

République Algérienne Démocratique et Populaire.  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT METALLURGIE

# MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : METALLURGIE

OPTION : GENIE METALLURGIQUE

## Thème

*Etude des fissures lors de la production du RB32 de nuance  
ST37-2 à l'unité LRB, SIDER, EL-HADJAR*

Présenté par :

M<sup>lle</sup> IMZI Naouel

Dirigé par :

Pr. ATOUI Lhadi

Jury de soutenance :

- |                        |           |                            |
|------------------------|-----------|----------------------------|
| - Pr. ATOUI L'Hadi     | Président | Univ. Badji Mokhtar-Annaba |
| - Dr. BOUCIF Abdenacer | Membre    | Univ. Badji Mokhtar-Annaba |
| - Dr. BENCHIHEUB Omar  | Membre    | Univ. Badji Mokhtar-Annaba |
| - Dr. SNANI Louafi     | Membre    | Univ. Badji Mokhtar-Annaba |

Promotion : Juin 2018

# REMERCIEMENT

*Avant tout, Je remercie 'Dieu' qui ma a ouvert les portes du savoir*

*Je remercie mes chers parents qui m'ont tout donné, qui m'ont soutenue, et encouragée  
durant toute ma formation et éclairé mon chemin avec leurs bénédictions  
Je leur souhaite une longue vie*

*Mes remerciements vont à mon Directeur de mémoire Pr. ATOUIL*

*Je remercie Monsieur Leftaha.A*

*Mes remerciements vont également à :*

*Monsieur BOURAGHDA chef de service process LRB*

*Monsieur MAHTOUR chef de service contrôle qualité LRB*

*Monsieur BOUDEMAGH chef de bureau service process LRB*

*Madame BELMOKRANI chef bureau service programmation LRB*

*Nos remerciements vont également à tous les professeurs qui nous ont fait découvrir le  
monde de métallurgie aux cours de notre formation, et qui nous ont toujours  
encouragés à avancer*

*Grâce à eux nous sommes fières de pouvoir exercer le noble métier de métallurgie*

*Nos remerciements vont à tous ceux qui ont une empreinte dans ce travail*

*Merci à tous*

# DÉDICACE

*Avant tout, je remercie 'Dieu'*

*De m'avoir donné la force, le courage, et la volonté pour réaliser*

*Ce modeste travail ; que je dédie :*

■ *À Mes chers parents qui m'ont tout donné, qui m'ont soutenue, et encouragée durant toute ma formation et éclairé mon chemin avec leurs bénédictions*

*Je leur souhaite une longue vie*

■ *À mes chers frères Yazid et Youcef et chères sœurs Nadia et son mari, Ghania et Rafika*

■ *A ma chère nièce Mima*

■ *A mes deux grands-pères et Yaya, qu'ils reposent en paix,*

■ *A ma grand-mère maternelle je lui souhaite une longue vie*

■ *À mes amis du département de métallurgie & génie des matériaux*

■ *À toutes les personnes que j'aime*

■ *Et enfin à tous les professionnelles de l'industrie du monde principalement ceux de la métallurgie*

■ *À vous...*

*Merci*



*NAOUEL*

## SOMMAIRE

---

---

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : PROCESSUS DE FABRICATION DU ROND A BETON .....</b>	<b>4</b>
<b>Introduction : .....</b>	<b>4</b>
<b>I-1. La fabrication du rond à béton :.....</b>	<b>4</b>
I-1-1. Elaboration de l'acier : .....	4
I-1-2. Coulée de l'acier :.....	10
I-1-3. Mise en forme du rond à béton :.....	13
<b>I-2. Propriétés du rond à béton :.....</b>	<b>14</b>
I- 3-1. Propriétés physiques :.....	14
I- 3-2. Compositions chimiques : .....	15
I- 3-3. Propriétés mécaniques :.....	16
I- 3-4. Propriétés thermiques :.....	16
<b>I-3. Défauts de fabrication du rond à béton : .....</b>	<b>17</b>
<b>Conclusion :.....</b>	<b>17</b>
<b>CHAPITRE II : ELABORATION, CARACTERISATION ET IDENTIFICATION DES DEFAUTS DU RB32 DE NUANCE ST37-2 A SIDER EL-HADJAR ANNABA .....</b>	<b>19</b>
<b>Introduction : .....</b>	<b>19</b>
<b>II- 1. Méthode d'élaboration :.....</b>	<b>19</b>
<b>II- 2. Description du laminoir rond à béton (LRB) :.....</b>	<b>20</b>
<b>II- 3. Composition chimique :.....</b>	<b>22</b>
<b>II- 4. Caractéristiques mécaniques du RB32 : .....</b>	<b>22</b>
II- 4-1. Caractéristiques de traction : .....	22
II- 4-2. Caractéristiques de pliage : .....	23
<b>II- 5. Techniques expérimentales de caractérisation du RB32. ....</b>	<b>23</b>
II-5-1. Essais mécaniques :.....	23
II-5-2. Essais métallographie :.....	27
<b>II- 6. Identification des différents défauts :.....</b>	<b>29</b>
II-6-1. Types de défauts apparus sur le RB32 :.....	29
II-6-2. Statistique des défauts apparus sur le RB32 pour l'année 2017 :.....	36
<b>Conclusion :.....</b>	<b>38</b>

<b>CHAPITRE III : ETUDE DES FISSURES LORS DE LA PRODUCTION DU RB32.....</b>	<b>40</b>
<b>Introduction : .....</b>	<b>40</b>
<b>III-1. Généralité sur les défauts de fissure : .....</b>	<b>40</b>
III-1-1. Définition de fissure : .....	40
III-1-2. Origine de fissure : .....	40
III-1-3. Types de fissure : .....	41
<b>III-2. Discussion des résultats de l'étude des fissures du RB32 : .....</b>	<b>42</b>
III-2-1. Résultats des analyses chimiques : .....	42
III-2-2. Résultats des essais mécaniques : .....	44
III-2-3. Caractérisation microstructurale des différents échantillons : .....	49
<b>CONCLUSION GENERALE : .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES : .....</b>	<b>69</b>

## Liste des figures

### Chapitre I :

<b>Figure I- 1</b> : Machine de coulée continue. ....	11
<b>Figure I- 2</b> : Différentes géométrie de machine de coulée continue. ....	11
<b>Figure I- 3</b> : les structures du rond à béton obtenues après traitement. ....	14

### Chapitre II :

<b>Figure II- 1</b> : Zone de four. ....	20
<b>Figure II- 2</b> : Zone de laminage. ....	20
<b>Figure II- 1</b> : Zone de barres. ....	21
<b>Figure II- 4</b> : Zone de refroidissement. ....	21
<b>Figure II- 5</b> : Machine de traction 100T de type Wolpert. ....	24
<b>Figure II- 6</b> : Machine de pliage de type Wolpert. ....	25
<b>Figure II- 7</b> : Duromètre universel de type ZWICK- ROELL. ....	26
<b>Figure II- 8</b> : Duromètre universel de type ZWICK- ROELL. ....	26
<b>Figure II- 9</b> : Microscopie optique de type NIKON. ....	28
<b>Figure II- 10</b> : (a)Microscopie électronique à balayage, (b) Les différentes émissions produites. ....	28
<b>Figure II- 11</b> : Défaut de moustache. ....	30
<b>Figure II- 12</b> : Défaut d’empreinte. ....	30
<b>Figure II- 13</b> : Hors tolérance diamètre. ....	31
<b>Figure II- 14</b> : Écrasement de diamètre. ....	32
<b>Figure II- 15</b> : Écrasement de verrous. ....	33
<b>Figure II- 16</b> : Hors tolérance de nervure. ....	33
<b>Figure II- 17</b> : Absence des verrous. ....	33

<b>Figure II- 18</b> : Défaut de chutes. ....	34
<b>Figure II- 19</b> : Défaut de fissure. ....	34
<b>Figure II- 20</b> : Défaut d'ondulation. ....	35
<b>Figure II- 21</b> : Défaut de barre non alignée. ....	35
<b>Figure II- 22</b> : Défaut de taches d' huile. ....	36
<b>Figure II- 23</b> : Histogramme représentant le tonnage de production pour le RB32. ....	37
<b>Figure II- 24</b> : Histogramme représentant le rebut par motif de défauts. ....	38

### **Chapitre III :**

<b>Figure III-1</b> : Evolution de la limite élastique des différents échantillons. ....	45
<b>Figure III-2</b> : Evolution de la résistance à la traction des différents échantillons. ....	46
<b>Figure III-3</b> : Evolution de l'allongement à la rupture des différents échantillons. ....	46
<b>Figure III-4</b> : Evolution de la dureté HRB des différents échantillons. ....	48
<b>Figure III-5</b> : Evolution de la dureté HRC des différents échantillons. ....	48
<b>Figure III-6</b> : (a) localisation de la fissure, (b) localisation des empreintes d'essais de microdureté de l'échantillon E6. ....	48
<b>Figure III-7</b> : (a) Coupe transversale de l'échantillon E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E9, E10, E11, E12, E13, (b) Coupe transversale de l'échantillon E8. ....	49
<b>Figure III-8</b> : Aspect de l'échantillon E1 sur la partie pliée. ....	50
<b>Figure III-9</b> : Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E1. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur. ....	50
<b>Figure III-10</b> : Aspect de l'échantillon E2 sur la partie pliée. ....	50
<b>Figure III-11</b> : Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E2. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur. ....	51
<b>Figure III-12</b> : Aspect de l'échantillon E3 sur la partie pliée. ....	51

<b>Figure III-13 :</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E3. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur. ....	51
<b>Figure III-14:</b> Aspect de l'échantillon E4 sur la partie plié. ....	52
<b>Figure III-15 :</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E4. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur. ....	52
<b>Figure III-16 :</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E5. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur.300X.....	52
<b>Figure III-17 :</b> Micrographie optique des quatre fissures apparues sur l'échantillon E5 avant attaque chimique. 300X. ....	53
<b>Figure III-18:</b> Aspect de l'échantillon E6 sur la partie plié. ....	53
<b>Figure III-19:</b> Micrographie optique de la fissure apparue sur l'échantillon E6. (a) avant attaque chimique, (b) après attaque chimique. 150X.....	54
<b>Figure III-20:</b> Localisation du défaut sur l'échantillon E7. ....	54
<b>Figure III-21:</b> Micrographie optique de la fissure de l'échantillon E7. (a) avant attaque chimique, (b) après attaque chimique. 150X. ....	55
<b>Figure III-22:</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E7. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.....	55
<b>Figure III-23:</b> Aspect macrographique de l'échantillon E8 rebuté lors de l'essai de traction (a) et l'essai de pliage (b). ....	56
<b>Figure III-24:</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E8. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.....	56
<b>Figure III-25:</b> Aspect macroscopique de l'échantillon E9 après test de pliage.....	57
<b>Figure III-26:</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E9. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.....	57
<b>Figure III-26:</b> Micrographie optique des fissures apparues sur l'échantillon E9 avant attaque chimique. 75X. ....	57



<b>Figure III-28:</b> Micrographie optique des fissures apparues sur l'échantillon E9 après attaque chimique. 75X. ....	58
<b>Figure III-29:</b> Aspect macroscopique de l'échantillon E10 après test de pliage.....	58
<b>Figure III-30:</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E10. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.....	59
<b>Figure III-31:</b> Micrographie optique des quatre fissures apparues sur l'échantillon E10 avant attaque chimique. (a) 75X, (b), (c) et (d) 300X. ....	59
<b>Figure III-32:</b> Micrographie optique de la fissure 1 apparues sur l'échantillon E10 après attaque chimique. 75X. ....	59
<b>Figure III-33:</b> Aspect macroscopique de l'échantillon E11 après test de pliage.....	60
<b>Figure III-34:</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E11. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.....	60
<b>Figure III-35:</b> Micrographie optique des trois fissures apparues sur l'échantillon E11 avant attaque chimique. 75X. ....	60
<b>Figure III-36:</b> Micrographie optique des trois fissures apparues sur l'échantillon E11 après attaque chimique. 75X. ....	61
<b>Figure III-37:</b> Aspect macroscopique de l'échantillon E12 après test de pliage.....	62
<b>Figure III-38:</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E12. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.....	62
<b>Figure III-39:</b> Micrographie optique des deux fissures apparues sur l'échantillon E12 avant attaque chimique. 75X. ....	62
<b>Figure III-40:</b> Micrographie optique deux fissures apparues sur l'échantillon E12 après attaque chimique. (a) 75X, (b) 300X. ....	63
<b>Figure III-41:</b> Aspect macroscopique de l'échantillon E13 après test de pliage.....	64
<b>Figure III-42:</b> Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E13. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.....	64

<b>Figure III-43:</b> Micrographie optique des deux fissures apparues sur l'échantillon E13 avant attaque chimique. 300X. ....	64
<b>Figure III-44:</b> Micrographie optique des deux fissures apparues sur l'échantillon E13 après attaque chimique. 300X. ....	65
<b>Figure III-45:</b> Micrographie électronique à balayage de la fissure apparue sur l'échantillon E6 avant attaque chimique. (a) 300X, (b) 195X, (c) 463X.....	66

## Liste des tableaux

### Chapitre I :

<b>Tableau I- 1 :</b> Influence des éléments d'additions sur les caractéristiques mécaniques des aciers. ....	10
<b>Tableau I- 2 :</b> Compositions chimiques de l'acier à béton HA soudable selon les Normes. ...	15
<b>Tableau I- 3 :</b> Caractéristiques de traction.....	16

### Chapitre II :

<b>Tableau II- 1 :</b> composition chimique du rond a béton.....	22
<b>Tableau II- 2 :</b> Essai de traction.....	23
<b>Tableau II- 3 :</b> Le tonnage de production pour le RB32. ....	36
<b>Tableau II- 4 :</b> Rebut par motif de défauts. ....	37

### Chapitre III :

<b>Tableau III- 1 :</b> Composition chimique du rond à béton selon la norme ISO 6935-2.....	42
<b>Tableau III- 2 :</b> Analyse chimique des échantillons étudiés. ....	43
<b>Tableau III- 3 :</b> Paramètres de laminage. ....	44
<b>Tableau III- 4 :</b> Caractéristiques de traction et paramètres de laminage. ....	44
<b>Tableau III- 5 :</b> Les résultats des essais de dureté. ....	47
<b>Tableau III- 6 :</b> Résultat de l'essai de microdureté de l'échantillon E6. ....	49

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton armé est un matériau complexe constitué par la réunion de deux matériaux «simples»: le béton et l'acier disposés de façon à utiliser d'une manière économique et rationnelle les résistances propres de chacun d'eux.

Le béton aujourd'hui est le matériau le plus répandu et presque irremplaçable dans le domaine du génie civil. Il n'existe pas de matériau qui pourrait prendre le relais pour constituer la très grande majorité des pieux, semelles de fondations, murs de soutènement, parois et ossatures de bâtiments, ponts et autres ouvrages.

Durant la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle les fers plats utilisés à l'origine furent progressivement remplacés par des barres rondes en fer, puis en acier. Depuis cette époque, les améliorations de la qualité des matériaux ont été apportées surtout avec l'apparition des ronds d'acier lisses, puis des barres à haute adhérence (HA), et la mise au point de ciments de meilleure qualité, et de toute une gamme d'adjuvants.

Du point de vue mécanique (résistance des matériaux) le béton est un matériau qui résiste bien à la compression, mais très médiocrement à la traction, voilà pourquoi il s'agit de renforcer le béton par des armatures orientées autant que possible suivant la direction des isostatiques de traction.

À présent, le génie civil demande de l'acier pour béton armé avec des qualités de plus en plus élevées, souvent contradictoires: bonne résistance mécanique et bonne plasticité. Ce fait se fonde essentiellement sur deux circonstances. La première est la nécessité de garantir la sécurité et la solidité nécessaire des bâtiments, dont le nombre d'étages augmente en permanence allant jusqu'aux gratte-ciel. La deuxième est le facteur économique qui joue aussi un rôle: plus l'armature est résistante, plus la consommation en aciers est faible.

Les propriétés généralement demandées aux armatures doivent répondre à des exigences particulières précisées dans des normes. Actuellement, dans la pratique de la production de l'acier à béton, on tend à substituer différentes nuances d'armature par l'armature unifié ayant la valeur de limite d'élasticité minimale de 500 MPa. Il existe, généralement, plusieurs techniques de fabrication, y compris la déformation à chaud suivie d'un refroidissement accéléré sous flux d'eau, ainsi que la déformation à froid.

Le présent travail a pour but de caractériser les différents défauts de fissures lors de la production du rond à béton de nuance ST37-2 et de diamètre 32 élaborée à l'unité laminoir rond à béton (LRB), SIDER, EL-HADJAR. La totalité des résultats de travail est présentée sous forme de 3 chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de généralités de production du rond à béton. Les questions de la métallurgie générale de production de l'acier, ainsi que les propriétés généralement demandées à ce matériau.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté le matériau utilisé, son mode d'élaboration, ses différentes propriétés, ainsi les techniques expérimentales utilisées afin de le caractériser. De plus on a présenté les différents défauts qui peuvent survenir sur le rond à béton lors de sa production.

Le chapitre III est consacré à la présentation des défauts de fissure apparus sur le RB32, leur origine et les résultats des analyses chimiques, des essais mécaniques et la caractérisation microstructurale des différents échantillons.

La fin de ce mémoire est réservée à la conclusion générale dans laquelle on a discuté l'intégralité des résultats obtenus.

**CHAPITRE I**  
**PROCESSUS DE FABRICATION DU ROND A**  
**BETON**

## CHAPITRE I : PROCESSUS DE FABRICATION DU ROND A BETON

### Introduction :

Le rond à béton, ou barre d'armature, est une barre d'acier couramment utilisée dans les structures en béton armé et en maçonnerie renforcée. Il est généralement formé à partir d'acier à bas carbone et est doté de nervures pour un meilleur ancrage mécanique dans le béton. Il peut également être décrit comme acier de renfort. Le béton armé ou autre matériau résultant est un exemple de matériau composite.

Pour compenser le déséquilibre dans le comportement du béton, des barres de rond à béton sont coulées pour supporter les charges de traction, car le béton est un matériau très résistant à la compression, mais relativement faible en traction

### I-1. La fabrication du rond à béton :

La production du rond à béton met en œuvre plusieurs filières selon les matières premières utilisées et le procédé employé. Cependant quel que soit le cas on met toujours en évidence trois opérations fondamentales :

- Elaboration ;
- Coulée ;
- Mise en forme.

#### I-1-1. Elaboration de l'acier :

On peut déterminer l'opération d'élaboration comme la série de processus métallurgiques dont le dernier au moins a lieu en phase liquide et qui est destiné à aboutir à la nuance d'acier désirée. De plus, lors de l'élaboration on diminue la quantité des impuretés indésirables : oxygène, soufre et phosphore.

Les procédés à l'oxygène permettent d'élaborer les nuances les plus variées d'acier non alliés et peu alliés. Ils ont de faibles teneurs en soufre, phosphore et surtout en azote [1].

L'élaboration comprend en général deux phases distinctes :

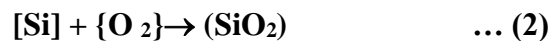
- **phase d'oxydation** : diminution de carbone, silicium, manganèse et phosphore (C, Si, Mn et S) avec action simultanée de CaO pour ce dernier;
- **phase de réduction** : la phase précédente conduit à un métal très oxydé (riche en FeO) qu'il faudra réduire. En présence de chaux CaO, il y aura simultanément désulfuration.

Le passage de la fonte liquide à l'acier nécessite les diminutions des teneurs en carbone, silicium, manganèse, phosphore et soufre. Les modes de réduction des divers éléments sont suivants :

**1. Carbone** s'élimine à l'état de CO<sub>2</sub> et surtout de CO; la turbulence créée favorise l'élimination de l'hydrogène et de l'azote présents dans le métal.



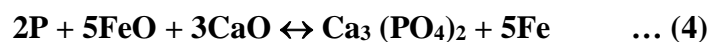
**2. Silicium: son oxydation conduit au dioxyde de silicium SiO<sub>2</sub> : cet oxyde acide se combine aux oxydes basiques présents MnO, FeO et à l'oxyde de calcium CaO introduit en donnant une scorie liquide qui monte à la surface du bain.**



**3. Manganèse:** son oxydation conduit à l'oxyde basique MnO qui se combine avec SiO<sub>2</sub>.

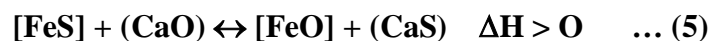


**4. Phosphore :** son oxyde P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est réductible par le carbone aux températures élevées réalisées. Cependant le phosphate de calcium est moins réductible par C que le pentoxyde. En présence de CaO et si on admet que FeO est le vecteur d'oxygène, la réaction s'écrira :



Le phosphate de calcium s'élimine dans la scorie. Donc une déphosphoration poussée exige un milieu très oxydant et très basique.

**5. Soufre :** l'oxydation des sulfures MnS ou FeS étant très endothermique elle est peu probable aux températures élevées de conversion. L'élimination du soufre aura lieu selon la réaction:



L'élimination sera favorisée par un milieu très réducteur (élimination de FeO) et très basique. Une élévation de température la favorisera également et fluidisera la scorie.

En ce qui concerne le FeO sa présence donne un produit inforgeable et un dégagement gazeux important de CO (réduction de FeO par C). Le produit final obtenu est l'acier « effervescent ».

La désoxydation du bain se fait essentiellement par le manganèse introduit surtout sous



forme de ferromanganèse et selon la réaction:



L'oxyde de manganèse est insoluble dans l'acier, l'oxygène n'est en fait pas éliminé du bain, mais il est sous forme d'inclusions de MnO beaucoup moins nocives que FeO. L'emploi de ferrosilicium ou l'addition d'aluminium à la coulée conduit à des aciers calmés. En particulier l'addition d'aluminium remplace MnO par  $\text{Al}_2\text{O}_3$  parfaitement non réductible par le carbone : il ne peut donc y avoir dégagement gazeux lors du refroidissement.

#### □ Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers: [2]

##### 1. Aluminium :

L'aluminium a été, jusqu'à présent peu ajouté dans les aciers à outils en raison de son rôle néfaste sur les propriétés de mise en œuvre telles que la transformation à chaud, l'usinabilité et l'aptitude à la rectification, ainsi que sur les caractéristiques de ténacité et de trempabilité. Toutefois, les progrès réalisés dans les modes d'élaboration permettent d'envisager des additions importantes (supérieures ou égales à 1 %) dans certains aciers à haute teneur en carbone. Cette addition d'aluminium entraîne des effets remarquables sur l'évolution des microstructures au cours des cycles thermiques.

##### 2. Carbone :

Le carbone est un élément essentiel pour durcir l'acier, et la variation de la dureté HRC en fonction de la teneur en carbone d'un acier non allié. Au-delà de 0.6% de carbone, on atteint la zone des aciers à outils caractérisée par de hauts niveaux de dureté et qui correspond au domaine des aciers de travail à froid des aciers à coupe rapide. L'augmentation progressive de la teneur en carbone conduit à une réduction des domaines de température correspondant à la transformation à chaud et au traitement thermique.

##### 3. Cobalt

Le cobalt est communément ajouté en quantités variables entre 3 et 15 %, notamment dans les aciers rapides qui travaillent dans des conditions sévères. Il permet d'effectuer la trempe à des températures plus élevées. Il accroît la dureté à chaud dans toute l'échelle de température allant de l'ambiante à 600 °C et retarde le sur vieillissement de l'acier au-delà du durcissement secondaire. Il améliore également la résistance à l'oxydation catastrophique de l'acier lors du chauffage entre 1000 et 1100 °C, surtout pour des teneurs supérieures à 5 %.

Par contre, il diminue la ductilité de l'acier pour des teneurs supérieures à 3 % et a une action néfaste sur la trempabilité, si bien que les nuances à forte teneur en cobalt posent des problèmes d'obtention de dureté pour des outillages de dimensions importantes..

#### 4. Chrome

Le chrome est utilisé dans la plupart des aciers à outils, en quantité allant de 0.5 à 17%. Il joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la trempabilité. Il forme des carbures qui participent à la résistance à l'abrasion et s'opposent au grossissement de grains lors de l'austénitisation. Il provoque, par ailleurs, un certain retard à l'adoucissement lors du revenu, ce qui améliore la résistance à chaud. Il entraîne également une très forte réduction de l'oxydation à haute température

#### 5. Manganèse :

Le Manganèse a, sur le comportement des aciers à outils, une influence analogue à celle du nickel. Il se trouve, en général, présent comme élément résiduel à des teneurs comprises entre 0,3 et 0,5 %. Certains aciers à outils contiennent jusqu'à 2 % de manganèse pour des problèmes de trempabilité et, jusqu'à 1 % de cet élément lorsqu'ils sont resulfurés.

#### 6. Tungstène

Le tungstène ne se met que très peu en solution dans la cémentite, mais donne naissance à des carbures de haute dureté conférant aux aciers une grande résistance à l'usure. De plus il offre, il offre la possibilité de durcissement secondaire. Par la présence de carbures primaires, le tungstène diminue la tendance des aciers au grossissement du grain par surchauffe. Sa forte masse atomique en fait un élément très ségrégué, d'où une augmentation sensible de l'hétérogénéité de l'acier. Les aciers à outils au tungstène sont peu sensibles à la décarburation, mais ont une résistance thermique assez faible.

#### 7. Molybdène

Le molybdène se comporte comme le Tungstène. Les aciers au molybdène présentent par rapport aux aciers au tungstène, un certain nombre d'avantages et d'inconvénients :

- Avantages : meilleure ductilité et densité plus faible.
- Inconvénients : plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation catastrophique pour des maintiens entre 1000 et 1100 °C, plus grande sensibilité au phénomène de surchauffe, d'où réduction de la fourchette de température de trempe

### 8. Nickel :

Le nickel, à l'exception de certains aciers d'outillages à chaud, se trouve simplement comme élément résiduel dans les aciers à outils, à des teneurs inférieures à 0,3 %. En raison de son influence directe sur le taux d'austénite résiduelle après trempe, cet élément entraîne des difficultés de traitement thermique au revenu dans les aciers à outils chargés en carbone et éléments carburigènes. Il a une influence favorable sur la trempabilité, la résistance aux chocs et la ténacité des calamines, ainsi que son influence plutôt défavorable sur la résistance au revenu.

### 9. Silicium :

Le silicium se trouve dans tous les aciers à outils à une teneur voisine de 0,3 %, car il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration. Il peut être avantageux d'augmenter sa teneur jusqu'aux environs de 1 % pour plusieurs raisons :

- Réduction de la sensibilité à l'oxydation catastrophique entre 1000 et 1100 °C pouvant contrebalancer les influences néfastes du molybdène et du vanadium;
- Augmentation de la trempabilité par effet de synergie avec des éléments comme le molybdène ;
- Augmentation de la dureté et de la résistance à l'adoucissement dans le domaine de température de revenu 150-300 °C;

### 10. Titane :

Le titane, peut être ajouté dans certains aciers à outils de forte résistance à l'usure. Toutefois, le taux d'addition doit être rigoureusement contrôlé pour éviter de trop gros amas de carbures tout à fait préjudiciables pour les problèmes de mise en œuvre par rectification ou électroérosion.

### 11. Vanadium

Le vanadium est utilisé essentiellement comme élément générateur de carbures. C'est un élément d'alliage important dans les aciers rapides pour l'obtention d'une bonne dureté à chaud et une bonne résistance à l'usure. De petites additions voisines de 0.2% en masse sont très efficaces pour éviter le grossissement du grain lors du traitement thermique. Le Vanadium est rarement utilisé seul dans les aciers à outils, mais la plupart du temps en association avec le chrome, molybdène et le tungstène. La teneur en vanadium est étroitement associée à la teneur en carbone. Pour chaque 1% de vanadium ajouté, il faut augmenter la teneur massive en carbone de 0.25%. Des additions de vanadium trop importantes entraînent des problèmes

de trempabilité, et des additions de carbone trop importantes entraînent des difficultés de forgeage.

### **12. Azote :**

L'azote a une solubilité très faible (0,04 %) dans l'acier à l'état liquide. L'addition de certains éléments comme le chrome, le manganèse, le molybdène et le vanadium entraîne une augmentation de la solubilité de cet élément et il est possible de conserver des teneurs comprises entre 0,10 et 0,13 % après solidification de certains aciers à haute teneur en chrome et vanadium (aciers à coupe rapide par exemple). L'azote ajouté en substitution partielle au carbone, entraîne une augmentation des propriétés mécaniques à chaud et de la résistance à la corrosion d'aciers à outils contenant des additions importantes de chrome; par contre, il entraîne un abaissement de la ductilité, de l'aptitude au soudage ainsi que de l'aptitude à l'usinage par certains procédés non conventionnels comme l'électroérosion.

### **13. Soufre :**

Le soufre, incorporé dans les aciers à outils jusqu'à des teneurs voisines de 0,1 %, permet d'améliorer l'usinabilité et l'état de surface des outils. Cette amélioration est d'autant plus importante que l'acier contient plus de carbone et d'éléments carburigènes.

La réduction de ductilité provoquée par les additions de soufre n'est pas très importante dans le domaine des aciers à outils car les inclusions de sulfures sont en général associées aux carbures. Pour des teneurs en soufre supérieures à 1 %, les propriétés de résistance à l'usure de l'acier sont fortement affectées.

### **14. Niobium :**

Le niobium, au même titre que le vanadium, contribue également à donner aux aciers à outils une bonne résistance à l'usure.

L'influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers peuvent être aussi représenté par le tableau I-1.

**Tableau I- 1** : Influence des éléments d'additions sur les caractéristiques mécaniques des aciers [3].

	Résistance à la traction	Limite élastique	Résistance à l'usure	Résistance à la fatigue	Résilience	Dureté à froid	Dureté à chaud	A%
Aluminium					↗			
Carbone	↗		↗		↘	↗		
Cobalt		↗					↗	
Chrome	↗	↗	↗		↘	↗		↘
Manganèse	↗	↗	↗			↗		
Molybdène	↗	↗					↗	
Nickel	↗	↗	↗		↗			
Silicium	↗	↗	↗			↗		
Titane	↗	↗	↗		↘	↗	↗	
Tungstène	↗	↗	↗			↗	↗	
Vanadium	↗	↗		↗	↗	↗		

### I-1-2. Coulée de l'acier :

Le rond à béton est laminé à partir de billettes produite en coulée continue.

#### - Coulée continue :

Le principe de cette technique est de couler l'acier liquide dans une lingotière en cuivre de section carrée. Le métal commence à former une peau solide du côté des parois de la lingotière, violemment refroidie à l'eau. Le métal à la sortie de la lingotière est tiré vers le bas par un jeu de rouleaux, il s'achève par se solidifier. A la base de l'installation, on extrait une barre solide, carrée qui est découpée en tronçon pour une longueur souhaitée [4].

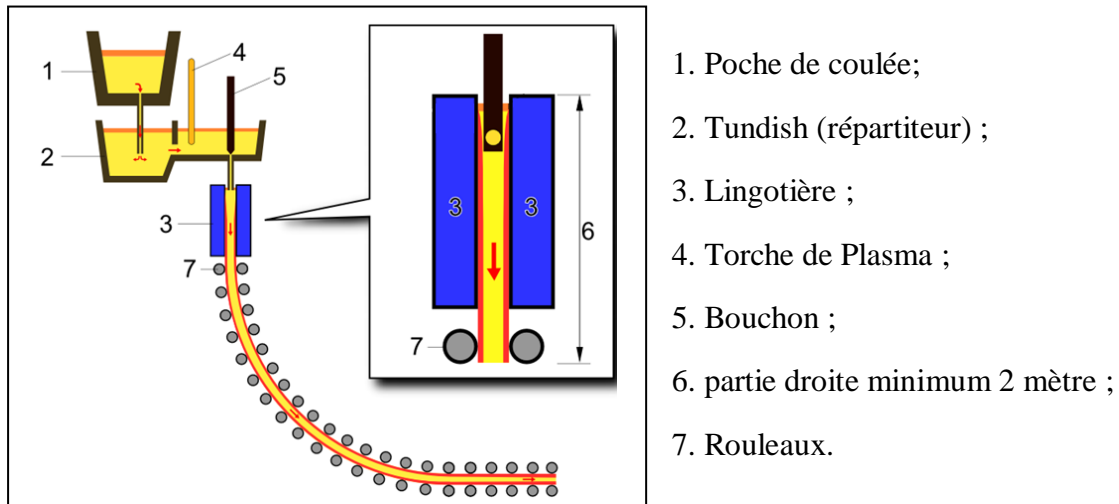


Figure I- 1 : Machine de coulée continue [5].

### - Type de coulée continue :

Les différents types de machines de coulée continue qui peuvent exister sont illustrés sur la Figure I-2.

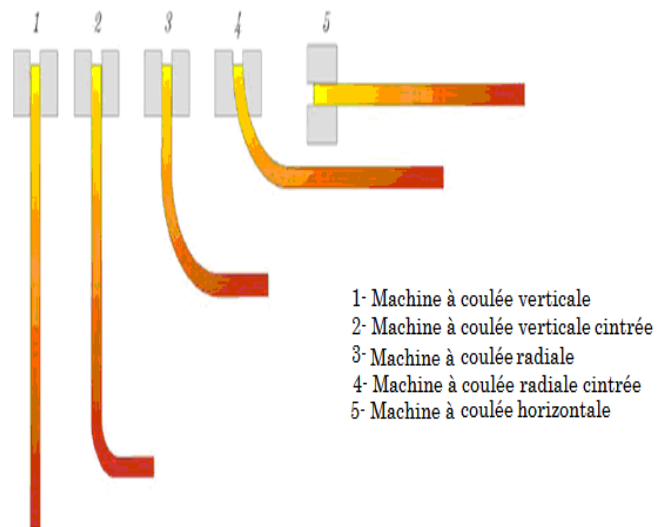


Figure I- 2 : Différentes géométrie de machine de coulée continue [6].

Les défauts principaux de coulée continue sont : [7]

### 1. Défauts de la forme :

- Variation dimensionnelle des produits ;
- Cintrage des produits ;
- Losangique ;
- Ovalisation ;
- Polygonisation de la section ;

- Cavités des faces ;
- Convexités des faces ;
- Gonflement convexe de grande face du produit ;
- Vrillage.

## 2. Défauts de coupe :

- Bavure de chalumeau ;
- Bavure de coupe à la cisaille ;
- Tête de sciage ;
- Bavure de sciage ;
- Argot du chalumeau ;
- Percé à la coupe ;
- Apure d'oxycoupage.

## 3. Défauts de surface :

- Dépression transversale ;
- Dépression longitudinal ;
- Rayure mécanique ;
- Rides d'oscillation ;
- Reprise de coulée ;
- Grippage ;
- Accrochage ;
- Incrustation métallique ;
- Trou ;
- Empreinte mécanique ;
- Angle en dents de scie ;
- Soufflure ;
- Inclusion non métallique ;
- Crique de surface.

## 4. Défauts internes :

- Point noir ;
- Inclusion ;
- Porosité ;
- Crique interne en diagonale ;
- Ségrégation ;
- Tache blanche.

**I-1-3. Mise en forme du rond à béton :****- Laminage :**

Le laminoir est composé de plusieurs cages comprenant des cylindres entre lesquels passe le métal qui y subit un écrasement progressif. Les cylindres tournent en sens inverses et sont groupés par paires. Ils sont normalement cannelés pour les produits sous formes des barres. La mise en forme de l'acier se fait par un laminage qui consiste en une série d'opérations transformant les billettes obtenus par coulée en produits longs, de formes et de dimensions déterminées. Avant le laminage les billettes doivent être réchauffées dans un four de réchauffage. Le laminage s'effectue à l'état austénitique particulièrement malléable. Le dégrossissage a lieu entre 1100°C et 1200 °C et la finition peut se faire à des températures descendant jusqu'à 800 °C [8].

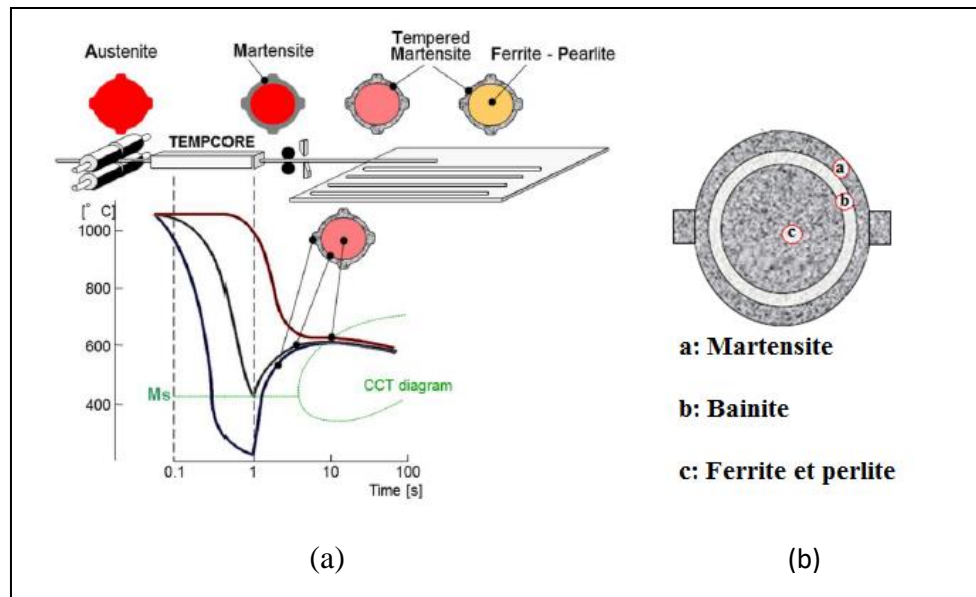
**- Traitement thermique :**

La structure de notre produit est obtenue en trempant la surface des barres d'acier à la fin du processus de laminage à chaud, suivi d'un revenu.

La trempe est obtenue en exposant le rond à béton, qui à la fin du processus de laminage est à très haute température, à une pulvérisation d'eau froide, ce qui provoque un refroidissement très rapide de la surface de la barre entraînant une transformation martensitique à la même température. L'acier martensitique non trempé qui en résulte est très dur, mais il est également trop fragile pour être utilisé dans la plupart des applications, nécessitant un revenu pour être utilisé dans l'acier renforcé.

Le revenu est obtenu grâce à la chaleur résiduelle présente dans le noyau de la barre d'acier. Cette énergie chauffe la section précédemment trempée de l'acier à une température inférieure à la température critique, suivie d'un refroidissement progressif et lent par exposition à l'air jusqu'à ce qu'il atteigne la température ambiante. A partir de ce second traitement thermique, on obtient un produit final constitué approximativement d'une surface de martensite trempée à haute résistance, d'un noyau de ferrite-perlite et d'une zone de transition en bainite [9].





**Figure I- 3 :** (a) les structures du rond à béton obtenues après traitement [10],  
 (b) Localisation des trois zones sur la coupe transversale des échantillons

## I-2. Propriétés du rond à béton :

Le rond à béton en acier peut être plié après avoir été fabriqué. Cela simplifie la construction et permet une livraison rapide des matériaux fabriqués. Il est robuste et capable de résister aux rigueurs de la construction. Il peut être facilement recyclé à la fin de la durée de vie de la structure. Il n'a pas besoin d'être directement attaché au coffrage et ne flotte pas dans le béton [11].

### I- 3-1. Propriétés physiques :

Les armatures ne glissent pas à l'intérieur du béton. C'est le phénomène d'adhérence qui empêche ou limite ces glissements. Cette propriété physique permet la transmission des efforts et un fonctionnement rationnel : le béton suit alors les armatures dans leurs déformations. L'adhérence est améliorée lorsque la barre possède des nervures en saillies ou lorsque sa surface est rugueuse [12].

Une des propriétés principales de l'armature à béton est la soudabilité. On peut définir la soudabilité comme une propriété géométrique :

« La soudabilité d'un métal ou d'un alliage est l'aptitude de ce métal ou de cet alliage à être assemblé par fusion ou par tout autre procédé assurant la continuité de la matière » [13].

Le rond à béton en acier peut être assemblé à l'aide de soudures ou de coupleurs ayant des résistances similaires à celles de l'acier d'armature [14].

### I- 3-2. Compositions chimiques :

Les aciers utilisés pour la production de l'armature de nuance 500MPa d'après toutes les normes sont de qualité ordinaire, bas carbone, peu chargés en éléments d'alliage et donc soudables.

En analysant les données présentées dans le tableau I-2, on peut constater, que les normes de différents états sont bien harmonisées selon la composition chimique et la valeur de carbone équivalent.

Toutefois, la valeur de carbone équivalent qui dépasse 0,50 (B500DWR selon ISO 6935-2) indique l'utilisation élevée de différents éléments d'alliage tels que Cr, V, Mo etc., qui compliquent la soudure mais permettent d'obtenir les caractéristiques de plasticité élevés ( $A_{gt}=8\%$  pour B500DWR). En outre, l'utilisation de ces éléments renchérit le produit fini.

Le fait que les aciers utilisés sont à bas carbone atteste la nécessité d'utiliser les traitements de durcissement pour obtenir la qualité de 500MPa [15].

**Tableau I- 2 :** Compositions chimiques de l'acier à béton HA soudable selon les Normes. [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]

Norme	Composition chimique, % masse max									
	C	Si	Mn	S	P	N	Cu	As	Céq	Céq, équation
ДСТУ ENV 10080	0,24	---	---	0,055	0,055	0,013	---	---	0,52	$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + V + Mo)}{5} + \frac{(Cu + Ni)}{15}$
ДСТУ 3760 :2006	0,25	---	---	0,045	0,045	0,012	---	0,08	0,3-0,52	
ГОСТ P 52544-2006	0,24	0,95	1,7	0,055	0,055	0,13	0,55	---	0,52	
NF A35-016(019)-1(2)	0,24	---	---	0,055	0,055	0,014	0,85	---	0,52	
BS 4449 : 2005	0,24	---	---	0,055	0,055	0,014	0,85	---	0,52	
DIN 488-1: 1984		---	---	0,055	0,055	0,013	---	---	---	
EN 10080 :2005	0,24	---	---	0,055	0,055	0,014	0,85	---	0,52	
ISO 6935-2 : 2007 a)	1	0,22	0,6	1,6	0,05	0,05	0,012		50	
	2	0,32	0,55	1,5	0,04	0,04	0,012		0,61	
a) 1 : B500AWR, B500BWR, B500CWR ; 2 : B500DWR										

### I- 3-3. Propriétés mécaniques :

La caractéristique principale de l'armature est sa limite d'élasticité  $R_e$ . On peut la calculer comme le rapport entre la force à la limite d'élasticité de l'armature et sa section nominale. De plus, les normes déterminent la valeur de la résistance à la rupture  $R_m$  ou bien le rapport  $R_m/R_e$ . Ce rapport caractérise la sécurité du rond à béton dans la construction. Ce dernier doit être conforme aux prescriptions pour les caractéristiques de traction spécifiées dans le Tableau [23].

**Tableau I- 3 :** Caractéristiques de traction.

Valeurs minimales	Caractéristiques mécaniques		
	$R_e$ min N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ min N/mm <sup>2</sup>	$A$ min %
<b>Fe E 500</b>	<b>500</b>	<b>550</b>	<b>14</b>

- Le module élastique de toutes les armatures en acier est de 29000000 psi et cette valeur peut être utilisée dans la conception. Ce module uniforme pour toutes les nuances et tailles de barres simplifie le processus de conception. Les matériaux avec des modules inférieurs peuvent nécessiter des barres supplémentaires pour assurer la même facilité de maintenance et les structures conçues avec ces matériaux peuvent présenter des flèches accrues et des fissures supplémentaires. L'acier a des propriétés élastiques similaires sous des charges de traction et de compression.

- L'armature en acier a un allongement important sous charge, ce qui permet de définir des fissures bien définies dans la structure en cas de surcharge. Une telle fissure fournit un avertissement approprié aux occupants concernant le chargement d'une structure. Les matériaux qui ne présentent pas de comportement non élastique sous la charge peuvent ne pas fournir une ductilité suffisante pour prévenir d'une défaillance imminente.

- Les armatures en acier ont généralement des propriétés uniformes dans toutes les directions et la résistance au cisaillement est similaire à la limite d'élasticité longitudinale.

- Les propriétés de fatigue des structures en béton armé d'acier sont bien comprises [24].

### I- 3-4. Propriétés thermiques :

Le module de dilatation thermique du ferrailage est très proche de celui du béton. En raison de la similitude des propriétés thermiques du béton et de l'acier, des contraintes ou déformations supplémentaires ne sont pas introduites lors du chauffage de la structure en béton. Sous l'effet du feu, le rond à béton résiste à des températures élevées avant que les propriétés de

résistance et de ductilité ne changent. De nombreuses structures en béton qui ont été soumises à un incendie peuvent être réhabilitées en utilisant l'acier d'armature existant [25].

### **I-3. Défauts de fabrication du rond à béton :**

Au cours de la production du rond à béton, de nombreuses imperfections et défauts apparaissent qui détériorent la qualité du produit et par conséquent réduisent le gain de l'entreprise. En général, les défauts les plus couramment rencontrés dans les produits en acier sont les suivants: [26]

- Fissures du réseau ;
- Porosité ;
- Trous de gaz ;
- Eclats ;
- Inclusions non métalliques ;
- Ductilité à basse température,
- Macro- et micro-ségrégation et défauts mécaniques (égratignures, fissures transversales et joints).

### **Conclusion :**

La production de l'acier à béton est un procédé complexe qui comporte plusieurs stades.

L'industrialisation du bâtiment et le coût de la main-d'œuvre ont conduit à utiliser des ronds à béton à caractéristiques élevées. En ce qui concerne les ronds à béton soudables à haute adhérence, les nuances à 500 MPa de limite d'élasticité peuvent être obtenues par procédés suivants:

- en utilisant des aciers bas carbone, ainsi qu'un refroidissement direct des barres ;
- traitement thermomécanique (TMCP), utilisant la trempe superficielle avec auto-revenu.

Le mécanisme de durcissement ainsi que de la microstructure finale de l'acier et par conséquent les propriétés mécaniques, dépendent des conditions de déformation à chaud (température, vitesse, degré de déformation), de la pause entre la déformation et le refroidissement et de la vitesse et type de refroidissement accéléré.

**CHAPITRE II**  
**ELABORATION, CARACTERISATION ET**  
**IDENTIFICATION DES DEFAUTS DU RB32 DE**  
**NUANCE ST37-2 A SIDER EL-HADJAR ANNABA**

## CHAPITRE II : ELABORATION, CARACTERISATION ET IDENTIFICATION DES DEFAUTS DU RB32 DE NUANCE ST37-2 A SIDER EL-HADJAR ANNABA

### Introduction :

Le rond à béton est intégré dans le béton pour améliorer la résistance globale du béton qui l'entoure. Les matériaux métalliques, y compris le rond à béton, subissent dans la plupart des cas des charges statiques dans les constructions en béton armé. Voilà pourquoi des essais mécaniques statiques prenant en considération différentes conditions de contraintes sont très utilisés pour ce type des matériaux. Des normes de produits matériels existent pour aider à garantir que les ronds à béton produits dans le monde présentent les mêmes propriétés physiques, chimiques et mécaniques, quelle que soit la source. Des essais appropriés sont alors nécessaires pour déterminer si le rond à béton répond aux spécifications publiées, ce qui garantit la qualité du produit.

### II- 1. Méthode d'élaboration :

Le rond à béton « RB32 » utilisé dans notre étude est fabriqué au sein de l'unité « Laminoir rond à béton LRB » au niveau du complexe sidérurgique « SIDER » d'EL-HADJAR à Annaba. Le RB32 est élaboré à partir de billettes produites à L'ACO2 et ACE au niveau du même complexe.

Le processus consiste à réchauffer les billettes dans un four afin d'augmenter l'élasticité du métal par conséquent on minimise l'effort de laminage et pour avoir une meilleure réduction de la section de la billette pour obtenir le diamètre demandé. Ensuite, les billettes passent par le train de laminage qui est composé de plusieurs cages comprenant des cylindres entre lesquels passe le métal qui y subit un écrasement progressif.

Le laminage consiste à déformer et allonger les billettes à l'état pâteux, portées à la température de laminage (1200°C en virent) entre deux cylindres tournant en sens inverse. Cette déformation est enchaînée par des passages successifs soit entre les mêmes cylindres, soit dans une succession de paire de cylindre, de façon à aboutir à une forme géométrique utilisable.

## II- 2. Description du laminoir rond à béton (LRB) :

L'unité de production du rond à béton, se compose de quatre zones, ont de différentes fonctions sont nommées comme suit :

### II-2-1. Zone de four :

La zone de four est dotée d'un four de circuit d'une capacité de 80T/H qui consiste à chauffer à 1160 °C avant son défournement la billette provenant des aciéries.

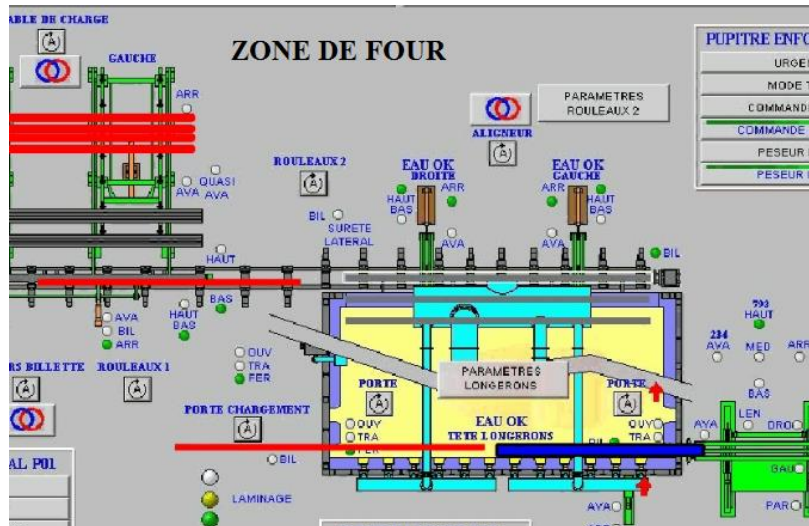


Figure II- 1 : Zone de four.

### II-2-2. Zone de laminage :

La zone de laminage est composée d'un système de 16 cages convertible, composée chacune de 02 cylindres –fonctionnant en position horizontale et verticale. Elles sont disposées en ligne de 06 cages de dégrossissage, de 04 intermédiaires et de 06 cages finisseuses.

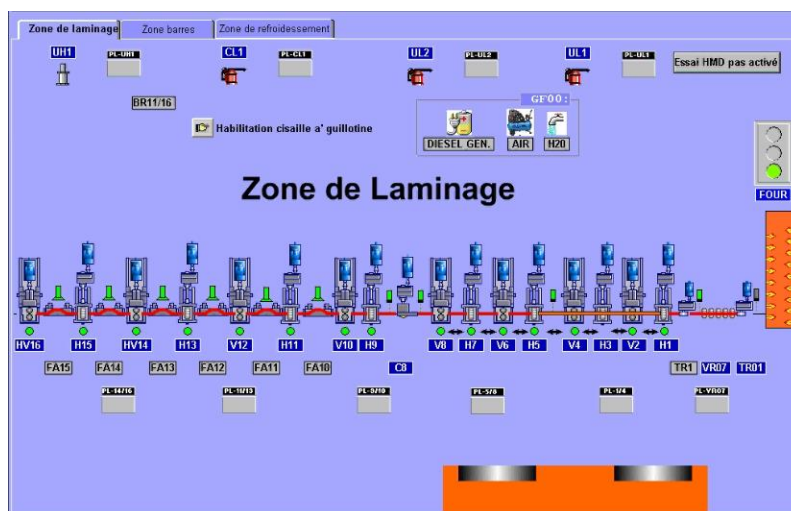


Figure II- 2 : Zone de laminage.

**II-2-3. Zone de barres :**

La zone de barres est dotée d'un thermex, dispositif permettant un traitement thermique destiné à donner au produit ses caractéristiques mécaniques (trempe à l'eau).

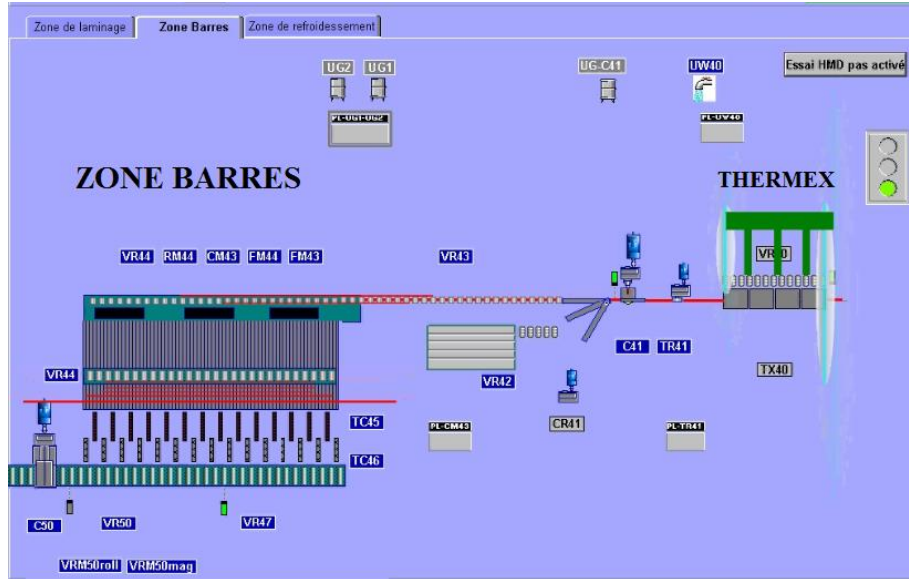


Figure II- 3 : Zone de barres.

**II-2-4. Zone de refroidissement :**

La zone de refroidissement est dotée d'un dispositif nommé « cooling bed » qui se compose de plaques de refroidissement fixe et amovible, permettant un refroidissement à l'air libre « revenu ».

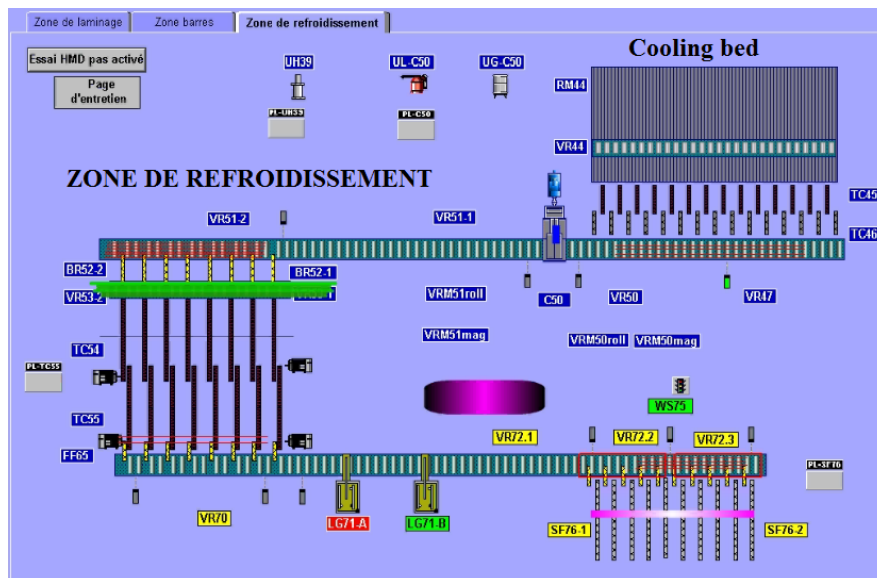


Figure II- 4 : Zone de refroidissement.



### II- 3. Composition chimique :

L'analyse chimique de nos échantillons a été réalisée en spectroscopie aux Laboratoires centraux au niveau du complexe sidérurgique « El-Hadjar ».

Le rond à béton doit avoir une composition chimique conforme à la norme (Tableau II-1) afin d'obtenir facilement les propriétés mécaniques désirées correspondant à une classe technique de 500MPa pour la limite d'élasticité après le traitement thermomécanique.

Le RB32 de nuance ST37-2 est un acier à bas carbone faiblement alliés avec des éléments d'additions.

La composition chimique du rond à béton, telle que déterminée par l'analyse doit être conforme au Tableau II-1.

**Tableau II- 1 :** composition chimique du rond a béton.

Elément en % Valeur-MAX	C	Mn	Si	P	S	N	Céq
Fe E400 (RB400W)	0.22	1.60	0.60	0.05	0.05	0.012	0.50
Fe E500 (RB500W)	0.24	1.70	0.65	0.055	0.055	0.013	0.52

1) Calculer le carbone équivalent, CEV

$$C_{ev} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+V+Mo)}{5} + \frac{(Cu+Ni)}{15} \quad \dots(7)$$

Où C, Mn, Cr, V, Mo, Cu et Ni sont les fractions massiques, exprimées en pourcentages, des éléments chimiques respectifs de l'acier.

### II- 4. Caractéristiques mécaniques du RB32 :

#### II- 4-1. Caractéristiques de traction :

Les caractéristiques principales du RB32 sont :

1) **Résistance statique** : est capacité à maintenir l'intégrité notamment en ce qui concerne les risques de rupture face aux sollicitations mécaniques. On examine dans certains cas les données en tenant compte de la température et/ou de la vitesse de déformation. Les valeurs de référence établies grâce à un essai de traction sont :

- **Re** (limite d'élasticité) qui détermine la limite au-delà de laquelle apparaissent des déformations plastiques,
- **Rm** (résistance à la traction) qui caractérise bien la force maximale que peut supporter un élément de structure soumis à une traction pure.

2) **Ductilité** : sa capacité à supporter une déformation. On suit, toujours au travers de l'essai de traction, les valeurs suivantes :

- A (allongement après rupture),
- Z (coefficient de striction reflétant par exemple les possibilités de formage à froid du métal),
- Ag - allongement réparti (observé sur l'éprouvette avant le début de la striction et correspondant à la force équivalente à la résistance à la traction). Cette dernière valeur permet d'apprécier la sécurité en service.

Eventuellement, on utilise  $R_m/R_e$  comme indice de la capacité de déformation plastique de l'acier. Le matériau doit être conforme aux prescriptions pour les caractéristiques de traction spécifiées dans le Tableau II-2.

**Tableau II- 2** : Essai de traction.

Valeurs minimales	Caractéristiques mécaniques			
	Re min N/mm <sup>2</sup>	Rm min N/mm <sup>2</sup>	A min %	Rm/Re min
Fe E 400	400	440	14	1,05
Fe E 500	500	550	14	1,05

#### II- 4-2. Caractéristiques de pliage :

On vérifie l'aptitude au pliage par l'absence de fissures lors d'une opération de pliage avec un rayon et pour un angle donnés. Le rond à béton doit avoir la capacité à résister à l'amorçage ou à la propagation de fissures. Après essai de pliage, les barres ne doivent présenter ni rupture ni fissures visibles par une personne dotée d'une vue normale ou corrigée.

### II- 5. Techniques expérimentales de caractérisation du RB32.

Les techniques expérimentales de caractérisation du RB32 que nous avons utilisées, visent à comprendre le comportement du matériau sous sollicitations mécaniques, en relation avec les microstructures.

#### II-5-1. Essais mécaniques :

Trois types d'essais mécaniques ont été retenus pour notre étude, à savoir :

- Essais de traction ;
- Essai de pliage ;
- Essais de dureté ;

### II-5-1-1. Essai de traction :

L'essai de traction est l'un des plus répandus et des plus pratiques. Il permet de déterminer certaines caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux qui servent de critère de qualité des matériaux et qui sont utilisées dans le calcul des constructions, à savoir:

- 1) La limite d'élasticité : c'est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.
- 2) La résistance à la traction : Elle correspond à la capacité d'un matériau à résister à des charges, à des forces sans rompre en raison d'une concentration de contrainte ou de déformation. La résistance maximale à la traction ( $R_m$ ) est souvent désignée par la contrainte maximale et est calculée en divisant la force maximale de traction que l'échantillon supporte par sa surface transversale.
- 3) L'allongement à la rupture : est une caractéristique sans dimension des matériaux. Elle définit la capacité d'un matériau à s'allonger avant de rompre lorsqu'il est sollicité en traction. Il consiste à réaliser un champ de contrainte uniforme et uniaxiale de traction dans une éprouvette et à enregistrer l'allongement résultant.

Les essais de traction ont été effectués au niveau du laboratoire des essais mécanique de l'unité LRB de SIDER d'EL-HADJAR ANNABA.



Figure II- 5 : Machine de traction 100T de type Wolpert.

### II-5-1-2. Essai de pliage :

L'essai de pliage a été effectué au niveau du laboratoire des essais mécanique de l'unité LRB de SIDER. Le but de ce test est de tester la qualité du produit et après essai, les barres ne

doivent présenter ni rupture ni fissures. L'appareil est conçu pour plier l'acier dans un virage en «U». Le virage fini peut être proche de 180 degrés.

S'il n'y a pas de rupture ou de fissure visible, l'éprouvette doit être considérée comme ayant réussi l'essai.



Figure II- 6 : Machine de pliage de type Wolpert.

### II-5-1-3. Essai de dureté :

L'essai de dureté est un test mécanique des propriétés des matériaux utilisées dans la conception technique, l'analyse des structures et le développement des matériaux. L'objectif principal de l'essai de dureté est de déterminer l'aptitude d'un matériau pour une application donnée, ou le traitement particulier auquel le matériau a été soumis. La dureté est définie comme la résistance d'un matériau à la déformation permanente telle que l'indentation, l'usure, l'abrasion, la rayure. Principalement, l'importance des essais de dureté a à voir avec la relation entre la dureté et d'autres propriétés du matériau. Par exemple, l'essai de dureté et l'essai de traction mesurent la résistance d'un métal à l'écoulement plastique, et les résultats de ces tests peuvent être très proches les uns des autres. Le test de dureté est préféré car il est simple, facile et relativement non destructif.

#### - Test de dureté Rockwell :

La méthode d'essai de dureté utilisé dans notre étude est la dureté Rockwell qui consiste à mettre en contact le matériau d'essai avec un cône en diamant ou un pénétrateur à billes en acier trempé. Le pénétrateur est forcé dans le matériau d'essai sous une charge mineure préliminaire, généralement 10 kgf. Lorsque l'équilibre a été atteint, un dispositif indicateur, qui suit les mouvements du pénétrateur et réagit ainsi aux changements de profondeur de pénétration du pénétrateur, est mis en position de référence. Pendant que la charge mineure

préliminaire est encore appliquée, une charge majeure additionnelle est appliquée avec une augmentation résultante de la pénétration. Lorsque l'équilibre est de nouveau atteint, la charge majeure supplémentaire est supprimée mais la charge mineure préliminaire est toujours maintenue. L'élimination de la charge majeure supplémentaire permet une récupération partielle, réduisant ainsi la profondeur de pénétration. L'augmentation permanente de la profondeur de pénétration, résultant de l'application et de l'élimination de la charge majeure supplémentaire, est utilisée pour calculer le nombre de dureté Rockwell.

Les essais de dureté ont été effectués au niveau du laboratoire des essais mécanique du département de métallurgie et génie des matériaux.



**Figure II- 7 :** Duromètre universel de type ZWICK- ROELL.

- **Essai de microdureté :**

La mesure de la microdureté, à la différence de la mesure de la dureté, intéresse un domaine très réduit de la matière (quelques microns) et sous de faibles charges. Elle permet donc d'obtenir des informations intéressantes en ce qui concerne en particulier : Les matières dures et fragiles (carbures) susceptibles de se fissurer, sauf sous très faible charge.



**Figure II- 8 :** Duromètre universel de type ZWICK- ROELL.

La microdureté consiste à utiliser des indenteurs de taille submillimétrique. Les empreintes ne couvrent alors qu'un à quelques grains, et les résultats présentent une dispersion significative, ce qui nécessite de multiplier les mesures. Elle s'effectue sous une charge de quelques grammes à quelques centaines de grammes. L'appareil utilisé (micro-duromètre) comporte une colonne de microscope optique en réflexion, qui permet de viser la zone souhaitée sur un échantillon poli; le pénétrateur Vickers est ensuite placé dans l'axe optique pour effectuer l'essai, puis le microscope permet de mesurer les diagonales de l'empreinte (de quelques microns à quelques dizaines de microns). On peut ainsi mesurer par exemple la dureté des différentes phases d'un matériau ou le profil de dureté obtenu sur la section d'une pièce à surface traitée.

Le calcul de la microdureté selon la formule Vickers :

$$HV = \frac{1.854 F}{d^2} \quad \dots (8)$$

F : la force appliquée en Kgf.

d : Diamètre moyen de l'empreinte en mm :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \dots (9)$$

## II-5-2. Essais métallographie :

### II-5-2-1. Microscopie optique :

Nous avons utilisé une technique de microscopie optique dans notre étude pour caractériser le type, la morphologie de microstructure, sa santé (continuité du matériau), sa propreté (absence de matière étrangère nuisible) et son homogénéité. Les échantillons d'aciers ont été observés au microscope optique NIKON sous différents grossissements au niveau du laboratoire de métallographie de l'école supérieur des mines et métallurgie ainsi aux laboratoires centraux du complexe sidérurgique SIDER d'EL-HADJAR.

Les étapes de préparation des échantillons pour la caractérisation microstructurale sont classiques :

- Découpage des échantillons en coupes transversales ;
- Enrobage : pour enrober nos échantillons nous avons choisi un enrobage à froid en utilisant la résine époxyde pour éviter un effet possible de vieillissement après une déformation à froid ;
- polissage au papier abrasif de 250 à 2000 suivi d'un polissage au diamant ;
- Attaque chimique au Nital (3% HNO<sub>3</sub> + méthanol). Le Nital est préférentiel dans les zones ferritiques, car elles apparaissent brillantes si elles sont d'étendue

suffisante, c'est-à-dire supérieures à la longueur d'onde lumineuse ( $\sim 0,6 \mu\text{m}$ ). Les zones de microstructure fine, comme les régions perlitiques, apparaissent sombres.

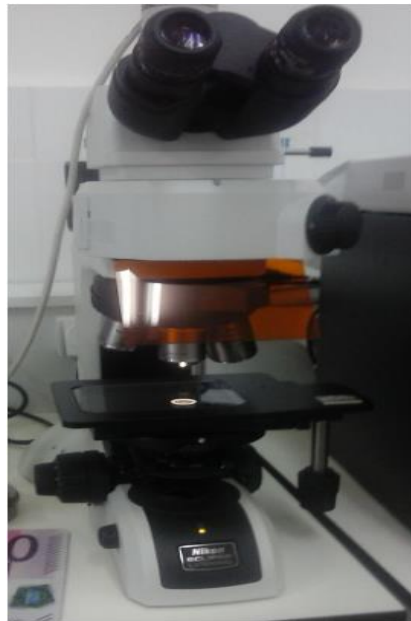


Figure II- 9 : Microscopie optique de type NIKON.

#### II-5-2-2. Microscopie électronique à balayage(M.E.B):

La microscopie électronique à balayage (MEB) a le grand avantage de pouvoir donner une image topographique réelle de la surface. L'étude d'une image permet de visualiser la forme, les dimensions des particules et permet d'accéder à une description morphologique et structurale de la surface. Les résultats obtenus par cette technique semblent bien performants, notamment dans la gamme des cristallites dont la taille varie du nano jusqu'au micromètre.

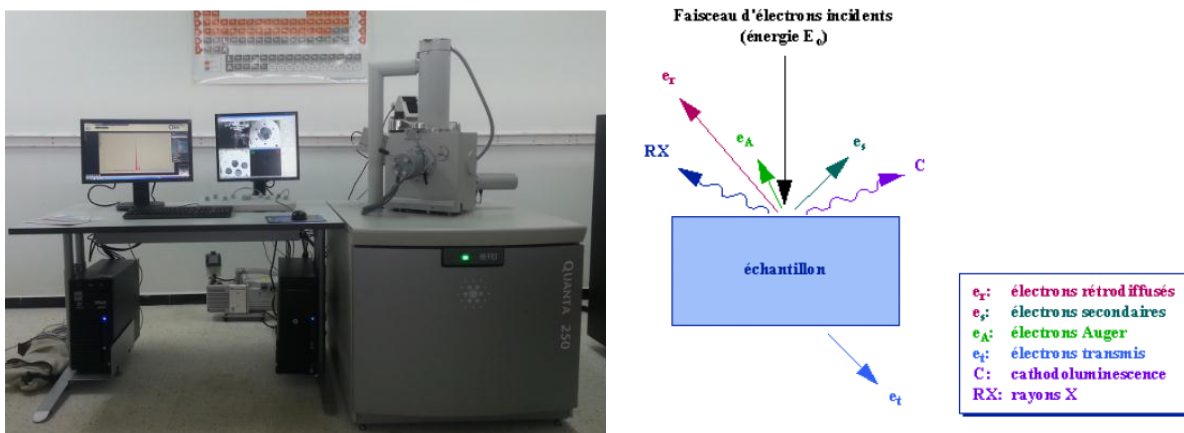


Figure II- 10 : (a)Microscopie électronique à balayage, (b) Les différentes émissions produites.



**Principe:**

L'échantillon est soumis à un bombardement d'électrons émis par un filament de tungstène

(W) dans une colonne maintenue sous vide. L'interaction du faisceau avec l'échantillon crée différentes émissions de particules qui sont analysées à l'aide de détecteurs appropriés : électrons secondaires, émission de rayons X, électrons rétro diffusés, etc.

Le détecteur du MEB récupère un mélange en proportion variable d'électrons secondaires et d'électrons rétro diffusés, proportion dépendant de l'énergie primaire, de la distance échantillon objectif, de l'angle d'incidence du faisceau primaire et du matériau observé. Les électrons secondaires permettent de distinguer les détails de la topographie de surface de l'échantillon. Les électrons rétro diffusés permettent d'en observer le contraste chimique.

**II- 6. Identification des différents défauts :****II-6-1. Types de défauts apparus sur le RB32 :****1) Moustache :**

<b>Définition</b>	C'est un défaut longitudinal sur l'un ou les deux cotés du métal.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	- Ce défaut se produit dans la 16 ème cage quand le jeu entre les galets est non convenable (diminution du jeu , T° plus élevée ou excès de métal) ; - Mauvais centrage de la boîte à Rx entrée cage16 par rapport au calibre.
<b>Remède :</b>	- Réglage du jeu des cylindres suivant la gamme ; - Changement de la boîte d'entrée cage 16 ; - Recentrer la boîte d'entrer cage 16 ; - Réglage de la température.



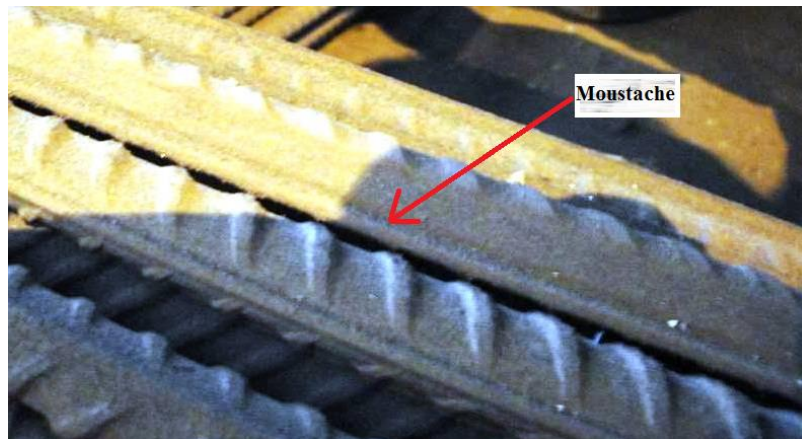


Figure II- 11 : Défaut de moustache.

## 2) Empreintes :

<b>Définition</b>	Ce sont des bosses ou des caves qui sont apparaissent sur la surface laminée du métal.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	- Dépôt de métal entre les cages N° 9 jusqu'à la cage N° 16 (dépend du diamètre laminé) ; - Dépôt de métal sur le calibre de la cage 16.
<b>Remède :</b>	- Passage du projet pour réglage métal de la cage N° 9 jusqu'à la cage N° 15 sauf la cage N°14 (pour le profil ( N12 – N14- N16) ; - Contrôle de tous les éléments de guidage (alignement) jeu de galet plus changement de cannelure dans la 16ème cage.



Figure II- 12 : Défaut d'empreinte.

## 3) Replure :

<b>Définition</b>	Ce sont des écailles fines qui se produisent sur la surface laminée.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- T° du four non uniforme ;</li> <li>- Non respect du système de refroidissement cage ;</li> <li>- Mauvais état de surface des calibres ;</li> <li>- Désaxage des cylindres cages finisseuses 13 – 14 – 15.</li> </ul>
<b>Remède</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réglage de la température et le système de refroidissement des billettes ;</li> <li>- Changement des cannelures ;</li> <li>- Réglage désaxage des cylindres.</li> </ul>

## 4) Hors tolérance diamètre :

<b>Définition</b>	Quand le diamètre du métal dépasse les écarts de tolérance supérieure ou inférieure on dit que le métal est hors Tolérance en plus ou en moins.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mauvais réglage jeu des cylindres des cages finisseuse ;</li> <li>- Usures des calibres ;</li> <li>- Mauvais remplissage métal des calibres finisseurs.</li> </ul>
<b>Remède :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réglage du jeu des cylindres dans les cages finisseuses ;</li> <li>- Changement des calibres usés ;</li> <li>- passage projets sur cages finisseuses (13,14,15,16) et contrôle dimensions.</li> </ul>

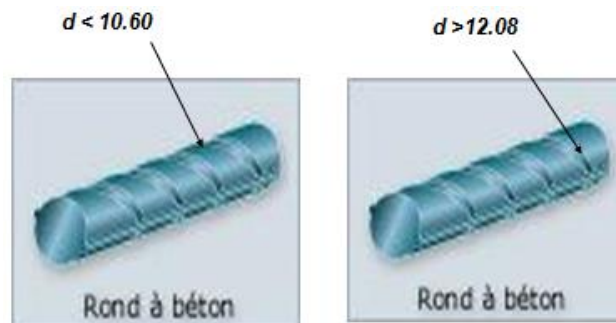


Figure II- 13 : Hors tolérance diamètre.

## 5) Ecrasement du diamètre :

<b>Définition</b>	Métal laminé des tolérances demandées.
<b>Identification</b>	Visuelle et mesure au pied à coulisse.
<b>Origine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution du jeu dans les cages finisseuses ;</li> <li>- Mauvaise retournement a la sortie cage N° 15 ;</li> <li>- Mauvais réglage des vitesses de laminage ;</li> <li>- désaxage des cylindres cage 16.</li> </ul>
<b>Remède :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réglage du jeu dans la cage finisseuse ;</li> <li>- Réglage du retournement sortie cage N° 15 ;</li> <li>- Réglage des vitesses de laminage ;</li> <li>- Eliminer le désaxage des cylindres de la cage 16.</li> </ul>



Figure II- 14 : Écrasement de diamètre.

## 6) Ecrasement de verrous :

<b>Définition</b>	Absence définitive des verrous.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Défaut dans les cannelures ;</li> <li>- Usure crans verrou cage 16 ;</li> <li>- Usure des cannelures dernières cages finisseuses ;</li> <li>- Faible débit métal en cage 16.</li> </ul>
<b>Remède :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Changement des cannelures avec réglage du jeu ;</li> <li>- Remplir le calibre de la cage 16 en laminant des projets sur les cages finisseuses (13,14,15,16) et en vérifiant les dimensions.</li> </ul>



Figure II- 15 : Écrasement de verrous.

7) Hors tolérance de nervure :

<b>Définition</b>	La nervure est laminée de la hors tolérance demandée.
<b>Identification</b>	Visuelle et mesure au pied à coulisse.
<b>Origine</b>	- Mauvais réglage du jeu entre les cylindres de la 16ème cage.
<b>Remède :</b>	- Réglage du jeu dans les cages finisseuses.



Figure II- 16 : Hors tolérance de nervure.

8) Absence de verrous :

<b>Définition</b>	Absence totale des verrous sur la surface laminée.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	- Absences de cannelures dans la dernière cage.
<b>Remède :</b>	- Changement de cannelures dans la dernière cage finisseuse



Figure II- 17 : Absence des verrous.

9) Chutes :

<b>Définition</b>	Barres inférieures à 12000mm après cisaille 51( la norme +100-0 ).
<b>Identification</b>	Visuelle et mesure.
<b>Origine</b>	- Défaut de coupe au niveau de la cisaille 51 ; - Défaut d'optimisation de longueurs ; - Longueurs des billettes.
<b>Remède :</b>	- Réglage des paramètres des coupes au niveau de la cisaille 51.



Figure II- 18 : Défaut de chutes.

10) Fissures :

<b>Définition</b>	C'est une ouverture ou une entaille longue et étroite sur la surface laminée du métal.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	- Mauvaise qualité interne des billettes ; - Désaxage des cylindres ; - Boite déchireuse défectueuse.
<b>Remède :</b>	- Respecter le tonnage prévisionnel des cannelures et des cages ; - Eliminer le désaxage des cylindres des cages ; - Réglage du refroidissement du train selon la gamme.

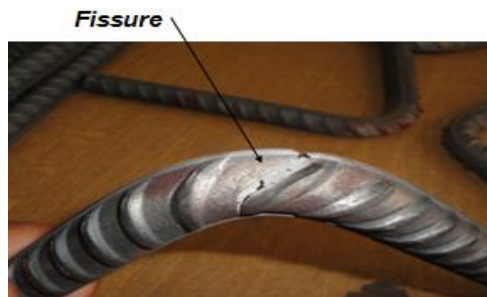


Figure II- 19 : Défaut de fissure.

## 11) Ondulation :

<b>Définition</b>	Arc ondulé non rectiligne sous forme de vague.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	- Non respect des pressions d'eau pour le premier et le deuxième tronçon du thermex ; - Mauvais état de la voie à rouleau après thermex.
<b>Remède :</b>	- Remise en état partiel de la voie à rouleaux après thermex ; - Respect des pressions d'eau pour le premier et le deuxième tronçon du thermex.



Figure II- 20 : Défaut d'ondulation.

## 12) BNA : (Barre non alignée)

<b>Définition</b>	Désalignement des barres.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	- Mauvais fonctionnement de la VR51 ; - Coincement des barres au niveau FF65.
<b>Remède :</b>	- Bon fonctionnement de la VR51 ; - Eviter les coincements des barres au niveau FF65.

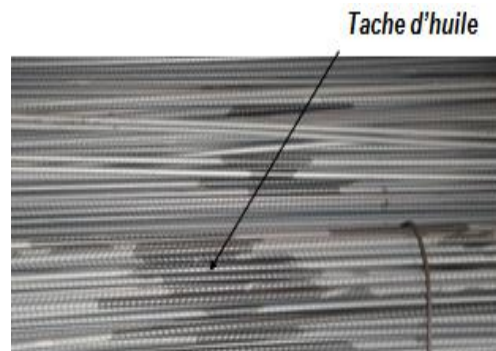


Figure II- 21 : Défaut de barre non alignée.



**13) Tâche d'huile :**

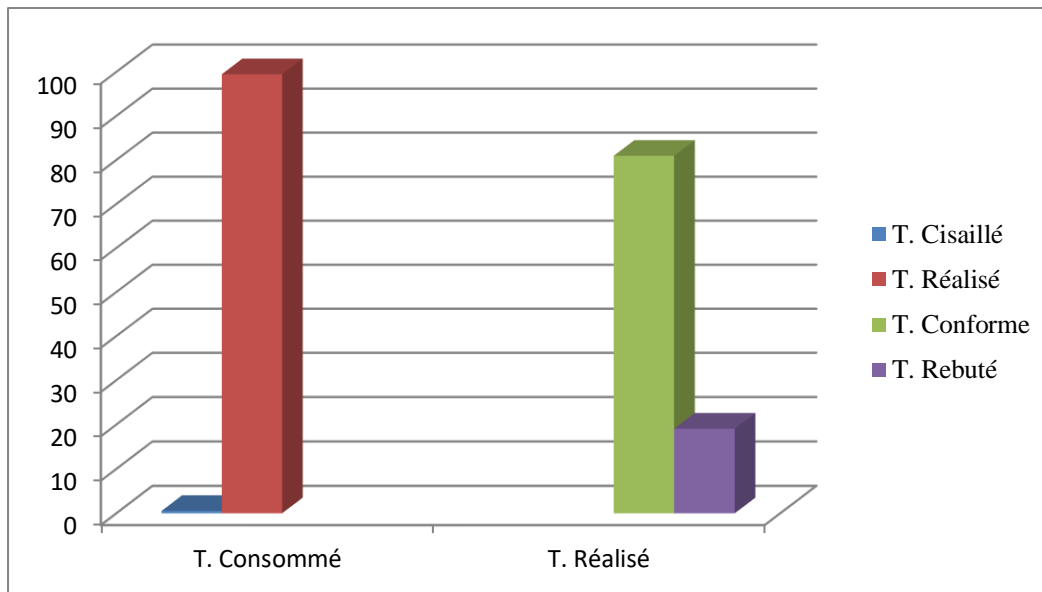
<b>Définition</b>	Des barres tachées par l'huile.
<b>Identification</b>	Visuelle.
<b>Origine</b>	- Eclatement du flexible d'huile zone formation fardeau (FF) ; - L'huile des pont roulants.
<b>Remède :</b>	- Élimination des fuites d'huile ; - Entretien des ponts roulants.

**Figure II- 22 : Défaut de taches d' huile.****II-6-2. Statistique des défauts apparus sur le RB32 pour l'année 2017 :**

L'évolution de la qualité du RB32 durant l'année 2017 est marquée par l'apparition de plusieurs défauts. Les statistiques des défauts du RB32 sont présentées dans le tableau II-4 et figure II-23.

**1) Tonnage de production du RB32 pour l'année 2017 :****Tableau II- 3 : Le tonnage de production pour le RB32.**

<b>Données</b>	<b>Tonnage</b>	<b>%</b>
Consommé	<b>7523,567</b>	<b>100</b>
Cisaillé	<b>39,806</b>	<b>0,53</b>
Réalisé	<b>7483,761</b>	<b>99,47</b>
Conforme	<b>6057,527</b>	<b>80,94</b>
Rebuté	<b>1426,234</b>	<b>19,06</b>



**Figure II- 23 :** Histogramme représentant le tonnage de production pour le RB32.

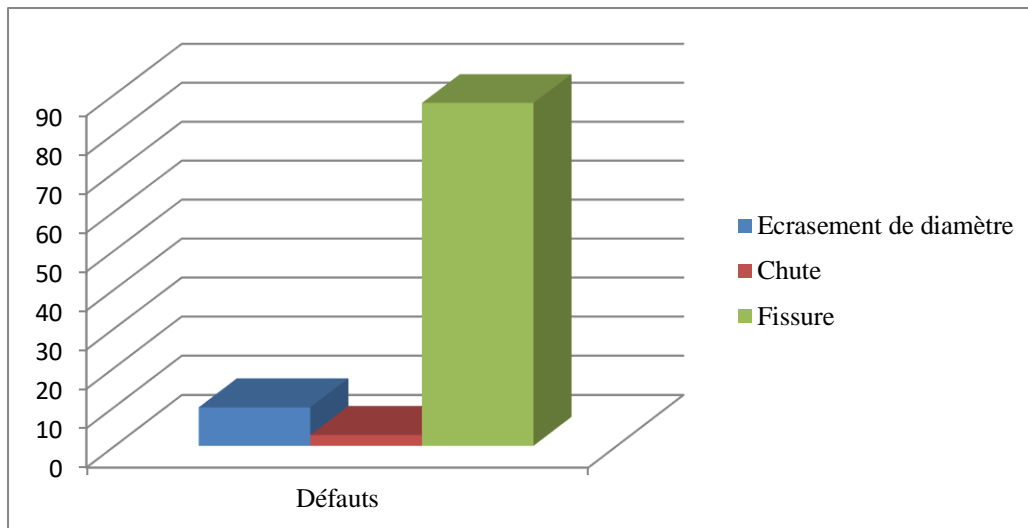
Le tableau II-3 et la figure II-23 montrent le tonnage de production du RB32 durant l’année 2017, et d’après ces données, on remarque que le taux de rebut est important et il est de 19 ,06 % du tonnage réalisé.

**2) Statistique des défauts du RB32 pour l’année 2017 :**

**Tableau II- 4 :** Rebut par motif de défauts.

Rebut par motif de défauts		
Défauts	N32	%
Ecrasement de diamètre	51,52	9,78
Chute	14,48	2,74
Fissure	460,56	87,75
Total	526,55	100





**Figure II- 24 :** Histogramme représentant le rebut par motif de défauts.

Le tableau II-4 et la figure II-24 montrent le taux des différents défauts qui sont apparus durant l'année 2017, on constate 3 types de rebut par motif de défaut, et d'après les données on remarque que le grand tonnage de rebut est à cause des fissures pour un taux de 87,75%.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté le rond à béton étudié dans notre travail qui est produit au sein de l'unité LRB au niveau du complexe sidérurgique SIDER, EL-HADJAR, à partir de billettes élaborées à l'ACO2. Notre matériau est fabriqué par un laminage à chaud suivi d'un traitement thermique (trempe + revenu).

Ensuite on a présenté les différentes caractéristiques du RB32, ainsi que les techniques expérimentales pour déterminer les propriétés mécaniques, à savoir la résistance mécanique, l'allongement à rupture, la microdureté, et aussi les techniques mises en œuvre pour l'observation des microstructures.

Et enfin, on a présenté les différents défauts qui peuvent survenir dans notre produit au cours de sa production et on a constaté que le défaut de fissures est le plus important sur le RB32.

## **CHAPITRE III**

**Etude des fissures lors de la production du RB32**

## CHAPITRE III : ETUDE DES FISSURES LORS DE LA PRODUCTION DU RB32

### Introduction :

Les aciers de construction métallique se sont considérablement accrus ces dernières années. La limite d'élasticité, la résistance, la résilience, la soudabilité, l'aptitude à la mise en forme, la résistance à la fatigue et à la corrosion, voire la propreté aux défauts, constituent un ensemble de propriétés susceptibles d'être exigées en tout ou partie par utilisateur. Nous nous intéressons, dans le présent travail à étudier le défaut de fissure vu sa présence importante dans notre produit d'après les statistiques présentées dans le chapitre précédent.

### III-1. Généralité sur les défauts de fissure :

Toutes les pièces mécaniques contiennent des fissures, même si cela ne se voit pas à l'œil nu. Ces fissures peuvent croître lentement ou brutalement, le dernier cas de figure étant souvent synonyme de rupture ; la prévision de ces phénomènes est donc un enjeu essentiel pour le dimensionnement [27].

Des fissures peuvent se produire le long du rond à béton ou transversalement à celui-ci. La cause de ce type de défauts de surface pourrait être un certain nombre de sources, se produisant à la fois dans l'atelier de fusion et dans le laminoir. Des fissures dues au stress, des trous dans la peau, des croûtes peuvent se produire lors de la coulée ou de la solidification dans l'atelier de fusion et, après avoir été allongées lors du laminage subséquent, apparaissent comme des fissures. Dans le laminoir, une forme incorrecte de la rainure du rouleau, des surfaces de roulement usées et des rayures du guide peuvent être à l'origine de fissures.

#### III-1-1. Définition de fissure :

La fissure est un « défaut » ou une discontinuité brutale apparue ou apparaissant dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, où la matière est séparée sur une certaine surface. Tant que les forces de contraintes ne sont pas libérées, elle entraîne une grande concentration de contrainte à son fond [28].

#### III-1-2. Origine de fissure :

Il est très difficile de réaliser une structure ne contenant aucune fissure. Les fissures rencontrées dans le rond à béton peuvent être causées par :

### 1) Inclusions non métalliques lors d'un laminage :

Les inclusions non-métalliques sont des lieux privilégiés d'apparition des fissures du fait de leur aptitude à piéger l'hydrogène. Pour éviter la formation de ces inclusions, les teneurs en soufre et manganèse doivent être limitées. De plus, lors de la fabrication, des traitements tels que l'injection de calcium ou calcium/silicium peuvent être réalisés pour réduire la teneur en soufre mais aussi modifier le type et la forme des inclusions [29].

### 2) Technologie de laminage :

D'après les travaux de Kawano et al, la température était le paramètre de traitement le plus important pour contrôler les fissures de surface et la conception de passe de rouleau recommandée avec la moindre chute de température pendant le laminage pour réduire les fissures de surface. Ils ont également ajouté un paramètre de vitesse de roulement pour réduire la fissuration de surface [30].

Pendant le laminage à chaud, si la température de l'acier n'est pas uniforme, alors le flux du matériau se produit plus dans les zones ayant une température plus élevée et moins dans les pièces à température plus basse. La différence de température élevée entraîne des fissures et des déchirures [31].

### 3) Traitement thermique de l'acier :

Au cours de la trempe, des fissures peuvent souvent se former. Pour éviter ce défaut incorrigible, on recommande lors de la fabrication des pièces de :

- Éviter les saillies, les angles vifs, les raccordements brusques etc. ;
- Refroidir modérément en utilisant une trempe à deux bains.

Par ailleurs, même si le composant est initialement dépourvu de fissures, les sollicitations cycliques et la corrosion peuvent en introduire ultérieurement [32].

### III-1-3. Types de fissure :

1) Fissures longitudinales - Elles sont formées dans le sens de l'extraction de l'acier. La présence de ces défauts entraîne le rejet de l'acier.

2) Fissures transversales - Ces fissures apparaissent généralement en raison des tensions dans la direction longitudinale du brin. Les fissures transversales sont généralement broyées dans les limites admissibles à condition qu'elles ne soient pas profondes.

3) Fissures en étoile - Ces fissures sont très fines et causées par la nature fragile du fil à haute température. Ils ne sont visibles que sur une surface sans écailles. La surface est généralement moulue localement pour éliminer le défaut. Un refroidissement local intense et la présence de cuivre à la limite des grains austénitiques provoquent des fissures en étoile [33].

### III-2. Discussion des résultats de l'étude des fissures du RB32 :

Afin de caractériser nos fissures, on a pris 13 échantillons pour lesquels on a réalisé des :

- Analyses chimiques ;
- Essais mécaniques ;
- Essais métallographiques.

#### III-2-1. Résultats des analyses chimiques :

Les analyses chimiques ont été réalisées pour les 13 échantillons. Les résultats obtenus sont représentés par le tableau III-2.

On remarque que le RB32 est un acier à bas carbone et micro-allié car il contient de petites quantités de nickel, chrome (Ni et Cr) et de traces de cuivre, aluminium, titane, niobium, molybdène, vanadium et étain (Cu, Al, Ti, Nb, Mo, V et Sn), alors que la norme ISO 6935-2 exige pour le rond à béton la composition chimique suivante :

**Tableau III- 1 :** Composition chimique du rond à béton selon la norme ISO 6935-2.

Nuance d'acier	C	Si	Mn	P	S	N	Ceq
B500AWR	0,22	0,6	1,6	0,05	0,05	0,012	0,5

Le premier B correspond à acier pour béton armé, les 3 positions suivantes correspondent à la valeur caractéristique spécifiée de la limite supérieure d'écoulement. Le cinquième symbole correspond à la classe de ductilité 500MPa. Le sixième symbole correspond au soudage "W" signifie apte au soudage. Le dernier "R" signifie barres à verrous.

Tableau III- 2 : Analyse chimique des échantillons étudiés.

Echantillon	C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ti	Nb	Ni	Cr	Mo	V	Sn	N	FE%	Ceq
E1	0,21	0,85	0,22	0,009	0,010	0,014	0,004	0,001	0,001	0,005	0,020	0,002	0,003	0,001	0,002	98,65	0,35
E2	0,24	0,71	0,19	0,007	0,012	0,033	0,005	0,001	0,001	0,013	0,021	0,002	0,003	0,004	0,004	98,75	0,36
E3	0,23	0,74	0,21	0,002	0,019	0,008	0,003	0,001	-	0,013	0,022	0,001	0,002	0,001	0,005	98,74	0,36
E4	0,18	1,19	0,20	0,029	0,011	0,008	0,003	0,001	-	0,004	0,021	0,001	0,004	0,001	0,001	98,35	0,38
E5	0,17	0,78	0,14	0,02	0,01	0,01	-	-	-	0,01	0,02	0,001	0,002	0,001	0,007	98,83	0,31
E6	0,21	0,49	0,12	0,005	0,008	0,018	0,003	-	-	0,008	0,603	0,001	-	0,001	0,002	98,53	0,41
E7	0,19	0,69	0,13	0,02	0,01	0,28	0,002	0,001	-	0,118	0,09	0,008	0,002	0,015	0,014	98,45	0,35
E8	0,19	0,63	0,14	0,014	0,01	0,233	0,001	0,001	-	0,109	0,079	0,009	0,001	0,012	0,008	98,56	0,34
E9	0,21	0,74	0,16	0,01	0,01	0,03	0,003	0,001	-	0,005	0,01	0,001	0,003	0,001	-	98,82	0,34
E10	0,20	0,72	0,24	0,01	0,01	0,03	0,003	0,001	-	0,011	0,03	0,002	0,002	0,001	-	98,74	0,33
E11	0,28	0,79	0,28	0,01	0,01	0,01	0,003	0,001	0,006	-	0,02	0,002	0,003	0,001	0,002	98,58	0,42
E12	0,24	0,84	0,17	0,01	0,01	0,03	0,006	0,001	0,016	0,001	0,02	0,003	0,003	0,002	0,001	98,65	0,39
E13	0,20	0,86	0,22	-	0,01	0,04	0,004	0,001	-	0,014	0,02	0,004	0,003	0,001	0,002	98,62	0,35

### III-2-2. Résultats des essais mécaniques :

Les paramètres les plus importants pour contrôler la qualité du rond à béton pendant le laminage sont la température de four, la vitesse de laminage ainsi le débit d'eau et la température de sortie du thermex. Les paramètres standards pour réaliser un produit de qualité conforme sont présentés dans le tableau III-3.

**Tableau III- 3 :** Paramètres de laminage.

	Température de four (°C)	vitesse de laminage M / S	débit d'eau thermex M3 / H	T° sortie thermex °C
<b>paramètre standard</b>	<b>1120</b>	<b>3-3.5</b>	<b>360</b>	<b>520-610</b>

#### III-2-2-1. Caractéristiques de l'essai de traction et paramètres de laminage :

Les essais de traction ont été réalisés pour les 13 échantillons. Les résultats obtenus sont représentés par le tableau III-4.

**Tableau III- 4 :** Caractéristiques de traction et paramètres de laminage.

Echantillon	Caractéristiques de l'essai de traction		
	Re	Rm	A%
E1	583	731	14,1
E2	511	640	14,9
E3	515	655	14,3
E4	536	657	16,1
E5	521	678	11,8
E6	531	669	13,8
E7	550	656	17,1
E8	641	796	19,3
E9	543	674	14,5

E10	564	688	15,1
E11	540	698	14,9
E12	585	701	14,6
E13	533	644	14

Identification des caractéristiques :

Re : la limite d'élasticité.

Rm : la résistance à la traction.

A% : l'allongement à la rupture

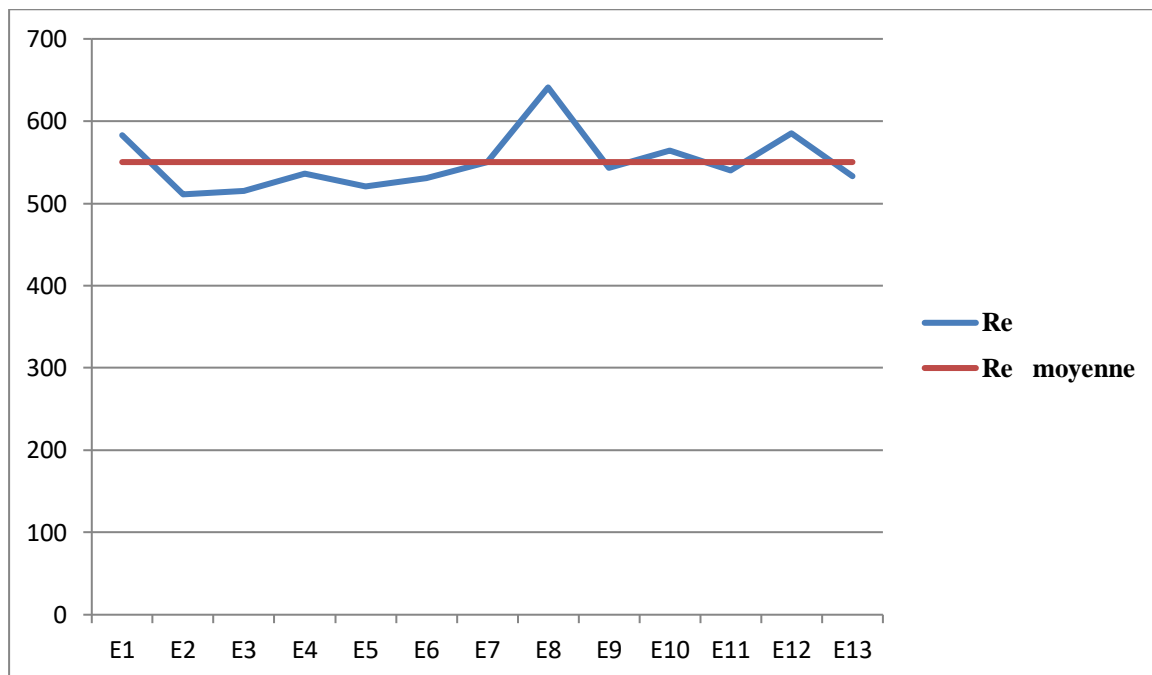
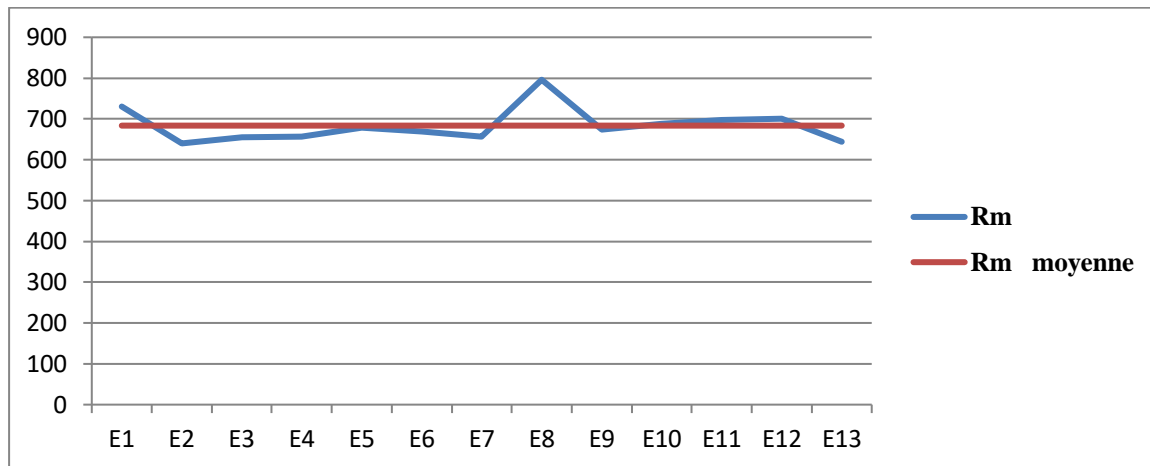
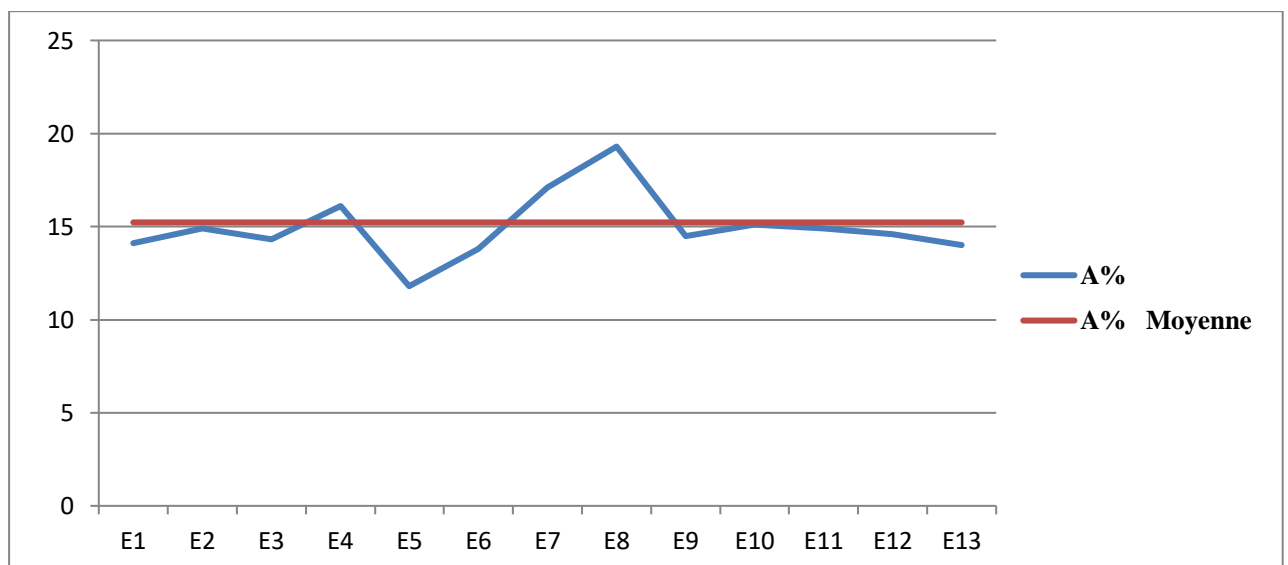


Figure III-1 : Evolution de la limite élastique des différents échantillons.





**Figure III-2 :** Evolution de la résistance à la traction des différents échantillons.



**Figure III-3 :** Evolution de l'allongement à la rupture des différents échantillons.

Les résultats de traction montrent que :

- La limite élastique  $R_e$  est comprise entre  $511 \div 585$  MPa.
- La résistance à la traction  $R_m$  est comprise entre  $640 \div 731$  MPa.
- L'allongement à la rupture est compris entre  $11,8 \div 17,1$  %

Alors que pour l'échantillon E8, la limite élastique  $R_e$  est de 641 MPa, la résistance à la traction  $R_m$  est de 796 MPa et l'allongement à la rupture est de 19,3%.

#### III-2-2-2. Résultats de l'essai de dureté :

Les essais de dureté ont été réalisés sur les 13 échantillons. Les résultats obtenus sont représentés par le tableau III-5.

Tableau III- 5 : Les résultats des essais de dureté.

Echantillon	Résultats de l'essai de dureté					
	Dureté HRB			Dureté HRC		
	Bord	Intermédiaire	Cœur	Bord	Intermédiaire	Cœur
E1	102,5	94,5	86	26,5	16,5	6,3
E2	100,8	95	87	23,8	18	7
E3	100,2	92	86	23,2	14	5,5
E4	101,2	92	86,5	25,2	14	6,5
E5	105	98	91	30	21	12
E6	103	95	88	28	18	9
E7	97	91	85	20	12	4
E8	103	102	100	28	26	23
E9	105	95	88	30	18	9
E10	104	95	87,5	29	18	7,5
E11	104	96	92,5	29	19	14,5
E12	103	98	89,5	28	21	10,5
E13	103	97	87	28	20	7

Les résultats de dureté montrent que :

- La dureté HRB sur la zone de bord est comprise entre 97 ÷ 105 HRB et la dureté HRC entre 20 ÷ 30 HRC.
- La dureté HRB sur la zone intermédiaire est comprise entre 91 ÷ 102 HRB et la dureté HRC entre 12 ÷ 26 HRC.
- La dureté HRB sur la zone du cœur est comprise entre 85 ÷ 100 HRB et la dureté HRC entre 4 ÷ 14,5 HRC.

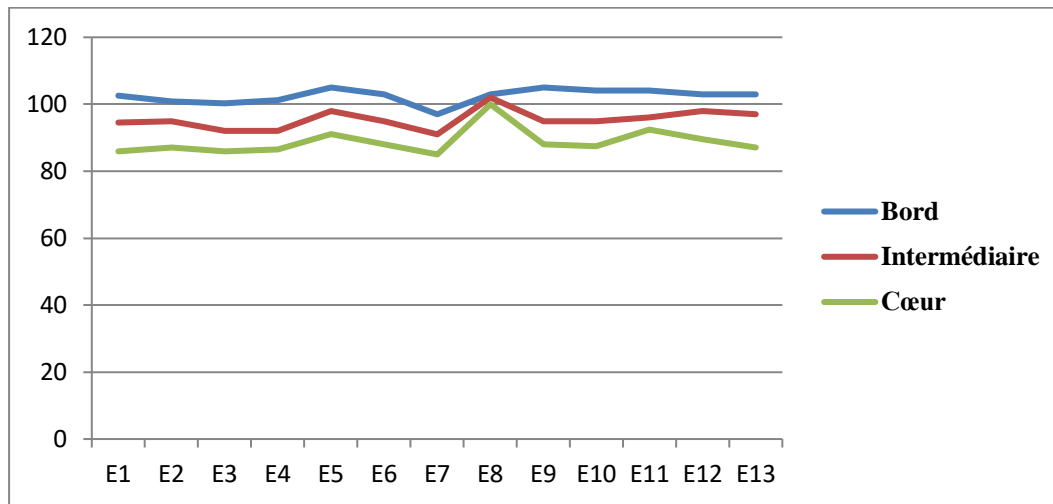


Figure III-4 : Evolution de la dureté HRB des différents échantillons.

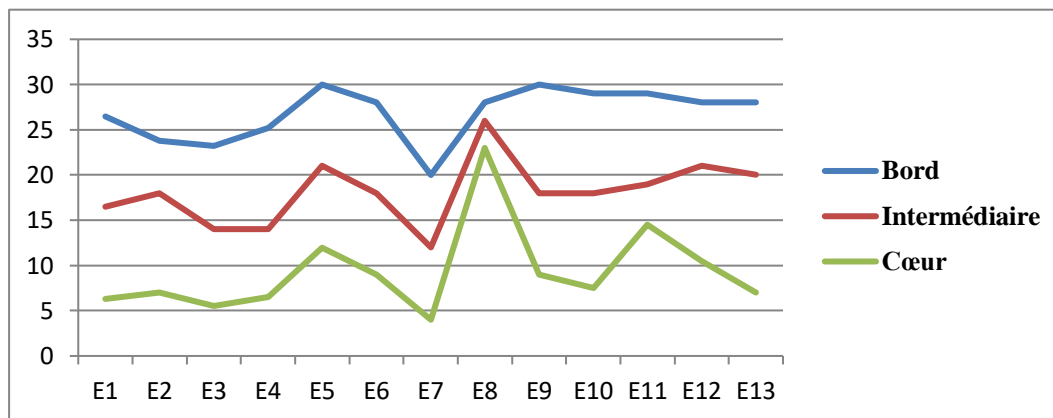


Figure III-5 : Evolution de la dureté HRC des différents échantillons.

**III-2-2-3. Résultat de l'essai de microdureté :**

L'essai de microdureté HV a été réalisé sur l'échantillon E6 sur les bords de la fissure et on a obtenu les résultats suivants :

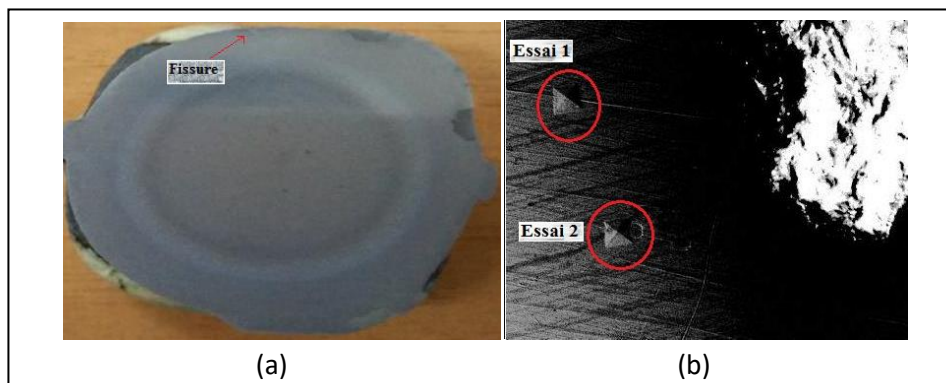


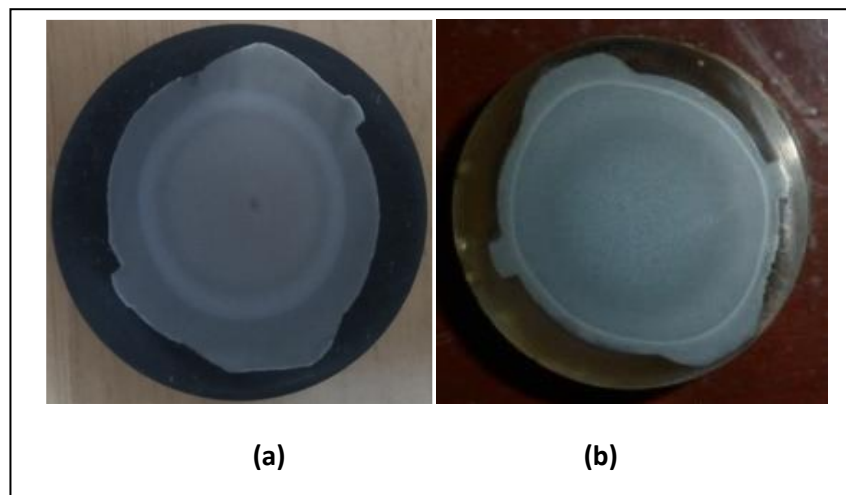
Figure III-6 : (a) localisation de la fissure, (b) localisation des empreintes d'essais de microdureté de l'échantillon E6.

Tableau III- 6 : Résultat de l'essai de microdureté de l'échantillon E6.

Paramètres	Essai	
	Essai 1	Essai 2
Charge (gf)	200	200
Temps chargé (s)	10	10
D1 ( $\mu\text{m}$ )	38,66	35,5
D2 ( $\mu\text{m}$ )	35,59	32,52
HV	269	320,6
HRC	25,4	32,2

### III-2-3. Caractérisation microstructurale des différents échantillons :

On a réalisé des coupes transversales pour les 13 échantillons, on les a fait subir un traitement de polissage et après une attaque chimique avec du Nital (3% HNO<sub>3</sub> + méthanol) on a obtenu les résultats suivants :



**Figure III-7:** (a) Coupe transversale de l'échantillon E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E9, E10, E11, E12, E13, (b) Coupe transversale de l'échantillon E8.

### III-2-3-1. Microscopie optique :

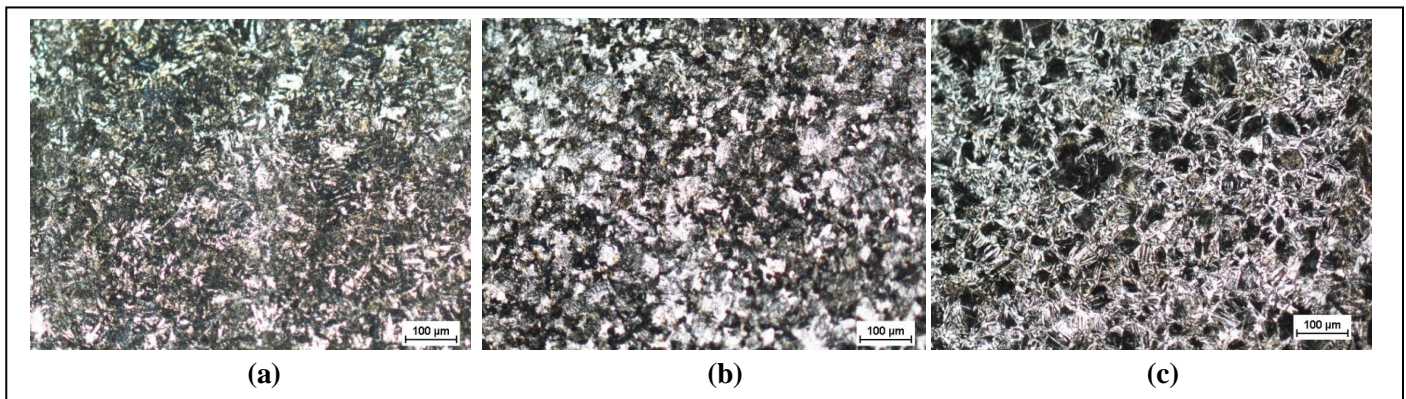
Les 13 échantillons ont été observés en microscopie optique.

#### 1. Echantillon E1 :

L'échantillon E1 ne représente aucune fissure.



**Figure III-8:** Aspect de l'échantillon E1 sur la partie pliée.



**Figure III-9 :** Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E1. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur.

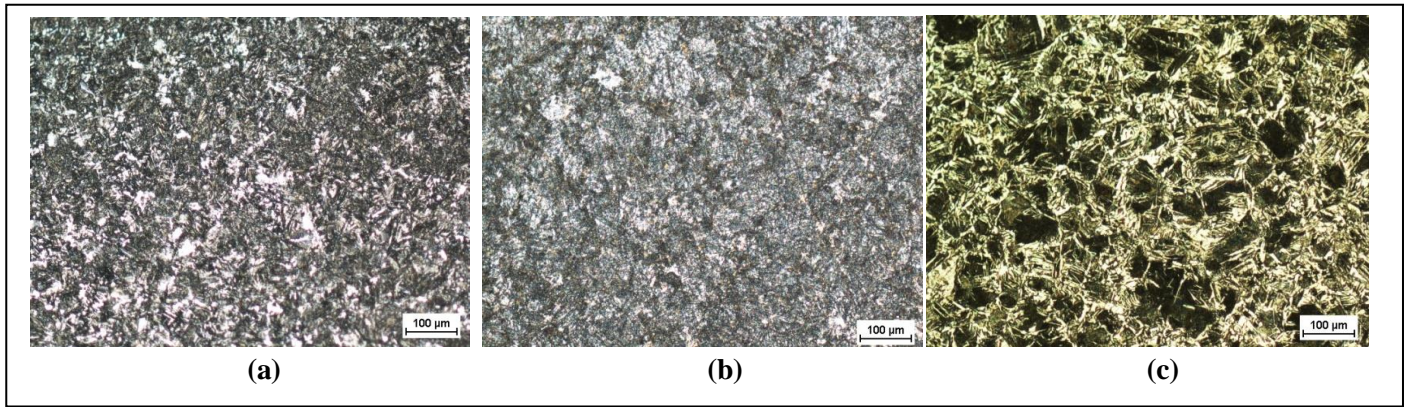
#### 2. Echantillon E2 :

L'échantillon E2 ne représente aucune fissure.



**Figure III-10:** Aspect de l'échantillon E2 sur la partie pliée.





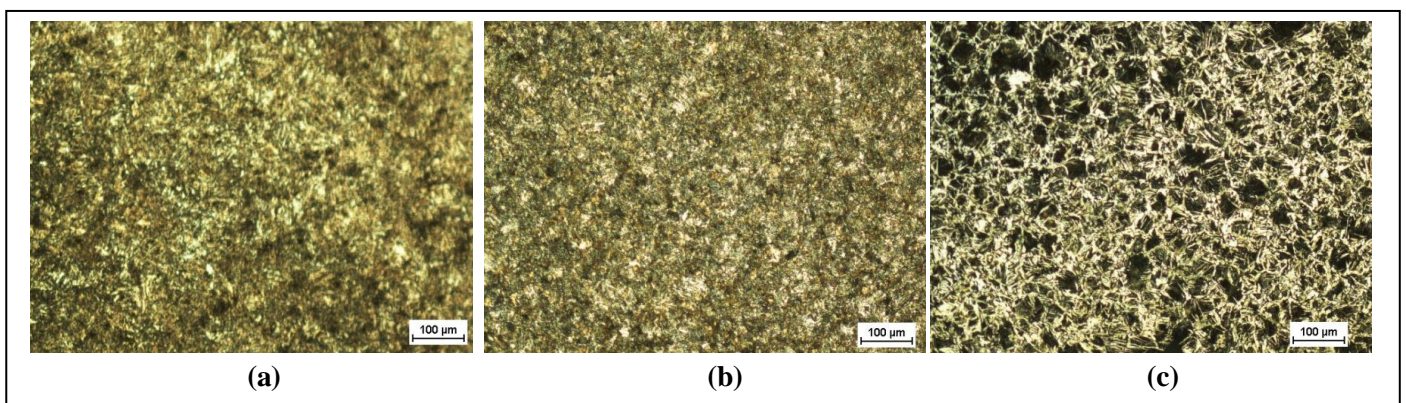
**Figure III-11** : Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E2. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur.

### 3. Echantillon E3 :

L'échantillon E3 ne représente aucune fissure.



**Figure III-12** : Aspect de l'échantillon E3 sur la partie plié.



**Figure III-13** : Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E3. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur.



#### 4. Echantillon E4 :

L'échantillon E4 ne représente aucune fissure.



Figure III-14: Aspect de l'échantillon E4 sur la partie plié.

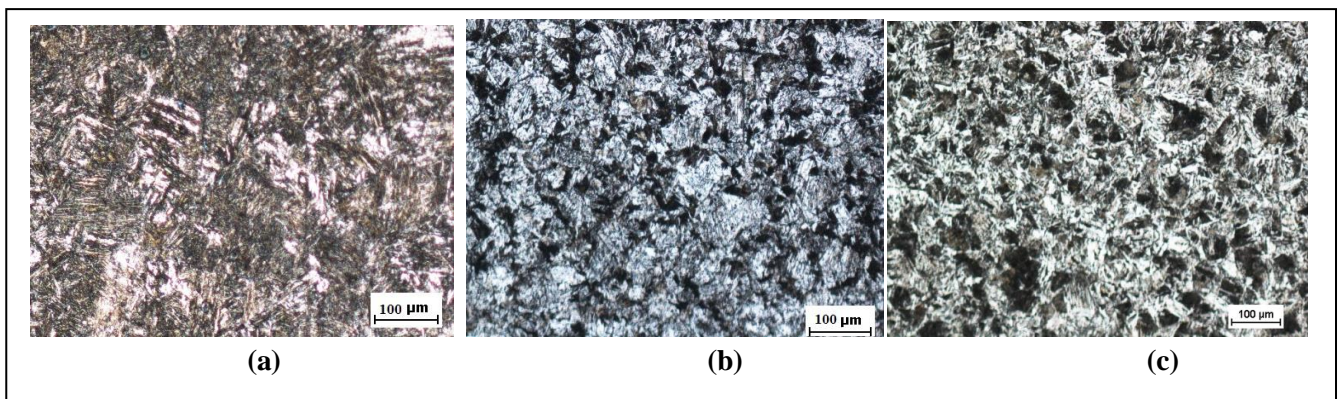


Figure III-15 : Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E4. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur.

#### 5. Echantillon E5 :

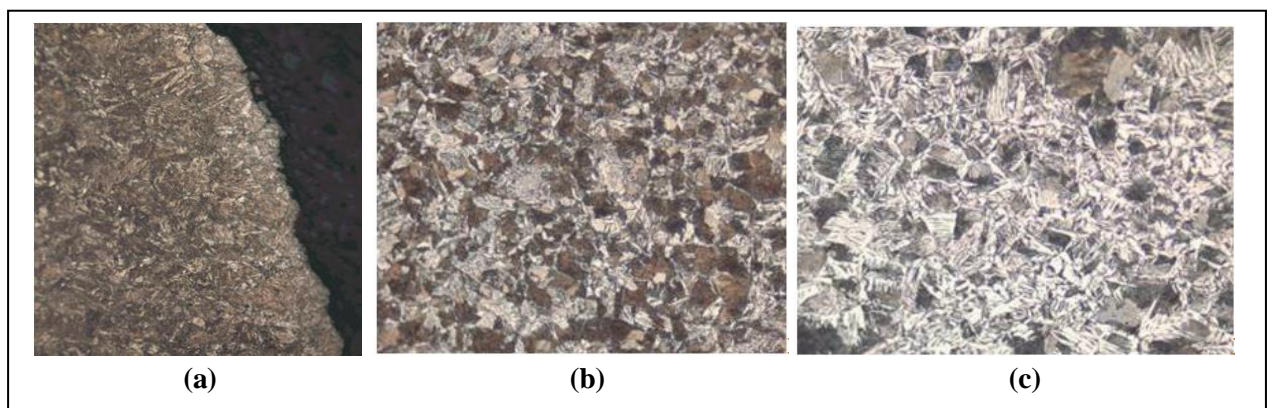
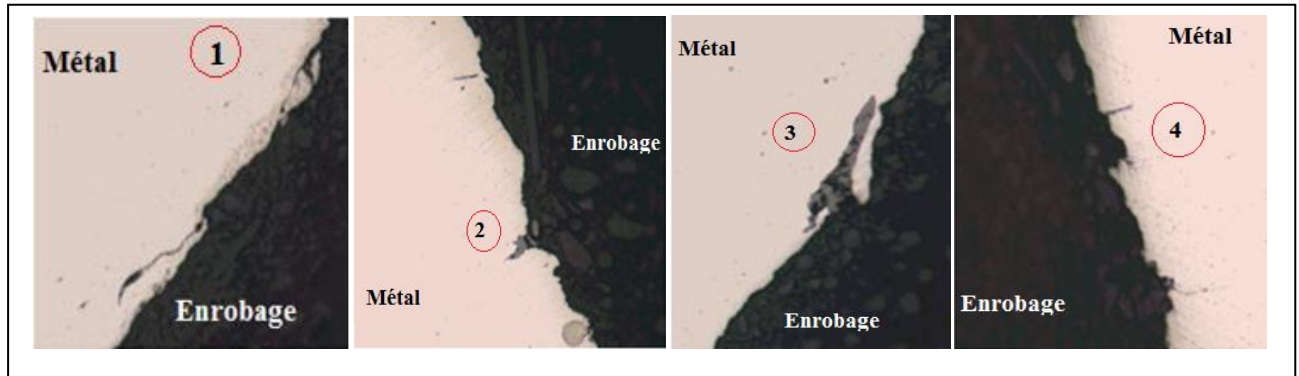


Figure III-16 : Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E5. (a) zone extérieure, (b) zone de transition, (c) zone de cœur.300X.



**Figure III-17 :** Micrographie optique des quatre fissures apparues sur l'échantillon E5 avant attaque chimique. 300X.

Les différentes observations réalisées sur une coupe transversale ont montré :

- Une présence de microfissures ;
- Une présence d'une légère décarburation sur le bord des microfissures ;
- Une présence des inclusions non métalliques ;
- Une dureté élevée sur la périphérie ainsi qu'au cœur de rond à béton (voir le tableau III-5) ;
- Une profondeur de trempe de 3 à 4 mm ;
- Une structure martensite très fine au bord ;
- Un aspect fragile de la cassure (grain très fins de couleur grisâtre).

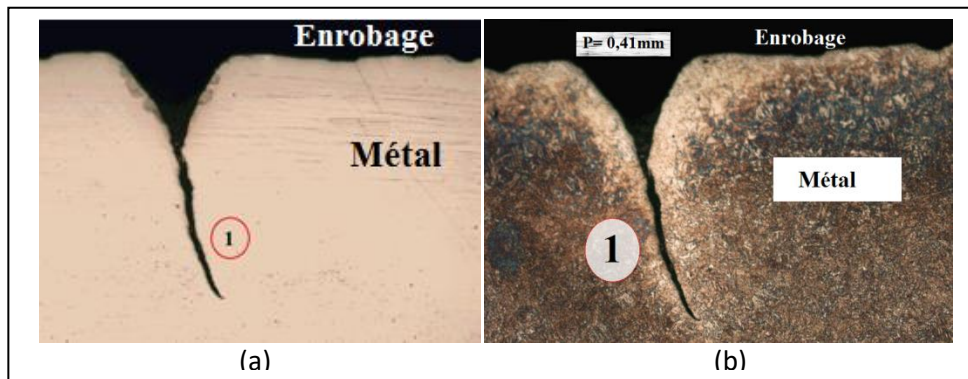
#### 6. Echantillon E6 :

Apparition d'une fissure sur la partie pliée (Figure III-18).



**Figure III-18:** Aspect de l'échantillon E6 sur la partie pliée.





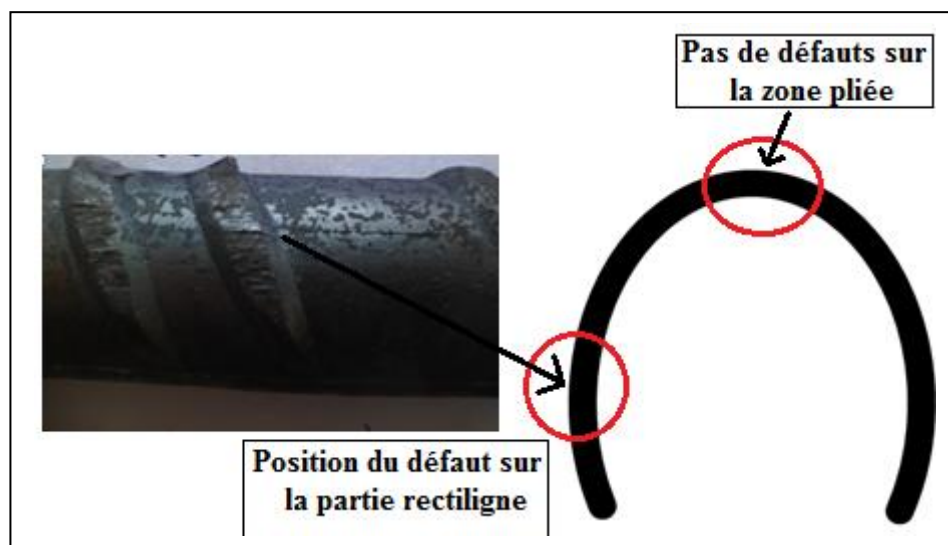
**Figure III-19:** Micrographie optique de la fissure apparue sur l'échantillon E6.  
(a) avant attaque chimique, (b) après attaque chimique. 150X.

Les différentes observations réalisées sur une coupe transversale localisée dans la zone pliée ont montré que l'échantillon est affecté par:

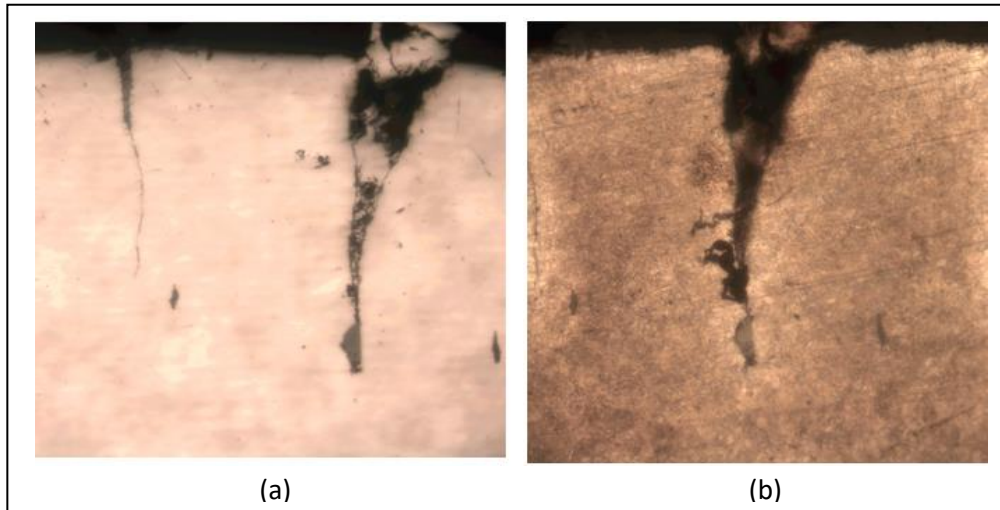
1. Une profondeur de la trempe entre 3 et 4 mm ;
2. Une présence d'une fissure longitudinale mise en évidence à l'œil nu visible de profondeur 0.41 mm, la fissure est liée à :
  - Une présence d'une nette décarburation sur le bord de la fissure ;
  - Une présence des inclusions non métalliques.

### 7. Echantillon E7 :

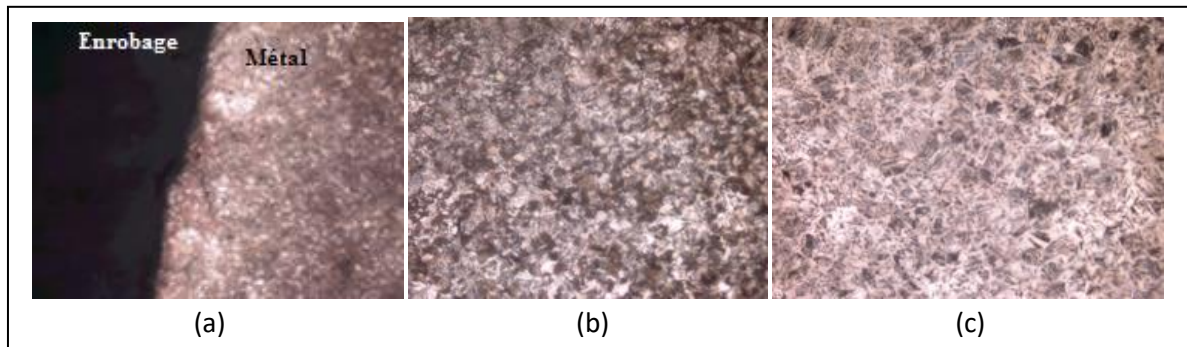
L'échantillon E7 ne représente pas de défaut sur la partie pliée, mais sur la partie rectiligne.



**Figure III-20:** Localisation du défaut sur l'échantillon E7.



**Figure III-21:** Micrographie optique de la fissure de l'échantillon E7. (a) avant attaque chimique, (b) après attaque chimique. 150X.

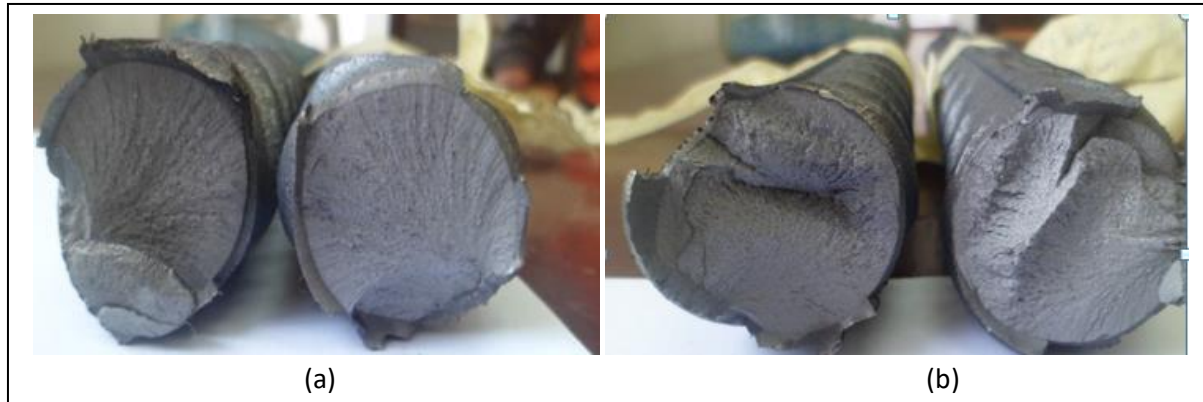


**Figure III-22:** Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E7. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.

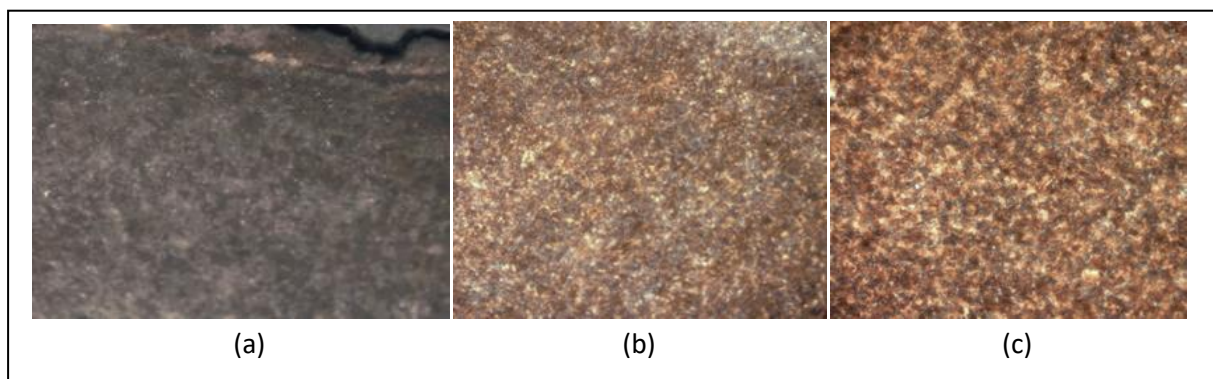
Les différentes observations réalisées sur une coupe transversale localisée dans la zone rectiligne de l'échantillon E7 ont montré :

1. Une absence de défaut sur la partie plié de la barre
2. Une présence d'un défaut presque rectiligne sur la partie trempée
3. Une absence d'inclusions non métalliques sur le bord de défaut.
4. Une absence de décarburation sur les bords de défaut
5. Une absence de ramification sur le défaut
6. Une absence de la calamine à l'intérieur de défaut.

## 8. Echantillon E8 :



**Figure III-23:** Aspect macrographique de l'échantillon E8 rebuté lors de l'essai de traction (a) et l'essai de pliage (b).



**Figure III-24:** Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E8. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.

1. L'observation macroscopique montre que :

- Les trois zones détectées ne correspondent pas aux structures habituelles du rond à béton conforme, vu l'aspect fragile de couleur blanchâtre qui indique la fragilisation accrue du produit.

2. L'observation microscopique de cet échantillon a montré :

- Une structure en peau martensite et bainite, une structure de bainite fine sur la zone intermédiaire, structure troostite fine au cœur de l'échantillon.

3. Les essais de dureté sur tout le profil du rond à béton sont en concordance avec les microstructures (régime de trempe intense)

4. Les valeurs des caractéristiques mécaniques sont élevées à cause de la durée de phase de refroidissement non adéquat sur la zone affecté thermiquement.

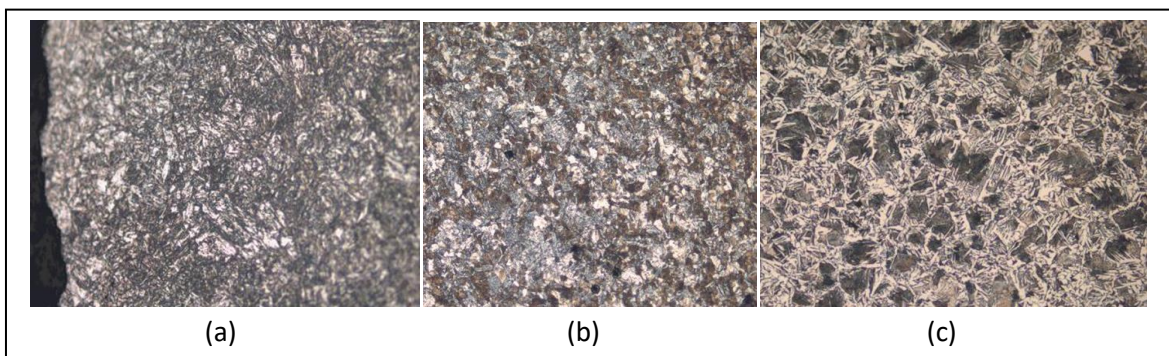


### 9. Echantillon E9 :

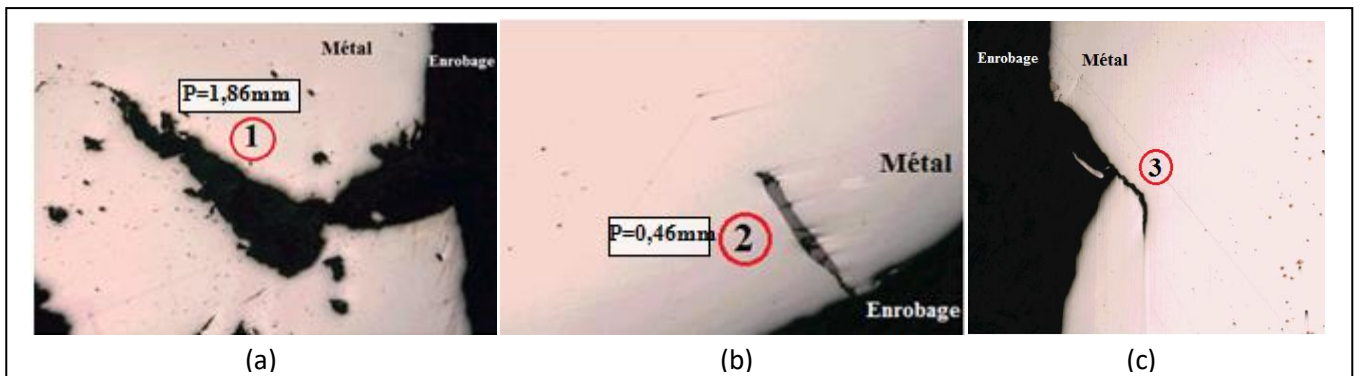
L'échantillon E9 présente fissure mise en évidence lors du test du pliage (Figure III-25).



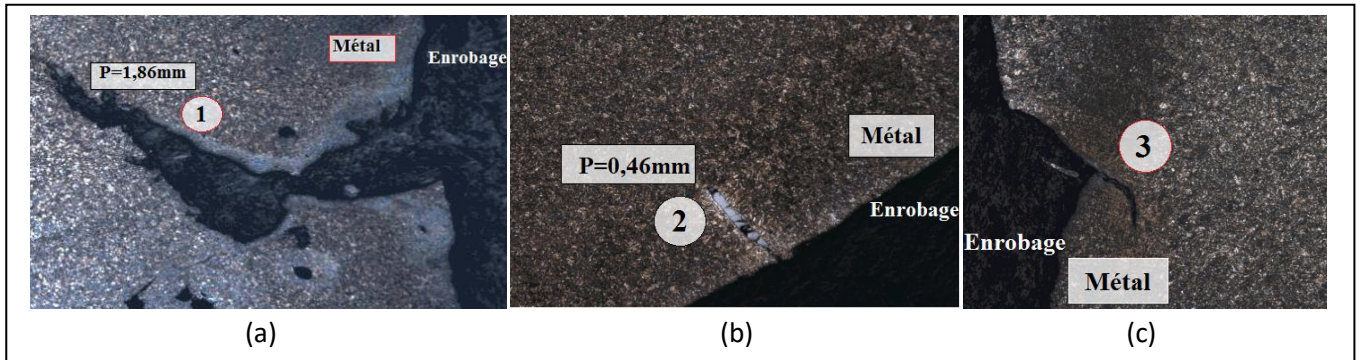
**Figure III-25:** Aspect macroscopique de l'échantillon E9 après test de pliage.



**Figure III-26:** Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E9. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.



**Figure III-27:** Micrographie optique des fissures apparues sur l'échantillon E9 avant attaque chimique. 75X.



**Figure III-28:** Micrographie optique des fissures apparues sur l'échantillon E9 après attaque chimique. 75X.

Les différentes observations réalisées sur une coupe transversale de l'échantillon E9, localisée dans la zone pliée ont montré que:

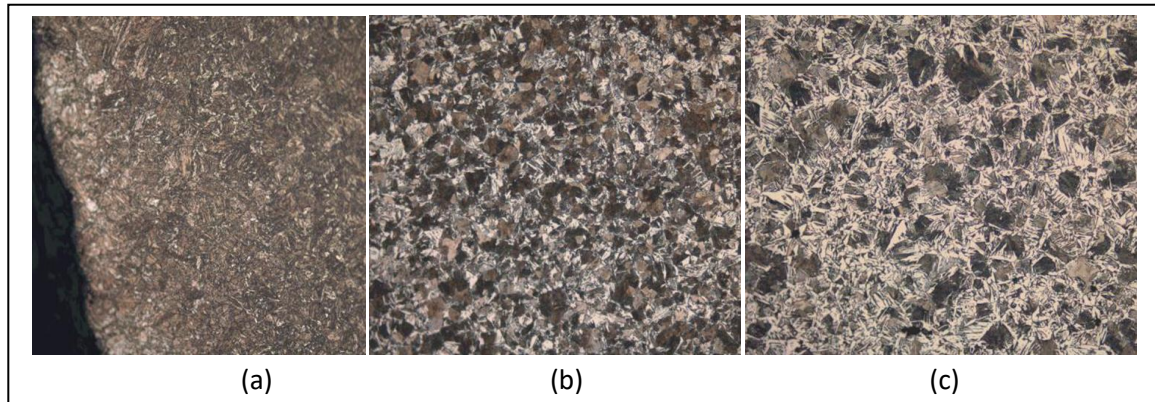
1. Une fissure mise en évidence à l'œil nu de profondeur 1.86 mm avec une fissure au voisinage de la fissure visible de profondeur 0.46 mm ;
2. Une présence des fissures et microfissures sur les autres angles du rond ;
3. Une absence de décarburation sur le bord de la fissure visible à l'œil nu ;
4. Une présence d'une légère décarburation sur le bord des fissures voisinage ;
5. Une présence des inclusions non métalliques ;
6. Une présence de la calamine à l'intérieur des fissures voisinage ;
7. Une présence des pores apparus sur l'échantillon.

#### 10. Echantillon E10 :

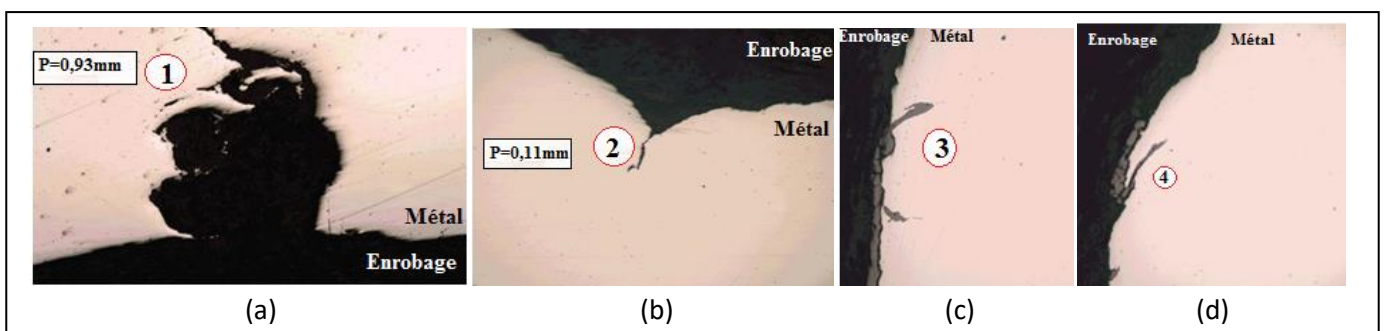
L'échantillon E10 représente une fissure mise en évidence lors du pliage (Figure III-29).



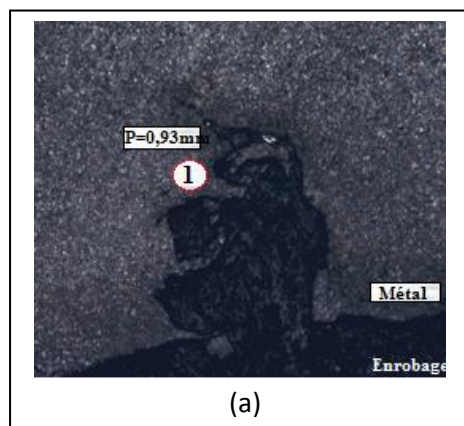
**Figure III-29:** Aspect macroscopique de l'échantillon E10 après test de pliage.



**Figure III-30:** Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E10. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.



**Figure III-31:** Micrographie optique des quatre fissures apparues sur l'échantillon E10 avant attaque chimique. (a) 75X, (b), (c) et (d) 300X.



**Figure III-32:** Micrographie optique de la fissure 1 apparues sur l'échantillon E10 après attaque chimique. 75X.

Les différentes observations réalisées sur une coupe transversale de l'échantillon E10, localisée dans la zone pliée ont montré :

1. Une fissure mise en évidence à l'œil nu de profondeur 0.933 mm avec une fissure au voisinage de la fissure visible de profondeur 0.116 mm ;
2. Une présence des fissures et microfissures sur les autres angles du rond ;



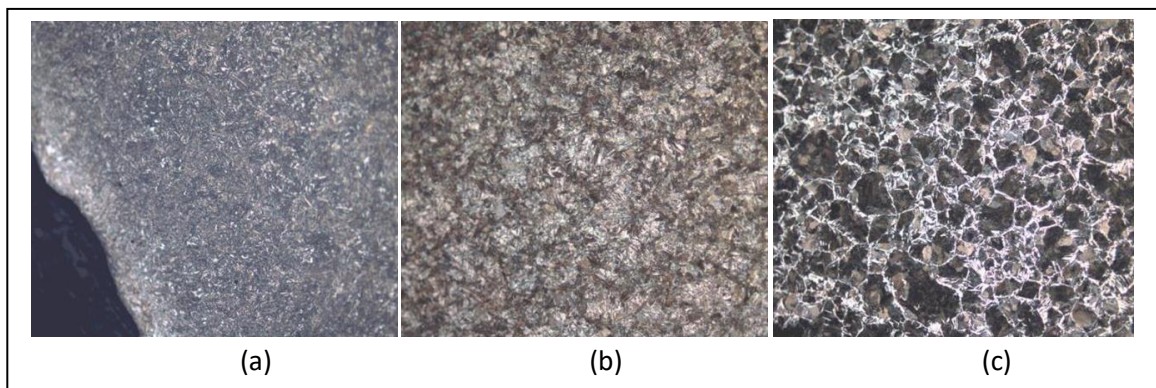
3. Une absence de décarburation sur le bord de la fissure visible à l'œil nu ;
4. Une présence des inclusions non métalliques ;
5. Une présence de la calamine à l'intérieur de la fissure.

### 11. Echantillon E11 :

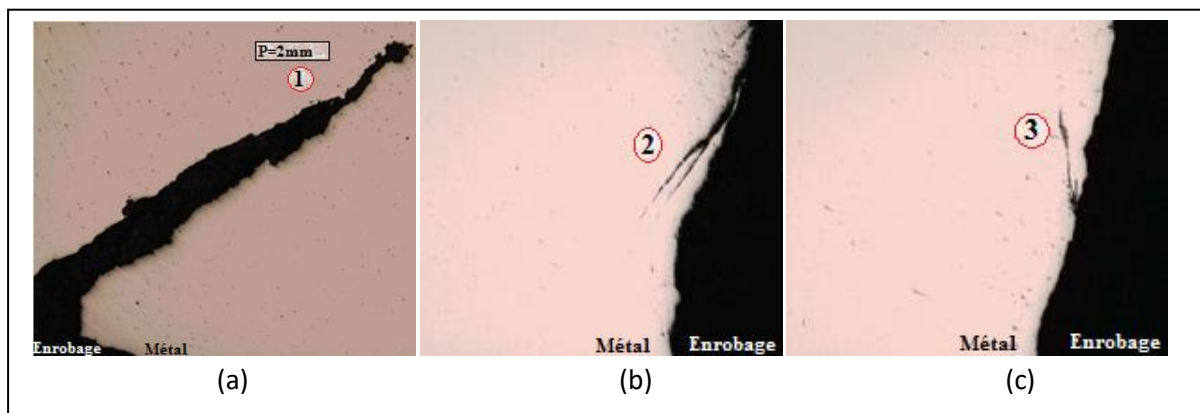
L'échantillon E11 présente aussi une fissure mise en évidence lors du test de pliage.



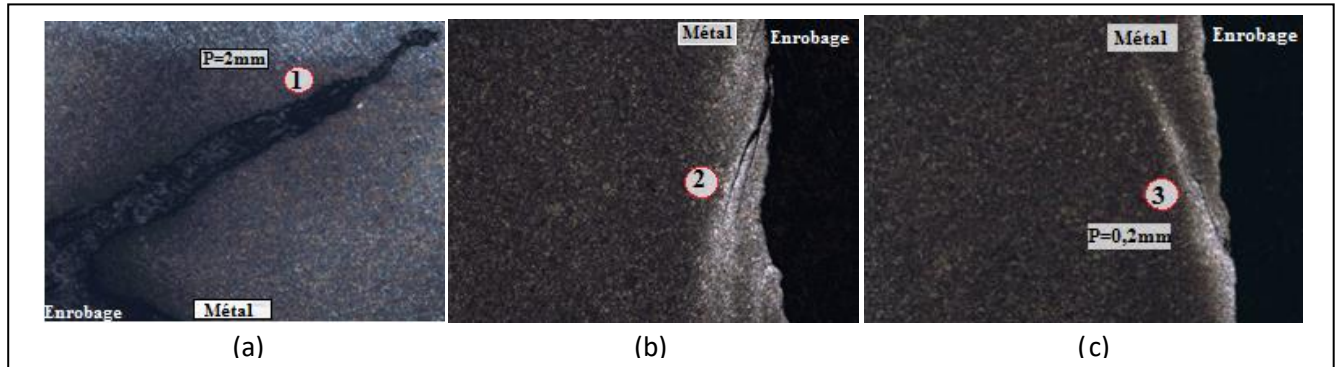
**Figure III-33:** Aspect macroscopique de l'échantillon E11 après test de pliage.



**Figure III-34:** Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E11. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.



**Figure III-35:** Micrographie optique des trois fissures apparues sur l'échantillon E11 avant attaque chimique. 75X.



**Figure III-36:** Micrographie optique des trois fissures apparues sur l'échantillon E11 après attaque chimique. 75X.

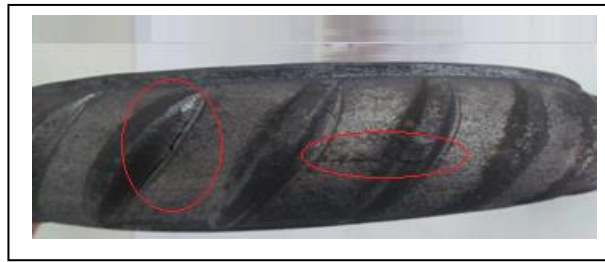
Les différentes observations réalisées sur une coupe transversale de l'échantillon E11, localisée dans la zone pliée ont montré :

1. Une fissure mise en évidence à l'œil nu de profondeur 2.0 mm avec une fissure au voisinage de la fissure visible de profondeur 0.20 mm ;
2. Une présence des fissures et microfissures sur les autres angles du rond ;
3. Une absence de décarburation sur le bord des fissures visible à l'œil nu ;
4. Une présence peu de décarburation sur les lèvres des fissures non visibles ;
5. Une présence peu des inclusions non métalliques ;
6. Une présence de la calamine à l'intérieur des fissures voisinage ;
7. Une composition chimique non conforme selon la norme d'où le pourcentage du carbone élevé par rapport à la norme 0,28% C ;
8. Une dureté élevé qui se concorde avec la microstructure au cœur avec un pourcentage de perlite élevé 92,5 HRB, 14,5 HRC.

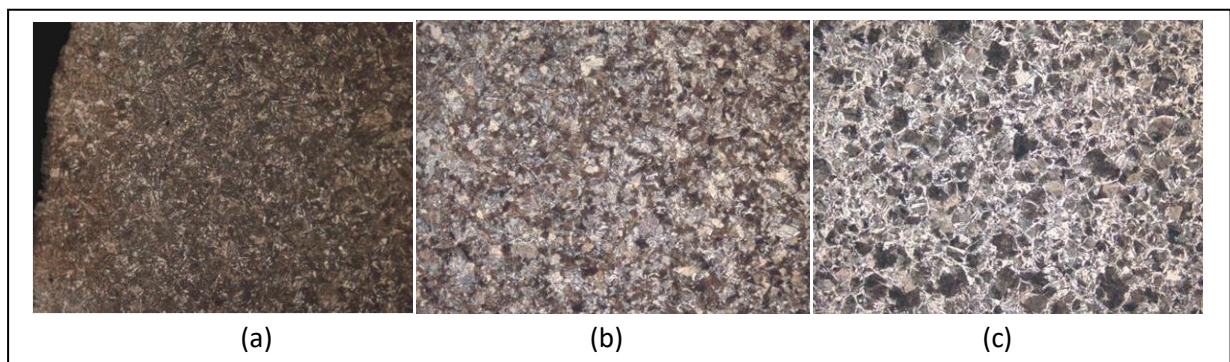


## 12. Echantillon E12 :

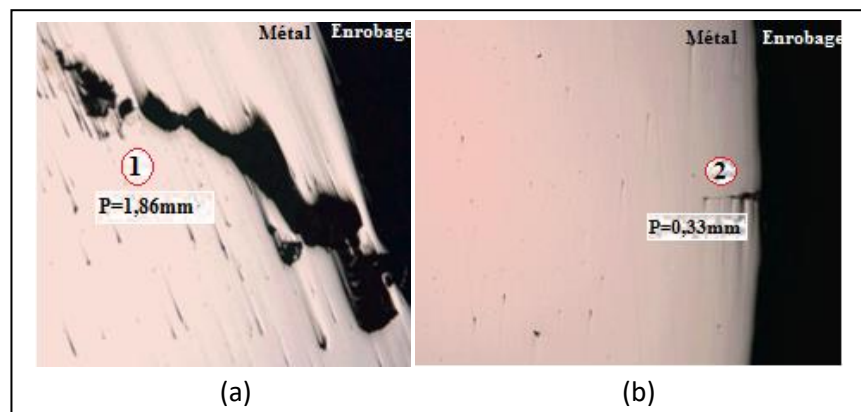
L'échantillon E12 présente une fissure mise en évidence lors du pliage.



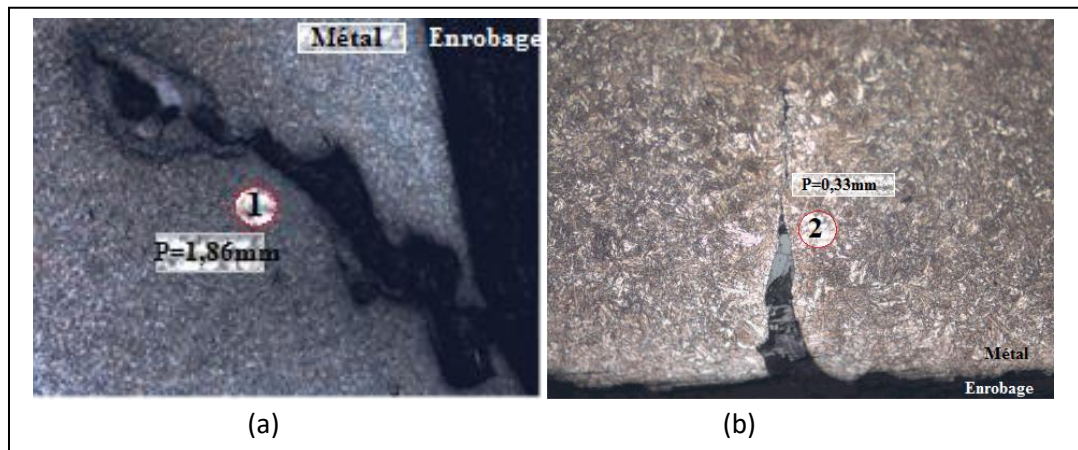
**Figure III-37:** Aspect macroscopique de l'échantillon E12 après test de pliage.



**Figure III-38:** Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E12. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.



**Figure III-39:** Micrographie optique des deux fissures apparues sur l'échantillon E12 avant attaque chimique. 75X.



**Figure III-40:** Micrographie optique deux fissures apparues sur l'échantillon E12 après attaque chimique. (a) 75X, (b) 300X.

Les différentes observations réalisées sur une coupe transversale de l'échantillon E12, localisée dans la zone pliée ont montré :

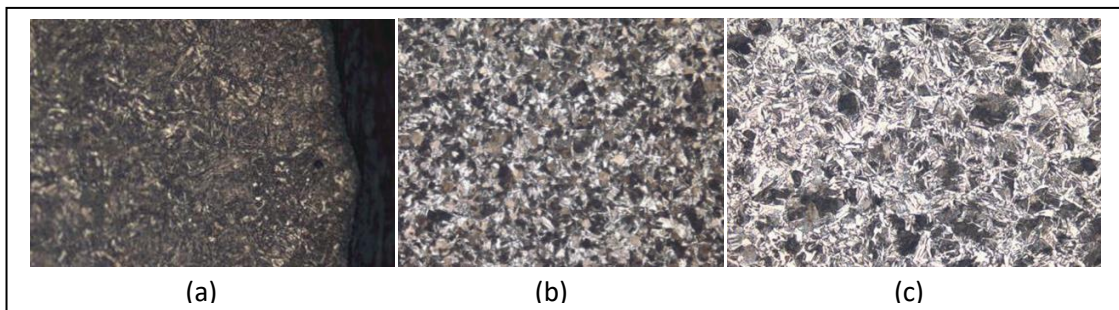
1. Une présence de fissure mise en évidence à l'œil nu de profondeur 1.86 mm avec une fissure au voisinage de la fissure visible de profondeur 0.33 mm ;
2. Une absence de décarburation sur le bord des fissures visible à l'œil nu ;
3. Une présence peu de décarburation sur les lèvres des fissures non visibles ;
4. Une présence peu des inclusions non métalliques ;
5. Une présence de la calamine à l'intérieur des fissures voisinage ;
6. Une présence des pores apparus sur l'échantillon ;
7. Une composition chimique non conforme selon la norme d'où le pourcentage du carbone élevé par rapport à la norme 0,24% C ;
8. Une dureté élevée qui se concorde avec la microstructure au cœur avec un pourcentage de perlite élevé 28HRC sur la zone extérieure.

### 13. Echantillon E13

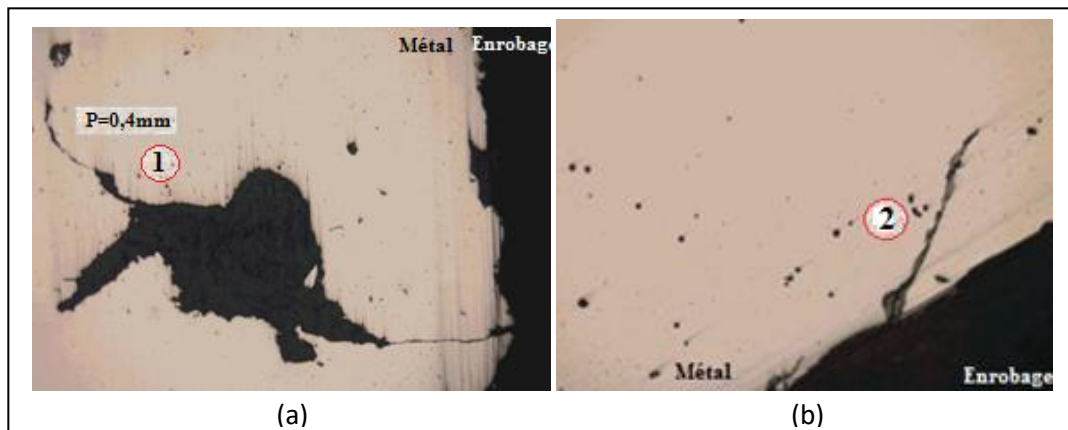
L'échantillon E13 présente une fissure mise en évidence lors du pliage.



**Figure III-41:** Aspect macroscopique de l'échantillon E13 après test de pliage.



**Figure III-42:** Micrographie optique des microstructures de l'échantillon E13. (a) zone extérieure, (b) zone intermédiaire, (c) zone de cœur. 300X.



**Figure III-43:** Micrographie optique des deux fissures apparues sur l'échantillon E13 avant attaque chimique. 300X.



**Figure III-44:** Micrographie optique des deux fissures apparues sur l'échantillon E13 après attaque chimique. 300X.

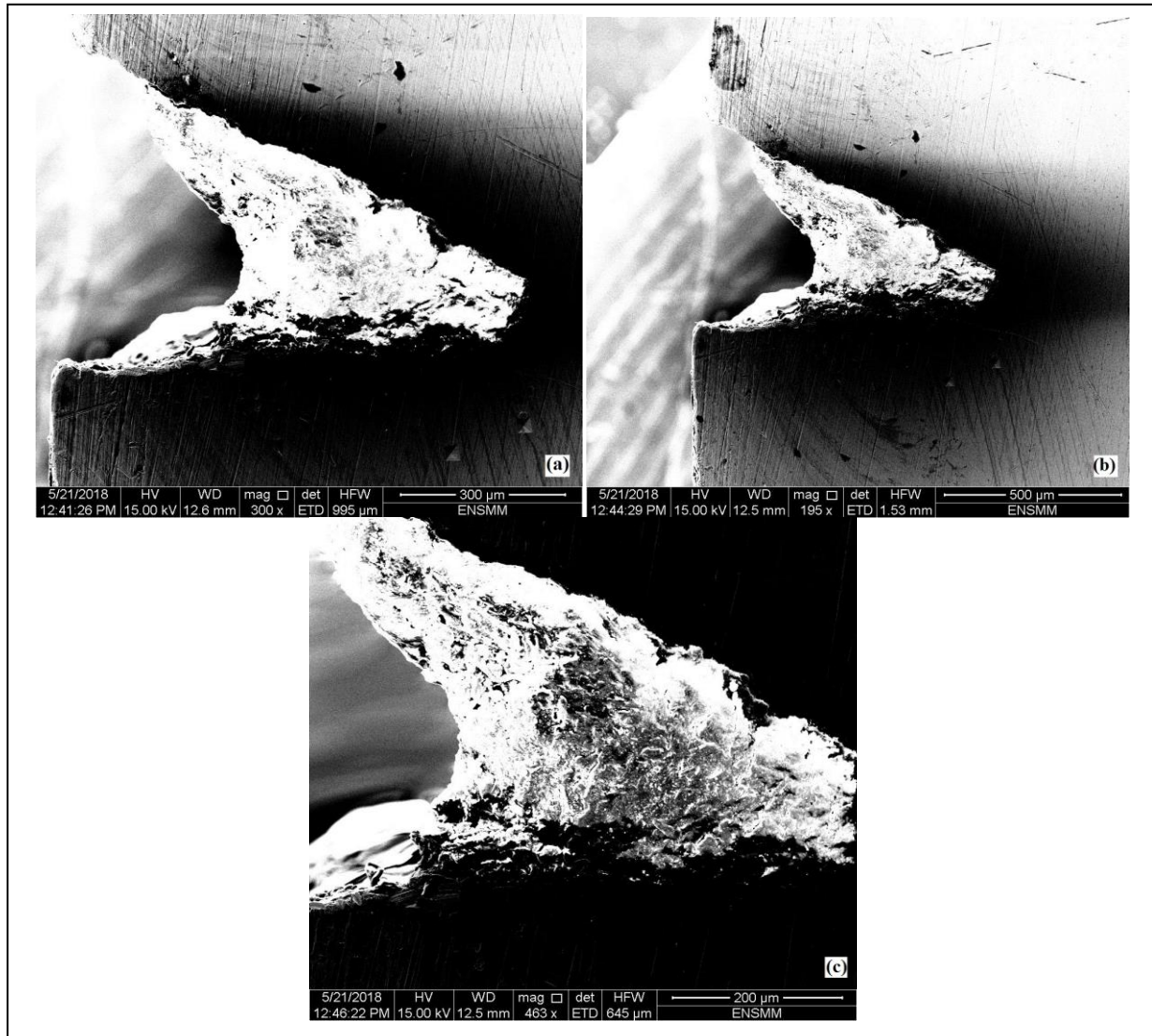
Les différentes observations réalisées sur une coupe transversale du rond à béton de l'échantillon E13, localisée dans la zone pliée ont montré :

1. Une fissure mise en évidence à l'œil nu de profondeur 0.40 mm ;
2. Une présence des fissures et microfissures sur les autres angles du rond ;
3. Une absence de décarburation sur le bord des fissures visible à l'œil nu ;
4. Une présence des inclusions non métalliques ;
5. Une présence des pores apparus sur l'échantillon.

#### **III-2-3-2. Microscopie électronique à balayage :**

La microscopie électronique à balayage a été réalisée sur la fissure localisée dans la partie rectiligne de l'échantillon E6 avec différents grossissements.





**Figure III-45:** Micrographie électronique à balayage de la fissure apparue sur l'échantillon E6 avant attaque chimique. (a) 300X, (b) 195X, (c) 463X.

Cette micrographie à été réalisé uniquement sur un seul échantillon afin de montrer l'allure de la fissure que peut entrainer une rupture.

## **CONCLUSION GENERALE :**

Le travail effectué dans cette étude avait comme objectif de caractériser les différents défauts de fissures lors de la production du rond à béton de nuance ST37-2 et de diamètre 32 élaborée à l'unité laminoir rond à béton (LRB), SIDER, EL-HADJAR. Les résultats obtenus nous ont permis de conclure les points suivants :

**1. L'analyse de la composition chimique des différents échantillons du rond à béton fissurés et non fissurés.**

**2. Les essais de traction ont montré que :**

- La limite élastique moyenne  $Re_{moy}$  des différents échantillons est de : 552,8 MPa.
- La résistance à la traction moyenne  $Rm_{moy}$  des différents échantillons est de : 685,1 MPa.
- L'allongement à la rupture moyen  $Al_{moy}$  % des différents échantillons est de : 14,9 %.

**3. Les essais de dureté ont montré que :**

- La dureté HRB moyenne des différents échantillons sur la zone extérieure est de : 102,4 HRB, sur la zone intermédiaire est de : 95,4 HRB et sur la zone du cœur est de : 88,7 HRB.
- La dureté HRC moyenne des différents échantillons sur la zone extérieure est de : 26,8 HRC, sur la zone intermédiaire est de : 18,1 HRC et sur la zone du cœur est de : 9,4 HRC.

**4. Les observations macroscopiques et microscopiques réalisées sur les différents échantillons ont montré que :**

- Les échantillons E1, E2, E3 et E4 ne présente pas de fissure.
- L'échantillon E5 présente une fissure apparente et elle est due à la dureté accrue du métal au niveau de la peau qui a donné un faible allongement de 11,8%, résultat d'un régime de trempe intense lié au processus de laminage.

## CONCLUSION GENERALE

- L'échantillon E6 présente une fissure mise en évidence vraisemblablement sur la billette d'origine aciérie.
- Les échantillons E7, E9, E10, E11, E12 et E13 présentent des fissures d'origine laminage.
- L'échantillon E8 a été affecté thermiquement à cause d'une trempe intense aboutissant à la non-conformité du produit.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] BARRALIS J., MAEDER G. Précis de métallurgie. Élaboration, Structures-Propriétés et Normalisation. AFNOR, NATHAN, 2005.
- [2] <http://philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/metallurgie/metallurgie.htm>
- [3] <http://philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/metallurgie/metallurgie.htm>
- [4] Technique de l'ingénieur. Par Jacques ASTIER. 1989
- [5] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Coulée\\_continue](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coulée_continue)
- [6] BOUACIR Tarek, Etude des défauts de la coulée continue de l'ACO2 ARCELOR-MITTAL Durant les années 2006 – 2007 et 2008, Thèse d'ingénieur, 2009.
- [7] BOUACIR Tarek, Etude des défauts de la coulée continue de l'ACO2 ARCELOR-MITTAL Durant les années 2006 – 2007 et 2008, Thèse d'ingénieur, 2009.
- [8] GREDT M., LESSEL G., SIMON P. Laminage de ronds à béton Tempcore en bobines sur un train à fil moderne à grande vitesse // Revue de Métallurgie-CIT, 1987, N° 1, P. 25-31.
- [9-10] João Pedro Florindo Lourenço, Study of steel bars for use in reinforced concrete produced by the “Tempcore” process, Dissertation for obtaining the degree of master in Civil Engineering, October 2012
- [10] João Pedro Florindo Lourenço, Study of steel bars for use in reinforced concrete produced by the “Tempcore” process, Dissertation for obtaining the degree of master in Civil Engineering, October 2012
- [11] <http://www.crsi.org/index.cfm/basics/rebar-properties>
- [12] <https://www.ingenieurs.com>
- [13] TABALAIEV K. Étude de la structure et des propriétés de l'acier à béton après déformation à froid. Thèse de doctorat, Matériaux de Lyon, 2010.
- [14] <http://www.crsi.org>
- [15] TABALAIEV K. Étude de la structure et des propriétés de l'acier à béton après déformation à froid. Thèse de doctorat, Matériaux de Lyon, 2010.



- [16] ДСТУ ENV 10080: 2005: « Сталь для армування бетону. Зварювана рифлена арматурна сталь В500. Технічні умови на постачання прутків, мотків і зварної сітки ». - К.: Держспоживстандарт України, 2006.
- [17] ДСТУ 3760: 2006 « Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови ». - К.: Держспоживстандарт України, 2007.
- [18] ГОСТ Р 52544-2006: «Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций ». - М.: Стандартинформ, 2006.
- [19] NF A35-016: « Aciers pour béton armé. Aciers soudables à verrous ». - Partie 1 : « Barres et couronnes ». - Partie 2 : « Treillis soudés ». AFNOR, 2007.
- [20] NF A35-019: « Aciers pour béton armé. Aciers soudables à empreintes ». - Partie 1 : « Barres et couronnes ». - Partie 2 : « Treillis soudés ». AFNOR, 2007.
- [21] ISO 6935-2 « Steel for the Reinforcement of Concrete ». - Part 2: « Ribbed Bars ». ISS, 2007.
- [22] DIN 488-1: « Betonstahl » - Teil 1: « Sorten, Eigenschaften, Kennzeichen ». DIN, 1984.
- [23] TABALAIEV K. Étude de la structure et des propriétés de l'acier à béton après déformation à froid. Thèse de doctorat, Matériaux de Lyon, 2010
- [24] <http://www.crsi.org>
- [25] <http://www.crsi.org>
- [26] Typical defects in plate and long steel products, Article in International Journal of Structural Integrity ·October 2016
- [27] La mécanique de la rupture et la mesure de la ténacité Sébastien GRANGE – Jean-Loup PRENSIER Edité le 20/04/2007
- [28] Wikipédia.org
- [29] Véronique SMANIO-RENAUD, Etude des mécanismes de Fragilisation Par l'Hydrogène des aciers non alliés en milieu H<sub>2</sub>S humide : contribution de l'émission acoustique, thèse de doctorat, Matériaux de Lyon, 2008.

[30] Hyuck-Cheol Kwon, Ho-Won Lee, Hak-Young Kim, Yong-Taek Im, Hae-Doo Park, Duk-Lak Lee, Surface wrinkle defect of carbon steel in the hot bar rolling process, Journal of Materials Processing Technology, 2009

[31] <http://ispatguru.com/metallurgical-processes-and-defects-in-steel-products/>

[32] S.Bensaada, D.Feliachi, Technologie 2eme partie, office des publications universitaires.

[33] <http://ispatguru.com/metallurgical-processes-and-defects-in-steel-products/>