

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ CHADLI BENDJEDID



- EL TARF جامعة الشاذلي بن جديد-الطارف

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

MÉMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCE DE LA MATIÈRE

FILIÈRE : Physique

SPECIALITE : Physique des Matériaux

Thème

**Etude comparative des propriétés mécaniques de
nuances d'aciers de construction**

Présenté par :

BENAMMAR Djenet Sondra

Dirigé par :

Dr. REDOUANI Locif

Jury de soutenance :

Dr. ADJIMI Samah	Présidente	MCA	Université El Tarf
Dr. REDOUANI Locif	Rapporteur	MCA	Université El Tarf
Dr. LAMROUS Douniazed	Examinatrice	MCB	Université El Tarf

Année Universitaire : 2023/2024



Remerciements

Louange à *ALLAH* le tout puissant pour m'avoir donné la volonté, la santé et la persévérance de mener à terme ce travail de mémoire qui a été réalisé à *SIDER EL-HADJAR* sous la direction du Docteur "**REDOUNI locif**" que je tiens à remercier de m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche et confier le sujet de cette étude et de l'avoir dirigé. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour la confiance qu'il m'a accordée, ses conseils, son soutien et encouragements tout au long de ce travail. Je le remercie pour le temps qu'il m'a consacré et pour les précieuses informations qu'il m'a prodigué avec intérêt et compréhension, sa patience, sa rigueur et ses qualités, ses valeurs humaines et disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Aussi, je remercie les membres du jury, Dr "**ADJMI Samah**" et Dr "**LAMROUS Douniazed**" pour avoir accepté d'examiner et juger mon travail.

Enfin, je voudrais remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, exceptionnellement Mr "**NASSI Farouk**", "**KABOUCHE Abdelkader**" et "**LACHEHAB Abdenour**".





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A mes parents, aucun hommage ne pourra être à la hauteur
de l'amour*

*Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu les protège et
leur accorde bonne santé et*

Long vie.

*A tous ceux que m'ont soutenu tout au long de ce projet,
bien sûr à mes frères*



Remerciements	
Dédicaces	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE	5
CHAPITRE I	2
GÉNÉRALITÉS SUR LES ACIERS	2
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. COMPLEXE SIDERURGIQUE D'EL HADJAR	3
I.2.1. Présentation	3
I.2.2. Mission	4
I.2.3. Histoire	4
I.2.4. Principaux processus d'élaboration des aciers au niveau d'El Hadjar	5
I.3. COMPOSITION DES ACIERS	8
I.3.1. Microstructure des aciers	8
I.3.2. Diagramme d'équilibre Fe-C	10
I.4. CLASSIFICATION DES ACIERS	11
I.4.1. Aciers non-alliés d'usage général	11
I.4.2. Aciers non-alliés spéciaux	12
I.4.3. Aciers faiblement alliés	12
I.4.4. Aciers faiblement alliés	13
I.4.5. Aciers rapides	13
I.5. CARACTERISTIQUES MECANQUES DES ACIERS	14
I.5.1. Module de Young (E)	14
I.5.2. Limite d'élasticité (Re)	14
I.5.3. Résistance à la traction (σ_u)	14
I.5.4. Ductilité	14
I.5.5. Résilience	14
I.5.6. Ténacité	14
I.5.7. Résistance à la fatigue	15
I.5.8. Résistance aux chocs	15
I.5.9. Dureté	15
I.6. CONCLUSION	15
CHAPITRE II	17
ANALYSE CHIMIQUE ET ESSAIS MECANQUES DES ACIERS	Erreur ! Signet non défini.
II.1. INTRODUCTION	18
II.1.1. Spectrométrie par étincelle	18
II.1.2. Principe de fonctionnement	18
II.1.3. Quantification de la composition chimique	19
II.1.4. Transformation de l'énergie lumineuse en signal électrique	20
II.1.5. Étalonnage initial et ajustements continus	20
II.1.6. Utilisation des Matériaux de Référence Certifiés pour la validation	20
II.2. ESSAI DE TRACTION	20
II.2.1. Objectifs de l'essai de traction	21

II.2.2.	Dispositif de traction	21
II.2.3.	Forme et dimensions des éprouvettes	22
II.2.4.	La courbe de traction	23
II.3.	ESSAIS DE DURETE	25
II.3.1.	Dureté Brinell	26
II.3.2.	Dureté Rockwell	27
II.3.3.	Dureté Vickers	29
II.4.	ESSAIS DE RESILIENCE	31
II.4.1.	Principe de l'essai	31
II.4.2.	Echantillons	32
II.4.3.	Exemple	32
II.5.	CONCLUSION	33
	CHAPITRE III	34
	RÉSULTATS ET DISCUSSION	34
III.1.	INTRODUCTION	35
III.2.	PRESENTATION DES NUANCES D'ACIERS ETUDIES	35
III.2.1.	E36-2	35
III.2.2.	E24-2	35
III.2.3.	BN	36
III.3.	ANALYSE CHIMIQUE	36
III.4.	ESSAIS DE TRACTION	37
III.5.	ESSAIS DE DURETE	40
III.6.	ESSAIS DE RESILIENCE	41
III.7.	CONCLUSION	43
	CONCLUSION GENERALE	44
	BIBLIOGRAPHIE	46
	Résumé	

FIG. I.1. UNITE DE PRODUCTION D'ACIER A SIDER EL HADJAR [3].	3
FIG. I.2. INSTALLATIONS DU HAUT FOURNEAU [8].	5
FIG. I.3. PHOTOS DE PARTIES DE L'UNITE ACIERIE A OXYGENE N°1	6
FIG. I.4. PROCESSUS DE PRODUCTION DE L'ACIER A SIDER EL HADJAR SUIVANT L'ACIERIE N°2 [8]	6
FIG. I.5. PROCESSUS DE COULEE CONTINUE [9].	7
FIG. I.6. UNITE DE LAMINAGE A CHAUD.	7
FIG. I.7. TRAITEMENT THERMIQUE DE L'ACIER [10].	8
FIG. I.8. DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CARBONE [10].	10
FIG. II.1. SPECTROMETRE DE LABORATOIRE [13].	18
FIG. II.2. PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA SPECTROMETRIE [14].	19
FIG. II.3. ETALON DE REFERENCE EN SPECTROMETRIE D'EMISSION OPTIQUE.	19
FIG. II.4. DISPOSITIF (MACHINE) DE TRACTION [16]. 18.	21
FIG. II.5. FORMES DES EPROUVETTES DE TRACTION DES ACIERS [20],[21].	22
FIG. II.6. COURBE DE TRACTION[27],[26].	23
FIG. II.7. ESSAI DE DURETE [29].	25
FIG. II.8. ESSAIS DE DURETE BRINELL [30].	26
FIG. II.9. ESSAIS DE ROCKWELL [31].	28
FIG. II.10. ESSAIS DE VIKERS.	30
FIG. II.11. MOUTON PENDULE (ESSAIS DE RESILIENCE) [32].	31
FIG. II.12. EPROUVETTES CHARPY V ET U [32].	32
FIG. III. 1. PIPE-LINE EN E36-2 ELABORES PAR SIDER EL HADJAR.	35
FIG. III. 2. APPLICATIONS DE L'ACIER E24-2.	36
FIG. III. 1. APPLICATIONS DE L'ACIER BN.	36
FIG. III. 1. MACHINE DE TRACTION WOLPERT (SIDER EL HADJAR).	37
FIG. III. 1. COURBE DE TRACTION DE LA NUANCE E36-2	38
FIG. III. 1. COURBE DE TRACTION DE LA NUANCE E24-2	38
FIG. III. 1. COURBE DE TRACTION DE LA NUANCE BN.	39
FIG. III. 1. DUROMETRE UNIVERSEL WOLPERT.	40
FIG. III. 1. ECHANTILLONS SOUMIS A L'ESSAI DE DURETE.	41
FIG. III. 1. PREPARATION DES EPROUVETTES DESTINEES A L'ESSAI DE RESILIENCE.	41
FIG. III. 1. DISPOSITIF DE REFROIDISSEMENT DES EPROUVETTES « CROIS_THERMOSTA ».	42
FIG. III. 12. MACHINE DE RESILIENCE (MOUTON-PENDULE).	42
FIG. III. 13. EPROUVETTES APRES L'ESSAI DE RESILIENCE.	43

TAB. I.1. CORRESPONDANCE DES NORMES DES ACIERS DE CONSTRUCTION METALLIQUE LAMINES A CHAUD [12].	12
TAB. I.2. PRINCIPALES NUANCES DES ACIERS SELON LEUR EMPLOI [11].	13
TAB. II.1. NORMES DES EPROUVETTES DE TRACTION [24] ET [25].	23
TAB. II.2. EXEMPLES DE RESULTATS DE L'ESSAI DE DURETE BRINELL.	27
TAB. II.3. COMPARAISON ENTRE LES METHODES DE DURETE.	30
TAB. II.4. EXEMPLE DE CALCUL DE LA RESILIENCE.	32
TAB. III.1. RESULTATS DE L'ANALYSE CHIMIQUE DES ACIERS ETUDIES COMPARES AUX NORMES.	37
TAB. III.2. DIMENSIONS DES EPROUVETTES DE TRACTION DES ACIERS.	38
TAB. III.3. CARACTERISTIQUES MECANQUES OBTENUES PAR LES ESSAIS DE TRACTION.	39
TAB. III.4. RESULTATS DE L'ESSAI DE DURETE.	41
TAB. III.5. RESULTATS DE L'ESSAI DE RESILIENCE.	43

INTRODUCTION GENERALE

Les aciers sont des matériaux fondamentaux dans l'industrie de la construction mécanique en raison de leur combinaison unique de résistance mécanique, de durabilité et de polyvalence. Cependant, la diversité des aciers disponibles, chacun avec des compositions chimiques et des propriétés mécaniques distinctes, soulève des questions cruciales quant au choix optimal pour des applications spécifiques.

Ce travail fait état d'une étude comparative entre trois types d'aciers différents destinés à la construction mécanique, soient E24-2, E36-2 et BN, élaborés par le Complexe Sidérurgique de Annaba (Sider El Hadjar). Cette comparaison se base sur des tests habituels permettant d'analyser les propriétés des matériaux industriels et la vérification de la conformité des produits sidérurgiques. Parmi ces tests, l'analyse chimique réalisée par la technique de spectrométrie optique ainsi que des essais mécaniques tels que la traction, la dureté et la résilience.

Ce mémoire se compose de trois chapitres distincts. Le premier fait état d'une revue bibliographique qui rassemble un certain nombre d'informations sur les aciers, tels que leurs caractéristiques structurales et mécaniques, classification, applications, etc.

Dans le deuxième chapitre, il y a lieu de présenter les différents tests mécaniques utilisés dans la caractérisation des aciers étudiés. Un inventaire théorique plus au moins détaillé est ainsi établi.

Le dernier chapitre est destiné à l'exposition des différents résultats expérimentaux ainsi que leur discussion. Enfin, ce manuscrit se termine par une conclusion générale qui récapitule le travail réalisé et les perspectives éventuelles.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES ACIERS

I.1. INTRODUCTION

L'acier est un alliage métallique principalement composé de fer et de carbone, avec éventuellement d'autres éléments d'alliage ajoutés en quantités contrôlées. C'est l'un des matériaux les plus utilisés dans le monde en raison de ses excellentes propriétés mécaniques, sa polyvalence et sa facilité de fabrication [1].

D'ailleurs, on le trouve par tout, commençant par la simple aiguille à coudre jusqu'aux navires gigantesques et des multitudes de pièces dans l'aéronautique et vaisseaux spatiaux.

Ce chapitre s'engage dans une analyse méthodique des processus d'élaboration et de fabrication des aciers, débutant par une présentation plus au moins détaillée du Complexe Sidérurgique d'El-Hadjar, l'acteur majeur en Algérie dans la production de l'acier.

I.2. COMPLEXE SIDERURGIQUE D'EL HADJAR

I.2.1. Présentation

SIDER EL HADJAR, un complexe sidérurgique intégré faisant partie du Groupe Public IMETAL et relevant du Ministère de l'Industrie et des Mines, est stratégiquement situé à 12km de la Wilaya d'Annaba. Il occupe une superficie de 832 hectares répartis comme suit [2]:

- 300 hectares dédiés aux ateliers de production,
- 300 hectares réservés au stockage des matières premières et des produits sidérurgiques,
- et plus de 200 hectares pour les structures de services.



Fig.I.1. Unité de production d'acier à Sider El Hadjar [3].

Le site bénéficie également d'installations maritimes et d'un réseau ferroviaire pour le transport des matières premières et des produits finis. En outre, SIDER EL HADJAR dispose d'un réseau commercial étendu avec plusieurs points de vente à travers le pays.

Pour répondre à ses besoins énergétiques et en fluides, le complexe est équipé de trois centrales thermiques, quatre centrales à oxygène et trois usines à eau. Fondée le 3 septembre 1964, l'entreprise bénéficie ainsi d'une infrastructure solide et diversifiée pour assurer ses opérations.

I.2.2. Mission

La mission principale du Complexe Sidérurgique d'El-Hadjar est la fabrication et la commercialisation de produits sidérurgiques finis et semi-finis destinés tant au marché national qu'international. Sa capacité de production actuelle atteint 800.000 tonnes de produits ferreux plats et longs, de rond à béton et de tubes [4].

I.2.3. Histoire

L'histoire du complexe sidérurgique d'El Hadjar remonte au plan de Constantine de 1958, qui prévoyait la création d'un important pôle sidérurgique à Annaba. À cette époque, la Société Bônoise de Sidérurgie (SBS) était chargée de construire un haut-fourneau et ses annexes, mais le projet n'a pas abouti. La Société nationale de sidérurgie (SNS) a ensuite été créée le 3 septembre 1964 pour construire le Complexe sidérurgique d'El Hadjar, inauguré le 19 juin 1969.

Au fil des décennies, le complexe a subi plusieurs transformations et restructurations. En 1983, avec la restructuration de l'industrie algérienne, l'entreprise nationale Sider a été créée, puis transformée en Groupe Sider en 1995, devenant une Entreprise publique économique (EPE/SPA) en 1999, avec un plan de redressement [5].

En janvier 2001, un partenariat entre LNM (Inde) et Sider (Algérie) a donné naissance à Ispat Annaba, en cette même année, le complexe d'El Hadjar a été cédé à Mittal, détenant 70% des parts, tandis que l'État algérien via Sider détenait les 30% restants. Cependant, en 2013, confronté à des difficultés financières et opérationnelles, le gouvernement a décidé de reprendre le contrôle du complexe [6].

Cette période a été marquée par d'importants investissements pour moderniser le complexe et accroître sa capacité de production. Malgré ces efforts, la production d'acier a

diminué au fil des années, ce qui a entraîné des pertes financières importantes, malgré une demande croissante sur le marché algérien [7].

I.2.4. Principaux processus d'élaboration des aciers au niveau d'El Hadjar

L'élaboration des aciers au niveau du complexe d'El-Hadjar est un processus complexe et sophistiqué qui comprend plusieurs étapes cruciales telles que définies ci-après.

a. *Extraction et préparation des matières premières*

La fonte (qui sera transformée par la suite en acier) est principalement produit à partir de minerai de fer extrait des mines, du charbon converti en coke pour fournir du carbone et du combustible, et du calcaire utilisé comme fondant pour éliminer les impuretés du minerai de fer. Le minerai de fer subit un processus de broyage et d'enrichissement visant à augmenter sa concentration en fer, tandis que le charbon est transformé en coke à travers des fours (hauts fourneaux HF) dédiés à cette conversion. La fonte est ensuite transférée aux convertisseurs (dans les unités aciérie) pour la transformer en acier.

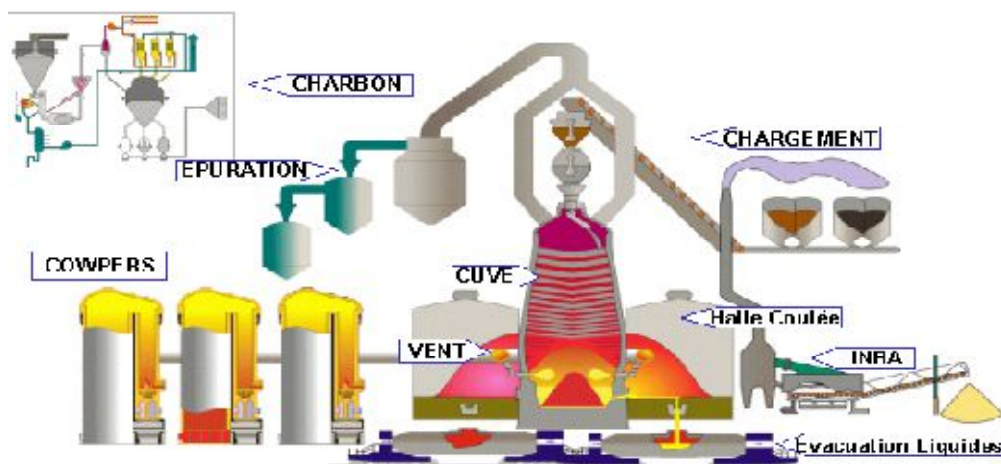


Fig.I.2. Installations du haut fourneau [8].

b. *Transformation de la fonte en acier*

Sider El Hadjar dispose de deux aciéries à oxygène

- *Aciérie à oxygène n°1*

Cette aciérie transforme la fonte liquide en acier à l'aide d'oxygène. L'acier liquide est solidifié sous forme de produits appelés "brames". Les brames sont ensuite laminées en bobines au niveau du laminoir à froid pour obtenir des tôles fines et des bobines galvanisées.



Processus de laminage à froid

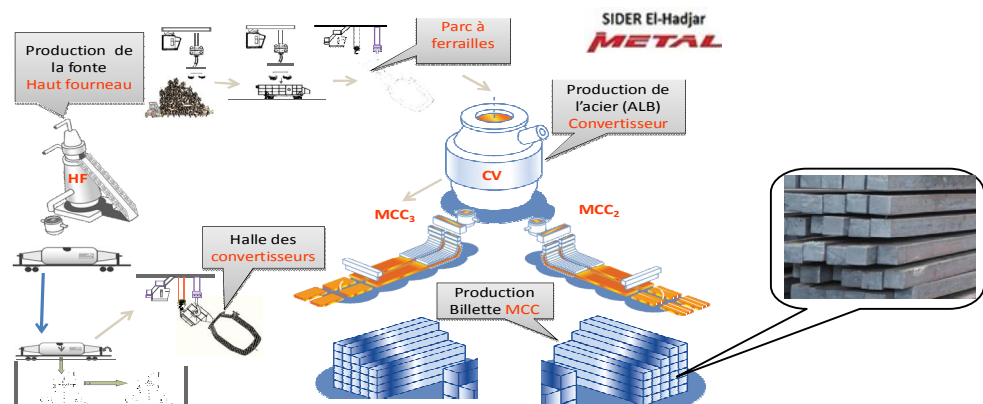


Parc à brames

Fig.I.3. Photos de parties de l'unité Acierie à oxygène n°1.

- *Acierie à oxygène n°2*

Cette aciérie transforme également la fonte liquide en acier à l'aide d'oxygène. L'acier liquide est solidifié sous forme de produits appelés "billettes". Les billettes (Produits semi-finis de section carrée 130x130mm² et de longueur de 12m) sont laminées au niveau du laminoir rond à béton pour produire des barres d'acier pour le renforcement du béton armé.

**Fig.I.4.** Processus de production de l'acier à Sider El Hadjar suivant l'aciérie n°2 [8].

c. Affinage et traitement de l'acier liquide

L'acier liquide peut être soumis à des traitements supplémentaires visant à ajuster sa composition chimique, éliminer les gaz dissous et améliorer ses propriétés, tandis que l'incorporation d'additifs tels que le manganèse, le nickel, le chrome, etc., permet d'obtenir des aciers alliés présentant des propriétés spécifiques.

- *Coulée de l'acier*

Le processus de coulée continue est utilisé, où l'acier liquide est versé de manière ininterrompue pour produire des brames (plaques), des blooms (lingots) ou des billettes (barres), qui seront ultérieurement transformés en produits finis. En outre, il existe la méthode de coulée en lingots, moins fréquente, où l'acier est versé dans des moules pour former des lingots.



Fig.I.5. Processus de coulée continue [9].

- *Laminage et mise en forme de l'acier*

Les produits semi-finis subissent un processus de chauffage et de laminage afin de produire des plaques, des feuilles, des barres, des poutres, des fils et autres produits. Ce processus comprend à la fois le laminage à chaud, réalisé à des températures élevées, et le laminage à froid, effectué à température ambiante pour obtenir des tolérances dimensionnelles plus précises et des propriétés de surface améliorées.

Le laminage à chaud est l'étape la plus importante dans le processus de transformation de l'acier. Il comprend plusieurs secteurs tels que le parc à brames, l'atelier de rectification des cylindres, le secteur fluide, le train à chaud, et le dépôt.



Fig.I.6. Unité de laminage à chaud.

- *Traitement thermique et finition*

Les produits en acier peuvent être soumis à des traitements thermiques tels que la trempe, le revenu et le recuit afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques, et peuvent également être revêtus, galvanisés, peints ou recouverts pour les protéger contre la corrosion.

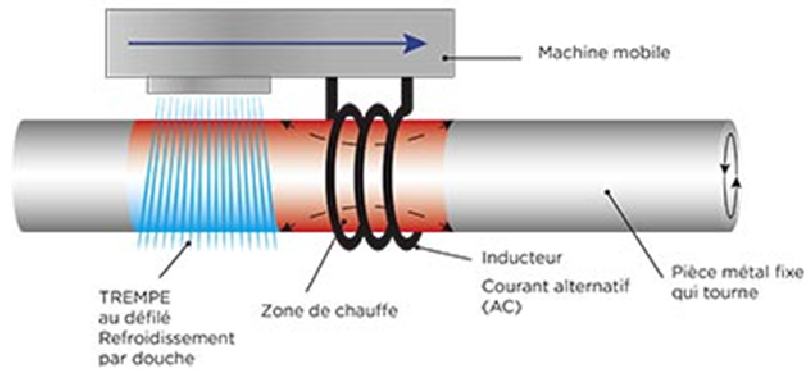


Fig.I.7. Traitement thermique de l'acier [10].

- *Contrôle de qualité*

Les produits finis ou semi-finis à Sider El-Hadjar sont soumis systématiquement à des contrôles de qualité. Mais également tout au long de la chaîne de production, plusieurs processus rigoureux de contrôle sont assurés afin de garantir la qualité des produits en acier.

I.3. COMPOSITION DES ACIERS

I.3.1. Microstructure des aciers

La microstructure de l'acier fait référence à l'arrangement et à la distribution des phases et des constituants à l'échelle microscopique. Elle est influencée par divers facteurs, notamment la composition chimique de l'acier, les conditions de traitement thermique et de refroidissement, ainsi que les contraintes mécaniques subies par l'acier pendant sa fabrication.

Dans ce qui suit, les principales phases et composants qui constituent les microstructures que l'on peut rencontrer dans les aciers.

a. Ferrite

La ferrite est une phase cristalline du fer qui peut contenir du carbone en solution solide. Elle est généralement douce, ductile et magnétique à température ordinaire. La ferrite peut exister sous différentes formes, notamment la ferrite α et la ferrite δ , en fonction de la température et de la teneur en carbone.

b. Austénite

L'austénite est une autre phase cristalline du fer qui peut contenir du carbone en solution solide. Elle est stable à haute température et présente une structure cubique à faces centrées. L'austénite est relativement malléable et peut exister dans un état métastable à température ambiante.

c. Cémentite

La cémentite est un composé chimiquement défini (Fe_3C) composé de fer et de carbone. Elle se présente généralement sous forme de lamelles ou de globules et est très dure mais fragile.

d. Perlite

La perlite est une microstructure formée lors du refroidissement et de la décomposition de l'austénite. Elle se compose de grains de cémentite sphéroïdaux noyés dans une matrice de ferrite. La perlite est dure et relativement ductile.

e. Martensite

La martensite est une phase cristalline de l'acier qui se forme lors d'un refroidissement rapide depuis la température d'austénitisation. Elle présente une structure très fine et une grande dureté mais est également très fragile.

f. Bainite

La bainite est une microstructure formée lors d'un refroidissement isotherme à des températures intermédiaires. Elle se compose généralement de plaquettes de ferrite contenant des carbures dispersés dans la matrice.

I.3.2. Diagramme d'équilibre Fe-C

Un diagramme d'équilibre de phases (ou, en plus court, diagramme de phases) est un diagramme qui permet de représenter la constitution d'un mélange de corps purs à l'équilibre, en fonction de sa composition globale et de sa température. Pour les aciers, le diagramme fer-carbone (Fig. I.8) constitue un outil fondamental en métallurgie pour comprendre les transformations de phases en fonction de la température et de la teneur en carbone.

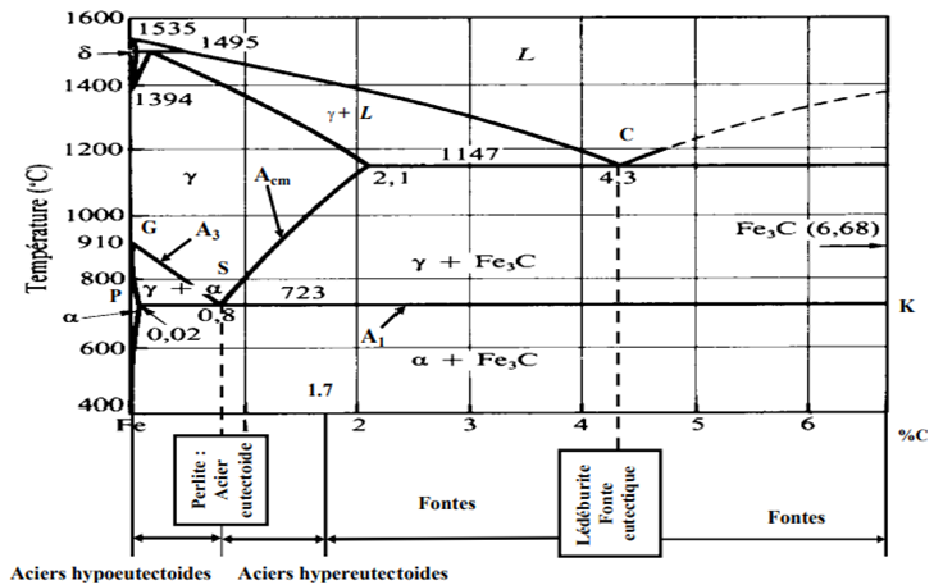


Fig.I.8. Diagramme d'équilibre Fer-Carbonate [10].

Ce diagramme fournit un certain nombre d'informations relatives aux transformations de phases qui se produisent lors du refroidissement lent selon la température en fonction de la teneur en carbone. Ci-dessous quelques des informations fournies

a. Points caractéristiques

- Point eutectique (C) Formation de la lédéburite à 1147°C avec 4.3 %C
- Point eutectoïde (S) Formation de la perlite à 723°C avec 0.8 %C
- A₁ Point de transformation de la perlite (ligne PK)
- A₃ Point de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ (ligne GS)

b. Constituants réactifs

- Ferrite (α)
- Austénite (γ)
- Perlite Formée à 723°C avec 0.8%C

- Lédéburite Formée à 1147°C avec 4.3 %C
- Cémentite (Fe₃C) Formée à 6.68%C

c. Réactions eutectiques et eutectoïdes

- Réactions eutectiques Liquide $\leftrightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$
Exemple À 1147°C et 4.3 %C (point C)
- Réactions eutectoïdes Toutes les phases sont solides
Exemple À 723°C et 0.8 %C (point S) $\gamma \leftrightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (« Perlite »)

I.4. CLASSIFICATION DES ACIERS

La classification des nuances d'acier dans la norme européenne est principalement définie par la norme EN 10027. Selon cette dernière, les aciers ont deux désignations [11] :

- Une désignation symbolique, selon la catégorie à laquelle ils appartiennent, et qui rappelle leurs caractéristiques principales (Quand la lettre G figure en début de la désignation, cela indique qu'il s'agit d'un acier moulé) ;
- Une référence numérique, par exemple, les aciers de construction générale sont en 1.00xx, 1.4xxx, etc.

Selon la norme EN 10027, on distingue 05 principaux types d'acier. Nous allons donner, dans ce qui suit, un aperçu général sur ces types ainsi que leurs usages courants.

I.4.1. Aciers non-alliés d'usage général

Ils sont désignés par une lettre suivis d'un chiffre qui représente la valeur minimale de la limite d'élasticité en *MPa*. On cite entre autres :

- B : fers à béton ;
- D : produits plats pour formage à froid
- S : pour construction ; etc.

Par exemple, S235, S275, S355, etc.

Il faut cependant noter que certaines unités de Sider El Hadjar utilisent l'ancienne désignation de la norme française AFNOR pour ce genre d'acier. Le tableau I.1 fait état d'un récapitulatif des correspondances des désignations selon différentes normes.

LIMITE D'ÉLASTICITÉ + MPa	Désignation selon EN 10025-2 : 2004		Désignation selon EN 10025 : 1990 +A1 : 1993		France NFA 35-501	Allemagne DIN 17100
	Symbolique	Numérique	Symbolique	Numérique		
	NF EN 10025 NF EN 10027-1	NF EN 10025 NF EN 10027-2	NF EN 10025 NF EN 10027-1	NF EN 10025 NF EN 10027-2		
185	S185	1.0035	S185	1.0035	A33	St33
235	-	-	S235JR	1.0037	E24-2	St37-2
	-	-	S235JRG1	1.0036	-	USt37-2
	S235JR	1.0038	S235JRG2	1.0038	-	RSt37-2
	S235J0	1.0114	S235J0	1.0114	E24-3	St37-3U
	S235J2+N	1.0117+N	S235J2G3	1.0116	E24-4	St37-3N
	S235J2	1.0117	S235J2G4	1.0117	-	-
275	S275JR	1.0044	S275JR	1.0044	E28-2	St44-2
	S275J0	1.0143	S275J0	1.0143	E28-3	St44-3U
	S275J2+N	1.0145+N	S275J2G3	1.0144	E28-4	St44-3N
	S275J2	1.0145	S275J2G4	1.0145	-	-
355	S355JR	1.0045	S355JR	1.0045	E36-2	-
	S355J0	1.0553	S355J0	1.0553	E36-3	St52-3U
	S355J2+N	1.0577+N	S355J2G3	1.0570	-	St52-3N
	S355J2	1.0577	S355J2G4	1.0577	-	-
	S355K2+N	1.0596+N	S355K2G3	1.0595	E36-4	-
	S355K2	1.0596	S355K2G4	1.0596	-	-
295	E295	1.0050	E295	1.0050	A50-2	St50-2
335	E335	1.0060	E335	1.0060	A60-2	St60-2
360	E360	1.0070	E360	1.0070	A70-2	St70-2

Tab. I.1. Correspondance des normes des aciers de construction métallique laminés à chaud [12].

I.4.2. Aciers non-alliés spéciaux

La désignation commence par un C, puis suit le pourcentage massique de carbone multiplié par 100. Par exemple, le C35 est un acier non-allié avec $35/100=0,35\%$ de carbone. On peut ajouter une lettre donnant des précisions :

E contient du soufre pour améliorer l'usinabilité ;

C acier pour formage ;

S acier pour ressort.

Par exemple : C35E.

I.4.3. Aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont la teneur en manganèse est supérieure à 1% ($Mn > 1\%$ et aucun élément n'est supérieur à 5%).

Leur désignation symbolique indique la teneur en carbone, puis la liste des éléments (selon les symboles chimiques standard), par ordre de teneur décroissante, puis les teneurs multipliées par un facteur (puisque ces teneurs sont faibles) ; le facteur dépend de l'élément.

Par exemple, le 36NiCrMo16 (anciennement 35NCD16) contient $36/100=0.36\%$ de carbone, $16/4=4\%$ de nickel, ainsi que des traces de chrome et de molybdène.

I.4.4. Aciers faiblement alliés

Au moins un élément a une teneur supérieure à 5%. Leur désignation symbolique commence par un X, ensuite la teneur en carbone, puis la liste des éléments et les teneurs des éléments principaux.

Par exemple, le X2CrNiMo18-10 est un Acier fortement allié, contenant environ 0,02% de carbone, contenant environ 18% de chrome, et 10% de nickel, contenant également des traces de molybdène (Ce genre d'aciers, dont la teneur en chrome est très élevée, sont des matériaux inoxydables).

I.4.5. Aciers rapides

Désigné par HS (*high speed*), puis suivi des teneurs en % en tungstène, molybdène, vanadium et cobalt. Ils contiennent tous au moins 0,7% de carbone ainsi que 4% de chrome, ces teneurs ne sont donc pas indiquées.

Par exemple, le HS2-9-1-8 contient environ 2% de tungstène, 9% de molybdène, 1% de vanadium et 8% de cobalt (ainsi que 0,7% de carbone et 4% de chrome).

<i>CLASSEMENT DES ACIERS SELON LEUR EMPLOI</i>					
Acier doux	Acier dur	Trempe dans la masse	Formage à froid	Cémentation	Inoxydable
S185	C60	C35E	S185	C22	X4CrMoS18
S235	37Cr4	C40E	S235	16MnCr5	X30Cr13
C22	34CrMo	C45E	S275	20MnCr5	X2CrNi19-11
Acier mi-dur	42CrMo	C55E	S355	15CrNi6	X5CrNi18-10
C30	36NiCrMo16	C60E	Décolletage	17CrNiMo6	X6CrNiMoTi17-12
C35	51CrV4	Trempe superficielle	11SMnPb30	Nitruration	Chocs
C40	Acier extra-dur	C40	11SMn37	31CrMo12	51CrV4
C45	100Cr6	41Cr4	11SMnPb37	41CrAlMo7	Fortes sollicitations
C50		42CrMo4	X2CrMoTiS18-2		36NiCrMo16

Tab. I.2. Principales nuances des aciers selon leur emploi [11].

I.5. CARACTERISTIQUES MECANIKES DES ACIERS

I.5.1. Module de Young (E)

Le module de Young, noté E , est une mesure de la rigidité d'un matériau. Il quantifie la relation entre la contrainte et la déformation dans le domaine élastique. Pour déterminer le module de Young, on effectue un essai de traction.

I.5.2. Limite d'élasticité (R_e)

La limite d'élasticité, notée R_e , est une caractéristique importante des matériaux, notamment en ingénierie et en construction. Elle est déterminée par des essais de traction ou de compression et peut être identifiée sur un diagramme contrainte-déformation.

I.5.3. Résistance à la traction (σ_u)

La résistance à la traction ultime, notée σ_u , est une mesure critique des propriétés mécaniques d'un matériau, indiquant la contrainte maximale qu'il peut supporter avant de se rompre sous une charge de traction. Elle est déterminée à partir d'un essai de traction.

I.5.4. Ductilité

La ductilité d'un matériau, mesurée par l'allongement et la réduction de section après rupture, quantifie sa capacité à se déformer plastiquement avant de se rompre. Elle est déterminée par un essai de traction et est essentielle pour évaluer la performance des matériaux dans des conditions de charge où des déformations plastiques sont attendues.

I.5.5. Résilience

La résilience est une propriété mécanique essentielle qui décrit la capacité d'un matériau à absorber et à restituer de l'énergie élastique, permettant ainsi au matériau de subir des déformations temporaires sans subir de dommages permanents. Elle est mesurée par le module de résilience et joue un rôle crucial dans la performance des matériaux soumis à des contraintes dynamiques.

I.5.6. Ténacité

Mesure la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie jusqu'à la rupture. Elle prend en compte à la fois la résistance et la ductilité du matériau.

I.5.7. Résistance à la fatigue

Capacité d'un matériau à résister à des charges répétitives ou cycliques sans se rompre, même si ces charges sont inférieures à sa limite de résistance à la traction.

I.5.8. Résistance aux chocs

Capacité d'un matériau à absorber l'énergie d'un impact sans se rompre ou se déformer de manière excessive.

I.5.9. Dureté

Résistance d'un matériau à la pénétration ou à la déformation plastique sous l'effet d'une charge statique. Elle est souvent mesurée par des tests de dureté tels que le test de dureté Brinell, Vickers ou Rockwell.

I.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue un certain nombre de concepts liés au processus de fabrication, structure et classification des aciers. Nous allons maintenant nous concentrer sur certaines nuances élaborées par Sider El Hadjar et qui sont destinées à la construction mécanique. Il s'agit des nuances E24, E36 et BN. Le chapitre suivant fera donc l'objet d'une revue théorique des essais mécaniques et des techniques d'analyse chimique qui sont utilisés dans notre travail.

CHAPITRE II

METHODES EXPERIMENTALES

II.1. INTRODUCTION

Le processus de fabrication des aciers au complexe sidérurgique El Hadjar implique des vérifications rigoureuses de la composition chimique et des propriétés mécaniques à chaque étape. L'analyse chimique fait appel à diverses techniques et équipements, en particulier la spectrométrie d'émission optique (OES). Quant aux essais mécaniques, plusieurs techniques spécifiques sont employées, notamment les essais de traction, de dureté et de résilience. Cette section de notre étude se penchera sur la méthode (OES) ainsi que sur ces trois essais mécaniques essentiels, en détaillant leur démarche et leur importance dans la caractérisation des différentes propriétés des aciers.

II.1.1. Spectrométrie par étincelle

La spectrométrie par étincelle, également connue sous le nom de spectrométrie d'émission optique (OES pour *Optical Emission Spectroscopy*), est une technique employée pour déterminer la composition chimique des matériaux métalliques, tels que les aciers. Cette technique utilise différents types de spectromètres, depuis les modèles portatifs jusqu'aux configurations intégrées dans des robots occupant des espaces entiers, ainsi que des dispositifs de laboratoire. Avant l'analyse, l'échantillon métallique doit être soigneusement préparé, souvent par meulage, tournage et polissage, afin d'assurer des résultats précis[13].



Fig. II.1. Spectromètre de laboratoire [13].

II.1.2. Principe de fonctionnement

La spectrométrie par étincelle repose sur la génération d'énergie lumineuse par un échantillon métallique soumis à un courant électrique. Ce courant est produit par un générateur d'arc ou d'étincelle, et l'échantillon, conducteur, est positionné entre une anode en

tungstène et une cathode. L'application de décharges d'étincelles crée un plasma à partir d'argon, entourant les électrodes, et élève la température de l'échantillon à environ 3000°C, provoquant la fusion de sa surface. Le matériau vaporisé, atomisé et ionisé produit des atomes excités dans le plasma, émettant ensuite une lumière caractéristique lorsqu'ils retournent à leur état stable [13].

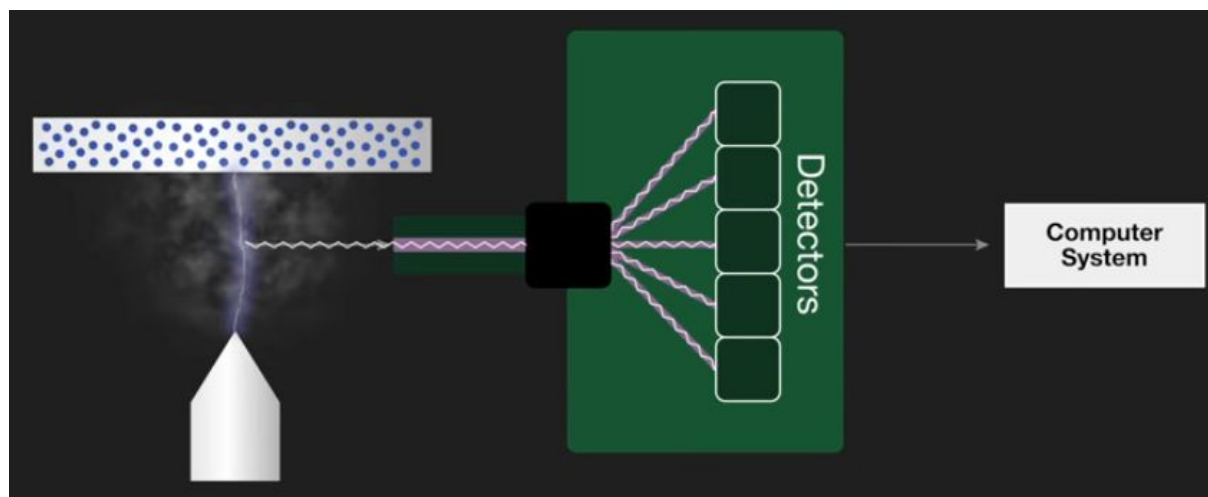


Fig. II.2. Principe fondamental de la spectrométrie [14].

II.1.3. Quantification de la composition chimique

Pour quantifier la composition d'un échantillon, on compare les énergies lumineuses émises par celui-ci à celles d'une série d'échantillons de référence de compositions connues. Ce processus, intégré dans un programme analytique de spectrométrie par étincelle, implique l'acquisition des intensités lumineuses de tous les éléments présents dans les MRC (matériaux de référence certifiés). Ces échantillons sont des alliages certifiés avec des concentrations précisément déterminées et des écarts types connus [13].

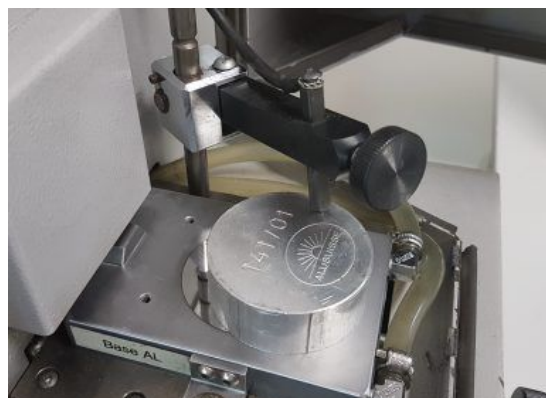


Fig. II.3. Etalon de référence en spectrométrie d'émission optique.

II.1.4. Transformation de l'énergie lumineuse en signal électrique

La lumière polychromatique émise par l'échantillon est captée par un système optique qui la sépare en composantes monochromatiques à l'aide d'un réseau, permettant ainsi la mesure des intensités lumineuses sur les différentes raies spectrales, de l'ultraviolet au visible. Cette lumière est ensuite transformée en signal électrique par des photomultiplicateurs ou des capteurs CCD, en fonction du type de spectromètre utilisé [13].

II.1.5. Étalonnage initial et ajustements continus

Le processus d'étalonnage inclut la sélection des raies spectrales les plus appropriées, la correction des interférences entre les éléments, et la construction des courbes de régression pour établir les limites de quantification. Les logiciels avancés permettent l'utilisation efficace de plusieurs raies pour un même élément, ainsi que l'application de différents degrés de régression selon les segments de courbe [13].

II.1.6. Utilisation des Matériaux de Référence Certifiés pour la validation

Les MRC sont essentiels non seulement pour la calibration initiale des courbes d'analyse, mais aussi pour vérifier la précision et la robustesse du programme analytique. La validation se fait en analysant des échantillons MRC additionnels, qui ne font pas partie des courbes du programme, mais dont les valeurs obtenues sont statistiquement acceptables. Cette étape est cruciale pour assurer la fiabilité des résultats au fil du temps [13].

II.2. ESSAI DE TRACTION

C'est l'essai le plus utilisé pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux. Il permet de tracer une courbe contrainte-déformation, fournissant ainsi des informations précises et précieuses sur le comportement du matériau sous charge [15].

Un phénomène important à noter est l'effet Bauschinger, défini comme un abaissement de limite d'élasticité lors d'un second chargement en sens opposé à un premier, qui se produit lorsqu'un matériau métallique subit une déformation plastique de traction après une déformation plastique de compression, et vice versa. Cet effet dépend du taux de déformation, de la composition chimique du matériau et de son hétérogénéité [17].

II.2.1. Objectifs de l'essai de traction

L'analyse de la courbe de traction et l'observation des comportements élastique et plastique lors d'un essai de traction fournissent des informations précieuses sur les propriétés mécaniques des matériaux, ce qui permet de prendre des décisions éclairées lors de leur utilisation dans diverses applications [18].

II.2.2. Dispositif de traction

a. description de la machine

La machine de traction décrite ici (se trouvant au niveau du Laboratoire Central de Sider El Hadjar) est de marque WOLPERT mais elle a été modifiée par une entreprise associée nommée ZWICK ROELL dans le but de répondre à des besoins spécifiques. Elle est également équipée d'un logiciel dédié pour contrôler les paramètres de test et enregistrer les données. Elle se compose d'un châssis sur lequel se trouve une traverse mobile. Entre cette traverse et la base de la machine se trouve un vérin de traction où est fixé l'éprouvette à tester. Cette éprouvette est maintenue entre des mors.

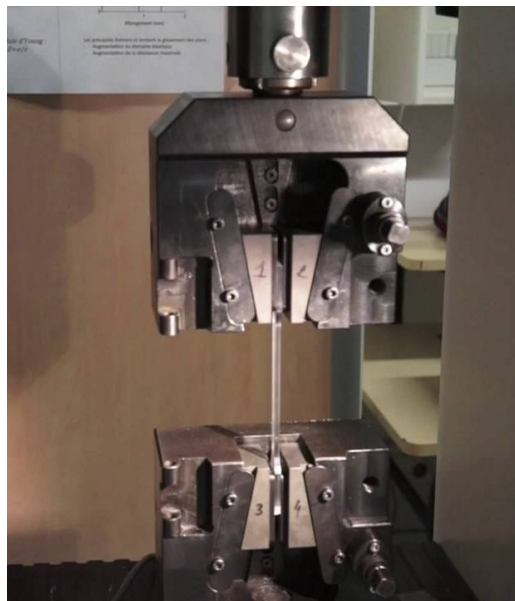


Fig. II.4. Dispositif (machine) de traction [16].

b. Fonctionnement

Lorsque la machine est activée, la traverse mobile se déplace vers le haut, ce qui exerce une force de traction sur l'éprouvette. Cela permet de mesurer la résistance du matériau à cette force.

c. Équipements de mesure

La machine est équipée d'une cellule de charge pour mesurer la force appliquée à l'éprouvette. L'allongement de l'éprouvette peut également être mesuré de différentes manières pour suivre la déformation du matériau pendant le test [19].

d. Contrôle et paramètres

Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis, ce qui signifie qu'ils sont contrôlés par un système de contrôle. Ce système permet de régler des paramètres tels que la vitesse de montée en charge, la charge constante ou la vitesse de déformation constante, en fonction des besoins spécifiques du test et des capacités de la machine.

II.2.3. Forme et dimensions des éprouvettes

Les éprouvettes de traction sont standardisées pour assurer des résultats cohérents et comparables. Les normes les plus courantes pour les essais de traction des aciers sont l'ASTM E8 et l'ISO 6892. Les formes typiques des éprouvettes de traction pour les aciers, conformément à ces normes, sont les suivantes (Fig. II.5) :

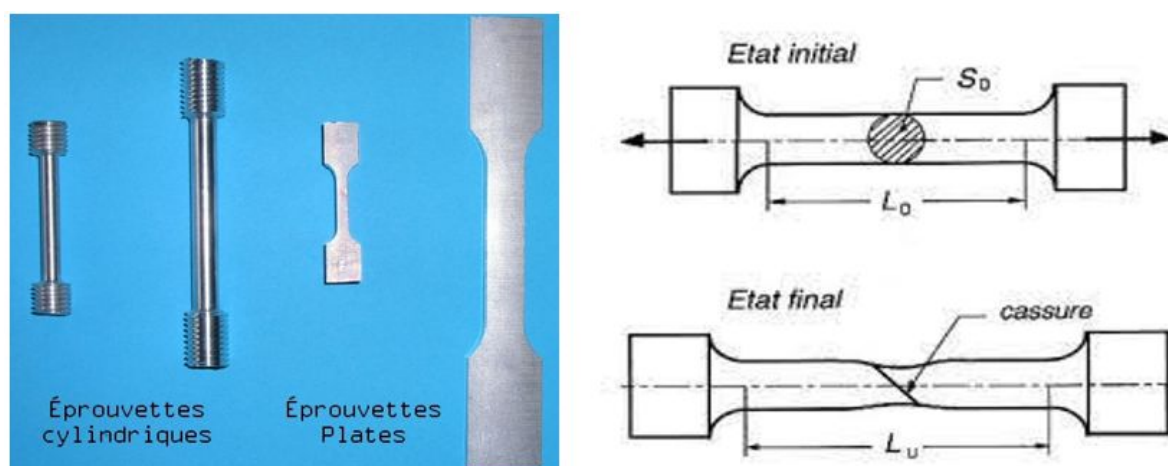


Fig. II.5. Formes des éprouvettes de traction des aciers [20],[21].

Le Tab. II.1 résume les principales dimensions des éprouvettes selon les normes ASTM E8 [22] et ISO 6892,[23] selon les formes cylindriques ou plates des éprouvettes.

Type d'éprouvette	Diamètre (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Longueur de l'éprouvette (mm)	Rayon de transition (mm)
Cylindrique ASTM E8	12,5	-	-	50	12,5
Plate ASTM E8	-	12,5	1,5 - 10	50	12,5
Cylindrique ISO 6892	10 - 12	-	-	50 ou 5d	10 - 15
Plate ISO 6892	-	20	2 - 10	80 ou $5,65\sqrt{S}$	20

Tab. II.1. Normes des éprouvettes de traction [24] et [25].

II.2.4. La courbe de traction

Une courbe de traction, également connue sous le nom de courbe de contrainte-déformation, est un graphique qui représente la relation entre la contrainte (stress) et la déformation (strain) d'un matériau lorsqu'il est soumis à une force de traction. Elle est utilisée pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux, comme la résistance à la traction, la limite d'élasticité, la déformation à la rupture, et le module de Young [26].

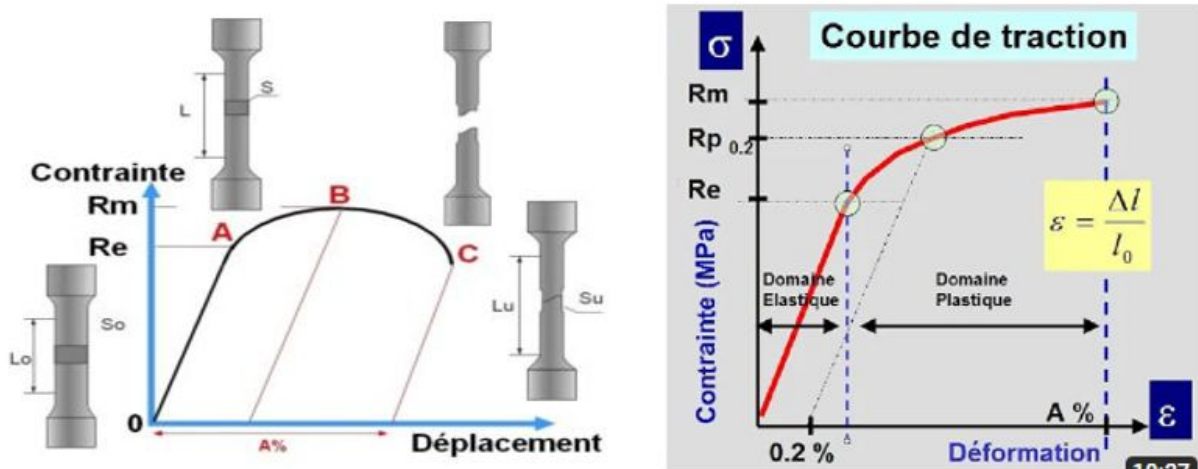


Fig. II.6. Courbe de traction [27],[26].

On interprète la courbe de traction en s'appuyant sur les différentes zones et points distingués sur la figure II.6.

✓ Zone Élastique

- **Point O** : Origine, où la force appliquée commence.

- **Ligne OA** : Déformation élastique, où le matériau revient à sa forme originale après la suppression de la force. La pente de cette section représente le module de Young (E).
 - ✓ **Limite Élastique**
- **Point A** La contrainte maximale dans la zone élastique. Au-delà de ce point, le matériau commence à se déformer plastiquement.
 - ✓ **Zone Plastique**
- **Zone AB** : Déformation plastique, où le matériau ne revient pas à sa forme originale après la suppression de la force. Le matériau commence à céder et se déforme de manière permanente.
 - ✓ **Striction et Rupture**
- **Point B** : Point de striction maximale où le matériau commence à se rétrécir.
- **Point C** : Point de rupture, où le matériau se casse.

Les caractéristiques importantes qu'on puisse déduire de l'essai de traction sont les suivantes :

- ✓ **Module de Young**

Le module de Young (E) est défini par la relation suivante :

$$\delta = E \cdot \varepsilon \quad (\text{II.1})$$

Où δ est la contrainte définie comme la force F appliquée par unité de surface S .

$$\delta = F/S \quad (\text{II.2})$$

ε est la déformation, définie comme le changement relatif de longueur $\Delta L/L_0$ où ΔL est le changement de longueur et L_0 est la longueur initiale.

- ✓ **Limite élastique R_e :**

La limite élastique, souvent symbolisée par R_e ou σ_e , marque le point à partir duquel un matériau cesse de se déformer de manière élastique et commence à se déformer plastiquement de manière permanente lorsqu'il est soumis à une charge.

- ✓ **Limite d'élasticité conventionnelle $R_{p0,2}$**

La limite d'élasticité conventionnelle correspond à 0,2 % de la déformation plastique.

✓ **Résistance à la traction R_m**

Également connue sous le nom de limite de rupture.

✓ **Ductilité :**

La ductilité d'un matériau se mesure par son allongement à la rupture (A%) ou par la striction à la rupture (Z%).

$$A\% = \frac{L-L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (\text{II.3})$$

$$Z\% = \frac{S_0-S}{S_0} \cdot 100 \quad (\text{II.4})$$

Le coefficient de striction (Z) est la variation maximale de l'aire de la section transversale produite par l'essai ($S_0 - S$) exprimée en pourcentage de l'aire de la section initiale (S_0) en déformation plastique sous un effet de traction.

II.3. ESSAIS DE DURETE

Les essais de dureté revêtent une grande importance pour les métallurgistes en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Il existe plusieurs types d'essais de dureté, tels que Brinell, Vickers, Rockwell et d'autres [28].

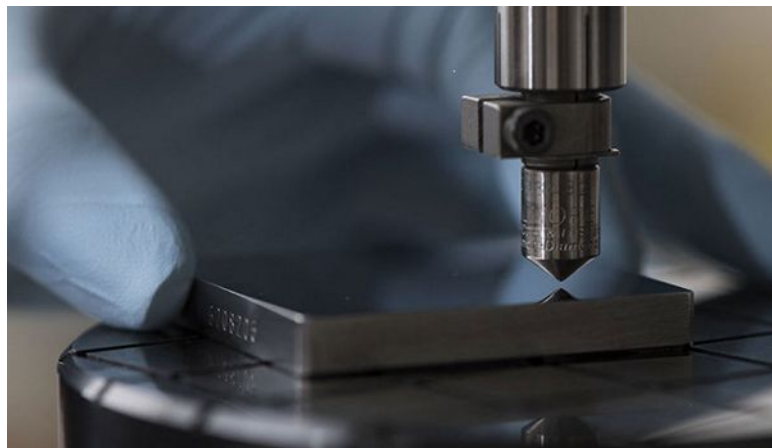


Fig. II.7. Essai de dureté [29].

II.3.1. Dureté Brinell

Sous une force F , un pénétrateur, qui peut être une bille en acier (HBS) ou en carbure de tungstène (HBW), crée une marque de diamètre d dans le matériau soumis au test. Cette méthode est appropriée pour des épaisseurs de plus de 10 mm et pour les surfaces planes. La force F est maintenue pendant 15 secondes.

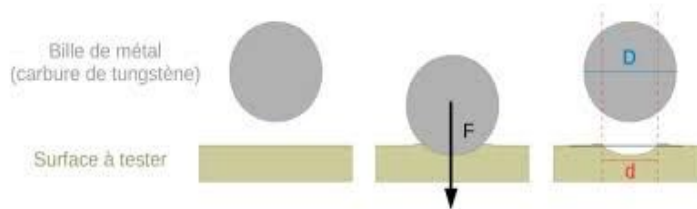


Fig.II.8.Essais de dureté Brinell[30].

La dureté Brinell est calculée selon la formule suivante :

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{II.5})$$

avec $1/g = 1/9,81 = 0,10$ et $d = (d_1 + d_2)/2$.

On définit :

F : La charge d'essai (N)

D : le diamètre de la pénétration en (mm)

F : La charge d'essai en (N)

d : Diamètre de l'empreinte

g : Accélération de la pesanteur

Les échantillons soumis au test doivent présenter une surface plane, polie et parfaitement propre, exempte de tout défaut, lubrifiant ou oxyde. De plus, ils doivent avoir une épaisseur adéquate pour éviter toute déformation due à la pénétration de la bille, avec une épaisseur d'au moins huit fois la profondeur de l'empreinte.

a. Conditions de réalisation de l'essai

- L'essai est généralement effectué à la température ambiante.
- La charge est appliquée de manière progressive, sans perturbations telles que les chocs ou les vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 20 secondes.

- Le diamètre de la bille et la charge sont choisis de manière à éviter toute déformation visible sur la face opposée à celle de l'application.
- La surface doit être préparée pour éviter toute altération, telle que la consolidation ou l'échauffement.
- L'échantillon testé doit reposer sur un support rigide, sinon un porte-échantillon spécifique peut être utilisé (solide, pâteux, etc.).
- L'essai Brinell ne doit être utilisé que pour des matériaux dont la dureté ne dépasse pas 400 (HBS) - 500 (HBW).

b. Procédure opératoire

- Placer le pénétrateur en contact avec la surface du matériau.
- Appliquer la force et la maintenir pendant 10 à 20 secondes.
- Mesurer deux diamètres sur l'empreinte, à 90° l'un de l'autre.
- Utiliser un dispositif grossissant et une règle pour effectuer la mesure.

Diamètre D de la bille (mm)	Charge (daN)			
	$P= 30 D_2$	$P= 10 D_2$	$P= 5 D_2$	$P= 2 D_2$
1	30	10	5	2
2.5	187.5	62.5	31.25	12.5
5	750	250	125	50
10	3000	1000	500	200

Tab. II.2. Exemples de résultats de l'essai de dureté Brinell.

II.3.2. Dureté Rockwell

L'essai de dureté Rockwell implique l'application, en deux étapes, d'un pénétrateur tel qu'un cône ou une bille dans la couche superficielle de la pièce à tester, suivi de la mesure de l'accroissement permanent de la profondeur de pénétration. Cette méthode permet une lecture directe mais n'est pas adaptée aux pièces moulées ou présentant de gros grains.

Il existe plusieurs variantes de l'essai de dureté Rockwell, les plus courantes sont l'essai Rockwell HRC et l'essai Rockwell HRB.

L'essai Rockwell HRC utilise un cône de diamant avec un angle de 120° et un arrondi de 0,2 mm. La charge appliquée est de 1373 N.

L'essai Rockwell HRB utilise une bille en acier trempé d'un diamètre de 1,5875 mm. La charge appliquée est de 883 N.

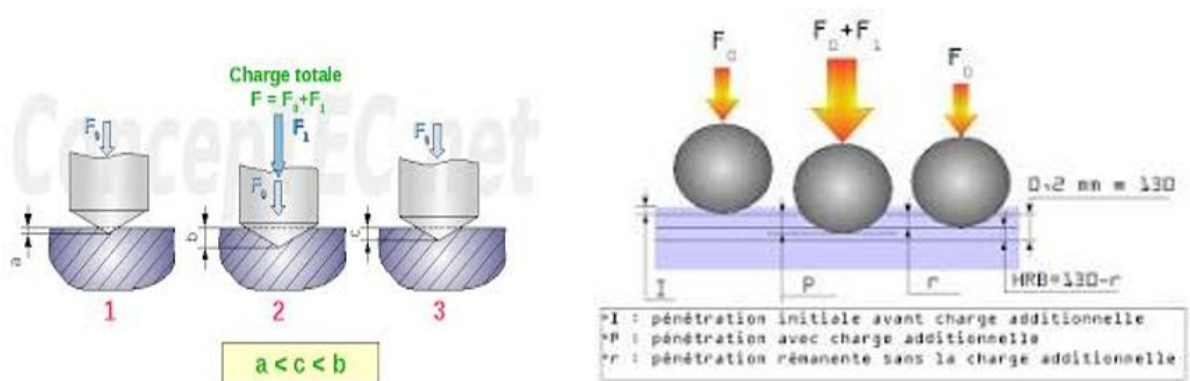


Fig. II.9. Essais de Rockwell [31].

a. Dispositif de Rockwell

Il implique l'application, en deux étapes distinctes, d'un pénétrateur standardisé (soit un cône en diamant, soit une bille en acier trempé polie) dans la couche superficielle de la pièce à tester. On évalue ensuite la pénétration résiduelle du pénétrateur après l'application d'une charge légère.

Ainsi, l'essai de dureté Rockwell se compose de trois phases distinctes.

b. Calcul de dureté

La valeur de dureté est calculée selon les formules suivantes

- Pour HRB $HRB = 130 - r$
- Pour HRC $HRC = 100 - r$

La valeur de r représente l'enfoncement résiduel obtenu après l'application puis le relâchement de la force F_1 .

Chaque unité de dureté Rockwell correspond à une pénétration de 0,002 mm.

c. Conditions d'exécution de l'essai

Le pénétrateur, étant perpendiculaire à la surface à tester, subit une charge initiale de pénétration. Cette charge induit une mesure de la dureté par la pénétration du pénétrateur, qui sert de référence pour la mesure de la dureté.

Ensuite, une surcharge est appliquée progressivement et sans à-coups (pendant 2 à 8 secondes) sur le pénétrateur, ce qui entraîne une augmentation de la pénétration, notée « b ». Après avoir retiré la surcharge pour revenir à la charge initiale, la pénétration est alors égale à « c ».

La variation permanente de la profondeur de pénétration, notée « h », est mesurée, représentant la différence entre la pénétration « c » sous la charge à la fin de l'essai et la pénétration « a » sous la charge initiale. Ainsi, $h = c - a$ (en mm).

La Dureté Rockwell est un nombre dérivé de la valeur de « h » selon la formule suivante :

$$\text{Dureté Rockwell} = E - \frac{h}{S} \quad (\text{II.6})$$

où : E est la valeur correspondant à l'échelle de dureté et $S = 0,002$ Pour les mesures de pièces volumiques et $0,001$ pour les mesures de surfaces.

II.3.3. Dureté Vickers

L'essai de dureté Vickers implique l'impression d'un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée, avec un angle au sommet de 136° , sur la surface de la pièce sous une charge F , suivie de la mesure de la diagonale d de l'empreinte laissée après retrait de la charge.

La valeur d est obtenue en calculant la moyenne des diagonales d_1 et d_2 (voir Fig. I.10). Cette valeur d est utilisée pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également standardisées.

Cet essai, le plus précis, permet de tester des pièces fines. Il est impératif que la surface soit rectifiée ou polie avant l'essai.

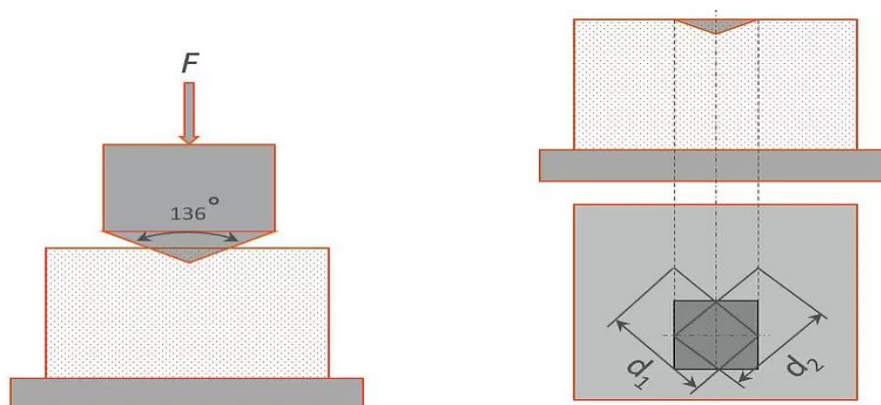


Fig. II.10. Essais de VIKERS.

La dureté Vickers est donnée par la relation suivante :

$$H_V = \text{Cst} \frac{F}{s} \quad (\text{II.6})$$

où "Cst" est une constante dépendant des unités utilisées pour la force et la surface.

Pour la dureté Vickers en fonction de la force (F) et du diamètre de l'empreinte (d), elle s'exprime par :

$$H_V = 0,102 \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad (\text{II.7})$$

Une autre expression plus simplifier de la dureté Vickers en fonction de F et d est donnée par :

$$H_V = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (\text{II.8})$$

avec $d = (d_1 + d_2)/2$. d_1 et d_2 sont les mesures de l'empreinte effectuées à 90 (les deux diagonales du carré de l'empreinte) en millimètres. F est la charge d'essai en Newtons.

II.3.4. Comparaison entre les méthodes de dureté

Une comparaison des différents types d'essais de la dureté est présentée ci-dessous :

Méthode	Type de Pénétrateur	Avantages	Inconvénients	Applications Principales
Brinell	Sphère en acier ou carbure	Simple, bon pour matériaux hétérogènes	Non adapté pour matériaux très durs	Métallurgie
Rockwell	Cône en diamant ou bille acier	Rapide, lecture directe	Moins précis pour couches fines	Métaux, plastiques
Vickers	Pyramide en diamant	Universel, bon pour microstructures	Équipement sophistiqué	Recherche, couches minces

Tab. II.3. Comparaison Entre Les Méthodes De Dureté.

L'essai de dureté est largement considéré comme quasi non destructif par rapport à un essai de traction, ce qui permet son application directe sur des pièces structurales. Il est souvent tentant, notamment pour des pièces ayant subi un traitement thermique, d'estimer la résistance de la pièce traitée à l'aide d'un simple essai de dureté, par exemple sur des têtes d'amarrage d'éprouvettes. Cependant, malgré la disponibilité de nombreuses méthodes de conversion, il est essentiel de faire preuve de prudence quant à la validité de ces conversions, qui ne fournissent qu'une estimation grossière de la résistance à la traction. Pour les matériaux présentant un faible coefficient d'érouissage, on peut approximativement considérer que la dureté Brinell (HB) est environ trois fois la résistance à la traction (R_m).

II.4. ESSAIS DE RESILIENGE

II.4.1. Principe de l'essai

L'essai de résilience (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture. La résilience est définie par la lettre K (Joules/cm²). L'essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. On mesure la résistance au choc du matériau. Normes en vigueur (06/2020), NF EN ISO 148-1 Mars 2017 et NF EN ISO 9016 Janvier 2013[32].

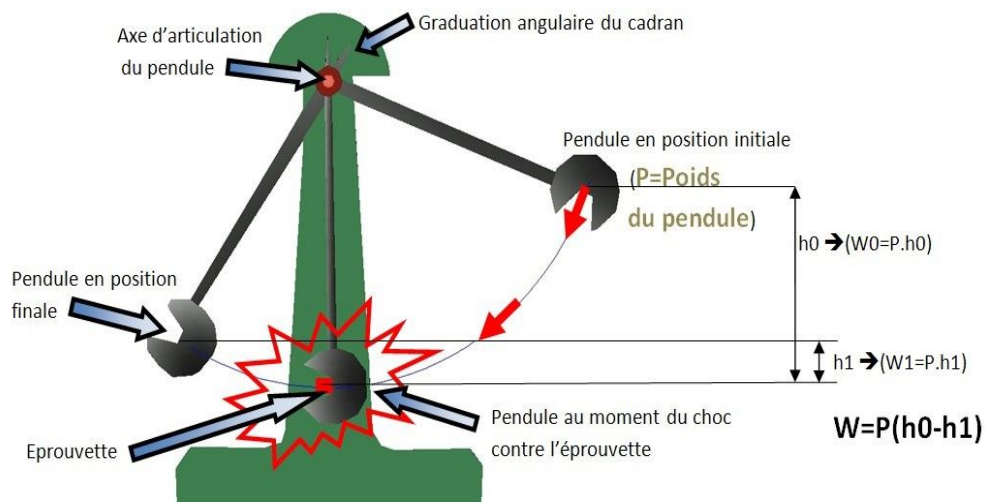


Fig. II.11. Mouton pendule (Essais de Résilience) [32].

II.4.2. Echantillons

On constate deux types d'éprouvettes

a. L'éprouvette Charpy U

Une éprouvette est un barreau usiné de section carrée de 10mm de côté et dont la longueur est 55mm. L'entaille de 2mm de largeur et de 5mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1mm de rayon. La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole K_{CU} .

b. L'éprouvette Charpy V

Pour un essai avec une éprouvette Charpy V, l'éprouvette sera entaillée en V de 2mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy U. On précise par le symbole K_{CV} l'essai de résilience en V[32].

L'échantillon est conditionné à la température souhaitée en utilisant un dispositif réfrigérant pour les basses températures ou des fours pour les hautes températures.

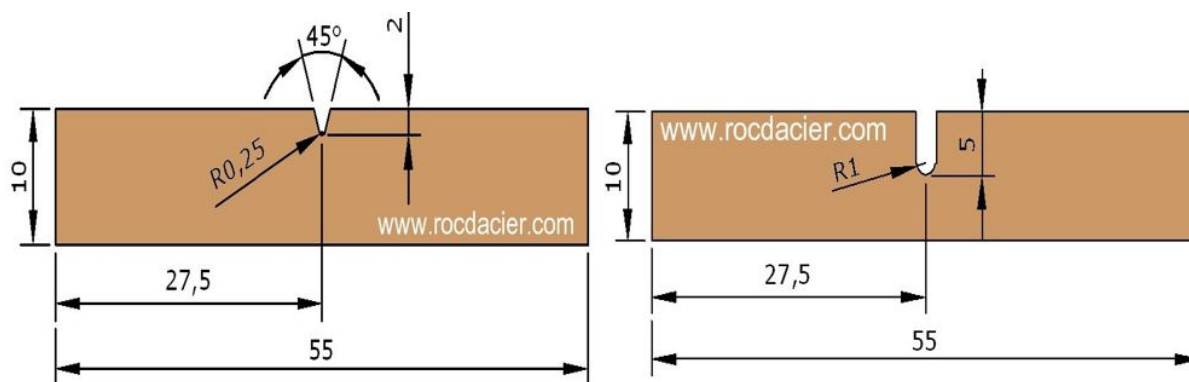


Fig. II.12. Eprouvettes Charpy V et U [32].

II.4.3. Exemple

Le tableau 2émontre un exemple de calcul de la résilience pour trois échantillons identiques de section 0.40 mm^2 .

Repère	S_0 en cm^2			W en j			K_{CV} en $\frac{j}{\text{cm}^2}$			Moyennes $\frac{j}{\text{cm}^2}$
F_Y	0.40	0.40	0.40	1.7	2.0	1.8	41.69	49.05	44.14	44.96
F_Z	0.40	0.40	0.40	2.1	2.3	2.0	51.5	56.4	49.05	52.31

Tab. II.4. Exemple de calcul de la résilience.

II.5. CONCLUSION

Les analyses chimiques identifient la composition élémentaire, tandis que les essais mécaniques, tels que la traction, la résilience et la dureté, évaluent les propriétés mécaniques des aciers. Ces méthodes permettent de caractériser et d'optimiser les aciers pour répondre aux exigences de performance et de sécurité des applications industrielles. Dans la section suivante, nous présenterons et discuterons les résultats de l'analyse chimique et des essais mécaniques de trois nuances d'acier.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1. INTRODUCTION

Les aciers qui ont fait l'objet de ce travail sont destinés particulièrement à la construction mécanique. Il s'agit des nuances E36-2, E24-2 et BN (selon leur désignation au niveau de Sider El Hadjar et l'ancienne norme AFNOR).

Dans ce chapitre, on aura à présenter, comparer et discuter les différents résultats de l'analyse chimique et des essais mécaniques (traction, dureté et résilience) que nous pu réaliser au niveau du Complexe sidérurgique Sider El Hadjar.

III.2. PRESENTATION DES NUANCES D'ACIERS ETUDIÉS

III.2.1. E36-2

La nouvelle désignation de cet acier selon la norme NF EN 10027-1 est S355JR. C'est un acier non allié d'environ 0,18% du carbone avec une limite élastique minimale de 355MPa. Il est destiné pour la production des tubes sans soudure avec plusieurs diamètres selon la norme API 617 utilisé pour le transport de pétrole (pipe line), gaz naturel (drill pipe) et puits de pétrole.



Fig. III. 1. Pipe-line en E36-2 élaborés par Sider El Hadjar.

III.2.2. E24-2

Selon la norme NF EN 10027-1 cette nuance correspond à S235JR. Sa teneur en carbone est d'environ 0,16% et sa limite élastique minimale est de 235MPa. Il est utilisé pour la production des bobines qui sont destinés pour la fabrication des :

- produits de conserveries ;
- tubes avec soudures pour le transport des fluides tel que : gaz naturel, gaz industriel, eau potable, eau industriel ;
- blindages industriels des installations ;

- tôles pour les voitures.



Fig. III. 2. Applications de l'acier E24-2.

III.2.3. BN

C'est un acier au carbone soudable avec une teneur en carbone de 0,17% utilisé pour la production des brames et billettes de haute qualité destiné pour la fabrication :

- Des rails des trains ;
- Des ossatures des bateaux ;
- Des profilés pour le secteur bâtiments ;
- Du rond béton pour le secteur bâtiments.



Fig. III. 3. Applications de l'acier BN.

III.3. ANALYSE CHIMIQUE

La composition chimique des nuances d'aciers étudiés est obtenue par la technique OES. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau III.1.

Les résultats obtenus montrent tout d'abord que les compositions chimiques des trois nuances d'aciers sont dans les normes. Cela démontre la rigueur dans le suivi de la production des aciers au niveau de Sider El Hadjar.

On constate également que le taux de manganèse est plus élevé dans l'acier E36-2. Il est connu sur cet élément qu'il augmente certaines propriétés mécaniques tel que la résistance mécanique, la limite élastique et la dureté à froid mais diminue l'allongement. Par ailleurs, la teneur en carbone est relativement proche entre les trois aciers.

			Eléments d'addition (%)													
			C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Nb	B	Ti	Ni	Cr	Mo	Sn
Nuances d'aciers	E36-2	Norme	≤0,20	0,9 1,60	0,15 0,55	≤0,035	≤0,035	0,015 0,06	≤0,35	0,02 0,05	/	/	≤0,4	≤0,2	≤0,08	/
		Résultat	0,19	1,38	0,22	0,007	/	0,013	0,042	0,002	0,002	0,001	0,0029	0,0911	0,001	0,001
	E24-2	Norme	≤0,17	≤1,50	≤0,03	≤0,05	≤0,05	/	≤0,55	/	/	/	/	/	/	/
		Résultat	0,15	0,69	0,03	0,012	/	0,054	0,018	0,002	0,001	0,001	0,014	0,002	0,005	0,001
	BN	Norme	0,14 0,18	0,70 0,90	0,10 0,30	≤0,024	≤0,010	≤0,060	0,018 0,040	≤0,04	≤0,040	≤0,050	≤0,125	≤0,050	≤0,030	≤0,015
		Résultat	0,17	0,78	0,17	0,007	0,006	0,023	0,039	0,006	0,013	0,004	0,013	0,028	0,023	0,001

Tab. III.1. Résultats de l'analyse chimique des aciers étudiés comparés aux normes.

III.4. ESSAIS DE TRACTION

Les essais de traction sur les trois nuances d'aciers ont été effectués au Laboratoire Central du Complexe Sidérurgique El Hadjar, utilisant une machine de traction de la marque WOLPERT (voir Fig. III.4). Cette machine a été modifiée par l'associée ZWICK ROELL et est équipée d'un logiciel de traitement des courbes de traction.



Fig. III.4. Machine de traction WOLPERT (Sider El Hadjar).

Les dimensions des éprouvettes de traction sont données dans le Tab. III.2 (nous n'avons pas pu cueillir les dimensions des éprouvettes de la nuance NB).

Nuance	Epaisseur A_0 (mm)	Largeur B_0 (mm)	Longueur L_0 (mm)	Section S_0 (mm)
E36-2	6.58	30.33	80	199
E24-2	3.64	25.32	54	92
BN	/	/	/	313.74

Tab. III.2. Dimensions des éprouvettes de traction des aciers.

Les courbes de traction obtenues par les essais sur les trois nuances E36-2, E24-2 et BN sont données par les figures respectivement III.5, III.6 et III.7.

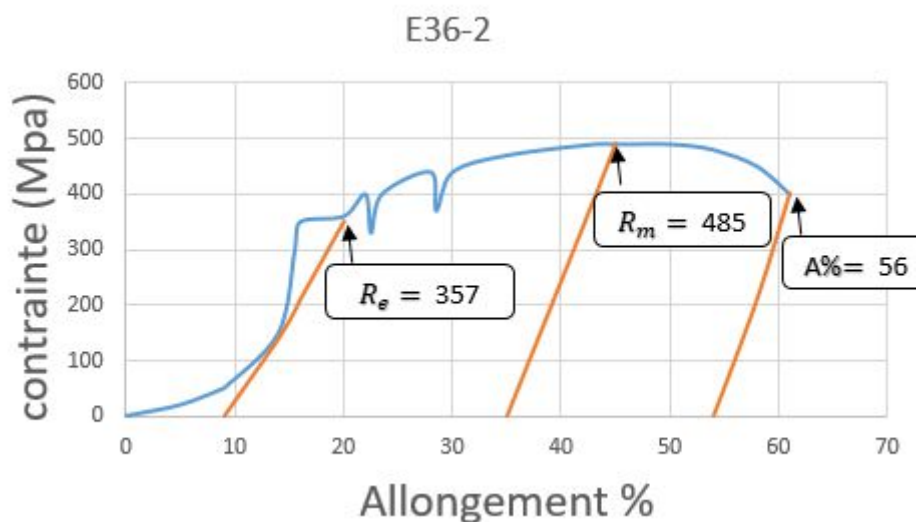


Fig. III. 5. Courbe de Traction de la nuance E36-2.

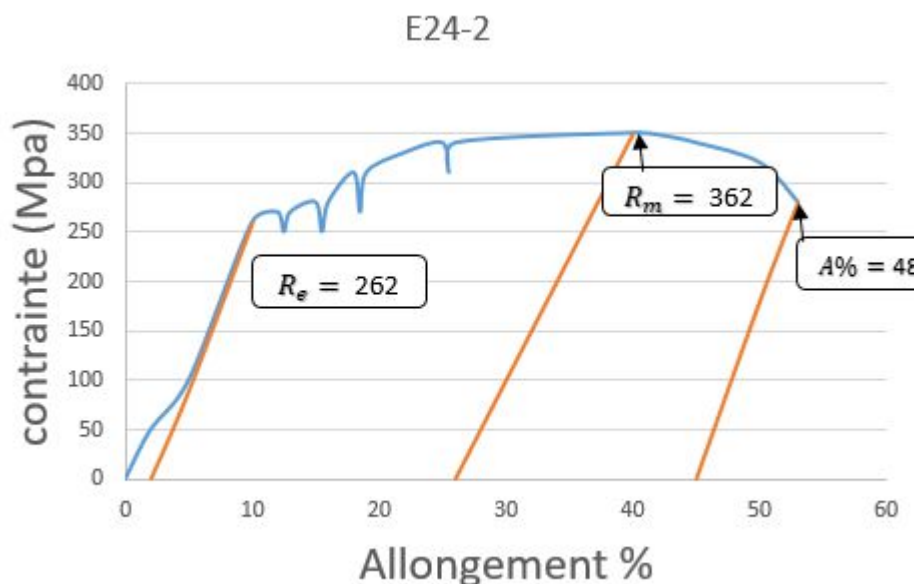


Fig. III. 6. Courbe de Traction de la nuance E24-2.

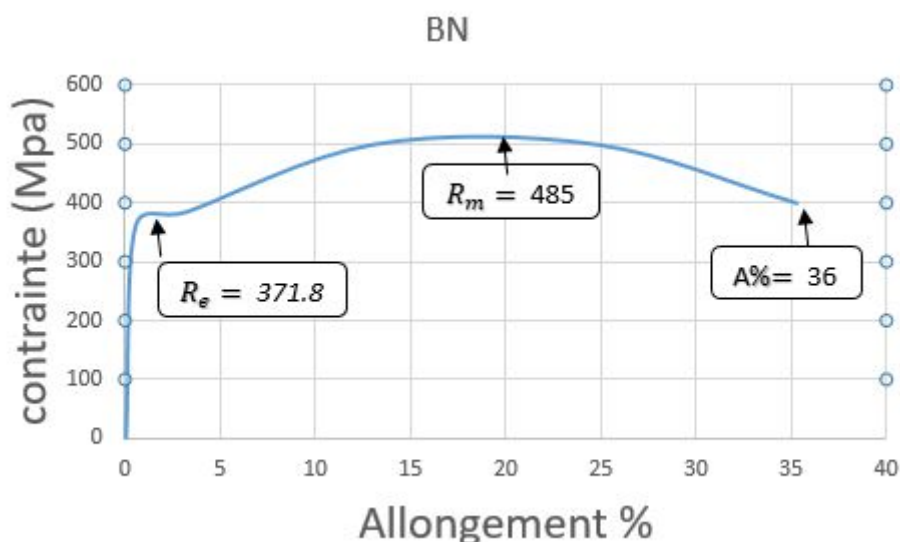


Fig. III. 7. Courbe de Traction de la nuance BN.

Les caractéristiques mécaniques obtenues à partir des courbes de traction sont rassemblées dans le tableau III.3.

Nuance	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A %
E36-2	≥ 355	470-630	≥ 22
	357	485	56
E24-2	≥ 235	360-510	≥ 26
	262	362	48
BN	/	/	/
	371.8	497.1	36.94

Tab. III.3. Caractéristiques mécaniques obtenues par les essais de Traction.

La limite élastique est le point où le matériau commence à se déformer plastiquement. BN et E36-2 ont des limites élastiques relativement proches. E24-2 a la plus faible limite d'élasticité, ce qui indique qu'il commence à se déformer plastiquement à des charges plus faibles.

La résistance à la rupture représente la contrainte maximale que le matériau peut supporter avant de se rompre. Le BN présente la plus haute résistance mécanique, ce qui indique en fait que ce matériau est le plus résistant parmi les trois. E36-2 suit de près, tandis que E24-2 a la résistance mécanique la plus faible.

L'allongement à la rupture est une mesure de la ductilité du matériau. E36-2 montre le plus grand allongement, ce qui indique une excellente ductilité, permettant de subir des

déformations importantes avant la rupture. Le BN présente l'allongement le plus faible, ce qui indique que le moins ductile parmi les trois aciers.

Par rapport aux normes, on constate que les propriétés mécaniques obtenues à partir des courbes de tractions des nuances E362 et E24-2 sont cohérentes. Pour la nuance BN, malheureusement, nous ne disposons pas de données théoriques pour réaliser la comparaison.

III.5. ESSAIS DE DURETE

L'essai de dureté est réalisé sur les trois nuances en effectuant trois mesures pour chacune. Le dispositif utilisé est un duromètre universel WOLPERT, équipé d'une cellule optique intégrée, conçu pour mesurer la dureté des matériaux sur une plage de charges allant de 1 à 250 kgf (kilogramme-force). Ce dispositif permet des mesures de dureté selon les trois méthodes principales Vickers, Brinell et Rockwell. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode Vickers.



Fig. III.8. Duromètre universel WOLPERT.

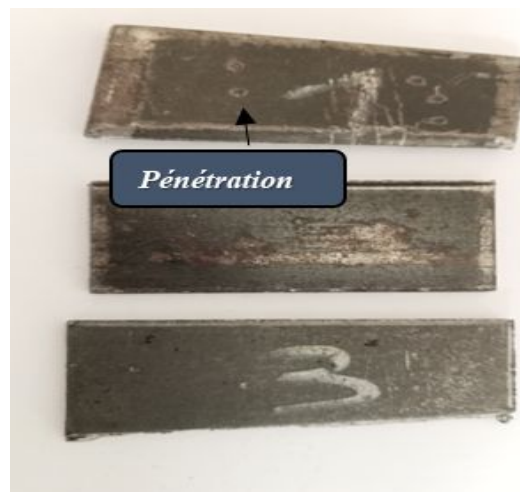


Fig. III.9. Echantillons soumis à l'essai de dureté.

Les résultats de l'essai de dureté sur les trois nuances d'aciers sont récapitulés dans le tableau III.4.

Nuance	E36-2	E24-2	BN
Essais 1	60	85	88
Essais 2	61	85	87
Essais 3	59	83	88
Moyenne	60	84,33	87,66

Tab. III.4. Résultats de l'essai de dureté.

Les résultats de l'essai de dureté sur les trois nuances E36-2, E24-2 et BN montrent que les trois mesures réalisées sur chacun des échantillons sont très proches. Ceci démontre l'uniformité, tout d'abord des échantillons mais également des essais.

La dureté la plus faible enregistrée correspond à la nuance E36-2 et celle des nuances E24-2 et Bn sont relativement proches. Les résultats de cet essai viennent confirmer ceux de l'essai de traction, soit la ductilité du E36-2.

III.6. ESSAIS DE RESILIENCE

L'essai de résilience que nous avons réalisé comprend trois étapes :

1. *Confection des éprouvettes* : c'est une étape d'usinage qui consiste à réaliser l'entaille (en V) au milieu des éprouvettes parallélépipèdes.

**Fig. III.10.** Préparation des éprouvettes destinées à l'essai de résilience.

2. *Refroidissement des éprouvettes* : au cours de cette étape, les éprouvettes sont refroidies à des températures spécifiques selon les besoins de l'expérience. Dans

notre cas la température est 0°C, cela garantit des conditions de test reproductibles et contrôlées.



Fig. III.11. Dispositif de refroidissement des éprouvettes « CROIS_THERMOSTA ».

3. *Réalisation de l'essai* : il est réalisé par un mouton-pendule. Ce dispositif est crucial pour mesurer la résilience du matériau en absorbant les chocs lors de la rupture de l'éprouvette au niveau de l'entaille.



Fig. III.12. Machine de résilience (Mouton-pendule).



Fig. III.13. Eprouvettes après l'essai de résilience.

Les résultats obtenus par l'essai de résiliences pour les trois aciers sont récapitulés dans le tableau suivant :

Nuances	Cst	S ₀ (cm ²)	W (J)	K
E36-2	0,98	0,40	4,8	117,72
E24-2	0,98	0,40	4,4	107,91
BN	0,98	0,40	4,6	112,81

Tab. III.5. Résultats de l'essai de résilience.

La plus haute résilience est enregistrée pour la nuance E36-2 et la plus basse correspond à la nuance E24-2. Ceci indique que le E36-2 est plus résistant aux chocs par rapport aux autres nuances. En outre, on constate une cohérence avec les résultats des essais de traction et de dureté.

III.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de caractérisation que nous pu réaliser au cours de notre stage au Complexe Sidérurgique d'El Hadjar sur les aciers E36-2, E24-2 et BN. En l'occurrence, l'analyse chimique et les essais de traction, dureté et résilience.

Les résultats de l'analyse chimique ont montré que les compositions des nuances des aciers étudiées sont cohérentes avec les normes. Les résultats des essais mécaniques ont montré que la nuance BN présente des propriétés mécaniques (limite élastique, résistance à la traction et dureté) plus élevées par rapport aux deux autres nuances. Par contre, elle présente une résilience intermédiaire. La nuance E36-2 possède la dureté la plus faible et la résilience la plus élevée ce qui prouve son comportement ductile.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons mené une analyse approfondie pour comparer trois types d'aciers de construction. Il s'agit des nuances E-36-2, E-24-2 et BN élaborées à Sider El Hadjar. Cette analyse englobe la composition chimique et un certain nombre d'essais mécaniques (traction, dureté et résilience).

L'analyse chimique par spectroscopie optique à étincelle (OES) a permis de déterminer la composition chimique des trois nuances. Les résultats obtenus par cette analyse, présentés sous forme de tableau, ont montré que toutes les nuances étudiées ont des compositions chimiques conformes aux normes en vigueur. Cela met en évidence la rigueur dans le suivi du processus d'élaboration des aciers au niveau de Sider El Hadjar.

Les essais mécaniques ont montré que l'acier BN possède la résistance à la traction, la limite élastique et la dureté les plus élevées. Pour l'acier E36-2, les essais ont révélé qu'il possède la meilleure ductilité (avec un allongement et résistance aux chocs les plus élevés).

Ces essais et analyses ont confirmé que chaque type d'acier possède des caractéristiques uniques adaptées à diverses applications industrielles. Le BN est recommandée pour les structures et composants nécessitant une résistance maximale, l'E36-2 pour les applications nécessitant une haute ductilité, et l'E24-2 pour des applications équilibrées nécessitant moins de résistance et ductilité.

Enfin, cette étude fournit des informations essentielles pour le choix des matériaux en ingénierie et en construction mécanique. Le processus complet mis en œuvre par Sider El Hadjar assure la production d'aciers de haute qualité adaptés à une variété d'applications industrielles, tout en garantissant la conformité aux normes internationales et aux exigences spécifiques des clients.

En guise de perspectives, ce travail peut être enrichi par des études métallographiques et microstructurales ainsi que de l'élargir aux autres nuances d'aciers tel que les aciers faiblement et fortement alliés.

BIBLIOGRAPHIE

1. Kumar, K., Blast Response of Steel and Cast Iron Circular Pipe Sections Under Explosive Impact using ls -Dyna. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2020. 9: p. 954-959.
2. <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/10/Bengacemi-Ilyes-El-Houari.pdf>.
3. <https://preprod.imetal.dz/filiale/1>, *Unité de production à Sider El Hadjar*.
4. Algérie Presse Service, S.E.H.à.A.l.s.d.l.i.s.a.f.a.d.d.l.e.é., Article paru le 03 Septembre 2022.
5. <https://elwatan-dz.com/historique-du-complexe-siderurgique-del-hadjar>.
6. <https://elwatan-dz.com/historique-du-complexe-siderurgique-del-hadjar>, h.e.-d.c.h.-d.-c.-s.-d.-h.
7. <https://web.archive.org/web/20230428112148/https://www.lematindz.net/news/18812-le-complexe-siderurgique-arcelomital-del-hadjar-lhistoire-dun-echec-patent-du-gouvernement.html>, L.M.O.
8. Hadjar., D.S.E.
9. <https://www.tosyali-algerie.com/fr/the-complex/technologies-et-partenaires/fr-the-complex-technologies-et-partenaires-coulee-continue-ccm-1598263068651>, w.t.-a.c.
10. <https://www.presi.com/controle-traitement-thermique-trempe/>, h.w.p.c.
11. D. Gilbert, d.d.a., Note de cours Matériaux, Lycée Léonard De Vinci, France (2011).
12. warde steel and metals, C.d.n.a.d.c.m., http://www.wardesteelandmetals.com/upload/files/Partners/ASSAB/Catalogs/normes_aciers_construction.pdf.
13. <https://metalblog.ctif.com/2022/09/12/la-spectrometrie-par-etincelle-pour-mesurer-la-composition-chimique/>, *La spectrométrie par étincelle pour mesurer la composition chimique*
14. https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15632&fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAAR2GqJ5iTHfKhzr14DlhVtLctxD5IxbYVPc5gIbXBFzZ5E72tjUN0gV-G4w_aem_ZmFrZWR1bW15MTZieXRlcw, *What is Optical Emission Spectroscopy (OES)?*
15. Abdemeziem, Z.a.A.L., Étude du comportement d'un stratifié carbone/polyester. 2017, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
16. <https://i.ytimg.com/vi/XMMLOVBz0aA/maxresdefault.jpg>.
17. Sowerby, R., D. Uko, and Y. Tomita, A review of certain aspects of the Bauschinger effect in metals. Materials Science and Engineering, 1979. 41(1): p. 43-58.
18. Jaoul, B., Structures de déformation d'un acier inoxydable 18-10. Revue de Métallurgie, 1958. 55(10): p. 976-992.

19. Blétry, M., Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
20. http://gelin.denis.free.fr/Cours/RDM_cours.htm#_Toc152191900.
21. http://jpcad64.free.fr/Materiaux/Essai_de_traction.htm.
22. <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/metal/normes-metal/essai-de-traction-materiaux-metalliques-astm-e8/>, Norme ASTM
23. Aegerter, J., et al., *EN ISO 6892-1: 2009 tensile testing: initial experience from the practical implementation of the new standard*. Materials Testing, 2011. **53**(10): p. 595-603.
24. <https://www.ss-pub.org/wp-content/uploads/2018/01/BCR2017112202.pdf>.
25. <https://regbar.com/wp-content/uploads/2019/09/ISO-6892-1-2009.pdf>.
26. <https://www.rocdacier.com/essai-de-traction-2/>, c.l.
27. <https://cvm-france.com/ressources-techniques/lessai-de-traction/>.
28. Malek, S., Identification des paramètres matériels des structures par approches inverses. 2013, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
29. <https://www.laboratuar.com/fr/testler/metal-test-laboratuvvari/iso-6506-1-metalik-malzemeler--brinell-sertlik-testi/>.
30. <https://souslemicroscope.com/mesure-de-la-durete-methode-de-brinell/>.
31. <https://conceptek.net/fr/techniques-de-base/materiaux/essais-et-contrôles/durete-rockwell?showall=1&rCH=2>.
32. https://www.rocdacier.com/essai-resilience/#google_vignette.
33. difyuvzeo_rugpurtpzrmiobvzemofivzemoifvmozeifv.

RESUME

Résumé

Cette étude compare trois types d'aciers (E24-2, E36-2 et BN) élaborés par Sider El Hadjar, largement utilisés dans la construction mécanique. L'objectif étant d'analyser la composition chimique et les propriétés mécaniques de ces aciers afin de déterminer leur adéquation pour diverses applications spécifiques. Elle comprend une revue des caractéristiques structurales et mécaniques des aciers, une description détaillée des méthodes d'analyse utilisées, comme la spectrométrie optique et divers essais mécaniques, ainsi que la présentation et la discussion des résultats expérimentaux. Les résultats obtenus mettent en évidence la cohérence des propriétés de produits de Sider El Hadjar avec les normes en vigueur. D'autre part, les caractéristiques de chaque nuance est mise en lumière tel que la résistance à la traction du rond à béton BN contrairement à la nuance E24-2 et la ductilité et résistance aux chocs de l'acier E36-2.

ملخص

تقارن هذه الدراسة بين ثلاثة أنواع من الفولاذ (E24-2 و E36-2 و BN) التي طورتها سدار الحجار، والتي تستخدم على نطاق واسع في البناء الميكانيكي. الهدف هو تحليل التركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية لهذه الفولاذ من أجل تحديد مدى ملاءمتها لمختلف التطبيقات المحددة. تتضمن مراجعة للخصائص الهيكلية والميكانيكية للفولاذ، ووصفا مفصلا للطرق التحليلية المستخدمة، مثل قياس الطيف الضوئي والاختبارات الميكانيكية المختلفة، بالإضافة إلى عرض ومناقشة النتائج التجريبية. تسلط النتائج التي تم الحصول عليها الضوء على اتساق خصائص منتج سدار الحجار مع المعايير المعمول بها. من ناحية أخرى، يتم تسليط الضوء على خصائص كل نوع، مثل قوة الشد لقضيب التسليح BN عكس النوع E24-2 وليونة ومقاومة الصدم للفولاذ E36-2.

Abstract

This study compares three types of steels (E24-2, E36-2 and BN) developed by Sider El Hadjar, which are widely used in mechanical engineering. The objective is to analyze the chemical composition and mechanical properties of these steels in order to determine their suitability for various specific applications. It includes a review of the structural and mechanical characteristics of the steels, a detailed description of the used analytical methods, such as optical spectrometry and various mechanical tests, as well as the presentation and discussion of the experimental results. The obtained results highlight the consistency of Sider El Hadjar's product properties with the standards in force. On the other hand, the characteristics of each grade are highlighted such as the tensile strength of the BN reinforcing bar unlike the E24-2 grade and the ductility and impact resistance of the E36-2 steel.