

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie Département

de Génie mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie mécanique

Spécialité: Génie des matériaux

Par

➤ RACHI Houssam Eddine

Intitulé

Etude multi-échelle des propriétés mécaniques, microstructurales et tribologiques des aciers au carbone : corrélations structure-propriétés.

Soutenue le: 30/06/2025

Devant le Jury composé de:

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
M.DAOUED Saleh	Pr	Président	Univ-BBA
M.DAIRI Walid	MCB	Encadreur	Univ-BBA
M.BENTOUMI Mohammed	MCA	Examineur	Univ-BBA
Mme. MECHTA Ahlem	MCB	Examinatrice	Univ-BBA

Résumé :

Cette étude démontre l'influence cruciale de la microstructure et des traitements thermiques sur les performances mécaniques et tribologiques des aciers au carbone P110 et N80 en environnements corrosifs. Par une approche expérimentale et théorique, nous établissons que le P110, grâce à sa composition alliée (Cr, Mo) et sa structure homogène, surpasse le N80 en résistance à la corrosion, tandis que ce dernier présente une vulnérabilité accrue aux fissurations intergranulaires. Les analyses microscopiques (microscopie optique, indentation Vickers) révèlent une corrélation directe entre l'évolution microstructurale (piqûres, oxydation) et la dégradation macroscopique. Ces résultats soulignent la nécessité d'optimiser composition et traitements thermiques pour les applications pétrolières critiques. Des perspectives sont proposées, incluant les revêtements anticorrosion et les caractérisations in situ pour une durabilité accrue.

Abstract :

This study demonstrates the crucial influence of microstructure and thermal treatments on the mechanical and tribological performance of P110 and N80 carbon steels in corrosive environments. By an experimental and theoretical approach, we establish that P110, thanks to its alloyed composition (Cr, Mo) and homogeneous structure, surpasses N80 in corrosion resistance, while the latter has an increased vulnerability to intergranular cracking. Microscopic analyses (optical microscopy, Vickers indentation) reveal a direct correlation between microstructural evolution (pitting, oxidation) and macroscopic degradation. These results highlight the need to optimize composition and heat treatments for critical oil applications. Perspectives are proposed, including anti-corrosion coatings and in situ characterizations for increased durability.

ملخص:

توضح هذه الدراسة التأثير الحاسم للبنية المجهرية والمعالجات الحرارية على الأداء الميكانيكي والاحتكاكي للفولاذ الكربوني P110 و N80 في البيئات المسببة للتآكل. من خلال النهج التجريبي والنظري، أثبتنا أن P110، بفضل تركيبته السبائكية (Mo, Cr)، وبنيته المتجانسة، يتفوق على N80 في مقاومة التآكل، في حين أن الأخير لديه قابلية متزايدة للتشقق بين الحبيبات. تكشف التحليلات المجهرية (المجهر الضوئي، انبعاج فيكرز) عن وجود علاقة مباشرة بين التطور البنيوي الدقيق (التآكل، الأكسدة) والتدهور العياني. تسلط هذه النتائج الضوء على الحاجة إلى تحسين التركيب والمعالجات الحرارية لتطبيقات النفط الحرجة. تم اقتراح وجهات نظر، بما في ذلك الطلاءات المضادة للتآكل والخصائص الموضعية لزيادة المتانة.

Remerciements

En guise d'avant-propos, il convient de remercier ici tous ceux et celles qui ont contribué à ce que ce travail aboutisse.

Je tiens en premier lieu à exprimer toute ma gratitude pour mon encadreur. **DAIRI Walid**, qui a accepté de diriger mon travail et m'a accordé tout son attention et sa patience pour l'accomplir.

Mes remerciements s'adressent Au monsieur **DAOUD Saleh**, pour avoir accepté de présider mon jury.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont aux **M.BENTOUMI** et à **Mme. MECHTA** pour avoir accepté d'examiner mon travail et faire partie du Jury.

J'exprime ma profonde gratitude à **M.Elhadi**, ingénieur au laboratoire de mécanique et d'optique de l'Université Ferhat Abbas Sétif, pour son aide précieuse.

Je tiens à exprimer mes très vifs remerciements à tous mes enseignants de la filière génie des matériaux de la Faculté des Sciences et de la technologie, auxquels je dois beaucoup pour ma formation. Merci à mes collègues et camarades de promotion de post-graduation, qui ont su m'accorder une partie de leur temps précieux lors de la préparation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A ma famille (mes parents, mes frères et sœurs)

A ma petite famille (ma femme et mes enfants acil et isra)

A tous les neveux et nièces (lina et razane).

A tous ceux-là dont les noms n'ont pas été cités ici mais qui ont eu un rôle déterminant tant par leurs encouragements, leur soutien moral et matériel surtout dans les moments difficiles.

Je leur exprime ma profonde gratitude.

A tous mes amis surtout : (Youssef tlidjane, Akram bechane,
walidhayouni, Walid nefnaf et zine sediki)

A mes collègues de la promotion.

A mes collègues de travail surtout (kamel, Ali, Hicham)

A tous ceux qui me sont chers.

A tous les universitaires.

RACHI Houssam Eddine



Listedestableauetfigures

Tableau

Tableau.1.1: classificationdesaciersaucarbone.	6
Tableau.1.2: élémentssecondairesdelacompositiondesaciers.	8
Tableau.1.3: Influencedelacompositionsurlespropriétés.	9
Tableau.1.4: Influenceducarbonesurlespropriétés mécaniques.	15
Tableau.1.5: Influencedelateneurencarbonesurlaconstitution.	17
Tableau.1.6: Classificationdesaciers selonlateneurencarbone.	18
Tableau.1.7: propriétés chimiquesdesnuancesd'acier.	23
Tableau.1.8: propriétés mécaniquesdesnuancesd'acier.	24
Tableau.2.1: principauxfacteursdecorrosion.	34
Tableau.2.2: desmoyensdeprotectioncontrelacorrosion.	36
Tableau3.1: propriétés mécaniques.	37
Tableau3.2: Compositionchimiquedel'acierP110.	38
Tableau3.3: Propriétés mécaniquesdel'acierN80.	38
Tableau3.4: Compositionchimiqued'aciernuanceN80.	39
Tableau3.5: valeursdesdiagonalespourP110etN80(bruteetcorrodé).	44
Tableau3.6: valeursdesdiagonalespourP110etN80(brutetcorrodé).	46

Figures

Figure1.1: Compositionchimiquedel'acier.	4
Figure1.2: aciersaucarbone.	4
Figure1.3: Différencesentreacierdoux,fonteetacierallié..	5
Figure1.4: élémentsprincipauxdeLesaciersaucarbone.	7
Figure.1.5: élémentsprincipauxdeLesaciersaucarbone.	7
Figure.1.6: Matièrespremièresutiliséesdansla fabrication desaciersaucarbone.	10
Figure.1.7: Conversiondelafonteenacier.	10
Figure.1.8: ProcédéLDouconvertisseuràoxygène.	11
Figure.1.9: Fourélectriqueà arc.	11
Figure.1.10: Métallurgiesecondaire.	12
Figure.1.11: Couléedel'acier(solidification).	13
Figure.1.12: Constitutiondesaciersaucarbone.	16
Figure.1.13: Diagrammefer-carbone.	20
Figure.2.1: photod'aciersaucarbonebruteavantutilisation.	27
Figure.2.2: photod'aciersaucarbonecorrodéaprès l'utilisation.	28
Figure.2.3: schémadecorrosionuniforme.	29
Figure.2.4: Schémadecorrosionparpiques.	29
Figure.2.5: corrosiongalvanique.	30
Figure.2.6: Schémadecorrosionsouscontrainte.	30
Figure.2.7: corrosionparpiques.	31
Figure.2.8: aspectetmécanismed'attaquedelacorrosioncaverneuse.	32
Figure.2.9: présentationschématiquedelacorrosionintergranulaire.	32
Figure.2.10: représentationschématique du phénomène de corrosion-érosion.	33
Figure.2.11: Exempledephénomènebactérienresponsabledela corrosion.	35
Figure3.1: échantillonsP110;(A)corrodé,(B)brute.	37
Figure3.2: échantillonsN80corrodé(A),brute(B).	38
Figure3.3: MicroduromètreQNESS.	40
Figure3.4: MicroscopeuniverselEuromexdetypeOXION.	41
Figure3.5: MicroscopeconfocalLeicaDCM3D(àdroite)lieravec l'outilinformatique(àgauche).	42

Figure3.6 :SpectromètredefluorescencedesrayonsX–RigakuZSX PrimusIV	43
Figure3.7 :évolutiondeladiagonaleenfonctiondelacharge appliquée.	45
Figure3.8 :évolutiondeladuretéenfonctiondelachargeappliquée.	46
Figure3.9 :micrographiesobtenuesparmicroscopeoptiquede N80etP110	47
Figure3.10 :micrographiesdesempreintesobtenuesparindentation Vickers.	49
Figure3.11 :topographiesdesaciersP110brutetcorrodé.	51
Figure3.12 :topographiesdesaciersN80brutetcorrodé	52

Introduction

Introduction générale

1. Introduction

Les aciers au carbone jouent un rôle fondamental dans l'industrie pétrolière, notamment dans la fabrication des pipelines, des tubages et des équipements de forage. Ces matériaux doivent répondre à des exigences mécaniques très strictes pour assurer la sécurité et la durabilité des installations soumises à des conditions extrêmes, telles que des pressions élevées, des températures variables et des environnements corrosifs. Comprendre les relations entre la microstructure des aciers et leurs propriétés mécaniques et tribologiques est donc essentiel pour optimiser leur performance et prévenir les défaillances. L'étude multi-échelle des propriétés mécaniques, microstructurales et tribologiques permet d'analyser en profondeur les mécanismes qui gouvernent le comportement de ces aciers, en reliant les caractéristiques à l'échelle atomique et microscopique aux performances macroscopiques. Cette approche est particulièrement pertinente dans le secteur pétrolier, où la maîtrise des corrélations structure-propriétés contribue à développer des aciers au carbone adaptés aux exigences croissantes des applications, garantissant ainsi une meilleure résistance à l'usure, à la corrosion et aux sollicitations mécaniques.

L'acier au carbone est un matériau incontournable dans de nombreux domaines industriels, notamment dans l'exploitation pétrolière, la construction et les applications mécaniques. Grâce à sa bonne résistance mécanique, sa ductilité adaptée et son coût relativement modéré, il est fréquemment utilisé pour des pièces soumises à des contraintes importantes. Cependant, son utilisation intensive le confronte à des sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques sévères qui peuvent altérer ses propriétés et réduire sa durée de vie.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié les propriétés mécaniques et tribologiques des aciers au carbone, en particulier leurs comportements face à l'usure et à la corrosion. L'objectif est d'analyser les deux nuances d'aciers largement employées dans le secteur pétrolier : P110 et N80. Ces matériaux doivent résister à des conditions extrêmes telles que des pressions élevées, des températures variables et des milieux corrosifs. Une compréhension approfondie de leur microstructure et de leur évolution sous ces contraintes permettra d'établir des liens entre leur constitution interne, leurs performances mécaniques et leur résistance aux dégradations.

Pour cela, différentes techniques d'analyse ont été utilisées : des tests d'indentation Vickers pour mesurer la dureté, des analyses de rugosité pour caractériser l'état de surface, et

des observations microscopiques pour identifier les modifications structurales induites par l'usure et la corrosion. Ces méthodes fournissent des données précieuses sur l'évolution du matériau en service, facilitant ainsi la prédiction de sa durabilité et l'optimisation de ses propriétés.

Ce mémoire s'organise autour de trois axes principaux : Le premier chapitre présente les bases théoriques sur les aciers au carbone. Il aborde leur définition, classification, composition chimique, processus d'élaboration ainsi que leurs propriétés mécaniques fondamentales (résistance à la traction, limite élastique, allongement, dureté, résilience, module d'élasticité). Ce chapitre a pour but de poser les fondements nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques et métallurgiques régissant leur comportement, notamment dans des environnements normaux ou extrêmes. Le deuxième chapitre traite des mécanismes de corrosion. Il explore les différents types de corrosion (généralisée, localisée, intergranulaire), leurs causes et leurs effets sur les propriétés des aciers. Un accent particulier est mis sur les mécanismes électrochimiques, thermiques et mécaniques qui influencent la dégradation du matériau. Ce chapitre vise à montrer comment la corrosion affecte non seulement la surface mais aussi la structure interne des aciers utilisés dans des applications industrielles exigeantes, comme celles rencontrées dans le domaine pétrolier. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux obtenus grâce à plusieurs techniques de caractérisation : mesure de dureté Vickers, analyse microscopique, étude de rugosité par microscopie confocale, et analyse chimique par fluorescence X. Ces analyses ont permis d'observer l'évolution de la microstructure, la formation de fissures, la propagation de la déformation, ainsi que la perte de cohésion intergranulaire causée par l'usure et la corrosion. Chaque résultat a été analysé et comparé avec les données bibliographiques disponibles.

Enfin, une conclusion générale clôture cette étude. Elle reprend les principales conclusions tirées de la recherche et propose des recommandations pour améliorer les traitements thermomécaniques, prolonger la durée de vie des aciers dans des environnements agressifs, et renforcer leurs performances mécaniques et tribologiques. Ce travail vise à répondre aux défis croissants posés par l'industrie pétrolière moderne, où les exigences en termes de résistance, de fiabilité et de durabilité sont de plus en plus strictes. En mettant en lumière les corrélations entre la microstructure et les propriétés macroscopiques des aciers au carbone, nous espérons contribuer à la conception de matériaux plus performants et durable.

Chapitre 1

Généralitéssurlesaciersau carbone

sommaire

1.1.	Introduction	3
1.2.	Définitiondel'acieraucarbone	3
	1.2.1.Différencesentreacierdoux,fonteetacierallié	5
1.3.	Classificationdesaciersaucarbone	6
1.4.	Compositiondesaciers	6
	1.4.1 Élémentsprincipaux	7
	1.4.2 Élémentssecondaires	7
1.5.	Élaborationdesaciersetdufer	9
	1.5.1 Matièrespremièresutilisées	9
	1.5.2 Conversiondelafonteenacier	10
	1.5.3 Métallurgiessecondaire	12
	1.5.4 Couléedel'acier(solidification)	12
1.6.	propriétésmécaniquesdesaciersaucarbone	13
	1.6.1 Résistanceàlatraction(résistancemécanique)	13
	1.6.2 Limited'élasticité(Re)	13
	1.6.3 Allongementàlarupture(A%)	14
	1.6.4 Dureté(Hardness)	14
	1.6.5 Résilience(tenacitéauxchocs)	14
	1.6.6 Moduled'élasticité(E)	14
	1.6.7 Influenceducarbonesurlespropriétés	14
	1.6.8 Influencedestraitementsthermiques	15
1.7.	Constitutiondesaciersaucarbone	15
	1.7.1 phasesprincipalesdanslesaciersaucarbone	16
	1.7.2 Influencedelateneurencarbonesurlaconstitution	17
	1.7.3 DiagrammeFer-Carbonateetconstitution	17
	1.7.4 Influencedestraitementsthermiques	18
	1.7.5 Importancedelaconstitution	18
1.8.	Classificationdesaciers	18
	1.8.1 selonlateneurencarbone	18
	1.8.2 selonl'application	19
	1.8.3 selonlesélémentsd'alliage	19
1.9.	Diagrammed'équilibrefer-carbone	19
1.10.	nuancesd'acier	20
	1.10.1 Définitiondesnuancesd'acier	21
	1.10.2 Importancedesnuances	21
	1.10.3 Nuancesd'acierpourletubageetlespipelinesdansle secteurpétrolier	21
1.11.	Avantagesetinconvénientsdel'acieraucarbone	24
	1.11.1 Avantagesdel'acieraucarbone	24
	1.11.2 Inconvénientsdel'acieraucarbone	25
1.12	Conclusion	25

Références bibliographiques

1. 1 Introduction

L'acier est aujourd'hui l'un des matériaux les plus fondamentaux dans le développement des sociétés industrielles modernes. Il constitue la base de nombreuses structures mécaniques, bâtiments, infrastructures et pièces techniques utilisées dans divers secteurs tels que : l'automobile, l'aéronautique, la construction navale, la fabrication d'outils, et cetera. La raison principale de cette omniprésence réside dans ses propriétés remarquables, sa malléabilité, sa résistance, ainsi que son coût relativement bas comparé à d'autres matériaux à performance équivalente.

Parmi les nombreuses catégories d'aciers, l'acier au carbone présente environ 90 % de la production mondiale d'aciers. Ce type d'acier, principalement composé de fer (Fe) et de carbone (C), se distingue par l'absence ou la très faible teneur en éléments d'alliage comme le chrome (Cr), le nickel (Ni) ou le molybdène (Mo). Il constitue une base essentielle dans les applications mécaniques et structurelles qui ne nécessitent pas nécessairement de résistance extrême à la corrosion ou à la chaleur.

L'étude de l'acier au carbone dans le cadre de cette recherche vise à explorer ses propriétés fondamentales, son processus d'élaboration, ses classifications, et ses applications industrielles. Une compréhension approfondie de ce matériau permettrait mieux appréhender son comportement mécanique et métallurgique, ses avantages, ses limites, ainsi que les normes qui régissent sa production et son utilisation.

1.2 Définition de l'acier au carbone

L'acier au carbone est défini comme un alliage métallique constitué principalement de fer (Fe) et de carbone (C), où le carbone agit comme élément d'alliage principal. La proportion de carbone dans ce type d'acier varie généralement entre 0,02 % et 2,1 % en masse. Au-delà de ce seuil, l'alliage n'est plus considéré comme un acier mais plutôt comme une fonte, en raison de la formation excessive de cémentite (Fe_3C), ce qui confère au matériau une fragilité accrue [1].

Selon la norme de l'*American Iron and Steel Institute* (AISI), un acier est qualifié de "carbone" lorsque :

- Il contient moins de 1,65 % de manganèse (Mn),
- Moins de 0,6 % de silicium (Si).

- Etmoinsde0,6%decuivre (Cu).
- Sansautresélémentsd'alliageintentionnelsàdesniveauxsignificatifs(commele chrome, lenickel oulemolybdène).

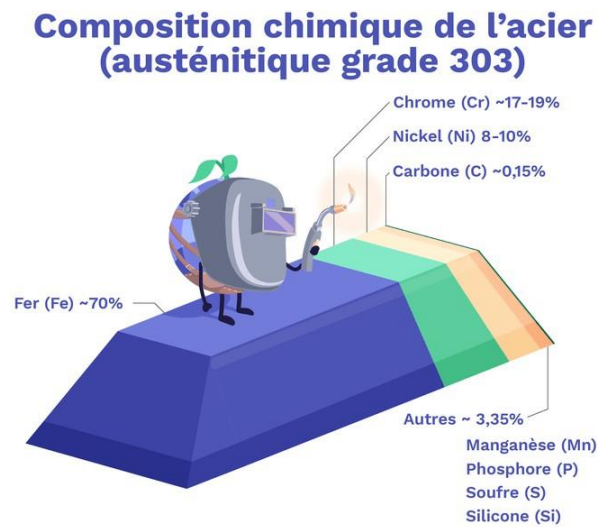


Figure1.1:Compositionchimiquedel'acier [2].

Ainsi, l'acier au carbone diffère des aciers alliés qui contiennent des ajouts intentionnels d'élémentsspécifiquespouraméliorer certaines propriétés, commela résistance àla corrosion ou la dureté à chaud. L'absence d'éléments d'alliage significatifs dans l'acier au carbone le rend plus simple à produire, moins coûteux, mais parfois moins performant pour certaines applications spécifiques.



Figure1.2:Lesaciersaucarbone[3].

1.2.1 Différences entre acier doux, fonte et acier allié:

- Fonte: plus de 2,1% de carbone, cassante, difficile à souder.
- Acier au carbone : entre 0,02% et 2,1% de carbone, bon équilibre entre ductilité et résistance.
- Acier allié: contient des éléments d'alliage pour améliorer certaines propriétés (ex: inoxydabilité, résistance à la chaleur).

Propriétés générales des aciers au carbone:

- Résistance mécanique variable selon la teneur en carbone.
- Bonne aptitude à l'usinage (surtout pour les aciers à teneur moyenne).
- Coût de production faible, ce qui leur rend attractif dans les industries de masse.
- Sensibilité à la corrosion, car non protégé par des éléments alliés comme le chrome (contrairement à l'acier inoxydable).

Utilisation typiques:

- Aciers doux: structures métalliques, tôles, tubes, carrosseries.
- Aciers moyens: engrenages, arbres de transmission, éléments de machines.
- Aciers durs: ressorts, outils à main, lames.

DIFFÉRENCES ENTRE ACIER DOUX, FONTE ET ACIER ALLIÉ			
	ACIER DOUX	FONTE	ACIER ALLIÉ
TENEUR EN CARBONE	< 0,25%	2-4 %	< 1%
RÉSISTANCE			
DUCTILITÉ	Faible à modérée	Élevée	Élevée à très élevée
RÉSISTANCE À LA CORROSION	Faible	Faible à modérée	Élevée
APPLICATIONS TYPIQUES	Construction	Tuyaux, pièces moulées	Aéronautique, automobiles
COUT	 Construction	 Tuyaux, pièces moulées	 Aéronautique, automobiles

Figure 1.3: Différences entre acier doux, fonte et acier allié [4].

1.3 Classificationdesaciersaucarbone:

La classification des aciers au carbone repose principalement sur la teneur en carbone qu'ils contiennent. Cette teneur influe directement sur les propriétés mécaniques, la facilité d'usinage, la soudabilité et les domaines d'application. Plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier est dur et résistant, mais aussi plus fragile et difficile à souder.

Il existe plusieurs classifications reconnues, mais la plus répandue est celle qui divise les aciers au carbone en trois grandes catégories[5] :

Tableau.1.1:classificationdesaciersaucarbone[6].

Catégorie	Teneur en carbone	caractéristiques	Application typiques	exemples
Aciers à faible teneur en carbone (aciers doux)	< 0,25% C	Dureté et résistance mécanique faibles à modérées. Excellente formabilité et soudabilité. Résistance à l'usure faible. Bon marché et facile à produire	Construction métallique (poutres, charpentes). Carrosseries automobiles. Tuyauteries, tôles, câbles métalliques.	Aciers C15, S235JR (norme EN), AISI 1010.
Aciers à teneur moyenne en carbone	0,25 % à 0,6 % C	Bonne résistance à la traction et à l'usure. Ductilité modérée. Peuvent être trempés et revenus. Soudabilité moyenne à faible selon la teneur exacte en C.	Arbres de transmission. Pièces mécaniques soumises à des efforts modérés. Engrenages, bielles, ressorts	Aciers C35, C45, AISI 1045
Aciers à haute teneur en carbone	> 0,6% C jusqu'à 2%	Très haute dureté après traitement thermique. Faible ductilité, fragilité élevée. Soudabilité difficile. – Usinage plus complexe sans recuit préalable.	Lames d'outils à main (scies, ciseaux, forets). Ressorts très résistants. Roulements, chaînes, outils de coupe	Aciers C70, C90, AISI 1095.

1.4 Compositiondesaciers

L'acier, en tant qu'alliage métallique, est principalement composé de fer (Fe) et de carbone(C). Toutefois, il contient également d'autres éléments chimiques, qu'ils soient ajoutés intentionnellement ou présents comme impuretés. La composition chimique joue un rôle déterminant dans les propriétés physiques, mécaniques, et métallurgiques de l'acier. Même de très faibles variations dans les teneurs peuvent produire des changements significatifs dans la performance du matériau.

1.4.1. Élémentsprincipaux

- **Fer(Fe)**: Élément de base, représentant plus de 97% de l'alliage. C'est le métal qui forme la matrice dans laquelle les autres éléments se dissolvent.
- **Carbone (C)** : Élément d'alliage principal. Sa teneur varie généralement entre 0,02 % et 2,1%. Il influence directement la dureté, la résistance à la traction, la tempabilité, et la fragilité. Plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier devient dur et cassant[7].

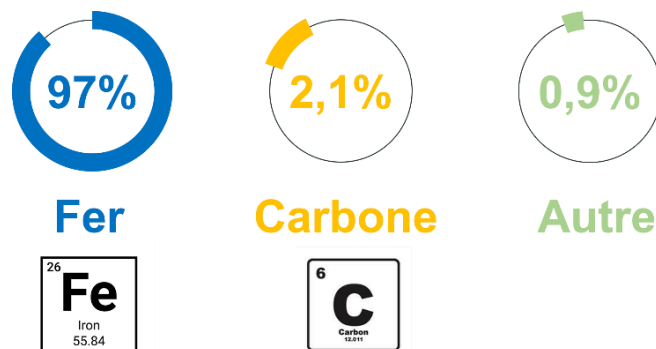


Figure 1.4: éléments principaux de l'acier au carbone[8].

1.4.2. Élémentssecondaires

Ces éléments peuvent être présents naturellement dans le minerai ou être introduits pendant l'élaboration. Certains sont conservés intentionnellement pour modifier les propriétés de l'acier.



Figure.1.5:élémentssecondairesdeLesaciersau carbone[8].
Tableau.1.2:élémentssecondairesdelacomposition desaciers[9].

Elément	Rôle principal	Teneur typique	Effetsecondaires
Manganèse(Mn)	améliore la trempabilité, augmente la résistance, aide à désulfurer.	0,3 % à 1,5%.	Il neutralise les effets nocifs du soufre.
Silicium(Si)	désoxydant puissant, améliore la résilience.	: jusqu'à 0,6% dans les aciers au carbone.	En forte teneur, il augmente la dureté mais réduit la ductilité.
Soufre (S)	élément nuisible, rend l'acier cassant à chaud.	généralement < 0,05%.	Peut être toléré ou ajouté en petite quantité dans les aciers d'usage facile (acier au soufre).
Phosphore(P)	améliore la résistance à la corrosion atmosphérique mais rend l'acier cassant à froid.	< 0,05%.	Rend l'acier cassant à froid
Oxygène(O)	Présent sous forme de traces. mécaniques.		Peut former des inclusions ou bulles
azote(N)	Peuvent former des inclusions ou bulles qui affaiblissent les propriétés		Peut affaiblir les propriétés mécaniques s'il est en excès

Bien que les aciers au carbone soient définis par l'absence d'éléments d'alliage à haute teneur, certains peuvent contenir de très faibles quantités des éléments suivants [10]:

- **Cuivre(Cu)**: jusqu'à 0,5% pour améliorer la résistance à la corrosion.
- **Chrome (Cr), Nickel(Ni), Molybdène(Mo)**: présents à l'état de traces dans les aciers au carbone non alliés.

Tableau.1.3: Influence de la composition sur les propriétés [11].

Élément	Effet principal sur l'acier
Carbone(C)	Augmente la dureté et la résistance, diminue la ductilité
Manganèse(Mn)	Améliore la ténacité, neutralise le soufre
Silicium(Si)	Renforce mécaniquement l'acier, rôle de désoxydant
Soufre(S)	Diminue la ténacité, facilite l'usinage
Phosphore (P)	Accroît la résistance à la corrosion, mais rend cassant
Cuivre (Cu)	Améliore la résistance à la corrosion
Oxygène, azote	Peuvent former des inclusions nuisibles

1.5 Élaboration des aciers et du fer

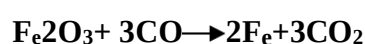
L'élaboration des aciers et du fer constitue une étape essentielle dans l'industrie métallurgique. Elle vise à transformer les minerais de fer bruts en produits métalliques utilisables, tout en maîtrisant leur composition chimique et leurs propriétés physiques et mécaniques.

1.5.1. Matières premières utilisées

L'élaboration de l'acier nécessite plusieurs matières premières fondamentales [12]:

- **Le minerai de fer**: principal composant, généralement sous forme d'hématite (Fe_2O_3) ou de magnétite (Fe_3O_4).
- **Le coke métallurgique**: dérivé du charbon, il sert de combustible et d'agent réducteur.
- **Le fondant (calcaire- CaCO_3)**: permet d'éliminer les impuretés sous forme de laitier.
- **L'air enrichi en oxygène**: favorise les réactions d'oxydation pour la purification du métal.

La première étape de l'élaboration du fer consiste à réduire le minerai de fer dans un haut fourneau à des températures voisines des 2000°C.



- Le fer obtenu est sous forme liquide (fonte), contenant environ 4 à 5% de carbone.
- Le laitier (slag), formé des impuretés (silice, alumine), est séparé du métal.

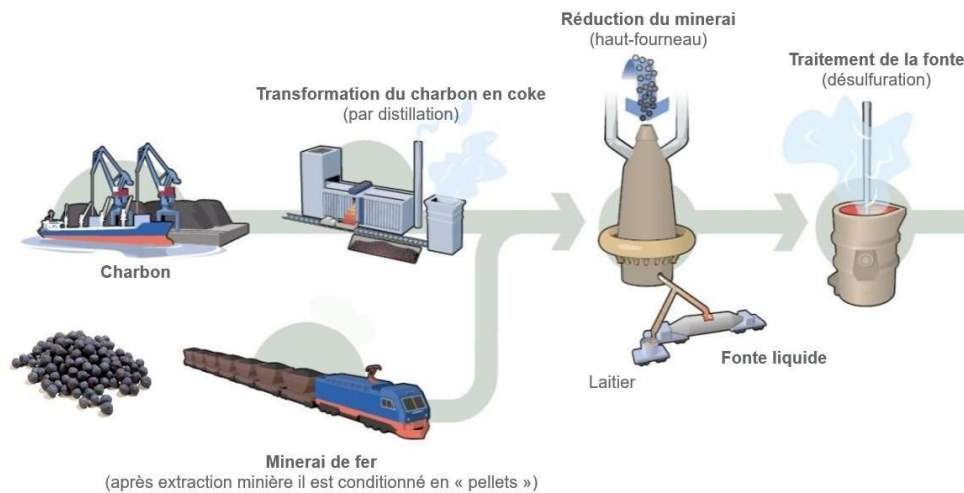


Figure.1.6: Matières premières utilisées dans la fabrication des aciers au carbone [13].

1.5.2. Conversion de la fonte en acier

Pour transformer la fonte en acier, il faut réduire la teneur en carbone et éliminer les impuretés comme le soufre, le phosphore et le silicium.

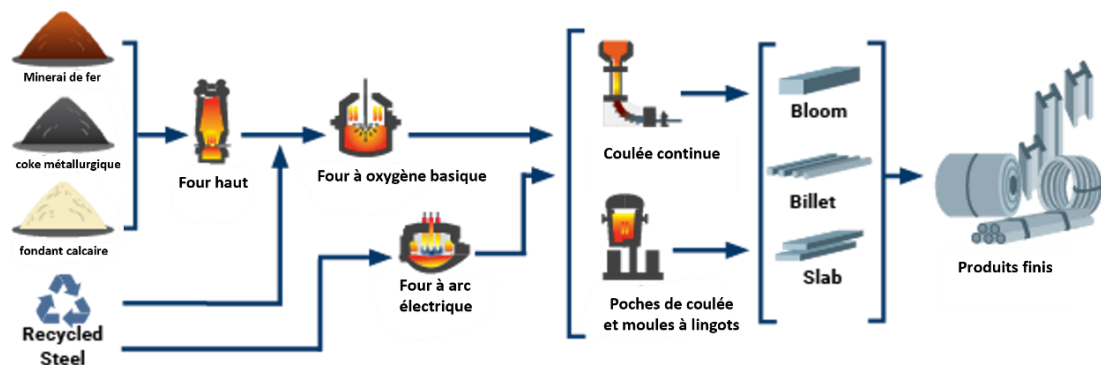
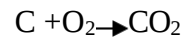


Figure.1.7: Conversion de la fonte en acier. [14].

a) Procédé LDO convertisseur à oxygène

- L'oxygène pur est insufflé à haute pression dans la fonte liquide.

- Le carbone est oxydé en monoxyde ou dioxyde de carbone [15]:



Ce procédé est rapide, économique et permet une production à grande échelle.



Figure.1.8: Procédé LD convertisseur à oxygène [16].

b) Four électrique à arc

- Utilise principalement de la ferraille comme matière première.
- Chauffage par arcs électriques entre des électrodes en graphite.
- Permet un contrôle précis de la composition chimique.
- Idéal pour les aciers spéciaux ou recyclés.

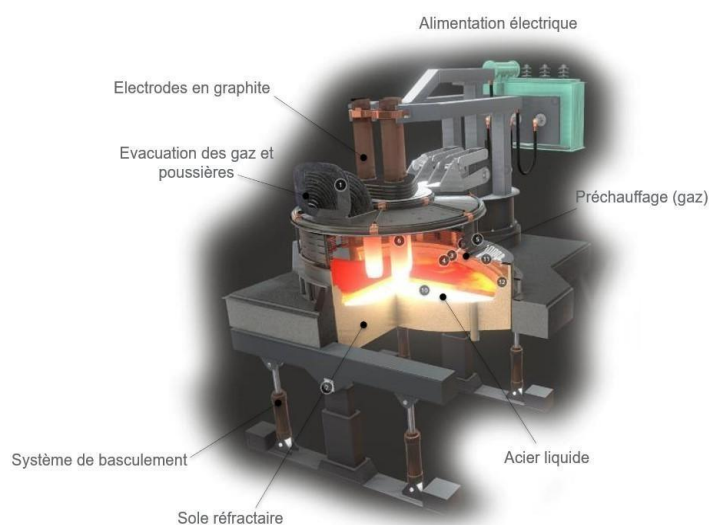


Figure.1.9: Four électrique à arc [17].

1.5.3. Métallurgiesecondaire

Après la conversion, l'acier subit une épuraison secondaire pour améliorer davantage sa qualité:

- Désoxydation: ajout de Si, Al ou Ca.
- Désulfuration: réduction du soufre.
- Traitement sous vide: élimination des gaz dissous (H_2 , N_2 , O_2).
- Alliages d'ajustement : ajout final de Mn, Cr, Ni selon le type d'acier désiré.

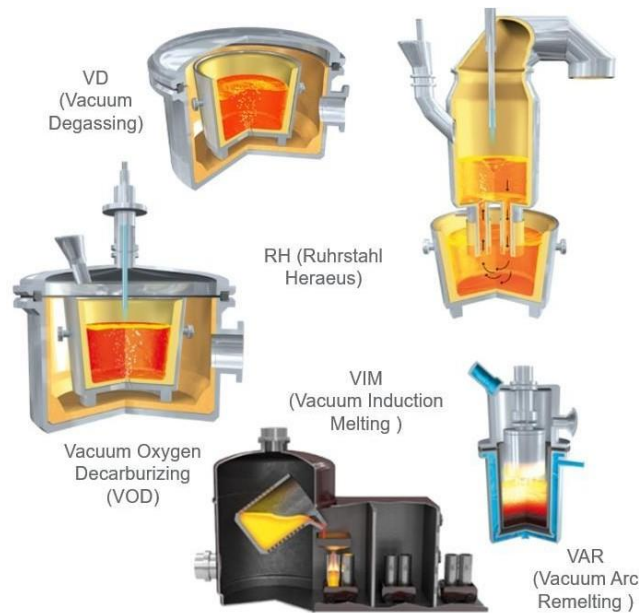


Figure.1.10: Métallurgie secondaire [18].

1.5.4. Couléedel'acier(solidification)

Deux grandes méthodes de coulée sont utilisées:

- **Coulée en lingots:** traditionnelle, l'acier versé dans des moules.
- **Coulée continue:** processus moderne permettant d'obtenir des brames, blooms ou billettes directement.

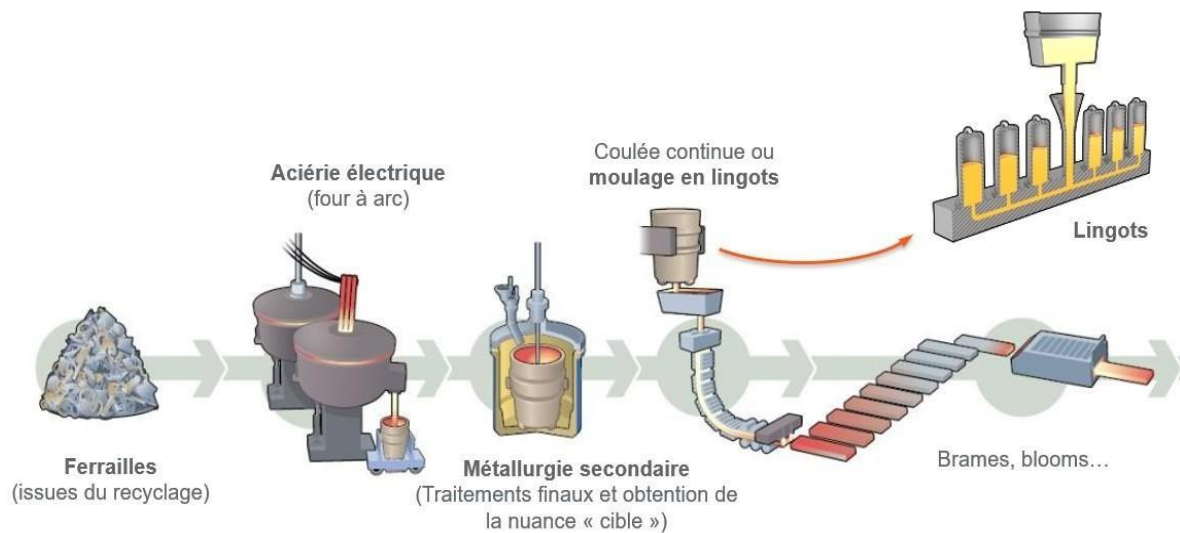


Figure.1.11: Coulée de l'acier (solidification) [19].

1.6 propriétés mécaniques des aciers au carbone

Les propriétés mécaniques des aciers au carbone jouent un rôle fondamental dans leur sélection pour des applications techniques variées. Elles sont influencées par la composition chimique, le traitement thermique, et la microstructure du matériau. Ces propriétés déterminent la capacité de l'acier à résister aux efforts mécaniques tels que la traction, la compression, la flexion, la torsion, ou encore les chocs [20].

1.6.1. Résistance à la traction (résistance mécanique)

La résistance à la traction (R_m) représente la capacité de l'acier à supporter un effort axial de traction sans se rompre.

- Pour les aciers faiblement carbonés: $R_m \approx 370$ à 500 MPa.
- Pour les aciers moyennement carbonés: $R_m \approx 600$ à 800 MPa.
- Pour les aciers fortement carbonés: $R_m > 1000$ MPa (après trempe) [21].

1.6.2. Limité d'élasticité (R_e)

C'est la contrainte maximale que l'acier peut supporter sans déformation permanente. Elle détermine la charge maximale admissible avant déformation plastique.

- Elle varie entre 200 MPa (acier doux) à 900 MPa (acier trempé).

- Une limite d'élasticité élevée est recherchée dans les applications structurelles (bâtiment, charpente, ponts...).

1.6.3. Allongement à la rupture (A%)

Ce paramètre traduit la ductilité du matériau, c'est-à-dire sa capacité à se déformer sans se rompre.

- Un acier faiblement carboné a un allongement $> 25\%$.
- Un acier fortement carboné a un allongement réduit (≈ 5 à 10%).

La ductilité permet de mieux absorber les chocs et les déformations avant la rupture.

1.6.4. Dureté (Hardness)

La dureté désigne la résistance à la pénétration ou à l'rayure. Elle est mesurée par les échelles [21]:

- Brinell (HB),
- Vickers (HV),
- Rockwell (HR).

Elle augmente avec le taux de carbone et après des traitements comme la trempe.

1.6.5. Résilience (tenacité aux chocs)

La résilience correspond à l'énergie absorbée par le matériau avant de se fracturer sous un choc (test de Charpy) [22].

- Les aciers à faible teneur en carbone présentent une bonne résilience, même à basse température.
- Les aciers riches en carbone deviennent plus cassants.

Cette propriété est cruciale dans les secteurs des transports, pipelines, pièces soumises à impact.

1.6.6. Module d'élasticité (E)

Il est quasiment constant pour tous les aciers (≈ 210 GPa), et reflète la raideur du matériau.

1.6.7. Influence du carbone sur les propriétés

L'augmentation de la teneur en carbone influence les propriétés mécaniques de manière suivante [23]:

Tableau.1.4:Influence ducarbone surlespropriétés mécaniques[24].

Teneur en C (%)	Résistance mécanique	Ductilité	Dureté	Résilience
0.05–0.25	Faible	Très bonne	Faible	Élevée
0.25–0.60	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
0.60–1.00	Élevée	Faible	Élevée	Faible

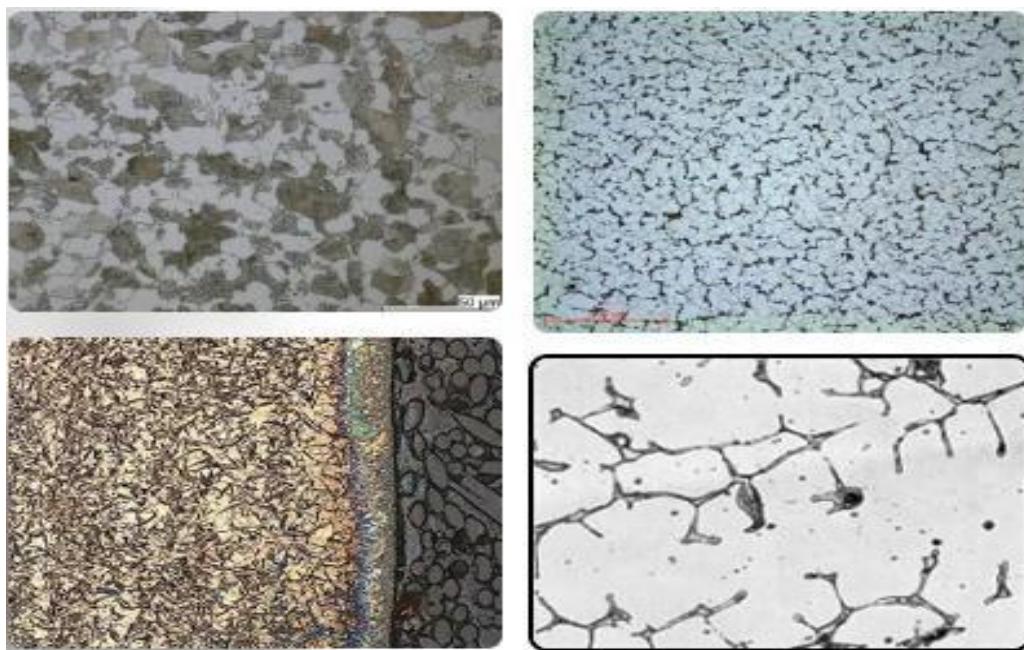
1.6.8. Influence des traitements thermiques

Les propriétés mécaniques peuvent être ajustées par des traitements :

- **Trempe** : augmentée dureté et résistance.
- **Revenu** : diminue la fragilité.
- **Recuit** : améliore la ductilité et facilite l'usinage.

1.7. Constitution des aciers au carbone

La constitution des aciers au carbone fait référence à la composition microstructurale du matériau, c'est-à-dire la manière dont les différents constituants métallographiques sont agencés à l'échelle microscopique. Cette constitution dépend principalement de la teneur en carbone, des éléments d'alliage éventuels, et des traitements thermiques appliqués à l'acier[25].

**Figure.1.12:**Constitution des aciers au carbone[26].

1.7.1. Les phases principales dans les aciers au carbone

a) Ferrite(α)

C'est une solution solide de carbone dans le fer α ($\text{Fe}\alpha$), de structure cubique centrée (BCC), Elle est molle, ductile, et faiblement résistante (faible élasticité).

Ne peut dissoudre qu'une très faible quantité de carbone (0,02 % à 723 °C), et présente dans tous les aciers à faible teneur en carbone.

b) Austénite(γ)

Solution solide de carbone dans le fer γ ($\text{Fe}\gamma$), structure cubique à faces centrées (FCC), et plus tenace et ductile que la ferrite.

Dissout plus de carbone (jusqu'à 2,11 % à 1147 °C) et présente à haute température et stabilisée dans certains aciers alliés.

c) Cémentite(Fe_3C)

C'est un carbure de fer dur et cassant, formé quand le carbone se combine avec le fer, la structure cristalline complexe.

la présente dans les aciers moyens et riches en carbone, et est responsable de la dureté et de la fragilité de l'acier.

d) Perlite

Microstructure lamellaire composée de ferrite et cémentite, et se forme par transformation de l'austénite à 723 °C.

L'offre un bon compromis entre résistance et ductilité et observée surtout dans les aciers au carbone moyen.

e) Bainite

Structure intermédiaire formée lors de refroidissements modérés de l'austénite et mélange de ferrite et de cémentite très fine, et plus résistante que la perlite, mais plus ductile que la martensite.

f) Martensite

Seformelorsd'unrefroidissementrapide(trempe)del'austénite,etlastructureaciculaire très dure et très fragile.

Neprésentepasd'équilibrethermodynamique(structuremétastable),Peutêtrerevenue pour améliorer sa ténacité.

1.7.2. Influence delateneur encarbone sur la constitution

Tableau.1.5: Influence delateneur en carbone sur la constitution [27].

Teneur en C (%)	Constituants dominants
0,02 – 0,25	Ferrite+peu de perlite
0,25 – 0,60	Ferrite+Perlite(équilibre)
0,60 – 1,00	Perlite+ Cémentite
>1,00	Austénite(à chaud) + Cémentite

1.7.3. Diagramme Fer-Carbone et constitution

Le diagramme d'équilibre Fer-Carbone permet de prévoir quelles phases apparaîtront à une température donnée selon la teneur en carbone. Par exemple :

- À 727 °C, un acier eutectoïde à 0,76 % de carbone est constitué uniquement de perlite.
- En dessous ou au-dessus de cette teneur, il y a coexistence de ferrite+perlite (hypo- eutectoïde) ou perlite + cémentite (hyper-eutectoïde).

1.7.4. Influence des traitements thermiques

La constitution peut être modifiée par différents traitements :

- Recuit: favorise la perlite et la ferrite.
- Trempe: favorise la formation de martensite.
- Revenu: transforme la martensite en structure plus tenace (martensite revenue).
- Normalisation: raffinage du grain, meilleure homogénéité.

1.7.5. Importance de la constitution

La compréhension de la constitution permet de [28]:

- Adapterlestraitementsthermiquespouratteindre despropriétés ciblées.
- Choisirl'acierenfonctiondel'application(résistance, usinabilité,soudabilité).
- Anticiperlecomportementenservice (fragilité, usure,résistanceàla rupture).

1.8. Classificationdesaciers

La classification des aciers permet de regrouper les aciers selon leurs propriétés chimiques, mécaniques, et d'usage, afin de faciliter leur sélection et leur application industrielle. Il existe plusieurs façons de classer les aciers au carbone, en fonction de différents critères.

1.8.1. selon la teneur en carbone

C'est la classification la plus courante pour les aciers au carbone :

Tableau.1.6: Classification des aciers selon la teneur en carbone [29].

Type d'acier	Teneur en carbone (%)	Principales caractéristiques
Aciers doux	<0,25 %	Très ductiles, faciles à souder et à former.
Aciers mi-durs	0,25 – 0,60 %	Bon compromis entre résistance et ductilité
Aciers durs	0,60 %	Très résistants et durs, mais peu ductiles.

1.8.2. selon l'application

Les aciers peuvent être classés selon leur destination [29] :

- Aciers de construction : utilisés dans les ouvrages mécaniques ou civils, charpentes, ponts, machines.
- Aciers pour outils : destinés à la fabrication d'outillage (ciseaux, matrices, forets) – généralement riches en carbone.
- Aciers pour ressorts : à haute élasticité.
- Aciers pour tôlerie : facilement déformables à froid.

1.8.3. selon les éléments d'alliage

- Aciers non alliés (ou aciers au carbone) : constitués uniquement de fer et de carbone (avec des impuretés comme Mn, Si, S, P).
- Aciers faiblement alliés : contiennent de faibles quantités d'éléments comme Cr, Ni, Mo (jusqu'à 5 %).

- Aciersfortementalliés:contenantplusde5%d'élémentsd'alliage(ex.aciers inoxydables).

1.9. Diagrammed'équilibrefer-carbone

Le diagramme d'équilibre fer-carbone est un outil fondamental pour comprendre les structures et transformations des aciers et fontes. Il existe deux versions principales :

- Diagramme métastable Fe-Fe₃C (fer-cémentite) : il montre la formation de la cémentite (Fe₃C),uncarburedefercontenant6,67%decarbone.Cediagrammeestutilisépourlesaciers (0,008%à2%C)etlesfontes(2%à6,67%C).Lacémentiteestunephasedureetfragilequi influence fortement les propriétés mécaniques.
- Diagramme stable fer-graphite : dans ce cas, le carbone se présente sous forme de graphite, phasestableetplusdouce.Cediagrammeestobtenuenconditionsderefroissementtrèslent et/ou en présence d'éléments favorisant la graphitisation comme le silicium. Il est important pour certaines fontes spéciales[30].

Lediagrammemontreplusieursphasesimportantesselonlatempératureetlateneurencarbone:

- Ferrite(α):ferpresque pur,phaseductile.
- Austénite(γ): phasestableàhautetempérature,capablededissoudreplusdecarbone.
- Cémentite(Fe₃C) :carburedur.
- Perlite:mélangelamellairedeferriteetcémentite,formélorsdelatransformationeutectoïde à environ 0,8 % C.

Lalimiteentreaciersetfontesestfixéeàenviron2%decarbone.Lediagrammeindiqueaussi les transformations eutectoïde, eutectique et peritectique qui déterminent la microstructure finale des alliages fer-carbone.

En résumé, ce diagramme est essentiel pour prévoir les phases présentes, leur composition et les propriétés mécaniques des aciers et fontes en fonction de leur teneur en carbone et de leur traitement thermique.

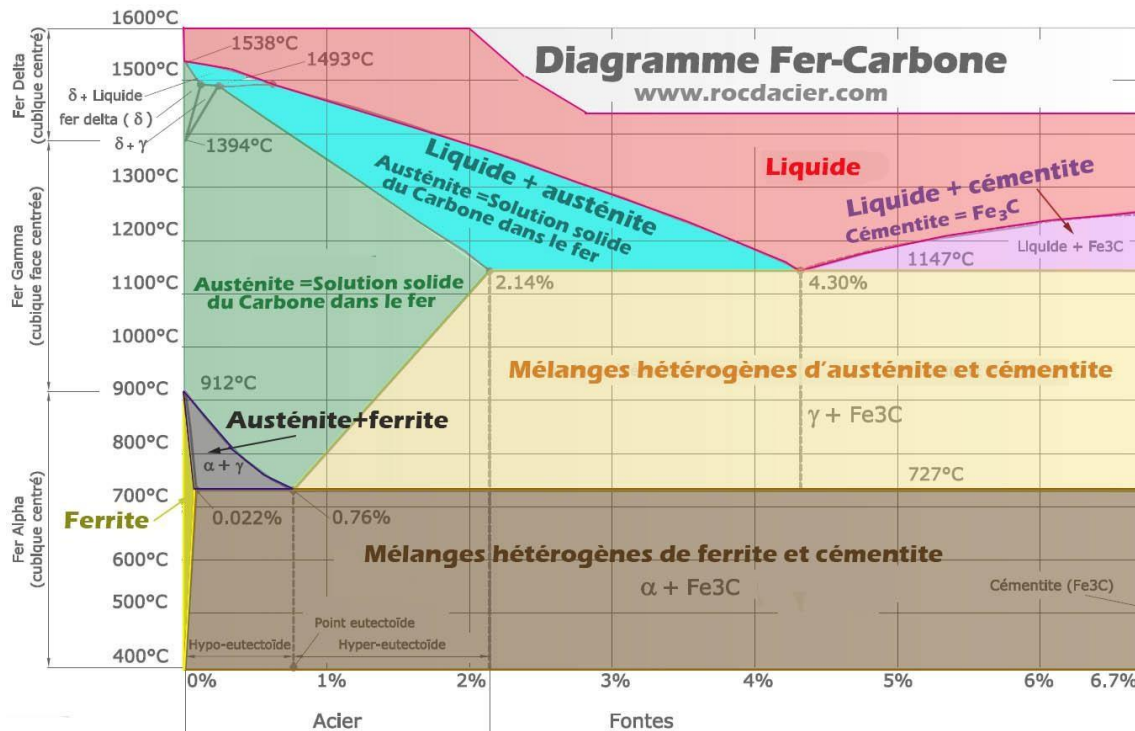


Figure.1.13: Diagramme fer-carbone [31].

1.10. Les nuances d'acier

Le terme « nuances d'acier » désigne les différentes variantes ou qualités d'acier qui se distinguent par leur composition chimique, leurs propriétés mécaniques, ainsi que leurs applications spécifiques. Chaque nuance d'acier est caractérisée par un ensemble précis de propriétés contrôlées, permettant aux industriels de choisir le matériau adapté à leurs besoins.

1.10.1. Définition des nuances d'acier

Une nuance d'acier est un type particulier d'acier défini par [32] :

- Sa composition chimique précise (teneur en carbone, éléments d'alliage, impuretés).
- Ses propriétés mécaniques (résistance, ductilité, dureté).
- Ses propriétés physiques et chimiques (résistance à la corrosion, conductivité).
- Sa destination technique (usage industriel ou commercial).

1.10.2. Importance des nuances

- Permettent d'adapter l'acier à des applications très variées :

- construction, automobile, mécanique, outillage, énergie, etc.
- Garantissent une **qualité constante** grâce à des normes strictes.
- Facilitent la communication entre fabricants, fournisseur et utilisateurs.

1.10.3. Nuances d'acier pour le tubage et les pipelines dans le secteur pétrolier

Dans le secteur pétrolier et gazier, le choix des matériaux utilisés pour le tubage des puits et la construction des pipelines revêt une importance capitale. Les aciers doivent répondre à des exigences strictes en termes de résistance mécanique, de ténacité, de soudabilité ainsi que de résistance à la corrosion, notamment en présence de CO_2 , H_2S ou de fortes pressions. À cet effet, plusieurs nuances d'acier ont été normalisées pour garantir la fiabilité et la sécurité des installations. Ci-dessous sont présentées les principales nuances d'acier couramment utilisées dans ces applications, accompagnées de leurs caractéristiques essentielles.

- **Nuance K55:** L'acier de nuance K55 présente une limite d'élasticité d'environ 379 MPa et une teneur en carbone avoisinant 0,30 pour cent. Il est principalement utilisé pour le tubage dans les opérations de forage. Cette nuance est appréciée pour sa bonne résistance mécanique et sa soudabilité, ce qui en fait un choix courant dans les forages de faible profondeur.
- **Nuance N80:** La nuance N80 possède une limite d'élasticité de 552 MPa et une teneur en carbone d'environ 0,35 pour cent. Elle est utilisée pour le tubage de forage et se distingue par sa résistance élevée et sa bonne ténacité, la rendant adaptée aux environnements exigeants.
- **Nuance L80:** Bien que les données du tableau soient incomplètes, la nuance L80 est généralement caractérisée par une limite d'élasticité de 552 MPa et une teneur en carbone proche de 0,30 pour cent. Elle est utilisée pour le tubage de production et se distingue par sa résistance à la corrosion, notamment en présence de CO_2 , ainsi que par sa bonne ténacité.
- **Nuance P110:** La nuance P110 offre une limite d'élasticité très élevée de 758 MPa et une teneur en carbone avoisinant 0,30 pour cent. Elle est utilisée à la fois pour le tubage de forage et de production. Elle se distingue par sa très haute résistance mécanique et sa bonne ténacité, ce qui la rend idéale pour les puits profonds soumis à des pressions élevées.
- **Nuance X42:** La nuance X42 possède une limite d'élasticité de 290 MPa et une teneur en carbone inférieure à 0,20 pour cent. Elle est couramment utilisée dans les pipelines

pour le transport du pétrole ou du gaz. Elle offre une résistance modérée ainsi qu'une bonne soudabilité.

- **Nuance X52:** Cette nuance présente une limite d'élasticité de 359 MPa et une teneur en carbone également inférieure à 0,20 pour cent. Elle est destinée aux pipelines nécessitant une résistance moyenne et une bonne ténacité, ce qui en fait un bon compromis pour les applications courantes.
- **Nuance X60:** Avec une limite d'élasticité de 414 MPa et une teneur en carbone inférieure à 0,20 pour cent, l'acier X60 est utilisé dans des pipelines à plus haute performance. Il combine résistance élevée, ténacité satisfaisante et bonne aptitude au soudage.
- **Nuance X65:** Cette nuance fournit une résistance mécanique de 448 MPa et une teneur en carbone inférieure à 0,20 pour cent. Elle est utilisée dans les pipelines nécessitant une résistance accrue et une bonne soudabilité, notamment sur de longues distances.
- **Nuance X70:** L'acier X70 affiche une limite d'élasticité de 483 MPa et une faible teneur en carbone, inférieure à 0,12 pour cent. Il est utilisé dans les pipelines à haute performance et offre une très bonne résistance à la corrosion ainsi qu'une excellente ténacité.
- **Nuance X80:** La nuance X80 possède une résistance élevée de 552 MPa pour une teneur en carbone inférieure à 0,12 pour cent. Elle est utilisée dans des pipelines à très haute performance et se caractérise par sa ténacité remarquable et sa fiabilité dans des conditions de forte pression.
- **Nuance X100:** Cette nuance très avancée présente une limite d'élasticité de 690 MPa et une teneur en carbone inférieure à 0,12 pour cent. Elle est conçue pour les pipelines de très haute performance et se distingue par une résistance mécanique maximale et une excellente ténacité, même dans les environnements les plus extrêmes.

Tableau.1.7:propriétéschémiquedesnuancesd'acier[33].

Chemical Composition, mass fraction (%)															
Group	Grade	Type	C		Mn		Mo		Cr		Ni	Cu	P	S	Si
			min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
1	H40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.030	—
	J55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.030	—
	K55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.030	—
	N80	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.030	—
	N80	Q	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.030	—
	R95	—	—	0.45	—	1.90	—	—	—	—	—	—	0.03	0.030	0.45
2	M65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.030	—
	L80	1.0	—	0.43	—	1.90	—	—	—	—	0.25	0.35	0.03	0.030	0.45
	L80	9Cr	—	0.15	0.30	0.60	0.90	1.10	8.00	10.00	0.50	0.25	0.02	0.010	1.00
	L80	13Cr	0.15	0.22	0.25	1.00	—	—	12.00	14.00	0.50	0.25	0.02	0.010	1.00
	C90	1.0	—	0.35	—	1.20	0.25	0.85	—	1.50	0.99	—	0.02	0.010	—
	T95	1.0	—	0.35	—	1.20	0.25	0.85	0.40	1.50	0.99	—	0.02	0.010	—
	C110	—	—	0.35	—	1.20	0.25	1.00	0.40	1.50	0.99	—	0.02	0.005	—
3	P110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.030	—
4	Q125	1.0	—	0.35	—	1.35	—	0.85	—	1.50	0.99	—	0.02	0.010	—

- a. The carbon content for L80 may be increased up to 0,50 % maximum if the product is oil-quenched.
- b. The molybdenum content for Grade C90 Type 1 has no minimum tolerance if the WT is less than 17,78 mm.
- c. The carbon content for R95 may be increased up to 0,55 % maximum if the product is oil-quenched.
- d. The molybdenum content for T95 Type 1 may be decreased to 0,15 % minimum if the WT is less than 17,78 mm.
- e. For EW Grade P110, the phosphorus content shall be 0,020 % maximum and the sulfur content 0,010 % maximum.
- NL = no limit. Elements shown shall be reported in product analysis.

Tableau.1.8 : propriétés mécaniques des nuances d'acier. [34].

Mechanical Properties								
Group	Grade	Type	Total	Yield strength MPa		Tensile	Hardness max.	
			%	min.	max.	MPa	HRC	HBW
1	H40	—	0.5	276	552	414	—	—
	J55	—	0.5	379	552	517	—	—
	K55	—	0.5	379	552	655	—	—
	N80	1	0.5	552	758	689	—	—
	N80	Q	0.5	552	758	689	—	—
	R95	—	0.5	655	758	724	—	—
2	M65	—	0.5	448	586	586	22	235
	L80	1	0.5	552	655	655	23	241
	L80	9Cr	0.5	552	655	655	23	241
	L80	13Cr	0.5	552	655	655	23	241
	C90	1	0.5	621	724	689	25.4	255
	T95	1	0.5	655	758	724	25.4	255
	C110	—	0.7	758	828	793	30	286
3	P110	—	0.6	758	965	862	—	—
4	Q125	1	0.65	862	1034	931	—	—

a. In case of dispute, laboratory Rockwell C hardness testing shall be used as the referee method.

b. No hardness limits, but the maximum variation is controlled by manufacturer acc API 5CT.

1.11. Avantages et inconvénients de l'acier au carbone

L'acier au carbone est l'un des matériaux métalliques les plus utilisés dans l'industrie en raison de ses propriétés mécaniques, sa disponibilité, et son coût relativement faible. Toutefois, comme tout matériau, il présente aussi certaines limites. [32]

1.11.1. Avantages de l'acier au carbone [5]

- **Coût économique faible:** L'acier au carbone est généralement moins coûteux à produire que les aciers alliés ou inoxydables, ce qui en fait un choix économique pour de nombreuses applications.
- **Bonne résistance mécanique:** Selon la teneur en carbone, l'acier peut offrir un excellent compromis entre résistance et ductilité, idéal pour les pièces mécaniques.
- **Facilité de mise en forme :** Les aciers doux et mi-durs sont faciles à travailler par laminage, forgeage, soudage, et usinage.
- **Disponibilité et diversité:** Large gamme de nuances disponibles, adaptées à une multitude d'usages industriels (construction, automobile, outillage).

- **Recyclabilité élevée:** L'acier est recyclable à 100 %, ce qui permet une économie d'énergie et une réduction de l'impact environnemental.

1.11.2. Inconvénientsdel'acierau carbone

- **Sensibilité à la corrosion :** L'acier au carbone est très sensible à la rouille en présence d'humidité, ce qui limite son usage en environnement corrosif sans traitement de surface.
[\[25\]](#)
- **Limitationdespropriétésmécaniques:**Au-delàd'unecertaineteneurencarbone (environ0,6%),lematériau devientdurmaisfragile, avecunefaibleductilité.
- **Usinabilitévariable:** Les aciers àhaute teneur encarbonesont plus difficilesàusiner en raison de leur dureté.
- **Performances limitées à haute température:** L'acier au carbone perd ses propriétés mécaniques à haute température, ce qui restreint son usage dans certaines applications thermiques.
- **Nécessité de traitements complémentaires :** Souvent, il faut appliquer des traitements thermiques (trempe, revenu) ou des revêtements pour améliorer les performances.

1.12 Conclusion :

L'acier, matériau clé des sociétés industrielles, se distingue par sa polyvalence, sa résistance et son coûtcompétitif. L'acier au carbone, représentant 90% de la production mondiale des aciers, offre une solution optimale pour les applications structurelles et mécaniques courantes. Cette étude a permis d'analyser ses propriétés fondamentales, ses procédés de fabrication et ses multiples applications, tout en identifiant ses avantages et limites. Une meilleure compréhension de ce matériau essentiel contribue à optimiser son utilisation dans divers secteurs industriels.

Références bibliographiques

- 1et 4GAYE, H; RIBOUD, P.V Modèle d'optimisation physico-chimique et économique de l'enfournement en acier" 1982. p131-136.
- 2 Stainless Steel Grade Chart, Atlas Steel, 2000.
- 3The Federal Group USA, 2025. <https://www.tfgusa.com/what-is-carbon-steel>.
- 5et6Fatiha.B Etude de l'efficacité des inhibiteurs de corrosion dans deux milieux acides HCl et H2SO4, mémoire magister 2018 P.7.
- 7 IMOA Guide pratique pour le travail des acier inoxydables et carbone 2011. p36.
- 8et 9et 10Berangergénéralités de l'acier. 1996. p22.
- 1112Murry généralité sur aciers 2002. p9.
- 13et 14et 16et 17et 18 et19Article en ligne de David LAVASTRE <https://fr.linkedin.com/pulse/br%C3%A8ve-introduction-concernant-l%C3%A9laboration-des-aciers-david-lavastre>. (consulté le 22/05/2025).
- 15Murry généralité sur aciers 2002. P12.
- 20lebrinisynthèse et étudephysicochimique de nouveaux thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide; thèse de doctorat ,2005, p41.
- 212429DARSOUNI Abderrazek, femodilasition de ductilite des metaux en deformation par traction ,universitébadjimokhtar - annaba,2015.
- 22et 26ABBACI SALAH, Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un acier à haute limite élastique de type X52,université Badji Mokhtar - ANNABA,2022.
- 23et27techniques constitution des alliages fer-carbone ingénieur, technique université de Biskra 2004, p26].
- 25bensaadasience des matériaux I, chapitre diagrammes d'équilibre 2018, p 37.
- 28wikiversité introduction à la science des matériaux- les métaux et alliages ferrux. 2025.].
- 30DIAGRAMME FER -CARBONE [https : // www. Univ – biskra .dz / enseignant / bensaada /4%20Diagramme%20fer%20carbone%2036%20pages.pdf](https://www.Univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/4%20Diagramme%20fer%20carbone%2036%20pages.pdf)]. (consulté le 05/06/2025).

31 cours en ligne sur soudage, https://www.rocdacier.com/les-alliages-binaires-et-diagramme-fer-carbone/#google_vignette. (consulté le 30/05/2025).

32 wikipédia acier au carbone, (consulté le 28/04/2025).

33 et **34** <https://fr.cortensteels.com/news/api-5ct-casing-and-tubing-specification-59299212.html>. (consulté le 28/04/2025).

Chapitre 2

Dégradation des aciers au carbone par la corrosion

sommaire

2.1.	Introduction	26
2.2.	Définition de la corrosion	26
2.3.	L'origine des différents types de corrosion	26
2.4.	Réaction de corrosion	28
2.5.	Les types de corrosion	28
	2.5.1 Corrosion généralisée	29
	2.5.2 Corrosion localisée (zonale)	29
	2.5.2.1 Métallurgie secondaire	30
	2.5.2.2 Coulée de l'acier (solidification)	30
	2.5.2.3 corrosion par piqûres	31
	2.5.2.4 corrosion caverneuse	31
	2.5.2.5 corrosion inter-granulaire	32
	2.5.2.6 corrosion sélective	33
	2.5.2.7 Érosion- corrosion	33
2.6.	Les facteurs de corrosion	33
2.7.	Les différents types de contrôle de la corrosion des équipements et pipelines dans l'industrie	34
	2.7.1 Corrosion chimique (sèche)	34
	2.7.2 corrosion électrochimique (humide)	34
	2.7.3 Corrosion biochimique	35
2.8.	Les moyens de protection contre la corrosion	35
2.9.	Conclusion	35
	Références bibliographiques	

2.1 Introduction

L'industrie pétrolière repose largement sur l'utilisation des aciers au carbone pour la fabrication des équipements critiques tels que les tuyauteries, les cuves de stockage, les réservoirs sous pression et les pipelines. Cette préférence s'explique par le bon compromis entre coût, facilité de fabrication, et propriétés mécaniques satisfaisantes que ces aciers offrent. Toutefois, lorsqu'ils sont exposés à des environnements agressifs comme ceux présents dans le champ pétrolier de Hassi Messaoud, ces matériaux subissent des phénomènes de dégradation, en particulier la corrosion.

La corrosion, en tant que phénomène électrochimique, affecte considérablement la durabilité des installations métalliques. Elle peut entraîner non seulement des pertes économiques importantes dues aux arrêts de production et aux réparations, mais aussi des risques pour la sécurité des personnes et de l'environnement. Ce chapitre vise à étudier de manière approfondie les mécanismes de corrosion qui affectent les aciers au carbone dans le contexte spécifique du champ pétrolier de Hassi Messaoud, en analysant leurs causes, leurs manifestations, les méthodes de contrôle, ainsi que les moyens de protection disponibles.

2.2 Définition de la corrosion

La corrosion est l'interaction physico-chimique entre un métal et son environnement qui entraîne une dégradation du métal et modification de ses propriétés. Selon le milieu, la corrosion est dite humide, lorsqu'elle a lieu dans des solutions et sèche quand elle apparaît dans un environnement gazeux [1] [2].

2.3 L'origine des différents types de corrosion

La corrosion n'est pas un phénomène uniforme. Elle peut se présenter sous différentes formes, en fonction de l'environnement, de la nature du matériau, du traitement de surface et de la présence ou non d'impuretés ou de contraintes mécaniques. Comprendre l'origine des différents types de corrosion est une étape fondamentale pour établir un diagnostic fiable et mettre en œuvre des solutions de prévention ou de réparation efficaces.

Dans les installations pétrolières, les aciers au carbone sont exposés à plusieurs facteurs de dégradation : humidité, gaz acides comme le H_2S (sulfure d'hydrogène), CO_2 (dioxyde de carbone), chlorures, variations de température et pression. Tous ces paramètres interagissent et influencent la manière dont la corrosion va se manifester.

Les principales origines des différents types de corrosion peuvent être résumées comme suit [3]:

Conditions environnementales : La présence d'eau, d'oxygène dissous, de sels minéraux et de gaz corrosifs accélère les réactions d'oxydation du fer. Par exemple, un milieu humide contenant des chlorures favorise la corrosion par piqûres.

Caractéristiques métallurgiques de l'acier : La microstructure du matériau, ses impuretés internes(soufre,phosphore),ainsiquelestraitementsthermiquestsubis,peuventcréerdeszones anodiques et cathodiques propices à la corrosion galvanique.

Hétérogénéité des matériaux : Lorsque deux métaux différents sont en contact et immergés dans un électrolyte, une pile galvanique peut se former et accélérer la dégradation de l'un des métaux (celui le plus anodique).

Contraintes mécaniques ou thermiques : Les contraintes résiduelles ou externes peuvent provoquer des fissures, qui servent de points d'attaque privilégiés pour certains types de corrosion localisée, comme la corrosion sous contrainte.

Dans les zones pétrolières, la complexité des fluides en présence (mélange d'eau, d'hydrocarbures,desable,etdegazacides)rendl'étudedel'originedelacorrosionencoreplus importante. Ces fluides sont souvent corrosifs à différents niveaux (chimique, biologique, physique), d'où la nécessité de bien caractériser chaque facteur[4].



Figure.2.1:photod'aciersaucarbonebruteavant utilisation.

Pp

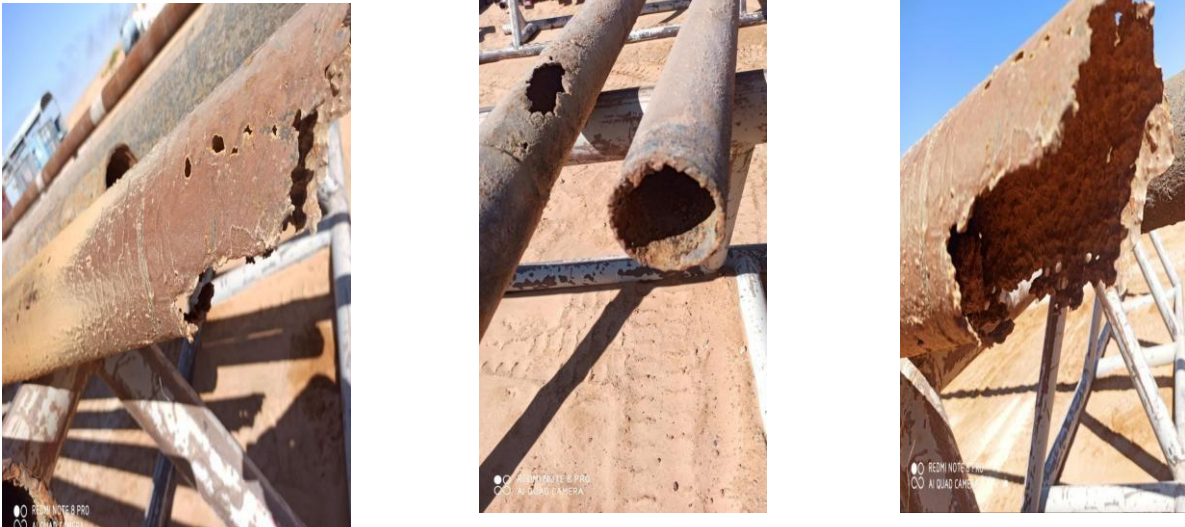
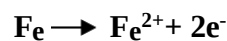


Figure.2.2:photod'aciersaucarbonecorrodé après l'utilisation.

2.4 Réactiondecorrosion

La corrosion, en tant que phénomène électrochimique, résulte d'un ensemble de réactions se produisant entre le métal (ici, l'acier au carbone) et son environnement. Ces réactions se déroulent à la surface du matériau, et leur compréhension repose sur les principes fondamentaux de l'électrochimie.

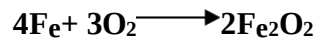
Dans une réaction typique de corrosion du fer, on distingue deux demi-réactions[5]: Réaction anodique (oxydation) :



Réduction cathodique:



La réaction globale de corrosion du fer en présence d'oxygène et d'eau est donc:



2.5 Les types de corrosion

La corrosion des aciers au carbone dans les installations pétrolières ne se manifeste pas toujours de la même manière. En effet, selon la nature de l'environnement, la géométrie des pièces, la composition du fluide circulant, et les conditions de fonctionnement (température, pression, turbulence), différents types de corrosion peuvent apparaître. Une bonne

compréhensiondecestypesestessentiellepouranticiperlesdégradations,orienterles inspections et mettre en place des stratégies de prévention efficaces.

lesformesdecorrosionlespluscourantesdanslessystèmesutilisantdel'acieraucarbonate[5]:

2.5.1. Corrosiongénéralisée

Ils'agitdelaformelaplussimpleetlaplusconnuedecorrosion.Elleaffectel'ensemble delasurfacemétalliquedemanièrerelativementhomogène.La pertedemétalest progressive, régulière, et relativement prévisible[6].



Figure.2.3:schémadecorrosion uniforme[7].

2.5.2. Corrosionlocalisée(zonale)

Ellesecaractérise parl'apparitiondepetitstrousprofonds(piqûres)trèslocalisés,alors quele restedelasurfacepeutsembler intact.On distingueplusieurs types,àsavoir[8]:



Figure.2.4:Schémadecorrosionparpiqûres[9].

2.5.2.1. Corrosiongalvanique

Elle se produit lorsqu'il y a contact entre deux métaux de natures différentes, en présence d'un électrolyte. Lemétalleplusanodique(moinsnoble)secorrodeauprofitdumétal cathodique (plus noble)[9].

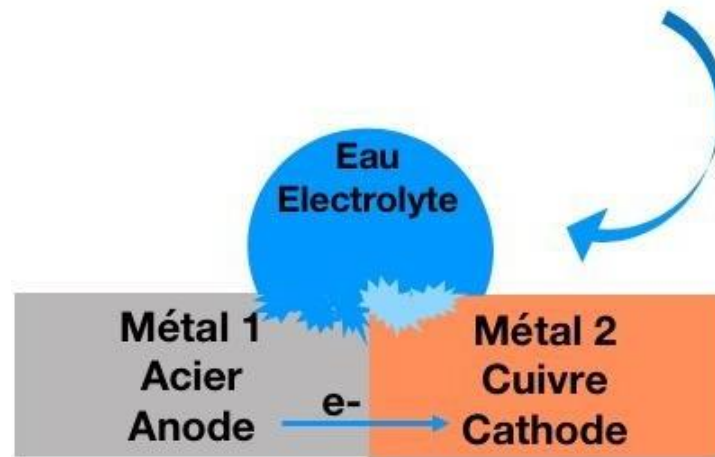


Figure.2.5:corrosiongalvanique[9].

2.5.2.2. Corrosionsouscontrainte(CSC)

C'est une forme de corrosion localisée qui survient en présence simultanée de contraintes mécaniques (internes ou externes) et d'un milieu corrosif[9].

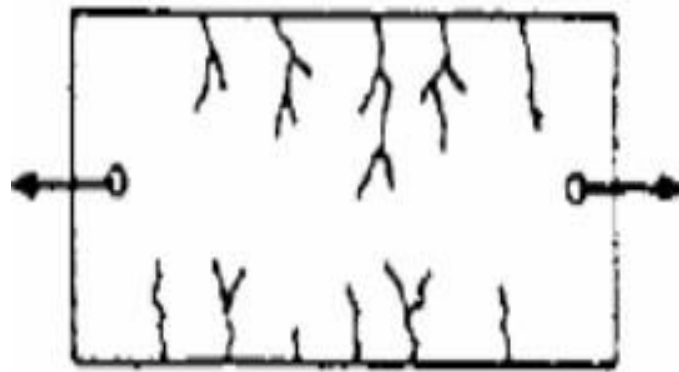


Figure.2.6:Schémadecorrosionsouscontrainte[9].

2.5.2.3. corrosionparpiqûres

La corrosion par piqûres est une forme de corrosion localisée très agressive qui se manifesteparlaformationdepetitstrousprofondssurlasurfacedumétal.Cetypedecorrosion est particulièrement dangereux, car il peut passer inaperçu dans ses phases initiales, tout en causant une défaillance rapide du matériau.

Elle survient généralement en présence d'ions chlorure (Cl^-), notamment dans les environnementsmarinsoulesinstallationsindustriellesutilisantdel'eausalée.Cephénomène est courant sur les aciers inoxydables lorsque le film passif de protection est altéré[10].

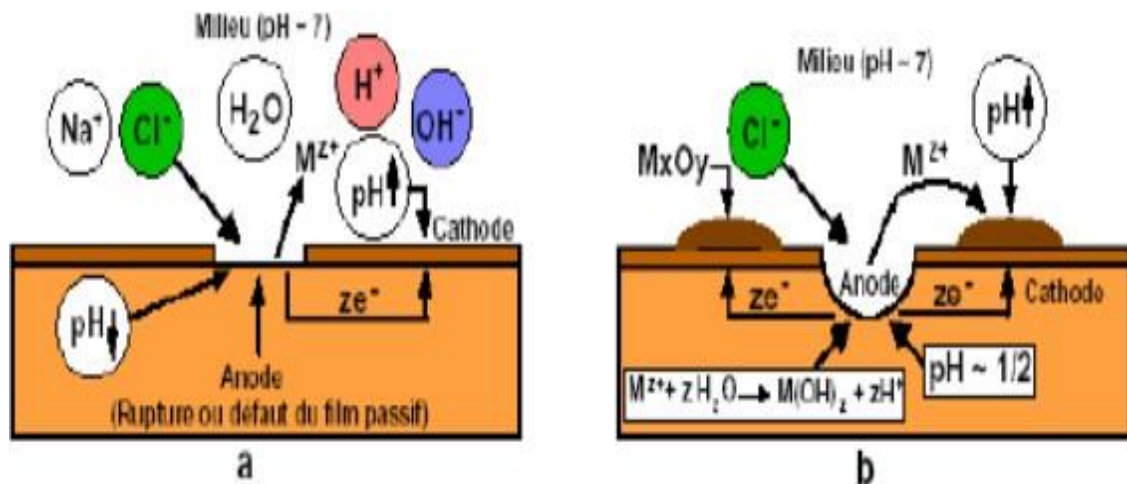


Figure.2.7:corrosionparpiques[11].

2.5.2.4. corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse est un type de corrosion localisée qui se produit dans des zones confinées, mal ventilées ou difficilement accessibles, telles que les interstices, les joints ou les fissures.

Elle résulte d'une différenciation entre l'environnement à l'intérieur de la cavité (pauvre en oxygène, plus acide) et celui à l'extérieur, ce qui génère une cellule électrochimique propice à la corrosion.

Cet type est souvent difficile à détecter et peut causer des dommages importants dans les zones critiques des équipements[11].

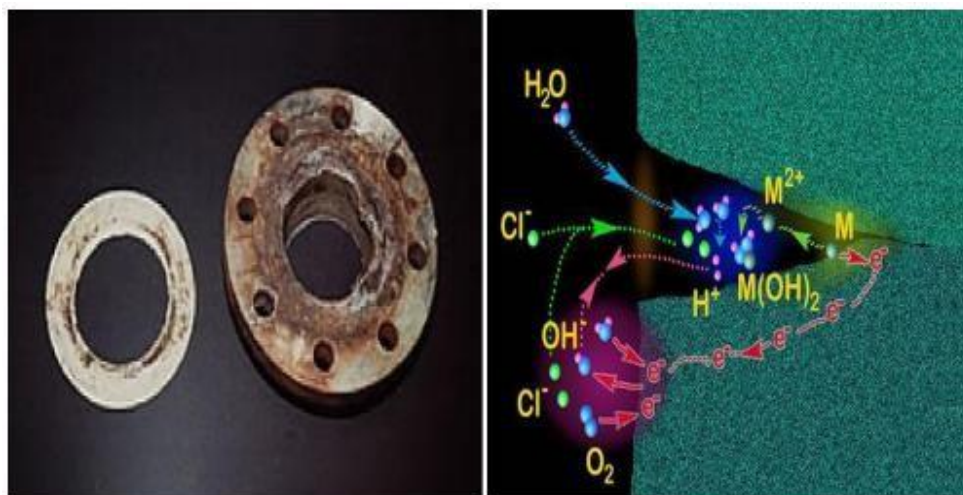


Figure.2.8:aspectetmécanismed'attaquedelacorrosioncaverneuse[11].

2.5.2.5. corrosioninter-granulaire

Lacorrosioninter-granulaireestuneattaquelocaliséequisedéveloppelelongdesjoints de grains du métal, affaiblissant ainsi la structure interne sans affecter les grains eux-mêmes.

Ce phénomène se produit généralement dans les aciers inoxydables exposés à des températures comprises entre 450 °C et 850 °C, favorisant la précipitation de carbures de chrome aux joints de grains. Cela appauvrit les zones adjacentes en chrome, les rendant vulnérables à la corrosion.

Lacorrosioninter-granulairepeutprovoquerdesfissuresetdesrupturesimprévuesdans les structures métalliques[11].

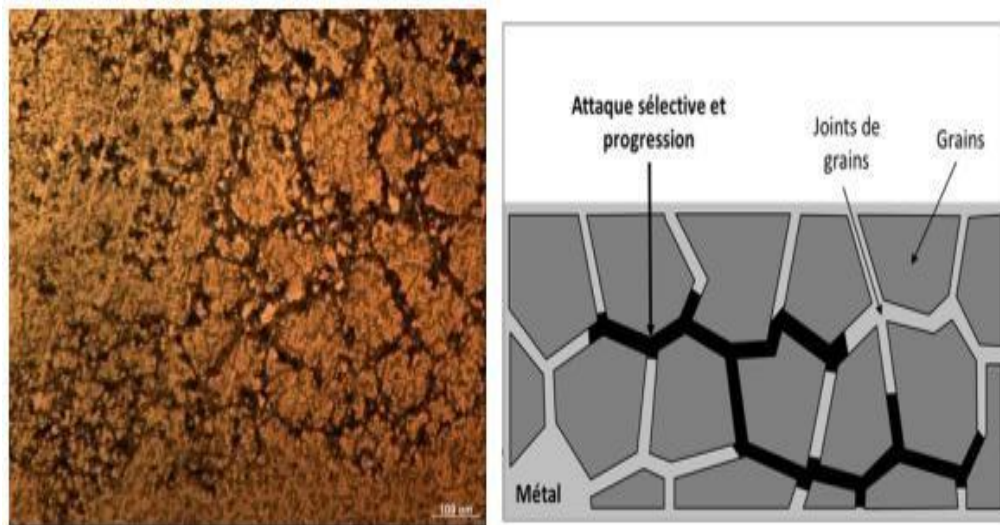


Figure.2.9:présentationschématiquedelacorrosionintergranulaire[11].

2.5.2.6. corrosion sélective

Lacorrosionsélectivedésigneleprocessusparlequelunouplusieursélémentsd'un alliagesontpréférentiellementdissous,laissantunestructureappauvrie mécaniquement.

Unexemple courant est ledézingage, où le zinc est retirésélectivement d'un laiton, ne laissant qu'un réseau poreux de cuivre.

Ce type de corrosion est particulièrement problématique car il altère la composition chimique du matériau sans signe apparent à la surface, compromettant ainsi ses propriétés mécaniques[12].

2.5.2.7. Érosion-corrosion

L'érosion-corrosion résulte de l'effet combiné d'un processus de corrosion (chimique ouélectrochimique)etdel'actionmécaniquedefluidesenmouvementrapideoucontenantdes particules solides.

Elle est fréquente dans les systèmes de tuyauterie, les pompes et les vannes, où le frottement ou la turbulence peut éliminer les couches protectrices du métal, accélérant ainsi la corrosion.

Pour limiter ce phénomène, il est nécessaire d'optimiser à la fois le design hydraulique des équipements et le choix des matériaux résistants à l'érosion[12].



Figure.2.10:représentationschématiqueduphénomènedecorrosion-érosion[13].

2.6 facteursdecorrosion

La corrosion est un phénomène complexe influencé par un grand nombre de facteurs physico-chimiques, mécaniques et biologiques. Dans les environnements industriels, en particulier dans les champs pétroliers, ces facteurs interagissent souvent entre eux, rendant le phénomène difficile à prédire et à maîtriser. Connaître ces facteurs permet de mieux anticiper les risques de dégradation et d'adopter des stratégies de prévention efficaces[14].

Tableau.2.1:principauxfacteursdecorrosion[15].

Milieu d'attaque	Facteurs dépendant du temps
– Concentration des réactives impuretés pH, température, pression présence des bactéries	– Composition chimique de métal - procédé d'élaboration impuretés – Élément d'addition – Traitement thermique
Condition d'emploi	Temps d'expositions
– Etat de surface – Moyenne de protection	– Vieillessement des matériaux – Variations des conditions opératoires (température). – Formation de dépôt de corrosion

2.7 différentstypesdecontrôledelacorrosiondeséquipementsetpipelines dans l'industrie

Selonlanaturedel'environnementtlecomportementdumétal,onpeutdéfinirle type decorrosion.Engénérale,onpeutrésumerlesdifférentsprocessusdelacorrosioncommesuit:

2.7.1. Corrosionchimique(sèche)

La corrosion chimique, que l'on appelle également corrosion sèche, se produit en l'absence d'un électrolyte liquide. Elle résulte généralement d'une réaction directe entre le métal et un gaz corrosif tel que : l'oxygène, le dioxyde de soufre ou les vapeurs acides, à des températures souvent élevées.

Cetypedecorrosion est fréquent dans lesinstallations àhautetemérature, commeles chaudièresoulesturbines,oùlesmétauxréagissentaveclesgazenvironnantspourformerdes couches d'oxydes. Ces couches peuvent, selon leur nature, soit protéger temporairement la surface,soitsefissurer et s'écailler, exposantlemétalsous-jacent àuneattaquecontinue[16].

2.7.2. corrosionélectrochimique(humide)

Lacorrosionélectrochimiqueestlaformelaplusrépanduedanslessystèmesindustriels où un métal entre en contact avec un électrolyte conducteur (souvent une solution aqueuse). Ellereposesuruneréactiond'oxydoréductiondanslaquelleunezonedumétalagitcommeune anode (où se produit l'oxydation) et une autre comme cathode (où a lieu la réduction).

Ce type de corrosion est typique dans les pipelines, les réservoirs et les échangeurs de chaleur. IlpeutêtreaggravépardesfacteurscommelepH,latempérature, laconcentrationen ions agressifs (notamment chlorures), ou encore la présence d'oxygène dissous[17].

2.7.3. Corrosionbiochimique

La corrosion biochimique, aussi appelée corrosion microbienne ou MIC (*MicrobiologicallyInfluenced Corrosion*), est provoquée par l'activité de micro-organismes présents dans les milieux humides ou aqueux. Ces micro-organismes, comme les bactéries sulfato-réductrices (SRB), peuvent altérer l'environnement électrochimique au contact du métal, accélérant ainsi sa dégradation.

Ce type de corrosion est particulièrement redouté dans les pipelines transportant du pétrole ou de l'eau, dans les zones stagnantes ou mal nettoyées, où les biofilms bactériens peuvent se développer sur les surfaces métalliques[18].

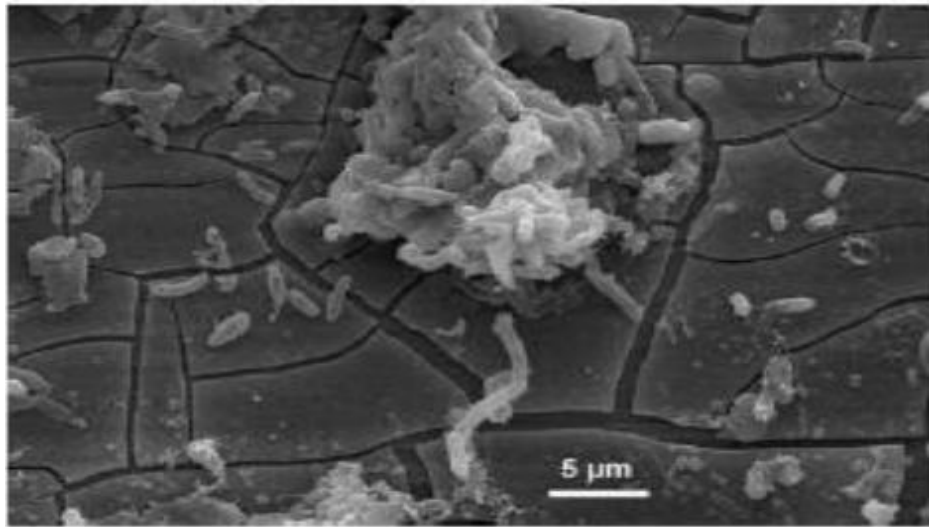


Figure.2.11:Exempledephénomènebactérienresponsabledelacorrosion[18].

2.8moyensdeprotectioncontrelacorrosion

Dans des environnements aussi sévères que ceux rencontrés dans les installations pétrolières, il est impératif d'adopter une approche proactive pour limiter les effets destructeurs de la corrosion sur les aciers au carbone. Plusieurs méthodes de protection existent, chacune adaptée à un contexte spécifique, et leur efficacité dépend de la bonne compréhension du type de corrosion, des conditions d'exploitation, et des contraintes économiques.

Tableau.2.2: moyens de protection contre la corrosion [19].

Type de protection	Moyens utilisés	Avantages	Inconvénients
Protection physique (revêtement)	- Peintures industrielles (époxy, polyuréthane, zinc) - Revêtements métalliques (galvanisation, aluminisation, cadmiage, nickelage) - Revêtements polymères (tuyauteries enterrées)	- Coût relativement faible - Facilité d'application	- Nécessite une bonne préparation de surface - Entretien périodique requis
Protection chimique (inhibiteurs)	- Inhibiteurs d'adsorption - Inhibiteurs de passivation - Inhibiteurs mixtes Exemples: injection dans les pipelines, réservoirs	- Efficace même dans les zones internes et complexes	- Dosage précis requis - Suivi chimique rigoureux nécessaire
Protection électrochimique	- Anodes sacrificielles (zinc, magnésium, aluminium) - Courant imposé (polarisation cathodique)	- Très utilisée pour les pipelines enterrés et structures offshore	- Coût élevé - Nécessite une surveillance continue
Conception et choix des matériaux	- Aciers inoxydables ou faiblement alliés - Éviter les couples galvaniques - Formes optimisées pour l'écoulement	- Réduction du risque de la conception - Diminue le besoin de protections externes	- Coûteux à l'installation - Nécessite une planification rigoureuse
Entretien et surveillance	- Inspections visuelles et mesures d'épaisseur - Remplacement des anodes - Analyses chimiques - Nettoyage des surfaces	- Allonge la durée de vie - Permet de détecter la corrosion précoce	- Nécessite un suivi constant - Ne prévient pas la corrosion, mais en contrôle l'évolution

2.9 Conclusion :

Les aciers au carbone, largement utilisés dans l'industrie pétrolière pour les équipements critiques, offrent un excellent rapport coût/performance. Cependant, leur exposition aux environnements agressifs comme celui du champ pétrolier de Hassi Messaoud entraîne des

phénomènes de corrosion aux conséquences économiques et sécuritaires majeures. Ce chapitre a permis d'analyser les mécanismes électrochimiques de cette dégradation, ses manifestations caractéristiques, ainsi que les différentes approches de contrôle et de protection disponibles. Une compréhension approfondie de ces phénomènes est essentielle pour optimiser la durabilité des installations et minimiser les risques associés.

Références bibliographiques

1 BAKOURI, Hichem el étude d'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone au milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique [mémoire de master Oujda :université Mohamed premier , facultés de sciences 2000.

2Azeddine, A. (2017). Etude du comportement a la corrosion de l'Aluminium dans différents milieux, Mémoire de Master, Université de Batna2, Département de GénieMécanique, Algérie.

3Landolt, D. (2003). Corrosion et Chimie de Surfaces des métaux, Traité des Matériaux 12, Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

4Chiter, M.F. (2015). Etude théorique d'inhibiteurs verts de corrosion : Adsorption de la 8-Hydroxyquinolene sur surfaces d'Aluminium. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Science et Génie des Matériaux, Toulouse.

5E, Hicham Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique, Mémoire d'Etudes Supérieures Approfondies, , Université de Oujda (Maroc), 2000.

6 et7et17Corrosion des métaux, ENSPM formation industrie - IFP training, France, 2005.

8et9 et18et19 Francois R., Corrosion and deposits course, Master of science in oil and gas production engineering, France, 2005.

10et11Chinogurei, Clinton - propriétés inhibitrices de l'huile de cade sur la corrosion de l'aluminium , diplôme de Master en Génie Chimique ,Université Badji Mokhtar-ANNABA, 2018.

12et13Faiza K., Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieuxmultiphasiques (eau, huile et gaz), Mémoire de Magister, Université de Boumerdès (Algérie) 2008.

14et15 P.BOUMERSBACH, C.DOUMONT,J.PMILLET electrochemical characterization of a corrosion inhibitor :influence of temperature on the inhibition mechanism."207th meeting of the electrochemical society, 15-20 Mai 2005, Quebec city (Canada).

16Einar B., Corrosion and protection, Norway, 2003.

Chapitre 3

Partie expérimentale

sommaire

3.1.	Introduction	37
3.2.	Matériaux utilisés	37
	3.2.1 Aciernuance P110	37
	3.2.2 Aciernuance N80	38
3.3.	Matériels utilisés	39
	3.3.1 Duromètre	39
	3.3.2 Microscope optique	40
	3.3.3 Microscope confocal Leica DCM 3D	41
	3.3.4 Spectromètre de fluorescence des rayons X (FRX)	42
3.4.	Résultat et interprétations	43
	3.4.1 l'évolution de la diagonale	43
	3.4.2 Évolutions de la dureté	45
	3.4.3 Observation microscopique	47
	3.4.4 Études de la rugosité	50
3.5.	Conclusion	52

3.1 Introduction

Nousexposonsici la sectionexpérimentale denotreétude, quiinclut: • leprélèvement d'échantillonssurdestubesdeforagepétrolierenacieraucarbone(nuancesP110et N80),

- lacaractérisationdeleurcompositionchimique,
- laconduitedesessaismécaniques.

Cette analyse comparative a examiné deux nuances d'acier : **N80** et **P110**, dans leurs états brut et corrodé. Tous les essais ont été réalisés à l'aide d'équipementss spécialisés fournis par l'Unité de Recherche des Matériaux Émergents et l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision, au niveau de l'université Sétif 1.

3.2 Matériaux utilisés:

3.2.1 Acier nuance P110:

C'est un acier à haute résistance utilisé principalement dans l'industrie pétrolière pour les tubes de forage et de casing (résistance minimale à la traction de 110 ksi, soit ~758 MPa)



Figure 3.1: échantillons P110; (A) corrodé, (B) brute

Le **tableau 3.1** regroupe les propriétés mécaniques de l'acier P110.

Tableau 3.1: propriétés mécaniques.

Propriété	Valeur	Unité
Limited' élasticité	Entre 758 et 965	MPa
Résistance à la traction min.	≥ 862	MPa
Allongement (élongation)	≥ 15	%

La composition chimique du grade P110 a été analysée au moyen de la méthode XRF (Fluorescence des Rayons X), les résultats obtenus étant résumés dans le [tableau 3.2](#).

.Tableau3.2: Composition chimique de l'acier P110.

No.	Composant	Résultat(mass%)
1	Na	0.965
2	Mg	0.466
3	Al	0.518
4	Si	1.07
5	P	0.299
6	S	0.232
7	K	0.100
8	Ca	0.531
9	Cr	0.240
10	Mn	1.45
11	Fe	94.1
12	C	0.029

3.2.2 AciernuanceN80:

Le grade N80 constitue un acier à résistance mécanique modérée, largement employé dans le domaine pétrolier pour les applications de tubage et de forage. Selon les normes en vigueur, il présente une limite d'élasticité minimale de 80 ksi, équivalente à environ 550 MPa.

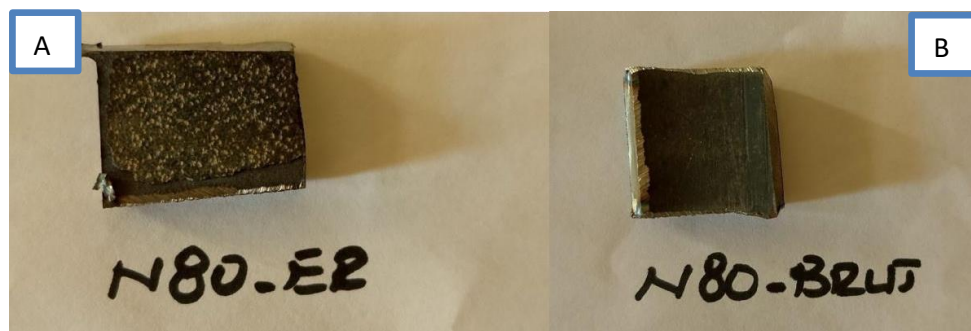


Figure3.2: échantillons N80 corrodé(A), brute(B).

Le [tableau 3.3](#) présente un récapitulatif des propriétés mécaniques caractéristiques de l'acier du grade N80, telles que la résistance à la traction, la limite d'élasticité, l'allongement à la rupture ainsi que le module d'Young, mesurées conformément aux normes en vigueur dans le domaine pétrolier.

Tableau3.3: Propriétés mécaniques de l'acier N80.

Propriété	Valeur	Unité
Limite d'élasticité	Entre 552 et 758	MPa
Résistance à la traction minimale	Environ 689	MPa
Allongement	Environ 18	%

Afin de caractériser la composition élémentaire des aciers N80, une analyse par fluorescence des rayons X (XRF) a été réalisée. Les données issues de cette méthode sont résumées dans le tableau 3.4.

Tableau3.4:Compositionchimiqued’aciernuanceN80.

No.	Composant	Résultat(mass%)
1	Na	0.859
2	Mg	0.218
3	Al	0.390
4	Si	0.777
5	P	0.0717
6	S	0.196
7	K	0.131
8	Ca	0.196
9	Cr	0.457
10	Mn	1.04
11	Fe	95.7
12	C	0.035

3.3 Matérielsutilisés:

Danslecadrede cetteétudeexpérimentale,unensemble d’équipementsetd’instruments spécialisés a été mobilisé afin de caractériser les propriétés physico-chimiques et mécaniques desaciersN80etP110. Ainsi,plusieurstechniquesanalytiquesontétéemployéespourobtenir des données fiables et pertinentes sur la composition chimique, la microstructure ainsi que les performances mécaniques de ces matériaux. Les principaux dispositifs utilisés dans ce travail sont présentés ci-après.

3.3.1 Duromètre

Dans le cadre de cette étude, des essais de dureté ont été réalisés sur des échantillons d’acier N80 et P110, dans leurs états brut et corrodé. Ces analyses visaient à évaluer les propriétés mécaniques locales des matériaux, ainsi que l’influence de la corrosion sur leur résistance. Les mesures ont été effectuées à l’aide d’un microduromètre QNESS Q10, un dispositif reconnu pour sa précision et sa fiabilité dans les tests de microdureté.

Lesystèmeestéquipéd’unetêtede pénétrationautomatiséepermettantd’appliquerdes chargescontrôléesavecunegrandeexactitude,d’unmicroscopenumériqueintégréfacilitant

l’observation directe et la mesure des empreintes laissées par l’indentation, ainsi que d’un plateau motoriséassurantunpositionnementprécisdeséchantillons. Le logiciel Qpix control,

accessible via un écran tactile, a permis de configurer les paramètres d'essai, d'enregistrer automatiquement les résultats obtenus et de les exporter sous format exploitable.

Les essais ont été conduits selon la méthode Vickers, avec un temps de maintien de l'indentation fixé à 15 secondes, conformément aux normes couramment utilisées. Trois niveaux de charge ont été testés : 3 N, 5 N et 10 N, afin d'observer l'évolution de la dureté en fonction de l'intensité de la sollicitation appliquée. À chaque fois, les diagonales des empreintes (2a) ont été mesurées soigneusement, permettant ainsi de calculer la valeur de dureté correspondante. Cette approche méthodique garantit une bonne reproductibilité des résultats et facilite une comparaison fiable entre les différents états des aciers analysés.



Figure3.3: Microduromètre QNESS.

3.3.2 Microscope optique:

L'observation microstructurale des échantillons a été réalisée à l'aide d'un microscope optique universel Euromex – modèle OXION, dont la configuration est illustrée sur la figure. Ce dispositif, conçu pour les applications avancées en métallographie, biologie et science des matériaux, offre une excellente qualité d'image grâce à ses composants optiques haut de gamme et à son système d'éclairage précis. Il permet ainsi une analyse détaillée des structures cristallines après attaque chimique.

Le microscope se distingue par plusieurs caractéristiques essentielles : une tête triloculaire inclinée à 30°, facilitant une observation ergonomique et permettant la connexion d'une caméra numérique pour la capture et l'archivage des images ; un système d'éclairage LEDpuissantetréglable,particulièrementadaptéàl'analyseenlumièreréfléchie,couramment utiliséeenétudedesmétaux;unegammed'objectifs(4xà100x)adaptéeàlavisualisationdes microstructuresmétalliques;uneplatinemécaniqueéquipéededéplacementsmicrométriques, assurantunbalayageprécisetcontrôledelasurfacedel'échantillon;etunsystèmedemiseaupoint coaxial (macro/micro), garantissant une mise au point fine et stable. L'ensemble de ces fonctionnalités rend ce microscope particulièrement pertinent pour l'étude comparative des aciers N80 et P110, dans leurs états brut et corrodé.



Figure3.4:Microscope universelEuromexdetype OXION.

3.3.3 MicroscopeconfocalLeicaDCM3D:

LeLeicaDCM3Destunmicroscopeoptiquenumériquedehauteperformancequicombine deux technologies complémentaires : la microscopie confocale à balayage (CLS – Confocal Laser Scanning)etl'interférométrieàlumièreblanche(WLI–WhiteLightInterferometry).Ce système permet une analyse non destructive en trois dimensions des surfaces avec une résolutionverticaleen nanométrieetuneobservationdétailléede leurmorphologie.Grâceàces capacités avancées, il s'avère particulièrement pertinent pour la caractérisation de matériaux techniquesdanslesdomainesdelamétallurgie,destraitementsdesurface,del'étudedel'usure ou de la corrosion.

Parmi ses principales fonctionnalités figurent l'acquisition d'images en 2D ainsi que la reconstructiontridimensionnelledelatopographiedesurface.L'utilisationconjointedesmodes

confocal et interférométrie permet d'analyser une large gamme de surfaces, qu'elles soient lisses ou rugueuses. La résolution verticale sub-nanométrique offre la possibilité de détecter des défauts microscopiques tels que des érosions localisées. Le système intègre un balayage motorisé pour une acquisition automatique des données, ainsi qu'une caméra haute résolution couplée à des objectifs interchangeables adaptés aux différentes configurations expérimentales. Le logiciel LeicaMap associé permet un traitement avancé des images, l'extraction de profils, la mesure de paramètres de rugosité (tels que R_a , R_z , S_a), ainsi que l'évaluation du volume de matière perdue sur les surfaces étudiées.

Dans le cadre de notre travail, ce microscope a été utilisé pour analyser la topographie des surfaces internes de tubes en acier au carbone (nuances N80 et P110), à la fois dans leur état brut et corrodé. Il a permis de quantifier la dégradation induite par l'exposition à des milieux corrosifs, notamment en mesurant des paramètres critiques tels que la profondeur d'attaque, la rugosité globale ou encore la forme et la distribution des piqûres de corrosion. Cette approche expérimentale a apporté des informations précises et fiables sur l'évolution morphologique des surfaces en fonction des conditions environnementales.



Figure 3.5: Microscope confocal Leica DCM3D (à droite) lié avec l'outil informatique (à gauche).

3.3.4 Spectromètre de fluorescence des rayons X (FRX) :

L'analyse chimique élémentaire des échantillons métalliques a été réalisée à l'aide d'un spectromètre de fluorescence des rayons X (XRF) du type Rigaku ZSX Primus IV, illustré sur la figure ci-dessous. Cet instrument utilise la technologie de fluorescence X à dispersion en longueurs d'onde (WDXRF), permettant d'obtenir une analyse précise, rapide et non

destructivedelacompositionélémentairedediversmatériaux,notammentlesalliages métalliques, les minéraux ainsi que les matériaux industriels complexes.

Le Rigaku ZSX Primus IV se distingue par plusieurs caractéristiques techniques avancées:ilpermetuneanalysequalitativeetquantitativedesélémentscomprisentrelebore (B)etl'uranium(U),grâceàuntubeàrayonsXde4kWmontéenpositionhorizontaledirecte, ce qui améliore la stabilité et la sensibilité du système. Le logiciel ZSX Guidance facilite la configuration et l'optimisation automatique des paramètres de mesure. De plus, l'appareil permet l'échantillonnage sous vide ou sous atmosphère d'hélium, garantissant une meilleure détection des éléments légers. Enfin, sa plateforme logicielle intuitive permet l'affichage des spectres obtenus, la calibration des mesures, ainsi que le calcul automatique des pourcentages élémentaires.

Ce spectromètre est largement utilisé dans les domaines de la métallurgie, de la pétrochimie et des géosciences, en raison de sa haute précision analytique, de sa bonne reproductibilité et de sa capacité à détecter des éléments présents en très faible concentration. Danslecadrenotreétude,ilapermisd'identifierlacompositionchimiquedestubesenacier au carbone (nuances P110 et N80), à la fois dans leur état brut et corrodé. Cette analyse visait à vérifier leur conformité aux spécifications techniques attendues, tout en recherchant d'éventuelles variations induites par la corrosion.



Figure3.6:SpectromètredefluorescencedesrayonsX –RigakuZSXPrimusIV.

3.4 Résultatsetinterprétations:

3.4.1 'évolutiondeladiagonale:

Lesvaleurscorrespondantauxdiagonalesdesdeuxnuancesontprésentéesdansle tableau 3.5.

Tableau3.5:valeursdes diagonalespourP110et N80(bruteetcorrodé).

Echantillon	3N	5N	10N
P110 Brute	21.5 ±1.5	34.2 ±0.7	59.9 ±4.0
N80 Brute	40.1 ±1.8	53.3 ±1.7	76.4 ±1.9
P110 Corrodé	/	/	98.0 ±5.1
N80 Corrodé	43.9 ±1.1	60.5 ±3.7	79.2 ±1.1

PourlanuanceP110brute,lesvaleursmoyennesdesdiagonalespassentde21.5±1.5µm sous une charge de 3 N à 59.9±4.0µmsous une charge de 10 N, ce qui correspond à une augmentation absolue de 38. 4µm, soit une évolution relative de +178.61%. Cette progression se fait par étapes : entre 3 N et 5 N, l'augmentation est de +58.98%, puis elle atteint +75.15% entre 5 N et 10 N.

ConcernantlanuanceN80brute,lesdiagonalesaugmententde40.1±1.8µm(3N)à 76.4±1.9µm (10 N), avec une variation absolue de 36.3µm, soit une évolution relative globale de +90.52%. L'augmentation est plus modérée comparativement à celle observée pour la nuanceP110,avecdestauxd'accroissementsuccessifsde+32.92%(3N→5N)etde+43.34% (5 N → 10 N).

LaFigure3.7illustrel'évolutiondesdiagonalesd'empreintesobtenuessur lesnuances P110 brute, N80 brute, P110 corrodé et N80 corrodé, en fonction de la charge appliquée (3 N, 5 N et 10 N). Elle met en évidence une augmentation linéaire ou quasi-linéaire de la taille des diagonales avec l'augmentation de la force, ce qui est cohérent avec le comportement élastoplastique des matériaux métalliques soumis à des sollicitations mécaniques.

Pour les nuances brutes, la nuance P110 présente, à chaque niveau de charge, des diagonales plus petites que celles observées pour la nuance N80, indiquant une résistance mécanique supérieure ou une dureté plus élevée. Cette tendance persiste après corrosion, bien que l'écart entre les deux nuances diminue légèrement, suggérant que la corrosion affecte davantage la nuance P110 qu'elle ne le fait sur la nuance N80.

L'effet de la corrosion apparaît clairement dans l'augmentation globale des diagonales comparées aux valeurs mesurées sur les échantillons bruts. En effet, la corrosion entraîne une altération de la surface du matériau, provoquant une perte de matière et une fragilisation locale, ce qui se traduit par une déformation accrue sous charge. Ainsi, pour une même charge appliquée, les diagonales mesurées sur les nuances corrodées sont systématiquement plus grandes que celles relevées sur les nuances brutes.

Du fait de l'impossibilité de visualiser les empreintes induites par indentation Vickers pour les charges (3N et 5N) pour la nuance P110 corrodé on n'a pas pu mesurer les valeurs des diagonales et la dureté Vickers correspondante.

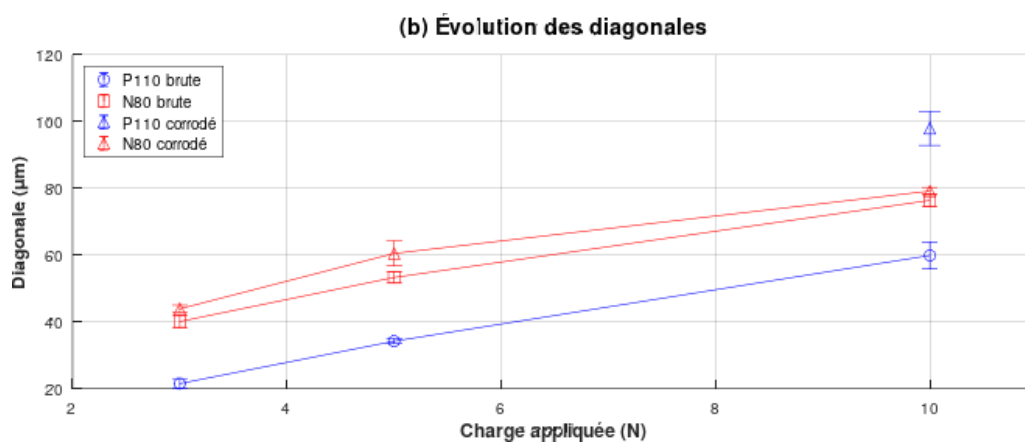


Figure 3.7 : évolution de la diagonale en fonction de la charge appliquée.

3.4.2 Évolutions de la dureté :

Pour calculer la dureté «Vickers» :

$$H_v = \frac{0,1891 \times F}{a^2} \quad / \quad a = \sqrt{\frac{0,1891 \times F}{H_v}}$$

$$H_v \cdot a^2 = 0,1891 \cdot F$$

$$a = \sqrt{\frac{0,1891 \cdot F}{H_v}}$$

Où :

H_v : dureté Vickers en kg/mm^2 converti (GPa). F :

la charge appliquée en (Kg.f).

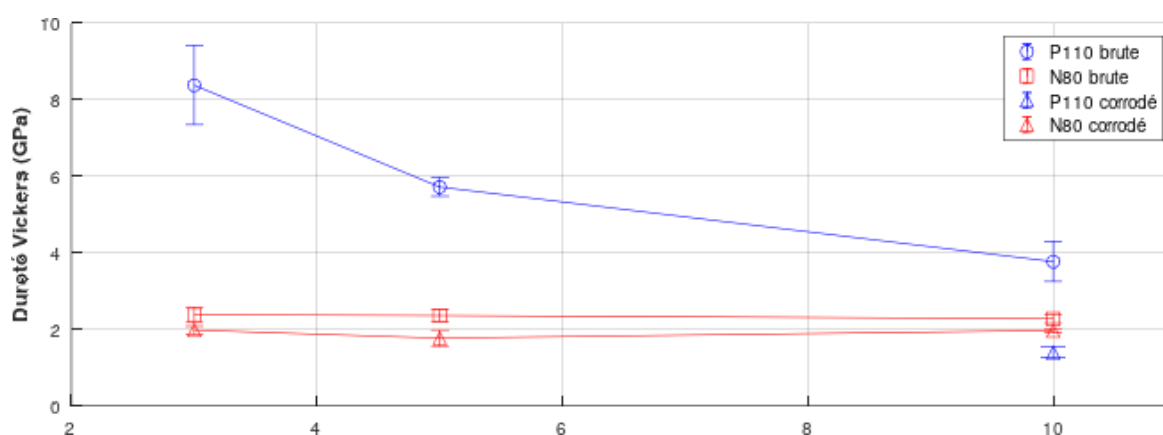
a : la moyenne des diagonales en (μm).

Les valeurs de dureté en fonction de la charge appliquée sont présentées dans le tableau 3.6.

Tableau3.6:valeursdesdiagonalespourP110etN80(brutetcorrodé).

Echantillon	3N	5N	10N
P110 Brute	8.38 ± 1.03	5.72 ± 0.24	3.77 ± 0.52
N80 Brute	$2.38 \pm 0.20^*$	2.36 ± 0.15	2.28 ± 0.11
P110 Corrodé	/	/	1.40 ± 0.14
N80 Corrodé	1.98 ± 0.10	1.77 ± 0.21	1.97 ± 0.05

L'évolution de la dureté des différentes nuances a été analysée sous différentes charges (3 N, 5 N, 10 N). La nuance P110 brute montre une diminution significative de la dureté : elle passe de 8.38 ± 1.03 à 3.77 ± 0.52 entre 3 N et 10 N, soit une baisse globale de -54.99% . La nuance N80 brute présente une évolution plus modérée, avec une diminution globale de -4.20% sur la même plage de charge. La nuance N80 corrodée, quant à elle, subit des variations faibles et peu régulières, passant de 1.98 ± 0.10 à 1.97 ± 0.05 entre 3 N et 10 N ($+0.51\%$ au total), avec une augmentation de $+10.61\%$ entre 3 N et 5 N suivie d'une baisse de -11.30% entre 5 N et 10 N. Enfin, les données concernant la nuance P110 corrodée sont incomplètes, ne permettant pas d'analyser son évolution complète.

**Figure3.8:**évolution deladuretéenfonction delachargeappliquée.

La Figure 3.8 illustre l'évolution de la dureté Vickers en fonction de la charge appliquée (3 N, 5 N et 10 N) pour les nuances P110 brute, N80 brute, P110 corrodé et N80 corrodé. Elle met en évidence une diminution générale de la dureté avec l'augmentation de la charge, particulièrement marquée pour la nuance P110 brute, dont la dureté passe de près de 8 GPa à environ 4 GPa lorsque la charge augmente de 3 N à 10 N. En revanche, la nuance N80 brute présente une dureté plus stable, restant proche de 2 GPa dans toute la gamme de charges testées.

L'effet de la corrosion se traduit par une baisse significative de la dureté, surtout pour la nuance P110, qui voit sa dureté tomber à environ 2 GPa, similaire à celle des autres nuances corrodées.

Cette diminution s'explique par l'altération de la surface due à la perte de matière et à la fragilisation locale provoquée par la corrosion. Ainsi, si la nuance P110 brute est initialement plus dure que la nuance N80 brute, cette différence disparaît après corrosion, soulignant une sensibilité accrue de la nuance P110 aux attaques corrosives. Les nuances corrodées montrent globalement une réponse mécanique plus uniforme face aux variations de charge, ce qui peut être attribué à une modification structurale induite par la corrosion.

3.4.3 observation microscopique:

La figure 3.9 représente les micrographies obtenues par microscope optique à une échelle de 10 μm illustrant l'aspect microscopique des aciers P110 et N80, dans leurs états brut (non corrodé) et corrodé. Ces images permettent d'évaluer la structure cristalline initiale des matériaux ainsi que les altérations provoquées par la corrosion, facteur critique dans les applications pétrolières où ces aciers sont utilisés.

L'acier P110 brut présente une structure fine et homogène, caractéristique d'un acier allié haute résistance. Les grains métalliques sont bien définis, avec une distribution régulière des phases ferrite et perlite, ce qui témoigne d'une bonne qualité de matériau. En revanche, l'acier N80 brut, qui est un acier au carbone, montre généralement une structure plus grossière, avec des grains plus visibles, reflétant une composition moins alliée et une résistance mécanique moindre.

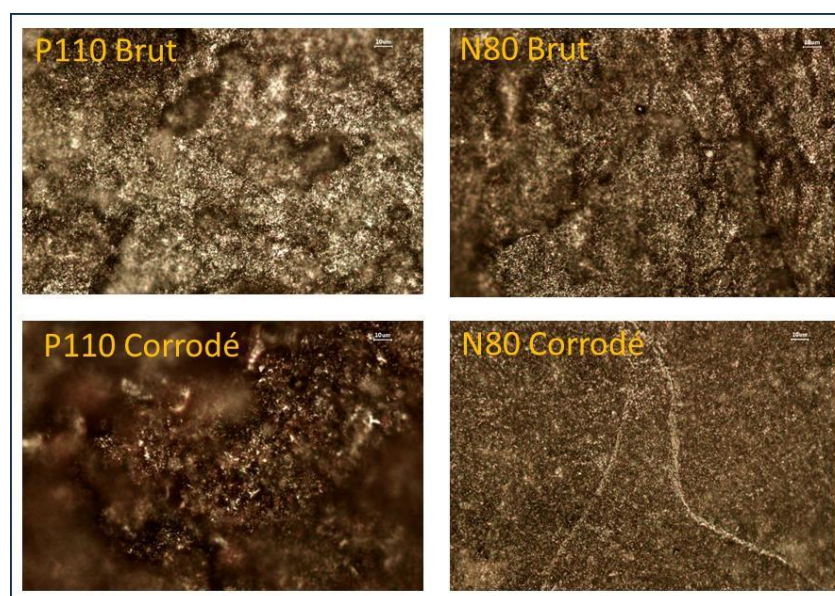


Figure 3.9: Les micrographies obtenues par microscope optique de N80 et P110

En présence de corrosion, les différences entre les deux aciers deviennent nettement visibles. L'acier P110 corrodé montre une altération localisée, souvent sous forme de points ou de zones isolées de pitting, sans détérioration généralisée. Cela s'explique par sa composition enrichie en éléments comme le chrome et le molybdène, qui améliorent sa résistance à la corrosion dans des environnements agressifs tels que ceux contenant du CO_2 ou du H_2S .

Par contre, l'acier N80 corrodé présente des signes de dégradation plus marqués : des dépôts oxydés épais, des zones irrégulières, voire des fissurations causées par l'attaque chimique. La corrosion est plus étendue et affecte davantage la surface et la structure du matériau, ce qui peut compromettre sa résistance mécanique et sa durée de vie.

La figure 3.10 représente les micrographies des empreintes induites par indentation vickers pour les deux types de l'acier utilisés. Les micrographies obtenues par indentation Vickers mettent en évidence des différences nettes entre les pastilles neuves et celles qui ont été utilisées. Sur les pastilles neuves, les empreintes sont bien définies, régulières et symétriques. Leur forme précise et l'absence de fissures aux coins montrent que le matériau est encore intact, avec une structure homogène et une bonne résistance à la déformation. La surface autour de l'empreinte reste stable, sans signe de dégradation ou de déformation excessive. Par contre, sur les pastilles usées, les empreintes sont plus grandes, irrégulières et asymétriques. Elles sont souvent entourées de zones claires, ce qui indique une déformation plastique plus importante. De plus, on observe des microfissures qui partent des coins de l'empreinte. Cela reflète un affaiblissement du matériau dû à l'usure, qu'elle soit mécanique, thermique ou chimique. La cohésion entre les grains a diminué, ce qui explique cette fragilisation progressive.

L'augmentation de la taille et de l'irrégularité des empreintes correspond à une baisse de dureté mesurée, pouvant atteindre 35 %. Cela montre clairement que l'état microstructural influence directement les propriétés mécaniques globales. Grâce à ces observations, il devient possible non seulement d'évaluer l'état de surface des outils, mais aussi de mieux comprendre comment ils se dégradent au fil de leur utilisation, et ainsi anticiper leur remplacement.

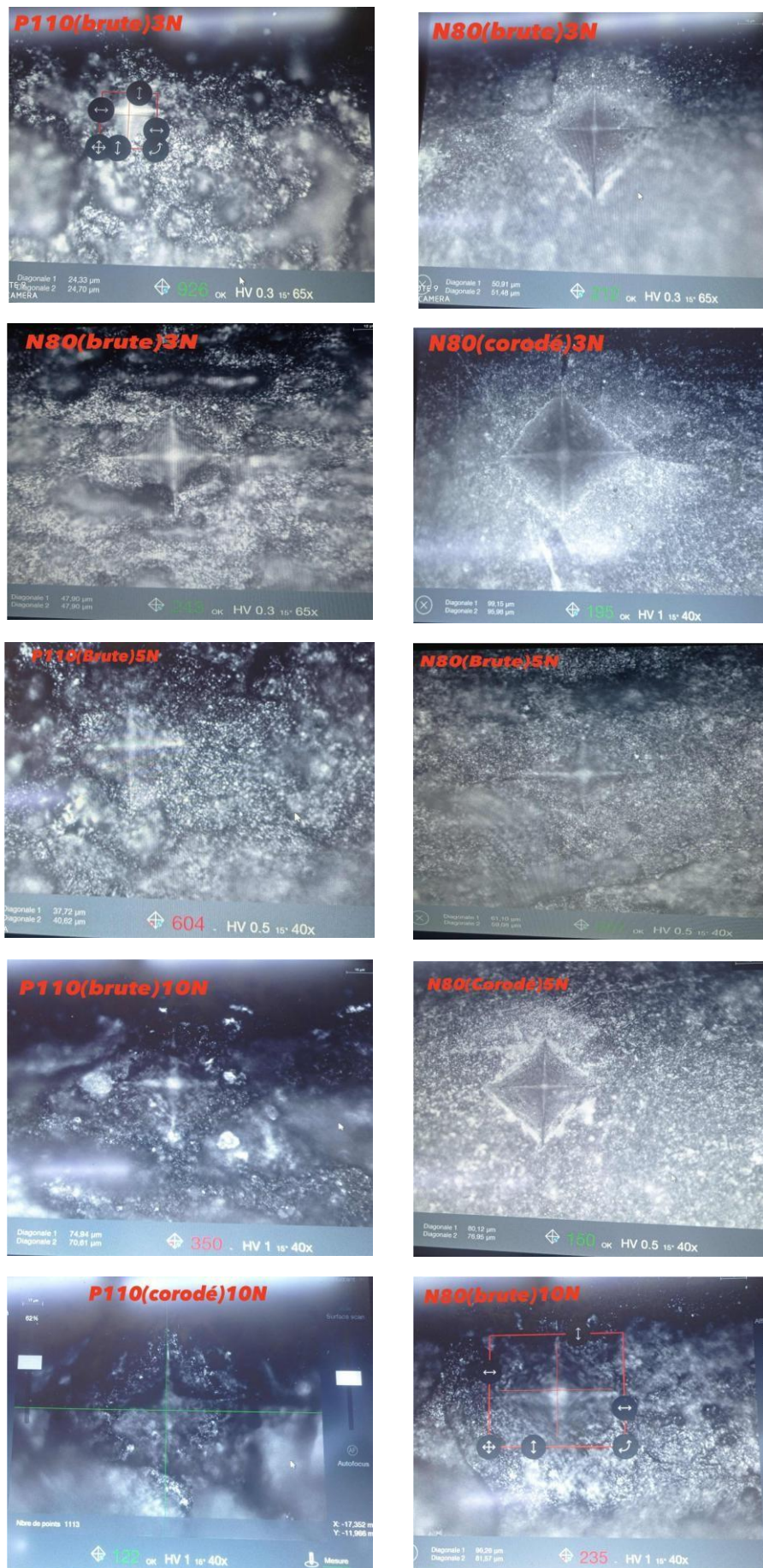


Figure 3.10: micrographies des empreintes obtenues par indentation Vickers.

La figure 3.10 montre des micrographies obtenues par indentation Vickers sur deux types de matériaux : N80 et P110, dans leurs états brut et corrodé.

3.4.4 Études de la rugosité:

Les images présentées dans la figure 3.1 illustrent une analyse de surface réalisée à l'aide d'une microscopie confocale sur deux types d'aciers N80 et P110 étudiés en état brut et après corrosion. La microscopie confocale permet une visualisation tridimensionnelle des variations topographiques de la surface métallique en mesurant les altitudes selon l'axe Z sur une zone définie selon les axes X et Y. Cette technique est particulièrement utile pour évaluer la rugosité des défauts de surface et l'effet des phénomènes de dégradation tels que la corrosion. Chaque image est codifiée en couleurs afin de représenter les variations de hauteur avec les zones rouges et jaunes qui correspondent aux parties élevées c'est-à-dire les pics ou reliefs tandis que les zones bleues et vertes indiquent les parties basses comme les creux ou piqûres de corrosion. Ces représentations couleur offrent une lecture intuitive des modifications subies par les surfaces des matériaux.

Les images des surfaces brutes montrent une topographie relativement homogène avec des variations limitées de hauteur. Les aspérités visibles en rouge ou jaune sont principalement dues aux procédés technologiques tels que le laminage, l'usinage ou les traitements thermiques appliqués lors de la fabrication du matériau. Les zones bleues reflètent des irrégularités mineures ou des défauts superficiels normaux ce qui suggère que les surfaces initiales des deux aciers possèdent une structure cohérente et uniforme avant toute exposition corrosive.

En revanche, les images des surfaces corrodées révèlent une modification notable de la topographie avec une augmentation significative de la rugosité marquée par la présence de pics plus prononcés et de creux profonds. Les zones bleues profondes correspondent à des sites de corrosion actifs caractérisés par des cavités ou des piqûres causées par la dissolution électrochimique du métal. Par ailleurs, certaines zones rouges peuvent correspondre à des dépôts de produits de corrosion ou à des résidus formés suite à l'altération du matériau. Cette hétérogénéité accrue traduit une dégradation sévère de la surface affectant l'intégrité mécanique du métal.

Bien que les aciers N80 et P110 soient tous deux employés dans des environnements agressifs, leurs comportements face à la corrosion diffèrent clairement. L'acier N80 dans son

état corrodé présente des zones bleues profondes et une rugosité générale plus importante ce qui indique une corrosion plus intense et localisée. Ce comportement suggère une moindre résistance à la dégradation chimique probablement liée à une composition moins alliée ou à un traitement thermique moins adapté. L'acier P110 quant à lui montre une meilleure tenue face à la corrosion. Les creux sont moins profonds la rugosité globale est plus modérée et les altérations des surfaces sont moins marquées. Cette amélioration peut être attribuée à une teneur en éléments d'alliage comme le chrome le molybdène ou le vanadium plus élevée ou à un traitement thermique optimisé favorisant une protection accrue contre les attaques corrosives.

La corrosion n'affecte pas uniquement l'apparence superficielle mais aussi les propriétés fonctionnelles des matériaux. Les creux profonds et les piqûres agissent comme des points de concentration de contraintes augmentant le risque de fissuration sous sollicitations cycliques. Une rugosité excessive rend difficile l'application homogène de revêtements protecteurs diminuant leur efficacité.

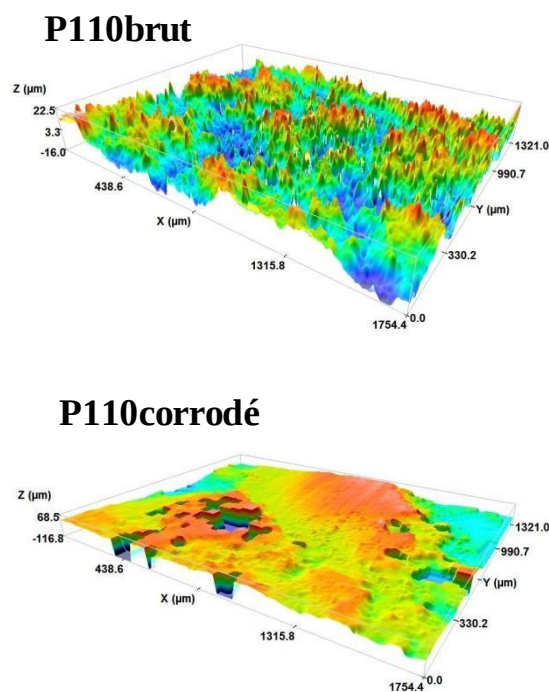
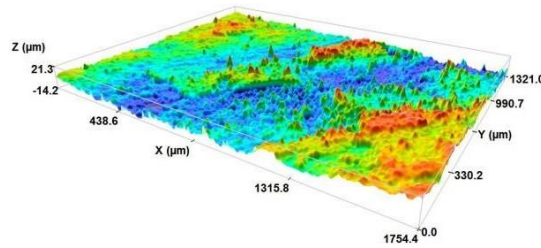


Figure 3.11: topographies des aciers P110 brut et corrodé.

N80brut



N80corrodé

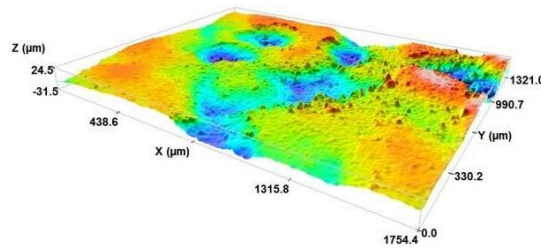


Figure3.12:topographiesdesaciersN80brutetcorrodé

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre a présenté la méthodologie expérimentale complète de notre étude sur les aciers P110 et N80 utilisés dans les tubes de forage pétrolier. Notre approche a combiné le prélèvement systématique d'échantillons et l'analyse chimique approfondie avec des essais mécaniques rigoureux

Les investigations ont porté sur les deux nuances d'acier dans leurs états brut et corrodé, utilisant les équipements spécialisés de l'URME et de l'IOMP de l'université Sétif 1. Les principaux résultats présentés incluent les mesures de dureté comparatives, les observations microstructurales détaillées et les analyses de rugosité de surface.

Ces données expérimentales constituent une base solide pour comprendre le comportement différentiel des aciers P110 et N80 face aux conditions opérationnelles extrêmes des champs pétroliers. Les résultats obtenus permettent d'établir des corrélations précises entre la composition chimique, les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion de ces matériaux stratégiques.

Conclusion

Conclusion générale

3.6 Conclusion générale :

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que les aciers au carbone, notamment les nuances P110 et N80, présentent des comportements mécaniques et tribologiques fortement influencés par leur microstructure, leurs traitements thermiques ainsi que leur exposition à des environnements corrosifs. À travers une approche expérimentale combinée à une analyse théorique rigoureuse, nous avons pu établir des corrélations entre la constitution microstructurale de ces aciers, leurs propriétés mécaniques (résistance, dureté, ductilité) et leur résistance face aux phénomènes de corrosion et d'usure.

Les résultats obtenus montrent que l'acier P110, doté d'une composition alliée plus raffinée, offre une meilleure tenue face à la corrosion comparativement à l'acier N80. Cette supériorité s'explique par une structure plus homogène, une teneur optimisée en éléments protecteurs comme le chrome et le molybdène, ainsi qu'un traitement thermique mieux adapté. En revanche, l'acier N80, bien qu'offrant une bonne résistance mécanique initiale, est plus sensible aux agressions chimiques, ce qui se traduit par une altération plus marquée de sa surface et une perte progressive de ses performances en service.

L'analyse microscopique et topographique a permis de visualiser les effets concrets de l'usure et de la corrosion sur les surfaces des deux aciers. Les empreintes d'indentation Vickers, les mesures de rugosité et les observations effectuées au microscope optique ont mis en lumière l'évolution de la déformation plastique, la propagation des fissures intergranulaires et la formation de piqûres ou de dépôts oxydés. Ces observations corroborent les mesures macroscopiques de dureté et soulignent l'importance de surveiller non seulement les propriétés globales du matériau, mais aussi son état localisé à l'échelle microstructurale.

Ainsi, cette recherche met en avant l'interdépendance entre la microstructure des aciers au carbone et leurs propriétés mécaniques et tribologiques. Elle constitue une contribution essentielle à la compréhension des mécanismes de dégradation dans des conditions industrielles exigeantes, particulièrement dans le secteur pétrolier où les matériaux sont soumis à des contraintes multiples.

Pour améliorer la durabilité et la fiabilité des aciers utilisés dans les applications critiques, il est impératif d'optimiser à la fois leur composition, leurs traitements thermiques et leur protection contre les agressions externes. Des recherches complémentaires pourraient explorer davantage l'impact des revêtements anticorrosion ou encore l'utilisation de techniques avancées de caractérisation in situ pour suivre l'évolution du matériau en temps réel. Cela permettrait de concevoir des solutions innovantes adaptées aux exigences croissantes de l'industrie moderne.