



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département : Génie minier de la métallurgie et des matériaux

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGENIEUR D'ETAT

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Métallurgie

Spécialité : Science et génie des matériaux

Présenté par

Manal ZEGROUR

Amira BOUBEKEUR

Etude De L'influence De La Composition Chimique Sur La Microstructure Et Les Propriétés Mécaniques Du Rond A Béton Tempcore -500

Encadré par

Dr.Haoues GHOUSS - MCA- ENSTI - Annaba

Mr. Mohamed ABDELNASSER

Membres du jury :

- | | | |
|----------------------|-----------|---------------|
| ▪ Dr. Nacira DJELLAL | Président | ENSTI -Annaba |
| ▪ Dr. Samia LEMBOUB | Examineur | ENSTI -Annaba |

Année 2025

Remerciements

Nos remerciements vont d'abord à Allah, le Tout-Puissant, Clément et Miséricordieux, pour nous avoir donné la volonté, la patience et le courage nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur monsieur **Haoues GHOUS** pour sa disponibilité, ses conseils précieux, et l'intérêt qu'il a accordé à notre travail tout au long de sa réalisation.*

*Nous tenons également à remercier chaleureusement monsieur **Mohamed ABDELNASSER** pour son accompagnement, son soutien et son encadrement bienveillant tout au long de notre stage.*

Nos sincères remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre respect, de notre reconnaissance et de nos remerciements les plus anticipés.

À nos parents, piliers de notre réussite et source inépuisable d'amour et de soutien, nous adressons notre reconnaissance infinie. Que ce travail soit le fruit de leurs sacrifices.

Nous remercions également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire, par leur aide, leurs conseils ou leur encouragement.

Enfin, nos remerciements vont à nos amis, pour leur soutien moral, leur présence constante et leur motivation tout au long de cette aventure académique.



Dédicaces

À ceux qui, après Dieu, ont eu le plus grand mérite dans mon arrivée à ce moment de ma vie...

À ma chère Maman, Toi qui as été mon refuge chaleureux, et dont les prières ont été la clé de chaque réussite que je vis aujourd'hui. Tu as veillé quand j'étais fatiguée, tu m'as consolée dans mes larmes, tu m'as relevée dans mes chutes.

À mon cher Baba, Ta présence a toujours été discrète, mais constante, empreinte d'un amour pur qui n'a jamais eu besoin de mots. Merci d'avoir toujours été là, un soutien et une aide sans que j'aie à demander.

À Papa, Celui qui a été pour moi un pilier, une ombre protectrice dans chaque moment d'épuisement. Merci pour ton amour, ton écoute, et tout ce que tu m'as offert sans jamais rien attendre en retour.

À ma grande Maman, Qui a toujours été une seconde mère pour moi, avec un cœur immense et une générosité sans limite.

À mes chers frères Saïd et Rachad, Vous êtes ma force, mon soutien, mon appui inébranlable. Rien n'égale la chaleur fraternelle que vous représentez. Merci pour votre confiance et votre présence indéfectible à mes côtés.

À mes sœurs bien-aimées Khouloud, Zahra et Nada, Vous êtes mon cœur battant, les compagnes de mon enfance et les plus beaux souvenirs de ma vie. Avec vous, je trouve la paix, la sérénité dans vos mots, et un soutien silencieux dans vos regards.

À Nadir et Rabie, les maris de mes sœurs, Vous avez toujours fait partie de notre famille. Vous n'êtes pas seulement des beaux-frères, mais de véritables frères. Merci pour votre respect et pour vos nobles attitudes inoubliables.

À mes petites adorées : Zayd, Malak, Célia, Ranim et Eline, Vous êtes les bijoux de la maison, vos rires sont une paix pour l'âme.

Je prie Dieu d'être pour vous un bel exemple, comme vous êtes pour moi une belle source d'inspiration.

À ma famille que je chéris et dont je suis fière,

Je vous offre ce travail comme un témoignage d'amour et de profonde reconnaissance, en espérant qu'il soit à la hauteur de ce que vous avez sacrifié pour moi, et de tout l'amour, les prières et la patience dont vous m'avez entourée.

MANAL ZEGROUR

Dédicaces

Je dédie ce travail modeste à ceux qui ont façonné mon parcours, illuminé mes jours, et fortifié ma volonté.

*À **ma mère** bien-aimée, source infinie d'amour et de tendresse, qui a sacrifié tant pour m'offrir l'espoir et la stabilité. Par ses prières silencieuses, elle a facilité chaque épreuve. Que Dieu te protège, toi la reine de mon cœur.*

*À **mon père** bien-aimé, symbole de courage et de persévérance, qui a tracé le chemin de ma réussite par ses sacrifices et sa sueur. Merci pour ton amour inconditionnel et ta confiance indéfectible.*

*À **mes frères et sœurs**, piliers inébranlables de ma force, qui ont toujours su m'entourer de leur affection sincère et de leur présence rassurante, aussi bien dans les moments de doute que dans les instants de joie. À **Yassine**, mon frère aîné, modèle de sagesse et de soutien ; à **Nadjat**, ma sœur aînée, généreuse dans son amour, douce dans ses gestes, véritable seconde mère ; à **mon jumeau Amir**, mon autre moitié, confident silencieux et refuge de l'âme ; à **Zidan, Daoud et Mouad**, frères chers à mon cœur, symboles de ma fierté et de mon énergie ; à **Khadidja, Zouleikha et Khaoula**, sœurs bien-aimées dont les sourires illuminent mes journées et apaisent mon cœur.*

*À **Siraj et Sajed**, mes petits rayons de lumière, et à **Aya**, amie fidèle, pour ton affection sincère et ton soutien constant.*

À mes amis loyaux, compagnons de route et de luttes, pour leur présence rassurante et leur encouragement sans faille.

À toute ma famille, à tous ceux qui m'ont porté par leurs sentiments sincères et leur bienveillance. À celui qui a cru en moi quand moi-même j'en doutais -î.

Et avant tout, à Dieu, Le Très-Haut, lumière de mes ténèbres et soutien de mes faiblesses. Louange à Lui pour le début, la fin, et tout ce qui est entre les deux. Et notre dernière prière est : louange à Dieu, Seigneur des mondes.

AMIRA BOUBEKEUR

Résumé

Résumé :

Cette étude porte sur l'analyse de l'influence de la composition chimique, particulièrement la teneur en manganèse et du diamètre du rond à béton sur la microstructure et les propriétés mécaniques des aciers pour béton armé produit par AQS suivant un procédé Tempcore. Par des analyses chimiques, des observations microstructures (microscopie optique et MEB/EDX), des mesures de dureté, des essais de traction et de pliage, il a été démontré que l'augmentation de la teneur en manganèse améliore la finesse de la microstructure, la dureté, ainsi que la résistance mécanique tout en préservant une bonne ductilité. Les résultats aident à bien saisir les liens entre la composition chimique, structure interne et comportement mécanique, ouvrent des pistes pour rendre mieux des aciers destinés aux bâtiments modernes.

Mot clé : AQS, Procédé Tempcore, microscopie optique, MEB/EDX, Manganese.

Abstract:

This study focuses on analyzing the influence of chemical composition—particularly the manganese content—and the diameter of the rebar on the microstructure and mechanical properties of reinforced concrete steel bars produced by AQS using the Tempcore process. Through chemical analyses, microstructural observations (optical microscopy and SEM/EDX), hardness measurements, as well as tensile and bending tests, it was demonstrated that increasing the manganese content improves the fineness of the microstructure, hardness, and mechanical strength, while maintaining good ductility. The results help to better understand the relationships between composition, internal structure, and mechanical behavior, and open up opportunities for improving the performance of steels intended for modern construction.

Keywords: AQS, Tempcore process, Optical Microscopy, SEM/EDX, Manganese.

ملخص:

تقوم هذه الدراسة على تحليل تأثير التركيب الكيميائي، وخاصة مستوى المنغنيز وقطر القضيب، على البنية الدقيقة والخصائص الميكانيكية لفولاذ الخرسانة المسلحة المُنتج من طرف AQS باستخدام عملية TEMPCORE من خلال التحاليل الكيميائية، والملاحظات المجهرية) بالمجهر البصري والمجهر الإلكتروني الماسح مع التحليل الطيفي (EDX)، وقياسات الصلابة، واختبارات الشد والانحناء، تم إثبات أن زيادة نسبة المنغنيز تحسّن من نعومة البنية المجهرية، وتزيد من الصلابة والمقاومة الميكانيكية مع الحفاظ على ليونة جيدة. تساعد النتائج على فهم أفضل للعلاقة بين التركيب، والبنية الداخلية، والسلوك الميكانيكي، كما تفتح آفاقاً لتحسين جودة الفولاذ الموجّه نحو الأبنية الحديثة.

الكلمات المفتاحية: AQS عملية TEMPCORE، المجهر البصري والمجهر الإلكتروني الماسح مع التحليل الطيفي، المنغنيز.

Sommaire

Remerciement

Résumé

Sommaire

Listes des tableaux

Listes des figures

Introduction générale P 01

CHAPITRE I : Description du complexe et motivation et problématique P 03

I.1 Description du complexe..... P 03

I.2.Problématique et motivationP 03

CHAPITRE II : Recherche bibliographique et état de l’artP 05

II.1 Définition d’acier..... P 05

II.2 Microstructure des aciers..... P 05

II.3 Classification des aciers P 06

II.4. Influence des éléments d’additions sur les caractéristiques mécaniques
des aciers P 07

II.5 Définition et l’utilisation du rond à béton P 08

II.6 Traitement thermique..... P 08

II.7 Mise en forme de rond à béton Tempcore-500 par laminage à chaudP 10

II.8 Techniques de refroidissement après le laminageP 11

CHAPITRE III : Matériau et techniques expérimentales P 13

IntroductionP 13

III-1-Choix de matériau..... P 13

III.2 Etude métallographique P 14

III.3. Essai de traction P 17

III.4 Essai de pliage..... P 18

III .5 Essai de Micro dureté P 19

Sommaire

III.6. Paramètres de traitement thermique	P 19
CHAPITRE IV : Résultat et discussions	P 21
IV .1. Résultats de l'analyse de la microstructure	P 21
IV.2 Résultat de l'Analyses par Microscope Electronique à Balayage (MEB) et Spectroscopie X a dispersion d'énergie (EDX)	P 22
IV.3. Résultats des essais de traction	P 26
IV.4. Résultats de la Micro-dureté.....	P 28
IV.5. Résultat de l'essai de pliage	P 29
Conclusion Générale	P 30
Références	P 31
Annexes	P 32

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
II.1	Microstructures des aciers et définitions	05
II.2	Les effets des éléments d'alliage sur les propriétés mécanique des aciers	07
III.1	La composition chimique de l'acier B500B	13
III.2	La composition chimique de l'acier B500BWR	13
III.3	Les Paramètres de laminage pour chaque échantillon.	20
IV.1	Propriétés mécaniques pour des aciers étudiés	26
IV.2	Profil de dureté en fonction de la distance.	28

Liste des figures

Figure	Titre	Page
I.1	Vue de complexe	03
II.1	Diagramme Fer-carbone	06
II.2	Principe du processus Tempcore	12
III.1	Exemple d'une microstructure.	14
III.2	Tronçonneuse (scie à ruban).	15
III.3	Ecopress d'enrobage.	15
III.4	Polisseuse - ECHOLAB - PM62	16
III.5	L'échantillon après polissage.	16
III.6	L'échantillon après l'attaque chimique	16
III.7	L'attaque chimique.	16
III.8	Microscope métallographique Nikon Eclipse.	17
III.9	Microscope Electronique à Balayage (MEB).	17
III.10	Machine de traction au niveau de l'entreprise AQS	18
III.11	Machine de pliage.	19
III.12	Machine de Micro dreté.	19
IV.1	Les microstructures obtenues pour les échantillons de B500B :(a) et (b) à l'extrémité de surface ;(c) : la 2ème zone d'extrémité de surface ;(d) :au cœur	21
IV.2	. Les microstructures obtenues pour les échantillons B500BWR:(a) et (b) à l'extrémité de surface ;(c) : la 2ème zone d'extrémité de surface ;(d) :au cœur	22
IV.3	Micrographie (MEB) obtenu pour les échantillons B500B:(a) :à l'extrémité de surface ;(b) :la zone intermédiaire ;(c) :au cœur.	23
IV.4	Micrographie (MEB) obtenu pour les aciers B500BWR:(a) :à l'extrémité de surface ;(b) :la 2ème zone d'extrémité de surface ;(c) :au cœur	23
IV.5	Analyse EDX de B500B :a)à l'extrémité de surface ;b) la 2ème zone d'extrémité de surface;(c) au cœur.	24
IV.6	Analyse EDX de B500B :a)à l'extrémité de surface ;b) la 2ème zone d'extrémité de surface;(c) au cœur	25
IV.7	. Les courbes de traction pour grade B500B différents diamètres A=20mm , B=25mm , C=32mm	26
IV.8	. Les courbes de traction pour grade B500BWR différents diamètres D=20 mm, E=25 mm, F=32 mm	27
IV.9	Profil de dreté en fonction de la distance de l'extrémité vers le cœur (mm)	28

Introduction

Introduction générale

Introduction Générale :

L'Algerian Qatari Steel (AQS) est l'une des entreprises leader en Algérie dans la production de barres d'acier conformes aux normes régionales et internationales. L'industrie sidérurgique joue un rôle primordial dans le développement des infrastructures, en particulier dans le domaine du génie civil. La technologie AQS est basée sur la réduction directe de l'oxyde de fer à l'aide d'une installation de réduction directe, telle que la technologie MIDREX.

La demande croissante du génie civil des aciers pour béton armé avec des performances supérieures et souvent paradoxales : une résistance mécanique élevée combinée à une bonne plasticité. Premièrement, La demande accrue repose sur la nécessité d'assurer la sécurité des bâtiments de plus en plus hauts. Deuxièmement, l'économie joue un rôle crucial : l'utilisation d'armatures plus résistantes pour réduire la consommation d'acier. Cependant la qualité des aciers pour béton armé, notamment en termes de résistance mécanique, de ductilité et de résistance à la corrosion, reste une préoccupation majeure. Les propriétés mécaniques des ronds à béton sont directement influencées par la microstructure (ferrite, base, phase secondaire), elle-même déterminée par la composition chimique (carbone, manganèse, soufre, phosphore, etc.) et les traitements thermomécaniques appliqués lors de la fabrication.

L'acier à béton de qualité Tempcore.s'avère une solution prometteuse. La production d'acier à béton de qualité Tempcore.consiste en une mise en forme par déformation à chaud suivie d'un traitement thermique, à savoir une trempe superficielle sous flux d'eau suivie d'un auto-revenu, qui se heurte cependant à la possibilité de satisfaire aux exigences des normes vis-à-vis des propriétés de résistance $R_{e} \geq 500$ MPa et de plasticité. Les propriétés mécaniques des ronds à béton sont intrinsèquement liées à la microstructure (ferrite, perlite, phase secondaire), qui est elle-même dictée par la composition chimique (carbone, manganèse, soufre, phosphore, etc.) et les traitements thermomécaniques appliqués pendant la production.

Cette étude vise à étudier l'effet de la composition chimique et l'effet de diamètre du rond à béton sur la microstructure et les propriétés mécaniques des produits d'AQS.

L'analyse approfondie portera sur la manière dont les différents éléments d'alliage à savoir le manganèse et les paramètres de fabrication affectent la qualité finale. Les résultats de cette étude peuvent contribuer à l'optimisation des processus de fabrication et améliore la qualité de l'armature en acier en Algérie et la construction d'exportation. L'approche méthodologique est basée sur :

- Analyse chimique de l'acier produit par AQS
- Inspection microstructurale par microscopie optique et électronique
- Tests mécaniques pour évaluer les performances et la corrélation entre la composition, la microstructure et les propriétés mécaniques

Notre étude a pour but de présenter les éléments scientifiques et techniques permettant de mieux contrôler les caractéristiques spécifiques des procédés, afin d'optimiser les performances et de respecter les normes en vigueur. Le manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Introduction générale

- **Chapitre 1** : Description du complexe sidérurgique BELLARA ;
- **Chapitre 2** : Recherche bibliographique et état de l'art ;
- **Chapitre 3** : Matériaux et techniques expérimentales ;
- **Chapitre 4** : Analyse et discussions des résultats.

Enfin, une conclusion générale fait la synthèse des résultats

CHAPITRE I :
Description du
complexe et
motivation et
problématique

CHAPITRE I : Description du complexe et motivation et problématique

I.1 Description du complexe :

L'Algérie et le Qatar ont signé un accord de coopération visant à augmenter la production d'acier de 2 millions de tonnes à 5 millions de tonnes d'ici 2017. Algerian Qatari Steel (AQS) est une société à capital mixte créée pour établir un nouveau complexe sidérurgique à Bellara, en Algérie. L'entreprise, qui fonctionne à environ 80 % de sa capacité, exporte une partie de sa production vers des marchés internationaux tels que la Chine, l'Italie, la Syrie et la Tunisie.

AQS utilise la technologie de réduction directe de l'acier MIDREX®, garantissant la qualité des produits et le respect de l'environnement, ce qui lui a permis d'obtenir trois certifications : ISO 9001, ISO 14001 et ISO 45001. L'entreprise joue un rôle majeur dans l'industrie sidérurgique nationale et régionale de l'Algérie [1].



Fig. I.1. Vue de complexe [1].

Il existe trois unités principales (L'unité de la réduction directe des oxydes de fer, L'unité de l'élaboration de l'acier et unité de laminage) et des Unités secondaires.

I.2.Problématique et motivation :

Les aciers utilisés pour les barres d'armature en béton sont essentiels pour la sécurité et la longévité des constructions en béton armé. Leur efficacité est étroitement liée à leur composition chimique, qui a un impact direct sur leur microstructure, leur solidité, leur ductilité, et également sur leur capacité à résister à la rupture et à la corrosion. Les composants d'alliage tels que le carbone, le manganèse, le silicium, le soufre ou le phosphore ont des impacts souvent interconnectés et complexes sur les propriétés finales de ces aciers. Dans le cadre de l'impératif d'assurer la fiabilité des matériaux pour les infrastructures majeures contemporaines, on constate une intensification des études portant sur le lien entre la composition chimique, la microstructure et les caractéristiques mécaniques des barres d'acier. Dans le contexte algérien, cette question est particulièrement pertinente, étant donné que des entreprises comme AQS fabriquent des barres d'acier destinées à de vastes projets.

Motivation :

Ainsi, afin de participer à l'explication des processus métallurgiques influencés par la composition chimique, cette étude se consacre à l'examen d'échantillons de barres de fer

CHAPITRE I : Description du complexe et motivation et problématique

fabriqués sur place. L'objectif est d'analyser comment les changements dans la composition peuvent influencer la formation des phases métallurgiques, les dimensions des grains, l'apparition d'inclusions, et par conséquent, les caractéristiques mécaniques globales du matériau. Ainsi, nous avons opté pour l'emploi d'une combinaison de techniques expérimentales complémentaires :

- L'utilisation de la microscopie optique pour examiner la microstructure générale et la distribution des phases ;
- La combinaison de la microscopie électronique à balayage (MEB) avec l'analyse EDX pour une étude détaillée de la morphologie et de la composition locale ;
- Des tests de micro dureté Vickers pour mesurer les variations de dureté en fonction des zones examinées ;
- Des essais de traction destinés à déterminer les caractéristiques mécaniques globales (résistance, allongement) ;
- Des tests de pliage réalisés pour analyser la ductilité et le comportement lors de la déformation plastique.

Les conclusions tirées de cette étude fourniront une meilleure compréhension du rapport entre la composition chimique des ronds à béton et leurs caractéristiques mécaniques, ce qui permettra d'optimiser les compositions chimiques pour répondre au mieux aux normes internationales et aux critères industriels dans le domaine de la construction.

CHAPITRE II :
Recherche
bibliographique
et état de l'art

CHAPITRE II : Recherche bibliographique et état de l'art

II.1 Définition d'acier :

Un acier est un alliage métallique composé majoritairement de fer et de carbone (de 0,008 % à 2 % en masse de carbone), avec des éléments comme le silicium, le phosphore, le manganèse et le soufre en faibles quantités [2].

II.2 Microstructure des aciers :

Tableau II.1. Microstructures des aciers et définitions

Microstructure	Définition
Ferrite α :	La ferrite α est une solution solide de fer contenant très peu de carbone (moins de 0,02 %). Elle a une structure cubique centrée, est ductile, peu dure et ferromagnétique jusqu'à 760 °C. On distingue la ferrite α à basse température de la ferrite δ à haute température, cette dernière ayant une solubilité en carbone plus élevée [3].
Austénite γ	L'austénite γ est une solution solide dans laquelle les atomes de carbone sont insérés dans le fer γ , qui possède une structure cristalline cubique à face centrée (CFC). Elle peut dissoudre jusqu'à 2,14 % de carbone et n'est stable qu'à haute température. L'austénite se caractérise par une grande ductilité [4].
Cémentite (Fe_3C)	La cémentite (Fe_3C) est un composé de fer et de carbone contenant jusqu'à 6,67 % de carbone. Elle possède une structure cristalline complexe, fond à 1550 °C, et se caractérise par sa dureté et sa fragilité. Selon le diagramme Fe– Fe_3C , elle peut exister sous trois formes de liaisons différentes, tout en gardant la même composition [5].
La Perlite	La perlite est une structure lamellaire formée par la transformation de l'austénite en ferrite et cémentite lors d'un refroidissement lent. Elle offre un bon équilibre entre résistance et ductilité, ce qui la rend courante dans les aciers [6].
La Bainite	La bainite est une phase qui se forme lors de transformations isothermes à basse température, par transformation de l'austénite, impliquant un cisaillement du réseau cristallin et une diffusion du carbone sur de courtes distances [7].
La martensite	La martensite est une phase dure formée par refroidissement rapide, sans diffusion, où le carbone reste piégé dans la structure ferritique. Cela provoque une déformation en structure tétragonale par cisaillement. Elle apparaît sous forme de lattes, d'aiguilles ou de plaquettes [8].

CHAPITRE II : Recherche bibliographique et état de l'art

II.3 Classification des aciers :

- Selon le diagramme d'équilibre fer-carbone :

Selon le diagramme d'équilibre fer-carbone, les aciers sont classés en trois catégories en fonction de leur teneur en carbone :

1 -Acier hypoeutectoïde :

Ces aciers ont une teneur en carbone inférieure à 0,8 %. Sa microstructure est constituée de grains de ferrite et de perlite. En fonction de leurs propriétés mécaniques, ils peuvent être divisés en cinq sous-catégories :

- **Aciers extra-doux** : la teneur en carbone varie de 0,05 % à 0,1 %. Il est principalement composé de ferrite, contenant de très petites quantités de perlite et de cémentite tertiaire ;
- **Aciers doux** : la teneur en carbone varie de 0,1 % à 0,25 % ;
- **Aciers mi-doux** : la teneur en carbone varie de 0,25 % à 0,4 % ;
- **Aciers mi-durs** : La teneur en carbone est comprise entre 0,4 % et 0,6 % ;
- **Aciers durs** : La teneur en carbone est comprise entre 0,6 % et 0,8 %.

2-Acier eutectoïde :

Ces aciers ont une teneur en carbone 0,8% à 727°C. Leur structure métallographique est constituée de fines couches alternées de ferrite et de cémentite formées par transformation eutectoïde.

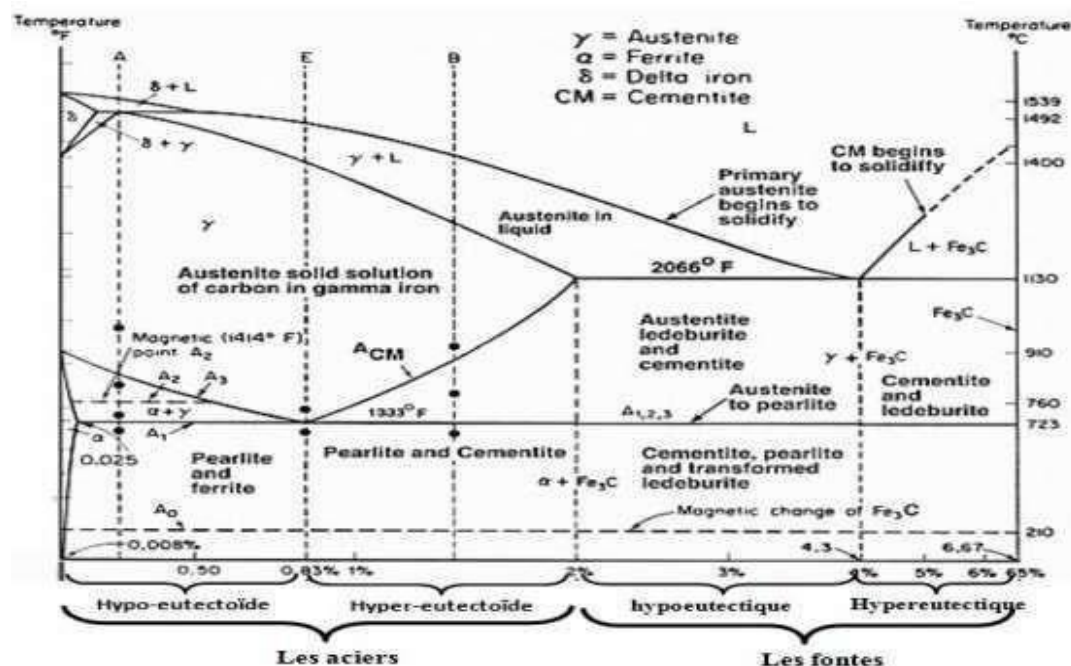


Fig. II.1. Diagramme Fer-carbone

CHAPITRE II : Recherche bibliographique et état de l'art

3- Acier hypereutectoïde :

La teneur en carbone de ces aciers varie de 0,8% à 2,11%. Leur structure est constituée de bancs de perlite entourés de marges de cémentite. Ils sont divisés en deux sous-catégories :

a) **Aciers dur** : la teneur en carbone varie de 0,8 % à 1 %.

b) **Aciers extra-durs** : la teneur en carbone varie de 1 % à 2,11 % [9].

- **Selon leur composition chimique :**

1- Aciers non alliés

Ces aciers contiennent une faible quantité d'éléments d'alliage, avec une teneur en manganèse inférieure ou égale à 1 %.

- **C22, C25** : utilisés pour la construction mécanique.
- **C30 à C60** : adaptés aux traitements thermiques (C30, C35, C40, C45, C50, C55, C60).

2- Aciers faiblement alliés

Les aciers faiblement alliés se caractérisent par l'ajout de petites quantités d'éléments d'alliage (généralement moins de 5% [10]).

3- Aciers fortement alliés

au moins un élément d'alliage présent à plus de 5 %. Les teneurs indiqués sont les pourcentages nominaux réels [11].

Nuances usuelles : X 4 Cr Mo S 18, X 30 Cr 13, X 2Cr Ni 19-11.

II.4. Influence des éléments d'additions sur les caractéristiques mécaniques des aciers :

Tableau II.2 Les effets des éléments d'alliage sur les propriétés mécaniques des aciers

	Résistance à la traction	Re	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	↗	↗		↗	↗	↗		

CHAPITRE II : Recherche bibliographique et état de l'art

II.5 Définition et l'utilisation du rond à béton :

Le rond à béton est une canne en acier, lisse ou côtelée utilisée pour renforcer le béton armé, fabriqués à partir de ferraille recyclée fondu dans un poêle électrique et roulés dans des crêpes et chauds. Les surfaces nervurées ou les empreintes digitales garantissent une bonne adhésion du béton, essentielle à la robustesse et à la durabilité des structures en béton armé. Le rond à béton est utilisé pour renforcer le béton, qui résiste bien à la compression mais pas à la traction. En y ajoutant de l'acier, résistant aux deux, on obtient du béton armé, solide et résistant, largement utilisé en génie civil [12].

II.6 Traitement thermique :

II.6.1 Définition :

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage et de refroidissement conçues pour optimiser les caractéristiques mécaniques des matériaux, comme leur résilience, leur dureté, leur ductilité. Concernant l'acier Tempcore Fe-E500 (utilisé pour les barres d'armature), le processus de traitement thermique se compose de :

1. Chauffage des billettes dans le domaine austénitique ;
2. Laminage à chaud (déformation) ;
3. Refroidissement rapide en surface (trempe) ;
4. Auto-revenu via la chaleur interne du noyau.

II.6.2 Traitement d'austénitisation

L'austénitisation a pour but la mise en solution le carbone et éventuellement les éléments d'alliage précipités sous forme de carbures. Cela se fait en chauffant l'acier dans le domaine austénitique pour transformer le fer α (ferrite) en fer γ (austénite), ce qui rend le carbone soluble. La présence des différents types de carbures dépend de la composition de l'acier : on trouve de la cémentite dans les aciers non alliés, de la cémentite alliée dans les aciers légèrement alliés, ou encore des carbures complexes dans les aciers alliés [13].

L'austénitisation s'effectue en deux étapes :

1. Chauffage jusqu'à atteindre la température d'austénitisation (fréquemment nommée à tort la température de trempe) ;
2. Le maintien à température est essentiel pour garantir la dissolution et la distribution uniforme du carbone et des éléments d'alliage, indispensables à un durcissement homogène.

II.6.2.1 Chauffage

Le chauffage doit favoriser une élévation de la température de toute la pièce jusqu'à atteindre la température d'austénitisation. En effet, la chaleur étant transmise à travers sa surface, la température de celle-ci dépasse toujours celle du noyau, concluant ainsi l'opération. C'est précisément à ce moment-là que l'écart entre ces deux températures est devenu nul, ou tout au plus inférieur à la tolérance acceptée.

CHAPITRE II : Recherche bibliographique et état de l'art

II.6.2.2 Déformation lors du chauffage

Tout au long du processus de chauffage, il existe un gradient de température entre la peau et le noyau. La pente de la pièce devient d'autant plus importante que le chauffage est plus rapide et que la pièce est de section plus forte. Ce gradient de température induit des hétérogénéités d'expansion, ce qui peut provoquer des déformations élastiques (c'est-à-dire, dans ce cas, une mise en place contrainte dans l'acier) ou plastique, selon la nature de l'acier [14].

II.6.2.3 Maintien à la température d'austénitisation

La phase de maintien à la température d'austénitisation est celle où l'élément est gardé à une température stable, jusqu'à ce que la chaleur soit répartie uniformément sur toute la section (avec un écart acceptable entre la surface et le cœur). L'objectif de cette phase est de compléter la dissolution des carbures et d'assurer une distribution uniforme du carbone dans l'austénite. La durée de conservation est liée à la température sélectionnée : plus elle se rapproche d'Ac₃, plus elle doit être prolongée, et vice versa. Toutefois, il est important d'éviter un temps de traitement trop long pour prévenir une augmentation de la taille des grains. En fait, la distinction entre l'austénitisation intégrale, qui implique la dissolution complète des carbures, et l'austénitisation partielle, où certaines phases restent non dissoutes.

II.6.3 Le refroidissement

Le refroidissement dépend des caractéristiques thermiques de l'acier, de la forme et des dimensions de la pièce, ainsi que du liquide de trempe utilisé, atteint son maximum à la surface et décroît vers le centre.

- **Une condition métallurgique :** existence d'un domaine austénitique sur le diagramme d'équilibre de l'acier choisi de manière à pouvoir austénitiser cet acier en le portant à une température convenable ;
- **Une condition thermique :** possibilité de refroidir cet acier à une vitesse suffisante à partir de l'état austénitique de manière à provoquer la formation des constituants, hors d'équilibre, recherchés.

II.6.4 Le revenu :

Le revenu, appliqué aux aciers trempés (martensitiques ou martensito-bainitiques), permet de précipiter le carbone de façon contrôlée pour atteindre un durcissement optimal. Il transforme la structure métastable issue de la trempe vers un état plus stable. Il peut aussi entraîner la transformation de l'austénite résiduelle. Les conditions du revenu sont définies par la température maximale atteinte, la durée de maintien à cette température, et la loi de refroidissement finale [15].

Les quatre étapes qui se produisent au cours du revenu sont identifiées comme suit :

- **Étape 1 :** appauvrissement en carbone de la phase martensitique et précipitation des Premiers carbures, appelés carbures de transitions ;

CHAPITRE II : Recherche bibliographique et état de l'art

- **Étape 2** : transformation de l'austénite résiduelle instable en ferrite et en cémentite ;
- **Étape 3** : perte de la tétragonalité de la martensite et transformation progressive des Carbures de transitions en cémentite ;
- **Étape 4** : apparition des carbures alliés pour les aciers enrichis en éléments d'alliages Carburigènes.

II.7 Mise en forme de rond à béton Tempcore-500 par laminage à chaud :

II.7.1 Présentation du procédé :

Le laminage est une technologie de conversion en plastique qui vise à réduire les sections de produits allongés en traversant les cylindres rotatifs. Cette méthode utilise le frottement pour faire avancer le produit. Au niveau métallurgique, il contribue à améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau, en particulier en modifiant la structure solidifiée obtenue pendant le processus de coulé. Cette méthode est souvent utilisée pour produire des ronds à béton de différents diamètres : 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16 mm, 20 mm, 25 mm, 32 mm et 40 mm. Il existe deux types de laminage.

- **Le laminage à chaud**, effectué à des températures élevées, permet une déformation aisée du métal, diminue rapidement son épaisseur, altère sa structure interne et est adapté aux pièces de grande épaisseur ;
- **Le laminage à froid**, qui se déroule à température ambiante après le laminage à chaud, améliore la qualité de la surface, l'exactitude et la longévité du matériau [16].

Il ya 3 étapes très important dans la production de rond à béton :

- Avant le laminage : chauffage ;
- Etape de laminage : déformation plastique ;
- Après laminage : traitement thermique.

II.7.2 Aspect métallurgique :

La déformation élastique d'un matériau cristallin découle d'une distorsion réversible de la structure cristalline. Toutefois, la déformation plastique exige en théorie une quantité importante d'énergie, car elle nécessite la réparation et le renouvellement des liaisons métalliques. Néanmoins, grâce au processus d'écrouissage, ces transformations localisées et graduelles peuvent s'effectuer, en diminuant de ce fait la quantité d'énergie nécessaire. Par la suite, des processus entravent l'accumulation de dislocations, ce qui permet au matériau de se renforcer via les mécanismes de restauration et de cristallisation. Il se peut que ces dernières soient :

- Dynamiques, lorsqu'elles surviennent pendant la déformation ;
- Statiques ou post-dynamiques, lorsqu'ils se manifestent suite à la déformation [16].

II.7.3 Les différentes étapes du laminage à chaud :

Le processus de laminage à chaud comporte quatre étapes principales : le réchauffement, le laminage, refroidissement, et la finition. On utilise les équipements de chauffage pour exposer le métal à une température qui lui confère de la flexibilité. Le

CHAPITRE II : Recherche bibliographique et état de l'art

Laminoir dégrossisseur est chargé de dimensionner la bille, tandis que les laminoirs finisseurs sont des trains qui gèrent simultanément le matériau à travers plusieurs cages en cascade. Les différentes parties de laminoir sont :

1. Parc à billettes ;
2. Chauffage ;
3. Train de laminage ;
4. Finissage.

II.8 Techniques de refroidissement après le laminage :

Le refroidissement des aciers à béton de haute résistance s'effectue principalement par des méthodes accélérées à l'eau ou mixtes air-eau (Tempcore, trempe isothermique). L'emploi du refroidissement à l'air est limité du fait de son besoin en aciers alliés onéreux, de sa tendance à réduire la soudabilité et à produire une grande quantité de calamine, ce qui diminue sa rentabilité [17].

II.8.1 Le procédé Tempcore :

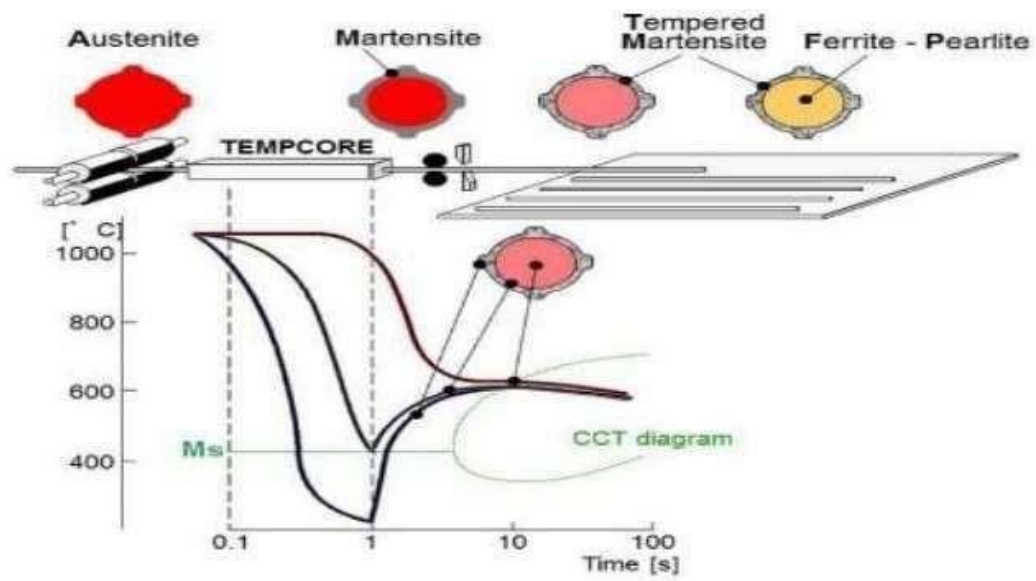
Depuis le début des années 1980, le procédé de trempe et d'auto-revenu s'est imposé comme un impératif pour la production économique de barres d'armature soudables à haute résistance. De ce fait, cette technique a été mise en œuvre dans des centaines de laminoirs, directement à la sortie de leurs cages de finition [18]. Le procédé Tempcore repose sur un simple cycle de trempe et de revenu, permettant d'accroître la limite élastique ainsi que la résistance ultime à la traction de l'acier faiblement allié (barre d'armature), tout en préservant leur ductilité. La méthode implique un traitement de trempe sur la surface locale des barres issues du laminoir à chaud, puis un auto-repos de la martensite [19].

Le procédé Tempcore est l'un des procédés thermomécaniques qui a été suivi par l'usine sidérurgique BELLARA pour produire des barres d'armature soudables à haute limite d'élasticité à partir de billettes d'acier doux sans altérer leur ductilité et sans l'ajout de microéléments d'alliage.

II.8.2 Description de processus

Ce processus implique trois étapes : initialement, les produits laminés à haute température ont été immédiatement refroidis avec de l'eau, atteignant des taux de refroidissement suffisants pour la formation de la martensite à la surface. La tige se déplace ensuite vers la zone de refroidissement de l'air, permettant la diffusion de la chaleur du noyau à la surface, provoquant l'auto-revenu de la couche de martensite. Enfin, l'austénite restante est transformée en ferrite et perlite pendant le refroidissement libre [20].

CHAPITRE II : Recherche bibliographique et état de l'art



FigII.2, Principe du processus Tempcore

CHAPITRE III :
Matériau et
techniques
expérimentales

CHAPITRE III : Matériau et techniques expérimentales

Introduction

Ce chapitre est consacré à la description des matériaux et des méthodes expérimentales employées pour analyser l'impact de la composition chimique du béton armé sur les microstructures et les caractéristiques mécaniques. L'entreprise Bellara, basée à Jijel (Algérie), a fourni le matériau examiné, un rond à béton fréquemment utilisé dans le secteur de la construction, sous forme de barres laminées à chaud. Les parties à venir détaillent les techniques utilisées pour examiner la composition chimique, évaluer la dureté, effectuer des essais de traction, et caractériser la microstructure du matériau. Ces études ont pour objectif d'offrir une connaissance approfondie des caractéristiques mécaniques et métallurgiques du rond à béton.

III-1-Choix de matériau :

Pour effectuer cette étude, nous avons utilisé deux compositions chimiques différentes Afin d'étudier l'effet du pourcentage du manganèse sur les traitements thermiques à savoir sur la microstructure et les propriétés mécaniques. Les échantillons A, B et C correspondent à l'acier B500B avec des diamètres de 20 mm, 25 mm et 32 mm respectivement, tandis que les échantillons D, E et F représentent l'acier B500BWR avec les mêmes diamètres dans le même ordre L'analyse chimique réalisée à l'aide du spectromètre ATLANTIS S9 repose sur le principe de l'émission optique.

TabIII.1. La composition chimique de l'acier B500B

B500B											
	Diamètre	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)	Ni(%)	Cr(%)	Nppm	Ceq(%)
A	20	0,21	0,17	1,25	0,004	0,008	0,00	0,004	0,015	85	0,42
B	25	0,22	0,21	1,22	0,01	0,01	0,001	0,005	0,015	67	0,43
C	32	0,21	0,23	1,25	0,007	0,008	0,00	0,005	0,01	86	0,42

TabIII.2. La composition chimique de l'acier B500BWR

B500BWR											
	Diamètre	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)	Ni(%)	Cr(%)	Nppm	Ceq(%)
D	20	0,21	0,21	0,66	0,004	0,009	0,000	0,004	0,011	85	0,36
E	25	0,21	0,25	0,67	0,004	0,009	0,000	0,003	0,018	83	0,38
F	32	0,22	0,23	0,69	0,006	0,010	0,000	0,004	0,009	77	0,36

CHAPITRE III : Matériau et techniques expérimentales

L'analyse chimique des échantillons d'acier B500B et B500BWR a été réalisée pour trois diamètres différents (20 mm, 25 mm et 32 mm), en se basant sur les résultats obtenus grâce au spectromètre ATLANTIS S9, qui utilise le principe de l'émission optique pour identifier et quantifier les éléments présents dans les aciers. Les analyses révèlent une disparité significative en termes de teneur en manganèse (Mn) entre les deux variétés d'acier, les échantillons B500B présentant un taux supérieur par rapport aux B500BWR. Ce facteur est crucial pour le développement de la microstructure et des caractéristiques mécaniques, le manganèse étant réputé pour renforcer la résistance aux fissures et promouvoir une structure interne plus uniforme.

III.2 Etude métallographique :

L'analyse métallographique offre la possibilité d'examiner la structure microscopique des matériaux de nature métallique. C'est crucial pour appréhender leurs caractéristiques mécaniques et cela se manifeste à chaque phase de leur existence : conception, emploi et détérioration (en particulier par corrosion).

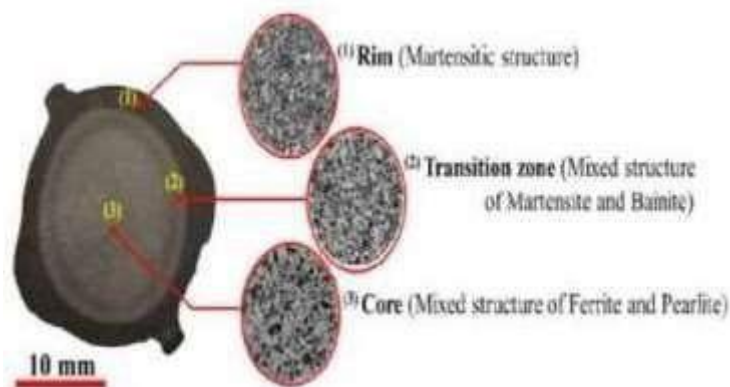


Fig. III.1. Exemple d'une microstructure.

III.2.1 Préparation métallographique :

Le polissage mécanique est indispensable pour préparer des échantillons destinés à l'observation au microscope. Il consiste en plusieurs étapes de polissage avec du papier abrasif, complétées par un lavage à l'eau, pour se débarrasser des particules de diamant et ce, à chaque étape, afin d'éliminer les débris de la surface et garantir une finition impeccable. Tous les échantillons sont attaqués au Nital 4%.

III.2.1.1 Découpage

La découpe des échantillons a été effectuée avec une scie à ruban horizontale ECHOENG SN350SA, dotée d'un mécanisme de lubrification pour prévenir la surchauffe causée par le frottement entre l'échantillon et la lame, ce qui contribue à maintenir l'intégrité du matériau. Cette machine est équipée d'un levier comprenant un bouton de sécurité, possède une coupe inclinée (0-60° à droite, 0-45° à gauche), dispose d'une descente automatique de l'arc et comprend un étau à serrage rapide. De plus, une deuxième scie, la CM260, a été employée pour couper de petits échantillons.



Fig. III.2. Tronçonneuse (scie à ruban).

III.2.1.2 L'enrobage :

L'enrobage est réalisé pour faciliter le polissage des échantillons et limiter le contact de la solution aux seules surfaces métalliques lors des tests de corrosion. Une résine thermodurcissable en poudre est utilisée à cet effet, avec une presse de montage métallographique ECHOLAB MP140A. Cette machine est entièrement automatique, silencieuse, avec un chauffage électrique réglable jusqu'à 250 °C, un système de refroidissement à eau, et une minuterie. Elle permet d'enrober des échantillons jusqu'à Ø40 mm, avec une puissance de 1600 kW et un poids de 80 kg.



Fig. III.3. Ecopress d'enrobage.

III.2.1.3 Le polissage :

Les échantillons ont été polis à l'aide de papiers abrasifs de différentes granulométries (de 120 à 4000), puis finis avec une pâte diamantée sur un papier feutre pour obtenir un état de surface miroir. Le polissage a été réalisé avec la polisseuse **ECHOLAB-PM62 T300**, qui est une machine programmable, automatique, silencieuse, avec une vitesse variable de 50 à 600 tr/min, un écran tactile, et une conception de table pratique.

CHAPITRE III : Matériau et techniques expérimentales



Fig. III.4. Polisseuse - ECHOLAB - PM62

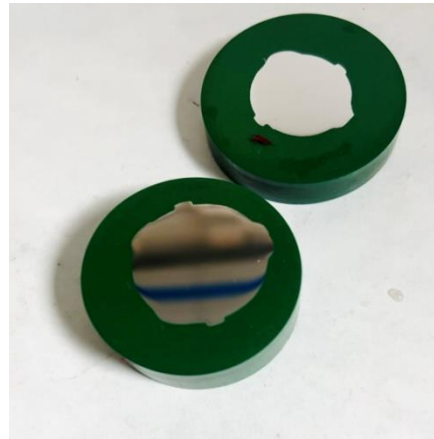


Fig. III.5. L'échantillon après polissage.

III.2.1.4 L'attaque chimique :

L'attaque chimique utilise un réactif pour différencier les phases de métal et mettre en évidence les joints des grains. Cette technique implique l'immersion du côté à attaquer dans un délai approprié avec le réactif sélectionné.

Dans le cadre de l'examen, les étapes suivantes ont été réalisées :

- Nettoyage de la surface avec de l'alcool à 96 % ;
- Application du réactif Nital à 4 %, composé de 4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol ;
- Durée d'attaque : environ 2 secondes.



Fig. III.6. L'échantillon après l'attaque chimique.



Fig. III .7.L'attaque chimique.

III.2.2 Observation par le microscope :

La microscopie optique est une méthode physique d'observation des métaux, qui consiste à examiner par réflexion au microscope une surface polie et généralement attaquée. Elle a pour but principal, la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques. Nos examens de microscopie optique ont été réalisés à l'aide d'un microscope optique de type **Nikon Eclipse**.

CHAPITRE III : Matériau et techniques expérimentales



Fig. III.8. Microscope métallographique Nikon Eclipse.

III.2.3 Analyses par Microscope Electronique à Balayage (MEB) et Spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDX) :

La microscopie électronique à balayage (MEB) permet d'analyser la topographie des surfaces solides en balayant un échantillon avec un faisceau d'électrons focalisé. Les signaux émis (électrons secondaires et rétrodiffusés) sont recueillis par des détecteurs pour produire une image détaillée. L'échantillon doit être conducteur pour éviter l'accumulation de charges électriques. Couplée à un détecteur EDX (spectroscopie X à dispersion d'énergie), la MEB permet également d'identifier la composition chimique des matériaux, soit ponctuellement, soit par cartographie élémentaire sur une zone donnée.



Fig. III.9. Microscope Electronique à Balayage (MEB).

III.3. Essai de traction :

L'essai de traction est une méthode simple et courante pour caractériser le comportement mécanique d'un acier. Il permet de déterminer la **limite élastique (R_e)** et la **résistance à la rupture (R_m)**. L'essai consiste à appliquer des forces opposées sur une éprouvette métallique jusqu'à sa rupture. L'échantillon passe d'abord par une phase élastique

CHAPITRE III : Matériau et techniques expérimentales

(déformation réversible), puis entre en phase plastique (déformation permanente), jusqu'à la **striction** et la **rupture**. [21].

L'éprouvette est découpée selon la norme ISO 18 265 avec une longueur égale à 5 fois son diamètre. Après avoir mesuré sa masse (M), on calcule :

1. Le rapport M/L (masse linéique) ;
2. La surface initiale $S_0 = \pi \times r^2$;
3. Le produit $S_0 \times \rho$ (ρ : masse volumique du fer = 7,88 g/cm³) ;
4. Une valeur ajustée de $S_0 \times \rho$ multipliée par un pourcentage (5 % pour certains diamètres, 4 % pour d'autres) ;
5. L'intervalle de masse linéique,
6. L'allongement $A\%$ à la rupture ;
7. Le logiciel de la machine de traction fournit enfin les valeurs de **Re** et **Rm**, essentielles pour évaluer la résistance mécanique de l'acier.



Fig. III.10. Machine de traction au niveau de l'entreprise AQS.

III.4 Essai de pliage :

Il permet d'apprécier la ductilité de l'acier et son aptitude au formage à froid. Il consiste à imposer à un échantillon, dans des conditions spécifiées, un pliage jusqu'à un angle requis (en général 180°). On inspecte ensuite les tranches et surtout la face en extension. Pour une bonne aptitude au pliage à froid la face en extension ne doit pas en principe présenter de fissures, ni déchirures [22].



Fig. III.11. Machine de pliage.

CHAPITRE III : Matériau et techniques expérimentales

III.5 Essai de Micro dureté :

L'essai de micro dureté est une épreuve mécanique mise en œuvre pour mesurer la capacité d'un matériau à résister à la déformation plastique localisée, telle que l'indentation, l'abrasion ou la rayure. Il permet d'évaluer la pertinence d'un matériau pour une application spécifique ou l'impact d'un traitement particulier. On privilégie souvent ce test du fait de sa simplicité, rapidité et faible destructivité. La dureté se détermine par la pénétration d'un indenteur sous une pression maîtrisée, et la mesure qui en résulte est tributaire de la profondeur ou du diamètre de l'empreinte. On peut utiliser divers dispositifs en fonction de la forme de l'indenteur. [23].



Fig. III.12. Machine de Micro dureté.

III.6. Paramètres de traitement thermique :

Les traitements thermiques de trempe et de revenu se font à la fin du laminage :

III.6.1. La trempe :

Elle se réalise en soumettant les barres d'acier à une pulvérisation d'eau froide au niveau des thermes QTB, entraînant un refroidissement extrêmement rapide de la surface de la barre. Provoquant une transformation martensitique à la même température.

III.6.2 Le revenu :

Le procédé utilise la chaleur résiduelle du noyau de la barre d'acier pour réchauffer la partie trempée à une température inférieure à la température critique. Ensuite, un refroidissement lent à l'air (sur un banc de refroidissement) permet d'obtenir une structure finale composée d'une surface en martensite à haute résistance, d'un noyau en perlite et d'une zone intermédiaire en bainite.

CHAPITRE III : Matériau et techniques expérimentales

III .6 .3. Les Paramètres de laminage pour chaque échantillon :

Tableau III.3. Les Paramètres de laminage pour chaque échantillon.

		WB1		WB2		Vitesse réelle (m/s)	T° fin de Laminage (°C)	T° Trempe (°C)
		PRESSION (bar)	FLUX (m³/h)	PRESSION (bar)	FLUX (m³/h)			
B500B	20	11,4	516	11	520	16,66	865	330
	25	11,1	520	10,6	520	10,15	854	349
	32	10,8	520	10,3	520	9,44	890	398
B500BWR	20	10,8	520	11	520	9,55	840	334
	25	10,8	520	11	520	9,55	860	377
	32	8	520	9,5	495	9,44	876	388

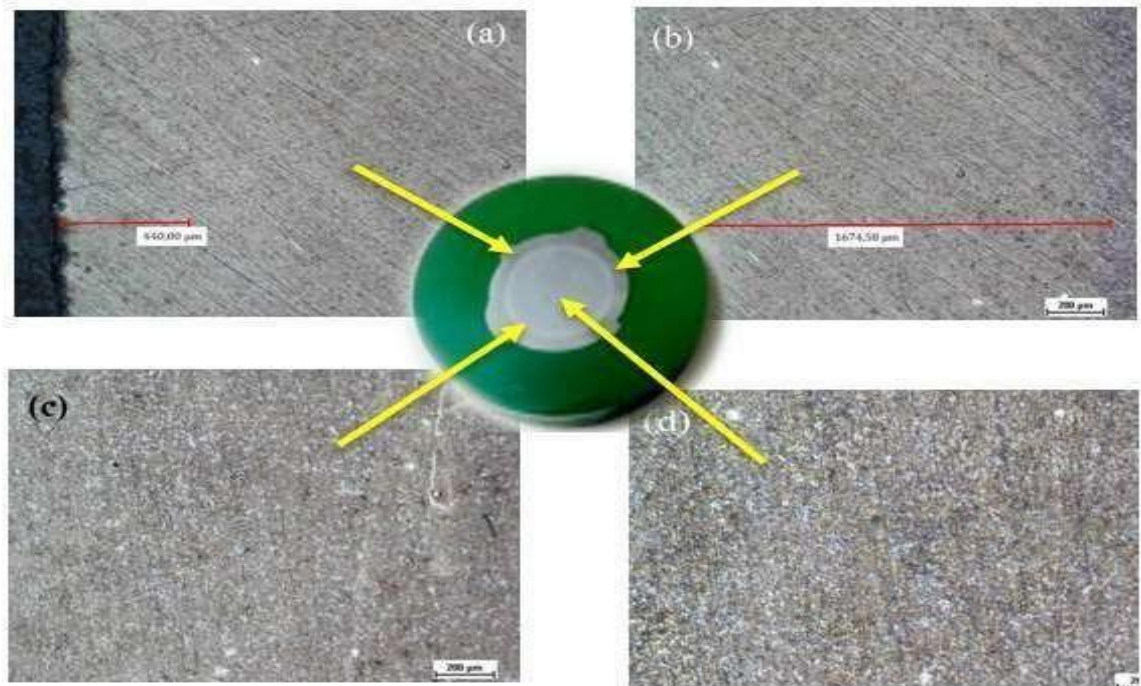
CHAPITRE IV :
Résultat et
discussions

CHAPITRE IV : Résultat et discussions

IV.1. Résultats de l'analyse de la microstructure :

On présente dans cette partie, la microstructure de l'acier B500B ET B500BWR de rond a béton de diamètre 20. La microstructure de l'acier B500B ET B500BWR de rond a béton de diamètre 25 et 32 mm sont présentés en **Annexes I**.

- **L'échantillon B500B de diamètre 20 mm**



FigIV.1. Les microstructures obtenues pour les échantillons de B500B :(a) et (b) à l'extrémité de surface ;(c) : la 2ème zone d'extrémité de surface ;(d) :au cœur

La figure IV.1 présente la microstructure d'acier B500B, riche en manganèse, révélant une distribution progressive et distincte des structures métallurgiques. On observe une fine couche martensitique en surface (images a et b), résultant du refroidissement rapide, suivie d'une zone intermédiaire principalement constituée de bainite, puis d'un cœur composé de ferrite et de plages de perlite (images c et d). La structure interne de l'échantillon présente une bonne homogénéité et une répartition fine, grâce à la teneur élevée en manganèse.

- **L'échantillon B500BWR de diamètre 20 mm**

La figure IV.2 présente la microstructure de l'échantillon d'acier B500BWR, à faible teneur en manganèse. On y observe une couche martensitique en surface (images a et b) nettement plus épaisse que celle de l'acier B500B, résultat d'un refroidissement rapide accentué. Cette couche est suivie d'une zone intermédiaire majoritairement bainitique, puis d'un cœur composé de ferrite et de perlite (images c et d). Cependant, la structure interne apparaît moins homogène et plus grossière, ce qui peut être attribué à la faible teneur en manganèse, limitant la formation de phases fines et uniformes.

CHAPITRE IV : Résultat et discussions

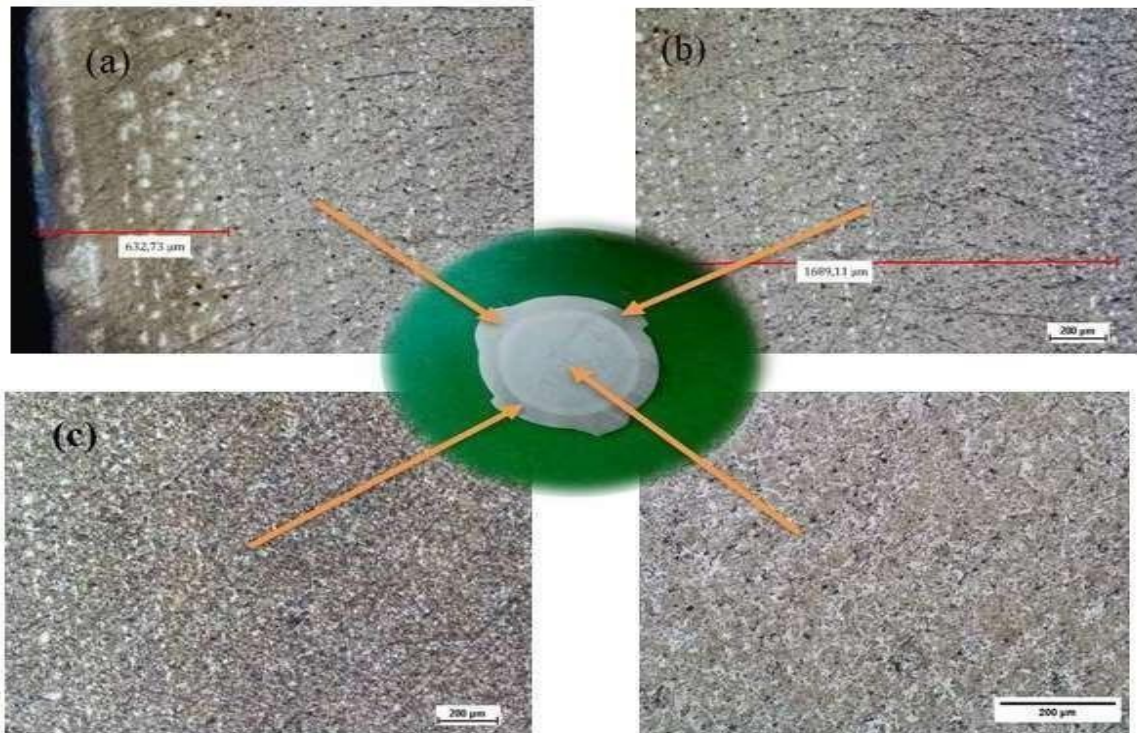


Fig IV .2. Les microstructures obtenues pour les échantillons B500BWR:(a) et (b) à l'extrémité de surface ;(c) : la 2ème zone d'extrémité de surface ;(d) :au cœur

La comparaison entre les deux échantillons B500B et B500BWR révèle une différence marquée au niveau de la microstructure et de l'épaisseur de la couche martensitique. L'échantillon B500BWR, à faible teneur en manganèse, présente une couche martensitique plus épaisse, mais avec une structure interne moins homogène, ce qui peut nuire à ses propriétés mécaniques. En revanche, l'échantillon B500B, riche en manganèse, montre une couche martensitique plus fine, mais une microstructure interne plus homogène et organisée. Cela s'explique par le rôle du manganèse dans la formation de phases dures telles que la martensite, la bainite et perlite, offrant ainsi une meilleure résistance à la traction et des performances mécaniques accrues sans dépendre d'une couche martensitique épaisse.

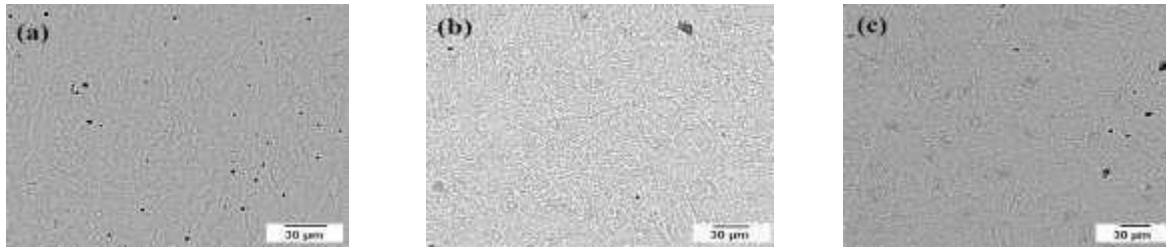
IV.2 Résultat de l'Analyses par Microscope Electronique à Balayage (MEB) et Spectroscopie X a dispersion d'énergie (EDX) :

Cette partie est consacrée à la présentation de la microstructure MEB et EDS du rond à béton de diamètre 20mm en aciers B500B et B500BWR. Les micrographies de ces aciers, pour les diamètres de 25 mm et 32 mm, sont détaillées **en Annexe [2]**.

CHAPITRE IV : Résultat et discussions

IV.2.1. L'analyse par Microscope Electronique à Balayage (MEB) :

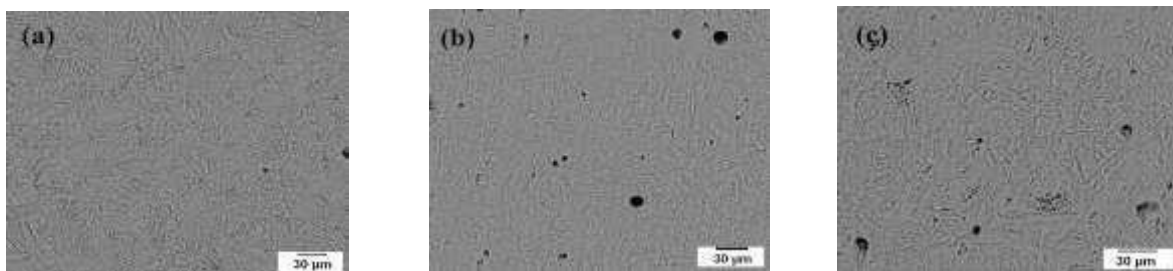
- Les échantillons B500B de diamètre 20 mm :



FigIV .3. Micrographie (MEB) obtenu pour les échantillons B500B:(a) : à l'extrémité de surface ;(b) :la zone intermédiaire ;(c) :au cœur.

La Figure (IV.3.a) présente la microstructure de l'acier B500B avec un haut degré d'homogénéité et d'organisation. La microstructure observée est une **martensite auto-revenue** sous forme de lattes. Cette martensite se distingue souvent par son aspect imbriqué et orienté dans diverses directions souvent appelé « structure en lattes ». Cet aspect est caractéristique des aciers hypoeutectoïdes. En outre, on constate la présence des pores qui sont peu nombreux et principalement localisés dans les couches internes. Le manganèse joue un rôle essentiel dans la stabilisation des grains et la réduction de l'énergie de surface au niveau des joints, ce qui diminue la formation de vides ou de microfissures, notamment dans les zones internes qui se refroidissent plus lentement, contribuant ainsi à une meilleure cohésion structurale de l'acier. Dans la zone intermédiaire, La microstructure obtenue est de type **aciculaire/en lattes**, ce qui est fortement indicatif de la présence de **bainite**. Cette phase se forme à des vitesses de refroidissement intermédiaires, entre celles qui produisent la perlite et celles qui donnent la martensite. Cela conférerait au cœur une bonne combinaison de résistance et de ductilité. La zone cœur (Figure IV.3.c) présente une microstructure composée de deux constituants principaux, organisés de manière un peu différente de la couche externe : **la ferrite** sous forme presque globulaire et plus claires. **Perlite** (lamellaire) se localise entre les grains de ferrite. Microstructure plus sombres et texturées, composées de fines lamelles (plaques) alternées de ferrite et de cémentite (carbure de fer).

- L'acier B500BWR de diamètre 20 mm :



FigIV .4. Micrographie (MEB) obtenu pour les aciers B500BWR:(a) : à l'extrémité de surface ;(b) :la 2ème zone d'extrémité de surface ;(c) :au cœur

La Figure (IV.4) montre la micrographie MEB obtenue pour les aciers B500BWR (à faible contenu en manganèse), indiquant une augmentation graduelle du nombre de pores de

CHAPITRE IV : Résultat et discussions

l'extérieur vers l'intérieur, due au rôle restreint du manganèse dans la stabilisation de la microstructure et la diminution des imperfections.

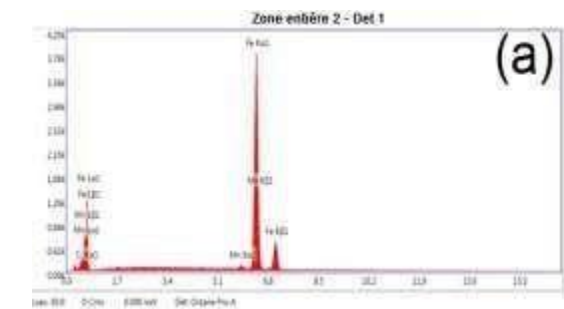
La figure IV.4.a présente une microstructure de **B500BWR** à l'extrémité presque similaire à celle de l'image de la figure IV.4.a. Elle est également caractérisée par des **constituants fins**, allongés et entrelacés, formant un motif de lattes qui s'entrecroisent avec une structure fine et homogène.

La figure IV.4.b présente une microstructure de B500BWR, dans la zone après l'extrémité de la barre, **une** zone plus proche de la surface. Où la structure est bainitique fine, avec un bon compromis entre résistance et ductilité.

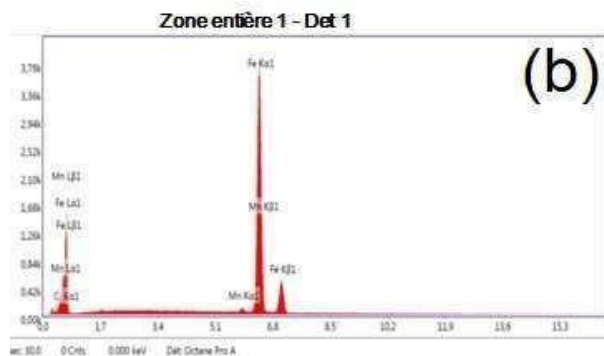
La microstructure du cœur de l'acier B500BWR est généralement plus douce et plus ductile (FigIV .4.c). Les phases typiquement observées dans le cœur sont : Ferrite, sous forme de grains plus ou moins équiaxes. Perlite sous forme de lamelles alternées, qui apporte de la résistance.

IV .2.2. Les Analyses EDX :

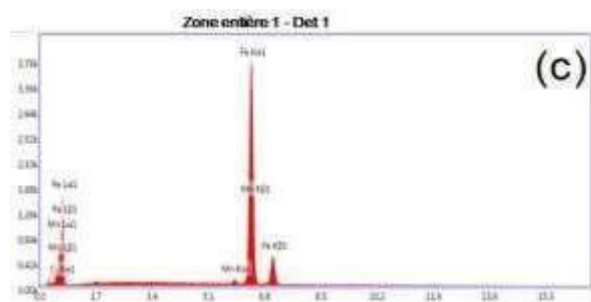
- L'acier B500B de diamètre 20 mm :



Elément	% de masse	% atomique
C K	20.97	55.23
MnK	1.01	0.58
FeK	78.01	44.19



Elément	% de masse	% atomique
C K	20.82	55.01
MnK	0.82	0.47
FeK	78.36	44.52

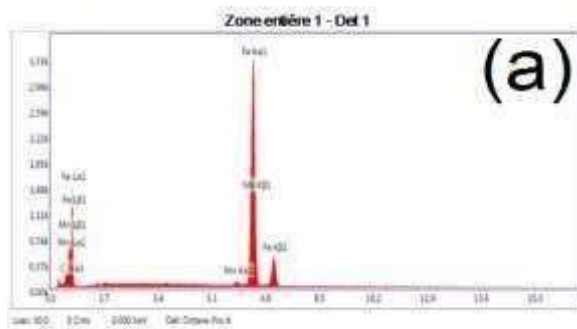


Elément	% de masse	% atomique
C K	20.68	54.80
MnK	0.94	0.55
FeK	78.37	44.66

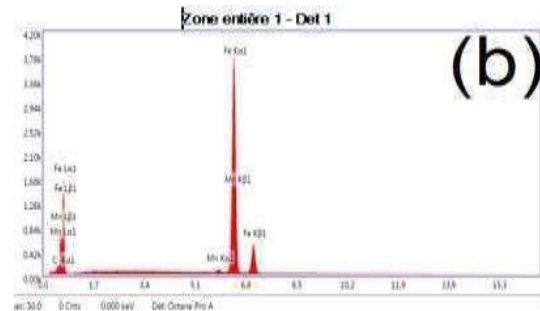
FigIV .5. Analyse EDX de B500B : a) à l'extrémité de surface ; b) la 2ème zone d'extrémité de surface;(c) au cœur.

CHAPITRE IV : Résultat et discussions

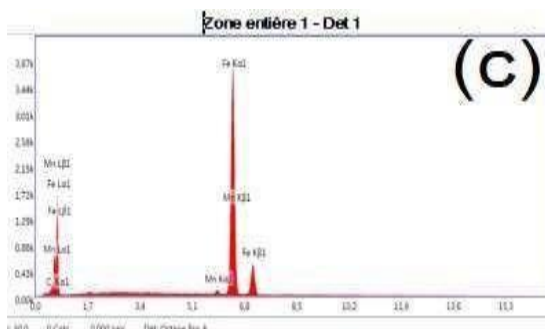
- Les acier B500BWR de diamètre 20 mm :



Elément	% de masse	% atomique
C K	22.49	57.42
MnK	1.02	0.57
FeK	76.49	42.00



Elément	% de masse	% atomique
C K	15.31	45.67
MnK	1.03	0.67
FeK	83.66	53.66



Elément	% de masse	% atomique
C K	13.55	42.14
MnK	1.09	0.74
FeK	85.36	57.12

FigIV.6 Analyse EDX de B500B : a) à l'extrémité de surface ; b) la 2ème zone d'extrémité de surface;(c) au cœur

L'examen EDS (Fig.IV.4) de l'acier B500B montre un léger changement dans la composition chimique à l'intérieur du rond à béton. L'extrémité de la surface présente une concentration élevée en carbone, probablement attribuée à une redistribution induite par la chaleur, tandis que le taux de fer augmente progressivement vers le cœur. La teneur en manganèse soit relativement faible et montre une légère diminution sur les trois analyses, sa présence est cruciale car il contribue au renforcement intrinsèque de l'acier. Ces résultats confirment l'effet direct de la température sur la chimie du matériau et soulignent le rôle crucial du traitement thermique Tempcore dans la microstructure.

L'examen EDS (FigIV .5) indique une répartition notable du carbone et du fer dans les trois zones du rond à béton. L'acier B500BWR dévoile des zones ou phases hautement chargées en carbone, montrant une fluctuation notable dans le contenu en carbone d'un point à l'autre. À l'écart, on observe une augmentation notable du taux de fer de l'extrémité vers le centre. Dans ces trois zones, la concentration en manganèse demeure relativement faible et stable. Cela peut être dû à la substitution de ce dernier dans les carbures de fer, ce qui restreint par conséquent sa capacité de diffusion thermique. Ces observations attestent la présence de

CHAPITRE IV : Résultat et discussions

gradients de composition chimique induits par le processus Tempcore, qui pourraient influencer les caractéristiques mécaniques et la durabilité du rond à béton.

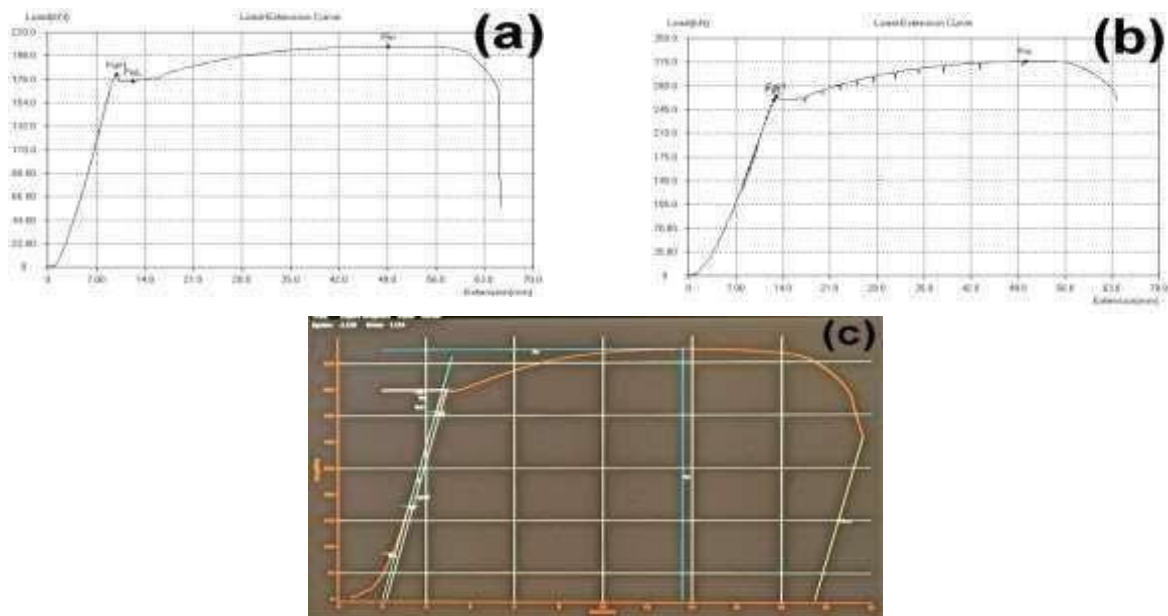
IV.3. Résultats des essais de traction :

Les courbes de traction présentées (Fig. IV.6 et IV.7) illustrent le comportement mécanique des aciers B500B et B500BWR pour trois diamètres (20 mm, 25 mm, 32 mm). On observe des différences notables entre les deux grades, ainsi qu'une influence du diamètre sur la réponse mécanique.

Tableau IV.1: propriété mécanique pour des aciers étudiés

	Echantillon N°	Re (MPa)	Rm (MPa)	A %
B500B	A	574	658	19,41
	B	570	666	18,26
	C	560	665	18,64
B500BWR	D	554	640	18,40
	E	558	632	17,01
	F	554	645	18,06

• IV.3.1. Les courbes de traction B500B :

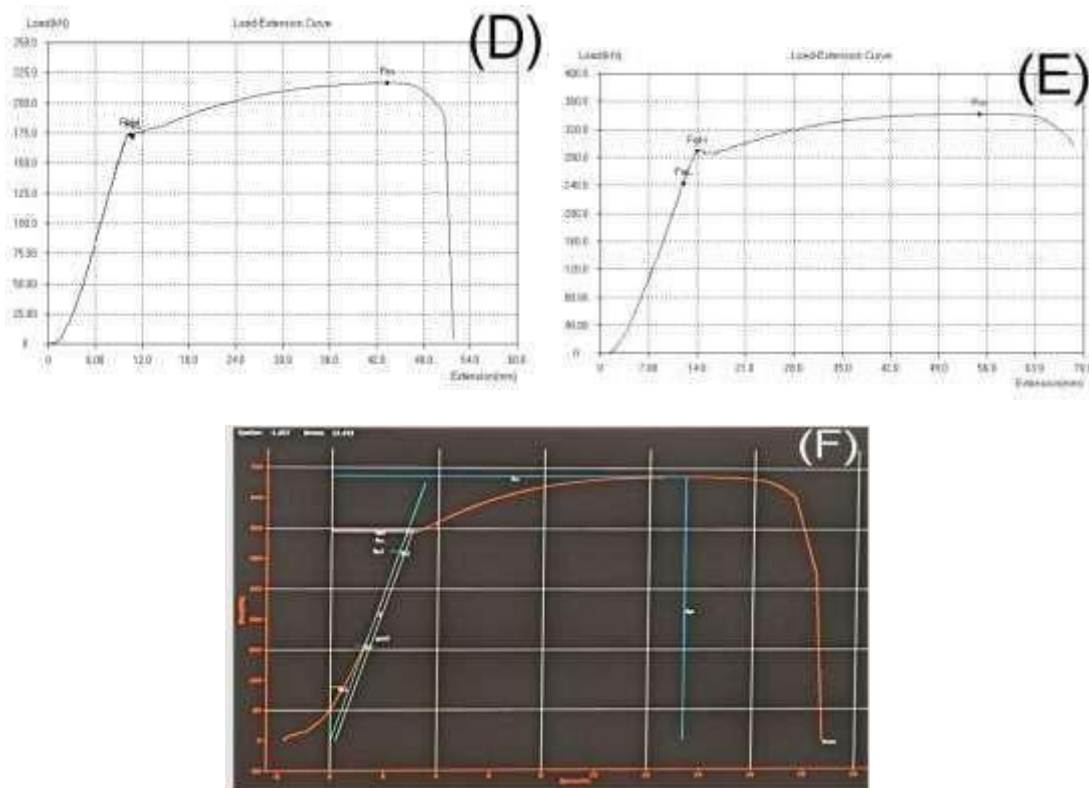


FigIV.7. Les courbes de traction pour grade B500B différents diamètres

A=20mm, B=25mm, C=32mm

CHAPITRE IV : Résultat et discussions

• IV.3.2. Les courbes de traction B500BWR :



FigIV.8. Les courbes de traction pour grade B500BWR différents diamètres

D=20 mm, E=25 mm, F=32 mm

L'acier B500B (Fig. IV.6) présente une limite d'élasticité et une résistance à la rupture améliorée, comparativement à l'acier B500BWR. À partir de l'analyse des courbes de traction, nous constatons l'effet du diamètre du rond à béton sur la résistance à la rupture et de la limite d'élasticité. Le rond à béton de diamètre 32 mm présente une résistance à la rupture et une limite d'élasticité supérieure comparativement à celles des diamètres 20 mm et 25 mm. Cela peut être expliqué par la microstructure : les diamètres plus faibles se refroidissent plus uniformément, ce qui favorise la formation d'une couche martensitique proportionnellement plus épaisse et un auto-revenu plus homogène d'un cœur plus fin.

Par contre, l'acier B500BWR (Fig. IV.7) se caractérise par une limite d'élasticité et une résistance à la rupture faible, avec une transition élastique-plastique plus douce et une homogénéité mécanique plus élevée. Nous enregistrons que les propriétés de résistances sont moins affectées par la variation du diamètre.

On note l'effet remarquable du Manganèse sur les courbes de traction. Une teneur en manganèse un peu élevée dans l'acier B500B suffit à induire une nette amélioration de ses propriétés mécaniques. Comparé au B500BWR, le B500B se distingue par des performances supérieures, tant en limite d'élasticité qu'en résistance à la traction — et cela s'explique par les effets majeurs du manganèse.

- A savoir, le manganèse en substituant en solution solide permet le renforcement du réseau cristallin, cela se traduit par une meilleure résistance mécanique ;

CHAPITRE IV : Résultat et discussions

- Ensuite, lors des traitements thermiques de trempe, le manganèse favorise la formation de martensite qui améliore significativement la dureté et la ténacité de l'acier ;
- L'affinement des grains, permet d'obtenir une microstructure plus harmonisée avec d'excellentes propriétés mécaniques. L'acier à faible teneur en manganèse présente des propriétés mécaniques faibles, principalement en raison d'une mauvaise trempabilité.

Cependant, de bonnes conditions de refroidissement sont nécessaires pour corriger ce défaut.

IV.4. Résultats de la Micro-dureté :

Afin de caractériser la trempabilité, nous avons analysé le profil de dureté en fonction de la distance depuis la surface. Dans notre étude, nous avons choisi de mesurer la dureté Vickers avec une charge appliquée de 300 gf. Le tableau IV.3 présente les valeurs du profil de dureté mesurées pour les deux grades et les trois diamètres.

Tab IV.2. Profil de dureté en fonction de la distance.

Echantil		Micro-dureté HV (mm de la surface au centre)										
Ion N°	Distance (mm)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5	7	9	11	13
A	Dureté (HV)	360	349	338	326	316	305	297	289	275	263	250
B		354	340	329	318	305	298	289	278	267	255	243
C		339	327	306	297	285	273	265	256	247	238	229
D		295	285	275	268	255	244	238	229	213	199	190
E		284	279	268	255	243	239	227	207	198	190	183
F		277	266	259	244	235	226	219	199	189	185	179

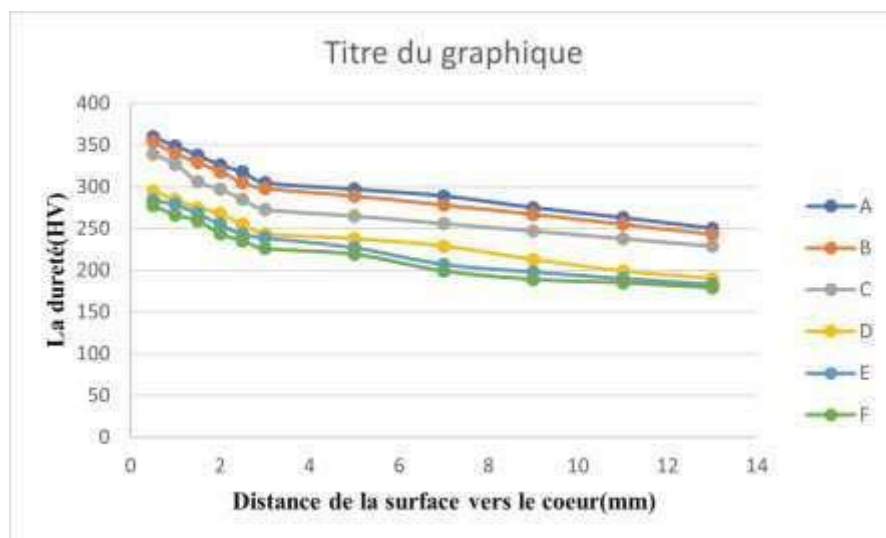


Fig. IV.9. Profil de dureté en fonction de la distance de l'extrémité vers le cœur (mm).

CHAPITRE IV : Résultat et discussions

La figure IV.8 présente les valeurs de microdureté (en HV) mesurées, allant de la surface vers le centre, pour chaque échantillon analysé. On observe que les échantillons A, B et C, correspondant à l'acier B500B à forte teneur en manganèse, présentent des valeurs de microdureté plus élevées en surface comparativement aux échantillons D, E et F, issus d'acier B500BWR à faible teneur en manganèse. Ce comportement met en évidence l'effet positif du manganèse sur la trempabilité de l'acier, en facilitant la formation d'une couche martensitique plus dure lors du traitement thermique. En outre, l'augmentation du diamètre des échantillons (de A à C puis de D à F) entraîne une diminution progressive des duretés mesurées, tant en surface qu'au cœur. Ce phénomène est dû à la réduction de la vitesse de refroidissement dans les échantillons de plus grand diamètre, ce qui limite la transformation martensitique et par conséquent diminue l'épaisseur de la zone durcie. La dureté mesurée au cœur de l'échantillon « A » est de 250 HV, tandis que celle en surface atteint 360 HV.

L'allure décroissante du profil de dureté en fonction de la profondeur reflète la présence de trois zones microstructurales successives : une couche martensitique en surface, suivie d'une zone bainitique, puis d'une phase ferrito-perlitique au cœur. Cette répartition graduelle est caractéristique d'un acier ayant subi une trempe efficace, où la microstructure évolue en fonction de la vitesse de refroidissement depuis l'extérieur vers l'intérieur de la pièce.

IV.5. Résultat de l'essai de pliage :

Des essais de pliage ont été réalisés sur l'ensemble des échantillons (A à F) après avoir subi le même traitement thermique avec une vitesse de refroidissement comparable. Les résultats ont montré que tous les échantillons ont un bon comportement ductile, sans apparition de fissures ni de défauts visibles en surface.

Bien que ce comportement soit commun à tous les échantillons, l'acier B500B riche en manganèse (A, B, C) présente une déformation plus homogène et stable, ce qui reflète l'effet positif du manganèse dans l'amélioration de la ductilité de l'acier.

En revanche, l'acier B500BWR à faible teneur en manganèse (D, E, F) a également conservé une bonne ductilité, mais avec un comportement de pliage moins régulier. Ainsi, on peut conclure que tous les échantillons présentent une ductilité suffisante après traitement thermique, avec un avantage notable pour l'acier riche en manganèse en termes de qualité de la déformation et d'absence de défauts, mettant en évidence le rôle bénéfique de cet élément dans l'amélioration des propriétés ductiles et plastiques de l'acier.

Conclusion

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude porte sur les nuances d'acier B500B et B500BWR, qui se distinguent par leur composition chimique. L'acier B500B contient une teneur en Manganèse supérieure à celle de l'acier B500BWR. Trois diamètres sont utilisés dans notre étude à savoir : 20mm, 25 mm et 32 mm, L'objectif était d'étudier l'influence de la teneur en manganèse et du diamètre du rond à béton sur les transformations de phase et, par conséquent, sur les propriétés mécaniques.

Les deux aciers B500B et B500BWR se révèle une différence marquée au niveau de la microstructure et de l'épaisseur de la couche martensitique. L'acier B500B présente une couche martensitique plus fine, avec une microstructure interne plus homogène et organisée, offrant ainsi des performances mécaniques meilleures comparativement à l'acier B500BWR. En revanche, l'acier B500BWR se distingue par une couche martensitique plus épaisse, mais avec une structure interne moins homogène, ce qui peut nuire à ses propriétés mécaniques.

Les résultats indiquent qu'à mesure que le diamètre des échantillons d'acier examinés augmente, la dureté de surface et la dureté à cœur mesurées diminuent simultanément. Une réduction de la vitesse de refroidissement des échantillons de plus grand diamètre entrave la transformation martensitique, ce qui produit une zone durcie plus mince.

En conclusion, on peut affirmer que le diamètre de rond à béton Tempcore régit principalement la cinétique de refroidissement et les gradients thermiques, tandis que le manganèse influence les températures de transformation de phase et la trempabilité de l'acier. La combinaison optimisée du diamètre et de la teneur en manganèse, ainsi que le contrôle précis des paramètres du processus Tempcore, sont cruciaux pour obtenir la microstructure composite idéale (couche externe dure de martensite revenue et cœur ductile de ferrite-perlite) et les propriétés mécaniques spécifiées pour les ronds à béton.

Références

Bibliographie

Références :

- [1] : Documentation interne de l'entreprise, Algérien Qatari Steel.
- [2] : <https://www.fichier-pdf.fr/2013/04/09/memotech-structure-metalliques-casteilla-2004/memotech-structure-metalliques-casteilla-2004.pdf>. — Hazard et al., Mémotech Structures métalliques (Casteilla, 2000), p. 14
- [3] : Guy MURRY, «Transformations dans les aciers, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M1115 », Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
- [4] : <https://www.technologuepro.com/cours-materiaux-metalliques/chapitre-3-etude-du-diagramme-fer-carbone.pdf>
- [5] : J.Barralis et G.Maeder. précis de métallurgie, structure, propriétés, Normalisation
- [6] : Micro icaunaise Stages de formation et de perfectionnement en Microscopie Électronique à Balayage et Microanalyses, Cours de Métallurgie, 4 - Les différentes classes d'aciers.
- [7] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bainite>
- [8] : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509317307128>
- [9] : N. Bouaoudja, Matériaux métallique, édition OPU Alger
- [10] : *Science et génie* des matériaux modulo Editeur, 2001, 233 AV Dunbar, Mont-Royal, Québec, Canada
- [11] : H.LAPLANCHE,R.THIRON.Duchoixetdemploisdesprincipauxaciers,fontesetalliage ferreux. Paris 1973
- [12] : <https://www.isoltop.com/Rond-a-b%C3%A9ton>
- [13] : Technique d'ingénieur, M1126, 2011
- [14] : M.T. Leger, P. Detrez. Les aspects métallurgiques du traitement thermique des aciers. Notice CTIF (1976), P 31, 38, 42, 43, 56, 76.
- [15] : Muriel Hantcherli. Influence d'éléments d'addition sur les transformations de la martensite revenue dans les aciers faiblement alliés. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2010 Français. NNT : 2010EMSE0570 tel : 00541049
- [16] : Anouar Halloumi. Modélisation mécanique et thermique du procédé de laminage asymétrique. Autre Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011. Français. NNT : 2011EMSE0595 tel : 00609219
- [17] : Kostiantyn Tabalaiev. Etude de la structure et des propriétés de l'acier à béton après déformations à froid. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Centrale de Lyon, 2010. Français. NNT : 2010ECDL0020. tel : 00566878.
- [18] : Noville Jean-François, CRM Group – CRM, Avenue du Bois Saint-Jean, 21 (P59) B-4000 Liege – Belgium.
- [19] : J. Nikolaou, et al., Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes.
- [20] : Study of steel bars for use in reinforced concrete produced by the“TEMPCORE” process
- [21] : <http://www.aciersspeciaux.fr/propri%C3%A9t%C3%A9s-m%C3%A9caniques>
- [22] : <https://www.google.fr/search?q=principe+de+l%27essai+de+pliage+fer+a+beton&tbm>
- [23] : <http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap4/site/html/6.html#6>

Annexes

Annexes

Annexe I

A.I Résultats de l'analyse de la microstructure :

Les microstructures des aciers B500B et B500BWR avec les diamètres 25 mm et 32 mm montrent la même morphologie que celle on a vu dans le cas des diamètres 20 mm.

Remarque :

Il a été vu que, la microstructure du rond à béton est composée de martensitique ‘couche externe), Bainite couche intermediaire et zone ferrito-perlitique.

En outre on a constaté l'effet du manganèse dans la stabilisation de l'austénite à haute température, ce qui renforce la transformation martensitique durant la trempe rapide.

- **L'échantillon B500B de diamètre 25 mm**

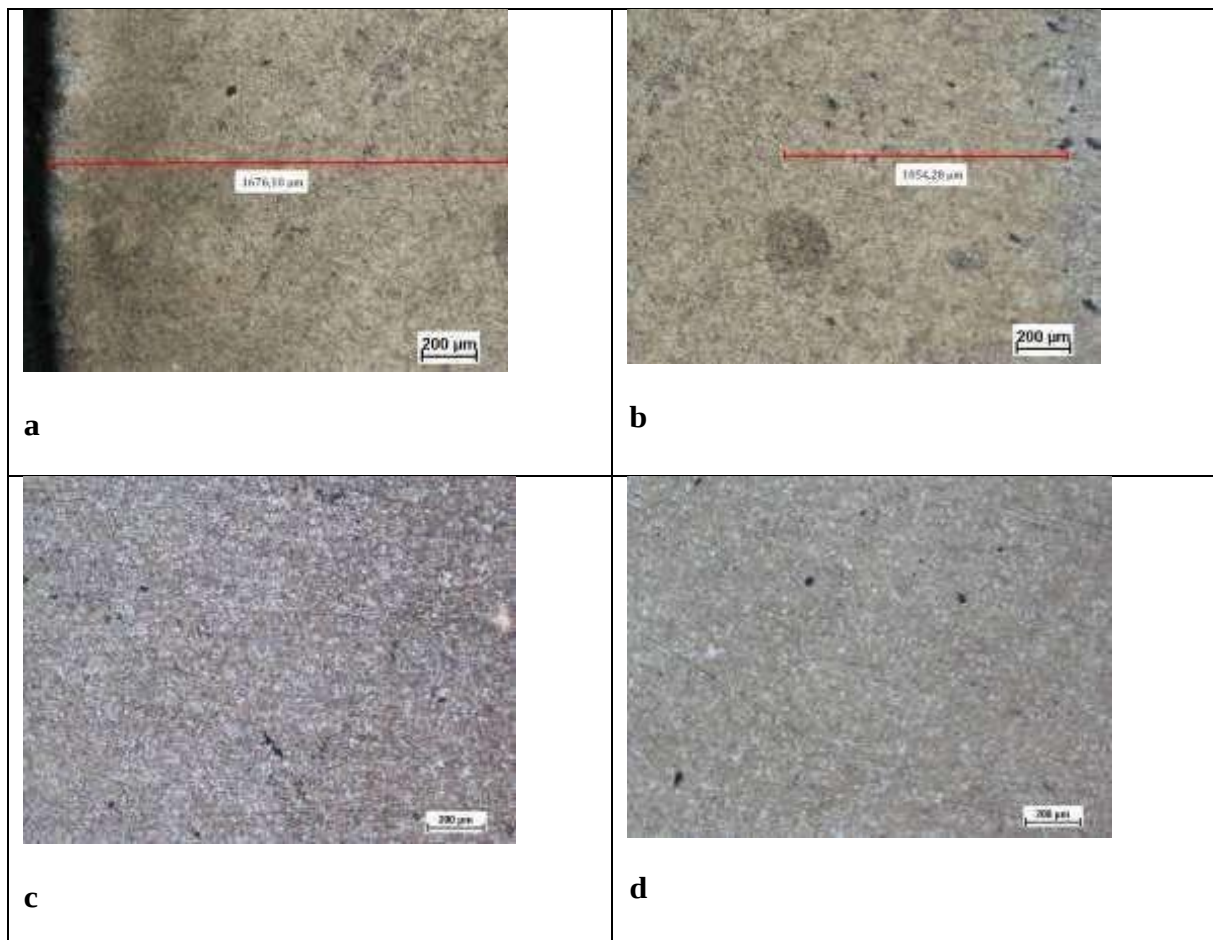


Fig I.1. Les microstructures obtenues pour les échantillons de B500B : (a) et (b) à l'extrémité de surface ; (c) : la 2ème zone d'extrémité de surface ; (d) : au cœur

Annexes

L'échantillon B500BWR de diamètre 25 mm

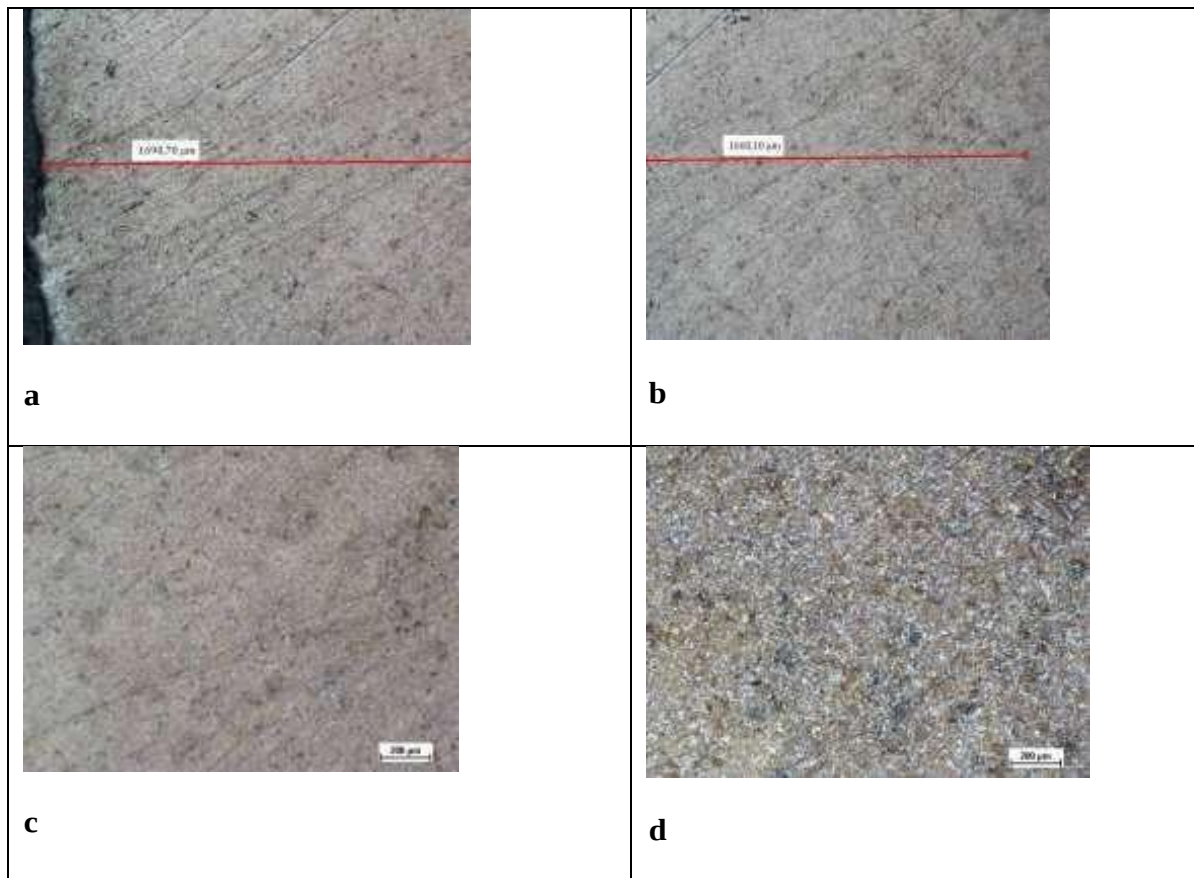
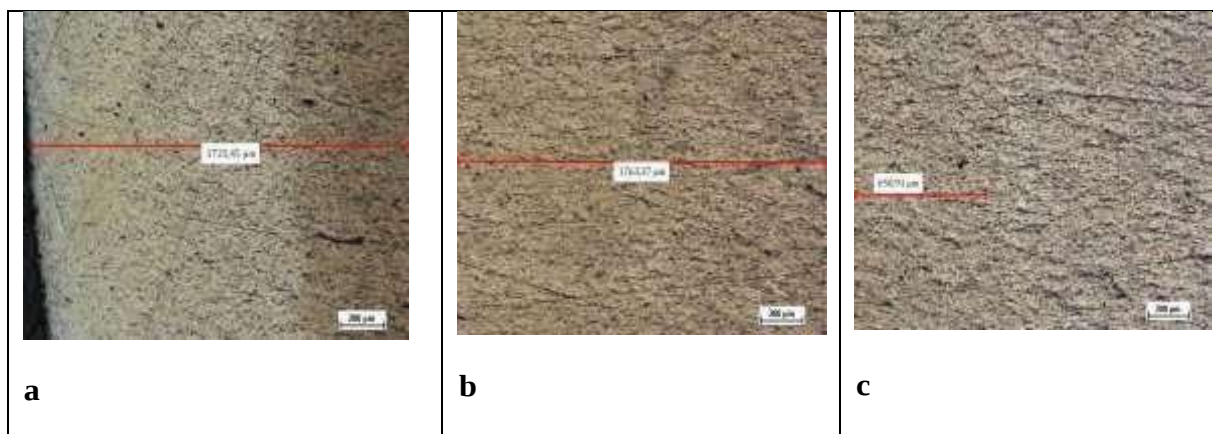


Fig I.2. Les microstructures obtenues pour les échantillons de B500BWR :(a) et (b) à l'extrémité de surface ;(c) : la 2ème zone d'extrémité de surface ;(d) : au cœur

L'échantillon B500B de diamètre 32 mm



Annexes

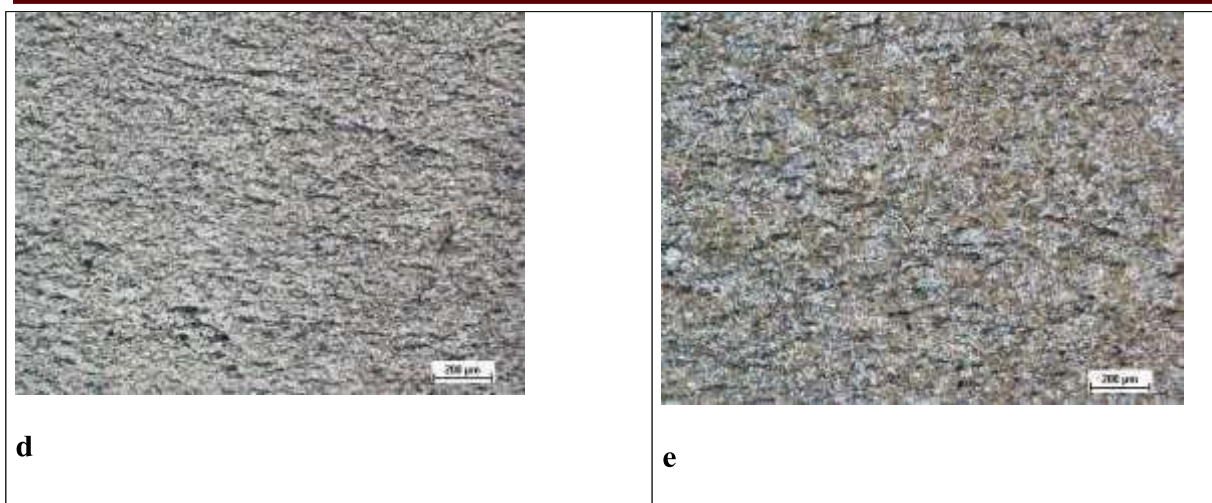
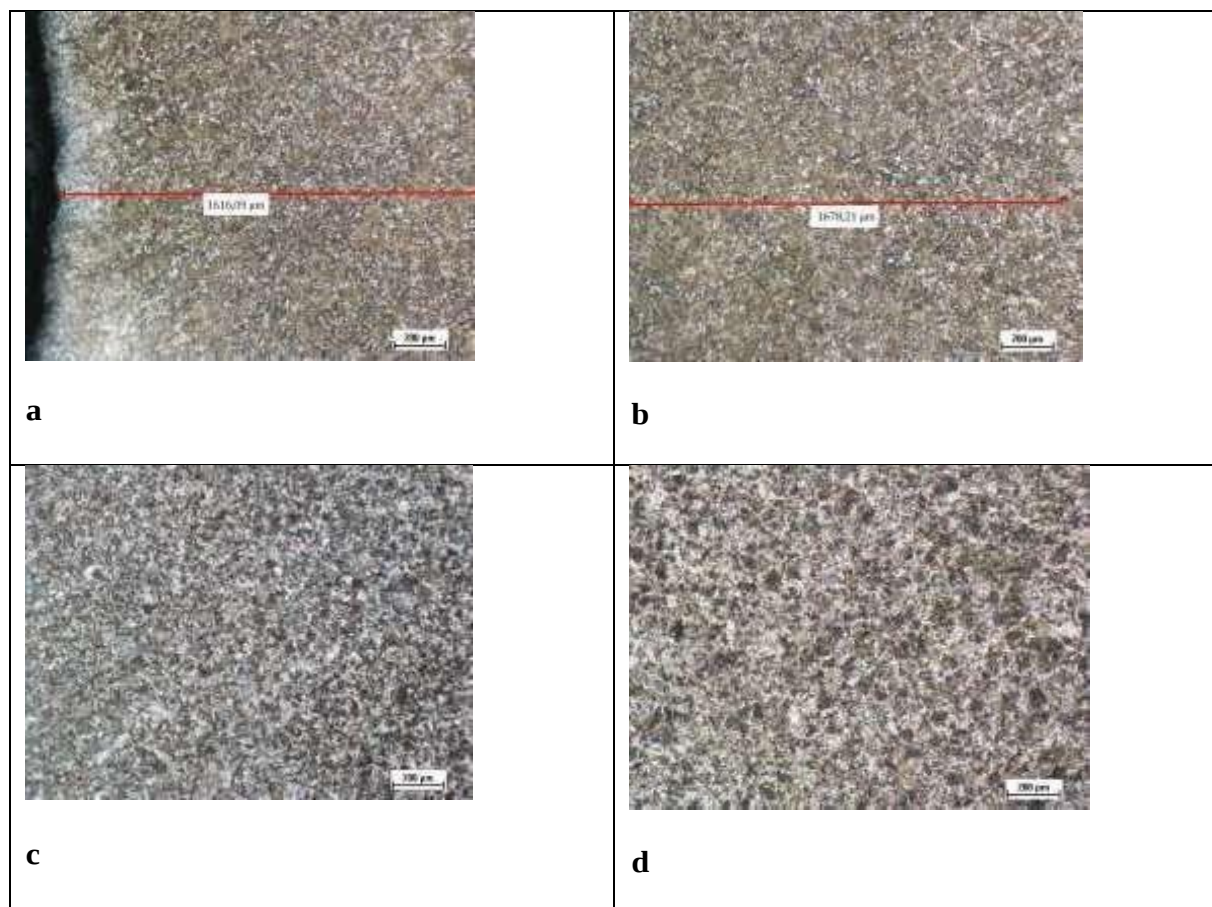


Fig I.3. Les microstructures obtenues pour les échantillons de B500B :(a),(b) et (c) a l'extrémité de surface ;(d) : la 2ème zone d'extrémité de surface ;(e) :au cœur

L'échantillon B500BWR de diamètre 32 mm



FigI.4. Les microstructures obtenues pour les échantillons de B500BWR :(a) et (b) a l'extrémité de surface ;(c) : la 2ème zone d'extrémité de surface ;(d) :au cœur

Annexe II : Résultat de MEB/EDS

A.2. l'Analyses par Microscope Electronique à Balayage (MEB) et Spectroscopie X a dispersion d'énergie (EDX)

A.2.1 L'analyse par Microscope Electronique à Balayage (MEB)

Les microstructures obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) des aciers B500B et B500BWR de 25 mm et 32 mm sont similaires à celles déjà identifiées sur les échantillons de 20 mm, notamment en ce qui concerne la distribution des constituants martensitiques, bainitiques et ferrito-perlitiques. La microstructure des deux types d'acier présente une différence significative pour le diamètre de 32 mm. L'acier B500B, dont la teneur en manganèse est élevée, exhibe une structure plus uniforme et stable, avec des grains fins et une répartition plus équilibrée des phases métalliques. Cette disparité est très nette par rapport à l'acier B500BWR à faible teneur en manganèse. Cette amélioration structurale est largement due à la forte concentration de manganèse. Le manganèse favorise la formation d'amas faiblement liés et réduit considérablement le risque de défauts associés aux ségrégations locales lors de la solidification.

- Les échantillons B500B de diamètre 25 mm :

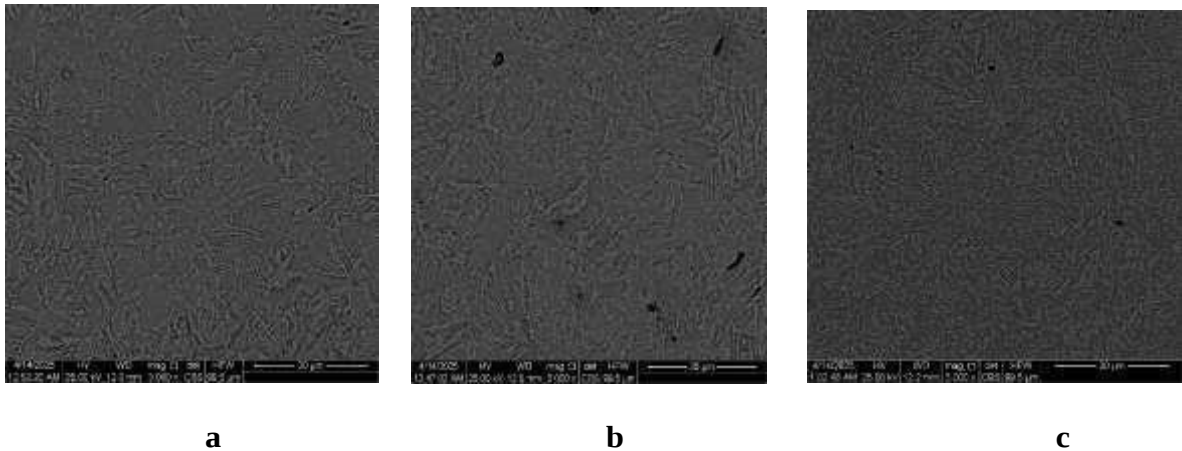


Fig II.1. Micrographie (MEB) obtenu pour les échantillons B500B:(a) : à l'extrémité de surface ;(b) :la zone intermédiaire ;(c) :au cœur.

- Les échantillons B500BWR de diamètre 25 mm :

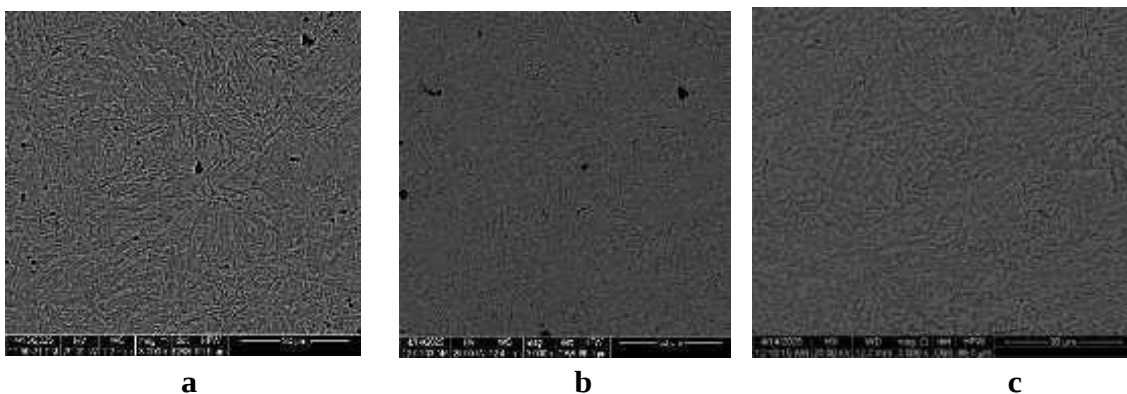


Fig II.2. Micrographie (MEB) obtenu pour les échantillons B500BWR:(a) : à l'extrémité de surface ;(b) :la zone intermédiaire ;(c) :au cœur.

Annexes

- Les échantillons B500B de diamètre 32 mm :

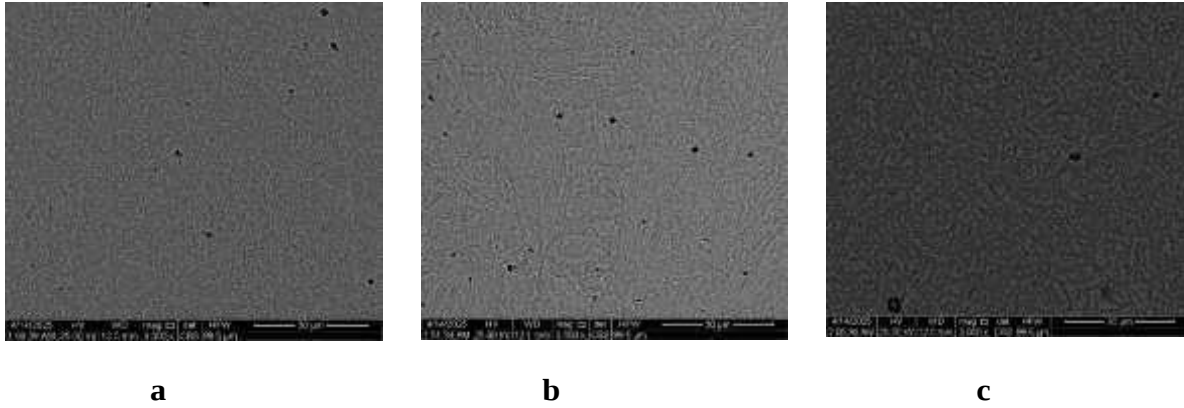
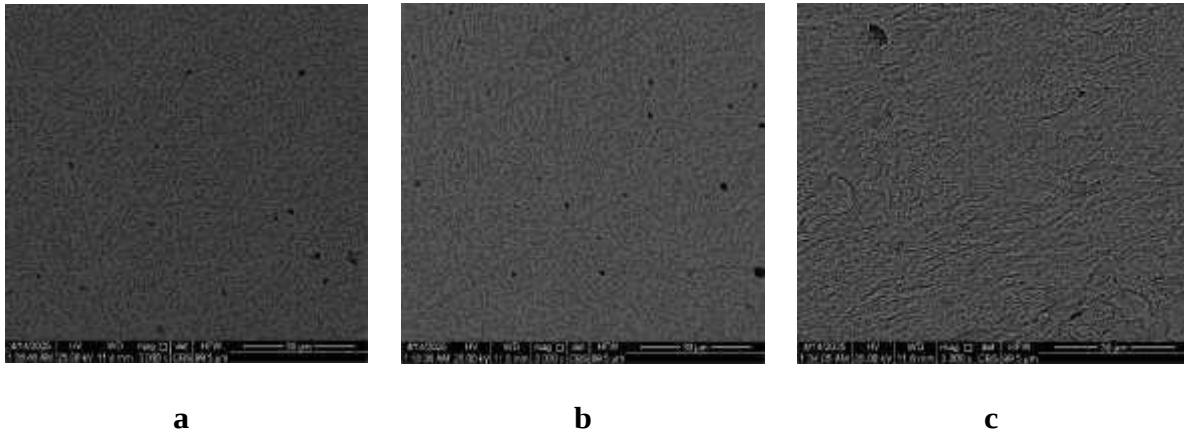


Fig II. 3. Micrographie (MEB) obtenu pour les échantillons B500B:(a) : à l'extrémité de surface ;(b) :la zone intermédiaire ;(c) :au cœur.

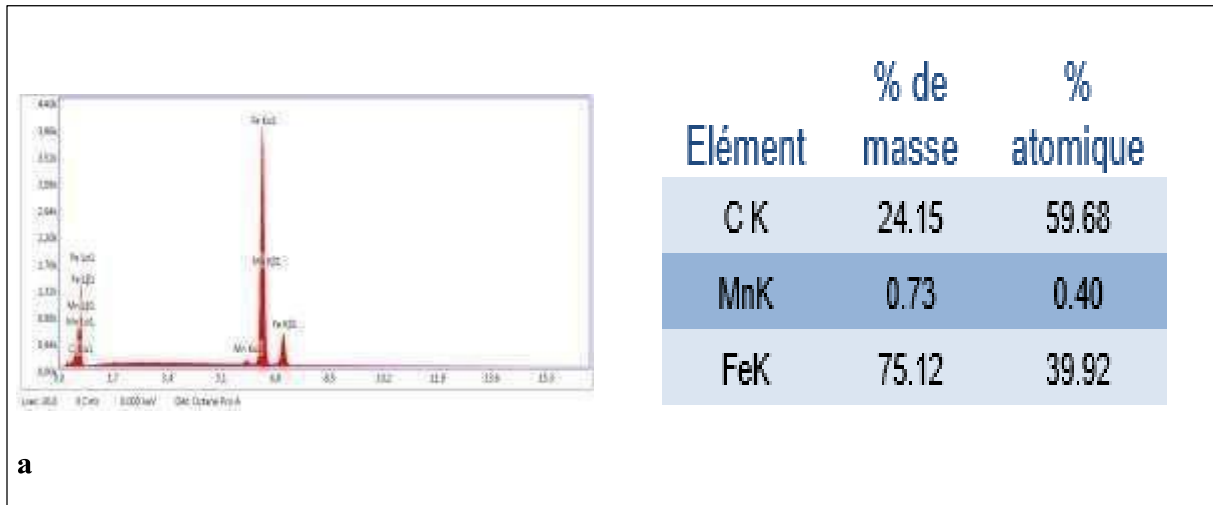
- Les échantillons B500BWR de diamètre 32 mm :



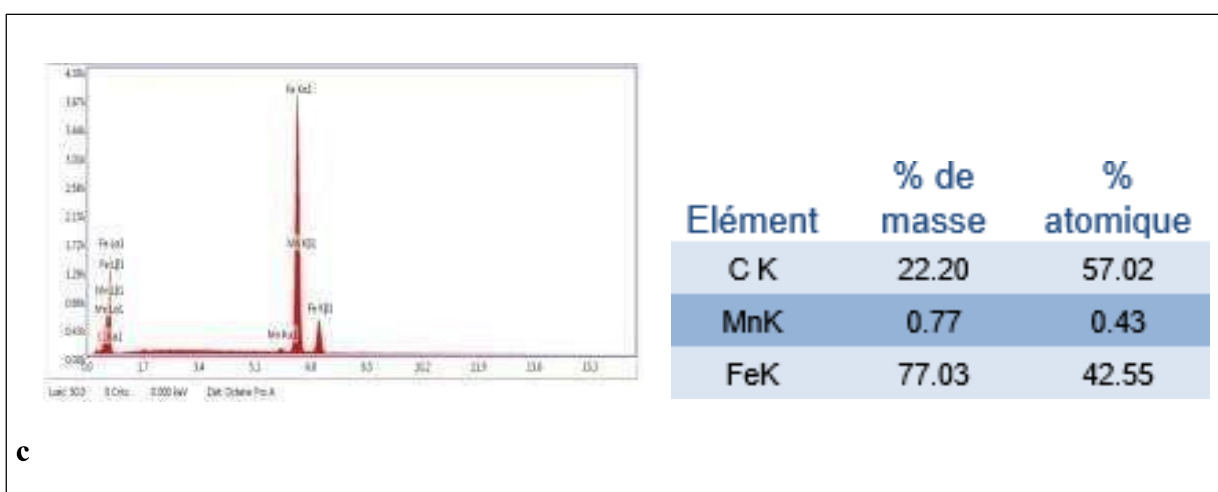
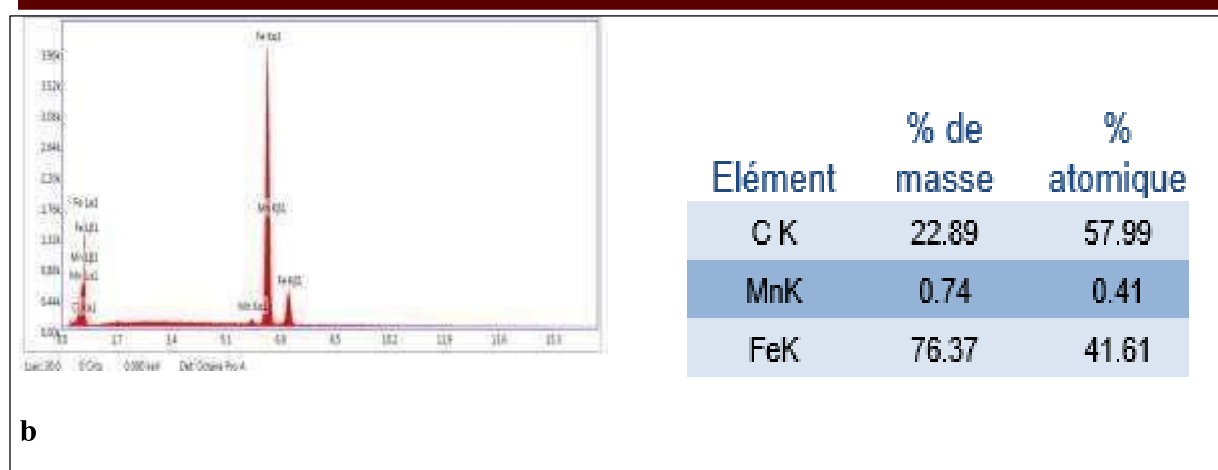
FigII.4. Micrographie (MEB) obtenu pour les échantillons B500BWR:(a) : à l'extrémité de surface ;(b) :la zone intermédiaire ;(c) :au cœur.

A.2.2. Les Analyses EDX :

- L'acier B500B de diamètre 25 mm :

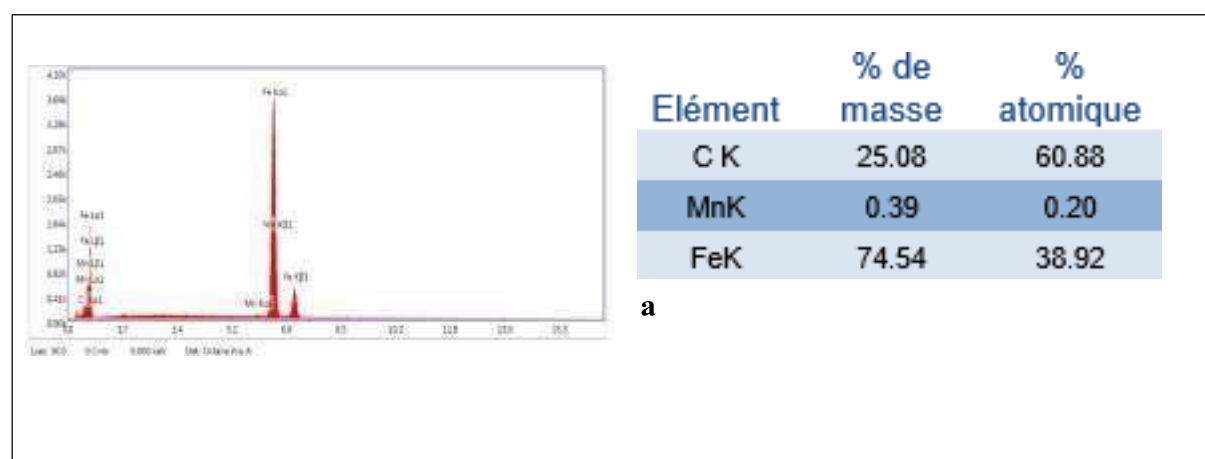


Annexes

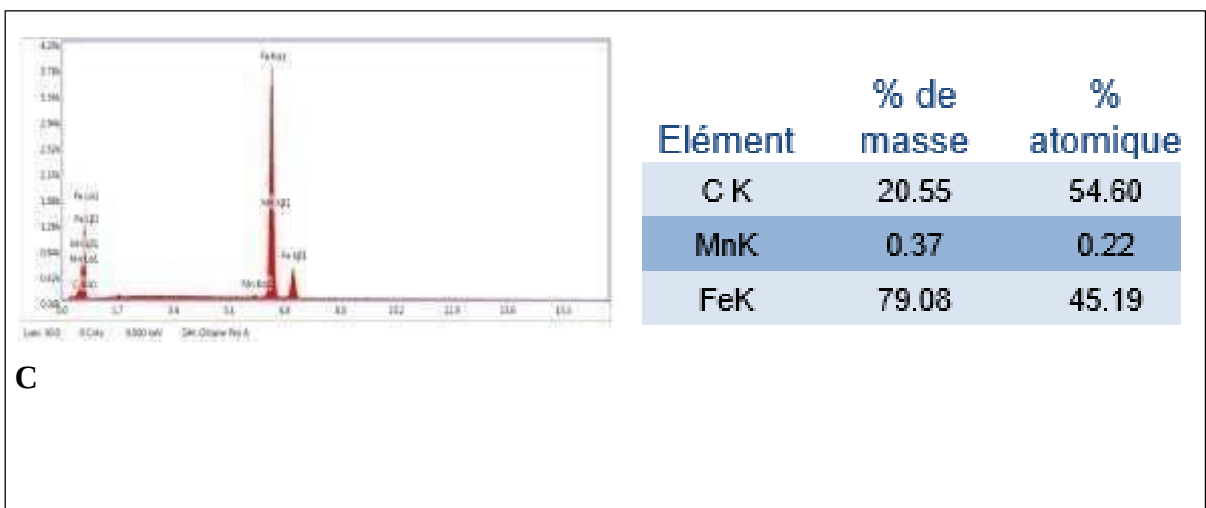
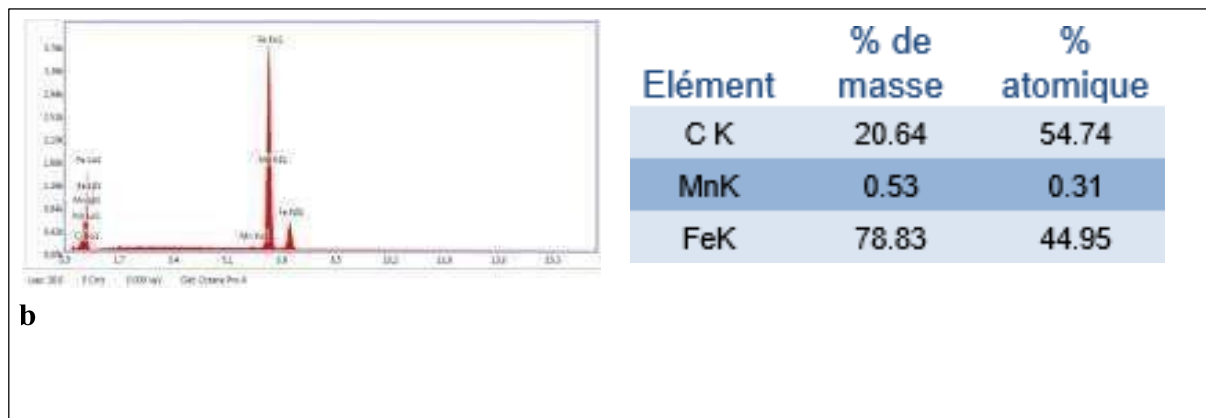


FigII.5. Analyse EDX de B500B : a) à l'extrémité de surface ; b) la 2ème zone d'extrémité de surface; c) au cœur

- L'acier B500BWR de diamètre 25 mm :



Annexes



FigII.6. Analyse EDX de B500BWR : a) à l'extrémité de surface ;b) la 2ème zone d'extrémité de surface;(c) au cœur

Les analyses EDX (Spectroscopie à Dispersion d'Énergie) réalisée sur des échantillons d'acier B500B et B500BWR, d'un diamètre de 25 mm montrent une légère variation de la composition chimique entre la surface et le cœur des échantillons, surtout dans le cas de l'acier B500B. Des teneurs en carbone (C), relativement élevées ont été relevées, particulièrement en surface, ce qui peut influencer significativement la dureté du matériau. De plus, le fer (Fe) est présent dans les deux types d'acier, avec une distribution plutôt uniforme. L'omniprésence du manganèse dans ces phases à forte teneur en carbone indique que celui-ci est incorporé dans la structure des carbures, créant des carbures complexes tels que $(Fe,Mn)_3C$ ou d'autres carbures alliés.

Annexes

- L'acier B500B de diamètre 32 mm:

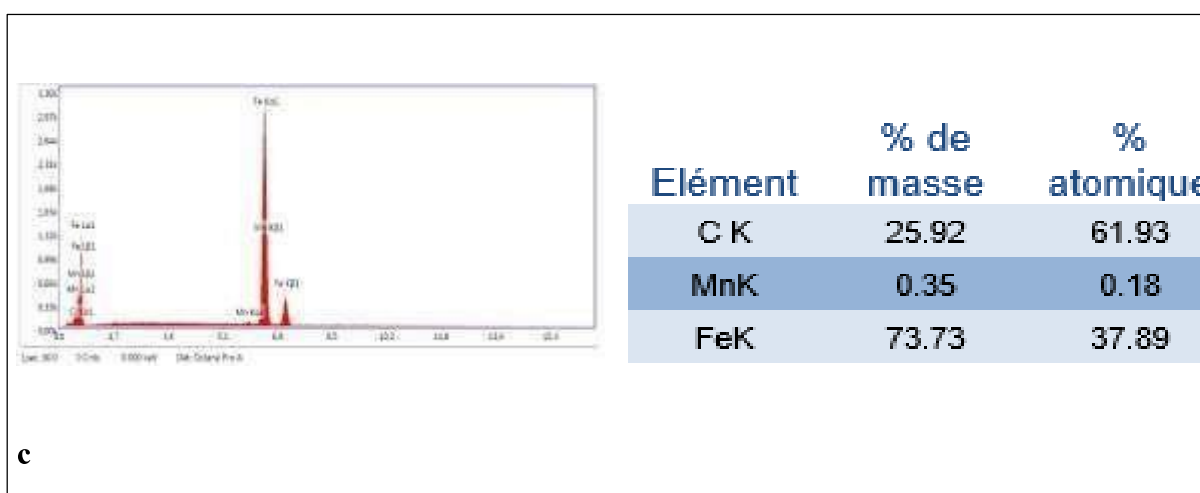
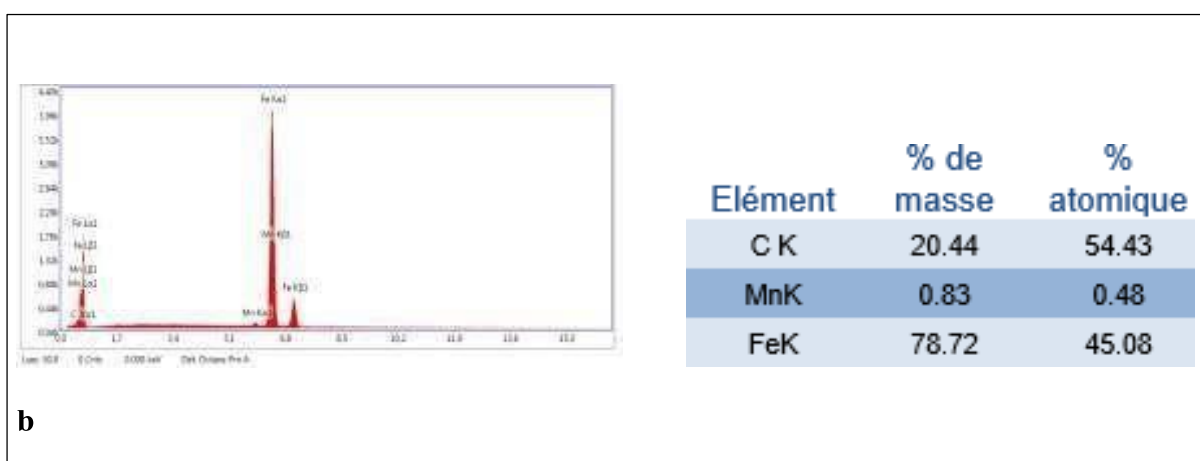
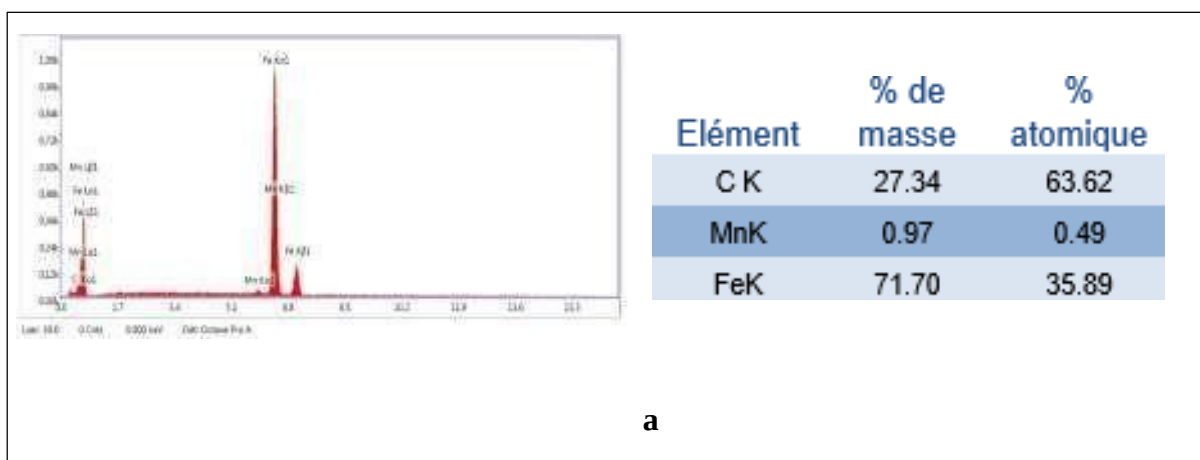


Fig II.7. Analyse EDX de B500B : a) à l'extrémité de surface ; b) la 2ème zone d'extrémité de surface;(c) au cœur

Annexes

- L'acier B500BWR de diamètre 32 mm :

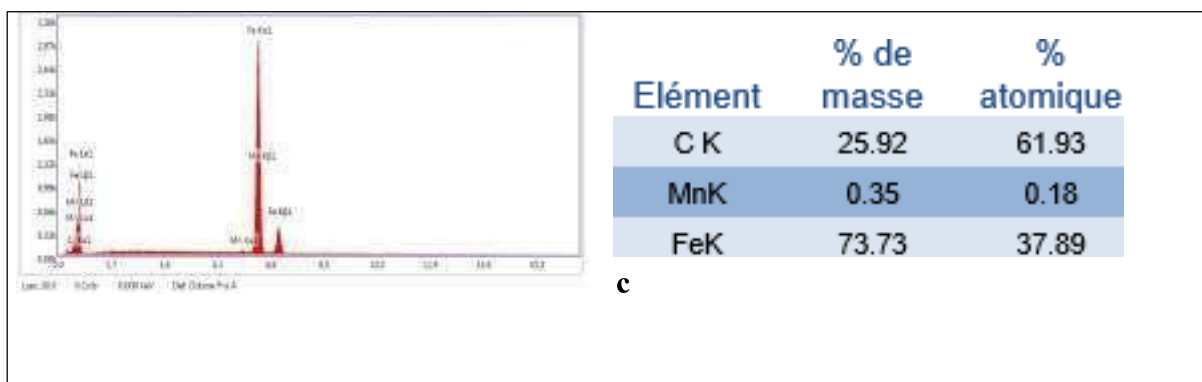
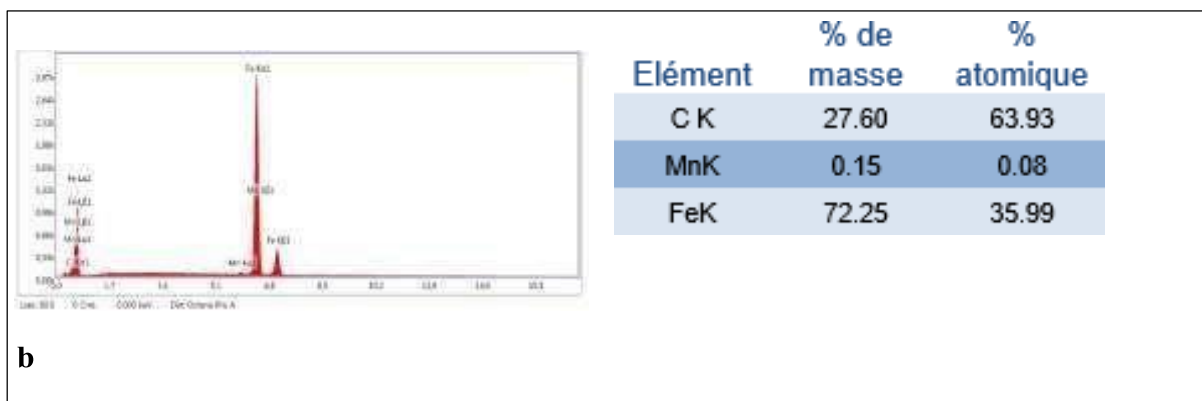
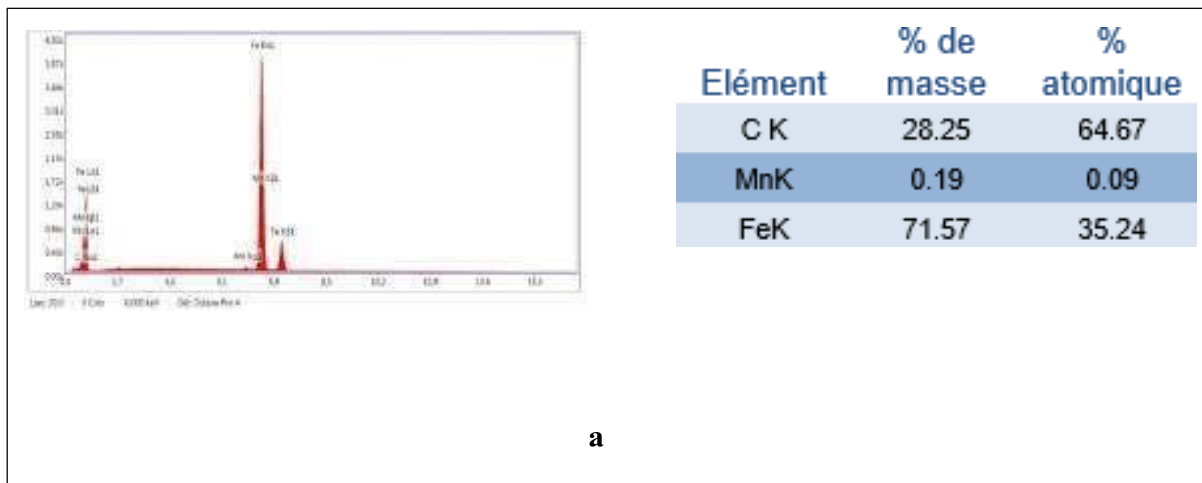


Fig II. 8. Analyse EDX de B500B : a) à l'extrémité de surface ; b) la 2ème zone d'extrémité de surface; (c) au cœur

Les analyses par spectrométrie à dispersion d'énergie (EDX) montrent une différence de la composition chimique entre la surface et le milieu de l'échantillon. Pour l'acier B500B, on constate que la teneur en manganèse (Mn) est plus élevée sur la partie extérieure, puis elle baisse en allant vers le centre. Cet enrichissement superficiel en manganèse, contribue à améliorer les propriétés mécaniques de surface, telles que la résistance et la durabilité. On observe également une forte concentration de carbone (C) en surface, qui pourrait résulter de

Annexes

la création de phases carbures ou du déplacement du carbone par diffusion. Le fer (Fe) reste l'élément dominant et présente une distribution assez uniforme dans les zones étudiées.

En revanche, l'acier B500BWR présente une composition plus stable entre la surface et le milieu avec des teneurs faibles en manganèse. Les teneurs en carbone sont presque les mêmes. Tandis que la proportion de fer reste élevée et ne montre pas de fluctuations majeures.