

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Génie des Procédés

Mémoire de Projet de Fin d'Etude

2^{ème} Année Master

=====

**Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone
par l'huile essentielle d'Eucalyptus dans des milieux
agressifs : application au cas de la raffinerie RA1K de
Skikda**

=====

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie chimique

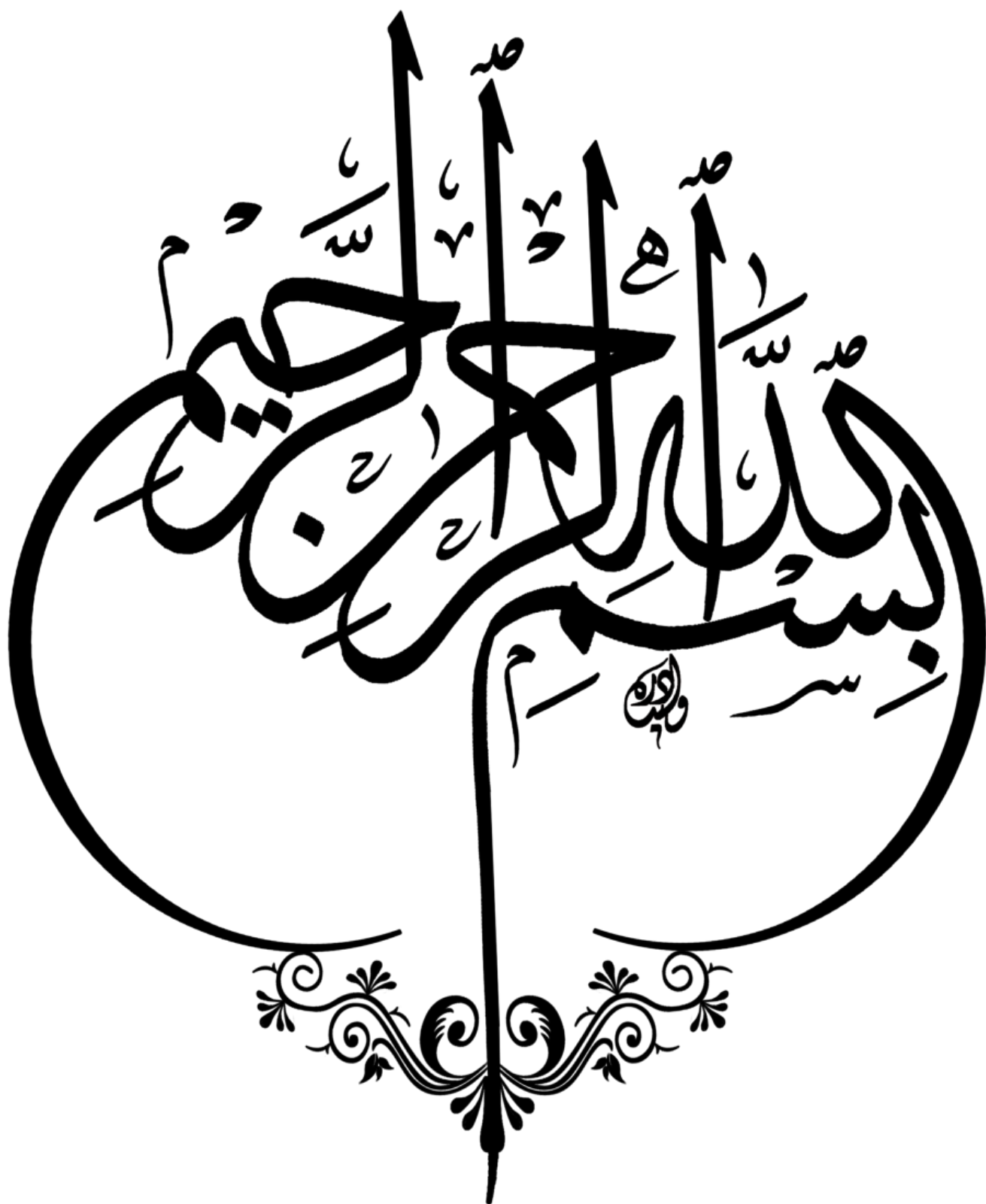
Présenté par :

GUEMIHI Amel

CHEKAROUA Samiha

Sous la Direction de : Dr. BAHLOUL Abida

Année 2024/2025



Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, le courage, la volonté et la patience pour mener à bien ce modeste travail de fin d'études.

*Nous exprimons nos profonds remerciements et notre vive reconnaissance à notre encadreuse, **Dr. Bahloul Abida**, pour son aide précieuse, ses conseils avisés, sa disponibilité, sa bienveillance, ainsi que pour ses encouragements constants tout au long de ce travail. Sa contribution a été essentielle à notre réussite.*

Nous tenons également à adresser nos sincères remerciements à l'ensemble du personnel du laboratoire RA1K, et tout particulièrement à :

Madame Hafida, Monsieur Boulhout, Monsieur Hachicha, Monsieur Selmani, Monsieur Nacer, Alilou, Chemsou, Abdou, Monira, Hamza, Ahmed, Haithem, Chaker, Amina, Mouhamed, Hakou, Abla, pour leur accueil, leur aide, leur patience et leur soutien tout au long de notre stage.

Nos sincères remerciements vont également aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail.

Nous n'oublions pas tous les enseignants du Département de Génie des Procédés, à qui nous devons respect et reconnaissance pour la qualité de l'enseignement et le soutien constant durant notre formation.



Dédicaces

Grâce à l'aide de Dieu tout-puissant, qui a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

*À la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie, ma chère mère **Aida**, qui m'a toujours soutenue tout au long de mes années d'études. Pour tous les sacrifices qu'elle a consentis, pour la confiance qu'elle m'accorde, et pour tout l'amour dont elle m'entoure. Je remercie Dieu de m'avoir fait ce magnifique cadeau qu'est ma mère.*

*À mon père **Messoud**, qui m'a inculqué la valeur de la persévérance tout au long de mon parcours. Il est pour moi le symbole même de la bonté, une source de tendresse, et l'exemple du dévouement. Merci pour tes encouragements constants et ta confiance inébranlable.*

*À mon frère **Mouhamed**, qui m'a toujours aidée et a été à mes côtés en toute circonstance.*

À mes chères amies, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables qui resteront à jamais gravés dans ma mémoire.

À tous mes camarades de la promotion 2025.

À mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines.

À toutes les personnes qui m'ont soutenue, conseillée et qui ont contribué, de près ou de loin, à l'achèvement de ce modeste travail.

Guemihi Amel

Dédicaces

*Louange à Allah par la grâce duquel les bonnes œuvres s'accomplissent,
et par Sa faveur que l'impossible se réalise. Mon Seigneur, Celui qui m'a honorée
par le succès à chaque étape, m'a sauvée des pièges du chemin,
et m'a guidée vers cette spécialité où je lève aujourd'hui la tête avec gratitude pour
Ses bienfaits innombrables.*

À ceux qui ont versé la chaleur de leur amour dans mon cœur et m'ont soutenue sans relâche :

*Ma mère, dont je respire encore le parfum du Paradis sous ses pieds, et dans les yeux de
laquelle je vois la sérénité du monde entier.*

*Mon père, soutien de mon âme et fierté de mon cœur, toi qui m'as appris la dignité dans
les moments de déchirement.*

*Ma grand-mère, récit d'une vie et tendresse de la nostalgie, et mon grand-père (qu'Allah lui fasse miséricorde), qui
aurait été si heureux de voir cette réussite s'il était encore parmi nous. Vous avez planté en moi les graines d'amour et
de patience, et les avez vues fleurir à travers les années.*

Mes frères et sœurs, unis par le sang et liés par les épreuves :

Imed et Khaled, mes piliers sur cette terre, mes épaules dans la tempête.

Khawla, sœur de mon cœur, ma douceur.

*Mes tantes, Rima et Rafika, dont les cœurs sont trop vastes pour les limites de ce monde, et
dont la chaleur habite mon âme.*

*Mon fiancé Youssef, soutien de mon esprit que j'espérais, compagnon de route que je me
suis choisi. Reste pour moi cette lune éclairant mes ténèbres, ce roc inébranlable à chaque étape
de la vie.*

Mes âmes sœurs :

Ihlam, compagne de route dont l'amitié m'honore, miroir de mes véritables traits.

*Salsabil, fille de ma tante et bien-aimée de mon cœur, qui partage avec moi la
profondeur des souvenirs.*

*À tout cœur qui a battu de bonté pour moi, et m'a portée dans ses prières, publiques
ou secrètes :*

*Mon amour pour vous dépasse les mots,
car la sincérité des sentiments transcende toute expression.*

CHEKAROUA Samiha

Résumé

Cette étude porte sur une analyse intégrée combinant l'examen des propriétés physico-chimiques de certains produits pétroliers (Jet A1) et (Fioul) produits au niveau de la raffinerie RA1K de Skikda, ainsi que l'évaluation de l'efficacité de l'huile essentielle d'Eucalyptus comme inhibiteur naturel de corrosion. Les analyses réalisées ont montré que le carburant d'aviation (Jet A1) présente des caractéristiques conformes aux normes en vigueur, avec un faible taux d'acidité, une conductivité électrique faible et une teneur en soufre dans les limites minimales, indiquant un milieu non corrosif. En revanche, le fioul a révélé des caractéristiques différentes, également conformes aux normes, telles qu'une viscosité relativement élevée et une teneur en soufre supérieure à celle du Jet A1, ce qui le rend plus susceptible à la corrosion.

Sur la base de ces résultats, l'huile essentielle a été extraite des feuilles d'eucalyptus par distillation à la vapeur, puis utilisée comme inhibiteur de corrosion dans trois milieux différents : une solution acide H_2SO_4 (1M), le fioul, et le carburant Jet A1. L'efficacité de l'huile a été évaluée par deux méthodes : la gravimétrie et la polarisation potentiodynamique. Les résultats ont montré que l'huile essentielle réduit efficacement la corrosion, notamment dans le milieu acide, où le taux d'inhibition a dépassé 94 %. L'étude de l'adsorption a également révélé que le comportement de l'huile suit le modèle de Langmuir, indiquant la formation d'une couche protectrice stable sur la surface de l'acier au carbone.

Cette étude souligne que les résultats obtenus contribuent à expliquer le comportement corrosif des différents milieux, et que l'efficacité de l'huile essentielle en tant qu'inhibiteur est étroitement liée à la composition et aux propriétés du milieu. Cela suggère la possibilité d'adopter des inhibiteurs naturels, écologiques et efficaces pour protéger les installations industrielles contre la corrosion, notamment dans les industries pétrolières.

Mots clés : Huile essentielle, Eucalyptus, Corrosion, Inhibiteur, Acide sulfurique, Jet A1, Fioul.

Abstract

This work addresses an integrated study combining the analysis of the physicochemical properties of certain petroleum products (Jet A1) and (Fuel oil) produced at the RA1K refinery in Skikda, along with the evaluation of the effectiveness of eucalyptus essential oil as a natural corrosion inhibitor. The conducted analyses showed that the aviation fuel (Jet A1) possesses characteristics conforming to the approved standards, featuring low acidity, weak electrical conductivity, and sulfur content within minimal limits, indicating a non-corrosive environment. Conversely, the fuel oil displayed different properties, also meeting the standards, including relatively higher viscosity and sulfur content compared to Jet A1, making it a more corrosion-prone environment.

Based on these results, the essential oil was extracted from eucalyptus leaves using steam distillation and then used as a corrosion inhibitor in three different media: an acidic solution of H_2SO_4 (1M), fuel oil, and Jet A1 fuel. The oil's effectiveness was assessed using two methods: gravimetric analysis and potentiodynamic polarization. The results indicated that the essential oil effectively inhibits corrosion, especially in the acidic medium, where inhibition efficiency exceeded 94%. The adsorption study also showed that the oil's behavior follows the Langmuir model, indicating the formation of a stable protective layer on the carbon steel surface.

This study highlights that the results obtained contribute to explaining the corrosive behavior of different environments, and that the effectiveness of the essential oil as an inhibitor is closely related to the composition and characteristics of the medium. This points to the potential adoption of natural inhibitors as environmentally friendly and effective alternatives to protect industrial facilities from corrosion, particularly in the petroleum industry.

Keywords: Essential oil, Eucalyptus, Corrosion, Inhibitor, sulfuric acid, Jet A1, Fuel oil.

ملخص

يتناول هذا العمل دراسة متكاملة تجمع بين تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية لبعض المنتجات البترولية (Jet A1) و (Fioul) المنتجة على مستوى مصفاة RA1K Skikda ، وتقييم فعالية الزيت العطري لنبات الأوكالبتوس كمثبط طبيعي للتآكل. أظهرت التحاليل المنجزة أن وقود الطائرات (Jet A1) يمتاز بخصائص مطابقة للمواصفات المعتمدة، حيث سُجلت نسبة حمضية منخفضة، توصيلية كهربائية ضعيفة، ومحتوى كبريتي ضمن الحدود الدنيا، مما يدل على بيئة غير تآكلية. بالمقابل، أظهر الفيوول خصائص مختلفة مطابقة للمواصفات المعتمدة ، منها ارتفاع نسبي في اللزوجة ومحتوى الكبريت مقارنة بـ (Jet A1) ، مما يجعله بيئة أكثر عرضة للتآكل .

استنادًا إلى هذه النتائج، تم استخراج الزيت العطري من أوراق الأوكالبتوس باستخدام تقنية التقطير البخار، ثم استخدامه كمثبط للتآكل في ثلاث أوساط مختلفة: محلول حمضي (H_2SO_4 1M) ، والفيول، ووقود Jet A1. تم تقييم فعالية الزيت باستخدام طريقتين: الفقد الوزني (gravimétrie) والطريقة الكهروكيميائية (polarisation potentiodynamique). بينت النتائج أن الزيت العطري يحد من التآكل بفعالية، خاصة في الوسط الحمضي، حيث تجاوزت كفاءة التثبيط 94% كما أظهرت دراسة الامتزاز أن سلوك الزيت يتبع نموذج لانجموير، مما يدل على تشكل طبقة واقية مستقرة على سطح الفولاذ الكربوني. تُبرز هذه الدراسة أن نتائج التحاليل تُساهم في تفسير السلوك التآكلي للبيئات المختلفة، وأن فعالية الزيت العطري كمثبط ترتبط ارتباطًا وثيقًا بتركيب الوسط وخصائصه. يشير ذلك إلى إمكانية اعتماد المثبطات الطبيعية كبديل صديقة للبيئة وفعالة في حماية المنشآت الصناعية من التآكل، لا سيما في الصناعات البترولية.

الكلمات المفتاحية: زيت عطري، زيت الأوكالبتوس، تآكل، مثبط، حمض الكبريتيك، وقود الطائرات Jet A1 ، وقود ثقيل (فيول).

Table des matières

Résumé-----	I
Abstract-----	II
ملخص-----	III
Liste des figures-----	IV
Liste des tableaux-----	VIII
Liste des abréviations-----	IX
Introduction générale-----	1
Références bibliographiques de l'introduction générale-----	3

Chapitre I : Raffinage de pétrole dans la raffinerie de Skikda

I.1. Introduction-----	4
I.2. La raffinerie de Skikda RA1K-----	4
I.3. Situation géographique-----	4
I.4. Présentation du laboratoire-----	5
I.5. L'objectif de la raffinerie de Skikda RA1K-----	6
I.6. Raffinage du pétrole-----	6
I.7. Composition du pétrole brut-----	7
I.8. Les procédés de séparation-----	7
I.8.1. La distillation atmosphérique-----	7
I.8.2. Distillation sous vide-----	8
I.9. Le kérosène traité (Jet A1)-----	9
I.10. Généralités sur le fioul-----	10
Références bibliographiques du chapitre I-----	12

Chapitre II : La corrosion des métaux et les inhibiteurs verts

II.1. Introduction-----	14
II.2. Notions de corrosion des métaux-----	14
II.3. Différents types de corrosion-----	14
II.3.1. Corrosion uniforme-----	15
II.3. 2. Corrosion localisée-----	15
II.3. 2.1. Corrosion par piqûres-----	16
II.3. 2.2. Corrosion sélective-----	17
II.3. 2.3. Corrosion caverneuse-----	17

II.3. 2.4. Corrosion par érosion-----	18
II.3. 2.5. Corrosion galvanique-----	18
II.3. 2.6. Corrosion sous contrainte-----	19
II.3. 2.7. Corrosion intergranulaire -----	20
II.3. 2.8. La corrosion filiforme -----	20
II.4. Classification des différents types de corrosion -----	21
II.4.1. Corrosion chimique -----	21
II.4.2. Corrosion biochimique -----	21
II.4.3. Corrosion électrochimique -----	22
II.5. Protection contre la corrosion -----	23
II.5.1. Protection par revêtements -----	23
II.5.2. La protection électrochimique -----	23
II.5.2.1. Protection cathodique -----	23
II.5.2.2. Protection anodique -----	23
II.5.2.3. Protection par anode sacrificielle -----	23
II.5.3. Protection par inhibition -----	24
II.6. Généralité sur l’Inhibition de la corrosion -----	24
II.6.1. Propriétés des inhibiteurs -----	24
II.6.2. Les facteurs affectant la performance des inhibiteurs -----	24
II.6.2.1. Effet de la température -----	24
II.6.2.2. Effet de la concentration d’inhibiteur -----	25
II.6.2.3. Vitesse d’écoulement -----	26
II.6.2.4. La nature de métal -----	26
II.6.2.5. L’électrolytes -----	26
II.6.2.6. Le pH -----	26
II.7. L’inhibition de la corrosion par les substances naturelles -----	26
II.8. Généralités sur les huiles essentielles -----	27
II.9. Acier au carbone -----	27
II.9.1. Propriétés des matériaux -----	28
II.9.2. Influence des éléments d’addition -----	28
Références bibliographiques du chapitre II -----	30
 <i>Chapitre III : Matériaux et Techniques expérimentales</i>	
III.1. Introduction -----	32

III.2. Distillation ASTM	32
III.2.1. Mode opératoire	32
III.2.2. Expression des résultats	33
III.3. Acidité totale	33
III.3.1. Mode opératoire	33
III.3.2. Expression des résultats	34
III.4. La masse volumique	34
III.4.1. Mode opératoire	34
III.4.2. Expression des résultats	35
III.5. Point d'éclair	36
III.5.1. Mode opératoire	36
III.5.2. Lecture des résultats	37
III.6. Point de congélation	37
III.6.1. Mode opératoire	37
III.7. La viscosité	38
III.7.1. Mode opératoire	38
III.7.2. Expression des résultats	39
III.8. Point de fumée	39
III.8.1. Mode opératoire	39
III.9. Conductivité électrique	40
III.9.1. Mode opératoire	40
III.10. Point d'écoulement	41
III.10.1. Mode opératoire	41
III.10.2. Expression des résultats	42
III.11. La couleur Saybolt	42
III.11.1. Mode opératoire	42
III.12. Teneur en soufre	43
III.12.1. Mode opératoire	43
III.13. Extraction de l'inhibiteur par hydro distillation	44
III.13.1. Matériel végétal	44
III.13.2. Matériels d'extraction	45
III.13.3. Principe de l'extraction par hydrodistillation	45
III.13.4. Protocol d'extraction	46

III.13.5. Détermination du rendement en huile essentielle-----	46
III.14. Techniques d'évaluation de la corrosion -----	47
III.14.1. Etude gravimétrique-----	47
III.14.1.1. Influence de la concentration de l'inhibiteur sur l'efficacité inhibitrice ---	47
III.14.1.2. Mesure de la vitesse de corrosion-----	47
III.14.1.3. Isothermes d'adsorption de Langmuir-----	48
III.14.2. Etude électrochimique-----	48
III.14.2.1. Montage expérimental-----	48
III.14.2.2. La cellule électrochimique-----	49
III.14.2.3. Méthodes d'évaluation de la résistance à la corrosion-----	50
Références bibliographiques du chapitre III -----	52

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction-----	54
IV.2. Caractéristiques physicochimiques du kérosène (Jet A1)-----	54
IV.2.1. La Distillation (ASTM D 86)-----	54
IV.2. 2. La densité (ASTM D 1298) -----	56
IV.2.3. Détermination de la conductivité électrique-----	57
IV.2.4. L'acidité (ASTM D3242) -----	58
IV.2.5. Le point de fumée -----	59
IV.2.6. Point de congélation-----	60
IV.3. Caractéristiques physicochimiques de Fioul-----	61
IV.3. 1. Teneur en soufre(ASTM D-4292) -----	61
IV.3. 2. La viscosité (ASTM D 445) -----	62
IV.3. 3. Le point d'écoulement (ASTM D 97)-----	63
IV.3. 4. Point éclair PE (ASTM D93-20)-----	64
IV.4. Méthodes d'étude de l'effet inhibiteur de l'huile essentielle sur la corrosion -----	64
IV.4.1. Matériau d'étude-----	65
IV.4.2. Méthode gravimétrique -----	66
IV.4.2.1. Etude de l'effet de l'inhibiteur de l'huile essentielle sur la corrosion de l'acier au carbone-----	66
IV.4.2.2. Effet de la concentration -----	67
IV.4.3. Isotherme d'adsorption -----	71
IV.5. Méthodes électrochimiques -----	73

IV.5. 1. Courbes de polarisation potentiodynamique de l'acier au carbone-----	74
IV.6. Conclusion-----	76
Références bibliographiques du chapitre IV -----	77
Conclusion générale-----	79

Liste des figures

Numéro	Description	Page
Figure I.1	Représentation géographique de la RA1K dans la zone industrielle de Skikda	5
Figure I.2	Unité de distillation atmosphérique	8
Figure I.3	Distillation atmosphérique et sous vide d'un pétrole brut et exemples de coupes associées	9
Figure II.1	Représentation de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion	14
Figure II.2	La distribution homogène des demi-réactions anodiques et cathodiques génère une corrosion uniforme, b) Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier	15
Figure II.3	a) Représentation schématique d'une corrosion localisé, b) Corrosion localisé.	15
Figure II.4	Corrosion par piqûres	16
Figure II.5	Formes de piqûres (a) cavité profonde (b) cavité caverneuse (c) hémisphérique	16
Figure II.6	Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage cuivre-zinc)	17
Figure II.7	Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse	18
Figure II.8	Étapes de développement du phénomène de corrosion par érosion	18
Figure II.9	a) Représentation schématique de corrosion galvanique, b) Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé	19
Figure II.10	Corrosion sous contrainte	19
Figure II.11	Corrosion intergranulaire	20
Figure II.12	Corrosion filiforme	20
Figure II.13	Mécanisme de la corrosion séché : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement	21
Figure II.14	Corrosion biochimique	22
Figure II.15	La pile de corrosion électrochimique	22

Figure II.16	Schéma représentant les différents constituants d'une goutte d'huile essentielle	27
Figure III.1	Appareillage de distillation ASTM, échelle laboratoire	33
Figure III.2	Appareillage de Mesure de l'acidité totale	34
Figure III.3	(A,C) mesure de la température de fioul & Jet A1(B,D) Appareillages utilisé pour la mesure de la densité de fioul & Jet A1	35
Figure III.4	Appareillage point d'éclair semi-automatique vase clos (PM)	37
Figure III.5	Appareil principal pour la détermination du point de congélation	38
Figure III.6	Viscosimètre	39
Figure III.7	Appareil mesurant le point de fumée	40
Figure III.8	Appareil de mesure de conductivité électrique	41
Figure III.9	Appareillage de détermination de point d'écoulement par la méthode d'essai ASTM D 97	42
Figure III.10	Docteur teste type ASTM D 156	43
Figure III.11	Appareillage de détermination de La teneur en soufre selon la norme ASTM D-4292	44
Figure III.12	Eucalyptus, a) arbre, b) feuilles d'eucalyptus	45
Figure III.13	Montage utilisé pour l'extraction de l'huile essentielle d'Eucalyptus par la méthode d'hydrodistillation.	46
Figure III.14	L'huile essentielle extraite	46
Figure III.15	Cellule électrochimique à trois électrodes	49
Figure III.16	Mesure du courant de corrosion par extrapolation des droites de Tafel	51
Figure VI.1	Représentation des courbes de distillation ASTMD 86 du Jet A1	56
Figure IV.2	Représentation de l'évolution de la densité des échantillons Jet A1	57
Figure IV.3	Représentation de l'évolution de la conductivité des échantillons du Jet A1	58
Figure IV.4	Représentation de l'évolution de l'acidité des échantillons du JetA1	59
Figure IV.5	Représentation de l'évolution de point de fumée des échantillons pour JetA1	60
Figure IV.6	Evolution du point de congélation	61

Figure IV.7	Evolution de de teneur en soufre	62
Figure IV.8	Représentation de l'évolution de la viscosité cinématique des échantillons pour fioul	63
Figure IV.9	Représentation de l'évolution du point d'écoulement des échantillons fioul analyses	64
Figure IV.10	Evolution de PE du fioul	64
Figure IV.11	Schéma représentant les étapes de préparation des substrats, a) la machine polisseuse, b) Les échantillons de l'acier au carbone obtenu après polissage.	67
Figure IV.12	Schéma montrant l'essai de corrosion de l'acier au carbone dans la solution de H_2SO_4 (1M) aérée en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur	67
Figure IV.13	Schéma montrant l'essai de corrosion de l'acier au carbone dans le fioul en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur	68
Figure IV.14	Schéma montrant l'essai de corrosion de l'acier au carbone dans le Jet A1 en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur	68
Figure IV.15	Variation de la vitesse de corrosion de l'acier au carbone dans une solution de H_2SO_4 en fonction de la concentration d'inhibiteur	69
Figure IV.16	Effet de la concentration d'huile essentielle d'Eucalyptus sur l'efficacité inhibitrice (E) de la corrosion de l'acier au carbone dans la solution H_2SO_4 (1M) aérée	70
Figure IV.17	Variation de la vitesse de corrosion de l'acier au carbone dans le fioul en fonction de la concentration d'inhibiteur	70
Figure IV.18	Effet de la concentration d'huile essentielle d'Eucalyptus sur l'efficacité inhibitrice (E) de la corrosion de l'acier au carbone dans le fioul	71
Figure IV.19	Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier au carbone dans la solution H_2SO_4 (1M) aérée	72

Figure IV.20	Isotherme d'adsorption de Langmuir du l'acier au carbone dans le Fioul	72
Figure IV.21	Montage expérimental pour la réalisation des essais de corrosion au laboratoire pédagogique, Département Génie des Procédés, Université 8 mai 45 Guelma, a) cellule électrochimique, b) Chaîne électrochimique	74
Figure IV.22	Courbes de polarisation potentiodynamique de l'acier au carbone dans la solution acide H_2SO_4 (1M) sans et avec addition d'huile essentielle d'Eucalyptus	75

Liste des tableaux

Tableau		Page
Tableau I.1	Comparaison entre le kérosène et le Jet A1	10
Tableau I.2	Composition élémentaire du fioul	11
Tableau IV.1	Composition élémentaire en fraction molaire de l'acier au carbone AISI C-1020	65
Tableau IV. 2	Vitesse de corrosion, efficacités inhibitrices et taux de recouvrement en absence et en présence de l'huile essentielle d'Eucalyptus.	69
Tableau IV. 3	Les valeurs de potentiel et de densité de courant tirés des courbes de Tafel.	75

Liste des abréviations

a : Coefficient de Tafel anodique

Al³⁺ : Ion aluminium

ASTM : American Society for Testing and Materials

BaSO₄ : Sulfate de baryum

BHM : Brut Hassi Messaoud

BRI : Brut Réduit Importé

BTS : Brut à Teneur en Soufre réduite

BTX : Benzène, Toluène, Xylène

C_{inh} : Concentration de l'inhibiteur

C4 : Butane

C5/C6 : Pentane / Hexane

Ca²⁺ : Ion calcium

c : Coefficient de Tafel cathodique

CFR : Cooperative Fuel Research

Cl⁻ : Ion chlorure

CSC : Corrosion Sous Contrainte

Cu²⁺ : Ion cuivre II

C_nH_{2n+2} : Formule des alcanes

C_nH_{2n-2} : Formule des alcynes

C_nH_{2n-6} : Formule des hydrocarbures aromatiques

CTE : Centrale Thermoélectrique

DEF STAN : Norme de défense britannique

Δm : Perte de masse due à la corrosion

ERI : Eaux Résiduelles Industrielles

Fe : Fer

Fe³⁺ : Ion fer III

Fe₂O₃ : Oxyde de fer(III)

g/mL : Grammes par millilitre

g/t : Grammes par tonne

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

H₂ : Hydrogène

H₂O : Eau

H₂SO₄ : Acide sulfurique

HE : Huile Essentielle

Hg²⁺ : Ion mercure II

HTS : Brut à Haute Teneur en Soufre

ia : Courant anodique

ic : Courant cathodique

i : Densité de courant totale

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

η : Surtension

J/g.K : Joule par gramme par Kelvin

JET A1 : Carburant aviation type Jet A1

k_{ads} : Constante de vitesse d'adsorption

kg/m³ : Kilogramme par mètre cube

KOH : Hydroxyde de potassium

kPa : Kilopascal

M : Masse molaire

m₀ : Masse avant essai

m₁ : Masse après essai

m²/s : Mètre carré par seconde

MES : Matières En Suspension

Mg²⁺ : Ion magnésium

Mn⁺ : Ion métallique

NaCl : Chlorure de sodium

N : Normalité de KOH

NA : Norme Algérienne

NACE : National Association of Corrosion Engineers

ne⁻ : Nombre d'électrons

N/mm² : Newton par millimètre carré

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

Pa.s : Pascal seconde

Pb₃O₄ : Tétraplomb tétraoxyde

PbCO₃ : Carbonate de plomb

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur
PMCI : Point de Mélange Critique d'Inflammabilité
 $\rho_{15^{\circ}\text{C}}$: Densité à 15 degrés Celsius
RA1K : Raffinerie Algérienne de Skikda – Unité 1
RAK1 : Variante orthographique de RA1K
S : Surface exposée (cm^2)
 SO_4^{2-} : Ion sulfate
SO_x : Oxydes de soufre
STEP : Station de Traitement des Eaux Polluées
t : Temps d'exposition
T_{corr} : Température de corrosion
TH : Titre Hydrotimétrique
TiO₂ : Dioxyde de titane
tr/min : Tours par minute
TVR : Tension de vapeur
UTE : Unité de Transport Est
V_{ads} : Vitesse d'adsorption
 ν : Viscosité cinématique
W : Masse de l'échantillon
Zn²⁺ : Ion zinc
ZnCrO₄ : Chromate de zinc
 μ : Viscosité dynamique
 Θ : Taux de recouvrement de surface

Introduction générale

Introduction générale

Le pétrole est une richesse naturelle qui constitue la principale source d'énergie mondiale et la base de l'économie Algérienne. En plus, la demande mondiale en énergie augmente d'une année à un autre surtout sous l'effet de la croissance économique et démographique.

L'industrie pétrolière revête un intérêt économique capital, elle englobe le forage, la production et le transport...etc. Les installations de l'industrie pétrolière sont souvent exposées à des défaillances à cause de la corrosion [1-3].

La corrosion affecte la plupart des secteurs industriels et peut coûter des milliards de dollars chaque année. Elle est généralement associée à la formation de rouille sur les produits en fer, cependant, tous les métaux sont affectés par ce phénomène [4, 5].

L'acier au carbone occupe une place privilégiée dans tous les secteurs industriels dans notre pays et spécialement dans les industries pétrolières. Les aciers qui sont la base de construction des équipements et des installations de l'industrie sont soumis à diverses formes de dégradation due à la corrosion.

Aujourd'hui, la prévention contre la corrosion représente un enjeu majeur pour l'utilisation industrielle des matériaux métalliques. Diverses méthodes existent pour lutter contre la corrosion, et parmi celles-ci l'emploi d'inhibiteur est largement répandu. Ces substances sont retenues en tant que solution flexible, économique et très efficace.

La majorité des inhibiteurs synthétiques présentent une bonne action anti corrosion, mais la plupart d'entre eux sont hautement toxiques et peuvent causer des dommages temporaires ou permanents au système d'organes ou perturber le système enzymatique dans le corps humain. Pour cette raison, de nombreuses études ont été menées afin de développer des inhibiteurs verts d'origine végétale en prenant en considération la toxicité acceptable pour l'homme et l'environnement [6- 8].

Le raffinage a pour objectif de transformer des pétroles bruts d'origines diverses en un ensemble de produits pétroliers répondant à des spécifications commerciales tels que les gaz, les essences, les gasoils et les fiouls.

Parmi les coupes pétrolières qui existent, nous nous sommes intéressées dans ce travail au kérosène et au fioul. Le kérosène de type Jet A1 est une fraction d'hydrocarbures C_9-C_{16} obtenue par distillation du pétrole brut. Le fioul est une fraction plus lourde, constituée d'hydrocarbures $C_{12}-C_{25}$ et distillé à des températures plus élevées.

Le premier objectif de ce travail a consisté à étudier les caractéristiques physicochimiques du Jet A1 et du fioul commerciaux.

Dans notre période de stage dans la Raffinerie RA1K de Skikda, Nous avons constaté que la plupart des équipements présentaient des signes de corrosion. C'est sur cette base que notre second objectif a été d'étudier les propriétés inhibitrices de l'huile essentielle d'eucalyptus contre la corrosion de l'acier au carbone, notamment dans les bacs de stockage, exposés à trois milieux corrosifs distincts, à savoir :

1. Milieu acide H_2SO_4 (1M) aéré.
2. Dans le kérosène (Jet A1) stocké.
3. Dans le fioul stocké.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres, organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à une présentation générale de la raffinerie RA1K de Skikda, ainsi qu'à une étude bibliographique approfondie sur le pétrole brut et le procédé de distillation.
- Le deuxième chapitre se focalise autour de la corrosion et les inhibiteurs verts.
- Le troisième chapitre présente les conditions expérimentales de cette étude ainsi que les différentes méthodes d'évaluation de l'inhibition à la corrosion.
- Les résultats expérimentaux sont présentés dans le quatrième chapitre, dans lequel nous avons présenté les caractéristiques physicochimiques du kérosène (Jet A1) et du fioul et nous avons aussi mis en évidence l'efficacité de l'inhibition de l'huile essentielle d'Eucalyptus vis-à-vis à la corrosion de l'acier au carbone dans des différents milieux corrosifs.
- Enfin, l'ensemble de ce travail se résume par une conclusion générale.

Références bibliographiques de l'introduction générale

- [1] Mechat F., Étude des paramètres physico-chimiques avant et après traitement des rejets liquide de (RA1K), mémoire de magister en chimie, option pollution chimique et environnement, 2006.
- [2] Habchi A., Etude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier xc52 en présence du sulfarlem et leur sel correspondent dans un milieu H_2SO_4 , 20%, mémoire de Master, Chimie Appliquée, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2013.
- [3] Saadoune S., Synthèse et caractérisation d'inhibiteurs bi fonctionnels : Application à la corrosion des aciers de construction, mémoire de master, Electrochimie, Université Ferhat Abbas, Setif, Algérie, 2010.
- [4] Koller E., Aide-mémoire génie chimique. 3e édition. Dunod, Paris, 2009.
- [5] Nadjat B., B. F., Évaluation de pouvoir inhibiteur de l'huile de l'arnoise arborescente (Absinthe) vis-à-vis de la corrosion de l'acier au carbone en milieu chlorhydrique, mémoire de master, Chimie inorganique et environnement, Université Moulay Tahar, Saïda, Algérie, 2016.
- [6] Messikh S., Etude de l'inhibition de la corrosion d'acier doux par des composés organiques en milieu acide, Université Frères Mentouri, Constantine 1, 2022.
- [7] EL Bakouri H., Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique, Thèse de Doctorat, Université Mohammed 1 Oujda, Maroc, 2000.
- [8] Derfouf-Talbi H., Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (XC38) par l'extrait aqueux de plantes sahariennes dans le milieu acide chlorhydrique 1M, Thèse de Doctorat, Université Abou-BekerBelkaid, Tlemcen, 2019.

Chapitre I

***Raffinage du pétrole dans la
raffinerie de Skikda***

I.1. Introduction

Le travail que nous avons réalisé a été effectué au niveau de la raffinerie de Skikda qui est la plus grande raffinerie en Algérie. Elle présente plus de la moitié de la capacité de raffinage du pays. Elle possède un parc de stockage gigantesque faisant d'elle un organisme très important dans l'économie nationale. Dans ce qui suit nous allons présenter que la raffinerie de Skikda communément appelée RA1K.

I.2. La raffinerie de Skikda RA1K

La raffinerie de SKIKDA a pour objectif de transformer le pétrole brut en produits pétroliers répondants à des spécifications requises « Normes Nationales et Internationales ». Ces produits sont : GPL, Carburants, Bitumes, Aromatiques » sont destinés à la satisfaction des besoins du marché national et les excédents sont exportés [1]. La raffinerie est conçue pour le traitement des charges suivantes:

Brut Hassi Messaoud « B.H.M », et un brut « Mélange d'Arzew » avec une capacité annuelle de 16.5 millions de tonnes.

Brut réduit « B.R.I » importé pour la production des bitumes « Bitumes routiers et bitumes oxydés » avec une capacité annuelle de 275 000 T/M.

La raffinerie de Skikda dispose de deux unités de reformage catalytique « Reforming I et Reforming II » et de deux unités d'aromatiques « U.200 et U.400 » et de deux unités d'isomérisation « ISOM 1 U. (700,701) » et « ISOM 2 U. (702,703) » avec une unité de production de l'hydrogène « U 900 » et une unité d'isomérisation des xylènes « U.500 ». En plus des unités de production, la raffinerie dispose d'une centrale thermoélectrique « C.T.E » pour la production des utilités et l'énergie nécessaire au fonctionnement de ses unités.

Le stockage des charges et des produits finis et semi-finis se fait dans des bacs spécialisés selon le type du produit à stocker « Toit Fixe, Toit Flottant, Sphères, Cigares ». Les expéditions des produits finis vers les ports, entrepôts NAFTAL et camions sont réalisées par le biais des stations d'expédition spécifiques à chaque type de produit [2].

I.3. Situation géographique

La raffinerie de Skikda est située dans la zone industrielle à 7 Km à l'est de Skikda et à 2 Km de la mer, elle est aménagée sur une superficie de 190 hectares avec un effectif à l'heure actuelle de 1280 travailleurs environ. Elle est alimentée en brut algérien par le brut venant de Hassi Messaoud. Le transport du pétrole brut est réalisé à l'aide d'un Pipe-line à une distance de 760 Km de champs pétroliers jusqu'au complexe (Fig. I.1) [3].

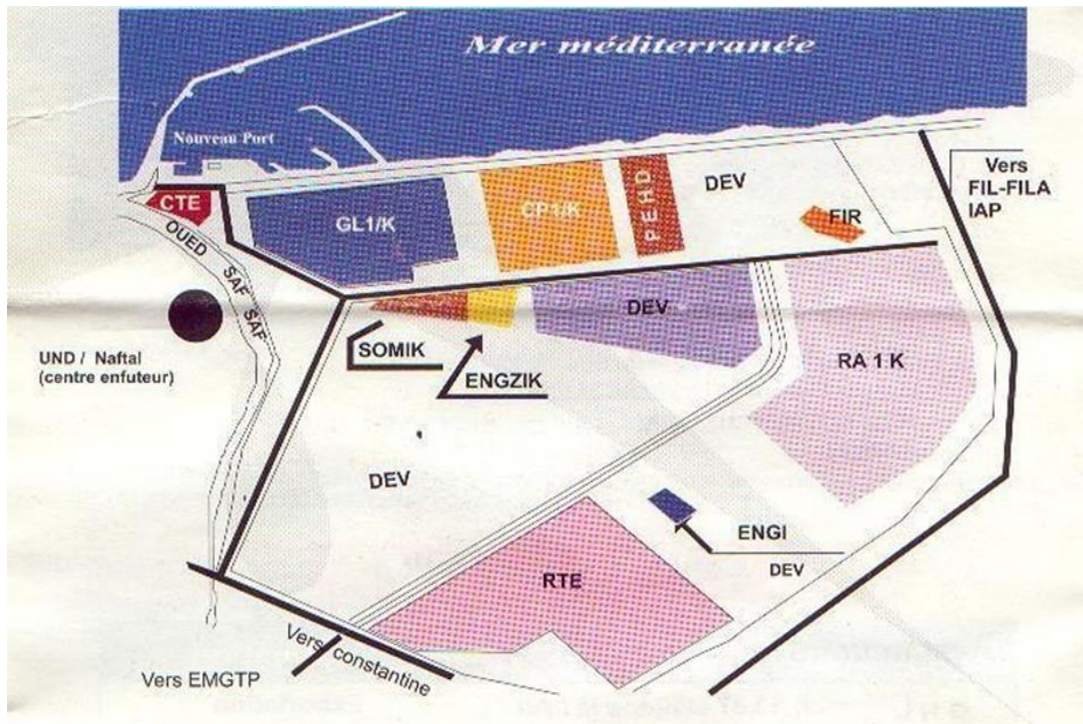


Figure I. 1 : Représentation géographique de la RA1K dans la zone industrielle de Skikda [3].

I.4. Présentation du laboratoire

Le laboratoire de la raffinerie est un laboratoire de contrôle des unités et d'analyse des produits finis commercialisés soit sur le marché extérieur, soit sur le marché intérieur. C'est un laboratoire accrédité

- **Salle d'analyse des eaux**

C'est la section où on contrôle l'unité des utilités, qui se présentent sous différentes branches : les chaudières, traitement des eaux résiduaires et eau déminéralisée.

Les différentes analyses effectuées sont : pH, conductivité, TA, TAC, TH, Cl^- , Ca^{2+} , mg^{2+} ...

- **Salle des analyses de routine**

Contrôle du Topping (U10, U11) : Concerne la distillation, la densité, tension de vapeur, Point de Mélange Critique d'Inflammabilité.

- **Salle des bitumes**

Contrôle des bitumes (U70) : ramollissement, pénétration, ductilité et densité par pycnomètre.

- **Salle des produits finis**

La salle s'intéresse au contrôle des produits stockés au melex prêts à être commercialiser sur le marché extérieur telles que : la Densité, la Distillation, l'acidité, la viscosité, le point d'écoulement, le point de congélation, le point d'éclair et le point de fumées.

- **Salle des analyses spéciales**

C'est la salle où s'effectue le contrôle de toutes les unités qui nécessitent des extra analyses, les analyses qui peuvent être effectuées sont :

- Détermination des métaux lourds par absorption atomique,
- Détermination du Souffre par méthode pyrofluorescence (U.V),
- Analyse des dépôts durant l'arrêt des unités,
- Détermination des composés existant dans le dépôt (particulièrement) Fe^{2+} , Al^{3+} , Zn^{2+} .

- **Salle moteur C.F.R**

C'est la salle de contrôle des unités magnaforming (U100) et reforming (U101, U103). La salle s'intéresse aux analyses suivantes :

- L'indice d'octane pour les essences.
- L'indice de cétane pour les gasoils.
- Le water séparomètre pour les Kérosènes (Jet A1) (l'analyse de l'eau).

- **Salle de chromatographie**

C'est le contrôle des unités extraction des aromatiques (U200), production des xylènes (U400) séparation des gaz (U30, U31, U104) et les unités telles que le magnaforming et le reforming, et le contrôle des bacs intermédiaires des produits aromatiques [4].

I.5. L'objectif de la raffinerie RA1K de Skikda

Les deux objectifs principaux de cette raffinerie sont :

- Continuer à assurer la couverture des besoins du marché national en produits raffinés, sur le plan quantitatif et qualitatif.
- Continuer à offrir des produits raffinés, destinés à l'exportation répondants aux normes en vigueur sur les marchés internationaux [5- 7].

I.6. Raffinage du pétrole

Le pétrole brut est un mélange très variable de produits de consommation énergétique (produits lourds et légers) qu'il faut séparer par raffinage pour répondre aux différents besoins.

La transformation des pétroles bruts s'effectue dans les raffineries, usines à feux contenus et très automatisés, qui sont plus ou moins complexes selon la gamme des produits fabriqués et selon la qualité des pétroles bruts comparée aux exigences du marché.

La complexité d'une raffinerie se traduit par le nombre d'unités de fabrication. Ces unités utilisent des procédés physiques ou chimiques que l'on peut classer en trois catégories, les procédés de séparation, procédés de conversation, et les procédés d'épuration.

Ainsi, les processus continus d'une raffinerie simple comportent d'abord une épuration du pétrole brut, puis une séparation par distillation en produits blancs (distillats légers, moyens) et en produits noirs (résidus lourds) en se basant sur des transferts de matière et de chaleur entre les différents effluents traversant ses procédés [8- 11].

I.7. Composition du pétrole brut

Le pétrole brut, appelé aussi hydrocarbure, selon cette nomenclature, on distingue les deux mots hydrogène et carbone, qui sont les composants essentiels de tous les pétroles bruts ; leurs teneurs sont (83% à 87%) pour le carbone et (11% à 14%) pour l'hydrogène. Ces deux éléments forment les trois grandes familles des hydrocarbures qui sont :

- a) Aliphatiques
- b) Cycliques
- c) Les hydrocarbures mixtes [12].

Il contient également d'autres éléments tels que l'oxygène, l'azote et le soufre dont la teneur varie entre 1% et 7%. La concentration de ces éléments peut varier considérablement d'un type de pétrole à un autre. Par ailleurs, il a été établi que les cendres issues du pétrole contiennent des éléments comme le chlore (Cl), le phosphore (P), le silicium (Si), ainsi que des métaux tels que le potassium (K), le sodium (Na), le fer (Fe) et le nickel (Ni) [13,14].

I.8. Les procédés de séparation

La première étape est celle de la séparation des molécules par distillation.

La distillation du pétrole comprend deux procédés distincts : la distillation atmosphérique et la distillation sous vide.

I.8.1. La distillation atmosphérique

La distillation atmosphérique est un procédé de distillation qui consiste à séparer les fractions d'hydrocarbures contenues dans le pétrole brut. C'est la première étape du raffinage du pétrole. Son fonctionnement est fondé sur la différence des températures d'ébullition de chacun des produits purs contenus dans le pétrole. Les produits les plus légers (basse température d'ébullition environ 20°C) sont récupérés en haut de la colonne tandis que les plus lourds (haute température d'ébullition, plus de 375°C) se concentrent en bas de la colonne.

En effet, les hydrocarbures les plus lourds restent sous forme liquide tandis que les molécules de masse faible ou moyenne passent à l'état de vapeur et s'élèvent dans la colonne

[15-17]. Au cours de leurs montées, elles se refroidissent et reviennent à l'état liquide puis collectées à différents étages sur les plateaux.

A chaque étage de la colonne de distillation correspond une température moyenne située entre les points de rosée (condensation) et de bulles (vaporisation) des produits que l'on souhaite récupérer (Fig. I.2).

A partir de la colonne de distillation on obtient :

- Un produit de tête (gaz non condensable, GPL, essence totale).
- Trois coupes latérales (kérosène, gasoil léger, gasoil lourd).
- Un résidu atmosphérique au fond.

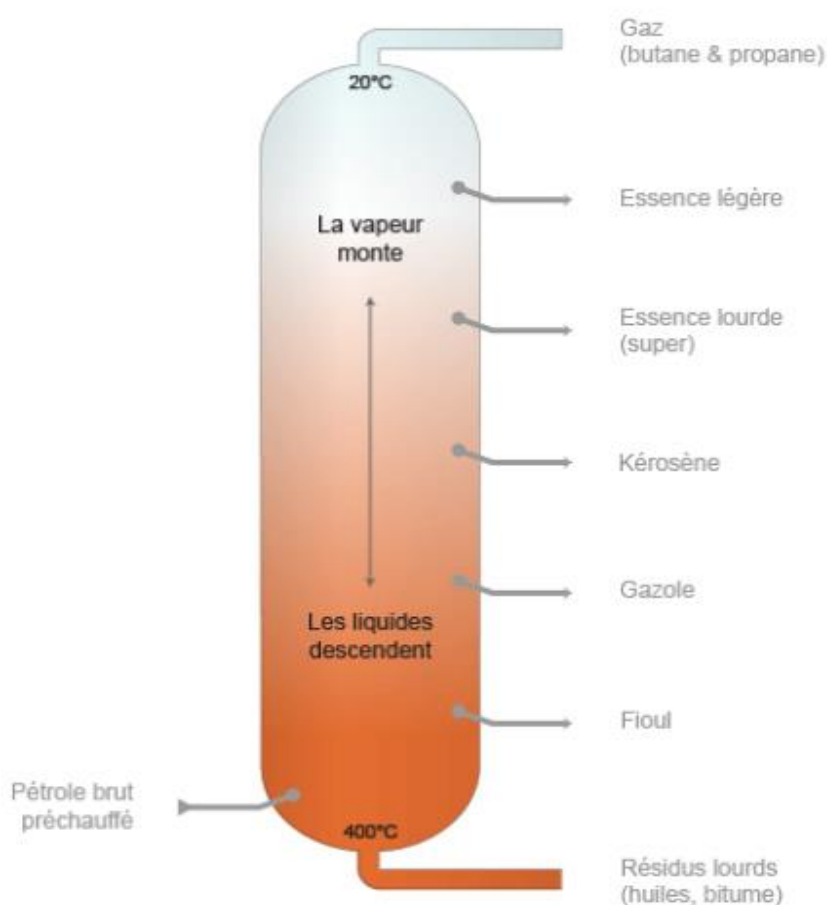


Figure I.2 : Unité de distillation atmosphérique [15].

I.8.2. Distillation sous vide

Les produits lourds extraits du fond de la colonne de distillation atmosphérique ne peuvent pratiquement plus être séparés en augmentant la température de distillation. En effet, au-delà des 360° environ auxquels on porte le pétrole brut dans la distillation atmosphérique, commencent les phénomènes de craquage thermique. Cela changerait la nature chimique des

produits. Pour isoler ces produits, on les distille donc à des températures similaires, mais sous pression réduite. Les installations qui pratiquent cette opération sont les unités de distillation sous vide (Fig. I.3).

Les produits séparés par distillation sous vide sont moins nombreux que ceux isolés par distillation atmosphérique.

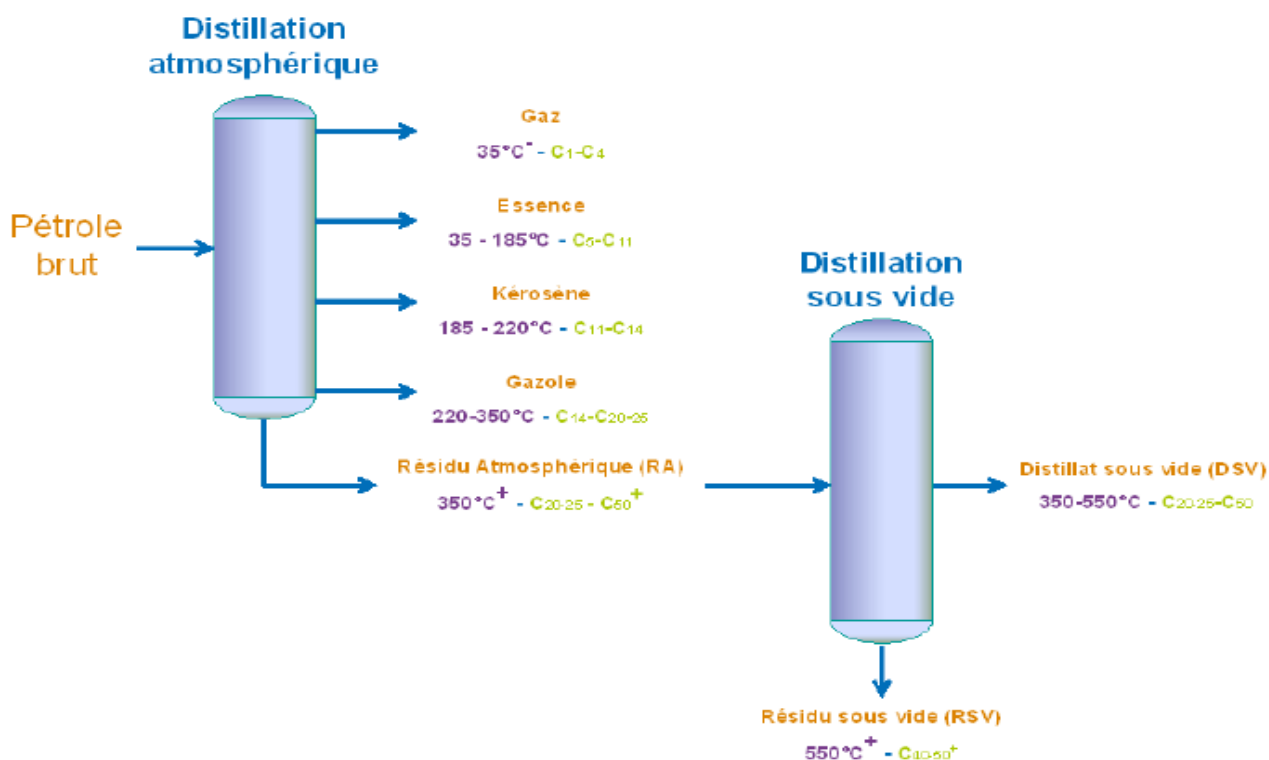


Figure I.3 : Distillation atmosphérique et sous vide d'un pétrole brut et exemples de coupes associées [15].

I.9. Le kérosène traité (Jet A1)

Le kérosène traité (Jet A1) est un carburant destiné à l'alimentation des brûleurs des turboréacteurs d'avion. La coupe Kérosène est utilisée pour la fabrication du Jet A1. Les exigences de qualité qui sont en relation avec la volatilité et les points de coupe sont essentiellement :

- **Le point d'éclair :** Pour le Jet A1, la spécification correspond à un point d'éclair ABEL $\geq 38^{\circ}\text{C}$.
- **Le point final** de distillation doit être égal à 250°C
- **Freising point ou le point de congélation** doit être $\leq -47^{\circ}\text{C}$,

La différence entre le Kérosène et le Jet A1 est représentée dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Comparaison entre le Kérosène et Jet A1.

Coupe Kérosène	Jet A1
- Teneur en soufre	- Soufre $\leq 0,3\%$ masse
0,01 à 0,07% masse sur bruts BTS	- Mercaptans $\leq 30\text{g/t}$
0,07 à 0,3% masse sur bruts HTS	- Conductivité $\geq 150\text{Ps/m}$
Exceptionnellement plus de 0,3%	
- Teneur en mercaptans RSH	
10 à 300 g/t selon les bruts	
- Conductivité 0ps/m	

Pour la fabrication du Jet A1, on voit que si le kérosène est issu d'un brut à basse teneur en soufre (BTS), il est inutile de le traiter. S'il est issu d'un brut contenant du soufre, on envoie cette coupe vers l'unité d'hydrotraitement afin d'enlever tout le soufre qu'il contient. [18].

I.10. Généralités sur le fioul

Le fioul ou mazout ou fuel est un combustible dérivé du pétrole, il est classé dans les ressources énergétiques fossiles. Le fioul est un liquide combustible qui peut avoir la couleur brun foncé ou noire.

Le fioul est issu de la fin de distillation du pétrole brute, celui-ci malheureusement inutilisable à ce stade. Pour l'obtenir, il convient de le purifier par configuration pour éliminer le pourcentage d'eau et les particules abrasives constitués de métaux lourds (vanadium, le nickel), les sédiments et autres résidus.

De plus la consommation du fioul par les propulseurs des navires génère des déchets (résidus). Ces résidus sont donc valorisés (chauffés ou dilués) et donnent naissance à un fioul qui est un produit noir plus ou moins visqueux selon sa densité et qui a une plus-value à savoir un fort potentiel énergétique.

La composition élémentaire du fioul est représentée dans le tableau I.2. Le fioul obtenu par fonctionnement du pétrole brut possède des caractéristiques similaires à celles du gasoil qui sont :

- Son pouvoir calorifique inférieur (PCI) est d'environ 12 KWh/kg, c'est-à-dire qu'un kilogramme de fioul procure au mieux 12 Kilowatt heures d'énergie en brûlant, compte tenu des pertes dues à la vaporisation de l'eau dans les fumées.
- Son pouvoir calorifique supérieur (PCS) est d'environ 12,8 KWh/Kg
- Le fioul ne s'enflamme pas à température ambiante.

- Point d'éclair variable (à partir de 70°C) [19].

Tableau I.2 : Composition élémentaire du Fioul.

Eléments	Fraction massique
Carbone	86,5
Hydrogène	13,3
Souffre	<0,2
Azote	50-400 ppm
Oxygène	Traces

Références bibliographiques du chapitre I

- [1] Choui N., Bidouche M.S., Manuel opératoire stockage zone nord, Raffinerie de Skikda, 2005, p. 11-17.
- [2] Belaidi A., Modélisation et Optimisation des pools essences avant et après réhabilitation de la raffinerie de Skikda, Mémoire de fin d'études, Ecole d'ingénieurs de Boumerdes, 2011.
- [3] Documentation Interne RA1K, manuel operating, 2014.
- [4] Fares A., Boudelf Ch., Caractérisation et analyses du Gazoil au niveau de laboratoire RA1K, Institut Algérien du pétrole.
- [5] Slama A., Menasria B., Amélioration des performances de l'unité de reformage catalytique II (U103) RA1k (Skikda), Mémoire de Master, Université 8 mai 45, Guelma, 2020.
- [6] <https://www.univ-eloued.dz/images/memoir/file/M.T-103-01>.
- [7] <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/10217>
- [8] Prsokouriakov V., Drabkine A., La chimie de pétrole et du gaz, Edition Moscou, 1983.
- [9] <https://fr.scribd.com/document/458664066/resume-reformage-catalytique>
- [10] Labsi N., Polycopié de cours, Introduction au Raffinage et à la Pétrochimie, 2021.
- [11] Benkezim R., Raffinage du pétrole et caractérisation d'un sous-produit huile moteur commerciale pour véhicules lourds de type diesel, Mémoire de Master, 2017.
- [12] Derdar H., Intitulé du sujet Suivi de traitement de pétrole brut par analyses chimiques « Sonatrach-organisation Ourhoud-hassimesaoud », Mémoire de Master, 2014.
- [13] Agal Y., Guenineche O., Simulation d'une colonne de pré-distillation du pétrole brute au niveau de la raffinerie RA1K de Skikda, Mémoire de Master, 2021.
- [14] Dou F., Dou M., Retteb S., Changement du Ballon de Flash par une Colonne de Prédistillation avec une Augmentation de 16% de la Capacité de l'Unité de Distillation Atmosphérique, Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhder, EL-Oued.
- [15] Boufellah., Polycopié de cours, Introduction au Raffinage et à la Pétrochimie, Université M'hamed Bougara, Boumerdès, 2019.

- [16] Nadjib C., Polycopié de cours, Introduction au Raffinage et à la Pétrochimie, Université Farhat Abbas 1, Sétif, 2020.
- [17] [https :www.connaissancedesenergies/fiche.pedagogique/petrole](https://www.connaissancedesenergies/fiche.pedagogique/petrole)
- [18] Ousna M., Bousbia, S., Suivi de la qualité de traitement du kérosène en Jet A1 au niveau de l'unité Topping-Raffineri d'Adrar, Université Ahmed draia, Adrar, 2020
- [19] <https://fr.scribd.com/document/780008123/debut-memoire>

Chapitre II

***La corrosion des métaux et
les inhibiteurs verts***

II.1. Introduction

La corrosion métallique est un phénomène de dégradation spontanée d'un matériau dans un environnement. Le phénomène de corrosion est essentiellement un phénomène électrochimique. On observe différents types de corrosion : sèche, atmosphérique, sous contrainte, humide et biocorrosion. On se limite à la corrosion métallique en solution. Elle se traduit simultanément par réaction d'oxydation du métal et une réaction de réduction de l'agent corrosif ou oxydant [1, 2].

II.2. Notions de corrosion des métaux

Le terme de corrosion provient du latin corroder, qui signifie ronger, attaquer. La définition officielle du terme corrosion, donnée par la norme ISO 8044, est la suivante :

«Interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs. »

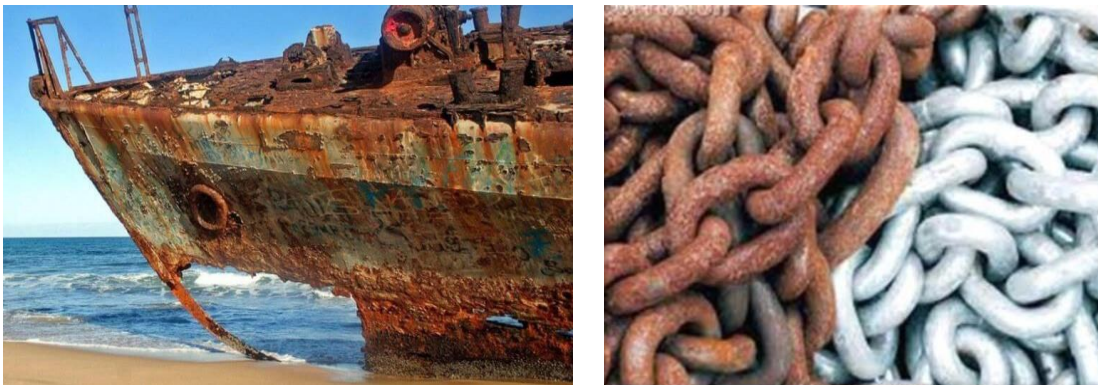


Figure II.1 : Représentation de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion [2].

La corrosion métallique est le phénomène suivant lequel les métaux et alliages ont tendance, sous l'action de réactifs chimiques ou d'agents atmosphériques, à retourner vers leur état originel d'oxyde, de sulfure, de carbonate ou de tout autre sel plus stable dans le milieu ambiant [3].

II.3. Différents types de corrosion

Le processus de corrosion des métaux prend de nombreuses formes, qui sont classées principalement selon la forme qui se manifeste à la surface corrodée :

- La corrosion uniforme,
- La corrosion localisée [4].

II.3.1. Corrosion uniforme

La corrosion uniforme ou généralisée est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface (Fig. II.2), Elle se traduit par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent agressif. Cette forme de corrosion est relativement facile à quantifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur et sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôles périodiques. Les concepteurs d'appareillages peuvent en tenir compte en prévoyant des surépaisseurs consommables par la corrosion. Ce type de corrosion est donc souvent peu dangereux même s'il peut être très coûteux [5].

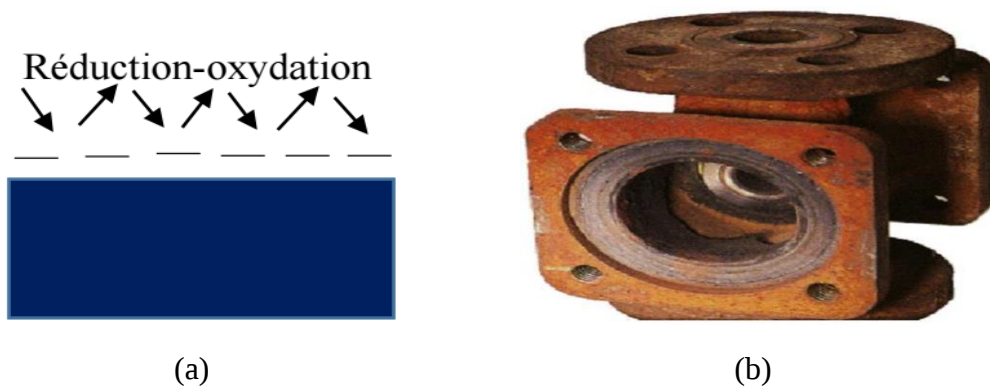


Figure II.2 : a) La distribution homogène des demi-réactions anodiques et cathodiques génère une corrosion uniforme, b) Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier [6, 7].

II.3. 2. Corrosion localisée

La corrosion localisée survient sur une partie du métal à un taux bien supérieur au reste de la surface (Fig. II.3), elle peut avoir plusieurs formes, De façon globale, Si la progression de la corrosion s'accomplit à une vitesse uniforme en tout point de la surface, on parle de corrosion uniforme. Si la progression des vitesses de corrosion est non homogène, on parle de corrosion localisée [2].

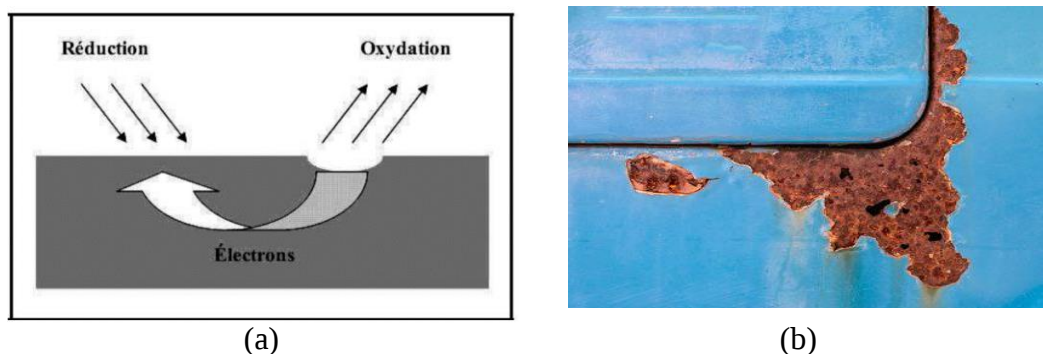


Figure II.3 : a) Représentation schématisée d'une corrosion localisée, b) Corrosion localisée [6- 8].

Les différentes formes de la corrosion localisée sont :

II.3. 2.1. Corrosion par piqûres

Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse. L'attaque se limite à des piqûres, très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne. Les solutions les plus agressives contiennent des chlorures, bromures, hypochlorites. Les iodures et les fluorures sont beaucoup moins actifs. La présence de sulfures et d' H_2S exacerbe les problèmes de corrosion par piqûres en abaissant systématiquement les critères de résistance.

La présence d'un cation oxydant (Fe^{3+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} , ...) permet la formation des piqûres même en absence d'oxygène. Les aciers inoxydables sont particulièrement sensibles à la corrosion par piqûres, mais d'autres métaux comme le fer passif, le chrome, le cobalt, l'aluminium, le cuivre... et leurs alliages y sont aussi sensibles [8].

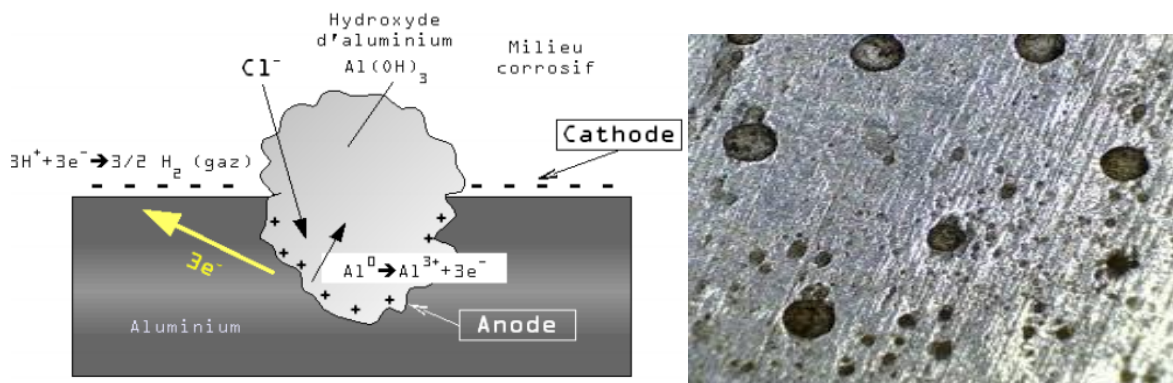


Figure II.4 : Corrosion par piqûres [8].

Une piqûre peut avoir des formes différentes selon les conditions expérimentales. Ces formes sont représentées de façon schématique sur la figure II.5. Il existe des formes étroites et profondes (Fig. II.5 (a)), des piqûres caverneuses (Fig. II.5 (b)) ou des formes hémisphériques (Fig. II.5 (c)), souvent décrites dans la littérature [2].



Figure II.5 : Formes de piqûres (a) cavité profonde (b) cavité caverneuse (c) hémisphérique [2].

II.3. 2.2. Corrosion sélective

C'est un type de corrosion très dangereux parce qu'il est insoupçonné, la pièce corrodée ne semble pratiquement pas concernée, alors que sa résistance diminue considérablement. Elle consiste en la dissolution sélective d'un élément d'un alliage, les autres éléments restent non attaqués. Le métal devient poreux et perd sa résistance (Fig. II.6) [9].

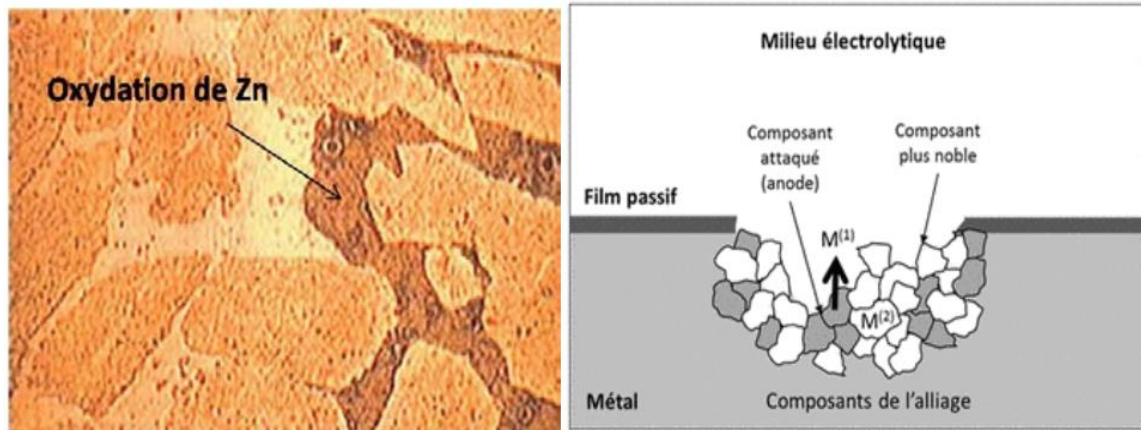


Figure II.6 : Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage cuivre-zinc) [2].

II.3. 2.3. Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse est une forme de corrosion localisée liée à la présence d'interstices étroites (trous / crevasses) formés entre les métaux de même/différents nature ou entre un métal et non-métal, en présence d'un milieu corrosif stagnant dans des interstices (Fig. II.7) [10, 11].

Il existe de principaux facteurs qui influencent sur la corrosion caverneuse tels que :

- Matériaux : composition d'alliage, structure métallographique.
- Conditions environnementales telles que le pH, la concentration en oxygène, la concentration en halogénures et la température.
- Caractéristiques géométriques des crevasses (taille de l'espace, sa profondeur et la surface).
- Le type de crevasse (métal-métal / métal-non métal).

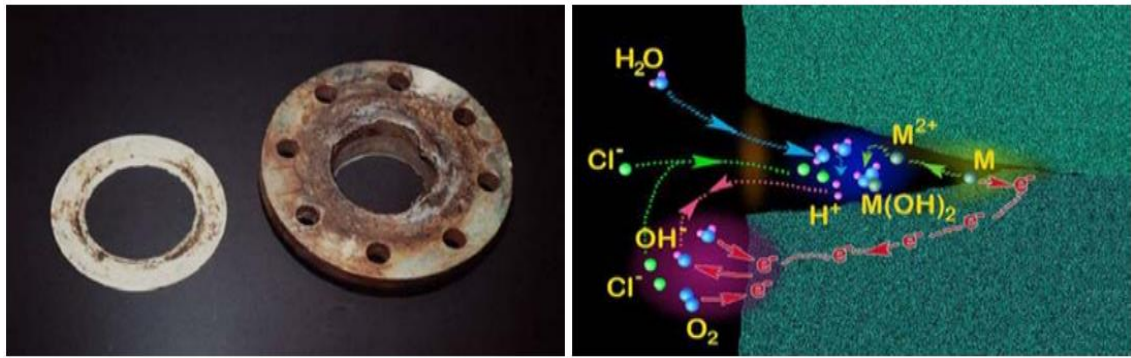


Figure II.7 : Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse [10].

II.3. 2.4. Corrosion par érosion

La corrosion-érosion affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier...), elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière.

Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide d'un fluide et se développe progressivement selon trois étapes (Fig. II.8) [7].

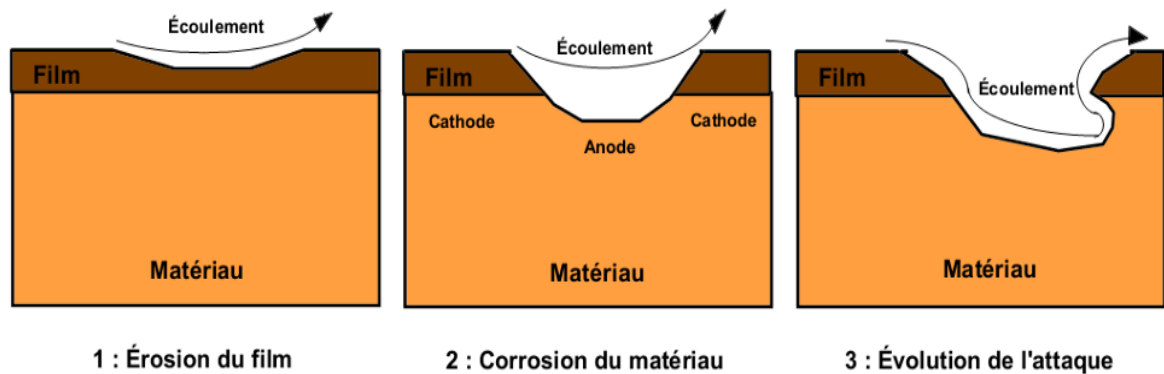


Figure II.8 : Étapes de développement du phénomène de corrosion par érosion [7].

II.3. 2.5. Corrosion galvanique

La corrosion galvanique, appelée également corrosion bimétallique, est l'une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte. Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou des conditions physicochimiques à l'interface [7] (Fig. II.9). Cette forme de corrosion est souvent liée à une mauvaise conception des installations. Par exemple, des erreurs de montage de la statue de la liberté occasionne l'accès d'eau à des dispositifs constitués d'alliages cuivreux et d'acier au carbone dont la corrosion s'est trouvée accélérée [2].

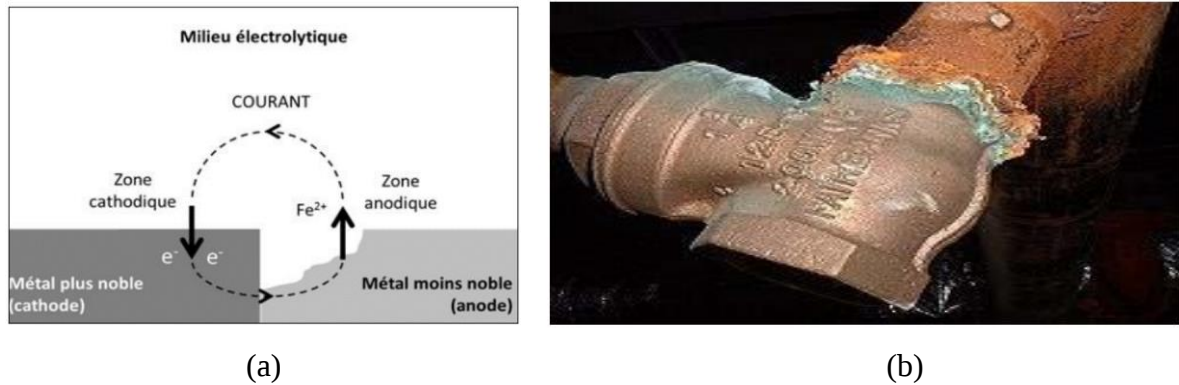


Figure II.9 : a) Représentation schématique de corrosion galvanique, b) Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé [7].

II.3. 2.6. Corrosion sous contrainte

Ce type de corrosion se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif. Ce sont les contraintes de tension, d'où le nom donné parfois à ce mode de corrosion. La corrosion sous contrainte mécanique (CSC) se produit la plupart du temps dans des milieux peu ou non agressifs à l'égard du métal ou de l'alliage en l'absence de toute contrainte. Cette forme de corrosion constitue un risque permanent dans de nombreuses installations industrielles, tant sur le plan des incidences économiques que sur les aspects sécuritaires (personnel, fiabilité des équipements, respect de l'environnement) (Fig. II.10) [12, 13].

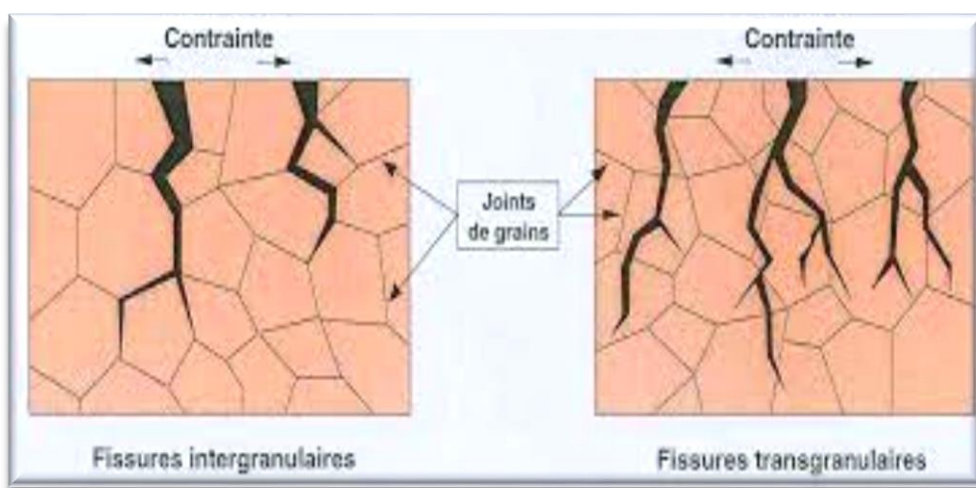


Figure II.10 : Corrosion sous contrainte [12].

II.3. 2.7. Corrosion intergranulaire

C'est une forme de corrosion qui se propage dans le métal en consommant uniquement les zones associées aux joints de grains. Elle peut être liée à la structure atomique et à la composition des joints de grains en absence de précipitation (corrosion intergranulaire hors précipitation) ou à la décoration des joints de grains par une précipitation [14].

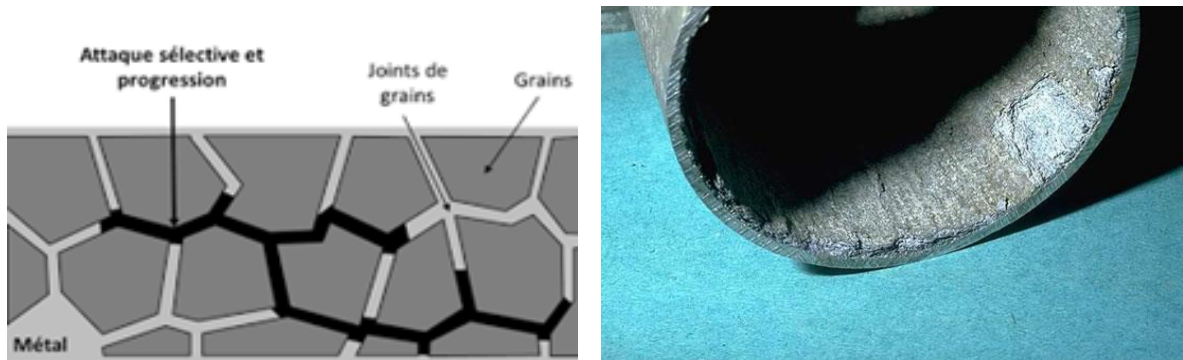


Figure II.11 : Corrosion intergranulaire [2].

II.3. 2.8. La corrosion filiforme

Généralement ce type de corrosion se produit dans certains revêtements sous forme de filaments distribués aléatoirement comme la peinture (Fig. II.12) [2].



Figure II.12 : Corrosion filiforme [2].

II.4. Classification des différents types de corrosion

II.4.1. Corrosion chimique

Aux températures élevées, les anions et les cations se diffusent plus rapidement à travers un film compact, ce film croît rapidement avec une vitesse égale à la vitesse de la corrosion. La surface intérieure est considérée comme anode, alors que la surface extérieure du film est considérée comme cathode. L'oxyde dans ce cas est un électrolyte et un conducteur électronique en même temps, contrairement aux piles électrochimiques classiques [15].

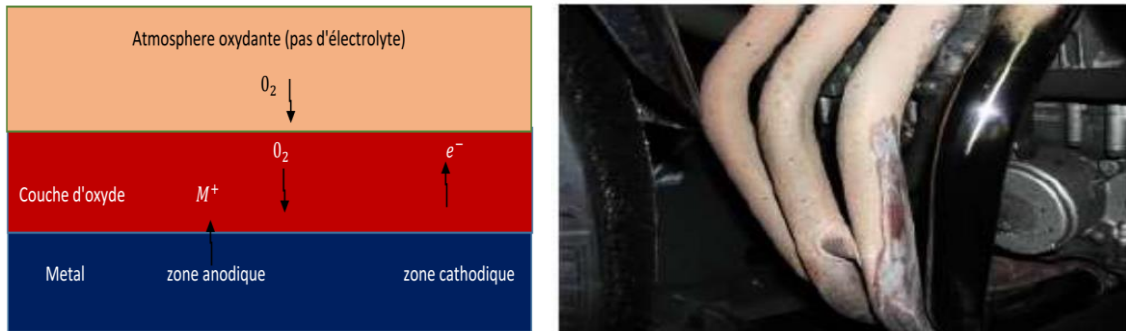
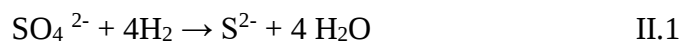


Figure II.13 : Mécanisme de la corrosion séchée: exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement.

II.4.2. Corrosion biochimique

La corrosion biochimique ou corrosion bactérienne, est une attaque bactérienne sur les canalisations enterrées, ces bactéries réagissent avec les éléments chimiques se trouvant dans le métal pour le transformer en oxyde (Fig. II.14) [16].

- Bactéries sulfato-réductrices Ces sont des bactéries anaérobies réductrices de sulfates, qui donnent des sulfures suivant la réaction :



- Bactéries oxydant le soufre On retrouve ce type de bactéries dans les gisements de pétrole et dans les égouts où elles attaquent rapidement le ciment [15].

Le développement de ce type de corrosion dépend du pH, de la température et de la teneur en oxygène dissous.

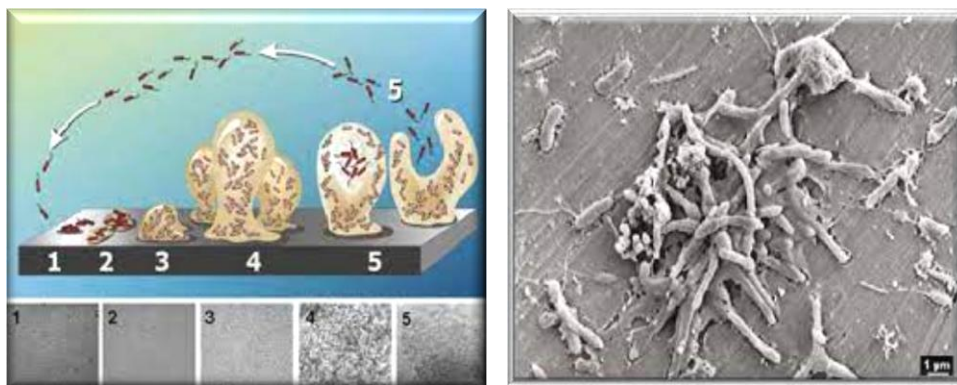


Figure II.14 : Corrosion biochimique [15].

II.4.3. Corrosion électrochimique

C'est l'attaque des métaux dans les électrolytes en raison de l'existence d'une hétérogénéité dans le système (métal-réactif). La corrosion électrochimique ou humide est la plus rencontrée dans l'industrie du pétrochimique. Pour qu'il y ait une corrosion il faut réunir quatre conditions :

- Une anode : Où se développe la réaction d'oxydation qui entraîne sa dissolution en cations dans le réactif.
- Une cathode : Où se développe la réaction de réduction des cations trouvant dans l'électrolyte (réduction des protons H^+ , réduction de l'oxygène en milieu acide, ...).
- Un conducteur ionique : c'est la migration des cations libérés de l'anode vers les anions libérés à la cathode.
- Un conducteur électrique : assure le contact entre la cathode et l'anode [17,18].

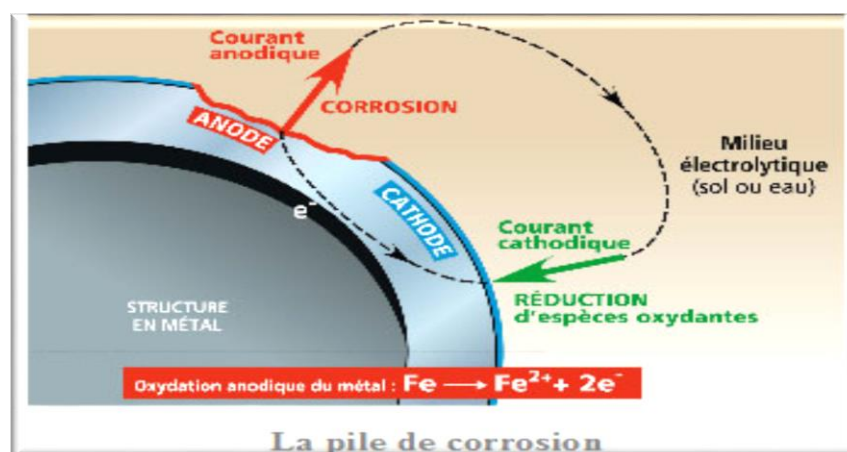


Figure II.15 : La pile de corrosion électrochimique [17].

II.5. Protection contre la corrosion

II.5.1. Protection par revêtements

Les peintures sont des mélanges de pigment insoluble en suspension dans un véhicule organique continu. Les pigments se compose généralement d'oxydes métalliques, par exemple TiO_2 , Pb_3O_4 , Fe_2O_3 ou d'autres composés tel que : ZnCrO_4 , PbCO_3 , BaSO_4 , etc. Une bonne peinture doit remplir les conditions suivantes [1] :

- 1) Inhiber la corrosion : les pigments incorporés dans le revêtement initial (revêtement immédiatement adjacent au métal) doivent être de bons inhibiteurs de corrosion.
- 2) Assurer une bonne barrière de diffusion à la vapeur.
- 3) Durer longtemps et coûter peu.

II.5.2. La protection électrochimique

Pour effectuer la protection électrochimique d'un métal, on modifie son potentiel de dissolution. On parle alors de protection cathodique ou anodique [1].

II.5.2.1. Protection cathodique

La protection cathodique est également une technique pour contrôler la corrosion d'une surface métallique en transformant cette surface en la cathode d'une cellule électrochimique. La protection cathodique est utilisée pour protéger les structures métalliques de la corrosion, notamment l'acier, les gazoducs, les oléoducs, les canalisations d'eau, les réservoirs, les piliers métalliques des jetées, les navires, les plateformes pétrolières ou encore les structures en béton armé.

II.5.2.2. Protection anodique

Certains métaux tels que le fer et les aciers inoxydables peuvent aussi être protégés efficacement en les plaçant en anode et en augmentant leur potentiel dans le domaine passif de la courbe de polarisation anodique.

La protection anodique a trouvé une application dans la protection des réservoirs contenant en particulier de l'acide sulfurique, la méthode est applicable aussi à d'autres acides.

II.5.2.3. Protection par anode sacrificielle

Un métal plus corrodable (Al, Mg, Zn...) est intégré dans la structure en contact électrique avec le métal à protéger [19].

II.5.3. Protection par inhibition

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances qui, ajoutées en très faible quantité dans le milieu corrosif, diminuent la vitesse de corrosion en modifiant la nature de l'interface : substrat métallique/électrolyte [20].

II.6. Généralité sur l'Inhibition de la corrosion

D'après "National Association of Corrosion Engineers (NACE)" : un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration.

Il s'agit d'un moyen original de lutte contre la corrosion ; on ne traite pas directement le métal, mais on intervient par l'intermédiaire du milieu. Les inhibiteurs de corrosion sont des composés qui modifient les réactions électrochimiques sans toutefois y participer eux-mêmes.

II.6.1. Propriétés des inhibiteurs

D'une manière générale un inhibiteur doit :

- Abaisser la vitesse de corrosion d'un métal, sans en affecter les caractéristiques physico-chimiques, en particulier la résistance mécanique (par exemple, risque de fragilisation par l'hydrogène en milieu acide) ;
- Être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants ;
- Être stable aux températures d'utilisation ;
- Être efficace à faible concentration ;
- Être compatible avec les normes de non-toxicité ;
- Être peu onéreux [1].

II.6.2. Les facteurs affectant la performance des inhibiteurs**II.6.2.1. Effet de la température**

Avec l'augmentation de la température, la vitesse de corrosion des métaux augmente et l'efficacité de la plupart des inhibiteurs diminue à cause de diminution de recouvrement de la surface de métal par les inhibiteurs adsorbés. Mais, en présence de certains inhibiteurs, par exemple, sulfure de dibenzyle, le dibenzyl-sulfoxyde, l'aniline et la gélatine, la vitesse de corrosion est réduite [11].

Une courbe de type Arrhenius ($\ln$ (vitesse de corrosion) en fonction de $1/T^\circ$) est souvent linéaire en présence d'inhibiteurs, comme dans le système désinhibé.

II.6.2.2. Effet de la concentration d'inhibiteur

Les lois de variation de la quantité adsorbée en fonction de la concentration en inhibiteur peuvent souvent être représentées par les isothermes classiques suivantes :

A. Isotherme d'adsorption de Langmuir

Le modèle de Langmuir suppose qu'il existe à la surface un nombre fixe de sites. Chacun de ces sites ne peut adsorber qu'une seule particule. De plus, comme on néglige les interactions entre particules adsorbées, l'énergie d'adsorption est constante [12]. Dans notre cas, la vitesse d'adsorption est proportionnelle à la concentration en inhibiteur C_{inh} et à la fraction de sites d'adsorption non occupée $(1-\theta)$.

$$V_{ads} = k_{ads} (1-\theta) C_{inh} \quad \text{II.2}$$

Inversement, la vitesse de désorption est proportionnelle à la fraction de sites occupés par le gaz adsorbé :

$$V_{des} = k_{des} \theta \quad \text{II.3}$$

A l'équilibre, les deux vitesses sont égales.

$$k_{ads} (1-\theta) C_{inh} = k_{des} \theta \quad \text{II.4}$$

Un réarrangement donne la fraction de sites occupés, aussi appelée taux de recouvrement de la surface :

$$\theta = \frac{K C_{inh}}{1 + K C_{inh}} \quad \text{II.5}$$

Dans cette équation, K désigne le coefficient d'adsorption.

B. Isotherme d'adsorption de Temkin

$$K C_{inh} = \exp(-2a\theta) \quad \text{II.6}$$

C. Isotherme d'adsorption de Frumkin

$$\ln \left[\frac{\theta}{C(\theta - 1)} \right] = \ln(K) + 2a\theta \quad \text{II.7}$$

Où a est une constante d'interaction entre particules adsorbées.

Lorsqu'un métal est en contact avec un électrolyte, on observe également une séparation de charges. La distribution des charges à l'interface dépend alors de nombreux facteurs : propriétés électroniques du solide, adsorption de molécules d'eau ou de cations hydratés et chimisorption d'anions.

II.6.2.3. Vitesse d'écoulement

La performance d'inhibiteurs est généralement affectée par une forte agitation. La vitesse de corrosion augmente avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement.

Une relation linéaire a été observée entre la vitesse du fluide et la vitesse de corrosion de l'acier au carbone en milieu HCl en présence des inhibiteurs commerciaux [14].

II.6.2.4. La nature de métal

L'action des inhibiteurs est sélective et dépend de la nature de métal à protéger, sa composition et son traitement métallurgique. Un inhibiteur qui est très efficace pour un métal peut ne pas être satisfaisant pour un autre. De nombreux inhibiteurs pour les métaux ferreux sont inefficaces pour les métaux non ferreux comme le zinc et l'aluminium. Toutefois, certains inhibiteurs ou leurs mélanges protègent plus d'un métal.

II.6.2.5. L'électrolyte

La nature de l'électrolyte a un effet considérable sur la protection des inhibiteurs. Par exemple, la quinoléine et les amines retardent la vitesse de corrosion des aciers en milieu acide chlorhydrique beaucoup plus fortement que dans l'acide sulfurique [13].

II.6.2.6. Le pH

De nombreux inhibiteurs deviennent satisfaisants à un pH inférieur ou supérieur à pH optimum. Par exemple, le benzoate de sodium n'est pas efficace dans des électrolytes avec pH inférieur à 5,5 [15].

II.7. Inhibition de la corrosion par les substances naturelles

De nombreux inhibiteurs utilisés aujourd'hui sont soit synthétisés à partir de matières premières peu coûteuses ou proviennent de composés organiques ayant des hétéroatomes tels que l'azote, le soufre, le phosphore ou l'oxygène dans leur système aromatique ou dans leur chaîne carbonée. Cependant, la plupart de ces substances anticorrosive sont toxiques vis à vis des êtres humains et de l'environnement. Ces inhibiteurs peuvent notamment causer des dommages temporaires ou permanents du système nerveux, mais également des perturbations du processus biochimique et du système enzymatique de notre organisme [16].

Ces inhibiteurs n'étant pas biodégradables, ils causent également des problèmes de pollution. En conséquence, ces lacunes ont orienté la recherche dans la direction des substances naturelles qui peuvent également offrir des propriétés inhibitrices vis-à-vis des métaux et des alliages. L'utilisation d'extraits de plantes, comme inhibiteurs de corrosion, est une thématique

de recherche en développement si on se fie au nombre de publications sortant chaque année. En effet, ces extraits naturels contiennent de nombreuses familles de composés organiques naturels (flavonoïdes, alcaloïdes, tannins...) écologiques, aisément disponibles et renouvelables .

II.8. Généralités sur les huiles essentielles

La définition donnée par (Afnor, 2000). Est la suivante : « les huiles essentielles (HEs) sont des produits obtenus à partir d'une matière première d'origine végétale soit par entraînement à la vapeur d'eau soit par des procédés mécaniques à partir de l'épicerie des Citrus soit par distillation sèche ».

Les huiles essentielles sont des extraits végétaux volatiles et odorants appelés également substances organiques aromatiques liquides qu'on trouve naturellement dans diverses parties des arbres des plantes et des épices elles sont volatiles et sensibles à l'effet de la chaleur elles ne contiennent pas de corps gras [17,18].



Figure II.16 : Schéma représentant les différents constituants d'une goutte d'huile essentielle.

II.9. Acier au carbone

L'emploi extensif des moyens mécaniques et le niveau de vie le plus élevé apte à améliorer les conditions de vie, ont pour conséquence une consommation croissante d'énergie ce qui rend l'utilisation très vaste des aciers dans la production énergétique (les échangeurs thermiques et les chaudières) mais à cause des conditions de la production énergétique (chaleur, humidité) ces aciers sont exposés à un problème d'usure à cause d'attaque chimique [21].

Les aciers sont des alliages métalliques à base de fer additionnés d'un faible pourcentage de carbone environ de (0.008 à 2.14 % en masse), L'addition de carbone augmente la résistance à la traction, à la dureté et à la corrosion, mais diminue la ductilité et la malléabilité. Même en très petites quantités, le carbone modifie grandement la résistance du fer. Des éléments d'alliages sont généralement ajoutés à un alliage Fe-C afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et les propriétés des aciers.

Les aciers au carbone se divisent en trois sous-familles : les aciers doux, les aciers à moyenne teneur en carbone et les aciers à forte teneur en carbone.

II.9.1. Propriétés des matériaux

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux est essentielle à la conception et à la fabrication d'objets techniques. Il est en effet important de sélectionner les matériaux adéquats afin que la pièce créée puisse résister aux contraintes qu'elle subit.

- Dureté : propriété d'un matériau de résister à la pénétration d'un autre matériau.
- Ductilité : propriété d'un matériau de s'étirer sans se rompre.
- Elasticité : propriété d'un matériau de se déformer puis de reprendre sa forme initiale par la suite.
- Rigidité : propriété d'un matériau de garder sa forme, même lorsqu'il est soumis à diverses contraintes.
- Résilience : propriété d'un matériau de résister aux chocs sans se rompre [22].

II.9.2. Influence des éléments d'addition

Les éléments d'addition (éléments d'alliage) sont en général des "métaux" surtout dans les aciers mais ce peut être des "non métaux" ou des "gaz". En général, les éléments d'alliage améliorent les propriétés de ces métaux. Les éléments d'addition dans les aciers sont nombreux (une trentaine). Ces éléments ont une action spécifique dans les aciers [23].

Fer : Le fer pratiquement pur n'est pas mécaniquement très performant. Ses caractéristiques de résistance (la limite d'élasticité, la résistance à la traction mais aussi la dureté, la ténacité...) sont faibles ; en contrepartie ses caractéristiques de plasticité (l'allongement à la rupture, la striction mais aussi l'énergie de rupture par choc sur éprouvette entaillée...) sont très élevées [24].

Carbone : Élément fortement gammagène (diagramme de Schaeffler), il contribue à stabiliser l'austénite lors de déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome Cr_{23}C_6 inter granulaires qui diminuent la résistance à la corrosion inter granulaire.

Niobium : A un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique.

Manganèse : Le manganèse intervient également dans tous les aciers comme désoxydant ; il augmente la trempabilité, permet d'obtenir des aciers à structure austénitique

stable. Mais il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite, où il remplace une partie du fer.

Titane : Il est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxydabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome [25].

Molybdène : Augmente fortement la trempabilité, favorise un grain plus fin, neutralise en partie la fragilité due à la trempe, augmente la résistance et la dureté à chaud, la résistance à l'abrasion, la résistance à la corrosion des aciers inoxydables.

Nickel : Renforce la résistance des aciers non trempés ou recuits, rend plus résilients les aciers ferritiques-perlitiques, surtout aux basses températures, rend austénitiques les aciers ayant un pourcentage de chrome élevé.

Soufre : Considéré en général comme une impureté (formation de sulfure de fer entraînant des ruptures).

Vanadium : Favorise un grain plus fin, augmente la trempabilité, s'oppose fortement à la détrempe pendant le revenu.

Tungstène : Entraîne la formation de particules très dures et très résistantes à l'abrasion (aciers à outil) et améliore la dureté et la résistance à température élevée [26].

Références bibliographiques du chapitre II

- [1] Larabi O., Contribution à l'étude de l'inhibition de corrosion d'un acier au carbone par des composés organiques en milieu acide agressif, Mémoire de Master en Chimie, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [2] Haroune B., Kaim S., Effet d'un polysavon 80C12 réducteur de frottement hydrodynamique sur le comportement électrochimique de l'acier en milieux agressifs, Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira, Bejaia, 2019.
- [3] Abdulwali N., Inhibition de la corrosion de l'acier doux dans l'acide chlorhydrique par les composés thiazoles et benzimidazoles, Thèse de Doctorat. Université de Rabat, Maroc, 2016.
- [4] Akilal N., Étude de la corrosion de la soudure de l'acier A33 utilisé en construction navale, Mémoire de Magister, Université A. Mira, Bejaia, 2004.
- [5] Develay R., Importance de l'Addition de Manganèse dans l'Aluminium et les Alliages de l'Aluminium, Revue de l'Aluminium, 1978.
- [6] Landolt D., Corrosion et chimie de surfaces des métaux, vol. 12 PPUR presses polytechniques, 1997.
- [7] Col A., Colombié M., Matériaux métalliques, Phénomènes de Corrosion, 4ième partie. Les différentes formes de corrosion aqueuse. Dunod, 2010.
- [8] Bouamama N., Madene S., Élaboration d'un revêtement à base d'oxyde de cérium destiné à la protection de la corrosion de l'acier en milieu marin, Mémoire de fin d'études, Université A. Mira, Bejaia, 2015.
- [9] Annou M., Etude de la résistance à la corrosion des dépôts composites (Ni-Al₂O₃), Mémoire de magister, Université KasdiMerbah Ouargla, Algérie, 2013.
- [10] Riskin, Joseph, and Alexander Khentov. Electrocorrosion and protection of metals. Elsevier, p. 4, 2019.
- [11] Pedferri, Pietro. Corrosion science and engineering. Italy: Springer, p. 231-232, 2018.
- [12] During, Evert DD, Elsevier, Corrosion atlas: a collection of illustrated case histories. 2018.
- [13] Bensabra H., Cours de Corrosion et Protection des Métaux, option génie des matériaux, p. 9, Département de Génie des Procédés – Université de Jijel.

- [14] Belgharbi H., Etude de l'effet inhibiteur de corrosion de l'huile essentielle de Cyprès : Extraction, caractérisation et application, Mémoire du Projet de fin d'étude, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2020.
- [15] Corrosion des métaux, ENSPM formation industrie - IFP training, France, 2005.
- [16] Radhia Y., Synthèse de nouveaux composés de l'acide phosphonique et mise en évidence de leur acidité affinité de chélation et de leurs propriétés inhibitrices de corrosion, Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2012.
- [17] Einar B., Corrosion and protection, Norway, 2003.
- [18] Francois R., Corrosion and deposits course, Master of science in oil and gas production engineering, France, 2005.
- [19] Normand B., Prévention et lutte contre la corrosion, une approche scientifique et technique, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004.
- [20] Skerray E.W., Shreir L.L., Corrosion, Newnes Butterworth, London, 1976.
- [21] Hamaidi L., Propriétés des matériaux des structures, Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, 2015.
- [22] Djoudi Ch., Hamadou, A.A., Traitement thermique des aciers, Concepts et applications, Mémoire de Master, Université Kasdi-Merbah, Ouargla, 2021.
- [23] Hicher N., Étude des propriétés microstructurales et mécaniques d'un acier (BS2) soudé, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2019.
- [24] Fodil Ch., Etude du comportement électrochimique de l'acier A106B d'un évaporateur de chaudière sous l'influence d'inhibiteurs de corrosion, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Métallurgie, 2013.
- [25] Mokrani K., Microstructure et caractérisation d'un acier BS2, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2019.
- [26] Taibi K., Les propriétés tribologiques du ressort à lames multiples en acier 55Cr3 de la suspension pour camion K66, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

Chapitre III

*Matériaux et Techniques
Expérimentales*

III.1. Introduction

Ce chapitre présente une description générale des différentes techniques et conditions expérimentales employées dans le cadre de cette étude. Nous allons résumer le protocole analytique suivi, ainsi que le matériel utilisé durant la partie pratique de ce mémoire. Tous les essais expérimentaux de la caractérisation du kérosène (Jet A1) et du fioul ont été menés au laboratoire de la raffinerie RA1K de Skikda. Les essais de corrosion et d'extraction de l'huile essentielle d'Eucalyptus ont été réalisés au laboratoire de Génie chimique, Faculté des sciences et de la Technologie, Université de Guelma.

III.2. Distillation ASTM (Distillation des produits pétroliers selon la norme ASTM D86-23a).

La distillation ASTM est un essai qui s'applique aux principaux produits pétroliers, à l'exception des gaz de pétrole liquéfiés et des bitumes fluxés. Son objectif est de déterminer le point initial et le point final d'un produit.

III.2.1. Mode opératoire

Avant de commencer l'essai de distillation, il est impératif de noter les conditions ambiantes, notamment la température, la pression et l'humidité de l'environnement. Une prise d'essai de 100 mL d'échantillon est mesurée avec précision à l'aide d'une éprouvette graduée, puis transférée dans un ballon de distillation de 125 mL. Le thermomètre est positionné de manière à ce que la base de la colonne de mercure se trouve exactement à hauteur de la tubulure de sortie. Le ballon, équipé du thermomètre, est ensuite fixé au sein de l'ensemble du distillateur. **PI** : c'est la température de la première goutte de distillat.

Une fois le processus de distillation est achevé, et après refroidissement du ballon et décantation des vapeurs, le ballon est déconnecté du condenseur. Son contenu est transvasé dans une éprouvette graduée pour mesurer le volume de distillat obtenu.

Le pourcentage total de récupération est calculé en additionnant le volume du distillat récupéré et celui du résidu restant dans le ballon. Le pourcentage de pertes est déterminé par la soustraction de cette somme à 100 % [1].



Figure III .1 : Appareillage de distillation ASTM, échelle laboratoire.

III.2.2. Expression des résultats

Ramener les indications thermométriques à une pression de 101.3 kPa selon l'équation suivante:

$$T_{\text{corr}} = T + 0,0009 (101,3 - P) \times (T + 273,15)$$

Où :

T_{corr} : Température corrigée.

T : Indication de la température, en degrés Celsius.

P : Pression barométrique au moment de l'essai, en kPa [1].

III.3. Acidité totale (Détermination de l'acidité totale selon la norme ASTM D3242)

La quantité de base, exprimée en milligrammes d'hydroxyde de potassium par gramme d'échantillon, nécessaire pour titrer un échantillon dans un solvant spécifique à un point final [2].

III.3.1. Mode opératoire

L'analyse de l'acidité d'un échantillon s'effectue selon un protocole précis débutant par l'introduction de 100 mL de solvant dans un erlenmeyer. On y ajoute ensuite 0,1 mL d'un indicateur coloré, puis on barbotte le mélange à l'azote en maintenant un débit stable compris entre 600 et 800 mL/min afin d'éviter toute interférence oxydative. L'excès d'acidité présent est titré à l'aide d'une solution de KOH, et le volume correspondant, noté A, est relevé en millilitres. On introduit ensuite 100 g d'échantillon (environ 125 mL), puis on procède au

titrage de l'acidité jusqu'à l'apparition d'une couleur verte persistante pendant au moins 15 secondes. Le volume de KOH utilisé est noté B en mL [2].



Figure III .2 : Appareillage de Mesure de l'acidité totale.

III.3.2.Expression des résultats

L'acidité totale est calculée selon la formule :

$$\text{Acidité totale (mg de KOH/g)} = \frac{(B - A) \times N \times 56.1}{w}$$

Où :

A = ml de KOH nécessaire pour titrer le solvant.

B = ml de KOH nécessaire pour titrer l'échantillon.

N = normalité de KOH.

W = masse de l'échantillon en grammes [2].

III.4. La masse volumique (Détermination de la masse volumique selon la norme ASTM D1298-12b(2017))

La masse volumique est le rapport entre la masse et le volume, exprimé en kg/m³ ou g/mL à 15°C sous une pression atmosphérique standard de 101.325 kPa [3].

III.4.1. Mode opératoire

Avant toute mesure de densité à l'aide d'un aréomètre, il est essentiel de relever les conditions ambiantes (à savoir la température, la pression et l'humidité) au début et à la fin de l'essai. Ces paramètres doivent rester stables, avec une variation maximale de 2 °C.

L'échantillon à analyser est introduit délicatement dans l'expérience, en évitant la formation de bulles d'air ou l'évaporation prématurée. Toute bulle présente à la surface doit

être éliminée à l'aide d'un outil adapté. L'expérience contenant l'échantillon est ensuite placée en position verticale pour éviter les abrasions.

L'aréomètre approprié est ensuite introduit dans le liquide, laissé à flotter librement jusqu'à atteindre l'équilibre. On exerce ensuite une légère poussée (1 à 2 mm) pour vérifier la stabilité du ménisque. Un mouvement de rotation est ensuite appliqué à l'aréomètre pour éviter tout contact avec la paroi du récipient.

Enfin, immédiatement après la lecture, l'échantillon est agité verticalement, puis la température est relevée avec une précision de 0,1 °C. Si un écart de plus de $\pm 0,05$ °C est observé par rapport à la lecture précédente, l'ensemble des mesures (aréomètre et température) doit être repris jusqu'à obtention d'une stabilité thermique satisfaisante [3].

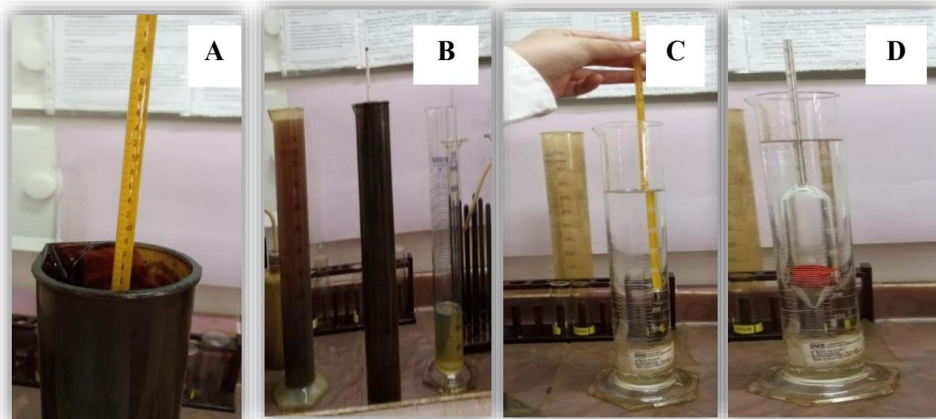


Figure III .3: (A,C) mesure de la température de fioul & kérosène Jet A1
(B,D) Appareillages utilisé pour la mesure de la densité de fioul & kérosène Jet A1.

III.4.2. Expression des résultats

Effectuer toutes les corrections nécessaires sur la température enregistrée, et noter la température à 0,1°C près. Pour les liquides opaques, appliquez la correction du ménisque nécessaire. On Note la valeur à 0,1 Kg/m³ près (0,0001 g/ml).

Convertir les valeurs obtenues sur l'aréomètre en masse volumique en utilisant les tables de mesure du pétrole 53A, 53B ou 53D :

Pétrole brut : 53A

Produits pétroliers : 53B

Huiles lubrifiantes : 53D [3].

- Si ρ' observée et ρ'' observée dans la table de conversion ASTM 53b, la lecture de la masse volumique à 15°C est illustrée sur l'image de la table.
- Si $\rho' \text{ observée} < \rho_t \text{ lue} \Rightarrow \rho'' \text{ observée}$

Noter le résultat final à 0,1 Kg/m³ (0,0001 g/ml) près à 15°C.

On calcule $\rho_{15^\circ\text{C}}$ en appliquant la formule [3] :

$$\rho_{15^\circ\text{C}} = \rho'_{15^\circ\text{C}} + \frac{(\rho_{t^\circ\text{C}} - \rho'_{\text{observée}}) * (\rho''_{15^\circ\text{C}} - \rho'_{15^\circ\text{C}})}{\rho''_{\text{observée}} - \rho'_{\text{observée}}}$$

III.5. Point d'éclair (Détermination du point d'éclair selon la norme ASTM D93)

Le point d'éclair, également appelé point de flash, correspond à la température à laquelle un produit pétrolier liquide, chauffé dans des conditions normalisées, dégage suffisamment de vapeurs pour s'enflammer en présence d'une flamme. Les essais pour déterminer le point d'éclair peuvent être réalisés en vase clos ou en vase ouvert. Cette caractéristique est essentielle car elle impacte directement la sécurité lors des opérations de transport, de transfert et de stockage [4].

III.5.1. Mode opératoire

Après avoir enregistré les conditions ambiantes (température, pression et humidité) au début de l'essai, remplir le vase d'essai jusqu'au trait de jauge avec l'échantillon préparé. Placer ensuite le vase dans le bloc chauffant. Poser le couvercle sur le vase, insérer la sonde de température dans l'échantillon, et connecter le tube flexible de l'agitateur. Mettre l'appareil sous tension, allumer la flamme d'essai, et ajuster son diamètre entre 3 mm et 4 mm. Réaliser un test préliminaire pour s'assurer l'absence de contamination par des produits volatils. Sélectionner la vitesse d'agitation appropriée (100 tr/min pour la méthode A ou 250 tr/min pour la méthode B). Activer le régulateur électronique pour démarrer le chauffage selon la rampe spécifiée (5–6 °C/min pour la méthode A ou 1–1,6 °C/min pour la méthode B). Procéder à la première introduction de la source d'inflammation lorsque la température de l'échantillon atteint 23 ± 5 °C en dessous du point d'éclair présumé. Si ce dernier est inférieur à 110 °C, répéter le test tous les 1 °C ; s'il est supérieur à 110 °C, le répéter tous les 2 °C. Noter la température précise au moment où un éclair net se produit dans le vase, puis appliquer la correction de pression atmosphérique à l'aide de l'équation :

$$T_c = T_0 + 0,25(101,3 - P)$$

T_0 : La température observée

P : La pression barométrique en kPa.

Enfin, relever à nouveau les conditions ambiantes à la fin de l'essai. Pour des raisons de sécurité, attendre que la température descende en dessous de 55 °C avant de retirer le couvercle et le vase [5].



Figure III.4 : Appareillage point d'éclair semi-automatique vase clos (PM).

III.5.2. Lecture des résultats

La température affichée à l'écran correspond au point d'éclair de l'échantillon.

Le point d'éclair est la valeur corrigée à la pression atmosphérique normale, arrondie au 0,5 °C près [5].

III.6. Point de congélation (Détermination de point de congélation selon la norme ASTM D2386)

Le point de congélation définit la température à laquelle un liquide (ou une substance renfermant de l'eau) se solidifie dans des conditions spécifiques. Sous l'effet d'un changement de pression ou de température, des phénomènes tels que la congélation, la cristallisation, la gélification ou la solidification se produisent, constituant ainsi l'inverse de l'ébullition ou de la liquéfaction [2].

III.6.1. Mode opératoire

La procédure de mesure du point de congélation commence par l'allumage du PC et de l'appareil. Ensuite, le tube est rempli avec l'échantillon jusqu'au trait de jauge, puis inséré dans l'embout d'accrochage avant d'être introduit dans le jacket. Une fois cette préparation physique effectuée l'utilisateur passe à l'interface logicielle : il double-clique sur « Cold properties », puis sur « Freezing point », et attend le chargement du programme. Une fois celui-ci installé, il sélectionne la méthode ASTM D2386 et confirme en cliquant sur « OK ».3) Insérer le tube dans l'embout d'accrochage [6].



Figure III .5 : Appareil principal pour la détermination du point de congélation.

III.7. La viscosité (Détermination de la viscosité cinématique selon la norme ASTM D445-24)

La viscosité est une grandeur physique qui mesure la résistance interne à l'écoulement d'un fluide, résistance due aux frottements des molécules qui glissent les unes sur les autres. Ainsi, on définit la viscosité dynamique ou absolue (μ) et la viscosité cinématique [7].

III.7.1. Mode opératoire

L'analyse de la viscosité requiert une préparation rigoureuse du matériel. Le nettoyage du viscosimètre doit être effectué avec des solvants adaptés, suivis d'un séchage à l'aide d'un jet d'air propre et sec. En cas de dépôts organiques tenaces, une solution fortement oxydante, chromique ou non-chromique, peut être utilisée. Un nettoyage final avec un solvant volatil tel que le naphte, suivi d'un rinçage à l'eau distillée puis à l'acétone, est recommandé.

L'échantillon à analyser doit être représentatif, ce qui peut nécessiter une homogénéisation, à condition de ne pas altérer sa composition. Il convient de le porter à température ambiante si nécessaire, sans toutefois risquer la perte de composés légers, notamment dans le cas des essences. Si l'échantillon contient des impuretés solides, un filtrage à l'aide d'un papier filtre est nécessaire.

Lors du remplissage du viscosimètre, il faut noter les conditions environnementales (température, pression, humidité) au début et à la fin de l'essai. L'échantillon est introduit à l'aide d'une pipette étalonnée, puis le viscosimètre est fixé verticalement dans le bain thermostatique. On laisse ensuite le système atteindre l'équilibre thermique avant la mesure.

La détermination de la viscosité commence par la stabilisation thermique du liquide dans le viscosimètre [8].

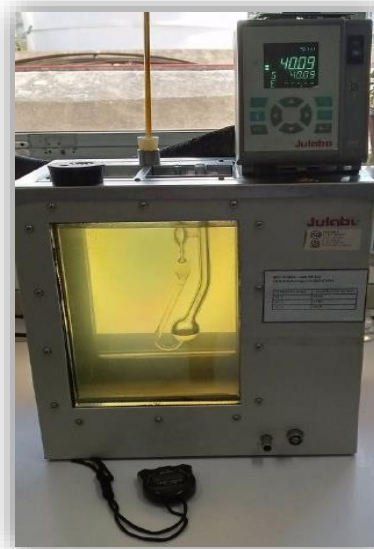


Figure III .6 : Viscosimètre.

III.7.2. Expression des résultats

La viscosité dynamique (μ) est la constante de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse perpendiculaire au plan de cisaillement, elle est donnée par l'équation :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{III.1}$$

on définit aussi la viscosité cinématique comme:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{III.2}$$

μ : Viscosité dynamique (Pa. sec).

ρ : Masse volumique (Kg/m³).

ν : Viscosité cinématique (m² /sec). [7].

III.8. Point de fumée (Détermination du point de fumée selon la norme ASTM D1322)

Le point de fumée est la hauteur maximale que peut atteindre la flamme d'un carburéacteur lors de sa combustion dans une lampe normalisée, sans production visible de fumée. Cette propriété permet d'évaluer la qualité de la combustion du carburant et sa capacité à limiter la formation de particules de carbone, ce qui contribue à la protection des matériaux de la chambre de combustion et des turbines [7].

III.8.1. Mode opératoire

La procédure commence par l'ajustement de la mèche à une hauteur précise de 6 mm, garantissant ainsi une combustion stable. Ensuite, on introduit 25 ml de l'échantillon dans la douille de la bougie, qui est ensuite placée correctement dans le dispositif prévu à cet effet. La

flamme est ensuite réglée jusqu'à ce que les fumées soient bien visibles, ce qui permet de vérifier la qualité de la combustion. Enfin, on procède à la lecture de la hauteur de la flamme en millimètres [9].



Figure III.7 Appareil mesurant le point de fumée.

III.9. Conductivité électrique

La conductivité électrique est l'aptitude d'un matériau ou d'une solution à laisser les charges électriques se déplacer librement, autrement dit à permettre le passage du courant électrique [10].

Un potentiel électrique est appliqué entre deux électrodes immergées dans le carburant, et le courant mesuré permet d'estimer la conductivité électrique. Cette conductivité détermine la capacité du carburant à dissiper la charge électrique générée lors des opérations de pompage ou de filtration. Si la conductivité est suffisamment élevée, les charges se dispersent de manière adéquate, ce qui empêche leur accumulation et la formation d'un potentiel élevé [7].

III.9.1. Mode opératoire

La mesure de la conductivité commence par la fixation de la sonde sur l'appareil de mesure. Après la calibration, on connecte le câble de mise à la terre de l'appareil au récipient contenant l'échantillon. On insère ensuite la sonde dans l'échantillon en veillant à immerger complètement la cellule dans le carburant. La lecture est obtenue en appuyant sur le bouton M, et seule la valeur affichée après trois secondes est considérée comme valable [11].



Figure III. 8 : Appareil de mesure de conductivité électrique.

III.10. Point d'écoulement (Détermination du point d'écoulement selon la norme ASTM D97b-2017)

Le point d'écoulement (PE) est la plus basse température, à laquelle un produit pétrolier peut encore couler lorsqu'il est refroidi, sans agitation dans des conditions normalisées. Cette méthode couvre la détermination du point d'écoulement des produits pétroliers (Fuel-oil, Gas-oil et huile) [12].

III.10.1. Mode opératoire

L'échantillon est versé dans un tube à essai jusqu'au trait de jauge, puis chauffé dans un bain d'eau afin de le rendre suffisamment fluide. Le tube est ensuite fermé hermétiquement à l'aide d'un bouchon muni d'un thermomètre ASTM 5C, dont le bulbe est placé à 3 mm sous la surface du liquide. Si le point d'écoulement est inférieur ou égal à $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'échantillon est chauffé, sans agitation, jusqu'à $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans un bain maintenu à $48\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, avant d'être refroidi à $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans l'air ou un bain à $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lorsque l'échantillon continue à s'écouler à $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, il doit être placé successivement dans des bains plus froids, par paliers déterminés de température, chaque étape visant à détecter l'arrêt de l'écoulement. Les mesures commencent à une température supérieure d'au moins $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ au point d'écoulement présumé, idéalement multiple de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si l'échantillon ne cesse pas de couler à $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$, etc., il est déplacé dans des bains réglés respectivement à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-51\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec un intervalle d'environ $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre deux bains successifs.

Le transfert du tube doit être effectué dès que la différence de température entre l'échantillon et le bain suivant atteint $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12].



Figure III.9 : Appareillage de détermination de point d'écoulement par la méthode d'essai ASTM D 97.

III.10.2. Expression des résultats

Noter à ce moment la température indiquée par le thermomètre, le point d'écoulement s'obtient en augmentant $+3^{\circ}\text{C}$ à cette température [12].

III.11. La couleur Saybolt (Détermination de la couleur selon la norme ASTM D156)

La couleur Saybolt est une échelle normalisée utilisée pour déterminer visuellement la couleur de certains produits pétroliers, notamment l'essence, le kérosène, le naphta et les huiles combustibles. Elle s'applique essentiellement aux produits dits « blancs », bien qu'ils puissent présenter des teintes allant du jaune très pâle au brun foncé.

La méthode repose sur la mesure de la hauteur d'une colonne de produit et sa comparaison à une échelle de couleurs étalonnée, selon une procédure spécifique. L'échelle Saybolt s'étend de +30 (produit très clair et transparent) à -16 (produit fortement coloré). Cette caractéristique est particulièrement utile pour évaluer la pureté visuelle et le degré de raffinage d'un produit pétrolier [1- 4].

III.11.1. Mode opératoire

On commence par rincer le tube propre avec l'échantillon à analyser, puis on le remplit jusqu'à la graduation 20. Le tube est placé avec précaution dans le compartiment prévu de l'instrument. La lampe du faisceau lumineux est alors allumée, puis la lentille de couleur standard, numérotée selon les références établies. Enfin, l'observateur compare visuellement les deux demi-champs colorés, l'un correspondant à l'échantillon et l'autre à la couleur standard, pour évaluer la concordance ou la différence entre les deux teintes [13].

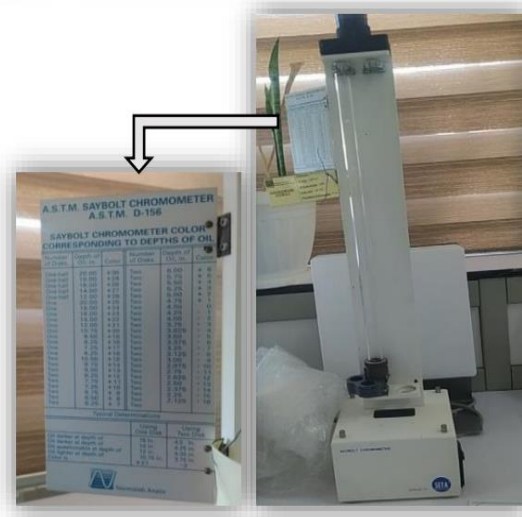


Figure III.10 : Docteur teste type ASTM D 156.

III.12. Teneur en soufre (Détermination de la teneur en soufre selon la norme ASTM D-4292)

La présence de soufre dans les carburants, comprise entre 0,45 et 0,55 %, favorise la corrosion à froid et la formation de dépôts nuisibles dans les moteurs diesel. Pour y remédier, des additifs lubrifiants sont ajoutés aux huiles. Grâce aux procédés de désulfuration catalytique, les raffineries ont pu réduire la teneur en soufre à des niveaux plus sûrs [15].

La teneur en soufre des fractions straight-run obtenues par distillation atmosphérique dépend fortement de la nature du pétrole brut traité (acide ou doux). La mesure de cette teneur est régie par la norme ASTM D-4292. Ce paramètre varie considérablement selon les pays et la qualité des procédés de raffinage [15].

III.12.1. Mode opératoire

Pour préparer l'échantillon, celui-ci doit être analysé immédiatement après son introduction dans une cellule de prélèvement jetable, en veillant à éliminer les bulles d'air issues du mélange. Les cellules et films radiographiques sont à usage unique, car les rides du film ou les résidus d'huile (comme les empreintes digitales) peuvent perturber la transmission des rayons X et fausser les résultats, notamment pour les faibles teneurs en soufre. Pour l'analyse, stabiliser l'équipement pendant 30 secondes, remplir la cellule avec l'échantillon, positionner le film radiographique, puis insérer l'ensemble dans l'appareil. La concentration finale en soufre s'affiche automatiquement sur l'écran après traitement des données [16].



Figure III.11 : Appareillage de détermination de La teneur en soufre Selon la norme ASTM D-4292.

III.13. Extraction de l'inhibiteur par hydro distillation

L'extraction de l'huile essentielle d'Eucalyptus qu'on va l'utiliser comme inhibiteur de corrosion dans notre étude, se fait par la technique d'hydro distillation simple, celle-ci se produit dans l'appareil de type Clevenger, au laboratoire de Génie chimique, Faculté des sciences et de la Technologie, Université de Guelma.

La préférence pour cette plante résulte de plusieurs facteurs, notamment sa disponibilité, son application en médecine traditionnelle, sa faible toxicité, son coût avantageux et son caractère naturel [17, 18].

III.13.1. Matériel végétal

Les feuilles adultes sont étroites, lancéolées et d'un vert foncé luisant. Elles mesurent de 15 à 35 cm de long. Les fruits ligneux mesurent de 1,5 à 2,5 cm de diamètre ont une capsule très dure. De nombreuses petites graines s'échappent par des valves qui s'ouvrent sur le dessus du fruit [19].

L'Eucalyptus a été récolté entre la fin du mois de mars et le début du mois d'avril 2025 de la région de Guelma (Algérie).



Figure III.12 : Eucalyptus, a) feuilles d'eucalyptus b) arbre.

- **Origine :** d'Australie
- **Nom scientifique :** Eucalyptus globulus, Eucalyptus radiata
- **Noms communs :** Eucalyptus, gommier bleu, arbre à la fièvre, arbre au koala
- **Nom anglais :** Tasmaniangum blue.
- **Classification botanique :** famille des myrtacées [20].

III.13.2. Matériels d'extraction

- Un élévateur.
- Un thermomètre.
- Un ballon.
- Un réfrigérant à eau.
- Un chauffe-ballon.
- Une ampoule à décanter.
- Une balance.
- Une Pipette pasteur.
- Une colonne de distillation.

III.13.3. Principe de l'extraction par hydrodistillation

Le principe de l'hydrodistillation est basé sur l'éclatement et la libération des molécules odorantes (non solubles dans l'eau) contenues dans les cellules de la matière végétale une fois mise en contact avec de l'eau chaude. Ces molécules aromatiques une fois condensées, dans un réfrigérant, donnent les huiles essentielles [19].

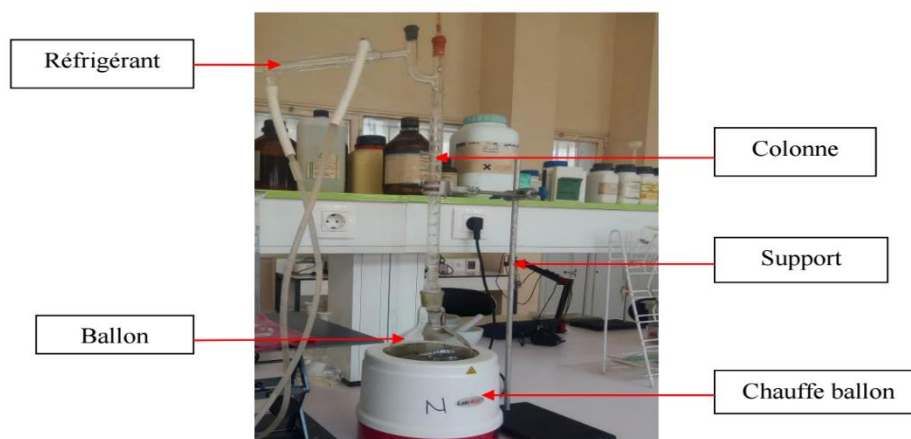


Figure III.13 : Montage utilisé pour l'extraction de l'huile essentielle d'Eucalyptus par la méthode d'hydrodistillation.

III.13.4. Protocol d'extraction

Le protocole d'extraction par hydrodistillation a été rigoureusement suivi : pour chaque essai, 50g de matière végétale ont été introduits dans un ballon contenant 400 ml d'eau distillée. L'ensemble a ensuite été porté à ébullition. Dès que l'ébullition a été atteinte, les cellules végétales ont éclaté, libérant leurs contenus en huiles essentielles. Les vapeurs chargées d'huile se sont condensées en traversant le réfrigérant et ont chuté dans une ampoule à décanter. Grâce à la différence de densité, l'huile essentielle et l'eau se sont séparées naturellement. Finalement, l'huile essentielle d'Eucalyptus a été récupérée et pesée afin de calculer le rendement de l'extraction.



Figure III.14 : L'huile essentielle extraite.

III.13.5. Détermination du rendement en huile essentielle

Le rendement en huile essentielle est défini comme étant le rapport entre la masse d'huile essentielle obtenue et la masse de la matière végétale (M) initialement utilisée. Le rendement est exprimé en pourcentage, et il est donné par la formule suivante :

$$\text{Rdt}_{\text{HE}} = [\text{M}_{\text{HE}} / \text{M}_s] \times 100$$

R_{HE} : rendement extraits fixes en g /100g de matière sèche.

M_{HE} : masse d'huile essentielle récupérée exprimée en g.

M_S : quantité de matière végétale sèche utilisée pour l'extraction exprimée en g [21].

III.14. Techniques d'évaluation de la corrosion

Les méthodes d'évaluation de la corrosion sont très nombreuses, mais les plus utilisés et les plus citées dans la littérature dans le cas de l'inhibition de la corrosion des métaux, comme détaillées précédemment, sont les suivantes :

- La gravimétrie (ou la perte de masse).
- Les techniques de polarisation potentiodynamique.
- Le voltampérométrie cyclique.
- La spectroscopie d'impédance électrochimique.
- Méthode de dosage.

III.14.1. Etude gravimétrique

III.14.1.1. Influence de la concentration de l'inhibiteur sur l'efficacité inhibitrice

Les mesures de perte de poids sont des premières approches de l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un métal dans une solution électrolytique. Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple et de ne pas nécessiter un appareillage important. Ces échantillons sont immergés dans les solutions corrosifs (H_2SO_4 (1M), Jet A1 et fioul) sans et avec addition de différentes concentrations d'huile essentielle à la température ambiante du laboratoire ($25 \pm 2^\circ C$) et à l'air atmosphérique. L'efficacité inhibitrice est déterminée après 2 jours (48 heures) d'immersion. La valeur de l'efficacité inhibitrice est donnée par la relation suivante :

$$E(\%) = \left[1 - \frac{V'_{corr}}{V_{corr}} \right] \times 100 \quad \text{III.1}$$

Où V_{corr} et V'_{corr} représentent respectivement les valeurs de la vitesse de corrosion en absence et en présence de l'inhibiteur [22].

III.14.1.2. Mesure de la vitesse de corrosion

Le taux de corrosion, par la méthode de perte de masse, est déterminé par la formule suivante

$$\Delta m = m_0 - m_1 \quad \text{III.2}$$

m_0 (mg) : la masse de l'échantillon avant l'essai.

m_1 (mg) : la masse de l'échantillon après l'essai.

Δm (mg) : la perte de masse (le taux de corrosion) de l'échantillon.

La vitesse de corrosion (V) est déterminée par l'équation suivante [23] :

$$V = \frac{\Delta m}{S \times t} \quad \text{III.3}$$

S : la surface exposée en cm^2 .

t : le temps d'exposition dans la solution en heure.

III.14.1.3. Isothermes d'adsorption de Langmuir

L'isotherme d'adsorption de Langmuir est généralement utilisée pour représenter des phénomènes d'adsorption en phase aqueuse impliqués dans les processus de corrosion ou d'inhibition. L'énergie d'adsorption est indépendante du taux de recouvrement de la surface (θ), ce qui signifie que l'énergie d'adsorption est la même pour tous les sites. Dans ce cas, le taux de recouvrement de la surface du métal (θ) est relié à la concentration de l'inhibiteur par la relation :

$$\frac{\theta}{1-\theta} = K C_{inh} \quad \text{III.4}$$

Où K désigne le coefficient d'adsorption (ou la constante d'équilibre du processus d'adsorption) et C_{inh} la concentration de l'inhibiteur dans la solution. Le réaménagement de cette relation donne :

$$K C_{inh} = \frac{\theta}{1-\theta} \exp(-2a\theta) \quad (\text{Frumkin}) \quad \text{III.5}$$

$$K C_{inh} = \exp(-2a\theta) \quad (\text{Temkin}) \quad \text{III.6}$$

Où a une constante d'interaction entre les particules adsorbées.

III.14.2. Etude électrochimique

Cette partie décrit le mode opératoire suivi pour la préparation de l'électrolyte utilisée et la réalisation des manipulations chimiques dans le cadre de ce travail.

III.14.2.1. Montage expérimental

Les mesures électrochimiques de nos échantillons ont été effectuées dans une cellule en verre, à trois électrodes.

Une électrode est un système constitué de deux phases en contact, un conducteur majoritairement électronique et un conducteur majoritairement ionique, dont l'interface est le lieu de transfert de charges entre les constituants des deux phases. Le passage du courant est assuré par la présence de la troisième électrode, électrode auxiliaire [24, 25].

- ❖ **Les électrodes utilisées** : Les électrodes utilisées au cours de toutes les manipulations électrochimiques de ce travail sont :
- **Electrode de travail (ET)** : C'est le siège des réactions électrochimiques et le support de substrat. En effet, lorsqu'il s'agit d'un processus d'électrodéposition de métaux ou d'alliages métalliques, elle porte couramment le nom de la cathode.
 - **Contre électrode (CE)** : L'électrode auxiliaire est considérée comme anode lors du dépôt sur la cathode.
 - **Electrode de référence (ER)** : Elle est caractérisée par un potentiel constant quel que soit le courant qui la traverse. Le rôle de cette électrode est de servir de référence aux potentiels mesurés [26].

III.14.2.2. La cellule électrochimique

Nous avons utilisé dans les manipulations de ce travail une cellule électrochimique en verre de 150 ml, munie d'un couvercle. La cellule, contenant la solution corrosive, est reliée à un potentiostat, piloté par un micro-ordinateur combiné à un analyseur (Fig. III.15). Les essais ont été réalisés à la température ambiante. La cellule est conçue de façon à maintenir une distance fixe entre les trois électrodes.

La technique de polarisation potentiodynamique a été mise à profit pour déterminer le comportement général à la corrosion de l'acier au carbone sans et avec l'ajout d'huile essentielle d'Eucalyptus. Les courbes potentiodynamiques sont tracées dans la plage de surtension entre (-1 et 1 V/SCE), avec une vitesse de balayage de 1mV/s. Le potentiel de corrosion (E_{corr}) et la densité de courant de corrosion (i_{corr}), ont été obtenus par l'extrapolation des droites de Tafel [27].

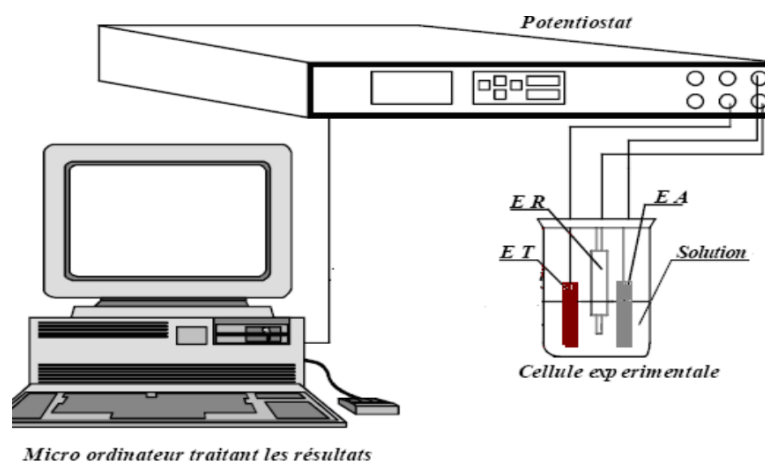


Figure III.15 : Cellule électrochimique à trois électrodes.

III.14.2.3. Méthodes d'évaluation de la résistance à la corrosion

L'évaluation de la résistance à la corrosion des matériaux est réalisée au moyen de plusieurs méthodes qui apportent des informations complémentaires. Les principales sont les méthodes électrochimiques, elles sont souvent associées à des analyses de surface. Il se produit deux réactions :

- ✚ Une réaction anodique avec oxydation du métal : ainsi le métal se solubilise
- ✚ Une réaction cathodique ou un élément gagne un ou plusieurs électrons.

Les vitesses des deux réactions doivent être égales [28].

La variation du potentiel d'un matériau peut traduire une modification de la réactivité de l'interface métal-solution. Pour cela, on peut suivre l'évolution de l'intensité en fonction du potentiel par voltampérométrie linéaire. Dans le cas d'un métal plongé dans un milieu corrosif et en l'absence d'une forte concentration d'ions dans le milieu, la réaction d'oxydation du métal s'écrit comme suit :

- Réaction anodique : $M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$
- Réaction cathodique : $M^{n+} + ne^{-} \rightarrow M$

Le tracé de la courbe courant-tension d'un système est appelé courbe de polarisation. Cette courbe permet la détermination du potentiel et courant de corrosion global.

La figure III.16 donne l'allure caractéristique de la courbe $i = f(E)$. Un tel système est régi par la relation suivante, déduite de la loi de ButlerVolmer.

$$i = i_a + i_c = i_{\text{corr}} [\exp (\beta_a/\eta_a) - \exp (\beta_c/\eta_c)] \quad \text{III.7}$$

Où i est la densité de courant totale mesurée, i_a est le courant anodique, i_c est le courant cathodique, η est la surtension ($\eta = E - E_{\text{corr}}$) et β_a et β_c sont les coefficients de Tafel anodique et cathodique.

- Pour $\eta \gg 0$,

$$i = i_a = i_{\text{corr}} [\exp (\beta_a/\eta_a)] \quad \text{III.8}$$

- Pour $\eta \ll 0$,

$$i = i_c = i_{\text{corr}} [\exp (\beta_c/\eta_c)] \quad \text{III.9}$$

Les pentes des droites de Tafel sont égales aux coefficients β_a et β_c , qui sont respectivement reliés aux cinétiques des réactions d'oxydation et de réduction [29]. Chaque courbe est une droite correspondante aux droites de Tafel. En extrapolant ces droites, on obtient un point d'intersection correspondant à la valeur du potentiel de corrosion (E_{corr}) et du courant

de corrosion (I_{corr}). Cette loi n'est valide que pour des valeurs de surtensions finies, positives ou négatives.

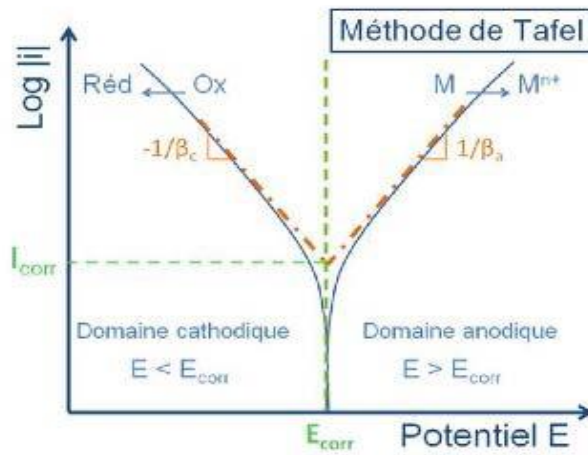


Figure III.16 : Mesure du courant de corrosion par extrapolation des droites de Tafel [29].

Références bibliographiques du chapitre III

- [1] Détermination de Distillation manuelle des produits pétroliers selon la norme ASTM D86-23a D3242service laboratoire, Département technique ; complexe RA1K.
- [2] Détermination de l'acidité totale Selon la norme ASTM D3242service laboratoire. Département technique ; complexe RA1K.
- [3] Détermination de la masse volumique à l'aide de l'hydromètre selon la norme ASTM D1298-12b, service laboratoire. Département technique ; complexe RA1K, 2017.
- [4] Ousna M., Sakmeche M., Suivi de la qualité de traitement du Kérosène en JET-A1 au niveau de l'unité Topping-Raffinerie d'Adrar, Université Ahmed Draia, ADRAR, 2020.
- [5] Détermination de point d'éclairSelon la norme ASTM D93-20service laboratoire. Département technique ; complexe RA1K.
- [6] Détermination de Point de congélation selon la norme ASTM D2386service laboratoire. Département technique, complexe RA1K.
- [7] FeddaouiDj., Segouali A., Fabrication du kérosène/jet A1 à partir du Condensat (procédés et analyses), 2022.
- [8] Détermination de la Viscosité Cinématique selon la norme ASTM D445-24 D3242service laboratoire. Département technique ; complexe RA1K.
- [9] Détermination du Point de fumée selon la norme ASTM D1322 service laboratoire Département technique ; complexe RA1K.
- [10] Rouaiguia M., Bouhank A., Suivi de la production et de la qualité ainsi que le traitement du JET A-1 au niveau de RA1K, 2021.
- [11] Détermination de la conductivité électrique selon la norme ASTM D2624service laboratoire. Département technique, complexe RA1K.
- [12] Détermination du point d'écoulement selon la norme ASTM D97b, service laboratoire. Département technique ; complexe RA1K, 2017.
- [13] Détermination de la couleur selon la norme ASTM D156 service laboratoire, Département technique, complexe RA1K.
- [14] Kherabet R., Zoubiri W., Amélioration du point d'écoulement du gasoil par l'ajout d'additifs, 2024.
- [15] Fares A., Boudelf Ch., Caractérisation et analyses du Gazoil au niveau de laboratoire RA1K, Institut Algérien du pétrole.

- [16] Détermination de la teneur en soufre selon la norme ASTM D-4292 service laboratoire, Département technique, complexe RA1K.
- [17] Boulahrouz B., Mous I., Substitution du PTE par du MTBE à la raffinerie de Skikda RA1K, Institut Algérienne du Pétrole, Direction Ecole de Boumerdes, 2019.
- [18] Belaidi A., Modélisation et Optimisation des pools essences avant et après réhabilitation de la raffinerie de Skikda, Mémoire de Master, Ecole d'ingénieurs de Boumerdes, 2011.
- [19] Reghaissia I., Extraction et caractérisation de l'huile essentielle de l'Eucalyptus Globulus :Application comme insecticid, Mémoire de Master, Université 8 mai 45, Guelma, 2020.
- [20] Eucalyptus Globulus – Bring images.
- [21] Boualleg M., Bousnobra R., Optimisation des paramètres d'extraction de l'huile essentielle de Lavandulastoechas .L et son application comme antifongique, Mémoire de Master, Université 8 mai 45 Guelma, 2021.
- [22] Sail L., Ghomari A., Khelidj A., Bezzar A., Benali O., La perte de masse dans l'inhibition de la corrosion d'un acier, Lebanese Science Journal. Vol. 14, 2013.
- [23] Landolt D., Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, 1st Edition, Alden Press, Oxford, 489, 1993.
- [24] Atamenia R., Amélioration de la résistance à la corrosion du titane et de l'aluminium par l'huile essentielle de citron dans l'acide sulfurique (1M), Mémoire de Master, Université 8 mai 45, Guelma, 2024.
- [25] Zekri A., Méthodes électrochimiques d'analyse, Polycopié de Cours, Université Mouhamed Khider, Biskra, 2021.
- [26] Tebani H., Elaboration et caractérisation d'alliages Ni-Fe par électrodéposition, Mémoire de Master, Université 8 mai 1945, Guelma, 2019.
- [27] <https://sites.google.com/site/projetdestageakram/programme/etapes>
- [28] Emeline H., Corrosion d'un type de minivis d'ancrage orthodontique en Ti6 Al 4, Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2014.
- [29] Landolt., Chimie et Corrosion, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1993.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Le premier objectif de ce travail a consisté à étudier les caractéristiques physicochimiques :

- du Kérosène (Jet A1) commercial.
- du fioul commercial.

Le deuxième objectif était d'étudier l'efficacité inhibitrice de l'huile essentielle d'Eucalyptus sur la corrosion de l'acier au carbone dans les milieux corrosifs suivants :

- Acide (H_2SO_4 (1M)) aéré,
- Le kérosène (Jet A1),
- Le fioul.

IV.2. Caractéristiques physicochimiques du kérosène (Jet A1)

IV.2.1. La Distillation (ASTM D 86)

Après une filtration de l'échantillon, nous avons effectué ces analyses, les températures qui ont été relevées en fonction des volumes de distillats évaporés sont représentées dans le tableau B.1 qui a été cité dans la partie des annexes.

Ensuite, nous avons tracé les courbes de distillation ASTM ayant comme coordonnées les températures d'ébullition de tous les points obtenus en fonction des volumes distillés $T_{eb} = f(v)$ (Fig. IV.1).

Les températures qui ont été enregistrées varient entre $\approx 150^\circ\text{C}$ (à 10 % de volume distillé) et $\approx 250^\circ\text{C}$ (à 90 % de volume distillé), ce qui est typique du Jet A1, garantissant un équilibre entre la volatilité et la performance thermique.

Les spécifications Algériennes (NA 1445) fixent 3 critères délimitant la volatilité minimale et maximale ainsi que la fraction distillée (% V), ces limitations sont :

Les limites max et min des points d'ébullitions :

Point de distillation à 10 % (T10) : Les valeurs ($150\text{--}160^\circ\text{C}$) indiquent la présence de composés légers facilitant l'allumage par temps froid.

- Point de distillation à 50 % (T50) : Entre $190\text{--}210^\circ\text{C}$, reflétant une combustion efficace et une stabilité thermique.

Point de distillation à 90 % (T90) : Atteint $\approx 250^\circ\text{C}$, sans présence de composés lourds dépassant les limites autorisées (généralement $\leq 300^\circ\text{C}$).

D'après les courbes de distillation présentées sur la figure IV.1, nous remarquons que les résultats sont supérieures à la limite minimale 150°C , cela confirme que le produit est conforme

à la norme NA 1445, ainsi la teneur en fractions légères contient le kérosène analysé sont acceptables.

Pour ce qui concerne les résultats du PF, on remarque que ces derniers résultats sont inférieurs à la limite maximale de 300°C ; donc le produit est conforme à la norme NA 1445.

T10 (10% distillé) Les valeurs comprises entre 150–160°C indiquent une présence optimale de fractions légères, garantissant un allumage rapide dans des conditions de froid extrême. Ceci rend le carburant particulièrement adapté aux vols en haute altitude où les températures chutent considérablement.

T50 (50% distillé) : La plage idéale de 190–210°C assure une combustion stable et une efficacité thermique maximale dans la chambre de combustion.

T90 (90% distillé) : Ne dépasse pas 250°C, ce qui confirme l'absence de fractions lourdes susceptibles de : Perturber la combustion, générer des dépôts carbonés sur les aubes de turbine.

Conformité normative : Selon la norme britannique DEF STAN 91-91, le T90 ne doit pas excéder 300°C. Le kérosène étudié satisfait pleinement les exigences de volatilité pour des performances turbine optimales.

On remarque que toutes les courbes montrent un gradient fluide sans interruptions ni changements soudains de pente, ce qui indique une composition homogène des échantillons.

L'augmentation régulière du point d'ébullition avec la proportion de distillation croissante reflète une distribution équilibrée des fractions légères et moyennes. Cela confirme que le produit possède une volatilité adéquate, assurant une combustion progressive et stable dans les turbines à gaz.

La distribution des températures d'ébullition est un indicateur direct de la composition du carburant, montrant la proportion entre les fractions légères, moyennes et lourdes. Le comportement progressif montre que le kérosène ne contient pas d'impuretés ou d'additifs avec des points d'ébullition anormaux.

Ces résultats traduisent une distillation efficace et un bon contrôle des processus de séparation thermique lors de la production, ce qui se traduit par des performances thermiques stables dans les moteurs d'avion et réduit les risques d'inflammation irrégulière ou de combustion incomplète.

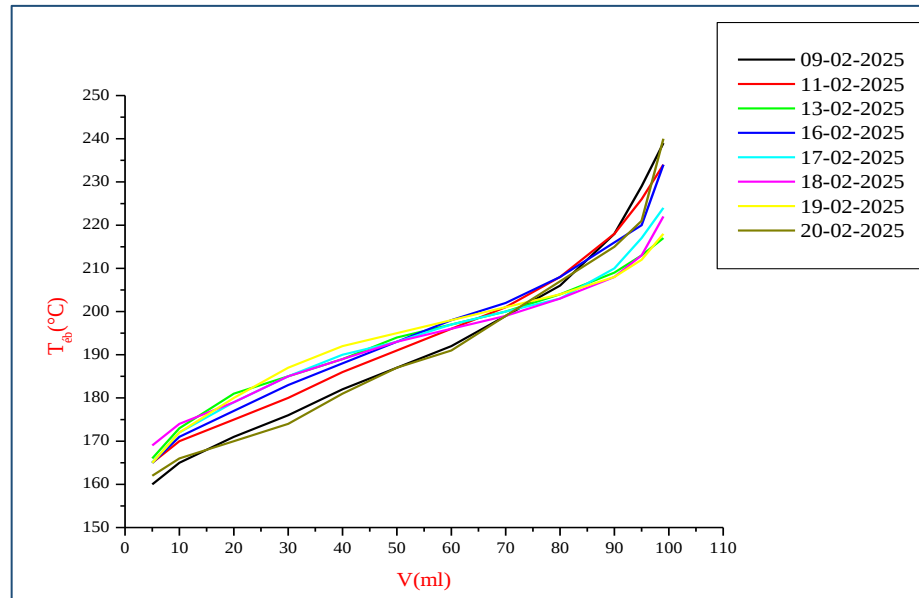


Figure IV.1 : Représentation des courbes de distillation ASTM D 86 du kérosène (Jet A1).

IV.2. 2. La densité (ASTM D 1298)

L'évolution de la densité d_4^{15} des échantillons analysés du Jet A1 a été représentée par la figure IV.2. La densité est fonction de la nature des hydrocarbures présents, Une densité élevée indique une proportion accrue d'aromatiques (composés cycliques à haut indice octane).

Les courbes expérimentales montrent une stabilité acceptable dans la plage technique standard, la densité influe directement l'énergie disponible par unité de volume. Un kérosène à densité stable garantit :

- Une poussée moteur homogène (pas de variations de thrust)
- Une prévention des fluctuations de performance (notamment en régime transitoire).

La courbe montre une stabilité évidente avec de très faibles fluctuations autour de la moyenne de 0,79 g/cm³.

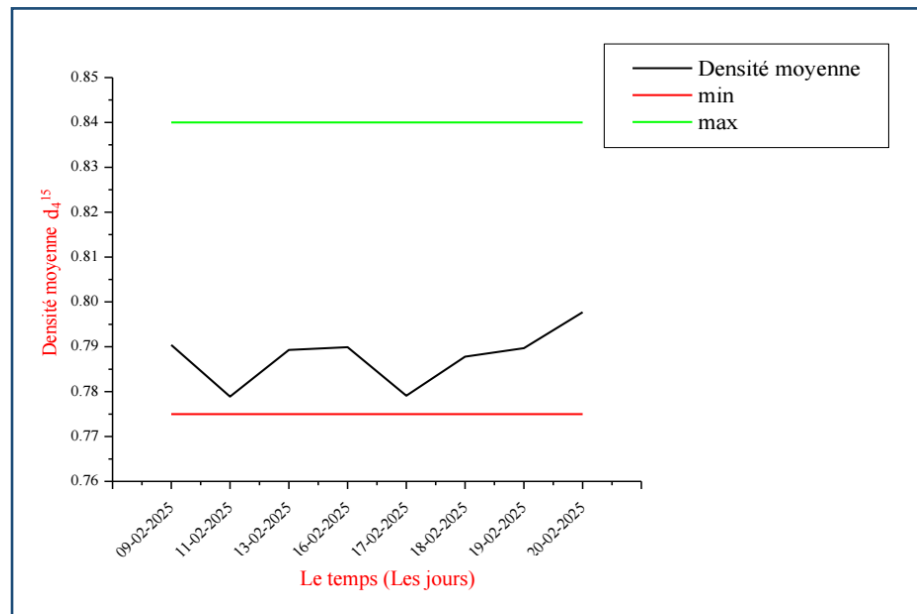


Figure IV.2 : Représentation de l'évolution de la densité des échantillons Jet A1.

IV.2.3. Détermination de la conductivité électrique

Les conductivités obtenues pour le Jet A1 sont représentées dans la figure IV.3.

Les résultats du graphique indiquent des valeurs suffisamment élevées pour permettre une décharge efficace des charges électrostatiques, évitant ainsi leur accumulation. Cette caractéristique est essentielle pour réduire les risques d'étincelles ou d'explosions, notamment lors des opérations de ravitaillement.

Ces valeurs sont conformes aux exigences de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), qui impose une conductivité supérieure à 50 pS/m, seuil minimal nécessaire pour prévenir les décharges électrostatiques dangereuses durant le remplissage. Des fluctuations ont été enregistrées les jours du 18 et 19 février, avec une baisse relative à 279 pS/m. Malgré ces oscillations, toutes les valeurs restent supérieures à la limite minimale recommandée (50 pS/m). Les valeurs plus faibles pendant ces deux jours pourraient indiquer un léger changement dans la teneur en additifs polaires ou l'humidité relative.

Bien que la conductivité reste sûre, il est important d'ajuster la formulation du carburant (comme les additifs antistatiques), en particulier dans les environnements secs, pour éviter les décharges électriques dangereuses.

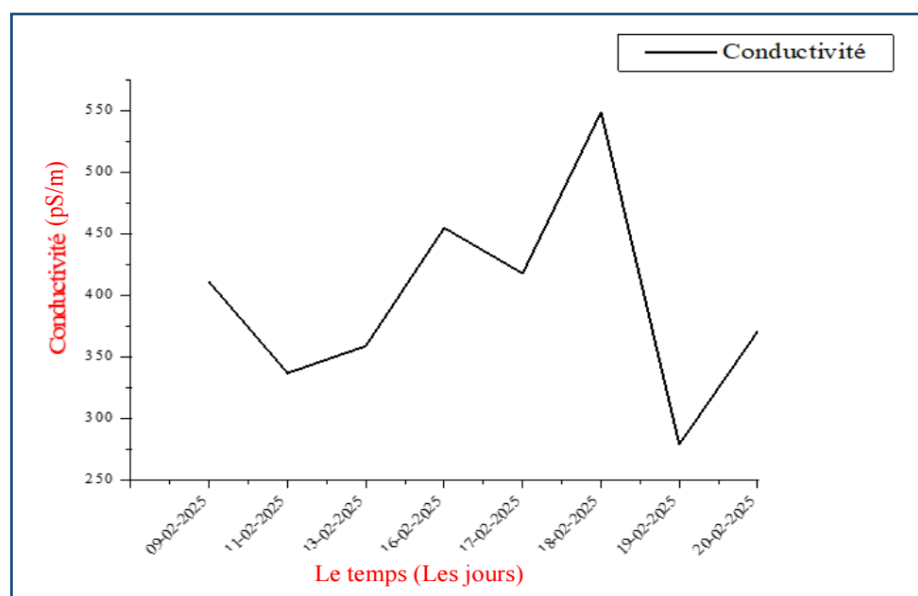


Figure IV.3 : Représentation de l'évolution de la conductivité des échantillons du kérosène (Jet A1).

IV.2.4. L'acidité (ASTM D3242)

Nous avons tracé la courbe qui représente l'évolution de l'acidité des échantillons analysés du Jet A1 dans la figure IV.4.

Les valeurs d'acidité faibles traduisent une faible concentration en acides organiques ou en agents oxydants, ce qui indique que le produit est stable sur le plan chimique.

Cette stabilité est un indicateur important de la qualité du kérosène, car une faible acidité réduit significativement les risques de réactions corrosives avec les métaux en contact avec le carburant.

Un kérosène faiblement acide implique une diminution notable du risque de corrosion à l'intérieur des conduites et des moteurs, ce qui améliore la durabilité des systèmes et la fiabilité du fonctionnement global.

La stabilité de la courbe montre une excellente tenue chimique du carburant, avec aucune indication de formation d'acides organiques ou d'oxydation, ce qui réduit le risque de corrosion interne dans le système, garantissant une bonne résistance à l'oxydation pendant le stockage ou l'utilisation. Cela renforce la fiabilité du carburant et prolonge la durée de vie des composants du système tels que les filtres et les tuyaux. Il réduit également les risques de corrosion pouvant entraîner des fuites ou des obstructions dans le système [1- 4].

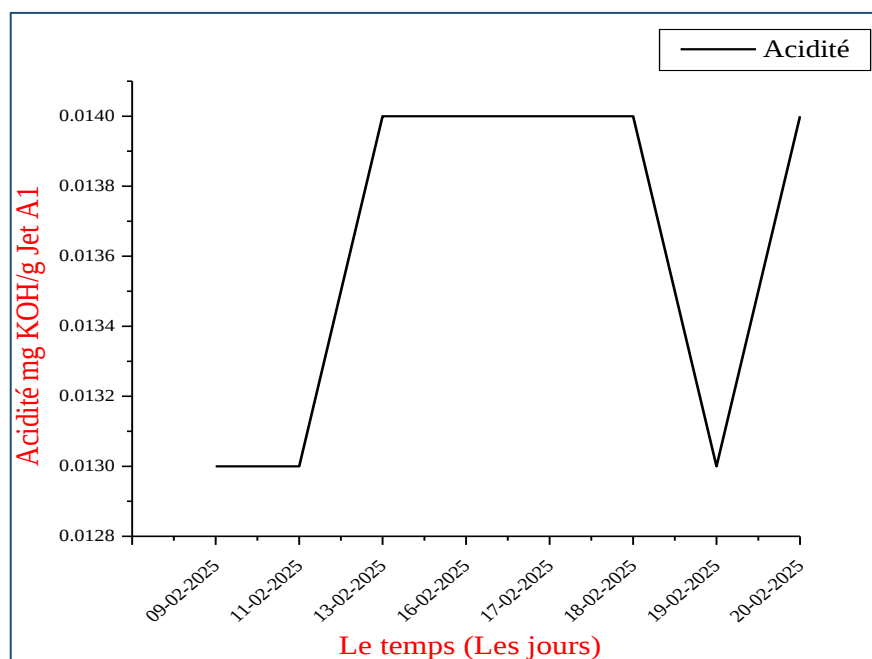


Figure IV.4 : Représentation de l'évolution de l'acidité du Jet A1.

IV.2.5. Le point de fumée

Nous avons tracé la courbe qui représente l'évolution du point de fumée des échantillons analysés du Jet A1 (Fig. IV.5).

Le point de fumée est une propriété qui reflète la capacité du carburant à brûler proprement, sans produire de suie ni de fumée visible. Il s'agit d'un critère essentiel pour évaluer la qualité de combustion du kérosène, notamment dans les moteurs à turbine.

La courbe obtenue montre un point de fumée élevé, ce qui indique que le carburant est riche en hydrocarbures paraffiniques (linéaires) et contient une faible proportion de composés aromatiques, généralement responsables de la formation de fumées.

Un point de fumée élevé est synonyme de combustion propre, de meilleure performance environnementale et d'un fonctionnement optimal des turbines, avec moins de dépôts dans la chambre de combustion et une réduction des émissions polluantes.

La courbe montre une tendance clairement descendante, de 31,2 à 22 mm. Cela indique une augmentation de la teneur en aromatiques, des composés qui brûlent de manière imparfaite et génèrent de la fumée et des suies.

Bien que les valeurs restent dans la plage acceptable, cette diminution signale une augmentation des aromatiques au détriment des paraffines, ce qui pourrait entraîner une combustion incomplète et des émissions plus élevées. Il est conseillé d'ajuster la proportion des composants pour améliorer la performance de la flamme.

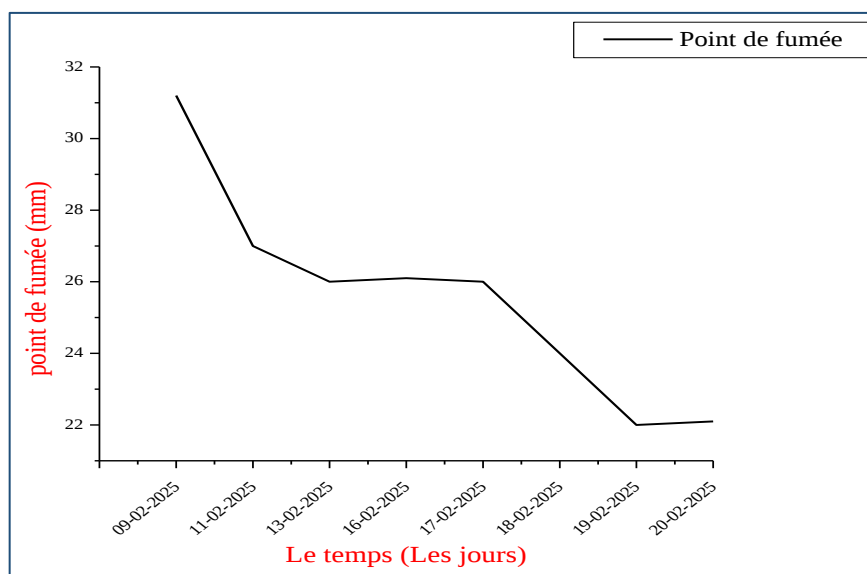


Figure IV.5 : Représentation de l'évolution du point de fumée des échantillons du Jet A1.

IV.2.5. Le point de congélation

La figure IV.6 illustre l'évolution du point de congélation du carburant d'aviation Jet A1 pour plusieurs échantillons prélevés sur une période donnée ou issus de différentes sources de production. Les données montrent que toutes les valeurs enregistrées sont inférieures à -47 °C, ce qui respecte pleinement les exigences des normes internationales telles que l'ASTM D1655, le DEF STAN 91-91, ainsi que les recommandations de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), qui constituent également la référence en Algérie.

La courbe met en évidence une stabilité relative de cette propriété, sans fluctuations marquées ni dépassements significatifs, ce qui témoigne d'une homogénéité satisfaisante de la qualité du produit. De légères variations entre les échantillons peuvent néanmoins être observées, probablement dues à des facteurs tels que la nature du brut utilisé, les conditions de fonctionnement ou de stockage.

Cette conformité constante indique l'efficacité du système de contrôle qualité en place au niveau de la raffinerie RA1K de Skikda, et confirme que le carburant produit répond aux exigences de performance et de sécurité, notamment en conditions de vol à haute altitude, où le carburant doit impérativement rester à l'état liquide sans risque de congélation.

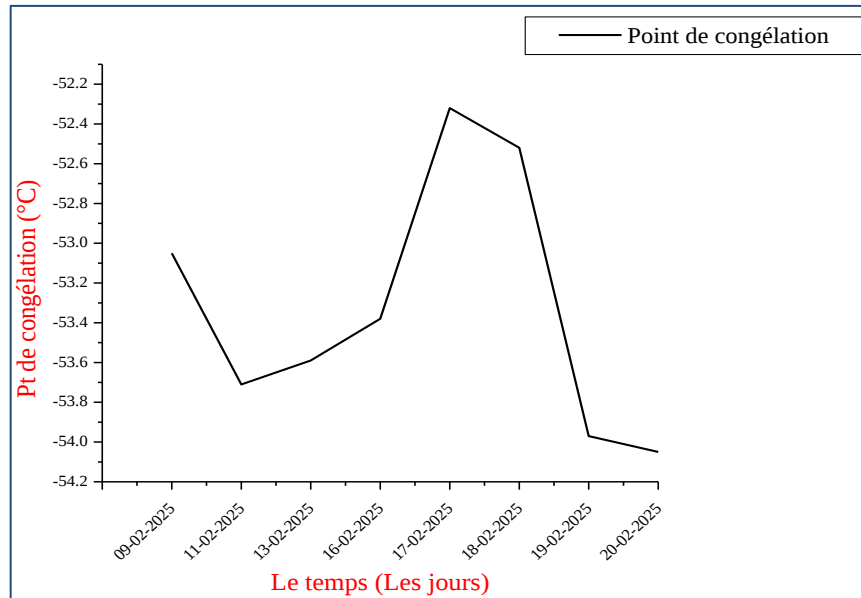


Figure IV.6 : Evolution du point de congélation.

IV.3. Caractéristiques physicochimiques du fioul

IV.3. 1. Teneur en soufre (ASTM D-4292)

L'évolution de la teneur en soufre des échantillons du fioul analysés est mentionnée dans la figure IV.7.

Toutes les valeurs sont stables entre 0,21 et 0,24%. La faible teneur en soufre réduit les émissions nuisibles et la corrosion dans les systèmes métalliques, favorisant ainsi le respect des normes environnementales.

Le soufre est un élément nuisible à la fois d'un point de vue environnemental et industriel, car il provoque la corrosion des tuyaux et la production de gaz SO_x nocifs. Le faible taux est un signe positif, mais cela ne dispense pas de l'utilisation de systèmes de traitement des gaz d'échappement.

Le carburant respecte les normes d'émission actuelles et peut être utilisé dans des zones sensibles d'un point de vue écologique sous certaines conditions.

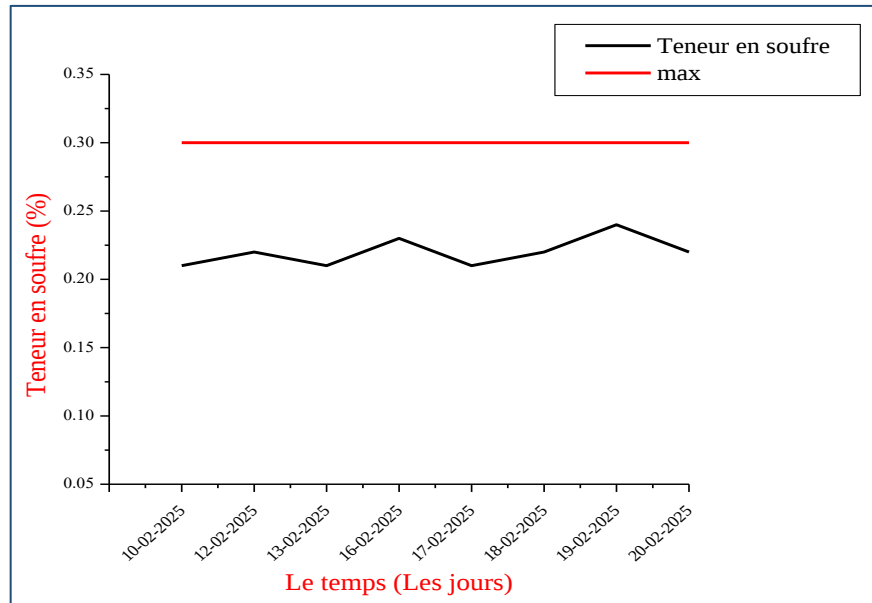


Figure IV.7 : Evolution de la teneur en soufre.

IV.3. 2. La viscosité (ASTM D 445)

Nous avons tracé la courbe qui représente l'évolution de la viscosité des échantillons du Fioul analysés (Fig. IV.8)

La viscosité est un facteur clé dans le type de combustion, surtout dans les chaudières industrielles.

La courbe montre des fluctuations notables, surtout le jour du 18/02/2025, où la viscosité a diminué puis elle est revenue à la hausse le jour suivant. Ce changement pourrait être dû à l'effet de la température ou à une variation dans la composition de l'échantillon ou à un manque d'homogénéité dans la composition. Toutefois, la viscosité reste dans la plage sécuritaire et est adaptée aux applications de chauffage et de combustion lente

La viscosité fluctuante pourrait entraîner une pulvérisation non homogène et une combustion incomplète, ce qui augmente les émissions et réduit l'efficacité thermique.

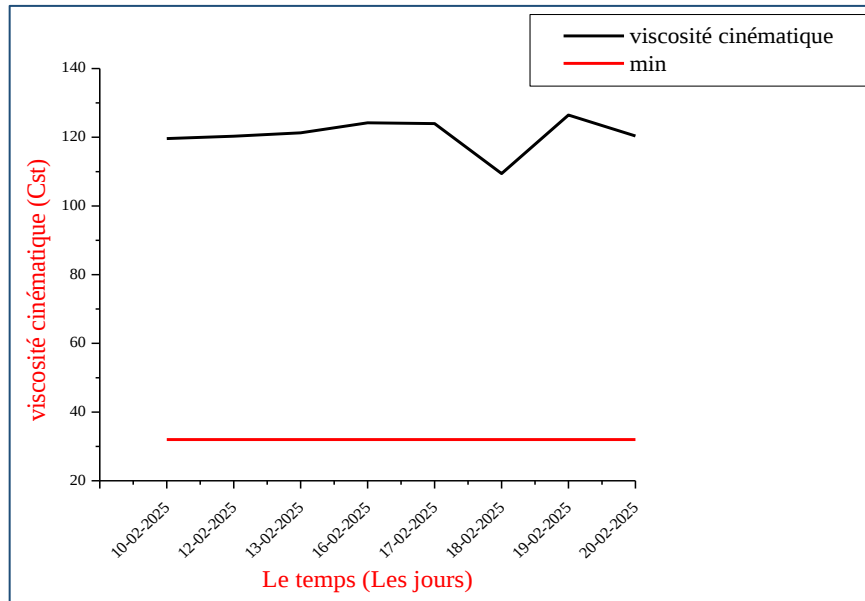


Figure IV.8 : Représentation de l'évolution de la viscosité cinématique des échantillons pour le fioul.

IV.3. 3.Le point d'écoulement (ASTM D 97)

Nous avons tracé la courbe qui représente l'évolution du point d'écoulement des échantillons analysés du fioul (Fig. IV.9):

La courbe est presque stable autour de +12°C avec une légère baisse le jour du 17/02/2025.

Les valeurs sont relativement élevées, ce qui signifie que le fioul pourrait perdre sa fluidité dans des environnements froids. Il est donc recommandé de le chauffer .

Le point de fluidité relativement élevé indique la présence de composants cireux ou lourds qui pourraient se solidifier par temps froid. Il est recommandé de chauffer le fioul avant utilisation ou d'utiliser des additifs pour abaisser le point de fluidité dans les zones froides, afin de maintenir la fluidité et garantir un approvisionnement continu pour la combustion [4].

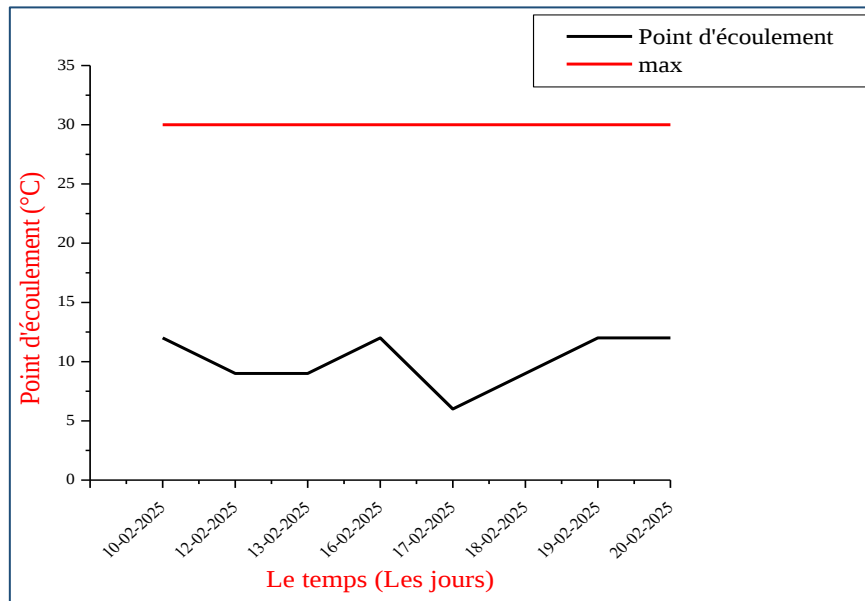


Figure IV.9 : Représentation de l'évolution du point d'écoulement des échantillons analysés du fioul.

IV.3. 4. Point éclair PE (ASTM D93-20)

L'évolution du point d'éclair des échantillons analysés du fioul durant notre stage à l'unité RA1K de Skikda est représentée par la figure IV.10.

Le point d'éclair élevé indique une sécurité accrue du produit lors du stockage et de la manipulation, réduisant le risque d'inflammation et d'explosion en cas de fuites ou de surchauffe accidentelle. Toutes les valeurs sont supérieures à 90°C, avec des variations mineures. Le produit est sûr pour le transport industriel et peut être stocké dans des conditions moins strictes sans risque d'inflammation.

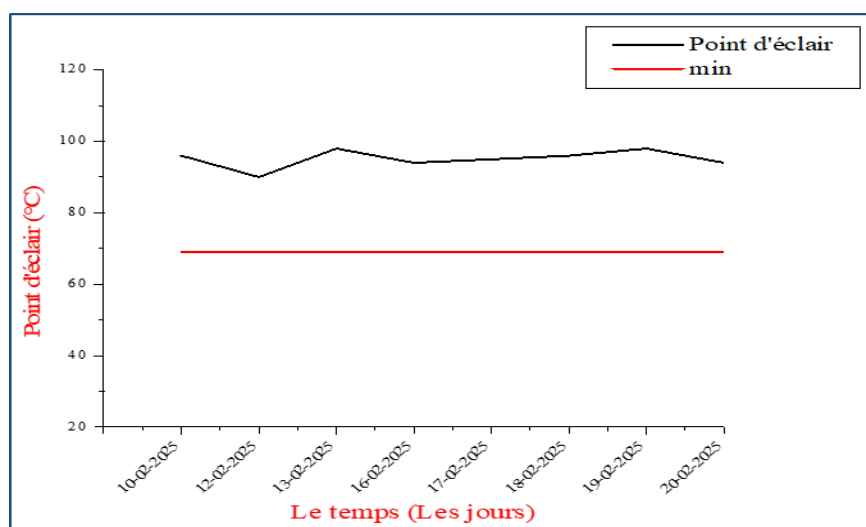


Figure IV.10 : Evolution de PE.

IV.4. Méthodes d'étude de l'effet inhibiteur de l'huile essentielle sur la corrosion

Le deuxième but de notre travail est d'étudier l'efficacité inhibitrice de l'huile essentielle d'eucalyptus sur la corrosion de l'acier en carbone, dans un milieu acide (H_2SO_4 (1M)) aéré, dans le Jet A1 et dans le fioul.

L'évaluation de l'effet d'inhibiteur de l'huile essentielle a été étudiée par les deux méthodes suivantes:

- Méthode gravimétrique (perte de masse).
- Méthodes électrochimiques.

IV.4.1. Matériau d'étude

Le matériau utilisé dans ce travail est l'acier au carbone (AISI C-1020). Sa composition chimique est mentionnée dans le tableau IV.1.

Les échantillons à caractériser sont découpés en forme parallélépipédique. Ils sont ensuite dégraissés au chloroforme, avant d'être polis mécaniquement jusqu'à un papier abrasif de grade 1200 avant de subir un second polissage électrochimique afin d'obtenir une surface polie.

Tableau IV.1 : Composition élémentaire en fraction molaire de l'acier au carbone AISI C-1020.

Elément	Fe	Mn	Ti	Cr	Ni	Nb	Mo	V	Cu	W
Teneur %	98,15	0,34	0,08	0,07	0,02	0,02	0,01	0	0	0

L'acier AISI 1020 est un acier au carbone qui fait partie de la norme américaine ASTM : A830, est un alliage à faible teneur en carbone contenant environ 0,20 % de carbone, ce qui le rend relativement souple, facile à façonner et simple à usiner. Ses niveaux de résistance sont inférieurs à ceux des aciers à plus forte teneur en carbone ; cependant, sa ductilité et sa soudabilité sont excellentes.

Milieu d'essai

➤ Préparation de la solution corrosive H_2SO_4 (1M)

La caractérisation électrochimique a été effectuée dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4 (1M)) préparée au laboratoire par la dissolution de 55 ml de H_2SO_4 dans un litre d'eau distillée.

IV.4.2. Méthode gravimétrique

La méthode gravimétrique (Perte de masse) consiste à exposer des échantillons préparés à un milieu corrosif. Après décapage, dégraissage, rinçage et séchage, on pèse un échantillon de l'acier au carbone, son poids initial m_0 (g) à l'aide d'une balance analytique à 10 grammes d'erreurs, en suite on l'immerge dans une solution corrosive gardée à une température et concentration bien déterminées, puis on pèse l'échantillon de l'acier au carbone après chaque rinçage et séchage, on note ainsi le poids final m_1 , après ces étapes et on calcule la vitesse de corrosion.

IV.4.2.1. Etude de l'effet de l'inhibiteur de l'huile essentielle sur la corrosion de l'acier au carbone **Matériels**

- Des échantillons en acier au carbone.
- Des béchers de 250 et 100 ml.
- Des fils isolés en nylon utilisés comme support des échantillons.
- Une tronçonneuse à disque en lubrifiant utilisée pour le coupage des échantillons.
- Un papier film
- Des papiers abrasifs (SAIT) de granulométrie (P 60, P 320, P 400, P 1200) utilisés pour le polissage des échantillons.
- Une balance de précision (OHAUS Shanghai).

 Les étapes de préparation des échantillons

- Polissage des échantillons de l'acier au carbone par le papier abrasif au carbure de silicium de granulométrie décroissante (du grain 60 jusqu'au 1200). Les échantillons sont ensuite rincés à l'eau distillée, dégraissés par l'éthanol puis séchés.
- Un rinçage à l'eau distillée, puis un dégraissage à l'acétone et un rinçage à l'eau distillée ;
- Un séchage sous un flux d'air pour éviter toute sorte de réaction entre l'eau distillée et la surface de l'échantillon avant les mesures.



(a)



(b)

Figure IV.11 : Schéma représentant les étapes de préparation des substrats, a) La machine polisseuse, b) Les échantillons de l'acier au carbone) obtenus après polissage.

IV.4.2.2. Effet de la concentration

L'évaluation de la stabilité de l'adsorption des inhibiteurs à la surface du l'acier au carbone a été réalisée par la mesure de perte de poids. La variation de la perte de masse de l'acier au carbone est déterminée après un temps d'immersion de 2 jours (48 heures) dans H_2SO_4 aéré, Jet A1 et dans fioul à la température ambiante du laboratoire ($25 \pm 2^\circ C$), avant et après addition d'huile essentielle d'eucalyptus.

Les échantillons de l'acier au carbone ont été immergés pendant 48 heures dans des solutions de concentrations en inhibiteur de 1 g/50mL, 2 g/50mL et 3 g/50mL. Les valeurs de V_{corr} et E (%) ont été calculées à l'aide des équations III.2, III.3 et III.4 [5].

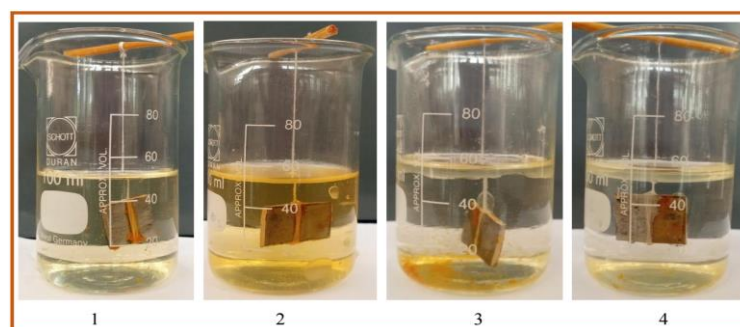


Figure IV.12 : Schéma montrant l'essai de corrosion de l'acier au carbone dans la solution de H_2SO_4 (1M) aérée en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

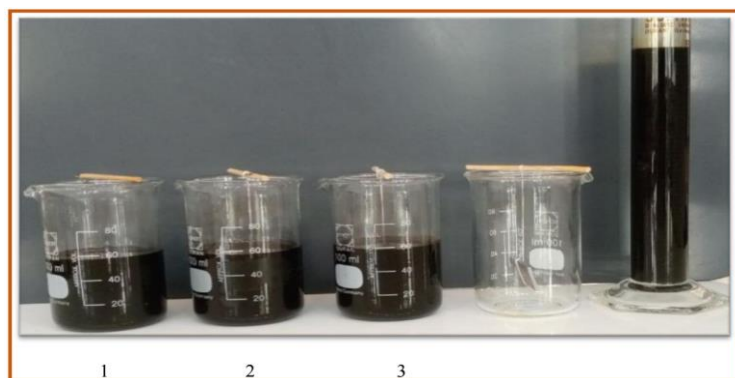


Figure IV.13 : Schéma montrant l'essai de corrosion de l'acier au carbone dans le fioul en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

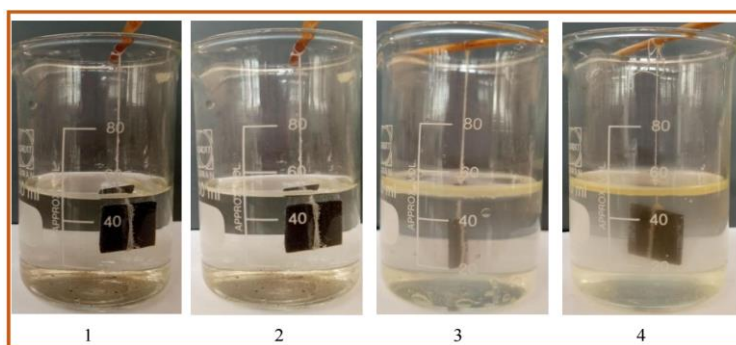


Figure IV.14 : Schéma montrant l'essai de corrosion de l'acier au carbone dans le Jet A1 en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

Les variations de la vitesse de corrosion (V_{corr}) et du pourcentage d'inhibition E (%) ont été déterminées à partir des mesures de la perte de poids de l'acier au carbone dans le milieu corrosif à la température ambiante du laboratoire (25 ± 2 °C) en présence de l'huile essentielle d'eucalyptus.

Le taux de recouvrement (θ) a été calculé pour différentes concentrations de molécules inhibitrices dans les solutions suivantes : H_2SO_4 (1M) aérées, Jet A1 et le fioul.

Les valeurs de la vitesse de corrosion (V_{corr}), l'efficacité inhibitrice EI (%) et le taux de recouvrement sont répertoriés dans le tableau IV.2.

Tableau IV. 2: Vitesse de corrosion, efficacités inhibitrices et taux de recouvrement en absence et en présence de l'huile essentielle d'Eucalyptus.

Produit	Pièce	Masse initiale	Surface (cm ²)	Δm	C (g/50ml)	$V_{\text{corr}} \cdot 10^{-5}$ (g/cm ² h)	E (%)	θ
H₂SO₄ (1M)	01	3,0090	1,8	0,3913	0	452,893	0	0
	02	3,1910	2,1	0,0534	1	52,9761	88	0,8830
	03	3,1354	2,1	0,0496	2	49,0263	89	0,8917
	04	3,5019	2,25	0,0366	3	33,8888	92	0,9251
Kérosène (Jet A₁)	01	3,5190	2,25	0	0	0	/	/
	02	3,5390	2,25	0	1	0	/	/
	03	3,5878	2,25	0	2	0	/	/
	04	3,6823	2,4	0	3	0	/	/
Fioul	01	4,4896	2,85	0,0028	0	2,04678	0	0
	02	4,6090	3	0,0008	1	0,5555	73	0,7285
	03	4,9203	3,18	0,00042	2	0,27515	86	0,8655
	04	5,2331	3,36	0,0002	3	0,12400	94	0,9394

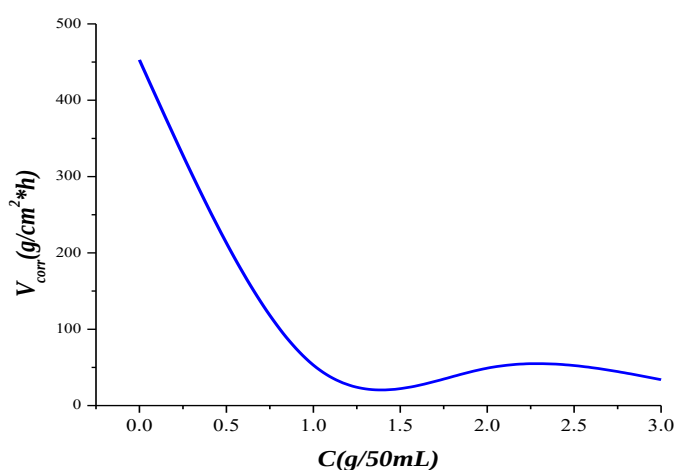


Figure IV. 15 : Variation de la vitesse de corrosion de l'acier au carbone dans une solution de H₂SO₄ en fonction de la concentration d'inhibiteur.

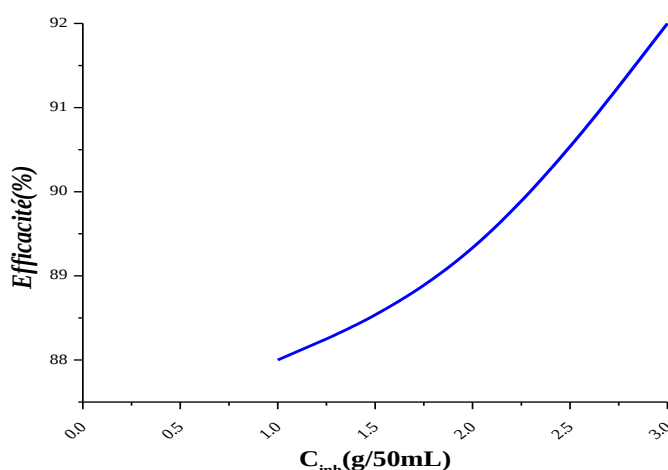


Figure IV.16 : Effet de la concentration d'huile essentielle d'Eucalyptus sur l'efficacité inhibitrice (E) de la corrosion de l'acier au carbone dans la solution H_2SO_4 (1M) aérée.

On observe clairement qu'une augmentation de la concentration de l'agent protecteur entraîne une diminution significative de la vitesse de corrosion, bien que cet effet tende à plafonner ou à s'atténuer à des concentrations très élevées.

Parallèlement, cette même augmentation de concentration se traduit par une amélioration constante et progressive de l'efficacité d'inhibition, démontrant une relation directe entre la quantité d'inhibiteur présente et le niveau de protection contre la dégradation du métal.

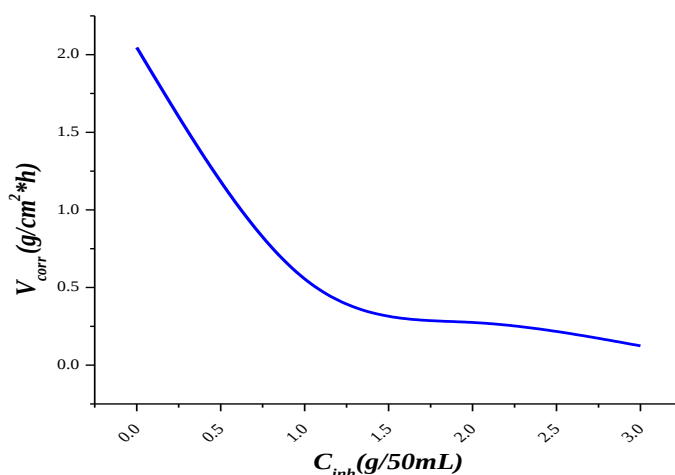


Figure IV.17 : Variation de la vitesse de corrosion de l'acier au carbone dans le fioul en fonction de la concentration d'inhibiteur.

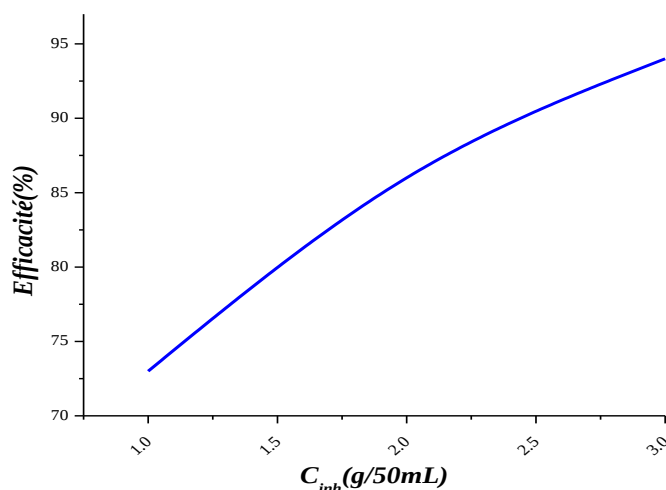


Figure IV.18 : Effet de la concentration d'huile essentielle d'Eucalyptus sur l'efficacité inhibitrice de la corrosion sur l'acier au carbone dans le fioul.

L'augmentation de la quantité d'inhibiteur entraîne une diminution notable de la vitesse de corrosion, signe d'une meilleure protection. Simultanément, l'efficacité inhibitrice s'accroît de manière continue et progressive avec l'augmentation de cette même concentration, soulignant une performance accrue du système de protection.

IV.4.3. Isotherme d'adsorption

Afin de comprendre le mécanisme d'interactions entre un inhibiteur et l'acier au carbone, il est très nécessaire de les ajuster avec des modèles décrivant le phénomène. Ces modèles sont représentés par les isothermes d'adsorptions qui sont en fonction de la concentration de l'inhibiteur. Dans la littérature il existe une gamme de modèles d'isothermes tels que Langmuir, Temkin, Frumkin etc.

Le modèle d'isotherme d'adsorption de Langmuir suppose qu'il existe, à la surface, un nombre fixe de sites énergétiquement identiques. Chacun des sites ne peut adsorber qu'une seule particule. De plus, le modèle suppose que les interactions entre particules adsorbées sont négligeables et, par conséquent, l'énergie d'adsorption est considérée comme constante. L'isotherme d'adsorption de Langmuir se représente graphiquement comme une fonction linéaire. Le tableau IV.2 représente les paramètres de Langmuir à savoir, Θ et C_{inh} .

Les valeurs du taux de recouvrement (Θ) des différentes concentrations ont été calculées à partir des efficacités inhibitrices obtenues (E) par gravimétrie.

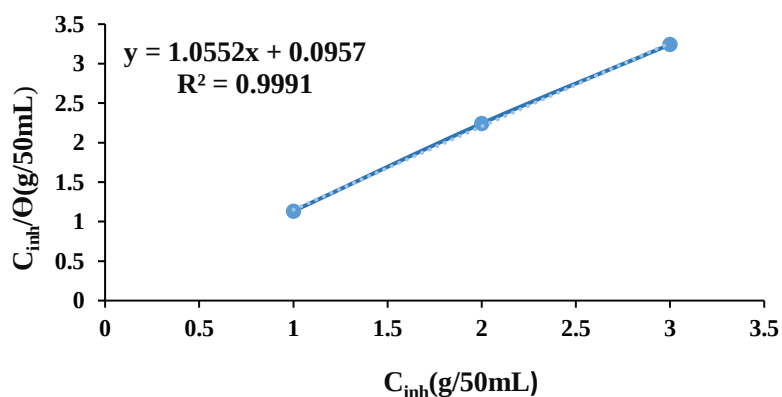


Figure IV.19 : Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier au carbone dans la solution H_2SO_4 (1M) aérée.

D'après la figure IV.19, on constate que la valeur du coefficient de corrélation linéaire de l'isotherme de Langmuir est très proche de 1. Ceci confirme que l'adsorption de l'huile essentielle d'eucalyptus sur la surface de l'acier au carbone obéit à l'isotherme d'adsorption de Langmuir. Ce modèle suppose que l'inhibition de la corrosion est due à la formation d'une mono couche sur la surface métallique, réduisant le contact avec l'électrolyte et que les interactions entre les particules adsorbées sont négligeables [5-7].

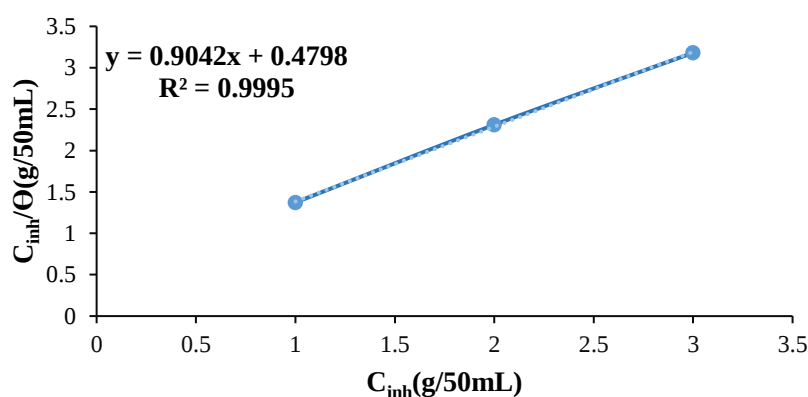


Figure IV. 20 : Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier au carbone dans le fioul.

La représentation de C_{inh}/Θ en fonction de C_{inh} est une droite linéaire avec un coefficient de corrélation égale à 0,9995 très proche de 1. Ce qui nous permet de conclure que l'adsorption de l'huile essentielle d'Eucalyptus sur la surface de l'acier au carbone obéit à l'isotherme de

Langmuir. Ce modèle suppose que l'inhibition de la corrosion est due à la formation d'une mono couche sur la surface métallique, réduisant le contact avec l'électrolyte et que les interactions entre les particules adsorbées sont négligeables.

IV.5. Méthodes électrochimiques

Cette partie a été réalisée au niveau du laboratoire pédagogique, Département Génie des Procédés, Université de Guelma. Dans le cadre des manipulations liées à ce travail, nous avons utilisé une cellule analytique en verre simple. La cellule est recouverte d'un couvercle muni des ouvertures permettant d'y placer les électrodes et le thermomètre (Fig. IV.21). Un montage à trois électrodes est utilisé pour effectuer les caractérisations électrochimiques de notre travail. Ces électrodes sont [7- 10] :

- Une électrode de référence : L'électrode de référence utilisée au cours de toutes les manipulations de ce travail est l'électrode au calomel saturé (ECS) $\text{Cl}^-/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{Hg}$.
- Une contre-électrode (auxiliaire) : Au cours des manipulations électrochimiques, la contre électrode utilisée est un fil de platine de $0,5 \text{ cm}^2$.
- Une électrode de travail qui est l'échantillon qu'on veut le caractérisé dans cette étude.

Les électrodes électrochimiques (une électrode de travail, une électrode de référence et l'électrode en platine) ont été immergées dans les solutions corrosives(en présence et en absence d'inhibiteur), elles ont été connectées à un potentiostat utilisé, qui est relié directement à un ordinateur équipé d'un logiciel qui sert à tracer et traiter les courbes $E = f(i)$ ainsi que l'obtention du vitesse de corrosion. Tout ça pour les différentes concentrations d'inhibiteur.

Une représentation schématique du montage expérimental décrit ci-dessus est proposée en figure VI.b. Les mesures ont été effectuées jusqu'à obtenir trois essais reproductibles.

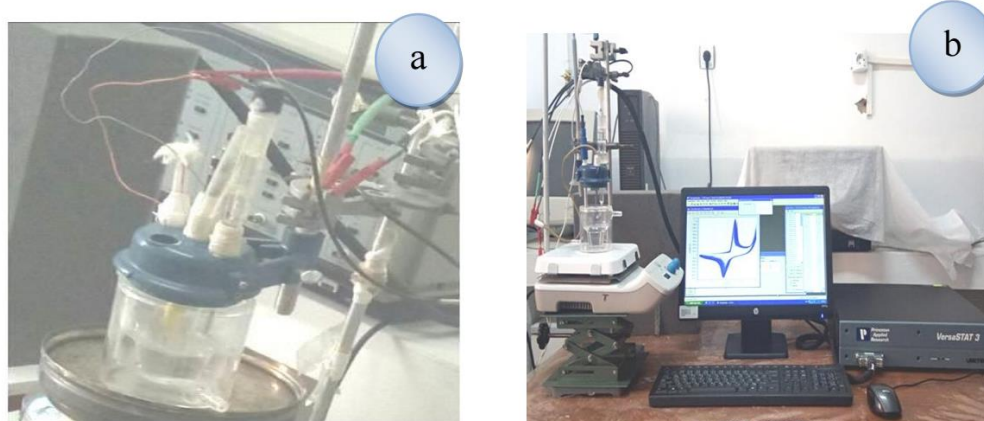


Figure IV.21 : Montage expérimental pour la réalisation des essais de corrosion au laboratoire pédagogique, Département Génie des Procédés, Université 8 mai 45 Guelma, a) cellule électrochimique, b) Chaîne électrochimique.

IV.5. 1. Courbes de polarisation potentiodynamique de l'acier au carbone

La méthode de polarisation potentiodynamique, consiste à imposer à l'échantillon une tension donnée par rapport à l'électrode de référence, et à mesurer la densité de courant résultante traversant l'électrode de travail.

A l'aide d'un générateur extérieur et d'une contre électrode, on fait passer un courant à travers l'électrode métallique. Son état stationnaire est modifié et sa surface prend une nouvelle valeur du potentiel. Les courbes $E = f(i)$ ou $i = f(E)$ constituent les courbes de polarisation.

L'analyse de ces courbes montre que les réactions anodiques et cathodiques sont affectées par l'ajout de l'huile essentielle d'Eucalyptus. En effet, l'ajout de cette huile essentielle à la solution corrosive induit la diminution du courant correspondant à la dissolution du métal et provoque un déplacement du potentiel de corrosion vers les valeurs positives [10,11].

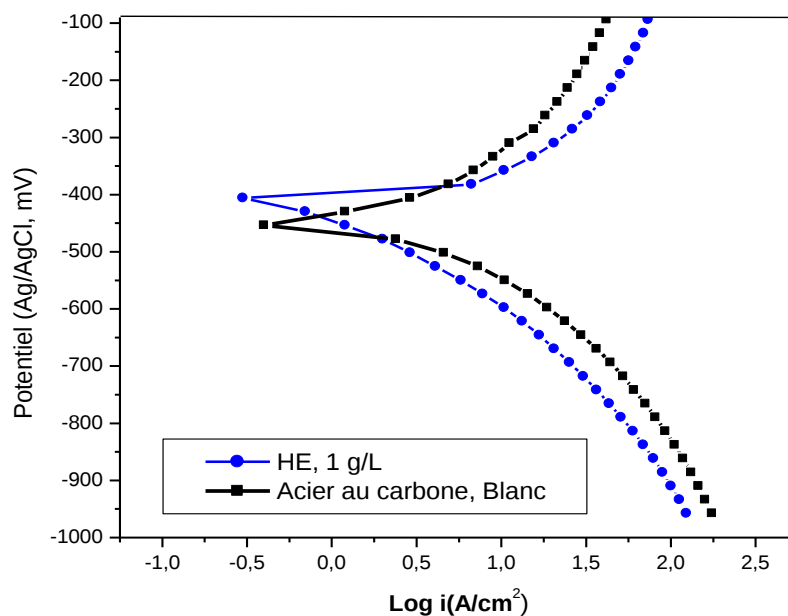


Figure IV.22 : Courbes de polarisation potentiodynamique de l'acier au carbone dans la solution acide H_2SO_4 (1M) sans et avec addition d'huile essentielle d'Eucalyptus.

Tableau IV.3 : Les valeurs de potentiel et de densité de courant tirés des courbes de Tafel de la figure IV.22.

Echantillons	Avec inhibiteur		Sans inhibiteur	
	E_{corr} (mV/SCE)	I_{corr} (A/cm ²)	E_{corr} (mV/SCE)	I_{corr} (A/cm ²)
Acier au carbone	-400,00	- 0,534	- 470,945	0,20

IV.6. Conclusion

L'analyse des données expérimentales met en évidence l'efficacité remarquable de l'huile essentielle d'eucalyptus en tant qu'inhibiteur naturel de la corrosion pour l'acier au carbone. L'ajout de cette huile a permis de réduire de manière significative la vitesse de corrosion (V_{corr}) dans tous les milieux testés, avec une efficacité maximale observée dans le milieu acide. Par ailleurs, l'efficacité inhibitrice ($E \%$) a montré une corrélation directe avec la concentration en inhibiteur, atteignant un maximum de 94 %, traduisant ainsi une action protectrice remarquable. Cette performance est corroborée par les valeurs élevées du taux de recouvrement (Θ), qui témoignent d'une adsorption efficace des molécules actives sur la surface métallique. Ce phénomène d'adsorption favorise la formation d'un film protecteur homogène qui limite les interactions entre le métal et les espèces agressives du milieu.

Parallèlement, il a été démontré que le comportement à la corrosion dépend fortement de la nature du milieu. Le Jet A1 n'a montré aucun signe de corrosion, en raison de l'absence d'humidité, de conductivité électrique et d'agents oxydants. Ce carburant, par sa nature apolaire et sèche, est donc incapable de soutenir des réactions électrochimiques corrosives. À l'opposé, le fioul présente un comportement corrosif notable, attribué à sa richesse en composés lourds et impuretés soufrées, ainsi qu'à sa capacité à retenir l'humidité et à former des films propices à la corrosion, surtout en stockage prolongé. De même, le milieu acide (H_2SO_4) s'est révélé hautement agressif.

Références bibliographiques du chapitre IV

- [1] Boeglin J-C., Roubaty J-L., Pollution industrielle de l'eau : Caractérisation, classification, mesure, Technique de l'ingénieur. Volume G 210, volume 2, 2007.
- [2] Mechat F., Étude des paramètres physico-chimiques avant et après traitement des rejets liquide de (RA1K), mémoire de Magister en chimie, option pollution chimique et environnement, 2006.
- [3] Bennajah M., Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation-électroflottation en réacteur air lift, Thèse de Doctorat en Génie des procédés et de l'environnement. Institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [4] Boukhatem M. N., Hamaid M. S., Saidi F., Hakim Y., Extraction, composition et propriétés physico-chimiques de l'huile essentielle du Géranium Rosat (*Pelargonium graveolens* L.) cultivé dans la plaine de Mitidja (Algérie), *Revue Nature et Technologie*, 2010.
- [5] Benoudjit F., Maameri L., Ouared K., Evaluation of the quality and composition of lemon (*Citrus limon*) peel essential oil from an Algerian fruit juice industry, *Algerian Journal of Environmental Science and Technology* December edition. Vol.6. No4. (2020) ISSN : 2437-1114, www.aljest.org
- [6] Traikia A., Manssouri M., Etude des caractéristiques physiques et chimiques des huiles essentielles du clou de girofle et de l'eucalyptus, Mémoire de Master 2 en chimie physique et analytique, Université 08 Mai 1945, Guelma, 2020.
- [7] Salhi A., Chetouani A., Bouyanzer A., Amhamdi H., The inhibitive action of *Pistacia Lentiscus* as a potential green corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium, *Moroccan Journal of Chemistry*, 4 N°4 1037-1051, 2016.
- [8] Ladouani H., Inhibition de la corrosion du cuivre en milieu acide par les dérivés de dithioacétal de cétène, Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2011.
- [9] <https://www.alloprof.qc.ca>, consulté le 02/05/2024 à 16 :50.
- [10] Hegazy M.A., Abdallah M., Alfakeer M., Ahmed H., Corrosion Inhibition Performance of a Novel Cationic Surfactant for protection of Carbon Steel Pipeline in Acidic Media, *Int. J. Electrochem. Sci.* 13, 6824-6842, 2018.

- [11] Benarioua M., Etude de l’Inhibition de la corrosion d’un acier doux en milieu acide par l’emploi d’inhibiteurs à base de plantes, Thèse de Doctorat, Université de Mostefa Ben Boulaïd, Batna, 2019.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le raffinage du pétrole a pour objectif de transformer des pétroles bruts d'origines diverses en un ensemble de produits pétroliers répondant à des spécifications commerciales, tels que les gaz, les essences, les gasoils et les fiouls.

Le kérosène (Jet A1) et le fioul commerciaux ont des différentes caractéristiques physico-chimiques qui déterminent leur comportement et leur qualité.

L'acier au carbone occupe une place privilégiée dans tous les secteurs industriels dans notre pays et spécialement dans les industries pétrolières. Ces aciers sont soumis à diverses formes de dégradation due à la corrosion.

Le premier objectif de ce travail a consisté à étudier les caractéristiques physicochimiques du kérosène (Jet A1) et du fioul, au sein du laboratoire de la raffinerie RA1K de Skikda, selon des normes qui définissent les différentes techniques.

Le deuxième objectif était d'étudier les propriétés inhibitrices de l'huile essentielle d'Eucalyptus sur la corrosion de l'acier au carbone dans trois milieux corrosifs :

- Milieu acide H_2SO_4 (1M) aéré.
- Dans le kérosène (Jet A1) stocké.
- Dans le fioul stocké.

L'inhibition de la corrosion a été étudiée à l'aide de la perte de masse et des techniques de polarisation potentiodynamique.

L'étude comparative des analyses effectuées, pour les différents échantillons a permis de dégager les conclusions suivantes :

- Les densités d_4^{15} obtenues sont conformes aux normes, elles exercent de bonnes influences complexes sur l'injection et la préparation du mélange auto-inflammable.
- Les courbes de distillation et les points d'éclair (PE) sont compatibles aux normes, ils nous indiquent une bonne volatilité de fioul au cours de leurs utilisations. Le point d'éclair (PE) a un critère de sécurité lors des opérations de stockage et de distribution.
- les viscosités et les points d'écoulement répondent aux normes recommandées, ils illustrent une influence directe sur les caractéristiques d'injection, et en particulier sur la taille des gouttelettes du kérosène (Jet A1) et du fioul.

L'extraction de l'huile essentielle d'Eucalyptus a été réalisée par hydrodistillation. La valeur du rendement en huile essentielle était 80 %.

L'efficacité inhibitrice de corrosion se stabilise à partir d'une concentration de 3 g/50 mL et atteint une valeur maximale de 94%.

Nous avons constaté que l'adsorption de l'inhibiteur était compatible avec l'isotherme d'adsorption de Langmuir pour l'acier au carbone.

D'après les courbes de polarisation de l'acier au carbone dans la solution acide H_2SO_4 (1M) en absence et en présence de l'huile essentielle d'Eucalyptus, tracées à une vitesse de balayage de 1 mV/s, nous avons observé que l'augmentation de la concentration en inhibiteur tend à déplacer le potentiel de corrosion vers le domaine positive

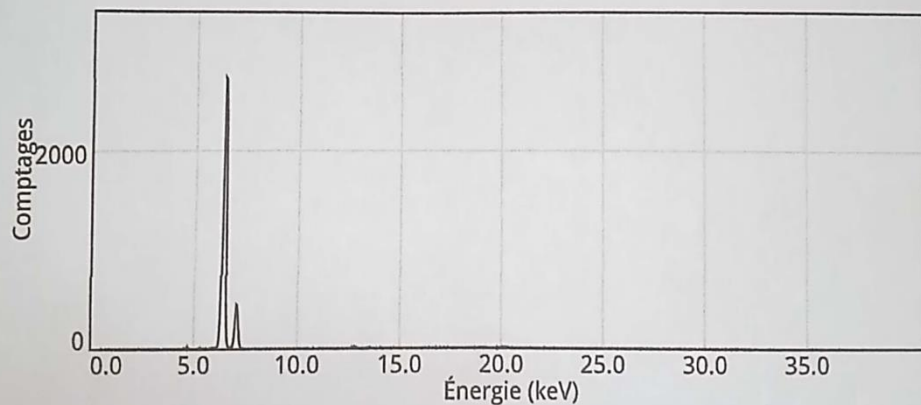
Annexes A

Figure A.1 : Composition de l'acier au carbone.



19/02/25 - Page 1

Nom imad	Classe 1 Alloy Mode			Date 19/02/25	Heure 09:23:57		Durée 3,6 s
Élément	Fe %	Mn %	Ti %	Cr %	Ni %	Nb %	Mo %
1echantillonIMAD	98,15	0,34	0,08	0,07	0,02	0,02	0,01
Moyenne	98,15	0,34	0,08	0,07	0,02	0,02	0,01
±	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Élément	V %	Cu %	W %				
1echantillonIMAD	0,00	0,00	0,00				
Moyenne	0,00	0,00	0,00				
±	0,000	0,000	0,000				
Qualité : C-1020 (0,00), TS O-6 (0,85)							
Référence :							



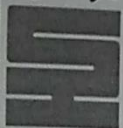
AISI = C-1020

ASTM: A830

Figure A. 2 : Certificat de qualité de Jet A1.

Methods		Caractéristiques		Résultats	Limites
ASTM		APPEARANCE	ASPECT	Clair et Limpide sans eau non dissoute ni sédiments à T° ambiante	Clear and Bright (free from solid mater and undissolved water at amble Report
D 6986(procedure A) D 156 or D 6045		Visual inspection Colour	Visual inspection Couleur	+ 30	
D 5452	423	Particulate contamination	Contamination par des particules	mg/l	
D7619	565 or 577	OR Particulate, at point of manufacture, cumulative channel particle counts & Individual channel count / and ISO code ≥ 4 µm(c) ≥ 6 µm(c) ≥ 14 µm(c) ≥ 21 µm(c) ≥ 25 µm(c) ≥ 30 µm(c)	OU Particules, à la raffinerie, N° cumulé par canal de comptage et comptage individuel par canal/ et code ISO	0.7 3293.0/19 525.1/16 10.2/11 0.9/7 0.2/5 0.0/0	1.0 max. Report/Max19 Report/Max17 Report/Max14 Report Report Report/Max13
D 3242 D 1319 D 6379	354 156 436	COMPOSITION Total Acidity Aromatics OR Total Aromatics	COMPOSITION Acidité Totale Aromatiques OU Aromatiques totaux	mg KOH/g % vol. % vol.	0.014 25.0 max. 26.5 max.
D5453 or D4294or D1266orD262253	336	Sulphur, Total	Soufre Total	% mass.	0.30 max.
D 3227 D 4952	342 30	Sulphur, Mercaptans OR Doctor Test	Soufre Mercaptan OU Doctor Test	% mass.	0.0030 max. Negative
		Refinery Components at point of manufacture: Composition du lot lors de la fabrication en raffinerie Non Hydroprocessed components in batch Hydroprocessed components in batch Severely hydroprocessed components Synthetic components	% non Hydrotraité % Hydrotraité % Sévèrement hydrotraité % Synthétique	100% NIL NIL NIL	Report (incl. "nil" or "100%") Report (incl. "nil" or "100%") Report (incl. "nil" or "100%") Report (incl. "nil" or "50%")
D7797 D7872	IP 585 /583 /590 /599	Incidental materials Fatty acid methyl ester (FAME) Pipeline Drag Reducer (DRA)	Composes accidentels Ester méthylique d'acide gras (EMAG)	mg/Kg µg/l	NIL /
D 86 See D 7345 See norote (10)	123 9/σ 406 See note (10)	VOLATILITY Distillation	VOLATILITE Point Initial 10% vol. rec. à 50% vol. rec. à 90% vol. rec. à Endpoint Residue Loss	°C °C °C °C °C % vol. % vol.	151 173 197 212 221 0.5 0.5
Or IP 406 or D 2887		Flash Point	Point d'Eclair	°C	39
D3828 or D56 or D93 or D7236	170 or 523 534	Density at 15°C	Masse Volumique à 15°C	kg/m³	791.5
D1298 D 4052 or 365	160 365	FLUIDITY Freezing Point	FLUIDITE Point de disparition des cristaux	°C	-54.05
D 2386 or D5972 or D7153 or D7154 D445 D7042or D7945	16 or 435 or 528 or 529 71	Viscosity at -20°C	Viscosité à -20°C	mm2 /s	3.405
D 3338 D4809	12 335	COMBUSTION Specific Energy, net	COMBUSTION Pouvoir Calorique inf.	MJ / kg	/
D 1322 D 1322 D 1840	598 598	Smoke Point OR Smoke Point AND Naphtalènes	Point de fumée OU Point de fumée ET Naphtalènes	mm mm % vol.	26.1 25.0 min. 18.0 min. 3.00 max.
D 130	154	CORROSION Corrosion, Copper strip, classification (2 hours +/- 5 min. at 100°C +/- 1°C) THERMAL STABILITY (JFTOT) Control temperature Filter Pressure Differential	CORROSION Corrosion Cuivre Classification (2 heures +/- 5 min. à 100°C +/- 1°C) STABILITE THERMIQUE (JFTOT) Température de contrôle Delta P du Filtre	°C mm Hg	260 0.1
D 3241 D 3241	323 323	One of the following requirement shall be meet (1) Annex B VTR no "Peacock" or "Abnormal" colour deposits (2) Annex C ITR or Annex D ETR average over area of 2.5 mm²	Une seule des deux conditions doit être remplie (1) Annexe B VTR sans irisation ou dépôts anormalement colorés (2) Annexe C ITR ou Annexe D ETR moyenne sur une aire de 2.5 mm²	nm	1 /
D 381 D 3948	540	CONTAMINANTS Existent Gum Microseparometer (MSEP) ratings: Fuel with Static Dissipator Additive OR Fuel without Static Dissipator Additive.	CONTAMINANTS Gommes Actuelles Cotation (MSEP) : Carburant additivé en additif antistatique OU Carburant non additivé en additif antistatique	mg/100 ml	0.4 70 85 min.
D 2624	274	CONDUCTIVITY Electrical Conductivity	CONDUCTIVITE Conductivité électrique	pS/m	279
D 5001		LUBRICITY BOCLE wear scar diameter	LUBRIFIANCE Diamètre d'usure BOCLE	mm	NA
CODE ADDITIF DEF STAN 91-091 RDE/A/xxx RDE/A/...		ADDITIVES Names and approval codes from DEF STAN 91-091/14 should be quoted on quality certificates Antioxidant in final batch (Optional)	ADDITIFS Noms et codes d'approbation selon DEF STAN 91-091/14 doivent être précisés sur les certificats de qualité Antioxydant dans le mélange final (optionnel)	mg/l	NIL
RDE/A/...		Metal Deactivator (Optional) First doping Cumulative after field redoping	Désactivant des métaux (optionnel) Première additivation Cumul après ré-additivation	mg/l mg/l	NIL NIL
RDE/A/621 RDE/A/D5FA/001		Static Dissipator Additive First doping Cumulative after field redoping	Additif Antistatique Première additivation Cumul après ré-additivation	mg/l mg/l	NIL NIL

Figure A.3 : Certificat de qualité du Fioul.

سوناطراك  sonatrach Raffinerie de Skikda RA1K Département : Laboratoire	Certificat de Qualité Certificat N° : 23/F-B/2025 Délivré le : 09/02/2025
---	--

FUEL- BTS
REFERENCE STOCKAGE: S.95 DESTINATION: NAVIRE: STI FINCHLEY

Caractéristiques	Unités	Méthodes d'essai	Limites	Résultats
Masse Volumique A 15°C	g/ml	ASTM D4052/ ASTM D1298	0,900-0,930	0.9135
Teneur en Soufre	%Pds	ASTM D 4294	0.30MAX	0.26
Point d'éclair	°c	ASTM D 93	69MIN	115
Point d'écoulement	°c	ASTM D 97	30 MAX	+9
Viscosité à 100 °F	cSt	ASTM D 445	32 MIN	147.36
Eau par distillation	%vol	ASTM D 95	0.5 MAX	0.1
Teneur en Eau & Sédiments	%vol	ASTM D 1796	0.5 MAX	<0.05
Teneur en Sodium	ppm	IP 470	10MAX	4.5

Produit conforme

Visa Inspecteur

Visa Responsable Laboratoire

Annexes B

Tableau B. 1: Valeurs des points de la distillation ASTM (°C) du Jet A1.

Caractéristique Echantillon	T _{eb} (°C)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
PI	150	152	151	155	150	159	151	150
5%	166	162	165	166	165	169	165	160
10%	174	166	173	173	173	174	170	165
20%	182	170	183	181	180	179	175	171
30%	191	174	189	185	186	185	180	176
40%	194	181	194	189	191	189	186	182
50%	197	187	197	194	194	193	191	187
60%	200	191	201	197	197	196	192	192
70%	203	199	204	200	201	199	201	199
80%	207	207	207	204	204	203	208	206
90%	211	215	212	209	209	208	218	218
95%	215	221	216	213	213	212	226	229
PF	220	240	221	217	218	222	234	239
Volume récupérer (mL)	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0
Volume résidu (mL)	1,7	1,8	1,6	1,8	1,5	1,6	1,8	1,7
Volume perte (mL)	0,3	0,2	0,4	0,2	0,5	0,4	0,2	0,3

Tableau B. 2 : valeurs des densités d_4^{15} du Jet A1.

N° Echantillon	Les jours	La densité à 15°C
1	09-02-2025	0,7906
2	11-02-2025	0,7787
3	13-02-2025	0,7899
4	16-02-2025	0,7915
5	17-02-2025	0,7791
6	18-02-2025	0,7878
7	19-02-2025	0,7914
8	20-02-2025	0,7917

Tableau B.3 : valeurs des conductivités du Jet A1.

N° Echantillon	Les jours	La conductivité
1	09-02-2025	418
2	11-02-2025	337
3	13-02-2025	359
4	16-02-2025	455
5	17-02-2025	412
6	18-02-2025	549
7	19-02-2025	279
8	20-02-2025	378

Tableau B. 4 : valeur de l'acidité du Jet A1.

N° Echantillon	Les jours	l'acidité
1	09-02-2025	0.0130
2	11-02-2025	0.0130
3	13-02-2025	0.0140
4	15-02-2025	0.0140
5	17-02-2025	0.0140
6	18-02-2025	0.0140
7	19-02-2025	0.0130
8	20-02-2025	0.0140

Tableau B. 5 : valeurs des points de fumée du Jet A1.

N° Echantillon	Les jours	le point de fumée
1	09-02-2025	31.2
2	11-02-2025	27
3	13-02-2025	26,1
4	15-02-2025	26,0
5	17-02-2025	26.3
6	18-02-2025	24
7	19-02-2025	22
8	20-02-2025	22,3

Tableau B .6 : La couleur Saybolt du Jet A1.

N° Echantillon	Les jours	La couleur
1	09-02-2025	+30
2	11-02-2025	+30
3	13-02-2025	+30
4	16-02-2025	+30
5	17-02-2025	+30
6	18-02-2025	+30
7	19-02-2025	+30
8	20-02-2025	+30

Tableau B .7: valeurs de teneur en soufre de fioul.

N° Echantillon	Les jours	teneur en soufre
1	10-02-2025	0,21
2	12-02-2025	0,22
3	13-02-2025	0,21
4	16-02-2025	0,23
5	17-02-2025	0,21
6	18-02-2025	0,22
7	19-02-2025	0,24
8	20-02-2025	0,22

Tableau B .8: Valeurs de la viscosité cinématique de fioul.

N° Echantillon	Les jours	Viscosité cinématique à 20°C (cSt)
1	10-02-2025	119,62
2	12-02-2025	120,32
3	13-02-2025	121,30
4	16-02-2025	124,22
5	17-02-2025	123,98
6	18-02-2025	109,43
7	19-02-2025	126,48
8	20-02-2025	120,36

Tableau B .9: Valeurs de point d'écoulement de fioul.

N° Echantillon	Les jours	Point d'écoulement °C
1	10-02-2025	+12
2	12-02-2025	+9
3	13-02-2025	+9
4	16-02-2025	+12
5	17-02-2025	+6
6	18-02-2025	+9
7	19-02-2025	+12
8	20-02-2025	+12

Tableau B.10 : valeurs de PE (°C) de fioul.

N° Echantillon	Les jours	PE (°C)
1	10-02-2025	96
2	12-02-2025	90
3	13-02-2025	98
4	16-02-2025	94
5	17-02-2025	95
6	18-02-2025	96
7	19-02-2025	98
8	20-02-2025	94