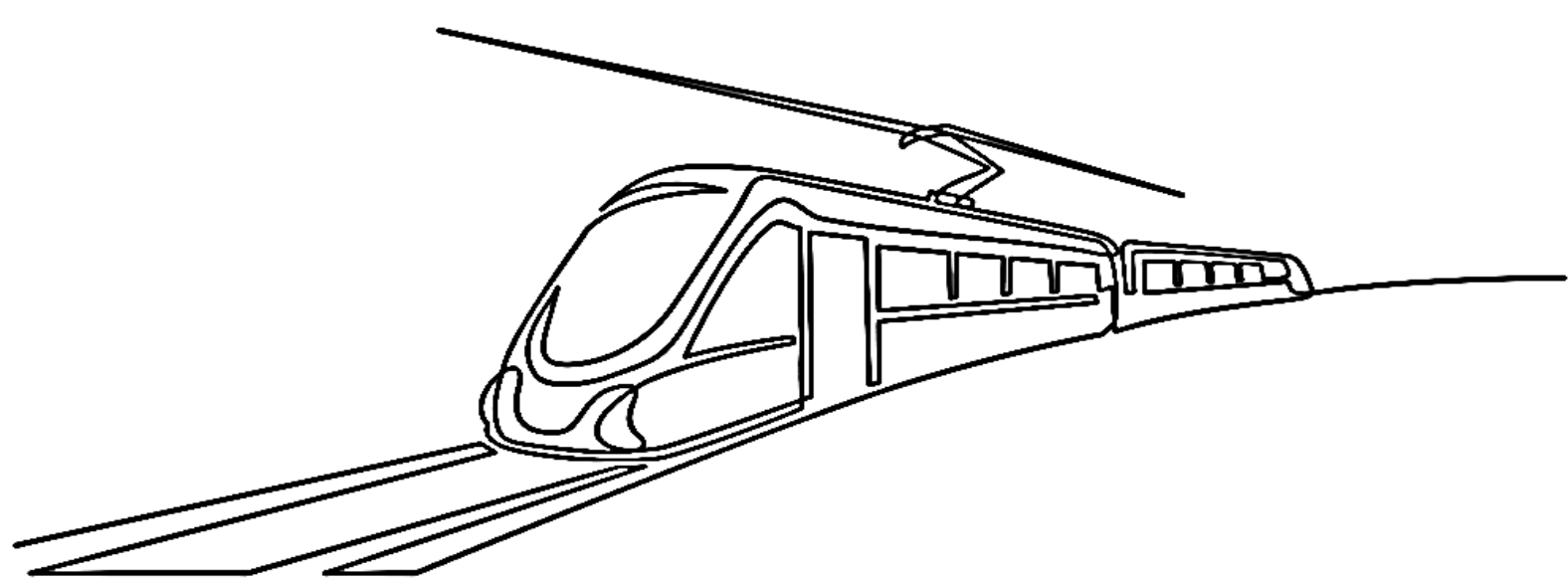
$$F = 1070 \text{ kN} \qquad \sigma = 137 \text{ MPa}$$

### II.8 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons exploré en détail les procédés de soudage des rails, en mettant l'accent sur le soudage aluminothermique et le concept de long rail soudé (le LRS).

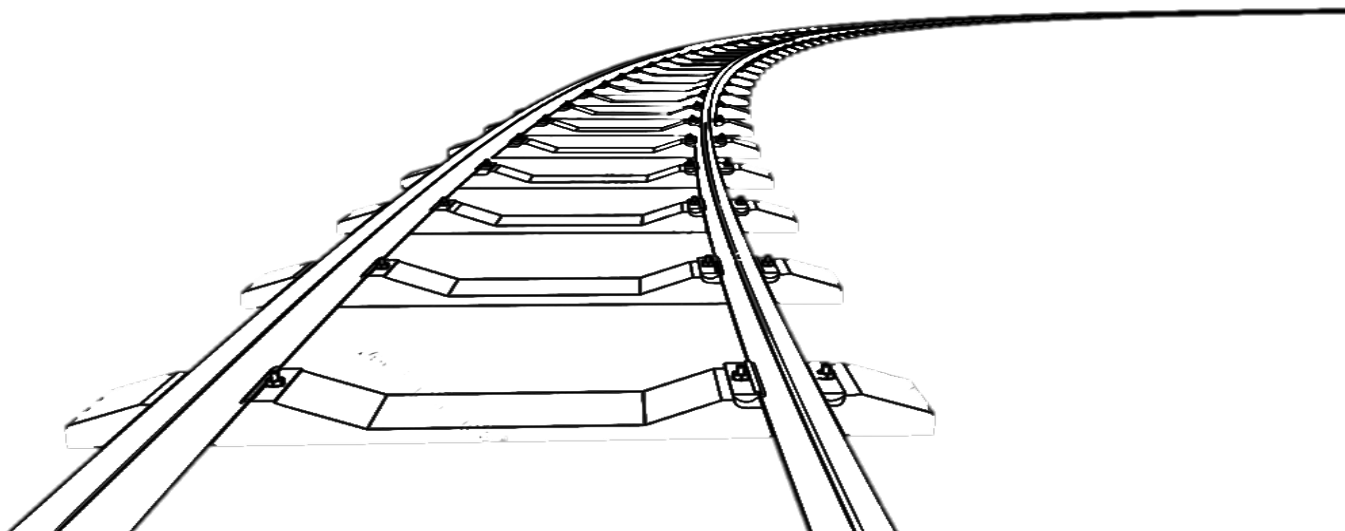
Nous avons examiné la définition du soudage aluminothermique et son processus de soudage, ainsi que les défauts qui peuvent survenir et les méthodes de contrôle associées. De plus, nous avons discuté de l'importance de la norme de soudure aluminothermique pour garantir des résultats de soudage fiables et de qualité.

Enfin, nous avons exploré l'historique du LRS, son fonctionnement et les avantages et inconvénients associés. En comprenant ces concepts clés, nous sommes maintenant prêts à avancer vers les prochains chapitres, où nous aborderons d'autres aspects pertinents de notre étude sur les systèmes de rail.



## **Chapitre III**

**Modélisation du comportement  
du rail sous l'effet de la variation  
de température à l'aide des codes  
ABAQUS et ANSYS**



### **III.1 Introduction**

La voie ferrée est réalisée en long rail soudé (LRS) afin d'assurer la continuité du chemin de roulement, dont la longueur peut atteindre des centaines de mètres voire des kilomètres. L'élévation de température ambiante provoque des contraintes thermiques et mécaniques (contraintes de compression) dans le rail. Ces contraintes provoquent des déformations latérales ce qui peut affecter la stabilité du rail. Ce phénomène est connu sous le nom de flambage thermique. Les exploitants installent des appareils de voie afin de permettre la dilatation des rails en cas de fortes chaleurs. Ces appareils permettent une diminution importante des contraintes de compression dans les LRS.

Dans cette partie, on rappellera des notions d'élasticité, et de thermo élasticité. Ensuite, nous nous intéressons à évaluer la dilatation du rail, et les contraintes mécaniques et critiques de flambement sous les codes de calcul Abaqus et Ansys. Pour ce faire, on choisira le type de rail UIC 60, et ayant une longueur donnée.

### **III.2 Théorie d'élasticité**

La théorie de l'élasticité trouve son origine dans la pratique, le domaine de construction, (pont construction mécanique automobile...), font signe de l'utilisation des propriétés des corps solides ...), capables de supporter et transmettre certaines charges. L'étude des propriétés de la matière permet la compréhension des phénomènes, les prévoir et, de concevoir dans les conditions souhaitables. La théorie de l'élasticité est l'une des branches les plus vigoureuses de la mécanique des milieux continus déformables, ses lois régissent l'étude de tous les corps solides qui nous environnent, du point de vue de leurs équilibres et leurs mouvements [9] [18].

Les champs de déformation et de contrainte dans un milieu continu sont liés par des lois Appelées lois de comportement. Ces lois caractérisent le comportement mécanique de ce milieu. Le comportement élastique d'un milieu continu est caractérisé par une relation linéaire liant les contraintes aux déformations :

$$\sigma_{ij} = 2G \varepsilon_{ij} + \lambda \text{tr}(\varepsilon) \delta_{ij}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \text{tr}(\sigma) \delta_{ij}$$

Avec : E : Module de YOUNG,  $\lambda$  et G : Coefficients de LAME,

$\nu$  : Coefficient de POISSON, et  $\delta_{ij}$  : Symbole de Kronecker,

le symbole  $Tr$  : Signifie la trace du tenseur.

Tels que :  $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ ,  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ,

Ou encore sous forme de tenseurs :

$$[\sigma] = [C][\varepsilon]$$

$$[\varepsilon] = [S][\sigma]$$

Avec  $[C]$  et  $[S]$  représentent respectivement les tenseurs de rigidité et de souplesse.

Compte tenu de la symétrie des tenseurs de contrainte  $[\sigma]$  et de déformations  $[\varepsilon]$ , on peut dire que ces deux tenseurs sont aussi symétriques et on peut écrire [18] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ \bullet & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ \bullet & \bullet & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ \bullet & \bullet & \bullet & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & C_{55} & C_{56} \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ \bullet & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ \bullet & \bullet & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ \bullet & \bullet & \bullet & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & S_{55} & S_{56} \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

### III.3 Notation de l'ingénieur

Les composantes des tenseurs de contraintes et de déformations peuvent être réduites à six composantes indépendantes à cause de la propriété de symétrie de ses deux tenseurs.

Pour des raisons de commodité et de simplification de l'écriture, la notation tensorielle peut être contractée en utilisant la notation suivante appelée notation de l'ingénieur [9] [19].

- **Le tenseur de contrainte :**

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \Rightarrow [\sigma] = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} = \sigma_{32} \\ \sigma_{13} = \sigma_{31} \\ \sigma_{12} = \sigma_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}$$

- **Le tenseur de déformation :**

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \Rightarrow [\varepsilon] = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{13} = \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}$$

### III.4 Influence de la température (Thermo élasticité)

Les solides se dilatent sous l'influence de la température, donc si un milieu continu est exposé à une variation de température  $\Delta T$  variable, cette différence affecte le tenseur de déformation, et la déformation thermique  $\varepsilon^T$  est donnée par [9] [19] :

$$\varepsilon_{11}^T = \varepsilon_{22}^T = \varepsilon_{33}^T = \alpha \cdot \Delta T$$

Avec  $\alpha$  : coefficient de dilatation thermique du matériau.

Et les relations de comportement ou de thermo-élasticité deviennent :

$$\sigma_{ij} = 2G \varepsilon_{ij} + \lambda \text{tr}(\varepsilon) \delta_{ij} - \frac{E \alpha \Delta T}{1 - 2\nu} \delta_{ij}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \text{tr}(\sigma) \delta_{ij} + \alpha \cdot \Delta T \cdot \delta_{ij}$$

### III.5 Dilatation et contraintes thermiques

#### III.5.1 Dilatations thermiques

On peut calculer pour tous les matériaux isotropes la variation de longueur et donc de volume en fonction de la variation de température :

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

Avec :

$\Delta L$  : est la variation de longueur en mètre (m)

$\alpha$  : est le coefficient de dilatation linéaire en kelvin puissance moins un ( $k^{-1}$ )

$L_0$  : est la longueur initiale en mètre (m)

$\Delta T = T - T_0$  : la variation de température en kelvin (K) ou en degré Celsius (°C)

#### Remarque :

Puisqu'on utilise une variation (une différence de température) la différence d'origine entre kelvin et degré Celsius s'annule, la distinction n'est donc pas nécessaire (On peut directement calculer la longueur en fonction de la température) [9] [19].

#### III.5.2 Contraintes thermique

La contrainte thermique Dans certaines conditions d'utilisation peut être soumise à des variations plus ou moins brusques de température, ces variations entraînent des variations dimensionnelles du matériau. Par conséquent, lorsque le matériau n'est pas libre de se dilater ou de se contracter, il se trouve soumis à des contraintes thermiques. Ces contraintes sont dues aux gradients de déformation qui se développent dans sa structure, dont tous les éléments sont incapables de se déformer librement [9] [19].

On distingue 2 types de dilatation thermique :

▪ **Contrainte thermique à température uniforme :**

Considérons un corps qui a subi un changement en température de  $T_0$  à  $T_1$  uniformément réparti. Le corps va se dilater simplement d'une grandeur  $\alpha.(T_1-T_0)$  où  $\alpha$  est le coefficient de dilatation thermique [9].

▪ **Contrainte thermique due à un gradient de température (Choc Thermique) :**

La contrainte due à un choc thermique provient d'un gradient de température dans le matériau. Il est donc nécessaire de connaître la variation de la température en fonction du temps à l'endroit où on veut analyser cette contrainte [9].

### III.6 Présentation du logiciel Abaqus

#### III.6.1 Introduction

ABAQUS/CAE™ est un code de calcul qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (M.E.F). Dans ce cadre il présente un système complet intégrant non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également les fonctions de construction du modèle et les fonctions de traitement des résultats ABAQUS/CAE™ est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaire, des problèmes thermiques etc...ABAQUS compose de trois produits ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE [10] [27].

#### III.6.2 Système d'unités dans le code de calcul ABAQUS

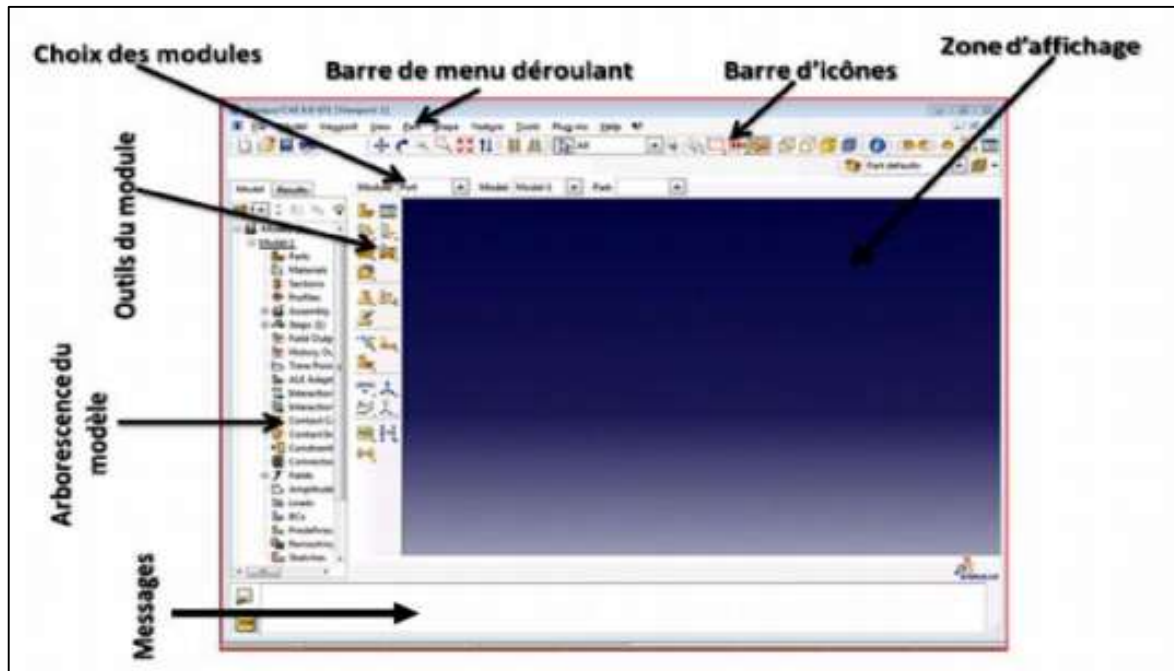
Comme dans beaucoup de logiciels, il n'y a pas de système d'unités fixé. C'est à l'utilisateur de définir son propre système. Le tableau (**Tableau III.1**) présente les différentes unités pour la résolution d'un problème mécanique avec le code ABAQUS [10] [27].

Masse	Longueur	Temps	Force	Pression	Energie
M	L	T	$MLT^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$	$ML^2T^{-2}$
Kg	m	s	N	Pa	J
g	mm	ms	N	mPa	mJ
Tonne	mm	s	N	mPa	mJ

*Tableau III.1 : Système d'unités pour la programmation*

### III.6.3 Organisation de l'interface ABAQUS CAE (complète ABAQUS environnement)

Il est important de savoir que le module CAE (**Figure III.1**) que vous allez utiliser pour créer votre jeu de données est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise en données de problèmes relativement classiques. Donc pas toutes les commandes utilisables dans ABAQUS et fait souvent le choix de paramètres par défaut [10] [27].



*Figure III.1 : Organisation d'ABAQUS*

### III.6.4 Modules

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules, figures.

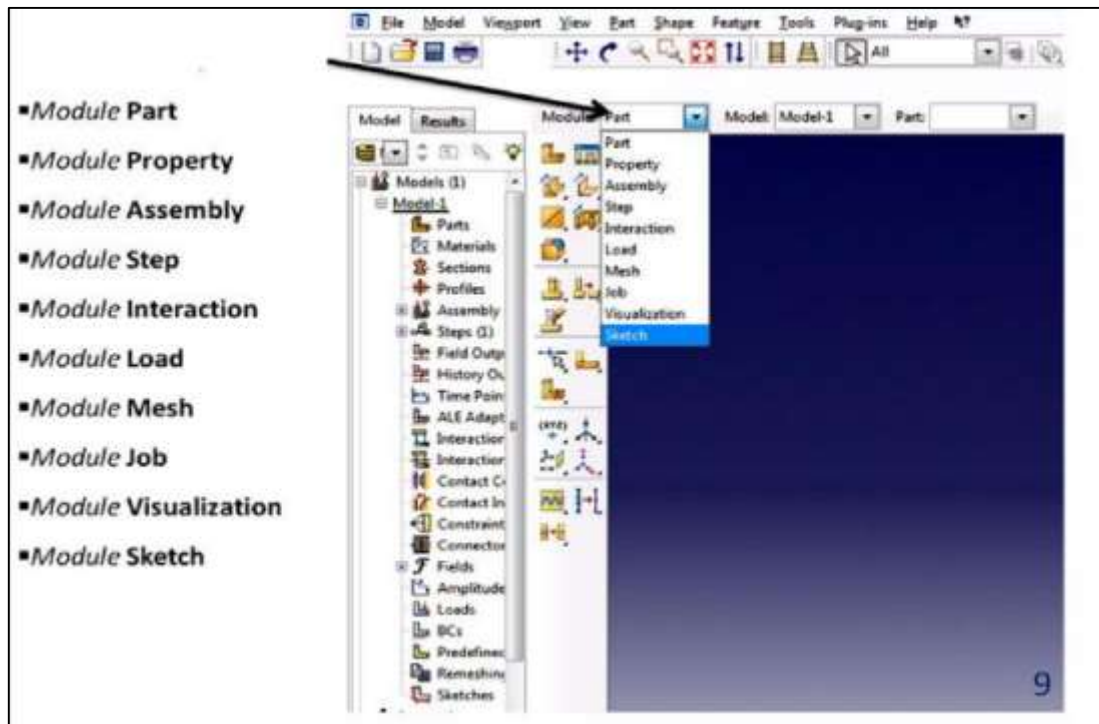


Figure III.2 : Réalisation de la mise en données d'un problème

### III.6.5 Éléments dans ABAQUS

- Un très large choix d'éléments (plus de 100) (Voir Figure III.3).
- Chaque élément est caractérisé par : famille, ddl, nombre de nœuds, intégration.
- Possibilités de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard) [10].

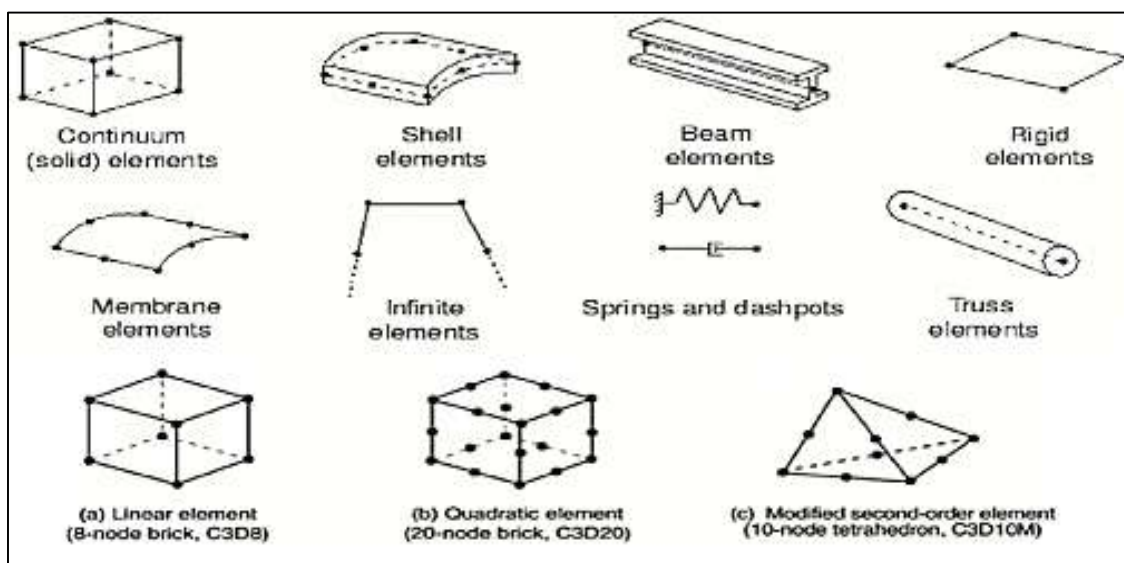
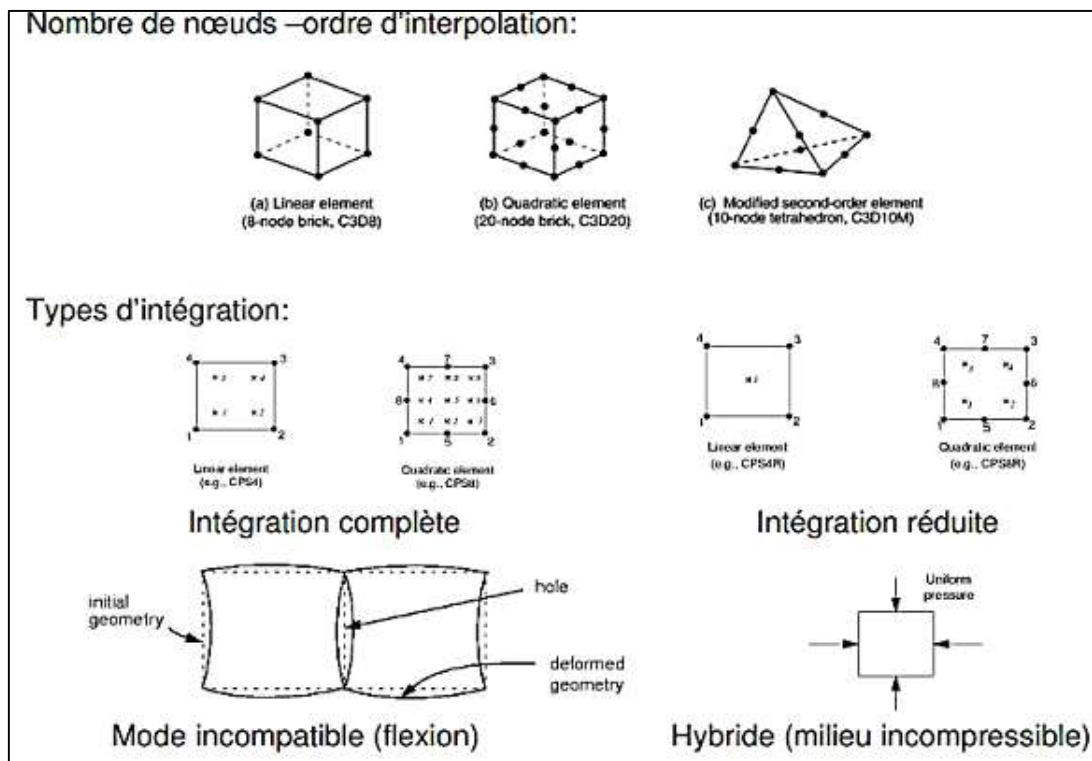


Figure III.3 : Quelques éléments dans Abaqus



*Figure III.4 : Les types d'intégrations et le nombre de nœuds.*

### III.6.6 Différents fichiers pour la simulation sous ABAQUS

- **Fichier d'entrée (Input file) :**

Avec une extension .inp, il contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les chargements de la structure étudiée.

La génération du fichier .inp se fait :

- ✓ Avec un éditeur (fichier texte) ou programme en connaissant les divers mots clés de commande Abaqus.
- ✓ Avec l'interface graphique Abaqus/CAE [10].

- **Fichier de résultats (output file) :**

Avec une extension .odb, il contient les contours et courbes de résultats.

- **Autres fichiers créés par Abaqus lors de la simulation**

- ✓ **Fichier .com :** exécutable de vos calculs.
- ✓ **Fichier .res :** fichier binaire de reprise.
- ✓ **Fichier .dat :** liste des résultats, résumé de votre modélisation.

# Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

- ✓ **Fichier .msg** : résumé du déroulement du calcul en cours, message d'erreur.
- ✓ **Fichier .fil** : fichier binaire des résultats.
- ✓ **Fichier .log** : fichier de procédure.
- ✓ **Fichier .sta** : Fichier statistique ... ets [10].

## III.7 Présentation du logiciel Ansys

### III.7.1 Introduction

Le logiciel ANSYS est un outil de développement en analyse d'ingénierie. La méthode d'analyse utilisée est celle des éléments finis. Les solutions logicielles proposées permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception. ANSYS permet la modélisation de structures, produits, composants ou systèmes et d'étudier leurs réponses physiques telles que les niveaux de contraintes, les distributions de température ou l'effet de champs électromagnétiques [11] [12].

### III.7.2 Interface Workbench sur Ansys

L'interface Workbench est la plateforme qui encapsule les différentes applications de simulation: Mechanical, Fluent, ACP (Composite), DesignXplorer (Optimisation), SpaceClaim (Modélisation), etc. Cette plateforme s'appuie sur une vue schématique du projet de simulation pour permettre à l'utilisateur de facilement organiser et lier ses différents calculs [12].

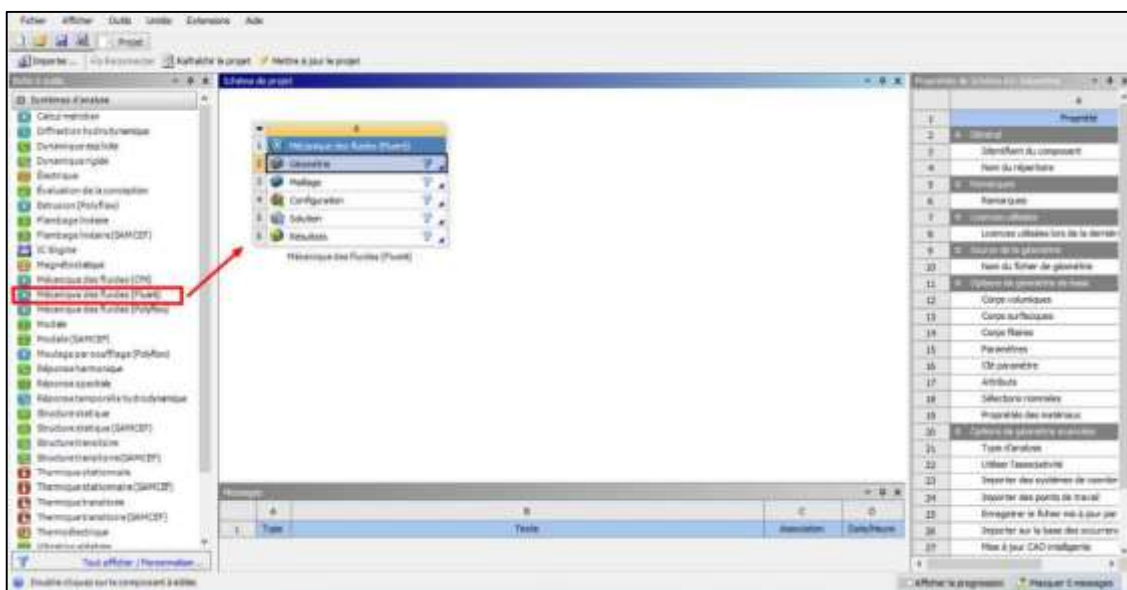
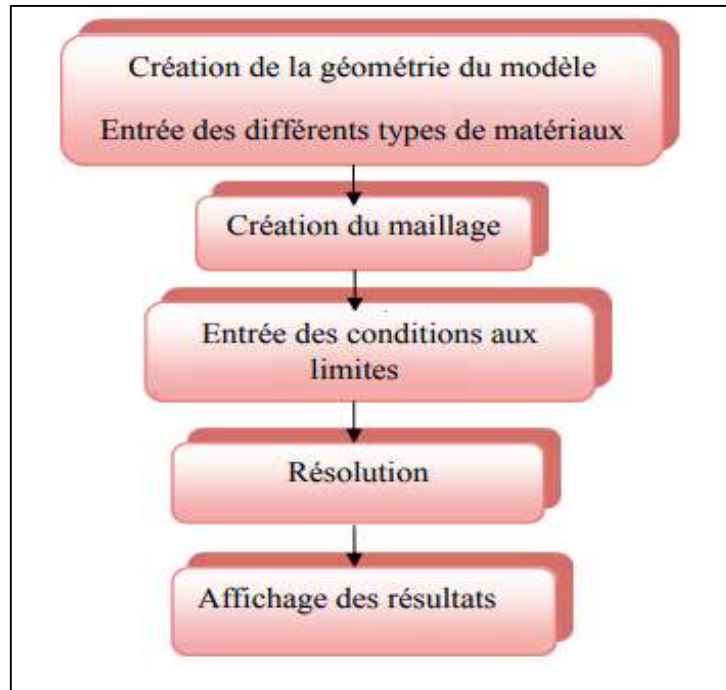


Figure III.5 : L'interface de WorkBench

### III.7.3 Simulation sur Ansys

Pour réaliser des simulations par ce logiciel, nous devons suivre les étapes suivantes :



*Figure III.6 : Les étapes de la réalisation de simulation [11]*

- **La géométrie (DesignModeler)**

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler: coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle.

Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres [12].

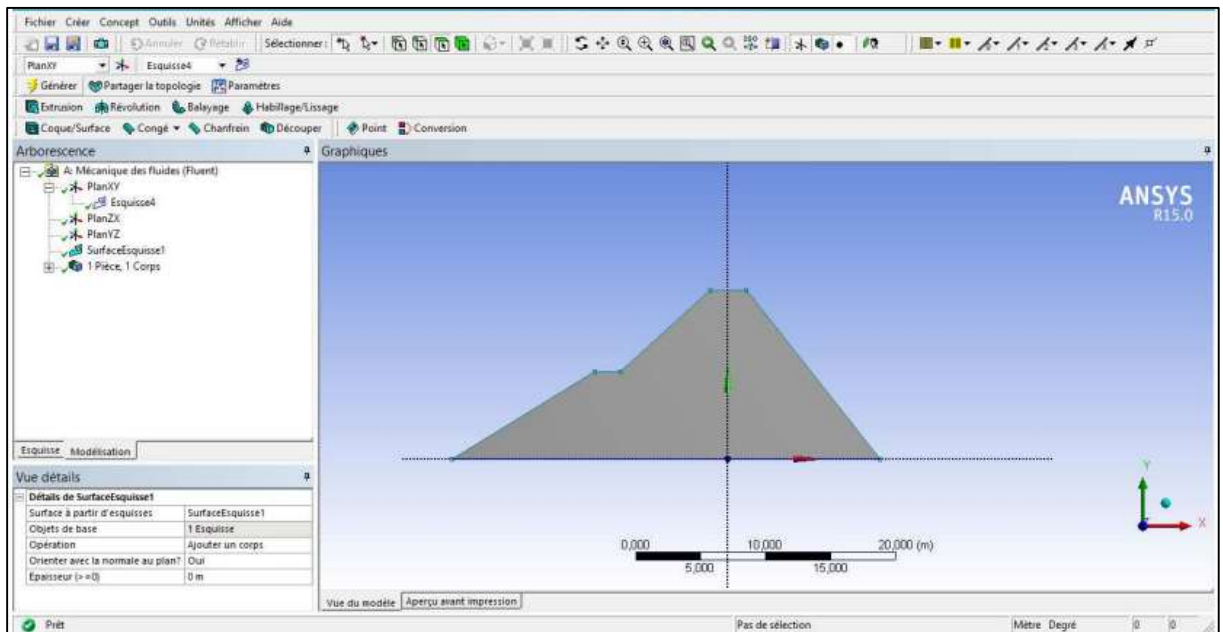


Figure III.7 : Création d'une géométrie sur Ansys

### ▪ Le maillage

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques x et y ou indices i et j.

Le maillage subdivise le domaine physique en petites cellules qui est en relation entre eux. Chaque cellule est défini par un nœud qui stocke les paramètres des inconnues en fonction des conditions aux limites [12].

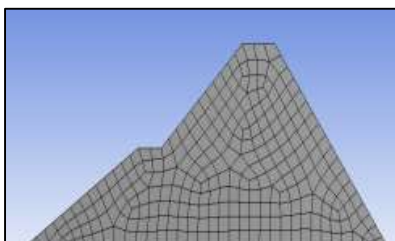


Figure III.8 : Maillage quadrilatère

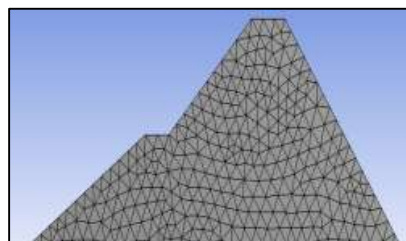


Figure III.9 : Maillage triangulaire

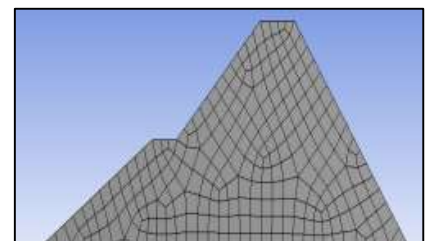


Figure III.10 : Un maillage avec les deux méthodes

▪ **Conditions aux limites**

La prise en compte des limites est un aspect très important lors de l'utilisation des techniques numériques dans le but d'obtenir de bons résultats. L'utilisateur doit être définir les limites de la géométrie, c'est-à-dire les conditions qu'on peut imposer pour notre simulation.

Comme conditions aux limites, on peut imposer une condition à l'entrée et une autre à la sortie [12].

### **III.8 Application et résultats obtenus**

La soudure aluminothermique des rails permet d'assembler les rails sur les voies et créer une connexion continue et homogène entre des sections de rail de quelques dizaines voire des centaines de mètres et permet la réalisation d'un seul rail. La problématique qui est posée étant : comment des rails de plusieurs kilomètres de longueur se comportent-ils lors de l'augmentation de leur température ?

Cependant, le risque le plus important qui mène à une destruction rapide des voies est le flambage ou flambement, c'est à dire le déplacement latéral et brutal de la voie sur le ballast à cause d'une force de compression trop grande dans les rails.

De la même manière qu'une poutre flambe à partir d'une certaine charge, les voies également sont soumises à cette déformation instable à partir d'une charge trop importante. L'évaluation de la charge critique est un enjeu majeur pour la sécurité ferroviaire.

Afin d'évaluer les déplacements et les contraintes dans les rails créés par l'augmentation de température, et afin de comparer les résultats, on a utilisé le logiciel ABAQUS utilisant la méthode des éléments finis (MEF) et dont les résultats seraient comparés à ceux du logiciel ANSYS.

#### **III.8.1 Etape 1 : Evaluation de la dilatation thermique d'une poutre encastree-libre**

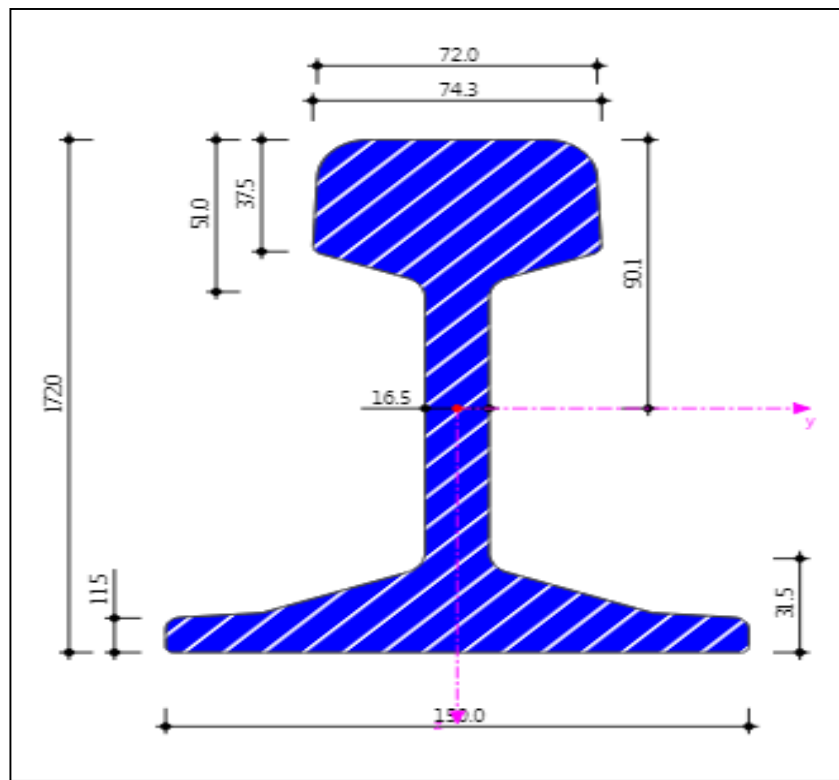
Afin de s'assurer de la bonne utilisation du logiciel dans la modélisation, on cherche à évaluer la dilatation thermique du rail, qui sera calculée par le logiciel Abaqus et vérifiée par Ansys ainsi que le calcul théorique. on a choisi pour la modélisation un rail (ou poutre) de longueur **L= 1m**, ayant un profilé de type **UIC60**.

### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

Les paramètres du tableau suivant sont représentatifs des caractéristiques mécaniques des rails sur le terrain. La variation de température est représentative de la variation entre la température de pose du rail et les valeurs extrêmes atteintes en été.

Module de Young acier $E$ (Pa)	$21.10^{11}$
Coefficient de dilatation $\alpha$ ( $1/^\circ\text{C}$ )	$1,3. 10^{-5}$
Conductivité thermique $\lambda$ ( $\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ )	50
Coefficient de Poisson $\nu$	0.28
Masse volumique $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7700
Chaleur spécifique $J/(\text{kg}\cdot^\circ\text{K})$	460
Section d'un rail $S$ ( $\text{cm}^2$ )	76.70
Module d'inertie vertical rail $I_y$ ( $\text{cm}^4$ )	3038.30
Module d'inertie horizontal rail $I_z$ ( $\text{cm}^4$ )	512.30

*Tableau III.2 : Données caractéristiques du rail*



*Figure III.11 : Profil de la section du rail UIC60*

### III.8.1.1 Modélisation sous Abaqus

✓ La géométrie

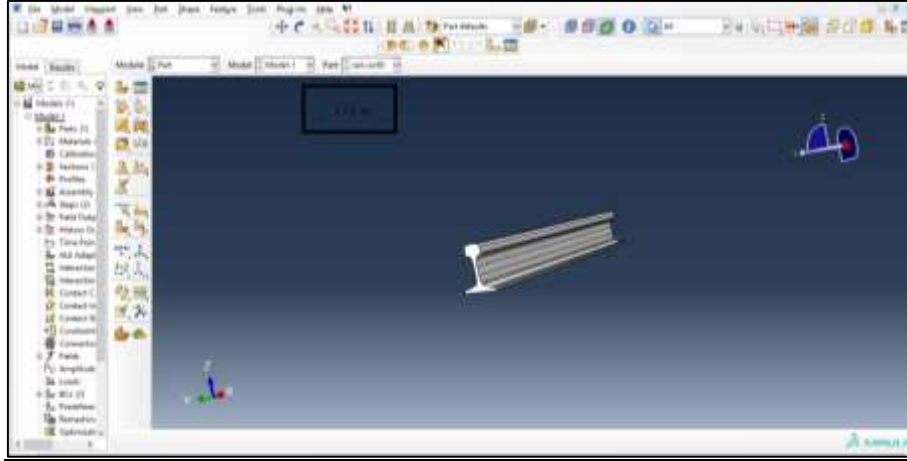


Figure III.12 : Modélisation d'un rail sous Abaqus avec  $L=1\text{ m}$

✓ Le maillage

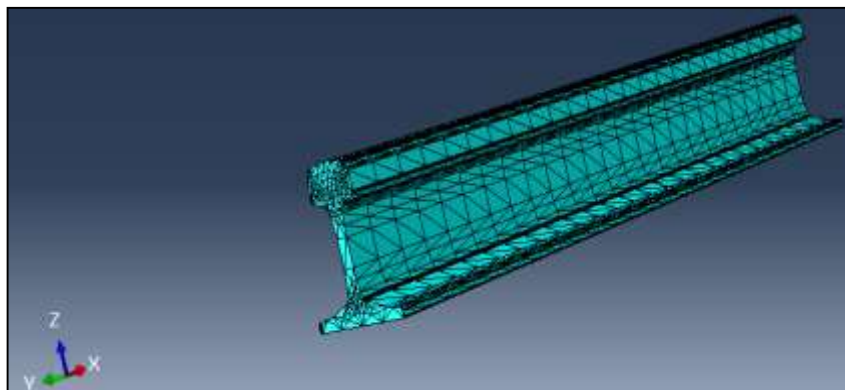


Figure III.13 : Maillage sous Abaqus- élément tétraédrique

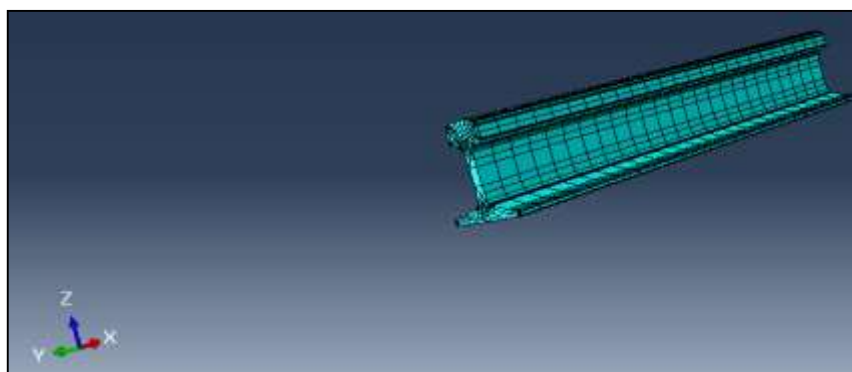


Figure III.14 : Maillage sous Abaqus- élément hexaédrique

### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

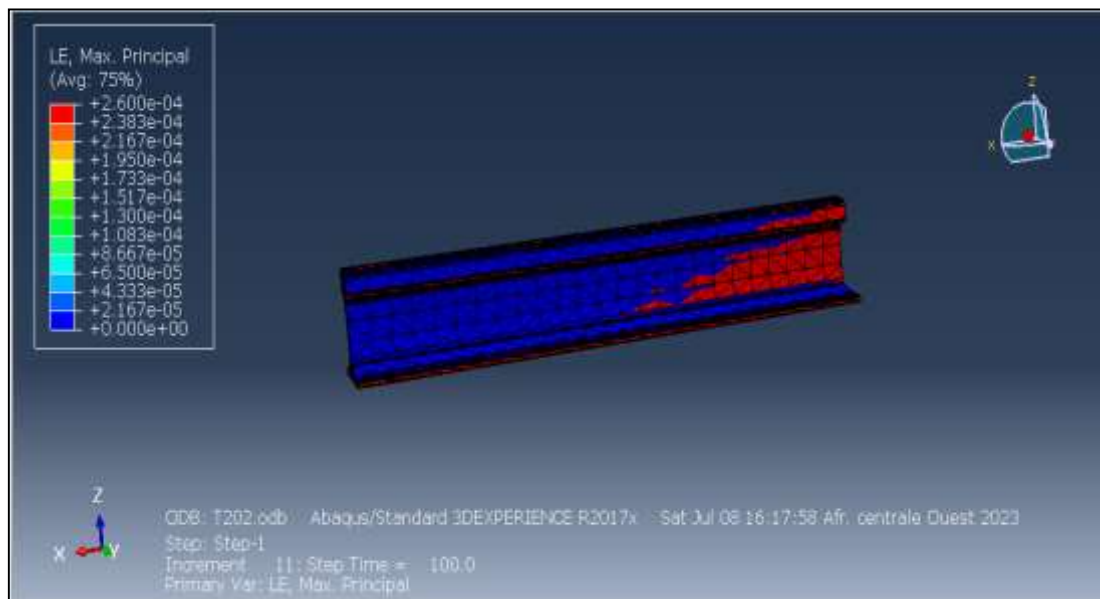
#### ✓ Longueur et Conditions aux limites

L= 1 m, Conditions aux limites : Encastré-Libre.

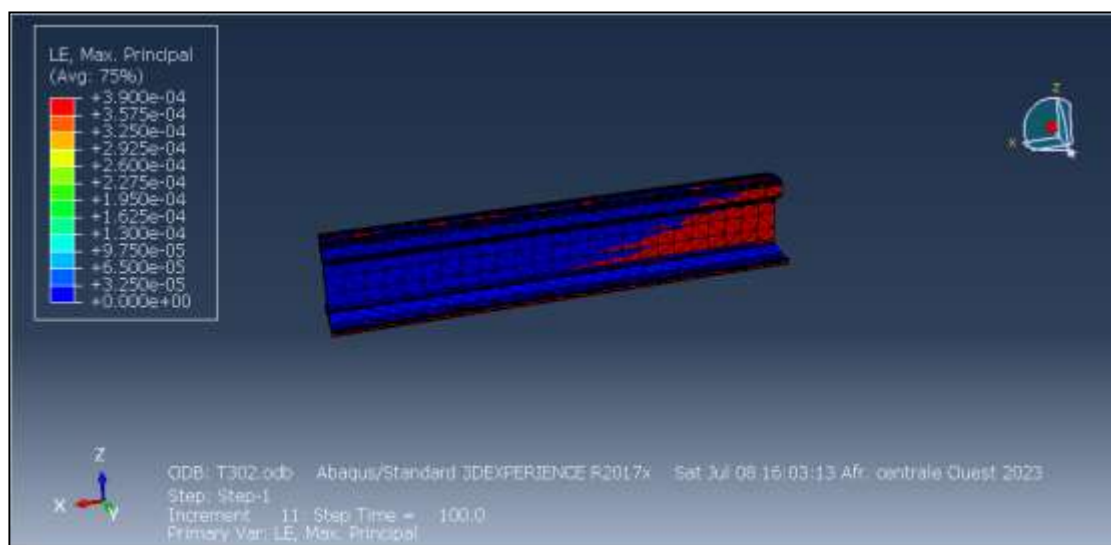
Variation de température  $\Delta T= 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Taille du maillage (Mesh): 0.04.

#### ✓ Résultats obtenus



*Figure III.15 : Dilatation du rail obtenue par Abaqus ( $\Delta T= 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )*



*Figure III.16 : Dilatation du rail obtenue par Abaqus ( $\Delta T= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )*

### III.8.1.2 Modélisation sous Ansys

#### ✓ La géométrie

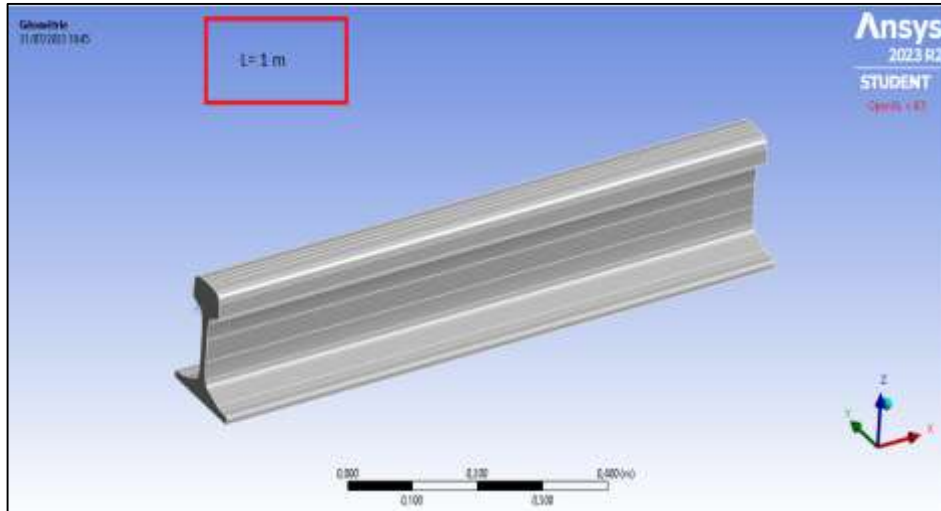


Figure III.17 : Modélisation du rail sous Ansys :  $L=1\text{ m}$

#### ✓ Le maillage

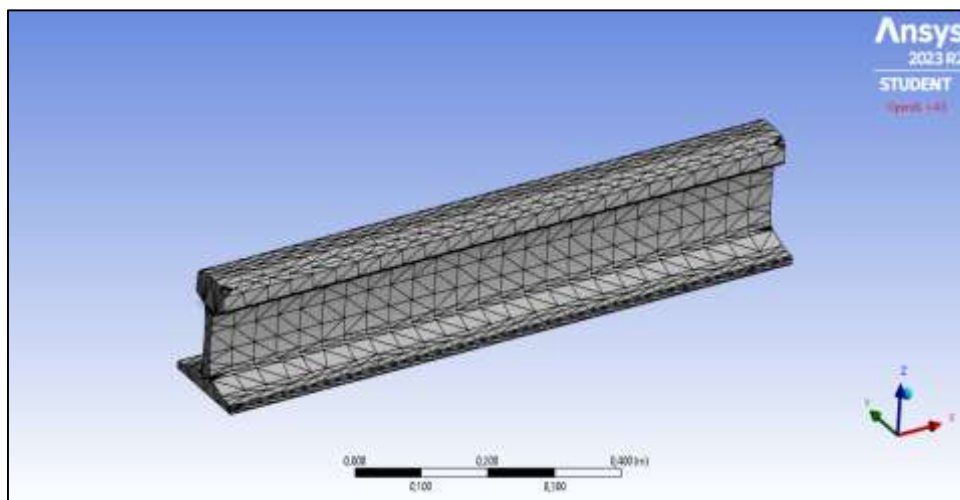


Figure III.18 : Maillage du rail sous Ansys

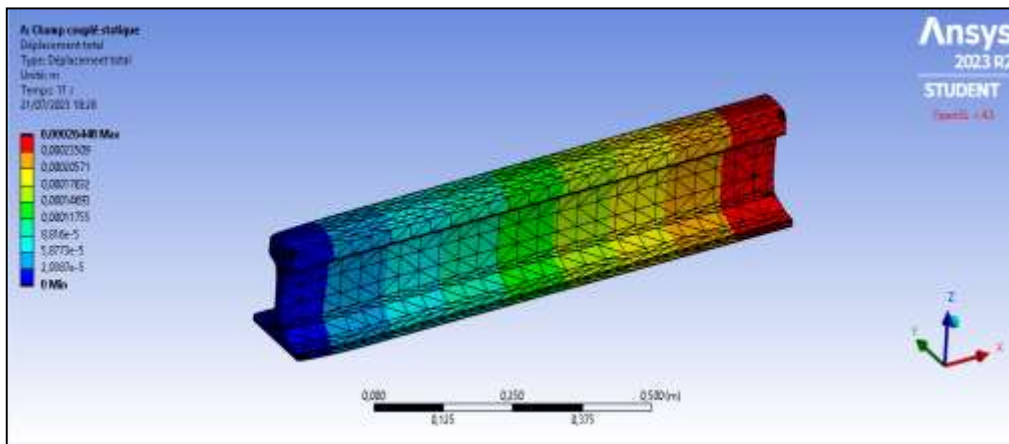
#### ✓ Longueur et Conditions aux limites

$L=1\text{ m}$ , CL : Poutre : Encasturé-Libre.

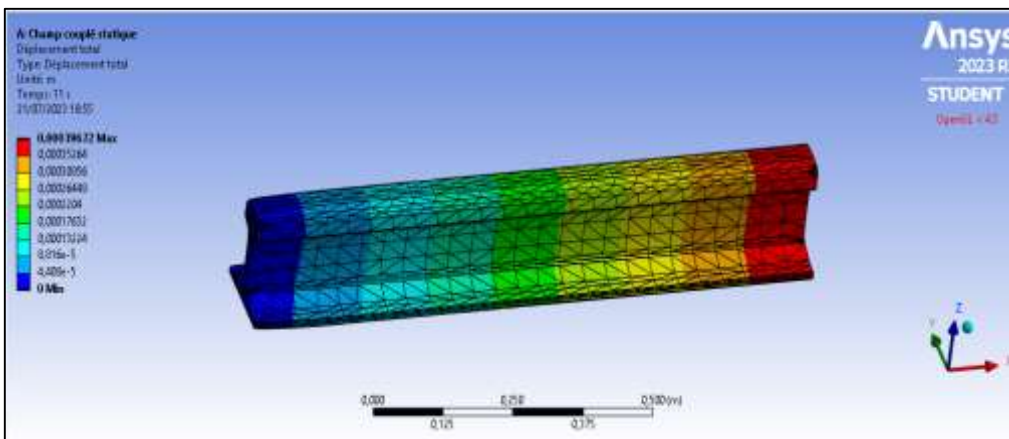
Profilé du rail : UIC60.

$\Delta T= 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

✓ **Résultats obtenus**



**Figure III.19 : Dilatation du rail obtenue par Ansys ( $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )**



**Figure III.20 : Dilatation du rail obtenue par Ansys ( $\Delta T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )**

Les résultats des calculs précédents sont résumés dans le tableau suivant :

	$\Delta T$	Abaqus (MEF)		Ansys (MEF)		Calcul théorique
		Elément hexaédrique	élément tétraédrique	élément hexaédrique	élément tétraédrique	
Dilatation $\Delta L_x$ (m)	20 $^{\circ}\text{C}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,644 \cdot 10^{-4}$	/	$2,6 \cdot 10^{-4}$
	30 $^{\circ}\text{C}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,967 \cdot 10^{-4}$	/	$3,9 \cdot 10^{-4}$

**Tableau III.3 : Dilatation d'un rail encasturé- libre en fonction de la température, Calculée avec ABAQUS et ANSYS.**

Dans cette première étape, l'objectif du choix d'une longueur de 1 m est, d'un côté, afin de maîtriser les étapes de la modélisation pour un problème thermomécanique, ainsi que les données caractéristiques du problème (unités et grandeurs) ; et d'un autre côté, s'assurer du bon choix des paramètres de la modélisation, telle que le type d'élément fini à choisir, la taille du maillage, pour chaque logiciel, la convergence et le temps de calcul afin d'obtenir des résultats précis.

Selon le **Tableau III.3**, l'écart entre le calcul théorique et celui numérique est très faible, on peut dire que les résultats numériques sont satisfaisants et le choix des différents paramètres est donc validé.

### **III.8.2 Etape 2 : Comportement du rail encastré des deux côtés sous l'effet de l'augmentation de température l'aide du logiciel Ansys**

L'intérêt de l'étude dans cette étape est le suivant : lorsque la dilatation axiale de la poutre est empêchée à cause des conditions de frontières (encastrement), la déformation thermique est contrée par une déformation élastique qui va induire une contrainte de compression (ou de traction).

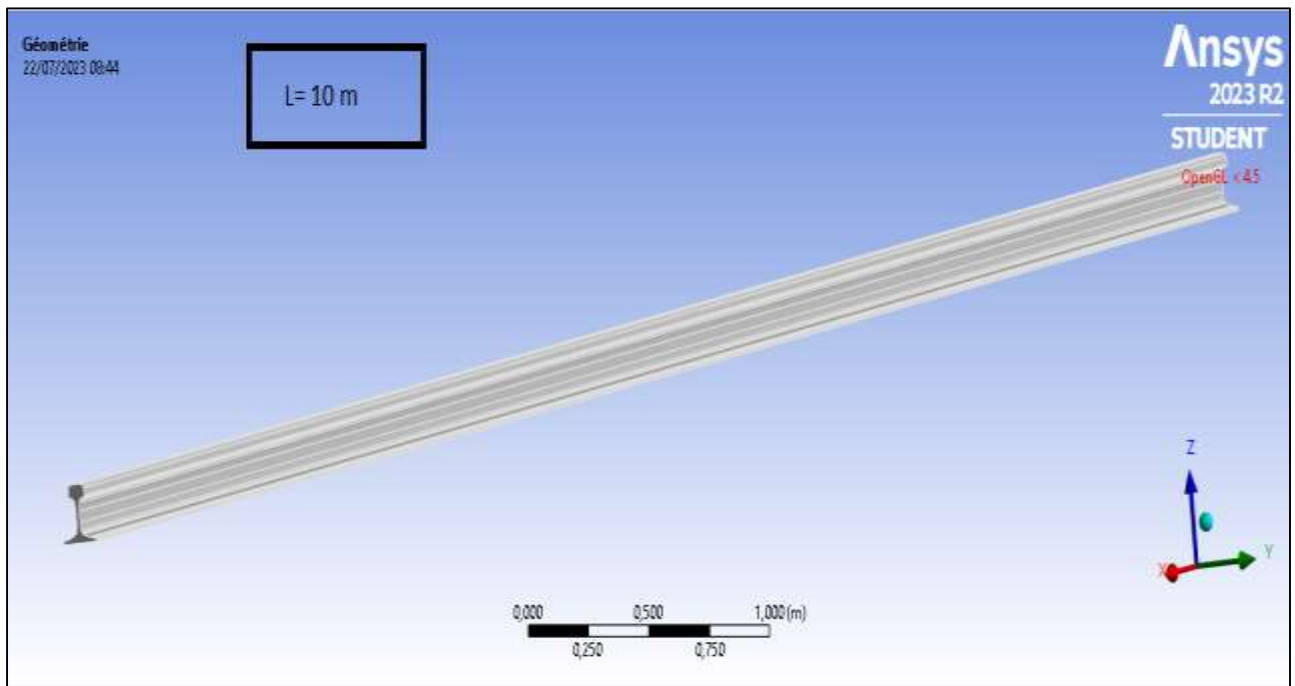
L'étude théorique du long rail soudé se fait sur un rail de longueur infinie. Mais, l'utilisation de la méthode des éléments finis utilise des éléments dont la longueur est finie. Il n'est donc pas possible d'implémenter cette poutre infinie dans Abaqus ou Ansys. Il faut rendre le problème fini et discret.

Egalement, l'introduction des conditions réelles du milieu, telles que l'existence du ballast dans le sens latéral ou la raideur du sol dans le sens vertical ne sont pas pris en considération. Pour cela, on choisira un rail de longueur  $L= 10$  m, dont le profilé de la section est UIC60, et dont le matériau est l'acier.

Sous l'effet de l'augmentation de la température ambiante en été ( $\Delta T$ ), le rail sera soumis à des efforts de compression internes  $F_x$  ( ou contraintes de compression) sur son entièreté. Les simulations suivantes (sous ANSYS) ont pour objet de voir l'évolution des efforts de compression dans le rail et sa déformée statique sous l'effet de l'augmentation de la température. Pour les conditions aux limites, on considère ses extrémités bloquées dans tous leurs degrés de liberté.

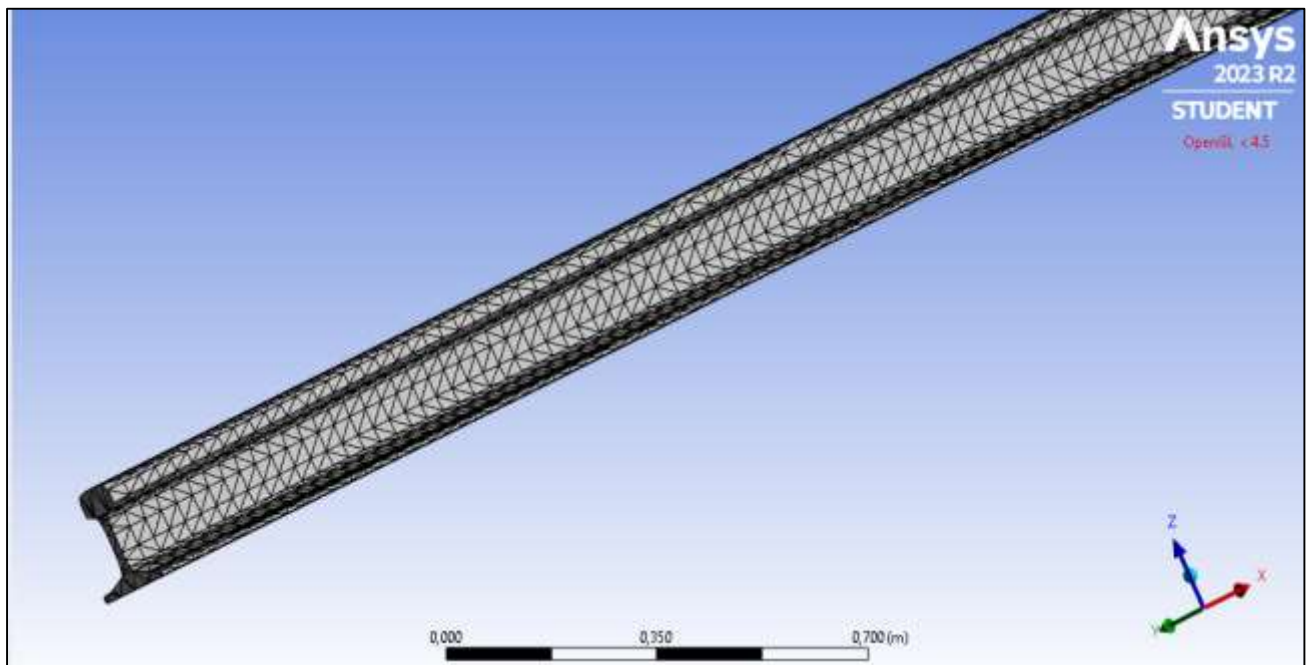
### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

- ✓ **La géométrie** :  $L= 10\text{ m}$ , Profilé du rail UIC60, section  $S= 76,7\text{ cm}^2$



*Figure III.21 : Modélisation du rail sous Ansys :  $L=10\text{ m}$*

- ✓ **Le maillage**



*Figure III.22: Maillage du rail sous Ansys :  $L=10\text{ m}$*

# Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

## ✓ Conditions aux limites

Poutre : Encastrée des deux côtés.

Chargement : Différentes valeurs de l'écart de température,  $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## ✓ Résultats obtenus

- Pour  $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  :



Figure III.23 : Force de réaction à l'encastrement obtenue par Ansys pour  $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

- Pour  $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  :

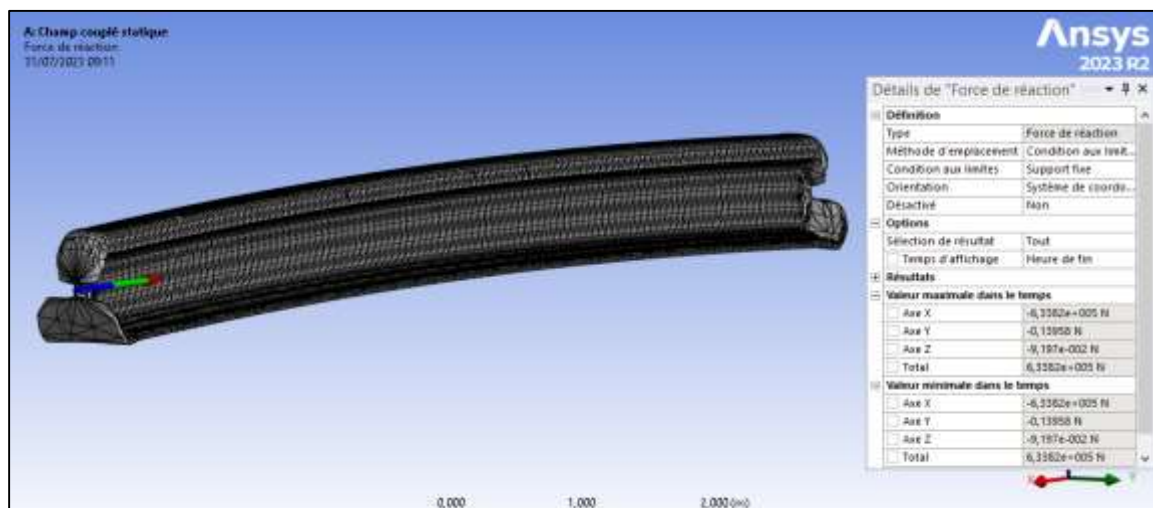


Figure III.24 : Force de réaction à l'encastrement obtenue par Ansys pour  $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

Le rail est assimilé à une poutre encastree aux deux cotes, la variation de temperature va se traduire par une augmentation de la contrainte axiale  $\sigma_x$ . Les poutres et les rails etant tres longs par rapport a leur section, on peut considerer l'hypothese selon laquelle la dilatation transversale par rapport a l'axe longitudinal  $x$  n'est pas contrainte. On a donc les relations suivantes, liant la deformation thermique, la deformation elastique et la contrainte :

$$\varepsilon_{th} = \alpha \Delta T \quad \sigma_x = E \cdot \varepsilon_{el}$$

Pour une poutre encastree des deux cotes, On ecrit que la deformation totale (elastique et thermique) est nulle :

$$\varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} = 0 \Rightarrow \varepsilon_{el} = -\alpha \Delta T \Rightarrow \sigma_x = -E \cdot \alpha \Delta T$$

L'effort de reaction a l'encastrement selon l'axe  $x$  correspondant a l'ellevation de temperature  $\Delta T$ , est donne par :

$$F_x = \sigma_x S = -E S \alpha \Delta T$$

Puisque l'on connait la solution exacte (ou theorique), on peut calculer l'erreur qui a ete commise dans le calcul numerique, et qui est definie comme :

$$erreur = \frac{\text{résultat théorique} - \text{résultat numérique}}{\text{résultat théorique}}$$

$\Delta T$ (°C)	Contrainte normale de compression $\sigma_x$ ou $S_{11}$ (en N/m <sup>2</sup> )			Réaction à l'encastrement $F_x$ (en N)		
	Calcul théorique	calcul ANSYS	Erreur	Calcul théorique	calcul ANSYS	Erreur
20	-54,6. 10 <sup>6</sup>	-54,778. 10 <sup>6</sup>	0,32 %	-418,782 . 10 <sup>3</sup>	-422,55. 10 <sup>3</sup>	0,89 %
30	-81,9. 10 <sup>6</sup>	-82.167. 10 <sup>6</sup>	0,32 %	-628,173 . 10 <sup>3</sup>	-633,82. 10 <sup>3</sup>	0,89 %
40	-109,2. 10 <sup>6</sup>	-109.56. 10 <sup>6</sup>	0,32 %	-837,564 . 10 <sup>3</sup>	-845,1. 10 <sup>3</sup>	0,9 %
50	-136,5. 10 <sup>6</sup>	-136.94. 10 <sup>6</sup>	0,32 %	-1046,955. 10 <sup>3</sup>	-1056,4. 10 <sup>3</sup>	0,9 %
60	-163,8. 10 <sup>6</sup>	-164.33. 10 <sup>6</sup>	0,32 %	-1256,346. 10 <sup>3</sup>	-1267,6. 10 <sup>3</sup>	0,89 %

**Tableau III.4 :** Contrainte normale de compression ( $\sigma_x$  ou  $S_{11}$ ) et réaction selon  $x$  ( $F_x$ ), du rail encastree-encastree en fonction de la temperature (calculée avec ANSYS).

### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

---

D'après les résultats du **Tableau III.4**, on remarque que les erreurs entre le calcul théorique et numérique, pour les deux grandeurs, est très faible. Ce qui signifie que les résultats trouvés sont satisfaisants, et la précision du résultat dépendra du choix des paramètres de maillage ainsi que les performances du matériel de calcul (processeur et mémoire).

Par exemple, quand le rail encasté-encasté est soumis à une variation de température de 60°C, on trouve la contrainte axiale associée :

$$\sigma_x = - 163,8. 106 \text{ Pa}$$

Le signe négatif signifie que c'est une contrainte de compression.

Cette contrainte reste inférieure à la contrainte de plastification de l'acier qui se situe autour de 109 Pa pour les aciers constituant les rails. Cette contrainte correspond, pour la section du rail, à une force d'environ:

$$F_x = - 1,25. 106 \text{ N}$$

Par contre les efforts de réaction à l'encastement peuvent atteindre des valeurs importantes. Ces valeurs sont à comparer à l'effort critique de flambement, qui sera évalué dans l'étape suivante.

#### III.8.3 Etape 3 : Etude du flambage du rail à l'aide du logiciel Ansys

Le flambement des poutres peut être étudié analytiquement pour des géométries simples. Cependant, pour des structures réelles, on fait appel aux logiciels d'éléments finis tels que ABAQUS ou ANSYS. La fonction s'appelle BUCKLING, et consiste à rechercher les modes de flambement pour une poutre prédéfinie (géométrie, matériau et conditions aux limites), ou trouver sa charge critique de flambement.

Pour les simulations de cette étape, on considère les données suivantes :

Profilé du rail	UIC60
Longueur (m)	10
Module de Young acier E (Pa)	$2,1.10^{11}$
Coefficient de dilatation $\alpha$ (1/°C)	$1,3. 10^{-5}$
Coefficient de Poisson $\nu$	0.28
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7700

### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

Section du rail $S$ (cm <sup>2</sup> )	76.70
Module d'inertie vertical rail $I_y$ (cm <sup>4</sup> )	3038.30
Module d'inertie horizontal rail $I_z$ (cm <sup>4</sup> )	512.30

#### ✓ La géométrie

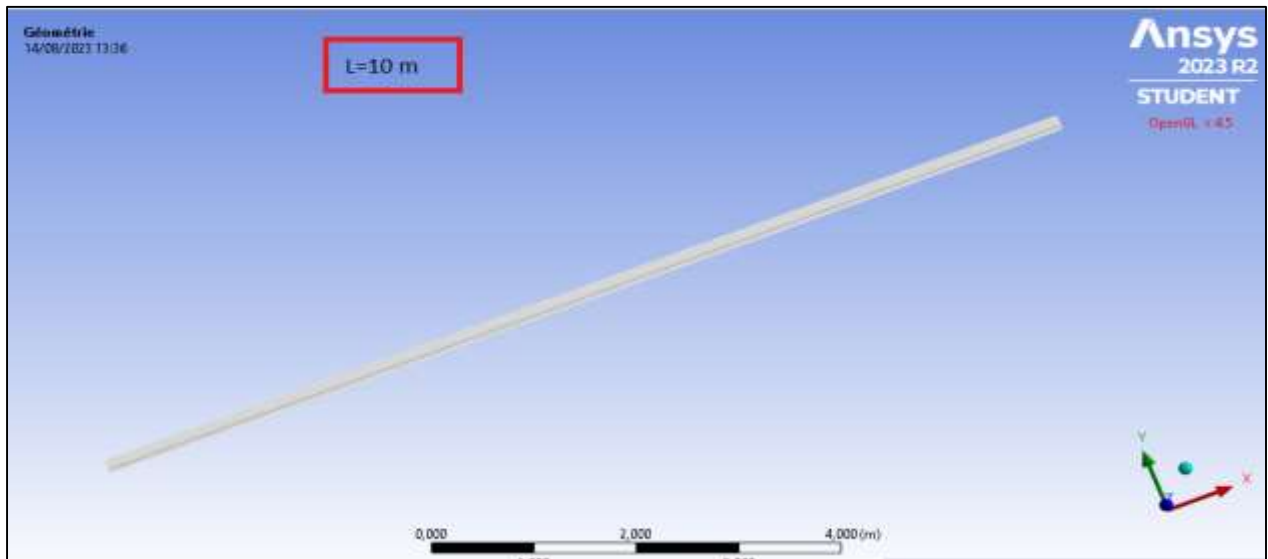


Figure III.25 : Modélisation du rail sous Ansys.

#### ✓ Le maillage

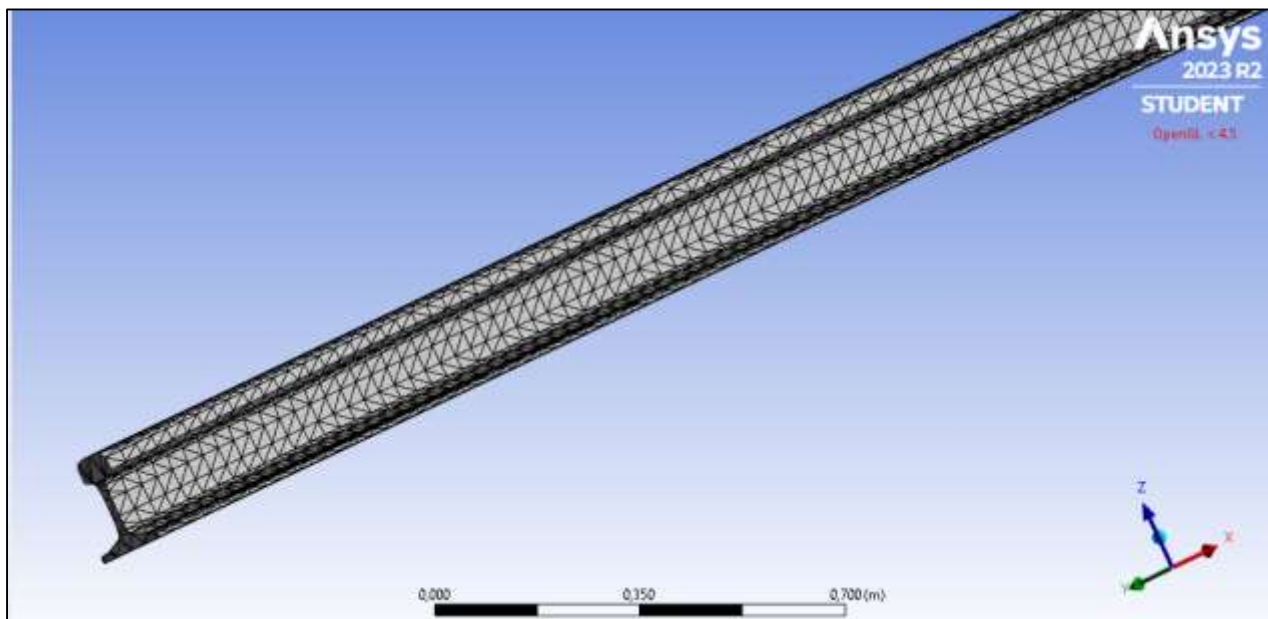


Figure III.26 : Maillage du rail.

### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

#### ✓ Conditions aux limites

Poutre : Supposée encastree – encastree (un seul déplacement possible sur l'axe x).

L= 10 m, Profilé du rail UIC60.

#### ✓ Résultats obtenus

La détermination des modes de flambement, donne les résultats suivants :

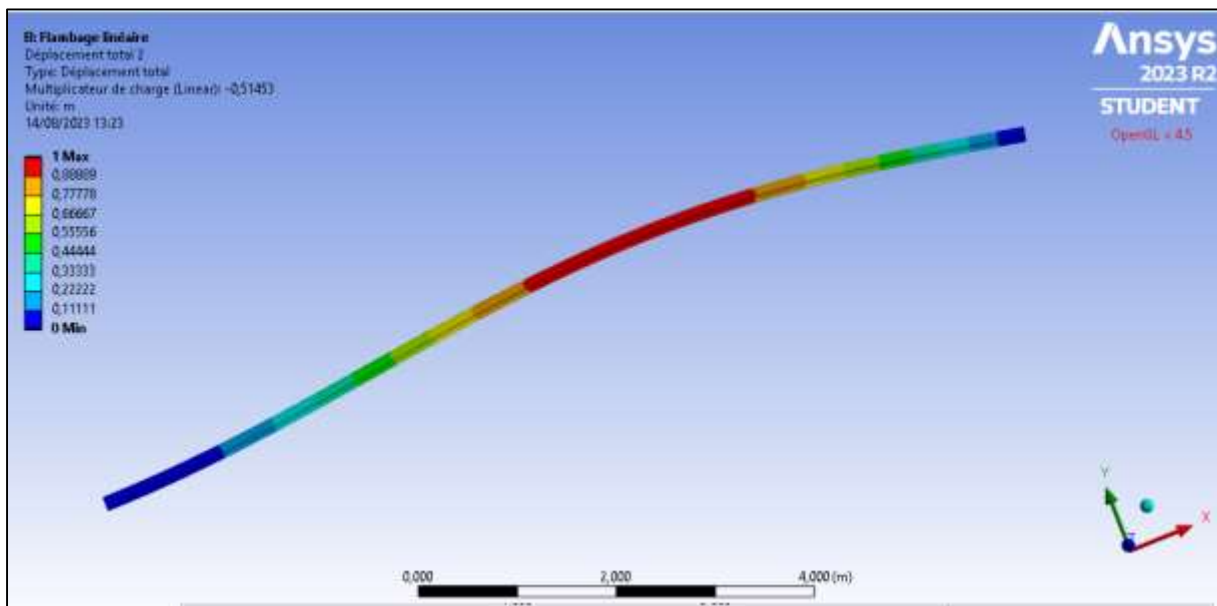


Figure III.27 : 1<sup>er</sup> mode de flambement

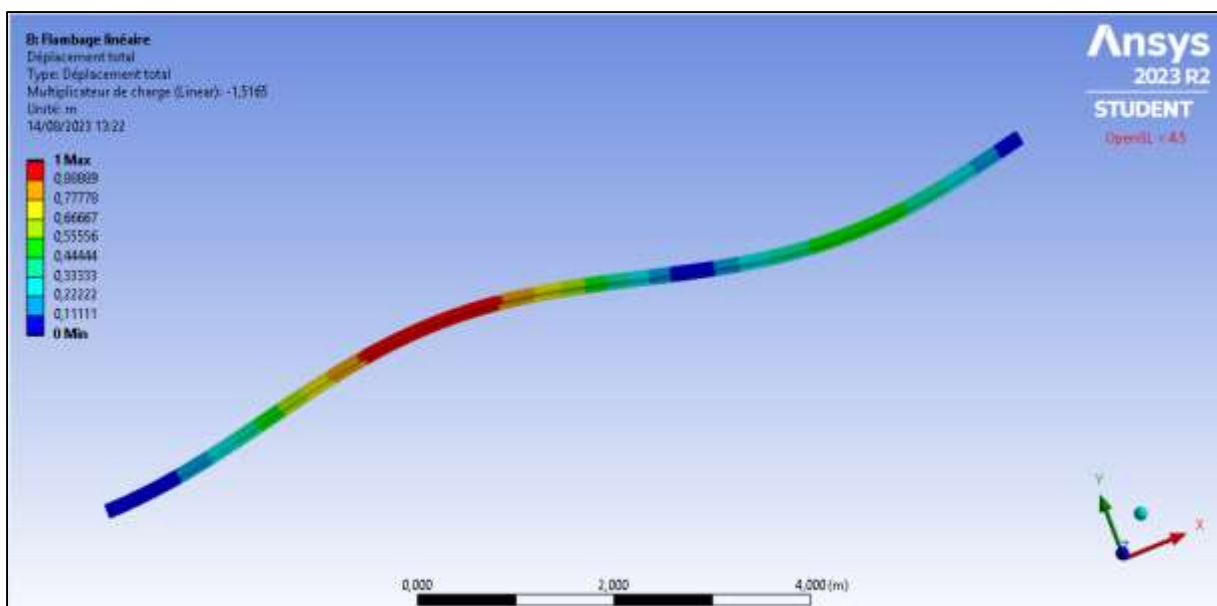


Figure III.28 : 2<sup>eme</sup> mode de flambement

### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

---

Pour évaluer théoriquement la charge critique de flambement  $F_{crit}$ , on utilise la formule donnée par la résistance des matériaux pour une poutre simple:

$$F_{crit} = \frac{k^2 \pi^2 E I}{(\lambda L)^2}$$

La valeur de  $k$  définit le mode de flambement (mode 1 :  $k=1$ , mode 2 :  $k=2, \dots$ ).

$\lambda$  : facteur fonction des conditions aux limites ( $\lambda=1$  : poutre sur deux appuis simples ;  $\lambda=0,5$  : poutre encastree-encastree).

Dans notre cas,  $\lambda = 0,5$ , on trouve :

$$\text{Mode 1 : } F_{crit} = 42,472 \cdot 10^4 \text{ N,}$$

$$\text{Mode 2 : } F_{crit} = 169,88 \cdot 10^4 \text{ N,}$$

En comparaison avec l'étape précédente, on pourra évaluer la variation de température  $\Delta T$  qui provoque une force critique de flambement pour une poutre encastree-encastree:

$$F_x = \sigma_x S = E S \alpha \Delta T \quad \Rightarrow F_{crit} = E S \alpha \Delta T_{crit}$$

$$\Delta T_{crit} = \frac{F_{crit}}{E S \alpha}$$

La variation de température critique du mode 1 :  $\Delta T_{crit} = 20,28^\circ\text{C}$

#### III.8.4 Etape 4 : Modélisation de la voie à l'aide du logiciel Ansys

Dans cette étape, on essaie de modéliser la voie qui est composée de deux rails, liés par des traverses (en béton ou en métal). On choisit une longueur  $L=12$  m, le reste des données étant le même que l'étape précédente. On cherche à déterminer les valeurs des dilatations et contraintes normales dans le rail en fonction de l'élévation de température.

a- Traverse en béton

✓ La géométrie

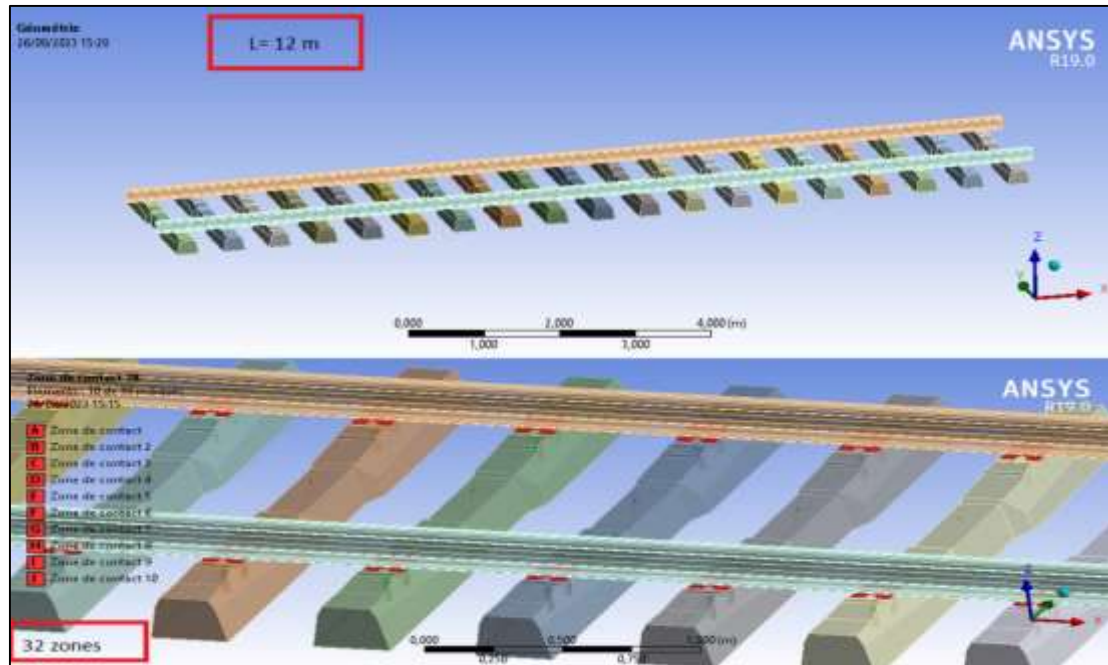


Figure III.29 : Modélisation de la voie (Traverse en béton) sous Ansys :  $L=12$  m

✓ Le maillage

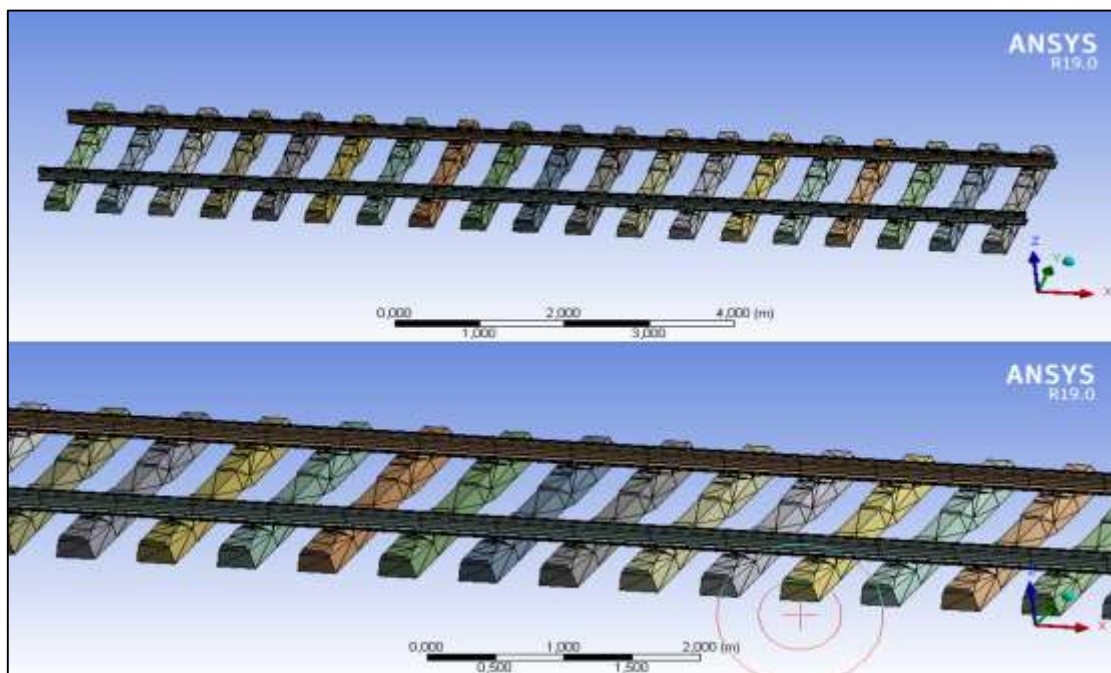


Figure III.30 : Maillage de la voie (Traverse en béton) sous Ansys :  $L=12$  m

### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

#### ✓ Conditions aux limites

La voie : Support Fixe (d'un seul côté)-Libre.

$L = 12 \text{ m}$ .

$\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}, 30 \text{ }^\circ\text{C}, 40 \text{ }^\circ\text{C}, 50 \text{ }^\circ\text{C}, 60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Profilé du rail UIC60.

#### ✓ Résultats obtenus (Pour Traverse en béton)

- Pour  $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  :

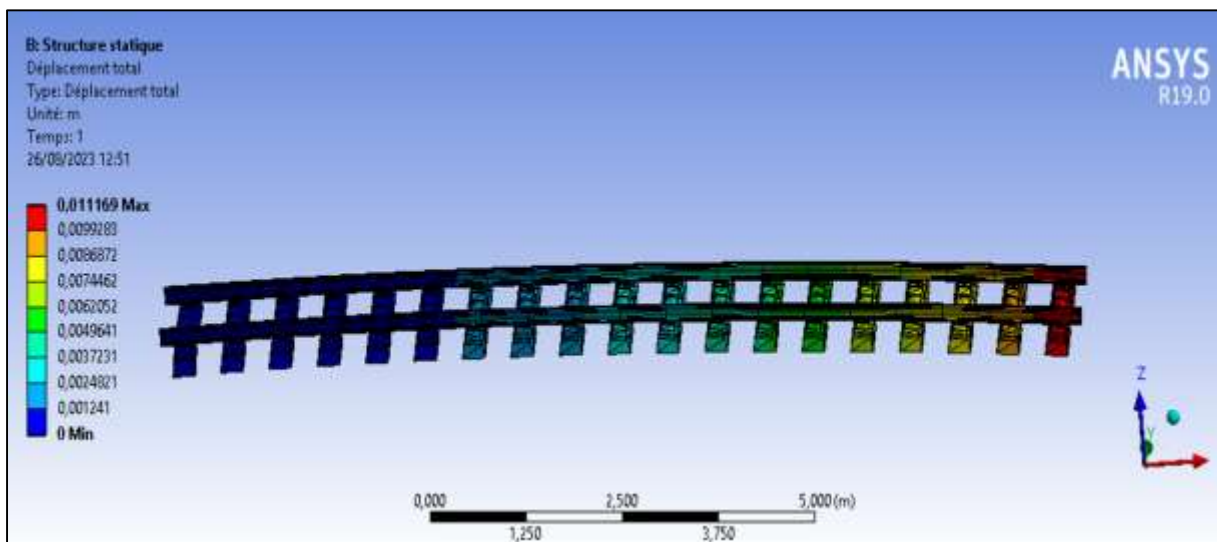


Figure III.31 : Dilatation du rail obtenue par Ansys pour  $L=12 \text{ m}$  ( $\Delta T=20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

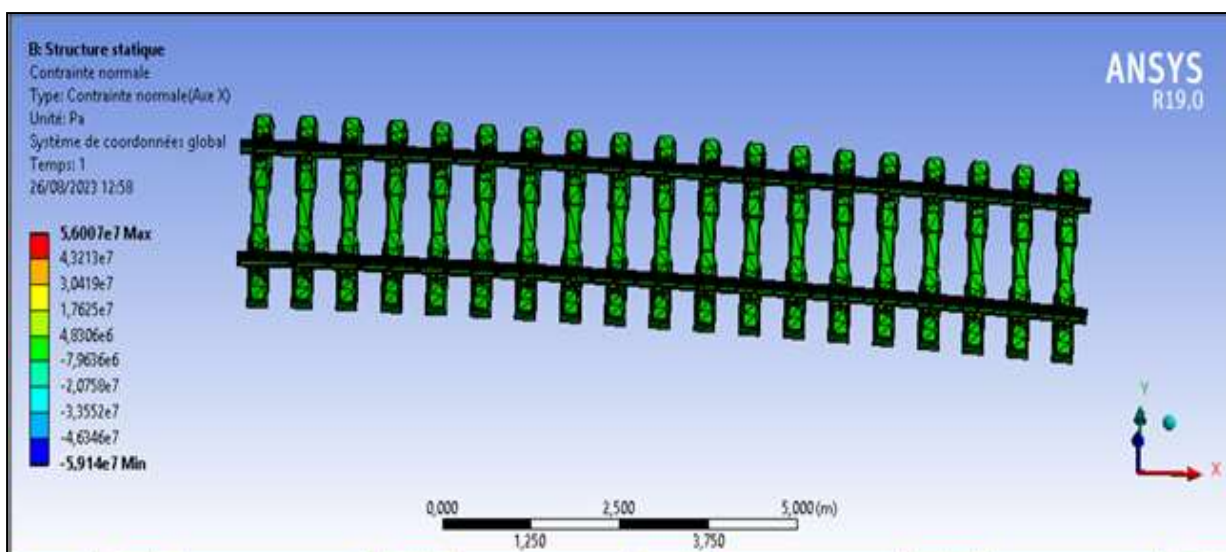


Figure III.32 : Contrainte normale obtenue par Ansys pour  $L=12 \text{ m}$  ( $\Delta T=20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

### Chapitre III : Modélisation du comportement du rail sous l'effet de la variation de température à l'aide des codes ABAQUS et ANSYS

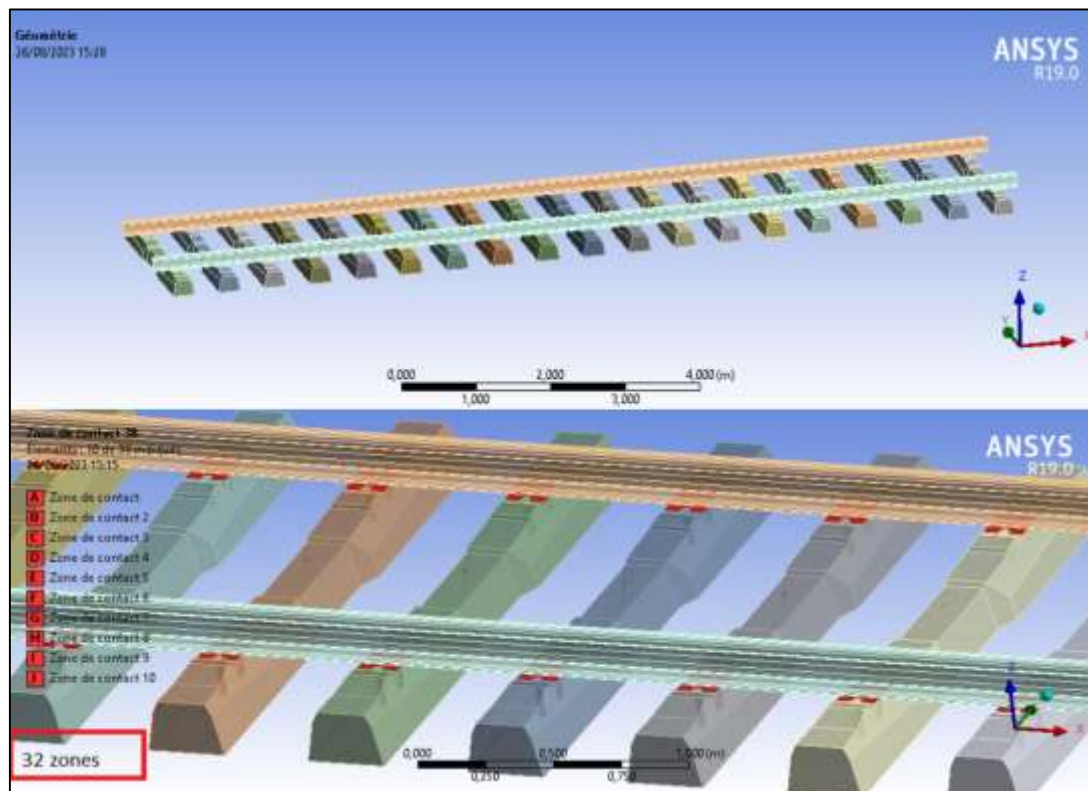
Pour le reste des écarts de température, les résultats sont résumés dans le tableau suivant (pour le traverse en béton) :

Ecart de température	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Dilatation (m)	0,0111	0,016	0,021	0,0261	0,0312
Contrainte max (Pa)	$56.10^6$	$72,7.10^6$	$89,4.10^6$	$106,1.10^6$	$122,9.10^6$

*Tableau III.5 : Evolution de la dilatation et la contrainte dans les rails en fonction de la température pour une voie (traverse en béton).*

#### b- Traverse en métal

##### ✓ La géométrie



*Figure III.33 : Modélisation de la voie (Traverse en métal) sous Ansys : L=12 m*

✓ Le maillage

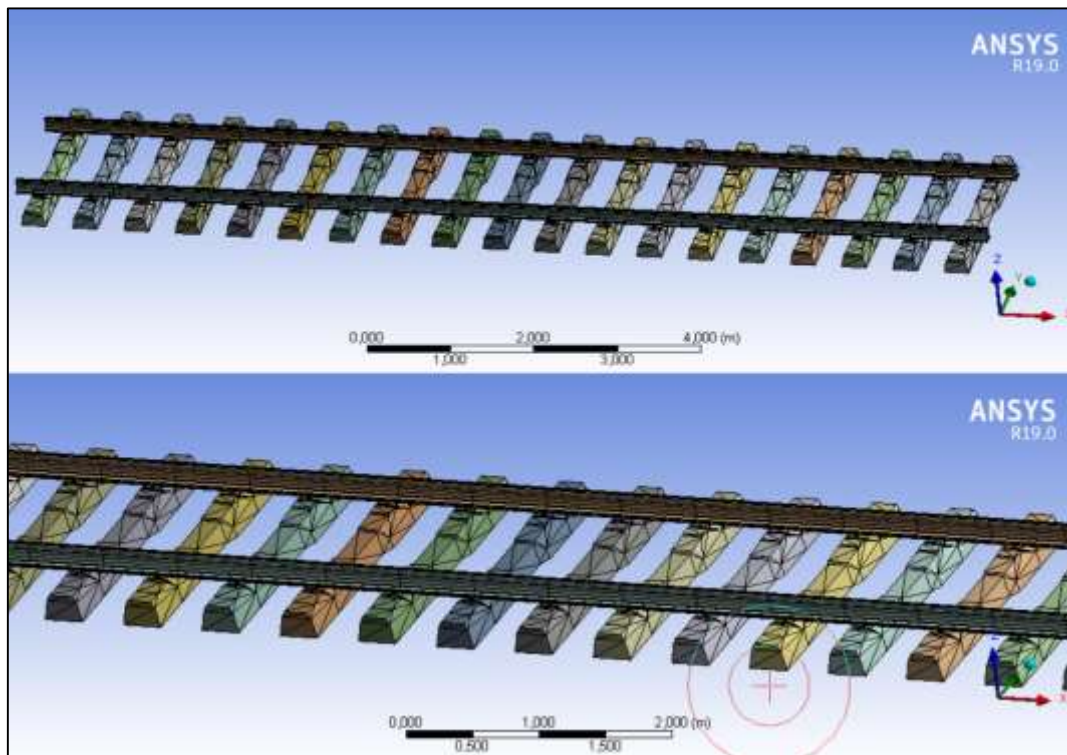


Figure III.34 : Maillage de la voie (Traverse en métal) sous Ansys : L=12 m

✓ Conditions aux limites

La voie : Support Fixe (d'un seul côté)-Libre.

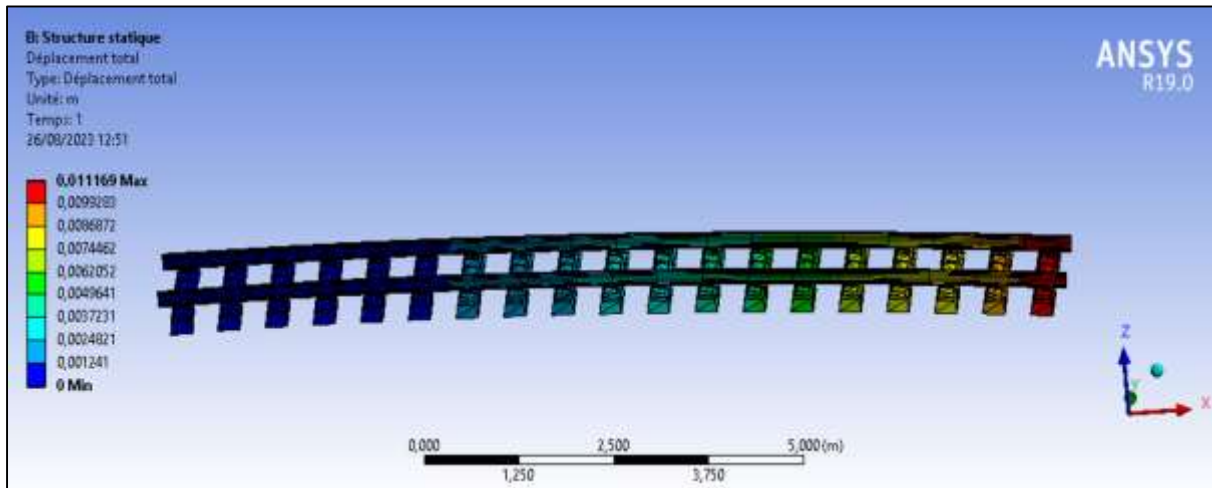
L= 12 m.

$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}, 30\text{ }^{\circ}\text{C}, 40\text{ }^{\circ}\text{C}, 50\text{ }^{\circ}\text{C}, 60\text{ }^{\circ}\text{C}.$

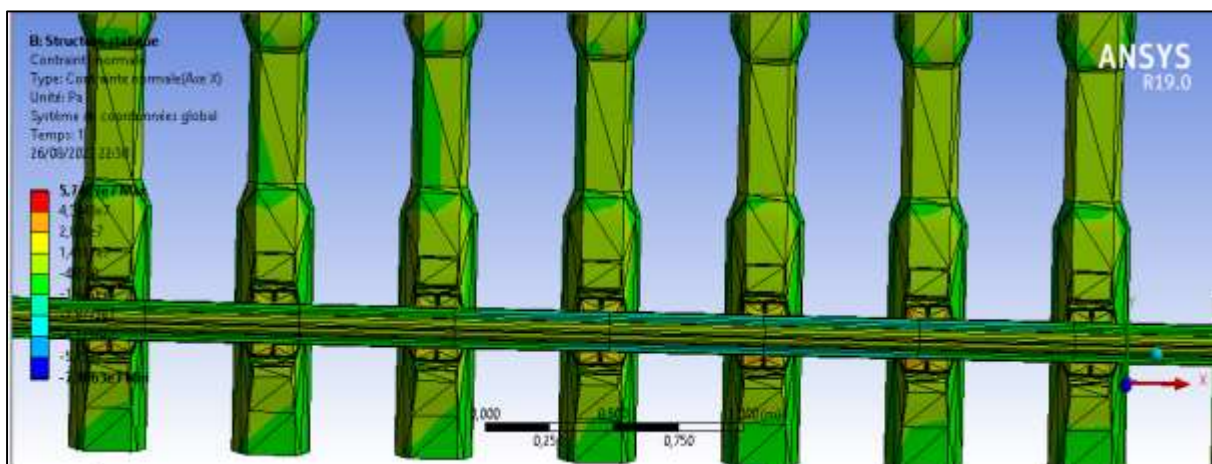
Profilé du rail UIC60.

✓ **Résultats obtenus (Pour Traverse en métal)**

- Pour  $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  :



*Figure III.35 : Dilatation du rail obtenue par Ansys pour ( $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )*



*Figure III.36: Contrainte normale obtenue par Ansys pour ( $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )*

Pour le reste des écarts de température, les résultats sont résumés dans le tableau suivant (pour le traverse en métal) :

Ecart de température	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Dilatation (m)	0,0111	0,0561	0,0749	0,0936	0,112
Contrainte max (Pa)	$57,6 \cdot 10^6$	$75,5 \cdot 10^6$	$93,66 \cdot 10^6$	$111,7 \cdot 10^6$	$134,1 \cdot 10^6$

*Tableau III.6 : Evolution de la dilatation et la contrainte dans les rails en fonction de la température pour une voie (traverse en métal)*

En comparant les résultats des **Tableaux III.5** et **III.6**, on remarque que les dilatations des voies qui ont des traverses en métal sont supérieures à celles des voies dont les traverses sont

en béton. Par contre, pour les contraintes normales dans le rail, les valeurs sont sensiblement proches pour les deux cas.

### **III.9 Conclusion**

Le présent chapitre a été consacré à des applications sous les codes de calcul ABAQUS et ANSYS. Ces applications consistent à étudier l'influence de l'élévation de la température ambiante sur le comportement du rail, ce qui revient à évaluer les dilatations, les contraintes normales, et les efforts de compression dans les rails afin de connaître l'élévation de température qui provoque à la charge critique de flambement du rail.

Pour cela, on a commencé par la présentation de certaines notions d'élasticité qui sont l'aspect théorique du phénomène étudié. Ensuite, on a abordé une présentation des logiciels utilisés dans ce travail de simulation, Abaqus et Ansys, aussi la présentation et la validation des différents résultats obtenus.

---

## Conclusion générale

Les longs rails soudés ou LRS, constituent une méthode moderne de pose des voies ferrées qui présente l'intérêt de supprimer la plupart des joints de rails sur des longueurs importantes en assurant la continuité de la voie. Ils présentent également les avantages suivants :

- Une réduction des coûts d'entretien de la voie du fait de la suppression des joints éclissés;
- Une meilleure qualité de roulement et un plus grand confort pour les voyageurs.

Cette étude a été consacrée, dans une première partie, à contribuer à la compréhension des aspects théoriques et pratique du procédé de soudage des rails de chemin de fer, en général, et par aluminothermie.

La variation de température ambiante est un paramètre qui pourra affecter la géométrie et le comportement du rail, de telle sorte que l'élévation de température pourra créer des contraintes et des déformations (ou dilatations) dans le rail. Ce phénomène s'appelle le flambement thermique, ce qui constitue une source de désagrément pour les exploitants ferroviaires.

A cet effet, la seconde partie était consacrée à l'étude du comportement mécanique du rail sous l'effet de l'élévation de la température. Afin d'étudier et d'analyser son comportement, mathématiquement et numériquement, une modélisation du rail et de la voie a été effectuée à l'aide des codes de calcul ABAQUS et ANSYS, en utilisant la modélisation par éléments finis.

Le but de ce travail est de déterminer les contraintes, déformations (ou dilatations) en considérant quelques types de conditions aux limites. Les résultats obtenus par les deux codes numériques sont cohérents avec ceux théoriques.

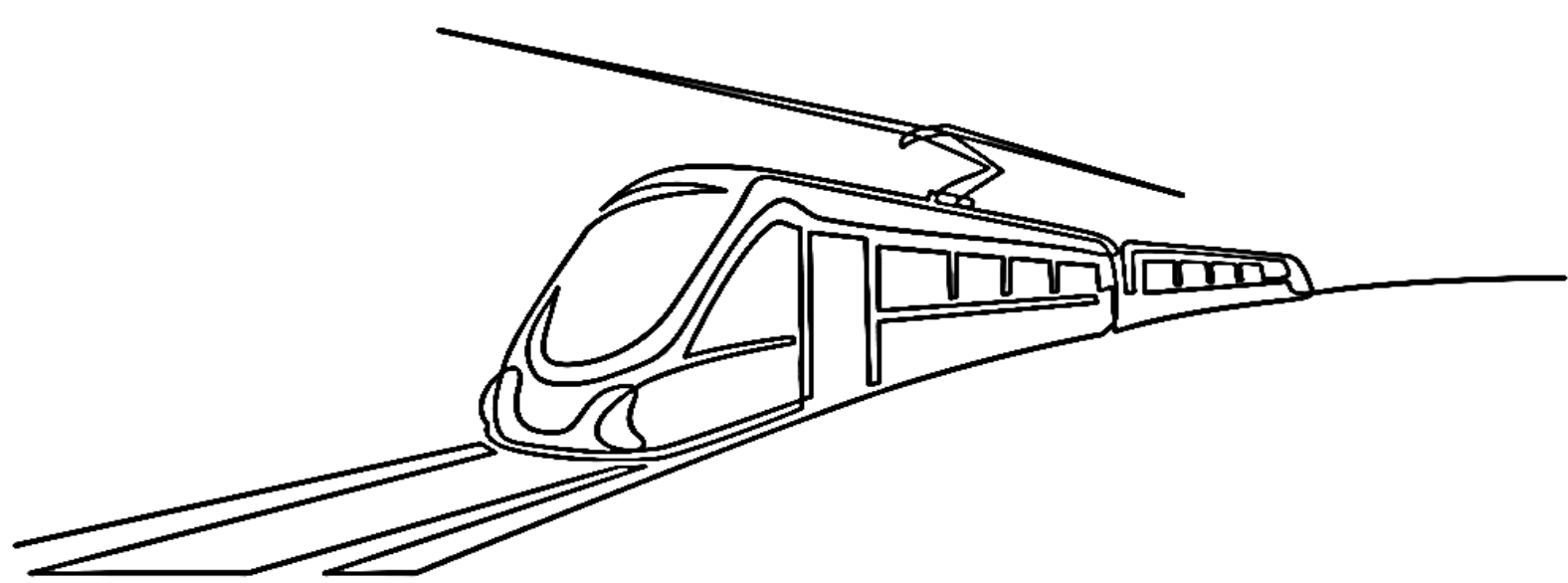
En réalité dans la voie ferrée, l'appareil de dilatation est un dispositif autorisant ponctuellement un libre mouvement du rail, sans affecter le roulement, et permet d'éviter d'atteindre la force critique de flambement.

En conclusion, la réalisation de ce travail m'a permis d'élargir mes connaissances dans le domaine ferroviaire, et de comprendre la modélisation d'un problème thermomécanique sous les codes de calcul ABAQUS et ANSYS.

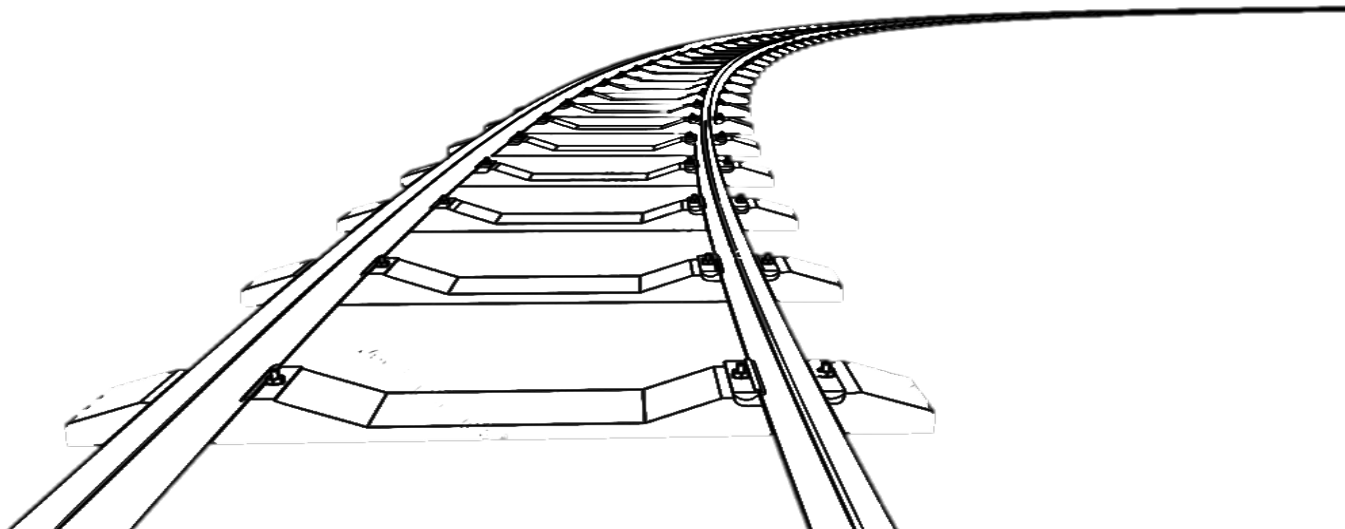
Comme perspectives, on peut dire que cette étude pourra faire l'objet d'améliorations futures, en tenant compte de certains points par exemple :

- Influence du rayon de courbure sur la stabilité de la voie ;
- Tenir compte de l'effet du ballast dans l'étude du flambage thermique de la voie ;

- 
- Prendre en compte les défauts du rail dans le plan vertical ;
  - Un ensemble d'appareils de voie au sein d'un réseau plus vaste afin d'identifier les points faibles et les zones présentant un risque de flambement.



# **Bibliographies**

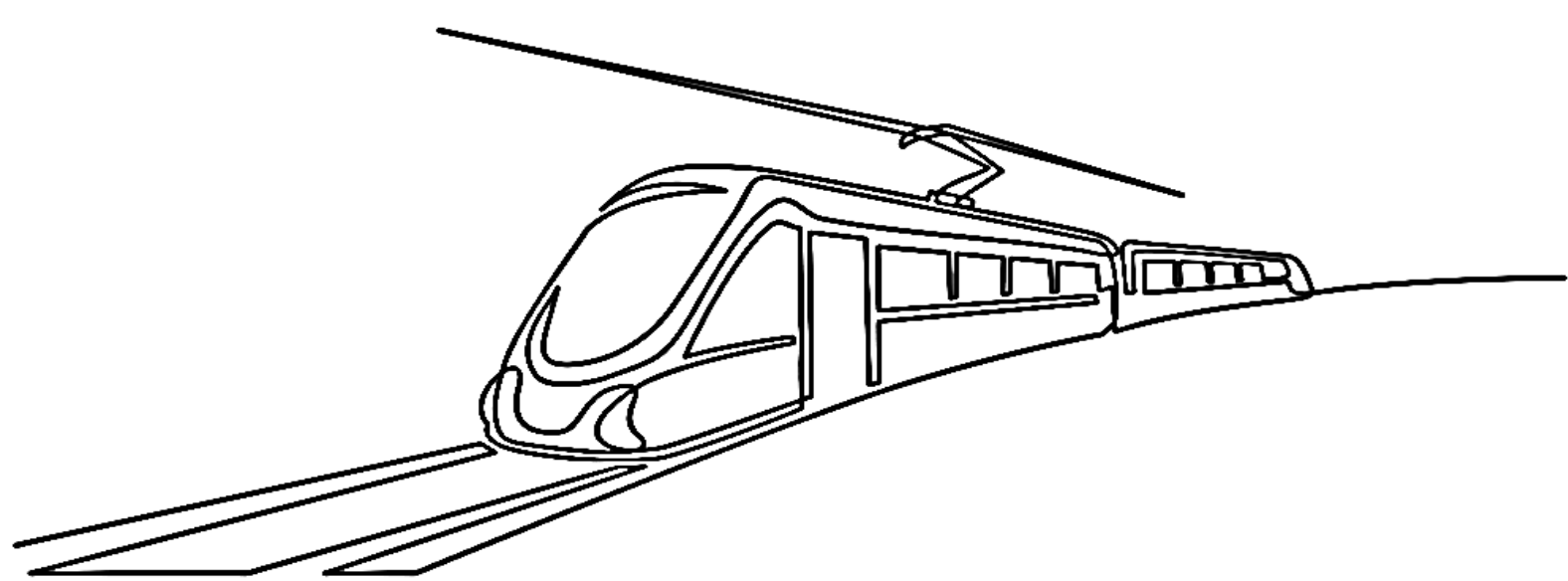


---

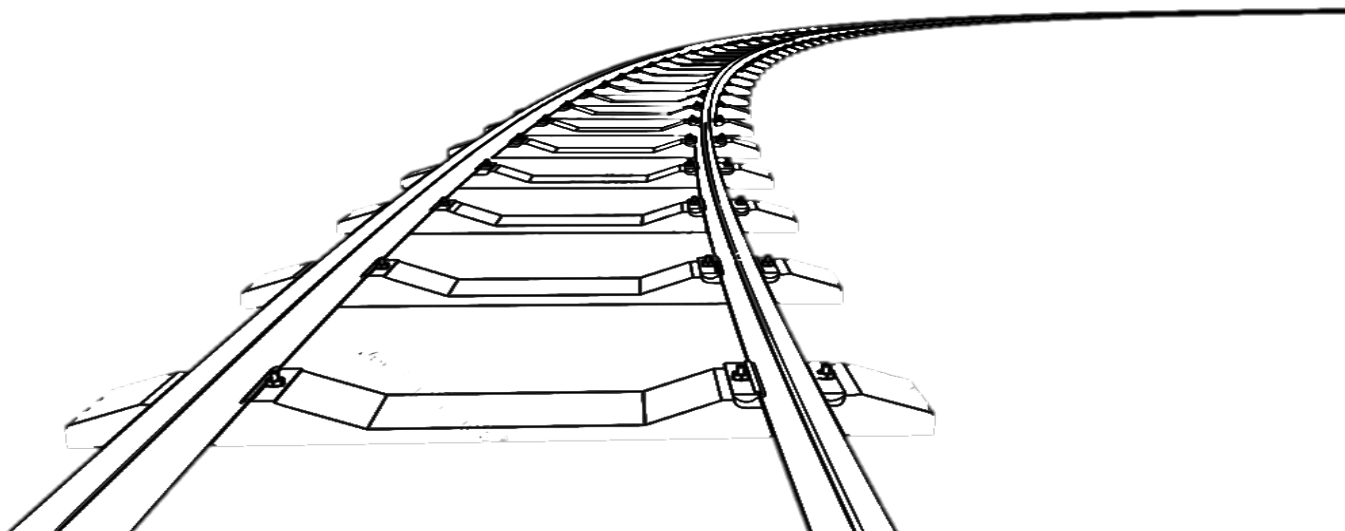
## ***Bibliographies***

- [1]. HENNI Hichem, *Etude en APD de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique TIARET-SAIDA du PK 108+475 au PK 123+000, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, PFE Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Travaux Publics, 2016.*
- [2]. A. BOUDI, *Cours de chemins de fer, Ecole Marocaine d'Ingenierie, Novembre 2019.*
- [3]. BENAOUALI AMEL, BOUABDELLI MISSOUME YANIS, *étude en APD de la nouvelle ligne ferroviaire à voie unique TIARET – SAIDA, Mémoire du projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master en Génie Civil Option : Voies et ouvrages d'art, UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET, 2020.*
- [4]. DJELLOULI Samir, DJOUBER Mohamed, *Etude et dimensionnement d'un tronçon ferroviaire à trafic mixte« Projet de la nouvelle ligne ferroviaire Saida-Tiaret »Du PK 109+425 au PK 119+450 , Mémoire du projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master en Génie Civil Option : Voies et ouvrages d'art, UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET, 2020.*
- [5]. SOLTANI Aziza Nedra, *Soudage aluminothermique des rails, Mémoire du projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master en Metallurgie Et Genie De Materiaux, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2020.*
- [6]. RAILTECH International, *Notice Spécifique de Soudure Aluminothermique des rails à Gorge, Décembre 2005.*
- [7]. M. Benabbas, *Long Rails Soudés Libération des LRS, Notice Technique, SNTF.*
- [8]. FRANCIS D'ALASCIO, *Des barres normales aux longs rails soudés, Séance Mensuelle en Ingénierie Ferroviaire, Académie Lorraine Des Sciences, 10 MAI 2007.*
- [9]. SOUFIANE MENAA, *Etude et simulation du comportement thermomécanique de plaques isotropes minces, mémoire de master, Université de Tébessa, 2021.*
- [10]. BARI TAIEB, *Modélisation des structures 3D en élasto plasticité utilisant l'Abaqus, Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.*
- [11]. CHAIB ILHAM, BENKABOUYA MERIEM, *Etude électromagnétique d'une pompe magnétohydrodynamique MHD, Mémoire du projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master en Génie électrique, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2015.*
- [12]. ZERGUIT Nor El Houda, *Etude expérimentale et numérique de l'écoulement à surface libre au-dessus du déversoir à seuil épais, Mémoire du projet de fin d'études Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique, Université ABOU BEKR BELKAID, 2018.*

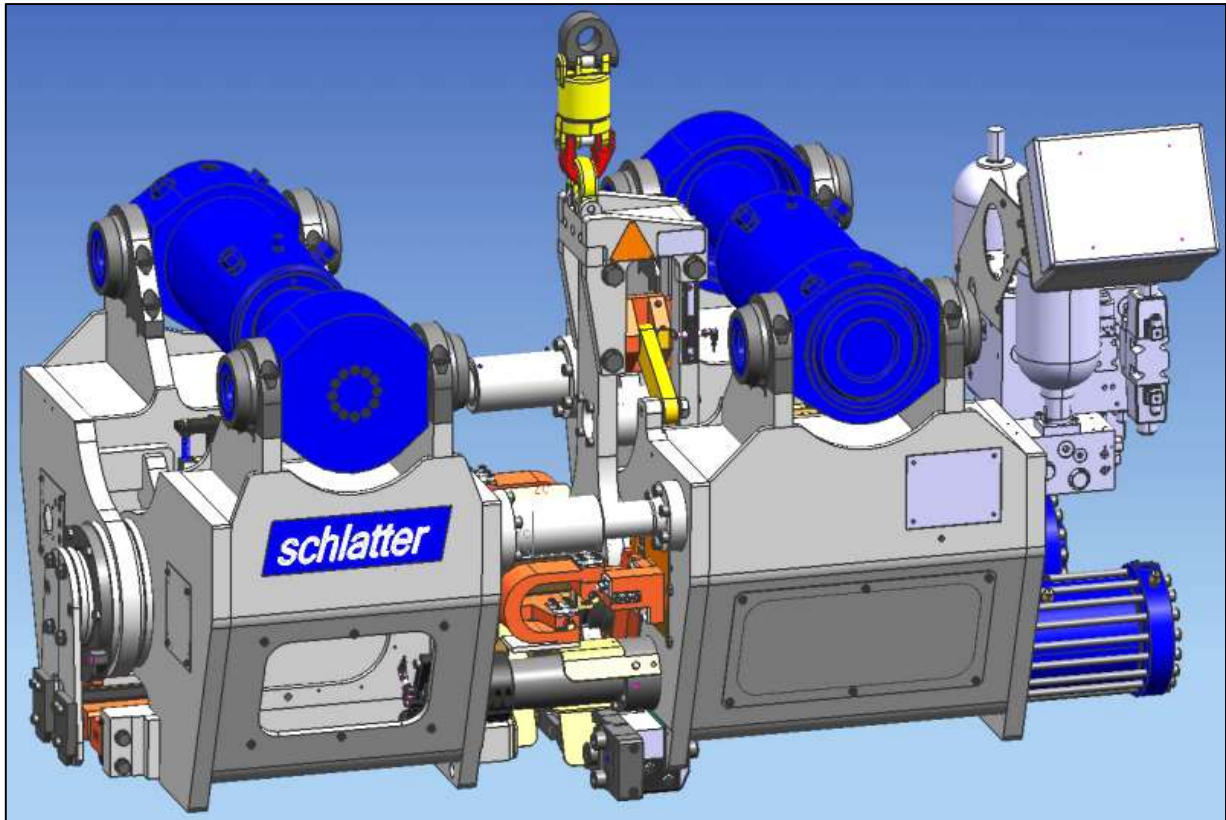
- 
- [13] M.A. Prud'homme, M.G. Janin – *La stabilité des voies en long rails soudés* – 1968.
- [14] *Technique de l'ingénieur, Longs rails soudés - Efforts longitudinaux et interaction rail – structure.*
- [15] Pr ROBERT RIVIER, *La voie ferrée – Géométrie et tracé général*, EPFL, document N°401/14, Octobre 2004.
- [16] Matthieu LEZAACK, *Incorporation des appareils de voie dans les longs rails soudés*, Mémoire de Master, école polytechnique de Louvain, Belgique, 2017.
- [17] Robin VAN LIERDE, *Étude sur la stabilité des voies en longs rails soudés*, Mémoire de Master, école polytechnique de Louvain, Belgique, 2018.
- [18] MENAA Soufiane, *Etude et simulation du comportement thermomécanique de plaques isotropes minces*, Mémoire de Master, Université Larbi Tebessi , Tebessa, 2021.
- [19] L. PENAZZI, *calcul de structures présentation de la méthode des éléments finis, premiers pas d'un utilisateur Abaqus*, école des mines d'Albi, decembre 1999.
- [20] Ilias Mouallifa, Abdelkrim Chouaf, Abdelhamid El amri et Abdelkader Benali, *Effets des défauts de soudure aluminothermique sur le comportement mécanique des rails*, *Mécanique & Industries* 12, pp343–351, 2011.
- [21] Yves NOBLET, *Théorie simplifiée des LRS*, document de formation FAAC, 2015.
- [22] E Kabo - *A numerical study of the lateral ballast resistance in railway tracks* – 2006  
Bernhard Lichtberger – *Track Compendium* – 2005.
- [23] Nam-Hyoung Lim, Nam-Hoi Park, Young-Jong Kang – *Stability of continuous welded rail track* – 2003.
- [24] Gopal Samavedam, Andrew Sluz, Andrew Kish - *the effect of realignment on track lateral stability* – 1999.
- [25] Shigeru Miura - *Lateral Track Stability: Theory and Practice in Japan* – 1991.
- [26] I. Mouallif, A. Benali, A. Elamri, A. Chouaf, *Étude du comportement des rails soudés par aluminothermie*, Congrès Algérien de Mécanique CAM2009, Biskra, Algérie, 2009.
- [27] *Abaqus Analysis User's Guide*, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2012.



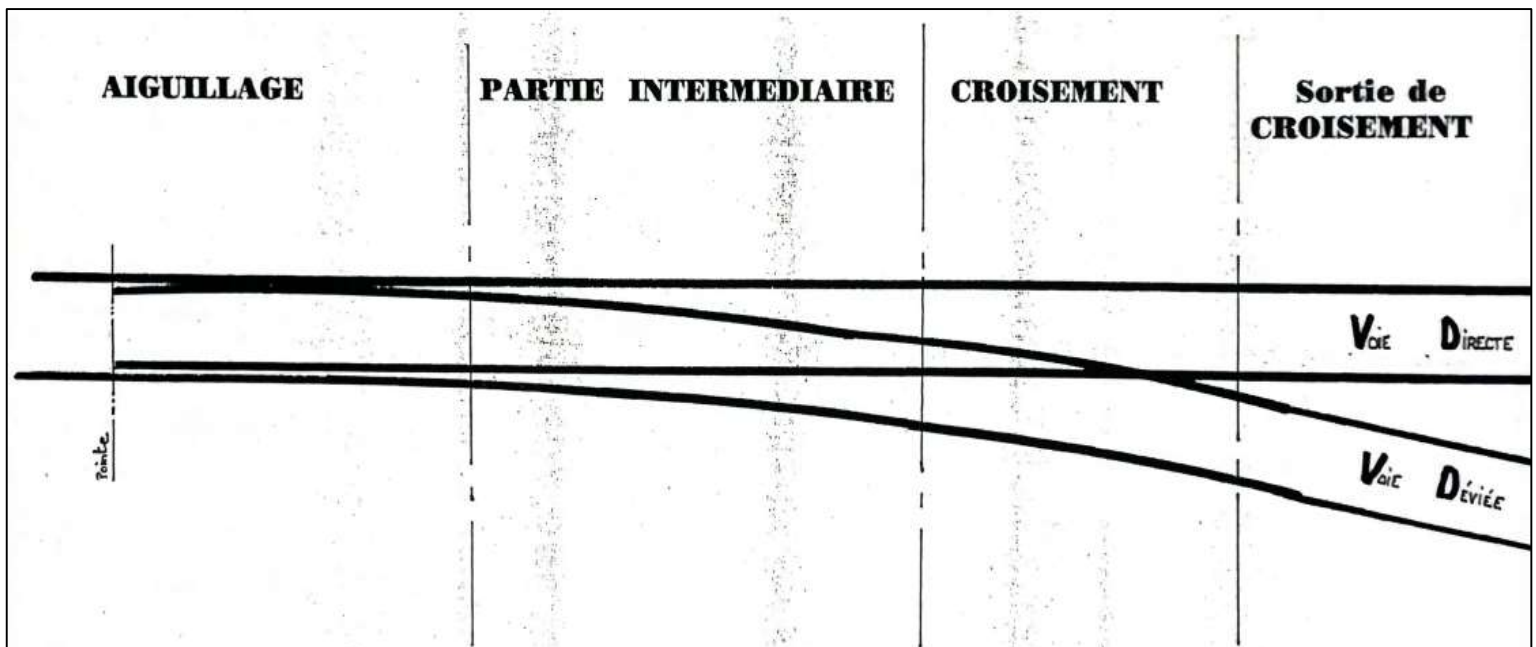
# Annexes



*Annexe A : Soudeuse SHLATTER*



*Annexe B : Parties Constitutives d'un appareil de voie (Branchement simple)*



Annexe C : Parties Constitutives d'un appareil de voie (Branchement 2 Voies)

