

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état et master2

Domaine : Science et technologie

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Traitement et Réutilisation des Eaux Usées

Thème :

**Évaluation de la performances du système de
traitement des eaux usées industrielles au
niveau de la raffinerie de Skikda**

Présenté par :

BENGOUFFA Sara

EL-BAHI Assia

Soutenu le 24 Juin 2026 devant le jury composé de :

MmeCHAOU Nadia	MAA	ENSSMAL	Présidente
Mme. GHEZALIKatia	MCB	ENSSMAL	Promotrice
M.BOUFELIGHA Messaoud	Ingénieur	Sonatrach	Co- Promoteur
MmeKHELASSI Amina	MCB	ENSSMAL	Examineur

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah de nous avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

*Nos remerciements les plus vifs et les plus sincères s'adressent tout particulièrement à notre promotrice, **Mme Katia Ghezali**. Nous la remercions infiniment pour son encadrement exceptionnel, sa grande disponibilité, son orientation scientifique rigoureuse et son aide immense tout au long de la rédaction de ce mémoire. Ce travail n'aurait pu voir le jour sans son investissement et son soutien constants.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre co-promoteur, **M. Boufeligha**, pour nous avoir proposé ce sujet de mémoire, pour son accueil chaleureux au niveau de la raffinerie de Skikda, ainsi que pour ses explications précieuses sur le terrain.*

*Nous tenons également à remercier chaleureusement toute l'équipe technique de la raffinerie de Skikda (**SONATRACH**), qui nous a encadrées durant notre stage. Un grand merci pour leur accueil formidable, leur disponibilité, leur gentillesse et toutes les explications qui nous ont permis de comprendre le fonctionnement pratique du système.*

Nos remerciements vont aussi à la direction de la raffinerie et au personnel de l'administration et de l'accueil pour leur professionnalisme et pour avoir facilité toutes nos démarches.

Nous exprimons notre reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail et de l'honorer par leur présence.

Enfin, nous ne saurions oublier de remercier nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours universitaire.



Dédicaces

(رَبِّ أَوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ)

À Allah : Pour m'avoir donné la force, la patience, la santé et le courage d'accomplir ce travail, et pour avoir éclairé mon chemin. Louanges et remerciements Lui appartiennent, au début et à la fin.

À mon cher Père : Mon exemple suprême, ma fierté et mon pilier de force. Merci infiniment pour tous tes sacrifices, tes précieuses prières et d'avoir toujours cru en moi. Tu as été le mur solide sur lequel je m'appuyais à chaque moment de fatigue, m'encourageant pas à pas pour devenir ingénieure aujourd'hui. Je te dédie ce succès avec une immense fierté, en espérant avoir honoré ton nom. Qu'Allah te bénisse et t'accorde une longue et heureuse vie, mon cher papa.

À ma très chère Mère : Source de tendresse, d'amour et de sacrifices infinis. Celle qui a illuminé mon parcours par ses prières quotidiennes. Tes douces prières ont été mon bouclier et mon refuge. Je t'aime maman, et ce succès est avant tout le fruit de tes veillées et de ton dévouement. Qu'Allah te préserve, ma reine.

À mes chers frères et sœurs : Mes précieux piliers, pour leur affection, leur soutien moral, leurs encouragements et leur présence constante à chaque étape de ma vie.

À tous mes amies et proches : Qui ont partagé mes moments de joie et de stress, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

SARA



Dédicaces

À Allah, du début à la fin...

Louanges à Toi, mon Seigneur, des louanges abondantes, pures et bénies, des louanges qui siéent à la majesté de Ton visage et à la grandeur de Ton pouvoir, pour Ta réussite, Ta bienveillance et Ta grâce qui m'ont entourée tout au long de ce chemin. Sans Toi, aucun pas n'aurait été franchi, et aucune difficulté n'aurait été surmontée.

À moi-même...

Je me dédie ce succès. À cette âme qui a patienté, lutté et résisté face aux épreuves et aux moments les plus lourds. À ma passion qui ne s'est jamais éteinte, et à ma détermination qui ne s'est jamais pliée devant la fatigue et les nuits blanches... Merci d'avoir été le meilleur des compagnons, de ne pas m'avoir déçue, et d'avoir tenu bon jusqu'à l'accomplissement.

À la source du don et mes piliers dans la vie... Mes chers parents...

À ma Mère : Ma précieuse, le battement de mon cœur et ma prière exaucée. Celle qui m'a soutenue par sa tendresse et a patienté à mes côtés, étape par étape.

À mon Père : Mon modèle, mon exemple suprême, celui qui m'a insufflé la force et a été le roc solide sur lequel je m'appuie à tout moment.

À vous deux, qui avez donné sans compter pour voir le fruit de votre dévouement aujourd'hui, je vous dédie ce succès, en priant Allah de vous préserver comme un trésor et un soutien éternel.

À vous tous... Je dédie le fruit de mes efforts et de mon diplôme.

ASSIA

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité du système de traitement des eaux usées appliqué au niveau de la nouvelle unité de raffinage de Skikda (RA1K/SONATRACH). La démarche a consisté à analyser les variations journalières de différents paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité électrique, dureté, chlorures, phosphates, DCO, DBO₅ et hydrocarbures totaux) et à les comparer aux normes réglementaires algériennes des rejets industriels liquides.

Les résultats obtenus montrent une réduction très nette de la charge polluante à la sortie de la station. Les paramètres biologiques et les hydrocarbures totaux affichent une excellente conformité avec le Décret exécutif 06-141, ce qui prouve la haute performance de la station dans le traitement de la pollution organique. Malgré des hausses saisonnières de la DCO et des dépassements en chlorures et température liés aux conditions d'exploitation et de maintenance, les performances globales restent satisfaisantes. En conclusion, les procédés de traitement utilisés par l'unité sont hautement efficaces, garantissant le rejet d'une eau épurée et sans impact négatif sur le milieu marin, tout en recommandant l'intégration future des mesures des MES et de l'azote.

Mots-clés : Traitement des eaux usées, Raffinerie de Skikda, Rejets industriels, Performance, DCO, DBO₅, Hydrocarbures totaux, Décret exécutif 06-141, Milieu marin.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم أداء وكفاءة نظام معالجة المياه المستعملة على مستوى وحدة تكرير النفط الجديدة بسكيدة (RA1K/سوناطراك). وتم تحقيق ذلك من خلال المتابعة الفيزيوكيميائية والتحليل اليومي لمختلف المؤشرات البيئية والمتمثلة في: درجة الحموضة، درجة الحرارة، الموصلية الكهربائية، الصلابة، الكلوريدات، الفوسفات، الطلب الكيميائي على الأكسجين (DCO)، الطلب البيوكيميائي للأكسجين (DBO_5)، والهيدروكربونات الكلية، ومقارنتها بالمعايير النظامية الجزائرية للنفايات الصناعية السائلة.

أثبتت نتائج الدراسة أن عمليات المعالجة المتبعة أدت إلى خفض الشحنة الملوثة بشكل واضح جداً عند المخرج النهائي؛ حيث سجلت المؤشرات البيولوجية والهيدروكربونات قيماً منخفضة ومطابقة تماماً للمواصفات القانونية (المرسوم التنفيذي 141-06)، مما يثبت الفعالية العالية للمحطة في إزالة التلوث العضوي. ورغم رصد بعض التقلبات الموسمية والتجاوزات المحدودة في تركيز الكلوريدات والحرارة نتيجة لظروف التشغيل والصيانة، إلا أن الأداء العام ظل مستقراً. وفي الختام، نستخلص أن طرق المعالجة المستعملة في الوحدة تضمن طرح مياه مصفاة آمنة في الوسط البحري دون أي تأثيرات بيئية سلبية، مع التوصية بإدراج قياسات المواد العالقة (MES) والنيتروجين مستقبلاً لضمان رقابة شاملة.

الكلمات المفتاحية: معالجة المياه المستعملة، مصفاة النفط بسكيدة، النفايات الصناعية السائلة، تقييم الأداء، DCO، DBO_5 ، الهيدروكربونات الكلية، المرسوم التنفيذي 141-06، الوسط البحري.

Abstract

The objective of this study is to evaluate the efficiency of the wastewater treatment system at the new Skikda Oil Refinery (RA1K/SONATRACH). This evaluation was conducted by analyzing the daily variations of various physicochemical parameters (including pH, temperature, electrical conductivity, hardness, chlorides, phosphates, COD, BOD₅, and total hydrocarbons) and comparing them with Algerian regulatory standards for industrial liquid effluents.

The analytical results demonstrate a significant decrease in the pollutant load at the plant's outlet. Biological parameters and total hydrocarbons showed high compliance with Executive Decree 06-141, proving the plant's high efficiency in removing organic pollution. Despite some seasonal increases in COD and certain exceedances in chlorides and temperature due to operational and maintenance conditions, the overall plant performance remained stable. In conclusion, the treatment methods deployed by the unit are highly effective, ensuring the discharge of safe, purified effluent into the marine environment with no adverse ecological impacts, while recommending the future inclusion of TSS and nitrogen monitoring.

Keywords: Wastewater treatment, Skikda Oil Refinery, Industrial effluents, Plant performance, COD, BOD₅, Total hydrocarbons, Executive Decree 06-141, Marine environment.

Liste des Abréviations

STEP	Station d'Épuration des Eaux industrielles
STEU	Station de Traitement des Eaux Usées
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DBO₅	Demande Biochimique en Oxygène (sur 5 jours)
MES	Matières En Suspension
TPH	Total Petroleum Hydrocarbons (Hydrocarbures Totaux)
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
COT	Carbone Organique Total
pH	Potentiel Hydrogène
MBR	Bioréacteur à Membranes (Membrane Bioreactor)
DAF	Flottation à Air Dissous (Dissolved Air Flotation)
IAF	Flottation à Air Induit (Induced Air Flotation)
CPI	Séparateur à Plaques Inclénées (Corrugated Plate Interceptor)
API	Séparateur Américain Pétrole-Eau (American Petroleum Institute)
POA	Procédés d'Oxydation Avancée
UV	Ultraviolet
ICP-MS	Spectrométrie de Masse à Plasma Inductif
SAA	Spectrométrie d'Absorption Atomique
HPLC	Chromatographie Liquide Haute Performance
QA/QC	Assurance Qualité / Contrôle Qualité
NF EN	Norme Française Européenne
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
APHA	American Public Health Association
RA1K	Raffinerie d'Alger – Skikda (unité de raffinage du complexe de Skikda)
GP1K	Complexe GPL de Skikda
CP1K/CP2K	Complexes Pétrochimiques de Skikda (unités 1 et 2)
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
HSE	Hygiène, Sécurité et Environnement
EIE	Étude d'Impact Environnemental
R (%)	Rendement d'épuration (%)

Liste des tableaux

Chapitre 2 : PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

Tableau 2. 1 : Bilan des capacités de production (RA1K).....	3
--	---

Chapitre 3 :MATÉRIELS ET MÉTHODES

Tableau 3. 1 : Synthèse des débits de conception de l'unité ETP II	3
--	---

Chapitre 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau 4. 1 : Statistiques descriptives des paramètres physicochimiques (Nov. 2025 – Jan. 2026)	50
Tableau 4. 2 : Évolution mensuelle des paramètres physicochimiques	51
Tableau 4. 3 : Coefficients de corrélation de Pearson pour les indicateurs de pollution	55
Tableau 4. 4 : Statistiques mensuelles de la DCO mesurée à la station d'épuration de RA1K (mg O ₂ /L).....	57
Tableau 4. 5 : Statistiques mensuelles de la DBO ₅ mesurée à la station d'épuration de RA1K (mg O ₂ /L).....	58
Tableau 4. 6 : Analyse de la conformité aux normes de rejet	60
Tableau 4. 7 : Statistiques descriptives des paramètres physicochimiques — Période 2 (Fév.–Mar. 2026, n=42).....	61
Tableau 4. 8 : Évolution mensuelle des paramètres physicochimiques (Moy ± Écart-type).....	62
Tableau 4. 9 : Conformité des effluents traités aux normes algériennes de rejet (Fév.–Mar. 2026)	66
Tableau 4. 10 : Statistiques descriptives globales sur 5 mois (n=105).....	67
Tableau 4. 11 : Évolution des moyennes mensuelles sur 5 mois de suivi	68
Tableau 4. 12 : Évolution des moyennes mensuelles pour DCO, H/C, PO ₄ et Conductivité (Nov. 2025 – Mar. 2026)	70
Tableau 4. 13 : Comparaison des moyennes Période 1 (Nov.–Jan.) Période 2 (Fév.–Mar.)	71

Table des figures

Chapitre 1 : REVUE DE LITTÉRATURE

Figure 1. 1 : schéma de fonctionnement d'une station d'épuration des eaux usées	1
Figure 1. 2 : Séparateurs huile -eau API	1
Figure 1. 3 : Intercepteur CPI	1
Figure 1. 4 : Flottateur à air dissous	1
Figure 1. 5 : Traitement et valorisation des boues de station d'épuration	2

Chapitre 2 : PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

Figure 2. 1: Logo officiel de Sonatrach.....	2
Figure 2. 2 : organigramme de Sonatrach.....	2
Figure 2. 3 : Complexe industriel d'Exploration & Production	2
Figure 2. 4 : Supervision technique du réseau de transport par canalisations	2
Figure 2. 5 : Unité industrielle de liquéfaction et de séparation des hydrocarbures	2
Figure 2. 6 : Supervision des opérations au sein d'un complexe de raffinage et de pétrochimie .	2
Figure 2. 7 : Transport maritime de GNL	2
Figure 2. 8 : La raffinerie de Skikda.....	2
Figure 2. 9 : Position géographique de la raffinerie de Skikda	2
Figure 2. 10 : Schéma des principales installations de la raffinerie	3
Figure 2. 11 : Organigramme général de la Raffinerie de Skikda	3

Chapitre 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES

Figure 3. 1 : Schéma synoptique globale du procédé de traitement.....	3
Figure 3. 2 : Le déshuileur CPI (Corrugated Plate Interceptor).....	3
Figure 3. 3 : Bassin de Coagulation et Flocculation	3
Figure 3. 4 : Flottation à Air Dissous (DAF)	3
Figure 3. 5 : Filtre à sable	3
Figure 3. 6 : Mesuré pH conductivité et température	4
Figure 3. 7 : Acide EDTA et solution tampon.....	4
Figure 3. 8 : coloration finale.....	4
Figure 3. 9 : réactifs chimiques et spectromètre	4

Chapitre 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Figure 4. 1 : Évolution temporelle du pH et de la température des effluents (Nov. 2025 – Jan. 2026).....	5
Figure 4. 2 : Évolution temporelle de la conductivité électrique et de la dureté totale (TH)	5
Figure 4. 3 : Évolution temporelle de la DCO et des hydrocarbures totaux (H/C)	5
Figure 4. 4 : Évolution temporelle des phosphates (PO_4^{3-}) et des chlorures (Cl^-)	5
Figure 4. 5 : Évolution mensuelle de la DCO : Moyenne, Minimum et Maximum ($\text{mg O}_2 / \text{L}$) ...	5
Figure 4. 6 : Évolution mensuelle de la DBO_5 : Moyenne, Minimum et Maximum ($\text{mg O}_2 / \text{L}$)	5
Figure 4. 7 : Évolution temporelle du pH et de la température (Fév.–Mar. 2026).....	6
Figure 4. 8 : Évolution temporelle de la conductivité électrique et de la dureté totale (TH)	6
Figure 4. 9 : Évolution temporelle de la DCO et des hydrocarbures totaux (H/C)	6
Figure 4. 10 : Évolution temporelle des phosphates (PO_4^{3-}) et des chlorures (Cl^-)	6

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des Abréviations	
Liste des tableaux	
Table des figures	
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : REVUE DE LITTÉRATURE	
Introduction	4
1.1 Les eaux usées industrielles dans le secteur pétrolier et gazier	4
1.1.1 Définition et classification.....	4
1.1.2Caractéristiques physico-chimiques et biologiques des eaux industrielles	4
1.1.3Sources de pollution au niveau des complexes pétrochimiques	7
1.2 Cadre réglementaire et normes environnementales.....	8
1.2.1 Réglementation algérienne	8
1.2.2 Standards internationaux	9
1.3Technologies de traitement des eaux usées industrielles	11
1.3.1Le prétraitement.....	12
1.3.2 Traitement Primaire.....	14
1.3.3Traitement biologique	16
1.3.4 Traitement tertiaire	16
1.3.5 Traitement des boues.....	18
Conclusion.....	20
Chapitre 2 : PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL	
Introduction	22
2.1 Groupe Sonatrach	22
2.1.1 Historique et missions	23
2.1.2 Organisation et activités	23
2.1.3 Politique environnementale du groupe.....	26
2.2 Complexe de Skikda.....	27
2.2.1 Localisation géographique.....	27
2.2.2 Historique et développement.....	28
2.2.3 Unités de production	29

2.2.5 Organisation administrative et technique.....	31
2.3 Objectifs environnementaux	33
2.4 Gestion globale de l'eau au complexe	33
2.4.1 Sources d'approvisionnement en eau	34
2.4.2 Réseau de distribution d'eau industrielle.....	34
2.4.3 Consommation d'eau par unité	34
3.1 Description détaillée de la station d'épuration (ETP II)	34
3.1.1 Capacité et dimensionnement	34
3.2 Filière de traitement.....	36
3.3 Description des chaque unités de traitement	36
3.3.2 Coagulation et Flocculation.....	37
3.3 4. Moving Bed Biofilm Reactor	38
CHAPITRE 3 :MATÉRIELS ET MÉTHODES	
Introduction	41
3.1. Échantillonnage	41
3.1.1 Points de prélèvement	41
3.1.2 Fréquence d'échantillonnage	41
3.2 Protocoles et prélèvement	41
3.2.1 Matériel d'échantillonnage	41
3.2.2 Protocoles opératoires de prélèvement.....	42
3.2.3 Conditionnement et identification des échantillons	42
3 Paramètres analytiques et méthodes d'analyse	43
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISSCUSSIONS	
Introduction	49
SECTION 1 (PÉRIODE 1) : NOVEMBRE 2025 – JANVIER 2026	49
4.1 Caractérisation des effluents	49
4.1.1 Caractérisation Effluents traités.....	Erreur ! Signet non défini.
4.2 Identification des pics de pollution	56
4.2.1 DCO – Demande Chimique en Oxygène	56
4.2.2 DBO ₅ – Demande Biologique en Oxygène.....	58
4.2.3 MES – Matières en Suspension	59
4.2.4 Azote et Phosphore	59
4.2.5 Autres paramètres	59
4.3 Conformité aux normes de rejet	60
SECTION 2 (PÉRIODE 2) : FÉVRIER 2026 – MARS 2026.....	61
1.Caractérisation des effluents	61

1.1 Statistiques descriptives — Février et Mars 2026	61
1.2 Statistiques descriptives mensuelles	62
1.3 Variations temporelles.....	63
Section 3 : ANALYSE COMPARATIVE GLOBALE : 5 MOIS DE SUIVI	67
1. Statistiques descriptives globales	67
2. Comparaison mensuelle sur 5 mois	68
3. Comparaison Période 1 vs Période 2	70
Conclusion Générale	72
Bibliographie.....	72

A dark blue horizontal scroll graphic with rounded ends and a slight 3D effect, featuring a lighter blue shadow on the right side. The text is centered on the scroll.

Introduction Générale

Introduction générale

L'Algérie figure parmi les principaux producteurs et exportateurs d'hydrocarbures du continent africain. Le groupe Sonatrach, acteur central de ce secteur, exploite un réseau de complexes de raffinage, de liquéfaction et de pétrochimie à l'échelle nationale. Le complexe industriel de Skikda occupe une position stratégique au sein de cet ensemble, en regroupant sur un même site une raffinerie (RA1K), des unités de gaz de pétrole liquéfié (GP1K), des installations pétrochimiques (CP1K, CP2K) et un terminal maritime d'exportation.

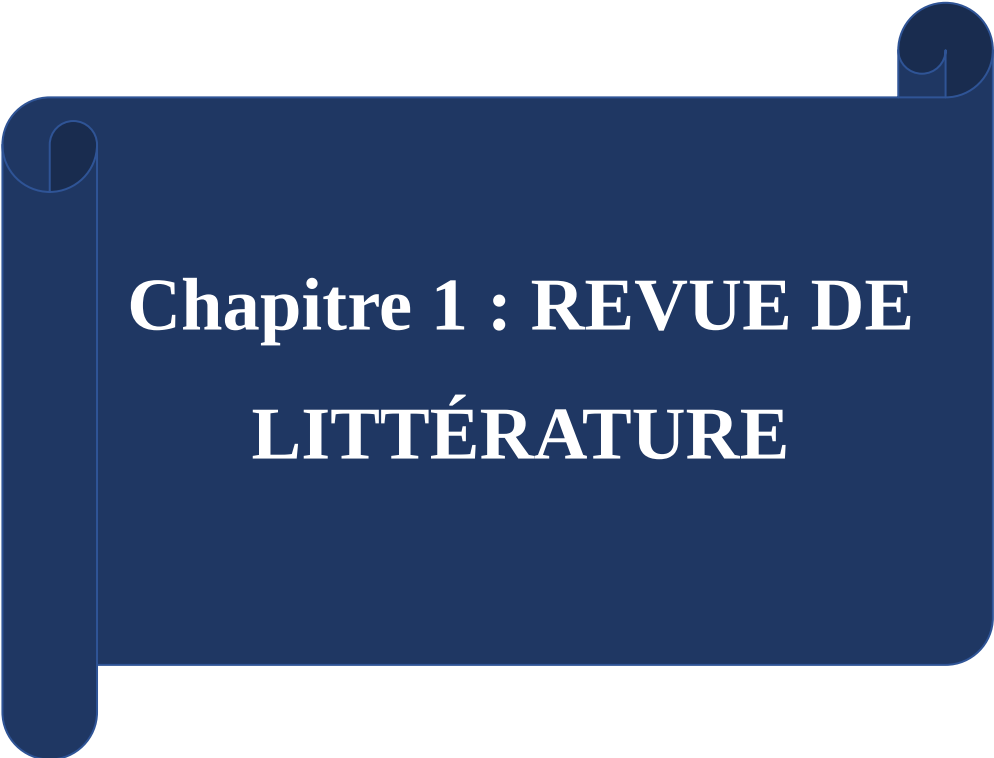
Dans le contexte actuel de transition énergétique et de sensibilisation environnementale croissante, l'industrie pétrolière est amenée à repenser la gestion de ses ressources, en particulier l'eau. Les activités de raffinage produisent d'importants volumes d'effluents liquides, dont la composition physico-chimique complexe représente un risque potentiel pour les écosystèmes récepteurs et les ressources hydriques locales.

Les stations d'épuration industrielles (STEP) constituent l'interface indispensable entre les rejets de production et le milieu naturel. Leur efficacité conditionne directement le respect des normes réglementaires algériennes, notamment celles fixées par le décret exécutif n° 06-141 relatif aux valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. L'exploitation d'une STEP intégrée dans un complexe de raffinage est particulièrement exigeante en raison de la variabilité de la charge polluante, de l'influence des conditions météorologiques et de la nécessité d'un suivi analytique rigoureux.

Malgré l'existence d'infrastructures de traitement au sein du complexe de Skikda, les questions relatives à leur performance réelle, à leur conformité réglementaire et aux possibilités d'optimisation demeurent des enjeux opérationnels et environnementaux majeurs. C'est ce constat qui constitue le point de départ de la présente étude, conduite dans le cadre d'un stage à la raffinerie RA1K.

L'objectif général est d'évaluer la performance du système de traitement des eaux usées industrielles de la raffinerie RA1K, à partir d'un suivi analytique couvrant la période de novembre 2025 à janvier 2026. De manière spécifique, l'étude vise à : caractériser les effluents bruts à l'entrée de la station ; évaluer les rendements d'épuration des principaux indicateurs de pollution (DCO, DBO₅, pH, conductivité, chlorures) ; vérifier la conformité des effluents traités aux normes algériennes en vigueur ; identifier les dysfonctionnements et les épisodes de dépassement des valeurs limites ; et formuler des recommandations pratiques pour améliorer les performances épuratoires et le suivi analytique.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres complémentaires. Le premier propose une revue de littérature sur les eaux usées industrielles dans le secteur pétrolier, les cadres réglementaires et les technologies de traitement disponibles. Le deuxième présente l'organisme d'accueil, le groupe Sonatrach et le complexe de Skikda. Le troisième détaille le matériel et les méthodes utilisés : filière de traitement de la STEP, protocoles d'échantillonnage et méthodes analytiques normalisées. Enfin, Le quatrième chapitre expose et discute les résultats obtenus, de la caractérisation des effluents bruts à l'analyse de la conformité réglementaire, tout en présentant les différents axes d'optimisation et les solutions proposées.



Chapitre 1 : REVUE DE LITTÉRATURE

Introduction

Ce premier chapitre constitue le socle théorique de notre étude. Il a pour objectif de définir les différentes catégories d'effluents générés par l'industrie pétrochimique et d'identifier leurs caractéristiques physico-chimiques. Nous y détaillerons également le cadre réglementaire algérien et international, avant de passer en revue les technologies de traitement actuelles, allant du prétraitement jusqu'aux procédés tertiaires les plus avancés.

1.1 Les eaux usées industrielles dans le secteur pétrolier et gazier

1.1.1 Définition et classification

1.1.1.1 Les eaux de process

Les eaux des procédés désignent l'eau utilisée dans les divers processus industriels, notamment dans la fabrication de produits, la génération d'énergie, ainsi que pour la condensation de vapeurs, nettoyage et l'entretien des équipements. Elle provient de plusieurs sources comme les nappes souterraines de surface et de mer (**Houria,2018**).

1.1.1.2 Les eaux de refroidissement

Elles jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels. Elles sont notamment utilisées dans les secteurs chimiques et pétrochimiques pour condenser les distillats, refroidir les compresseurs et gérer le refroidissement des produits issus de réactions exothermiques (**Latrech,2024**).

1.1.1.3 Les eaux huileuses :

Ce sont des eaux contaminées par des hydrocarbures provenant des opérations d'extraction, de raffinage et de transport des produits pétroliers. Ces rejets industriels, se composent d'un mélange d'eau, de pétrole brut, d'huiles, de graisses et de matières solides en suspension (MES) (**Lahrech et .Meddour,2020**)

1.1.2Caractéristiques physico-chimiques et biologiques des eaux industrielles

1.1.2.1 Paramètres physico chimiques

- **La température :**

La température constitue un facteur écologique crucial pour les milieux aquatiques. Elle est influencée à la fois par les variations saisonnières et journalières de la température

ambiante, ainsi que par les rejets issus des activités humaines, comme les eaux de refroidissement.

Une perturbation de la température peut avoir des conséquences sur la vie aquatique, notamment à travers la pollution thermique. De plus, la température joue un rôle clé dans les processus bactériens tels que la nitrification et la dénitrification. La nitrification est optimale lorsque les températures se situent entre 28 et 32 °C, tandis qu'elle est considérablement réduite lorsque les températures varient entre 12 et 15 °C. Des températures inférieures à 5 °C sont également peu favorables à ce processus **(Alisawi,2020)**.

- **Les matières en suspension (MES) :**

La détermination de la concentration en matières en suspension (MES) dans les eaux usées est un paramètre fondamental. Les MES servent d'indicateur clé de la charge polluante des eaux usées, car leur niveau de concentration témoigne de la présence de particules solides non dissoutes, souvent liées à des polluants organiques ou inorganiques **(Fromant,2015)**.

- **La demande chimique en oxygène (DCO)**

Ce paramètre permet d'évaluer la charge polluante d'une eau usée en matières organiques au travers de la mesure de la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique et minérale. Selon le décret exécutif 06-141, pour le secteur du raffinage, la valeur limite autorisée est fixée à 100 g/t de produit traité **(Baba et Djelouah,2017)**.

- **La Turbidité :**

La turbidité des eaux usées, causée par la présence de particules en suspension, notamment des colloïdes, des argiles, des limons et des matières organiques, est une mesure optique de la clarté de l'eau **(Decamps et Casanova-Batut,1978)**.

- **Le pH :**

Le pH est un potentiel hydrogène représente l'évaluation de la mesure de l'acidité ou de l'alcalinité en chimie d'une solution ou d'un milieu **(Dekkar et Darani,2017)**. Il se mesure sur une échelle logarithmique de 0 à 14 unités. Une eau « neutre » a un pH de 7 unités, une eau 'acide ' a un pH inférieur à 7 et une eau 'alcaline ' a un pH supérieur à 7.**(Kennely et Rodwell,2017)** .

- **La teneur en hydrocarbures :**

Les hydrocarbures, issus des rejets domestiques et industriels, forment un film de surface qui bloque les échanges gazeux et asphyxie les écosystèmes aquatiques. Leur traitement nécessite des procédés physiques et biochimiques complexes. Par ailleurs, leur dosage dans les eaux résiduaires industrielles est souvent imprécise raison des difficultés d'échantillonnage et de la variabilité des résultats selon la méthode d'analyse employée (Dekkar et Darani,2017).

- **Les métaux lourds :**

Couramment présents dans les eaux usées, les métaux lourds proviennent principalement des activités industrielles et domestiques. On y retrouve notamment le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le nickel (Ni) et l'arsenic (As). Ces éléments persistent et s'accumulent dans l'environnement, ce qui pose des risques sanitaires majeurs.

- **Plomb (Pb)** : Issu de la plomberie, de la métallurgie et des batteries.
- **Mercure (Hg)** : Provient des incinérateurs, de l'industrie du chlore et du charbon.
- **Cadmium (Cd)** : Utilisé dans les batteries, la galvanoplastie et les engrais.
- **Chrome (Cr)** : Présent dans la tannerie, la métallurgie et les pigments.
- **Cuivre (Cu)** : Issu de la corrosion des tuyaux, des algicides et des industries.
- **Zinc (Zn)** : Provient de la galvanisation, de l'industrie et des eaux usées domestiques.
- **Nickel (Ni)** : Utilisé dans le placage métallique et les batteries.
- **Arsenic (As)** : Issu de l'industrie minière, du verre et des pesticides.
- **Autres** : Cobalt (Co), Manganèse (Mn), Vanadium (V), Argent (Ag).

Ces métaux, souvent invisibles et inodores, sont fortement toxiques, même à faible concentration, pour la santé et l'écosystème(Ngram,2011).

1.1.2.2 Paramètres biologiques

L'évaluation de la charge biologique est déterminante pour juger de l'efficacité des processus d'autoépuration et de traitement des effluents :

-
- **Demande Biochimique en Oxygène (DBO5)** : Elle mesure la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour dégrader la matière organique biodégradable sur une période de 5 jours.
 - **Rapport de biodégradabilité (DBO5/DCO)** : Ce ratio est un indicateur de l'aptitude de l'eau à être traitée biologiquement ; un rapport supérieur à **0,4** indique une biodégradabilité satisfaisante.
 - **Biomasse épuratrice** : l'épuration repose sur l'activité de micro-organismes (bactéries, protozoaires, champignons) dont l'équilibre est fragile. Un excès de bactéries filamenteuses peut notamment entraîner des phénomènes de moussage.
 - **Indicateurs de contamination** : La recherche de germes fécaux (coliformes et streptocoques) permet de détecter la présence de micro-organismes pathogènes.
 - **Oxygène dissous** : Sa présence est indispensable au métabolisme des bactéries aérobies responsables de la minéralisation de la pollution (**Tabet,2014**).

1.1.3 Sources de pollution au niveau des complexes pétrochimiques

1.1.3.1 Raffinage du pétrole

Le raffinage transforme le pétrole brut en carburants et bitumes via des procédés comme la distillation et le craquage. En raison de ses opérations à haute température, ce secteur pétrochimique figure parmi les plus gros émetteurs industriels de CO₂, générant une pollution importante en gaz à effet de serre (GES), soufre et composés organiques volatils (COV) (**Baba Ahmed,2021**).

1.1.3.2 Production pétrochimique

La pétrochimie convertit les hydrocarbures en intermédiaires chimiques (oléfines, aromatiques), qui servent de base à la fabrication des plastiques et des engrais. Ce secteur constitue une source majeure de pollution industrielle : ses procédés libèrent des gaz à effet de serre (GES), des composés organiques volatils (COV) comme le benzène et le toluène, ainsi que du SO₂ et des particules fines, impactant directement la qualité de l'air(**Baba Ahmed,2021**).

1.1.3.3 Le stockage et la manutention

Les complexes pétrochimiques constituent des sources majeures de pollution chronique et accidentelle.

Ils se caractérisent par le stockage de matières dangereuses (hydrocarbures, produits chimiques), qui génèrent des émissions de COV (composés organiques volatils) par évaporation, des fuites lors du transfert (chargement/déchargement), ainsi que des risques de déversement accidentel (rupture de bacs, débordement) **(Baba Ahmed,2021)**.

Stockage : l'entreposage de produits pétroliers, souvent en grands volumes, entraîne des fuites de composés organiques volatils dans l'air, notamment lors des "respirations" des réservoirs (variations de température). Les fuites au niveau des joints ou la corrosion des bacs provoquent des contaminations des sols et des eaux souterraines **(Baba Ahmed,2021)**.

Manutention : La manipulation des produits (pompage, chargement/déchargement de camions, wagons ou pipelines) est une phase critique. Les fausses manœuvres, la rupture de flexibles ou les erreurs de connexion provoquent des déversements de produits toxiques ou inflammables. Ces opérations peuvent également être à l'origine d'émissions fugitives importantes (vapeurs)**(Baba Ahmed,2021)**.

1.1.3.4 La maintenance et le nettoyage

Les opérations de maintenance en milieu pétrochimique garantissent la sécurité opérationnelle et la conformité environnementale. Ces interventions mobilisent des procédés lourds tels que le nettoyage Très Haute Pression (THP), le pompage de produits dangereux et le décapage de cuves. En complément, le lavage chimique et les ultrasons permettent un détartrage et un dégraissage précis des échangeurs et des fours, optimisant ainsi le rendement thermique et limitant les arrêts de production **(Baba Ahmed,2021)**.

1.2 Cadre réglementaire et normes environnementales

1.2.1 Réglementation algérienne

- A. **Loi 03-10 relative à la protection de l'environnement** : Promulguée le 19 juillet 2003, cette loi constitue le texte législatif de base en Algérie. Elle fixe les règles de protection, de préservation et de valorisation de l'environnement dans le cadre du développement durable. Elle impose aux activités industrielles de prévenir toute forme de pollution atmosphérique, thermique ou hydrique.

-
- B. Décret exécutif 06-141 sur les rejets liquides :** Ce décret, daté du 19 avril 2006, définit les conditions de déversement des effluents liquides industriels. Il stipule que tout rejet doit être traité avant d'être évacué et interdit le déversement de substances pouvant altérer la santé publique ou l'équilibre biologique. Il oblige l'exploitant à assurer un autocontrôle permanent de ses rejets.
- C. Normes de rejets industriels :** Les installations doivent être conçues pour que les effluents ne dépassent pas les valeurs limites à leur point de sortie. Le décret accorde aux installations pétrolières existantes un délai de 7 ans pour se conformer aux nouvelles normes, avec l'application de valeurs de "tolérance" durant cette phase de transition.
- D. Valeurs limites des paramètres :** Pour le secteur du raffinage de pétrole (Annexe I), les valeurs maximales autorisées sont les suivantes :
- **pH :** Entre 6,5 et 8,5.
 - **Température :** 30°C (35°C avec tolérance).
 - **Demande Chimique en Oxygène (DCO) :** 100 g/t de produit.
 - **Demande Biologique en Oxygène (DBO5) :** 25 g/t de produit.
 - **Matières en Suspension (MES) :** 30 g/t de produit.
 - **Hydrocarbures totaux :** 15 mg/l (Tolérance : 20 mg/l).
 - **Phénols :** 0,25 g/t de produit (**Décret exécutif n°06-141,2006**).

1.2.2 Standards internationaux

1.2.2.1. Normes ISO 14001

L'adoption de la norme internationale ISO 14001 par Sonatrach témoigne d'un engagement volontaire vers une gestion environnementale structurée. Contrairement aux textes réglementaires qui imposent des limites de rejets fixes, cette norme définit une méthodologie de gestion appelée Système de Management Environnemental (SME).

Selon l'étude de Mahdjoubi et al. [2] sur Sonatrach, ce système repose sur le principe de l'amélioration continue, matérialisé par le cycle PDCA (Planifier-Faire-Vérifier-Agir) :

-
- **Planifier (Plan)** : Le complexe identifie ses "Aspects Environnementaux Significatifs" (AES), comme les rejets d'effluents huileux, et fixe des objectifs précis pour réduire leur impact sur l'écosystème.
 - **Faire (Do)** : Cette étape concerne la mise en œuvre technique, notamment l'exploitation des unités de déshuilage et le traitement des eaux de process avant leur évacuation.
 - **Vérifier (Check)** : Sonatrach procède à une surveillance rigoureuse et à des analyses régulières pour s'assurer que les rejets sont conformes aux exigences du Décret exécutif 06-141.
 - **Agir (Act)** : En cas d'anomalie ou de dépassement des seuils, des mesures correctives sont immédiatement prises pour optimiser les performances de la station de traitement.

L'intégration de l'iso 14001 permet au complexe de Skikda non seulement de garantir sa conformité légale, mais aussi de réduire les coûts liés aux taxes de pollution et de renforcer sa réputation à l'échelle internationale (**Organisation internationale de normalisation, 2015**).

1.2.2.2. Directives de la Banque Mondiale (SFI/IFC)

Le Groupe de la Banque Mondiale, à travers la Société Financière Internationale (SFI), publie des directives environnementales, sanitaires et sécuritaires (EHS) qui servent de référence internationale. Pour le secteur du raffinage, ces normes sont souvent plus exigeantes que les réglementations nationales.

Selon le document de la SFI sur le raffinage du pétrole, les valeurs limites de rejet pour les effluents liquides sont les suivantes :

- **Hydrocarbures totaux : 10 mg/l** (alors que le décret algérien autorise 15 mg/l).
- **Phénols** : 0,5 mg/l.
- **Sulfures** : 1 mg/l.
- **pH**: 6 – 9.
- **Augmentation de la température** : < 3 °C par rapport au milieu récepteur.

Le respect de ces seuils est essentiel pour les entreprises pétrolières souhaitant garantir une performance environnementale de niveau mondial (**Société financière internationale, 2015**).

1.2.2.3. Meilleures pratiques internationales (BAT)

Selon les directives de la SFI (Groupe de la Banque Mondiale) présentes dans le document technique sur le raffinage, les meilleures pratiques internationales pour le traitement des effluents reposent sur une hiérarchie de traitement rigoureuse. Ces techniques (souvent appelées BAT pour Best Available Techniques) comprennent :

- A. La Séparation à la source :** Il est recommandé de séparer les réseaux d'égouts (eaux pluviales, eaux de procédés huileuses et eaux sanitaires) pour ne pas saturer la station de traitement.
- B. Le Prétraitement (Séparation primaire) :** Utilisation systématique de séparateurs API (American Petroleum Institute) ou de réservoirs à plaques ondulées pour récupérer les huiles libres et les solides lourds par simple gravité.
- C. Le Traitement primaire (Séparation avancée) :** Recours à la Flottation à Air Dissous (DAF). Cette technique est citée comme la meilleure pratique pour éliminer les huiles émulsionnées et les matières en suspension que la gravité seule ne peut pas séparer.

Le Traitement biologique (Traitement secondaire) : Pour les raffineries complexes, l'utilisation de systèmes à boues activées ou de filtres biologiques est préconisée afin de réduire la charge organique (DCO et DBO5) avant le rejet final dans le milieu récepteur (Société financière internationale, 2015).

1.3 Technologies de traitement des eaux usées industrielles



Figure1. 1: schéma de fonctionnement d'une station d'épuration des eaux usées

1.3.1 Le prétraitement

1.3.1.1 Dégrillage

Le dégrillage est la première barrière physique d'une station de traitement. Son objectif principal est de protéger l'installation contre les dommages mécaniques et les obstructions en interceptant les solides volumineux (bois, plastiques, textiles).

L'efficacité du système dépend de l'écartement (entrefer) des barreaux, choisi selon la nature des rejets :

- **Dégrillage grossier (50 à 150 mm) :** Capture les débris volumineux pour éviter les casses majeures.
- **Dégrillage moyen (10 à 40 mm) :** Élimine la majorité des déchets solides courants.
- **Dégrillage fin ou tamisage (0,5 à 10 mm) :** Retient les particules fines, optimisant ainsi les étapes biologiques suivantes (Maouche,2017).

1.3.1.2 Dessablage

Le dessablage constitue une étape fondamentale du prétraitement, dédiée à l'extraction des particules minérales denses (sables, graviers) d'une taille supérieure à **200 µm**. Par un processus de **décantation gravitaire**, cette opération protège les installations contre l'usure abrasive et prévient l'accumulation de sédiments dans les bassins biologiques. Pour une efficacité optimale, le dessablage est fréquemment combiné au déshuilage au sein d'un même ouvrage(Maouche,2017).

1.3.1.3 Le Déshuilage

Le déshuilage est une étape de séparation physico-chimique indispensable dans l'industrie pétrolière. Son rôle est d'extraire les hydrocarbures, les graisses et les huiles (dont la densité est inférieure à 1) afin de conformer les effluents aux normes de rejet et de protéger les unités de traitement biologique situées en aval(Maouche,2017).

L'efficacité du système repose sur la combinaison de plusieurs procédés complémentaires :

- A. Le Séparateur API (American Petroleum Institute) :** Utilisé en tête de traitement, il permet une séparation gravitaire naturelle. Il intercepte les huiles libres et laisse décanter les boues lourdes au fond du bassin(Kahlalech et Taibi,2023).



Figure1. 2 : Séparateurs huile -eau API

B. Séparateur CPI (Corrugated Plate Interceptor) : Ce dispositif utilise des plaques inclinées pour forcer les fines gouttelettes d'huile à se percuter et à fusionner (coalescence). Cela accélère leur remontée en surface et réduit considérablement l'encombrement des installations(Kahlalech et Taibi,2023).



Figure1. 3 : Intercepteur CPI

C- La Neutralisation : Contrôle et Ajustement du ph

La neutralisation est une opération physico-chimique critique visant à stabiliser le ph des effluents industriels, idéalement entre 6,5 et 8,5. Cette étape est indispensable pour protéger les infrastructures contre la corrosion et garantir la viabilité des traitements biologiques en aval.

1. Traitement des effluents acides

- **Réactifs alcalins :** Utilisation de la chaux (Ca(OH)_2) pour son faible coût, ou de la soude (naoh) pour sa grande réactivité et sa facilité d'automatisation.

-
- **Voie minérale** : Filtration sur matériaux calcaires (marbre ou dolomie) pour les acidités modérées.

2. Traitement des effluents basiques (Abaissement du pH) :

- **Acides forts** : Injection d'acide sulfurique (H_2SO_4) ou chlorhydrique (hcl) pour une correction rapide.
- **Injection de CO_2** : Méthode de plus en plus utilisée en pétrochimie. Le dioxyde de carbone réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique, offrant une régulation précise et sécurisée sans risque de sur-acidification(Maouche,2017).

1.3.2 Traitement Primaire

1.3.2.1. La Décantation Primaire

La décantation physique constitue une étape de traitement primaire fondamentale. Elle repose exclusivement sur la différence de densité entre les polluants et l'eau, permettant une séparation solide-liquide et liquide-liquide sans recours aux additifs chimiques.

Dans les raffineries de pétrole «cette opération s'effectue généralement via des séparateurs gravimétriques conçus selon la norme API (American Petroleum Institute).

Le but est d'éliminer les hydrocarbures libres dont le diamètre des gouttelettes est supérieur à 150 μm «afin d'éviter qu'ils ne gênent l'efficacité des traitements biologiques qui interviennent ensuite (Maouche,2017).

1.3.2.1.1 La flottation par air dissous (DAF)

Constitue un procédé de séparation physique essentiel pour le traitement des eaux usées industrielles, exploitant la différence de masse volumique entre la phase aqueuse et les polluants légers.

En conditions de repos, les gouttelettes d'huile migrent naturellement vers la surface, un phénomène accéléré par l'injection de microbulles d'air à la base de l'unité qui entraînent les particules vers le haut pour un écrémage efficace.

Bien que performante, cette technologie requiert des ouvrages de dimensions importantes pour traiter des débits industriels élevés, imposant ainsi une emprise au sol considérable.

En outre, son efficacité est limitée face à des émulsions stables (huiles dispersées) ; dans ces configurations complexes, l'ajout préalable de réactifs chimiques (dés émulsifiants ou coagulants) devient impératif pour rompre l'équilibre de l'émulsion et garantir une épuration optimale des effluents pétrochimiques (Stiti,2020).



Figure1. 4 : Flottateur à air dissous

1.3.2.1.2 La flottation à air induit (FAI)

Constitue un procédé de séparation physique performant pour le traitement des effluents industriels, particulièrement adapté à l'élimination des matières en suspension (MES), des corps gras et des colloïdes. Contrairement à la flottation par air dissous, elle génère des microbulles par induction mécanique ou hydraulique qui, en s'agrégeant aux particules polluantes, provoquent leur ascension rapide vers la surface. La couche de mousse ainsi formée, concentrant les impuretés, est ensuite évacuée par un système de racleur superficiel (Stiti,2020).

1.3.2.2 La coagulation

La coagulation constitue une étape physico-chimique fondamentale du traitement des effluents industriels, visant la destabilisation des particules colloïdales chargées négativement qui maintiennent la turbidité de l'eau. Par l'introduction de réactifs coagulants (principalement des sels inorganiques comme le chlorure ferrique (FeCl_3) ou le sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) les forces de répulsion électrique sont neutralisées, permettant l'amorce de l'agglomération des matières en suspension et de certains polluants dissous (métaux, fractions organiques). Ce processus requiert impérativement un mélange rapide et intense pour assurer une dispersion homogène du réactif, créant ainsi des micro-flocs. Cette phase de transition est le préalable indispensable à la floculation et à la séparation finale par décantation ou flottation,

garantissant l'élimination efficace de la charge polluante résiduelle souvent complexe dans le secteur pétrochimique(Stiti,2020).

1.3.2.3 La floculation

La floculation constitue l'étape physico-chimique de maturation faisant suite à la coagulation, dont l'objectif est l'agglomération des micro-flocs déstabilisés en structures macroscopiques plus volumineuses et denses. Par l'introduction de polymères de synthèse (poly électrolytes) agissant comme des agents de pontage, le processus accélère la formation de "flocs" résistants aux contraintes hydrauliques. Cette phase requiert impérativement une agitation lente et contrôlée afin de favoriser les collisions entre particules tout en évitant leur rupture mécanique. En optimisant ainsi la cinétique de sédimentation ou de flottation, la floculation garantit une élimination rigoureuse des matières en suspension (MES), des métaux lourds et des résidus organiques complexes, assurant une clarification haute performance des effluents industriels avant leur rejet ou leur traitement final (Stiti,2020).

1.3.3 Traitement biologique

Le traitement biologique repose sur l'exploitation industrielle des processus naturels d'autoépuration au sein de réacteurs contrôlés. Ce procédé consiste à mettre la charge organique biodégradable des effluents en contact avec une biomasse bactérienne spécifique, dont le métabolisme assure la dégradation des polluants dissous. La conception de ces systèmes tient compte du rapport $K = DCO/DBO5$ qui caractérise la pollution organique.

Par des mécanismes d'oxydation ou de fermentation, les micro-organismes transforment ainsi la pollution carbonée et azotée en biomasse solide (boues biologiques) et en sous-produits gazeux. Cette étape est fondamentale pour réduire la DBO5 et garantir une épuration profonde des eaux usées avant leur rejet dans le milieu récepteur (Maouche,2017).

1.3.4 Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire constitue l'étape d'affinage ultime du cycle d'épuration, intervenant après les procédés secondaires pour éliminer les pollutions résiduelles les plus persistantes. Son objectif principal est la réduction drastique des nutriments eutrophisants, tels que l'azote et le phosphore, ainsi que l'élimination des matières en suspension fines et des micro-organismes pathogènes. En mettant en œuvre des technologies avancées (filtration membranaire, désinfection UV ou adsorption sur charbon actif), ce stade de traitement permet d'atteindre des standards de qualité supérieurs, indispensables à la préservation des

écosystèmes sensibles ou à la valorisation des effluents par la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) à des fins industrielles ou agricoles. »(Stiti,2020).

1.3.4.1 Filtration sur sable

La filtration sur lit de sable constitue une unité d'affinage physique et biologique majeure du traitement tertiaire, dont la fonction principale est la rétention des matières en suspension (MES) résiduelles et de la fraction organique particulaire. Ce procédé opère selon un double mécanisme de filtration : une action de surface pour les particules volumineuses et une filtration en profondeur par adsorption des micropolluants sur la matrice granulaire. Cette étape de finition est déterminante pour garantir la conformité de l'effluent aux normes de rejet les plus strictes, permettant d'atteindre des valeurs limites d'émission inférieures à 25 mg/L pour la DBO5 et 125 mg/L pour la DCO. En assurant une clarification optimale et une réduction de la charge organique résiduelle, la filtration sur sable sécurise ainsi le rejet en milieu naturel ou prépare l'eau à une éventuelle réutilisation industrielle(Stiti,2020).

1.3.4.2 Adsorption sur charbon actif

L'adsorption sur charbon actif constitue une technologie de traitement tertiaire performante, dédiée à l'affinage de l'épuration des effluents industriels. Ce procédé permet l'élimination des matières organiques réfractaires (DCO dure), des micropolluants, des pesticides, ainsi que des métaux lourds, tout en assurant la désodorisation et la décoloration des eaux. Le mécanisme repose sur l'exploitation de la forte surface spécifique du charbon (utilisé sous forme de grains (CAG) ou de poudre (CAP)) qui permet de piéger les polluants à sa surface via les forces de Van der Waals(Stiti,2020).

1.3.4.3 Ozonation

L'ozonation tertiaire est une technique d'oxydation avancée (AOP) performante pour le traitement des eaux industrielles, appliquée en phase d'affinage après un traitement biologique ou physico-chimique. Ce procédé permet de détruire les micropolluants réfractaires tout en assurant une désinfection efficace contre les bactéries et les virus. En plus d'améliorer la qualité globale de l'eau par la décoloration et la désodorisation, l'ozonation garantit un effluent conforme aux exigences de rejet environnemental ou aux standards de réutilisation (Stiti,2020).

1.3.4.4 La désinfection par rayonnement UV-C

Le traitement tertiaire par UV-C constitue une étape de désinfection avancée des eaux industrielles, exploitant le rayonnement ultraviolet à une longueur d'onde de 254 nm. Ce procédé physique permet l'élimination de plus de 99,99 % des micro-organismes pathogènes (bactéries, virus et parasites) sans recours à des agents chimiques. Installés en aval du traitement secondaire, les réacteurs UV-C assurent la mise en conformité des effluents vis-à-vis des normes de rejet ou permettent leur réutilisation (REUSE) pour des usages tels que l'irrigation, le lavage industriel ou les eaux de process (Stiti,2020).

1.3.4.5 Osmose inverse

L'osmose inversée est une technologie membranaire qui permet de séparer, par l'application d'une pression hydraulique, le solvant d'une solution concentrée. Ce procédé force le passage du solvant à travers une membrane semi-perméable, circulant ainsi de la solution la plus concentrée vers la solution la plus diluée. Le fonctionnement du système génère deux flux distincts : d'un côté, le solvant pratiquement pur (le perméat) et, de l'autre côté, une solution encore plus concentrée que la solution de départ (le concentrât) (Cheraitia,2014).

1.3.5 Traitement des boues

Le traitement des boues est une étape indispensable qui vise à réduire leur volume et leur instabilité biologique avant leur évacuation finale. Ce processus suit généralement quatre phases :

1.3.5.1 l'épaississement

Cette première étape réduit le volume des boues par élimination d'une partie de l'eau interstitielle :

- **Épaississement statique (gravitaire)** : Utilise la force de pesanteur dans une cuve pour décanter les boues lourdes.
- **Épaississement dynamique** : Utilise une force mécanique. On distingue la flottation (bulles d'air pour les boues légères), l'égouttage (toile filtrante) et la centrifugation.

1.3.5.2 La déshydratation

Cette opération physique transforme la boue liquide en une galette solide ou pâteuse pour faciliter son transport :

- **Mécanique** : Par centrifugation (tambour tournant) ou par filtration (filtre à bandes ou presse à plateaux).
- **Naturelle** : Réalisée sur des lits de séchage à l'air libre, où l'eau s'évapore selon les conditions climatiques.

1.3.5.3 La stabilisation

Elle sert à neutraliser les odeurs et les matières fermentescibles. Elle peut être biologique (compostage ou méthanisation) ou chimique (ajout de chaux pour bloquer l'activité bactérienne).

1.3.5.4 Valorisation et élimination finale

Une fois traitées, les boues sont dirigées vers trois filières :

- A. Recyclage agricole** : Valorisation des nutriments (Azote, Phosphore) comme engrais.
- B. Valorisation énergétique** : Incinération ou pyrolyse pour produire de l'énergie.
- C. Mise en décharge (CET)** : Stockage sécurisé selon la dangerosité (Classe 1, 2 ou 3) (Amorce,2012).

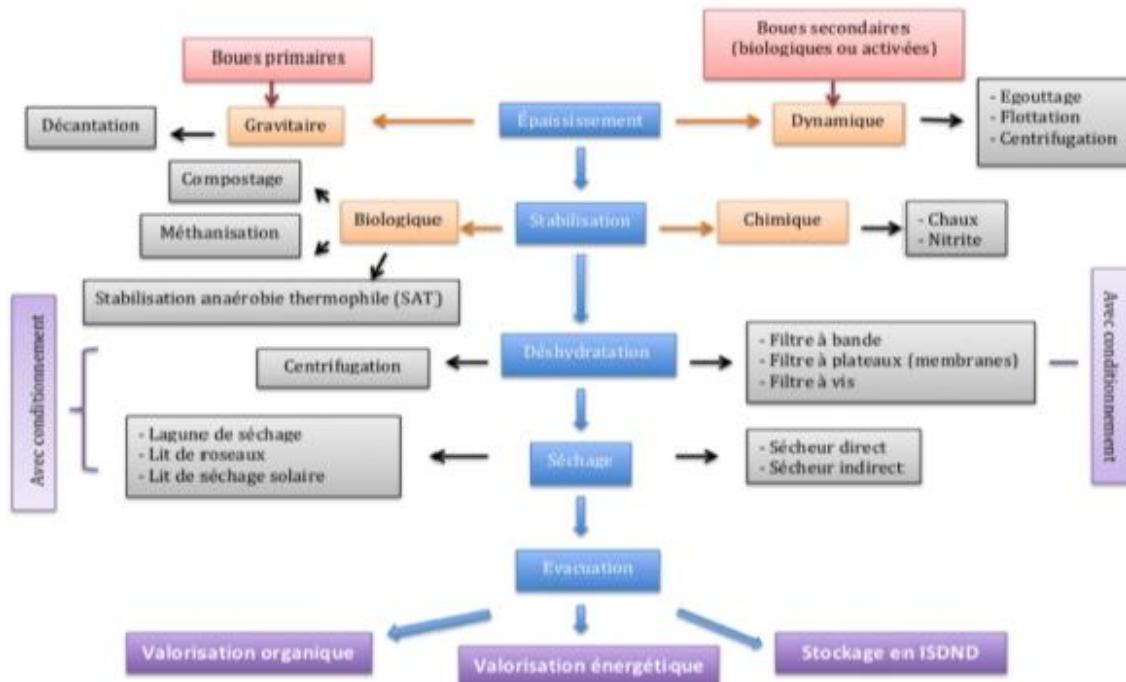


Figure1. 5 : Traitement et valorisation des boues de station d'épuration

Conclusion

Cette revue de littérature nous a permis de comprendre la complexité des pollutions issues du raffinage et de la pétrochimie.

La maîtrise des paramètres tels que la DBO5, la DCO et les hydrocarbures est essentielle pour garantir la conformité environnementale. Après avoir exposé ces généralités théoriques et les méthodes de traitement.

A dark blue graphic element resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip on the right, both with rounded ends. The text is centered within the horizontal strip.

Chapitre 2 : PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

Introduction

Ce chapitre présente le contexte industriel du Groupe Sonatrach, nous y évoquons, dans un premier temps, le complexe de Skikda, ses unités de production, son organisation et ses politiques environnementales, notamment en matière de gestion de l'eau, ensuite, nous présentons le schéma général des procédés de traitement mis en œuvre, incluant les étapes physico-chimiques et le réacteur biologique MBBR. Par la suite, nous.

2.1 Groupe Sonatrach

Depuis 60 ans, SONATRACH s'impose comme la locomotive de l'économie algérienne et le premier groupe d'hydrocarbures en Afrique. Sa force réside dans son modèle entièrement intégré, lui permettant de maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur :

- **Amont** : Exploitation de gisements de rang mondial au Sahara (Hassi Messaoud, Hassi R'Mel, etc.), en propre ou en partenariat.
- **Transport** : Gestion d'un réseau de 22 000 km de canalisations et de quatre ports pétroliers majeurs (Alger, Arzew, Bejaia, Skikda) accueillant des tankers de grande capacité.
- **Aval** : Transformation des ressources via six raffineries, ainsi que des complexes de pétrochimie et de liquéfaction (GNL/GPL).

Le Groupe emploie plus de 200 000 personnes, s'appuie sur un réseau de 154 filiales, dont des leaders sectoriels tels que NAFTAL, ENAFOR ou l'ENGTP (Sonatrach,2024).



Figure2. 1: Logo officiel de Sonatrach

2.1.1 Historique et missions

La SONATRACH (Société Nationale pour le Transport et la Commercialisation des Hydrocarbures) voit le jour le 31 décembre 1963 (Décret n° 63-491). À sa création, ses prérogatives sont exclusivement logistiques, se limitant aux études préalables à la mise en place d'infrastructures de transport pour les hydrocarbures liquides et gazeux. Cependant, cette mission initiale évolue rapidement : dès le 22 septembre 1966, le champ d'action de l'entreprise s'étend à l'ensemble de la chaîne de valeur, incluant la recherche, la production, la transformation et la commercialisation.

Le tournant majeur survient le 24 février 1971 avec la nationalisation des hydrocarbures. Cet acte souverain confie à la SONATRACH la responsabilité intégrale du développement industriel pétrolier et gazier de l'Algérie, l'amenant à diversifier ses activités vers le raffinage, la pétrochimie et le traitement du gaz naturel. Cette expansion a consolidé le rôle de l'entreprise comme moteur d'intégration nationale et garant de la stabilité socio-économique du pays.

Sur le plan institutionnel, le décret présidentiel du 23 janvier 1998 transforme la SONATRACH en Société par Actions (SPA). Bien que dotée d'un capital social de 245 milliards de dinars, elle demeure une propriété exclusive de l'État. Aujourd'hui, la SONATRACH constitue la colonne vertébrale de l'économie algérienne, assurant 95 % des recettes d'exportation et demeurant la principale source de financement du développement national (Amina,2015).

2.1.2 Organisation et activités

Sonatrach adopte une structure intégrée couvrant toute la chaîne de valeur énergétique, pilotée par un Président Directeur Général. Son organisation s'appuie sur des directions centrales stratégiques et cinq activités opérationnelles majeures : Exploration-Production, Transport, Liquéfaction, Raffinage et Commercialisation.

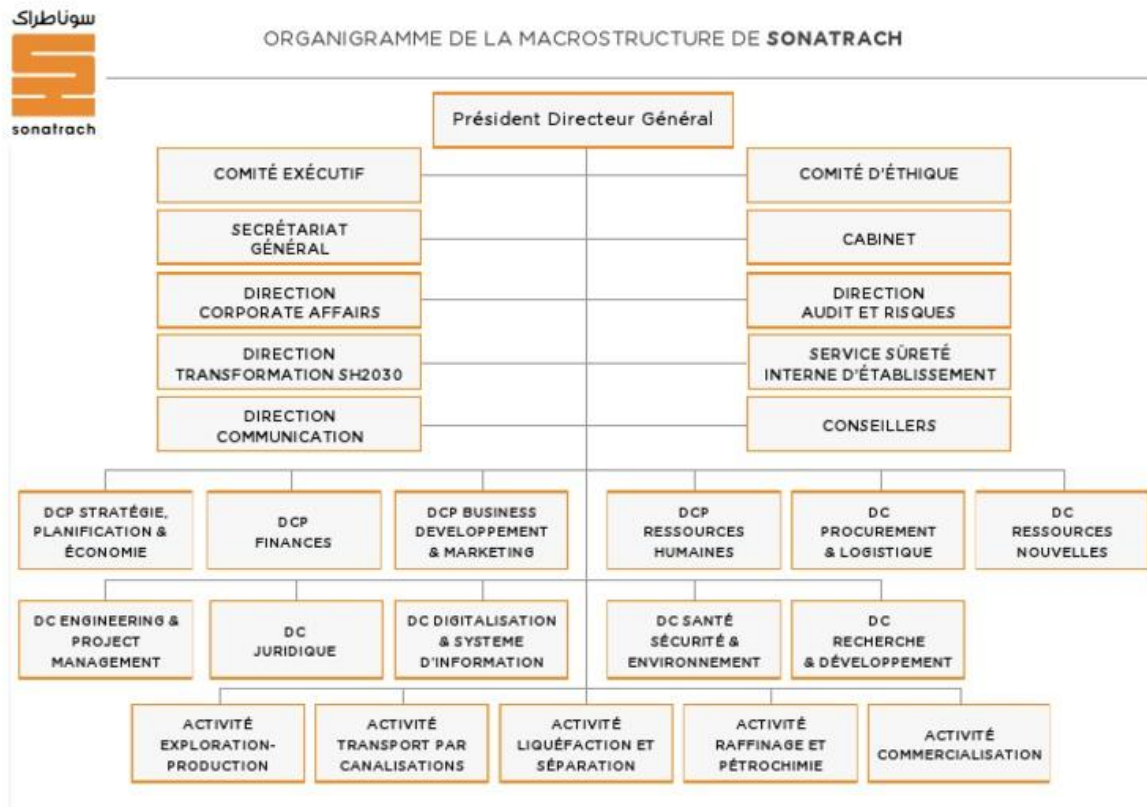


Figure2. 2 : organigramme de Sonatrach

Sonatrach maîtrise toute la chaîne des hydrocarbures, de la recherche à la commercialisation. Classée 10e producteur mondial de gaz, la compagnie diversifie aujourd'hui ses activités vers la pétrochimie, les énergies renouvelables et le dessalement d'eau pour construire son avenir (Rezzik,2023).

Les principales activités de Sonatrach se présentent comme suit :

- **Exploration & Production** : Un axe stratégique visant à découvrir de nouvelles ressources et à maximiser l'exploitation des réserves existantes(Sonatrach,nos Activités).



Figure2. 3: Complexe industriel d'Exploration & Production

- **Transport par Canalisations** : Garantir un acheminement fiable et durable de l'énergie vers tous les clients(**Sonatrach,nos Activités**).



Figure2. 4: Supervision technique du réseau de transport par canalisations

- **Liquéfaction & Séparation** : Un leader mondial garantissant l'excellence dans la production et l'exportation de GNL(**Sonatrach,nos Activités**).



Figure2. 5: Unité industrielle de liquéfaction et de séparation des hydrocarbures

- **Raffinage & Pétrochimie** : Un levier stratégique pour la transformation et la modernisation industrielle de SONATRACH(**Sonatrach,nos Activités**).



Figure2. 6: Supervision des opérations au sein d'un complexe de raffinage et de pétrochimie

- **Commercialisation** : Une ambition forte pour optimiser la présence de Sonatrach sur le marché mondial des hydrocarbures liquides(**Sonatrach,nos Activités**).



Figure2. 7: Transport maritime de GNL

2.1.3 Politique environnementale du groupe

En 2024, le groupe Sonatrach a franchi une étape décisive en adoptant officiellement une stratégie climat alignée sur l'Accord de Paris et les Objectifs de Développement Durable (ODD). Cette feuille de route, consolidée par une nouvelle politique HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement) le 31 octobre 2024, vise la neutralité carbone d'ici la seconde moitié du siècle. Pour y parvenir, l'entreprise s'appuie sur des axes concrets : l'amélioration de l'efficacité énergétique, la réduction drastique des émissions de méthane et de CO₂, ainsi que le développement de solutions de capture du carbone. Enfin, Sonatrach investit dans l'avenir à travers l'intégration des énergies renouvelables et de filières innovantes comme l'hydrogène vert et les carburants à faible émission(**Horizons2025**).

Cette dynamique opérationnelle est soutenue par une gouvernance climatique rigoureuse, visant à réduire l'empreinte carbone à travers des projets concrets, tels que le captage du carbone et la réduction drastique du torchage de gaz, en collaboration avec l'Agence spatiale algérienne (ASAL). L'engagement du groupe se manifeste également par un investissement majeur d'un milliard de dollars pour la plantation de 400 millions d'arbres, un projet de séquestration naturelle d'envergure. À travers ces initiatives, incluant le développement de l'hydrogène vert et des énergies renouvelables, Sonatrach aspire à devenir un modèle de responsabilité environnementale tout en respectant les engagements internationaux de l'Algérie (**CDER,2024**).

2.2 Complexe de Skikda

Le complexe de Skikda, désigné sous le nom de RA1/K, constitue un maillon essentiel de l'activité raffinage de Sonatrach. Sa mission principale est la transformation du pétrole brut issu du gisement de Hassi Messaoud, avec une capacité de traitement dépassant les 15 millions de tonnes par an. En complément, l'unité traite environ 277 000 tonnes par an de brut réduit importé, consolidant ainsi sa position stratégique dans la production nationale de carburants et de produits dérivés **(Redouane,2020)**.



Figure2. 8: La raffinerie de Skikda

2.2.1 Localisation géographique

Située au cœur de la zone industrielle, à 7 km à l'est de Skikda et à seulement 2 km du littoral, la raffinerie s'étend sur une superficie de 190 hectares. Son approvisionnement en pétrole brut algérien est assuré par l'unité de transport ETU de Skikda, qui sert de station intermédiaire depuis Hassi Messaoud. L'acheminement de la matière première est réalisé via un pipeline s'étendant sur une distance de 760 km, reliant directement le champ pétrolier au complexe industriel**(Khaldi,2019)**.

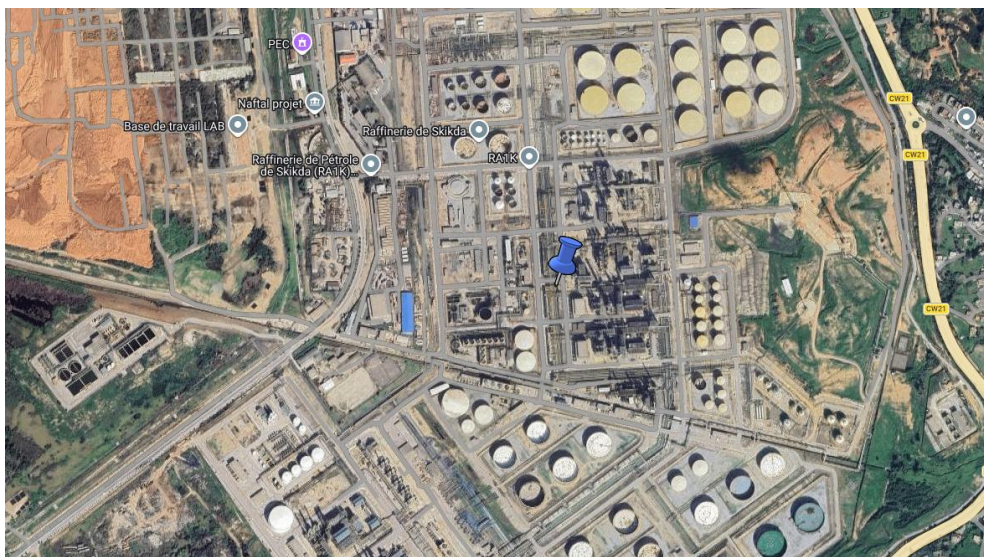


Figure2. 9 : Position géographique de la raffinerie de Skikda

2.2.2 Historique et développement

Mise en service en 1980 et ayant bénéficié d'une réhabilitation majeure en 2013, la raffinerie de Skikda (RA1K) est un pilier de l'industrie pétrolière algérienne avec une capacité de traitement de 16,5 millions de tonnes par an. Couvrant environ 67 % des besoins du marché local, ce complexe intègre des standards internationaux de qualité, appuyés par un laboratoire de conformité de pointe et des infrastructures de stockage modernisées selon les règles de sécurité les plus strictes. Le développement du site s'inscrit aujourd'hui dans une vision d'expansion stratégique, marquée par le projet d'extension du port pétrolier (atteignant un taux de réalisation de 94 %) et la construction d'un nouveau réservoir de GNL de 150 000 m³. Ces infrastructures visent à optimiser les capacités d'exportation de Sonatrach en permettant l'accueil de grands navires transporteurs de gaz et de pétroliers de haute capacité. Au-delà de sa mission industrielle, le groupe réaffirme son rôle sociétal dans la région de Skikda, notamment par le financement d'équipements médicaux de haute technologie pour la santé publique **(Sonatrach, Raffinage et Pétrochimie, S.D)(Horizons, Zone industrielle de Skikda : Le PDG de Sonatrach inspecte les installations et les unités de production, 2024).**

2.2.3 Unités de production

2.2.3.1 Raffinerie (RA1K)

La raffinerie RA1K est la plus grande raffinerie d'Afrique, traite du pétrole brut saharien, elle repose sur une architecture industrielle complexe, structurée autour de plusieurs unités de production et de traitement spécialisées :

- **Unités de base et distillation** : Le site exploite deux unités de distillation atmosphérique, dites Topping (U10/11), ainsi qu'une unité de distillation sous vide (U70) dédiée à la production de bitume. RA1K ne possède pas d'unité de raffinage lubrifiants (réservée à RA1Z Arzew), mais produit des huiles lourdes comme sous-produits
- **Traitement des gaz et reformage** : Le complexe comprend trois unités de séparation et de traitement des gaz (U30/31/104). Le processus de reformage catalytique est assuré par l'unité Magnaforming (U100) et par les unités Platforming (U101/103), ces dernières constituant le cœur de la présente étude.
- **Filière des aromatiques** : La raffinerie intègre une unité d'extraction (U200), une unité de cristallisation et de séparation du paraxylène (U400), ainsi que l'unité Milex (U600).
- **Infrastructures de soutien et utilités** : Le fonctionnement est sécurisé par une centrale thermoélectrique (CTE1050) et un système de purge par torchère (U1090).
- **Unités annexes** : Le site dispose également d'installations essentielles pour la gestion environnementale via le traitement des effluents, ainsi qu'un parc de stockage destiné aux produits finis et semi-finis. **(PPLUS,s.d)**

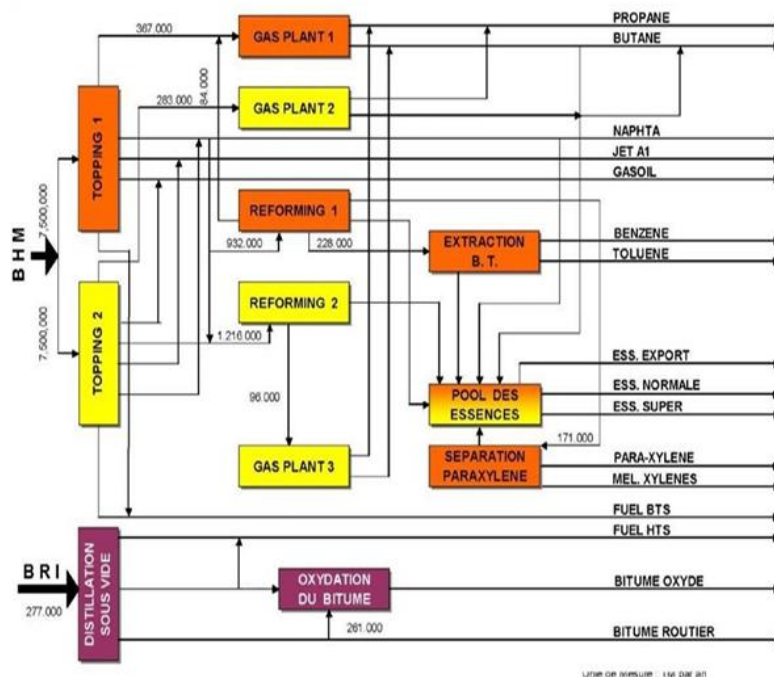


Figure2. 10: Schéma des principales installations de la raffinerie

Tableau2. 1: Bilan des capacités de production (RA1K)

Matières premières	Quantité (tonnes/an)	Produits finis	Capacité (tonnes/an)
B.H.M. (Brut de Hassi Messaoud)	14 521 841	Propane	65.000
		Butane	300.000
		Essence normale sans plomb (S/P)	700 000
		Essence super sans plomb (S/P)	600 000
		Naphta Pétrochimique	1.700.000
		Kérosène / Jet A1	1.500.000
		Gasoil	4.250.000
		Fuel-oil (BTS / HTS)	4.400.000
B.R.I. (Brut réduit)	177 450	Aromatiques (Benzène/Toluène/X	244.000

importé)		ylènes)	
		Bitumes (Routier / Oxydé)	165.000

2.2.5 Organisation administrative et technique

La gestion de la raffinerie de Skikda (RA1K) repose sur une structure hiérarchique pyramidale conçue pour assurer une coordination optimale entre les impératifs de production et les fonctions de soutien. À son sommet, la direction du complexe supervise une organisation répartie en deux grands pôles de compétences : cinq services techniques de ligne et deux services de staff(**Scribd.(2025,mai19).**

La structure administrative de la raffinerie est pilotée par une Direction Générale qui supervise les départements clés tels que l'Exploitation, les Ressources Humaines, les Finances, l'Informatique et le HSE. Le Président-Directeur Général assure le suivi des performances et de la maintenance par des visites régulières sur site. En appui, les services de staff assurent des missions de soutien transversal, comptant notamment environ huit employés pour le service Informatique et trois pour le service Finances

(Horizos,2024)(ZoomInfo.(S.d).

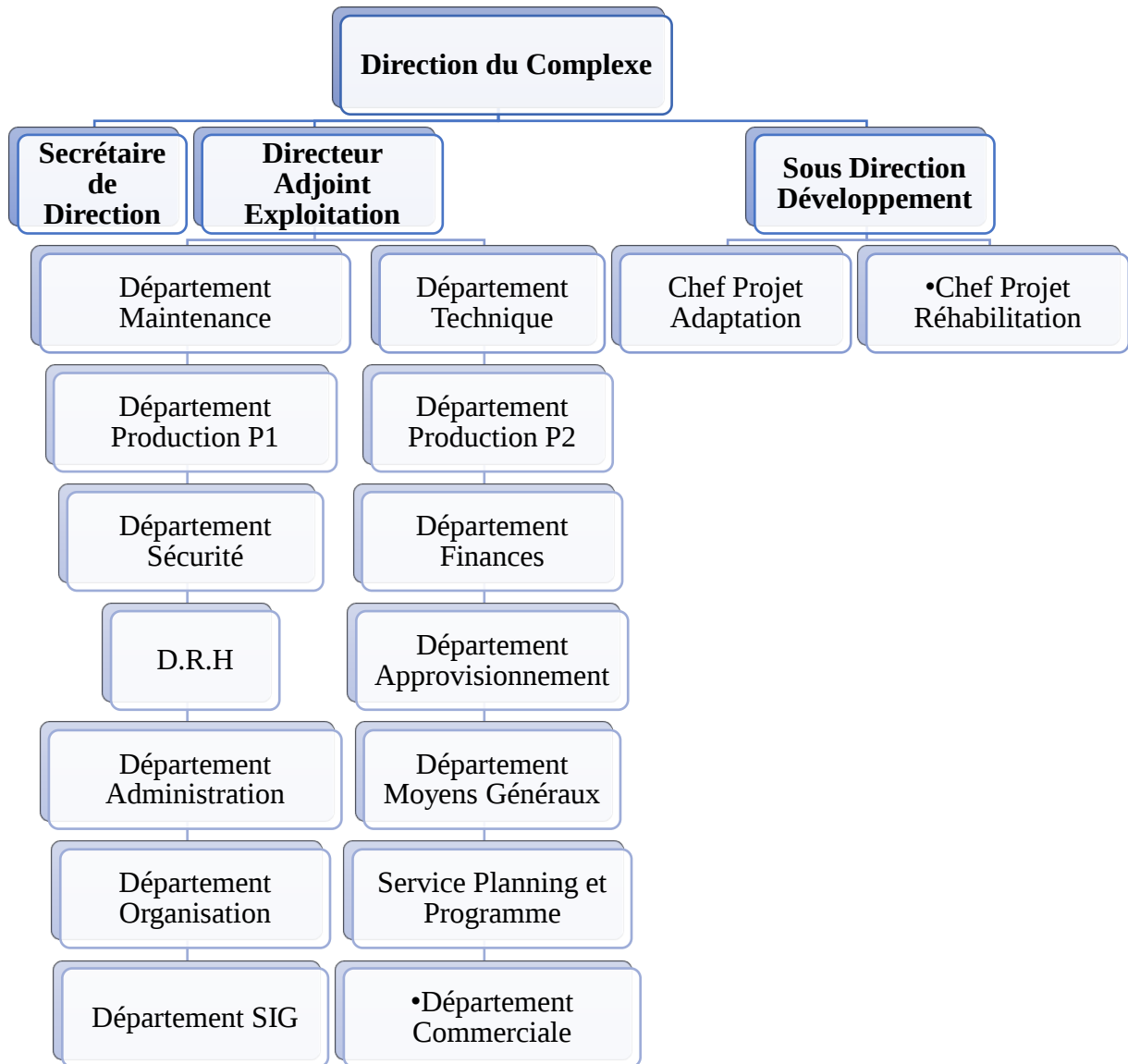


Figure2. 11 : Organigramme général de la Raffinerie de Skikda

L'organisation technique du complexe s'appuie sur des pôles spécialisés incluant les Opérations (37 employés), l'Ingénierie & Technique (26 employés), ainsi que les services de Production (Stockage et Mouvement) et de Maintenance. La supervision de la raffinerie RA2K et de ses annexes est assurée par un système de contrôle centralisé (DCS), garantissant une efficacité opérationnelle maximale. Cette structure soutient les unités stratégiques du site (RA1K, GL1K/GP1K, CP1K/CP2K) en mettant l'accent sur la sécurité et la performance industrielle.(Sonatrach,Raffinage et Pétrochimie,s.d)(zoomInfo,s.d)(k,2024)

2.3 Objectifs environnementaux

Le groupe Sonatrach s'est engagé dans une démarche proactive pour minimiser l'impact écologique de ses activités, particulièrement au sein de la zone industrielle de Skikda. Cette stratégie s'articule autour de trois axes principaux : **(Horizons,2025)(Algérie,2017)**.

- A. Surveillance et Contrôle :** La mise en place du premier centre algérien d'observation de l'environnement à Skikda permet un contrôle rigoureux des émanations gazeuses. Ce centre vise à réduire la pollution atmosphérique et à garantir la sécurité sanitaire des populations riveraines.
- B. Modernisation des Installations :** Afin de préserver la couche d'ozone et de limiter les polluants, Sonatrach procède au remplacement des unités obsolètes par des technologies « amies de l'environnement » et à l'installation de systèmes de filtrage haute performance.
- C. Vision « Horizon 2050 » :** En accord avec l'Accord de Paris, le groupe vise la neutralité carbone d'ici 2050. Les objectifs phares incluent :
 - L'élimination totale du torchage de routine d'ici 2030.
 - L'objectif zéro émission de méthane via le programme LDAR (détection et réparation des fuites).
 - Un vaste programme de reboisement (420 millions d'arbres) et le développement des énergies renouvelables (photovoltaïque et hydrogène vert).

Cette politique HSE, consolidée en 2024, confirme la volonté du complexe de concilier performance industrielle et développement durable.**(Algérie360,Sonatrach projette un centre d'observation de l'environnement à skikda,2017)(Horizons,Sonatrach,420millions d'arbres pour capter le CO2,2025)**

2.4 Gestion globale de l'eau au complexe

La gestion hydrique du complexe de Skikda s'appuie sur une diversification des sources d'approvisionnement et un réseau industriel spécifique. Ce dispositif permet un suivi rigoureux de la consommation par unité de production, visant à optimiser l'utilisation de la ressource tout en réduisant l'empreinte environnementale du site.

2.4.1 Sources d'approvisionnement en eau

Le complexe intègre une unité de production des utilités et de traitement des eaux. Cette installation assure la préparation de l'eau nécessaire aux processus industriels et le traitement des effluents avant leur rejet **(Horizons, la raffinerie de condensat de skikda : un pilier fondamental de l'économie et de la sécurité énergétiques, 2024)**.

2.4.2 Réseau de distribution d'eau industrielle

Le système dispose d'une capacité de traitement de $60 \text{ m}^3 / \text{h}$. Ce réseau utilise des procédés physiques, chimiques et biologiques pour éliminer les sédiments et toxines. Une attention particulière est portée à la récupération et au recyclage des huiles pétrolières avant le déversement des eaux traitées dans l'oued Safsaf. **(Horizons, la raffinerie de condensat de skikda : un pilier fondamental de l'économie et de la sécurité énergétiques, 2024)**.

2.4.3 Consommation d'eau par unité

La consommation est régulée par l'unité des utilités pour répondre aux besoins des différentes sections (distillation, séparation, traitement gas-oil). Le suivi est centralisé en salle de contrôle (DCS) pour optimiser l'usage de l'eau et garantir le respect des normes environnementales. **(Horizons, la raffinerie de condensat de skikda : un pilier fondamental de l'économie et de la sécurité énergétiques, 2024)**.

3.1 Description détaillée de la station d'épuration (ETP II)

L'unité ETP II, qui signifie (effluent treatment plant) ou la station de traitement des effluents, est une installation industrielle intégrée à la raffinerie de Skikda (RA1K). Elle est spécifiquement conçue pour assurer l'épuration et le contrôle des eaux usées issues des différents procédés de raffinage.

3.1.1 Capacité et dimensionnement

Le dimensionnement de la station de traitement des eaux usées ETP II de la raffinerie de Skikda est établi selon les données techniques fournies par le constructeur Samsung Engineering. Cette unité est conçue pour traiter une capacité nominale de **10 800 m³/jour**.

3.1.1.1 Débits de conception (Design Flow Rates)

L'unité reçoit plusieurs courants d'affluents dont les débits varient selon les conditions opératoires de la raffinerie. Deux régimes de débit sont définis pour le dimensionnement des équipements : le débit moyen (Normal) et le débit de pointe (Peak).

Tableau3. 1 : Synthèse des débits de conception de l'unité ETP II

Nature de l'effluent	Débit moyen m ³ /h	Débit de pointe m ³ /h
Eaux usées huileuses (OWS)	76 ,24	464
Effluents de dessaleur	158,2	174
Eaux pluviales contaminées	218	2768
Capacité totale de la station	450	-

3.1.1.2. Volumes et principes de régulation

Pour maintenir une efficacité de traitement stable face à ces variations hydrauliques, la station ETPII s'appuie sur un système de régulation optimisé. Ce système repose sur plusieurs ouvrages clés permettant de réguler et d'homogénéiser les débits afin d'alimenter en continu les étapes aval, dont le premier élément est :

- **Bassin de régulation/homogénéisation** : joue un rôle tampon indispensable. Son volume est conçu pour lisser les pics de débit (notamment les 464 m³/h du courant OWS) et uniformiser la charge polluante avant l'étape biologique.
- **Réacteurs MBBR** : Le volume de ces ouvrages est optimisé pour garantir un temps de contact suffisant entre l'effluent et le biofilm fixé, assurant ainsi la dégradation des polluants organiques selon les garanties de performance.
- **Emprise au sol** : L'unité occupe une surface optimisée au sein de la zone 501, configurée pour minimiser les pertes de charge hydraulique entre le prétraitement (CPI/DAF) et le traitement biologique (MBBR).

3.2 Filière de traitement

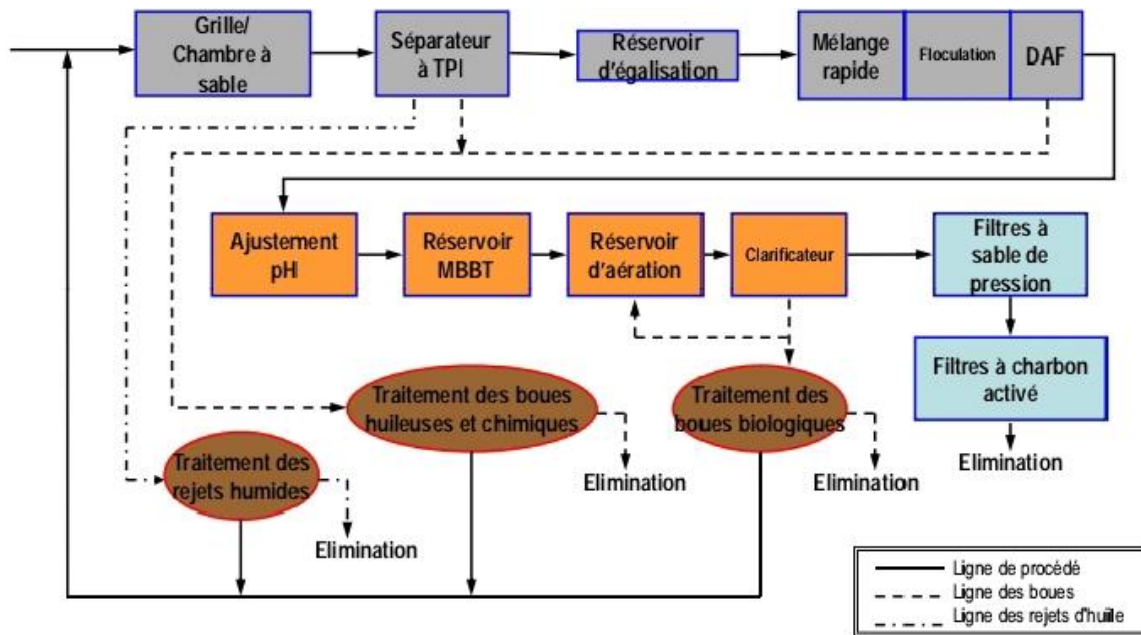


Figure3. 1 : Schéma synoptique globale du procédé de traitement

3.3. Description des chaque unités de traitement

3.3.1. Le déshuilage par CPI (Corrugated Plate Interceptor)

Le séparateur CPI est un équipement de séparation gravitaire à haute efficacité. Il est conçu pour traiter les eaux huileuses en utilisant des faisceaux de plaques ondulées inclinées qui optimisent la séparation des phases.

3.3.1.1 Principe de fonctionnement

Le flux d'eau traverse les plaques où les gouttelettes d'huile coalescent et remontent vers la surface par différence de densité. Simultanément les particules solides glissent vers le bas pour être collectées dans la trémie à boues.

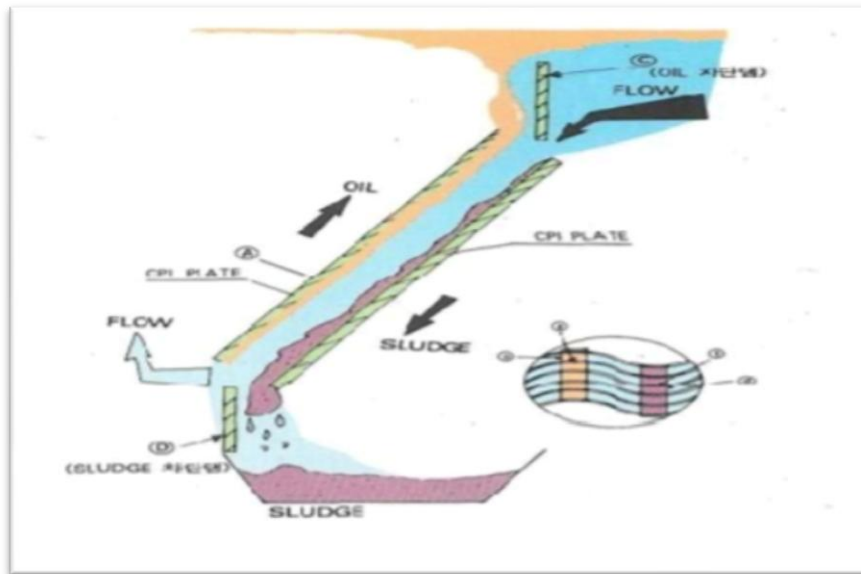


Figure3. 2 : Le déshuileur CPI (Corrugated Plate Interceptor)

3.3.1.2 Égalisation et Homogénéisation

Le flux est recueilli dans un réservoir d'égalisation. Ce bassin joue un rôle de tampon pour réguler les variations de débit et de charge polluante. Il est également équipé de dispositifs de récupération des huiles flottantes résiduelles et de pompes de transfert vers l'unité suivante.

3.3.2 Coagulation et Floculation

Afin d'éliminer les particules colloïdales et les huiles émulsionnées, des agents chimiques (coagulants et floculants) sont injectés. Le mélange rapide assure la destabilisation des particules, suivi d'un mélange lent permettant la formation de "flocs" plus volumineux.



Figure3. 3 : Bassin de Coagulation et Floculation

C. Unité de Flottation à Air Dissous (DAF)

La clarification finale du traitement primaire est assurée par l'unité DAF. Ce procédé consiste à injecter des micro-bulles d'air qui s'attachent aux floccs et aux fines gouttelettes d'huile ($< 60 \mu m$) les entraînant vers la surface. Un système de raclage (Scraper) élimine ensuite cette couche de surface.



Figure3. 4 : Flottation à Air Dissous (DAF)

3.3 4. Moving Bed Biofilm Reactor

MBBR ou **réacteur à lit mobile** est une technologie aérobie qui utilise des supports en plastique en suspension dans le bassin. Ces supports, de petite taille et de grande surface spécifique, sont maintenus en mouvement constant grâce à l'aération ou à l'agitation mécanique.

Les micro-organismes se fixent sur ces supports et forment un bio film qui dégrade la matière organique et les composés azotés de l'effluent.

Le MBBR combine les avantages des procédés à biomasse fixée et à biomasse libre : il offre une grande stabilité, résiste bien aux variations de charge, ne nécessite pas de recirculation des boues et demande une emprise au sol réduite par rapport aux boues activées classiques. Pour assurer une efficacité optimale, ce réacteur biologique fonctionne en mode aérobie continu où l'apport en oxygène dissous est régulé de manière à maintenir une activité biologique stable.

Les médias (supports en plastique) en suspension offrent une grande surface spécifique permettant la fixation et le développement d'un biofilm robuste, capable de digérer la charge organique et d'absorber les fluctuations de flux avant l'étape de décantation

3.1.2.3 Traitement de polissage.

Le traitement de polissage constitue l'étape tertiaire de la station d'épuration. Il vise à affiner la qualité de l'eau traitée avant son rejet ou sa réutilisation. Cette étape comprend trois éléments principaux :

- **Filtre à sable sous pression** : assure l'élimination des matières en suspension résiduelles qui n'ont pas été retenues lors des traitements précédents.
- **Filtre à charbon actif** : permet de réduire la `DBO`, la `DCO` ainsi que les micropolluants organiques et les hydrocarbures encore présents dans l'effluent.
- **Bassin de protection** : sert à contrôler la qualité finale de l'eau et à homogénéiser l'effluent traité avant son évacuation.



Figure3. 5 : Filtre à sable

Les filtres fonctionnent selon un cycle comprenant une phase de filtration et une phase de lavage à contre-courant. L'eau brute alimente le filtre par le haut, traverse le média filtrant, puis ressort traitée en partie basse. Deux types de médias sont utilisés :

Le lavage du filtre à sable se fait par injection d'eau et d'air en contre-courant afin de décolmater le média et restaurer ses performances (Sonatrach et Samsung engineering, 2026).



CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude pratique réalisée au niveau de la raffinerie de Sonatrach afin d'évaluer le fonctionnement de la station de traitement RA1K. Nous exposons la méthodologie de suivi adoptée, à travers l'identification des analyses physico-chimiques nécessaires pour quantifier la charge polluante.

3.1. Échantillonnage

L'échantillonnage est une étape importante qui conditionne la fiabilité des analyses ultérieures. Au niveau de la raffinerie de Skikda (RA1K), cette opération suit des protocoles rigoureux pour garantir que les prélèvements soient parfaitement représentatifs du milieu étudié.

3.1.1 Points de prélèvement

Les campagnes de prélèvement des eaux huileuses ont été réalisées au niveau du point de sortie finale, situé juste avant le rejet des effluents en mer. Cette localisation stratégique a été choisie afin de contrôler l'efficacité du traitement et de vérifier la conformité des eaux vis-à-vis des normes réglementaires en vigueur.

L'étude s'est articulée autour de deux périodes distinctes de suivi :

- **Période 1** : S'étendant de novembre 2025 à janvier 2026.
- **Période 2** : S'étendant de février 2026 à mars 2026.

3.1.2 Fréquence d'échantillonnage

- A. **Quotidienne (7j/7)** : Pour les paramètres de base tels que le pH, la température, la DCO, les MES et les Hydrocarbures.
- B. **Hebdomadaire** : Pour la DBO₅, l'Azote total et le Phosphore, permettant de réajuster l'apport en nutriments du système biologique.

3.2 Protocoles et prélèvement

3.2.1 Matériel d'échantillonnage

Utilisé selon les procédures internes du laboratoire, le matériel suivant est employé :

- **La bouteille lestée (ou éprouvette lestée)** : Dispositif en métal ou plastique inerte

- **Pipette d'échantillonnage** : Un tube creux permettant de prélever des colonnes de liquide dans des récipients de faible volume (fûts ou bidons).
- **Louche d'échantillonnage** : Équipée d'un manche télescopique pour les prélèvements desurfaces ou dans les canaux ouverts.

3.2.2 Protocoles opératoires de prélèvement

A. Prélèvement par niveau (Échantillon de niveau)

Cette technique est utilisée pour les réservoirs de grande capacité. Le flacon lesté est descendu à une profondeur précise (Haut, Milieu ou Fond). Une fois le niveau atteint, le bouchon est retiré manuellement à l'aide d'une cordelette. Les prélèvements des trois niveaux sont ensuite mélangés en proportions égales pour constituer un échantillon moyen composite.

B. Prélèvement en ligne (Sondage des conduites)

Avant de recueillir l'échantillon à partir d'une vanne ou d'un robinet de purge, une vidange préalable de la ligne est effectuée. Cette opération permet d'éliminer les résidus stagnants et d'obtenir un fluide représentatif de la circulation actuelle dans la tuyauterie.

C. Échantillonnage à la pipette

Le prélèvement est réalisé en introduisant la pipette verticalement dans le produit. Une fois le fond atteint (ou le niveau souhaité), l'extrémité supérieure est obstruée pour retenir la colonne de liquide par effet de vide lors du retrait.

3.2.3 Conditionnement et identification des échantillons

- **Récipients** : Les flacons (en verre ou PVC selon le paramètre) doivent être scrupuleusement nettoyés. Pour les produits hydrocarbonés, le flacon est rincé trois fois avec le produit lui-même avant le prélèvement définitif.
- **Étiquetage** : Immédiatement après le prélèvement, une étiquette est apposée sur chaque flacon mentionnant : le point de prélèvement, la nature du produit, la date, l'heure et le nom de l'opérateur.
- **Conservation** : Afin de limiter les dégradations chimiques ou biologiques, les échantillons sont transportés dans des glacières et conservés au réfrigérateur à une température proche de 4 °C avant analyse.

3.3 Paramètres analytiques et méthodes d'analyse

3.3.1 Détermination du pH (Norme ASTM D1293)

A. Principe : Mesure de la différence de potentiel électrique entre une électrode de verre et une électrode de référence, traduisant l'acidité ou l'alcalinité du milieu.

B. Mode opératoire :

- Initialisation et calibration du pH-mètre via des solutions étalons (pH 4, 7 et 9).
- Nettoyage soigneux de la sonde à l'eau déminéralisée.
- Immersion du capteur dans 150 ml d'effluent sous une légère turbulence.
- Enregistrement du résultat après stabilisation thermique et électrique de l'appareil.

3.3.2. Détermination de la température

A. Principe: La température est mesurée directement sur site. Les appareils de conductivité et de pH sont équipés d'un thermomètre intégré.

3.3.3 Détermination de la conductivité

A. Principe : La conductivité électrique de l'eau dépend de la concentration en ions dissous. Sa mesure permet d'évaluer rapidement la pureté de l'eau.

B. Mode opératoire :

- Allumer l'appareil.
- Rincer soigneusement les électrodes avec de l'eau distillée.
- Plonger les électrodes dans l'échantillon en agitant.
- Sélectionner la gamme adaptée.
- Lire directement la valeur. Le résultat s'exprime en $\mu\text{S/cm}$ ou $\text{M}\Omega/\text{cm}$

(Sonatrach,2024).



Figure3.6 : Dispositif de mesure pH,conductivité et température

3.3.4 Titre Alcalimétrique Complet (TAC - Norme ASTM D1067)

A. Principe : Évaluation quantitative des bases (OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^-) par neutralisation acide en présence d'un indicateur de virage.

B. Mode opératoire :

- Introduire une prise d'essai de 100 ml dans une fiole conique.
- Incorporer quelques gouttes d'indicateur mixte.
- Procéder au titrage avec l'acide sulfurique (0.02 N) jusqu'au basculement de la teinte du bleu vers le rose.

3.3.5. Dureté Totale (TH - Norme ASTM D1126)

A. Principe : Complexation des ions divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+}) par l'EDTA à un pH régulé par une solution tampon.

B. Mode opératoire :

- Prélever 100 ml d'échantillon brut.
- Stabiliser le milieu avec 1 ml de solution tampon (pH 10).
- Ajouter le Noir d'Eriochrome T (NET) comme indicateur.
- Titrer à l'aide de l'EDTA jusqu'à l'obtention d'une coloration bleue franche.



Figure3. 7 : Acide EDTA et solution tampon

3.3.6. Dosage du Calcium (Norme ASTM D511)

A. Principe : Séquestration sélective du calcium par l'EDTA après précipitation du magnésium sous forme d'hydroxyde à pH élevé.

B. Mode opératoire :

- Prendre un volume de 100 ml de l'effluent.
- Alcaliniser le milieu avec 2 ml de Soude (1 N).
- Ajouter la murexide pour colorer la solution en rose.
- Titrer jusqu'au virage final vers le violet.

3.3.7. Dosage des Chlorures (Norme ASTM D512)

A. Principe : Précipitation des ions chlorures par le nitrate d'argent. La fin de réaction est signalée par le chromate de potassium.

B. Mode opératoire :

- Verser 100 ml de l'échantillon dans un erlenmeyer.
- Ajouter 1 ml d'indicateur chromate.
- Titrer avec AgNO_3 (0.0282 N) jusqu'à l'apparition d'un précipité rouge brique.



Figure3. 8 : coloration finale du virage au point d'équivalence.

3.3.8. Analyse des Phosphates (Méthode Photométrique)

A. Principe : Formation d'un hétéropolyacide bleu après réduction, dont l'intensité colorée est proportionnelle à la concentration en phosphates.

B. Mode opératoire :

- Préparer la cuvette d'analyse avec l'échantillon traité.
- Ajouter les réactifs de complexation et de réduction.
- Respecter le temps de latence pour le développement de la couleur.
- Effectuer la lecture de l'absorbance à 660 nm sur le spectrophotomètre.



Figure3. 9 : réactifs chimiques et spectromètre

3.3.9. Demande Biochimique en Oxygène (Système BOD Trak)

A. Principe : Évaluation de la dégradation biologique des matières organiques par la mesure de la dépression gazeuse due à la consommation d'oxygène.

B. Mode opératoire :

- Préparer la solution nutritive de dilution (sels de Ca, Mg, Fe et phosphate).
- Introduire l'échantillon dans le flacon ambré du BOD Trak.
- Insérer des cristaux de NaOH dans le compartiment supérieur pour piéger le CO₂.
- L'incubation à 20 °C [02].

3.3.10. Détermination des Hydrocarbures

A. Principe :

Cette méthode repose sur la spectroscopie d'absorption infrarouge (IR). Les molécules d'hydrocarbures absorbent le rayonnement IR à des longueurs d'onde spécifiques selon leur structure chimique. La mesure de l'intensité des bandes d'absorption permet de réaliser une analyse à la fois qualitative et quantitative des hydrocarbures présents dans l'échantillon.

B. Mode opératoire :

- **Stabilisation :** Allumer l'appareil et laisser la lampe préchauffer pendant 30 minutes jusqu'à la disparition du message « WARM UP ».
- **Extraction :** Dans une ampoule à décanter, verser 10 ml d'échantillon (à l'aide d'une seringue en verre Horiba), ajouter quelques gouttes d'acide chlorhydrique (1+1) et 10 ml de solvant S316. Agiter vigoureusement puis laisser décanter.
- **Calibrage :** Rincer la cellule avec du solvant pur pour effectuer le réglage du zéro de l'instrument.

- **Mesure** : Remplir la cellule (environ 65 ml), l'insérer dans le compartiment de l'analyseur (en orientant le repère "V" face à l'appareil) et lire le résultat affiché sur l'écran.

3.3.11. Détermination de la demande chimique en oxygène

A. Principe :

La détermination de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) repose sur l'oxydation par voie humide des matières organiques présentes dans l'échantillon. Cette réaction s'effectue à chaud (150°C pendant deux heures. Après digestion, la quantité de chrome réduite est mesurée par photométrie pour évaluer la concentration de la DCO.

B. Mode opératoire :

1. Préchauffage :

- Allumer le réacteur DRB200.
- Choisir la méthode DCO.
- Attendre la température de 150°C

2. Préparation des fioles

3. **Fiole Échantillon** : Verser 2 ml d'échantillon dans la fiole de réactif.

4. Fiole Blanc :

- Verser 2 ml d'eau distillée dans une autre fiole de réactif.
- Fermer et agiter doucement les deux fioles.

5. Chauffage :

- Insérer les deux fioles dans le réacteur à 150°C.
- Lancer le chauffage pendant 120 minutes (2 heures).

6. Refroidissement :

- Retirer les fioles du réacteur.
- Les agiter doucement par retournement.
- Laisser refroidir à température ambiante dans un endroit sombre avant la mesure

(Boiguerra, Cheligheme, Boulahres, 2023)

A dark blue horizontal scroll graphic with rounded ends and a slight 3D effect, featuring a lighter blue shadow on the right side. The text is centered on the scroll.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Ce chapitre présente et analyse l'ensemble des résultats de la caractérisation physicochimique des effluents de la station de traitement sur une période de cinq mois consécutifs (novembre 2025 à mars 2026), représentant au total 105 mesures journalières. L'objectif est d'évaluer la qualité des effluents bruts à l'entrée de la station, d'examiner l'évolution temporelle des différents paramètres, de quantifier les rendements d'épuration et de vérifier la conformité des rejets avec la réglementation algérienne en vigueur, les résultats sont organisés en deux périodes : la Période 1 couvre les mois de novembre 2025 à janvier 2026 (63 mesures), et la Période 2 couvre les mois de février et mars 2026 (42 mesures).

Les paramètres suivis incluent le pH, la conductivité électrique, la titre alcalimétrique (TA), le titre alcalimétrique complet (TAC), la dureté totale (TH), les teneurs en calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), chlorures (Cl^-), phosphates (PO_4^{3-}), la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène à 5 jours (DBO_5), les hydrocarbures totaux (H/C) et la température. Au total, 63 mesures ont été effectuées sur la période d'étude.

SECTION 1 (PÉRIODE 1) : NOVEMBRE 2025 – JANVIER 2026

4.1 Caractérisation des effluents traitées :

4.1.1. Statistiques descriptives de tous les paramètres

Le tableau suivant synthétise les statistiques descriptives (moyenne, minimum, maximum, écart-type) de tous les paramètres mesurés sur les 63 jours de suivi. La colonne "Tendance" indique l'évolution observée entre novembre et janvier (↑ hausse, ↓ baisse, → stable).

Tableau 4. 1: Statistiques descriptives des paramètres physicochimiques (Nov. 2025 – Jan. 2026)

Paramètre (unité)	n	Moyenne	Min.	Max.	Écart-type	Tendance
pH	63	7.81	7.00	8.30	0.28	→
Conductivité(μS/cm)	63	1384.71	700.00	2550.00	492.35	↓
TAC (mg/L CaCO ₃)	63	99.25	44.00	198.00	35.23	↑
TH (mg/L CaCO ₃)	63	157.51	100.00	260.00	29.33	→
Ca ²⁺ (mg/L)	63	108.44	70.00	210.00	26.89	↓
Mg ²⁺ (mg/L)	63	50.59	20.00	90.00	14.47	↑
Cl ⁻ (mg/L)	63	590.10	355	949.00	144.24	↓
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	63	1.09	0.10	5.73	0.93	↓
DCO (mg O ₂ /L)	63	0.44	0.08	4.00	0.61	↓
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	12	2.96	1.70	4.10	0.80	↑
H/C	63	0.22	0.05	4.42	0.54	↑
Température (°C)	63	24.24	16.00	31.00	2.71	↓

Le pH des effluents varie entre 7,00 et 8,30 avec une moyenne de $7,81 \pm 0,28$, ce qui correspond à un milieu légèrement basique. Cette valeur est caractéristique des effluents de raffinage et reste dans la plage tolérée par les normes algériennes.

La conductivité électrique présente une forte variabilité (700 à 2550 μS/cm ; CV = 36 %), témoignant de fluctuations importantes dans la charge saline des effluents, probablement liées aux variations des procédés industriels en amont.

La dureté totale (TH) affiche une valeur moyenne de 157,5 mg/L CaCO₃ , dominée par le calcium (Ca²⁺ moyen : 108,4 mg/L) par rapport au magnésium (Mg²⁺ moyen : 50,5 mg/L), indiquant une eau de type calco-magnésien.

La teneur en chlorures (Cl^-) est élevée, avec une moyenne de 590,10 mg/L, ce qui constitue un point d'attention important pour la conformité aux normes.

Les paramètres de pollution organique montrent des valeurs relativement faibles : la **DCO** moyenne est de 0,44 mg O_2 /L et les hydrocarbures totaux (**H/C**) atteignent en moyenne 0,22 mg/L, bien en deçà des limites de rejet réglementaires.

La DBO_5 , mesurée ponctuellement (n=12), a une valeur moyenne de 2,96 mg O_2 /L, une charge organique biodégradable modérée. La valeur nulle systématique du **TA** (< 0,5 mg/L) indique l'absence d'alcalinité hydroxyde, confirmant un milieu non sursaturé en carbonates. Cependant, il convient de noter que la valeur de la DCO apparaît inférieure à celle de la DBO_5 , ce qui paraît irréaliste pour un effluent de ce type.

4.1.2 Variations temporelles (journalières, hebdomadaires, ou saisonnières)

L'analyse des variations temporelles permet d'identifier des tendances saisonnières et des événements ponctuels pouvant affecter la qualité des effluents.

Le tableau 4.2 présente les moyennes mensuelles des principaux paramètres.

Tableau 4. 2: Évolution mensuelle des paramètres physicochimiques

Paramètre	Novembre 2025	Décembre 2025	Janvier 2026
pH	7,58	7,93	7,92
Conductivité($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1623	1037	1542
TAC (mg/L CaCO_3)	83	94	123
TH (mg/L CaCO_3)	152	165	154
Ca^{2+} (mg/L)	113	114	97
Mg^{2+} (mg/L)	44	51	57
Cl^- (mg/L)	669	594	529
PO_4^{3-} (mg/L)	1,13	1,21	0,91
DCO (mg O_2 /L)	0,51	0,51	0,27

Paramètre	Novembre 2025	Décembre 2025	Janvier 2026
H/C	0,13	0,33	0,19
Température (°C)	25,3	24,3	23,1

L'évolution temporelle du pH (Figure 4.1) montre une tendance à la hausse entre novembre (7,58) et décembre (7,93), qui se stabilise ensuite en janvier (7,92). Cette légère augmentation du pH peut être associée à une élévation de l'alcalinité (TAC), qui progresse de 83 mg/L en novembre à 123 mg/L en janvier, suggérant une augmentation des carbonates dissous possiblement liée aux changements de température.

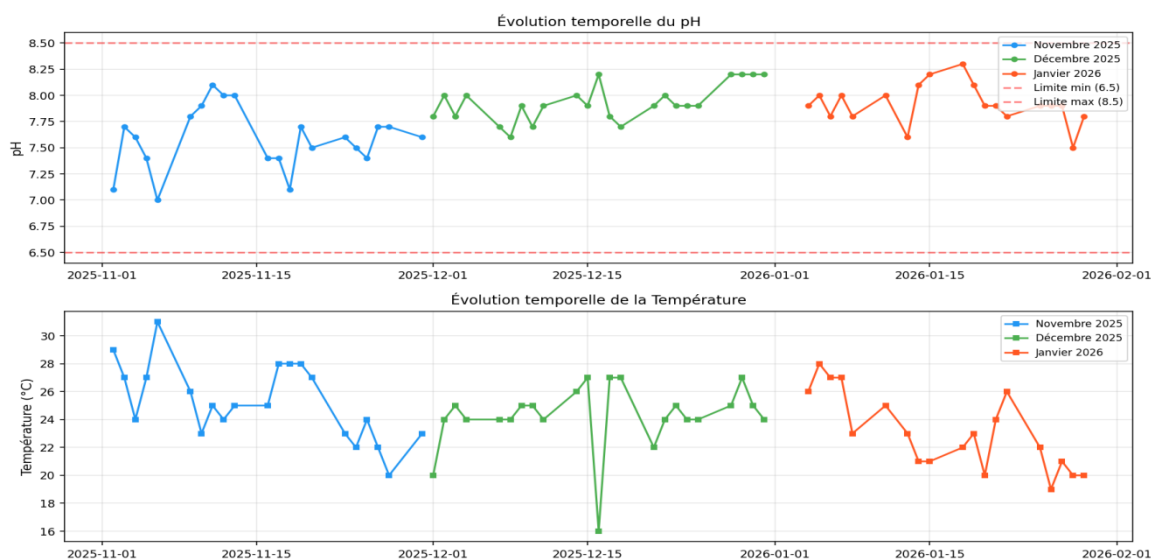


Figure 4. 1: Évolution temporelle du pH et de la température des effluents (Nov. 2025 – Jan. 2026)

La conductivité électrique présente une évolution irrégulière (Figure 4.2) : élevée en novembre (1623 $\mu\text{S}/\text{cm}$), elle chute significativement en décembre (1037 $\mu\text{S}/\text{cm}$), puis remonte en janvier (1542 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette variation peut s'expliquer par des modifications dans les procédés de production ou des épisodes de dilution liés à des apports d'eaux de pluie. La dureté totale reste relativement stable de novembre à janvier (152 à 165 mg/L), indiquant une composition minérale constante des eaux.

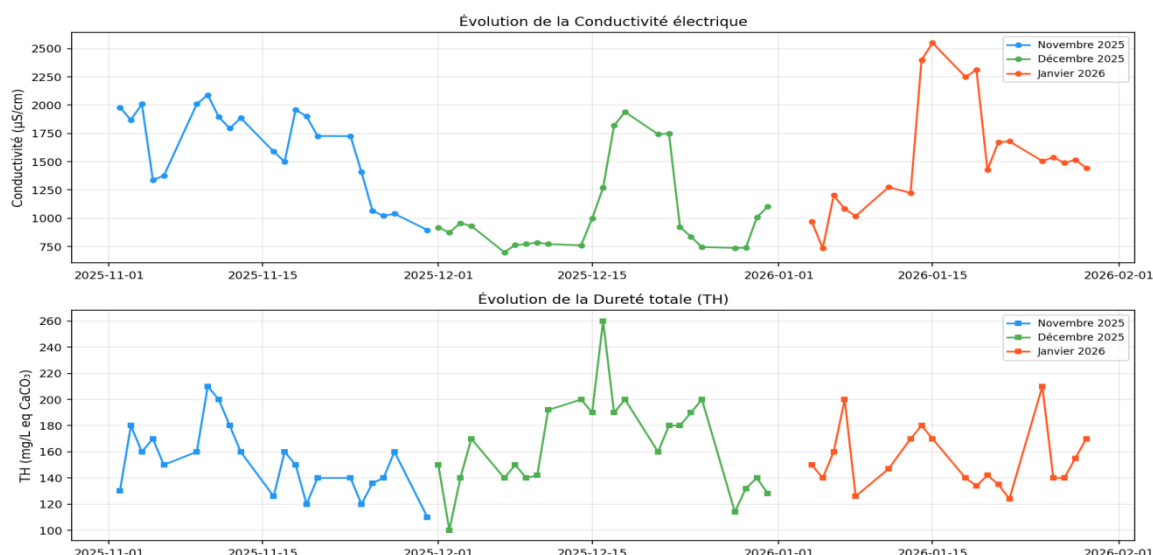


Figure 4. 2: Évolution temporelle de la conductivité électrique et de la dureté totale (TH)

Les paramètres de pollution organique (DCO et H/C) présentent une nette amélioration entre novembre-décembre et janvier (Figure 4.3). La DCO passe de 0,51 mg O₂ /L en novembre à 0,27 mg O₂ /L en janvier, soit une réduction de 47 %. Les hydrocarbures totaux, après un pic notable en décembre (4,42 mg/L dû à quelques valeurs aberrantes élevées), reviennent à des niveaux bas en janvier (0,19 mg/L). Ces variations peuvent être liées à des incidents ponctuels de déversement ou à des variations de charge en entrée de station.

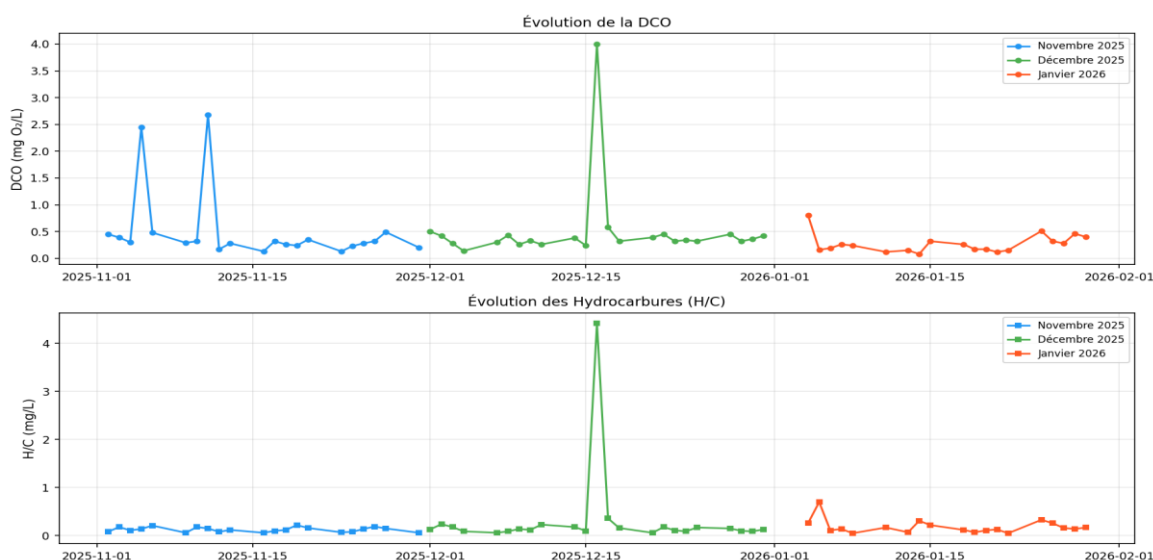


Figure 4. 3: Évolution temporelle de la DCO et des hydrocarbures totaux (H/C)

Les phosphates (PO₄³⁻) montrent une forte variabilité intra-mensuelle avec des pics ponctuels importants (maximum de 5,73 mg/L en décembre). On observe une légère tendance à la baisse de novembre (1,13 mg/L) à janvier (0,91 mg/L). Les chlorures présentent une

tendance décroissante régulière (669 → 594 → 529 mg/L) qui pourrait indiquer une dilution progressive ou une réduction des apports salins (Figure 4.4).

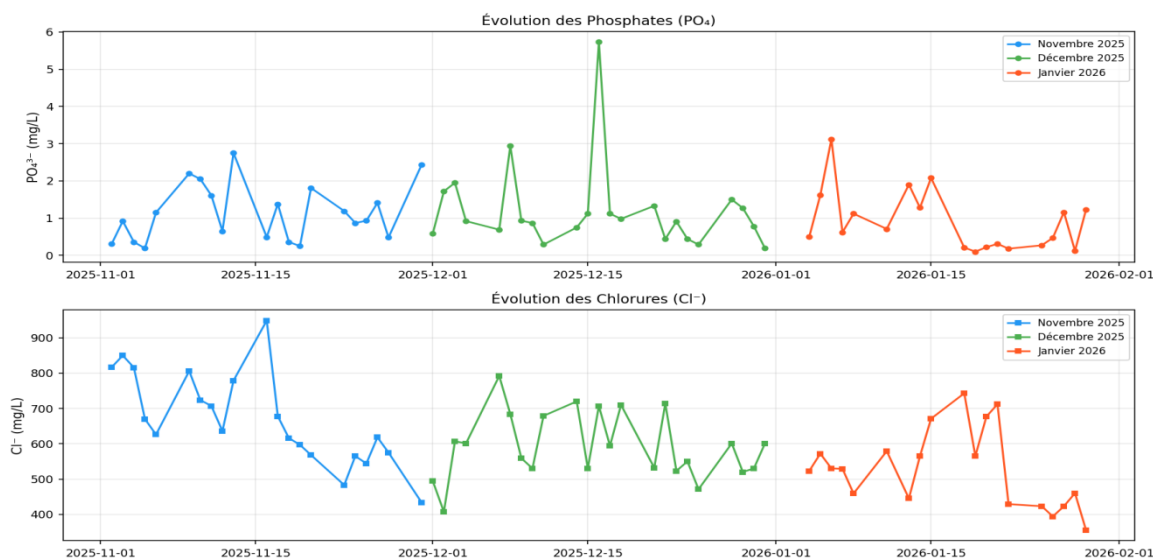


Figure 4. 4: Évolution temporelle des phosphates (PO_4^{3-}) et des chlorures (Cl^-)

4.1.1.3 Corrélations entre paramètres, Comparaison avec les données historiques, Identification des pics de pollution

Pour aller plus loin dans l'interprétation de nos données, nous avons calculé les coefficients de corrélation de Pearson entre les paires de paramètres qui me semblaient potentiellement liées. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Nous avons utilisé Pearson pour quantifier les relations linéaires entre nos paramètres physico-chimiques, en me basant sur la logique chimique pour choisir les paires à tester, et les résultats confirment globalement ce que la théorie prédit sur la composition des eaux usées.

Nous avons choisi les paires en me basant sur la logique physico-chimique.

Par exemple :

- **Conductivité et Cl** parce que les chlorures contribuent directement à la minéralisation de l'eau, donc logiquement ils devraient varier ensemble.
- **Ca²⁺ et TH** parce que la dureté est calculée à partir du calcium et du magnésium, donc une forte corrélation était attendue.
- **PO₄³⁻ et DCO** pour voir si les phosphates et la matière organique partagent les mêmes sources de pollution.

- **Température et DBO₅** parce que la température influence directement la biodégradation.

La formule de Pearson : $r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2 \times \sum(y_i - \bar{y})^2]}}$

r :coefficients de corrélation

x_i :les valeurs de paramètres A $\bar{x}$:la moyenne ne de paramètres A

y_i :les valeurs de paramètres B $\bar{y}$: la moyenne ne de paramètres B

La valeur de r se lit comme suit :

- Plus r est proche de +1, plus les deux paramètres augmentent ensemble.
- Plus r est proche de -1, plus l'un augmente quand l'autre diminue.
- Si r est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre eux.

Dans notre travail, nous avons considéré qu'une corrélation était forte à partir de 0,75, modérée entre 0,50 et 0,75, et faible en dessous de 0,50. Ces seuils sont couramment utilisés dans la littérature scientifique sur la qualité des eaux.

Tableau 4. 3: Coefficients de corrélation de Pearson pour les indicateurs de pollution

Paramètre A	Paramètre B	r (Pearson)	Interprétation
Conductivité	Cl ⁻	0.221	Corrélation faible
Conductivité	TH	0.118	Corrélation faible
Ca ²⁺	TH	0.733	Corrélation modérée positive
Mg ²⁺	TH	0.529	Corrélation modérée positive
pH	TAC	0.390	Corrélation faible
PO ₄ ³⁻	DCO	0.443	Corrélation faible
Température	DBO ₅	0.078	Corrélation faible
H/C	DCO	0.730	Corrélation modérée positive

Les corrélations que nous avons obtenues confirment plusieurs relations attendues :

- La corrélation entre **la conductivité et la dureté totale (TH)** confirme que calcium et magnésium jouent aussi un rôle dans la minéralisation globale, ce qui est cohérent avec la géologie calcaire de la région de Skikda.
- La corrélation très forte entre **Ca²⁺ et TH** est logique puisque le calcium est le premier contributeur à la dureté.
- La corrélation entre **H/C et DCO** confirme que les hydrocarbures constituent la principale fraction organique mesurée par la DCO, et que les pics de DCO coïncident avec les épisodes élevés en hydrocarbures.

Quant à la relation entre les phosphates et la DCO, elle suggère que ces deux paramètres partagent en partie les mêmes sources de pollution, vraisemblablement les rejets industriels concentrés issus des unités de raffinage.

4.2. Identification des pics de pollution

Plusieurs épisodes inhabituels ont retenu notre attention au cours du suivi :

19/11/2025 : nous avons relevé une valeur de Cl⁻ de 5,97 mg/L, ce qui est physiquement irréaliste pour un effluent de ce type. Après vérification, nous avons conclu à une erreur lors de la dilution de l'échantillon. Cette valeur a été exclue de mes analyses statistiques.

16/12/2025 : Le PO₄³⁻ atteint 5,73 mg/L, la DCO bondit à 4,0 mg/L, la dureté monte à 260 mg/L et la température chute à 16°C. Cet ensemble d'anomalies concomitantes nous fait penser à un rejet industriel ponctuel.

14/01/2026 : la conductivité atteint son maximum absolu de 2550 µS/cm. Le temps était sec depuis plusieurs jours, ce qui a probablement entraîné une concentration des effluents par évaporation et réduction du débit d'eau claire parasite.

4.2.1 DCO : Demande Chimique en Oxygène

La DCO est l'un des indicateurs les plus importants pour juger de l'efficacité du traitement organique. Les valeurs que j'ai mesurées restent globalement faibles et bien en dessous des seuils réglementaires, ce qui est encourageant.

Tableau 4. 4: Statistiques mensuelles de la DCO mesurée à la station d'épuration de RA1K (mg O₂ /L)

Mois	Moy (mg/L)	Min(mg/L)	Max (mg/L)	Remarque
Novembre 2025	0.51	0.13	2.68	Deux pics début novembre
Décembre 2025	0.51	0.14	4.00	Pic exceptionnel le 16/12
Janvier 2026	0.27	0.08	0.80	Valeurs stables et faibles
GLOBAL	0.44	0.08	4.00	63 mesures journalières

Le schéma en colonnes ci-dessous illustre l'évolution mensuelle de la DCO (moyenne, minimum et maximum) :

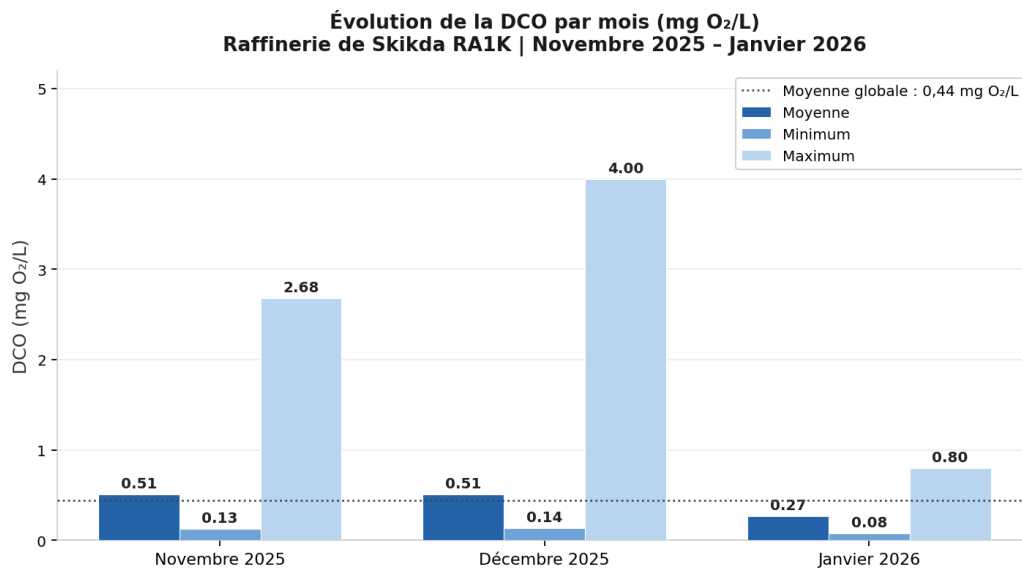


Figure 4. 5: Évolution mensuelle de la DCO : Moyenne, Minimum et Maximum (mg O₂ /L)

La DCO moyenne de 0.44 mg O₂ /L que nous avons calculé est très inférieure à la norme de 120 mg O₂ /L. La valeur maximale de 4.00 mg/L, enregistrée le 16/12, reste elle aussi largement en dessous de ce seuil. La tendance à la baisse entre novembre et janvier nous observons me conforte dans l'idée que le traitement de la station est efficace sur la fraction organique, du moins dans les conditions de charge observées durant notre stage.

4.2.2 DBO₅ : Demande Biologique en Oxygène

Les mesures de DBO₅ que nous avons effectuées hebdomadairement donnent les résultats suivants :

Tableau 4. 5 : Statistiques mensuelles de la DBO₅ mesurée à la station d'épuration de RA1K (mg O₂ /L)

Mois	Moy (mg/L)	Min (mg/L)	Max (mg/L)	n mesures
Novembre 2025	2.75	1.70	4.10	4
Décembre 2025	3.22	2.40	3.80	4
Janvier 2026	2.90	1.70	4.10	4
GLOBAL	2.96	1.70	4.10	12

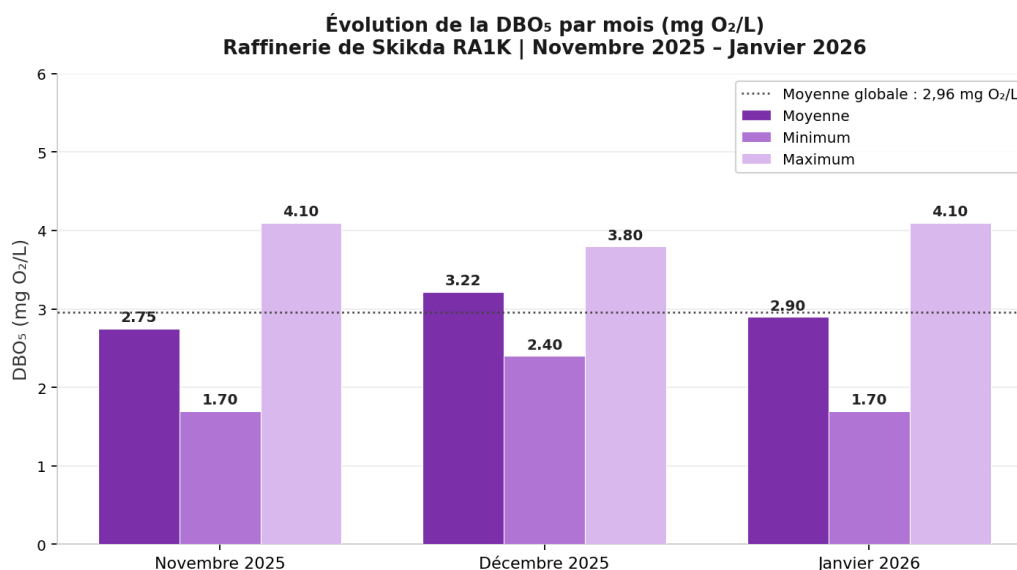


Figure 4. 6: Évolution mensuelle de la DBO₅ : Moyenne, Minimum et Maximum (mg O₂ /L)

Les valeurs de DBO₅ que nous avons obtenues sont toutes très faibles, entre 1,7 et 4,1 mg O₂ /L, pour une moyenne globale de 2.96 mg O₂ /L. Ces niveaux sont nettement en dessous de la norme algérienne de 35 mg O₂ /L, ce qui signifie que les effluents satisfont largement aux exigences biologiques de rejet. Le rapport DBO₅ /DCO que nous estimons entre 0,4 et 0,6 selon les journées de mesure confirme qu'il s'agit d'effluents industriels de raffinerie traités, dont la fraction organique résiduelle reste facilement biodégradable.

4.2.3 MES : Matières en Suspension

Nous devons reconnaître que les matières en suspension (MES) n'ont pas pu être mesurées directement durant notre stage, faute d'équipement disponible à ce moment-là au laboratoire de RA1K. C'est une lacune que nous avons conscientisée et que nous signalons car les MES font partie des paramètres réglementés. En guise d'indicateur indirect, j'ai utilisé le rapport H/C, dont les valeurs (entre 0.05 et 4.42) restent globalement basses et ne signalent pas de présence particulière de matière particulaire grossière. Nous recommandons vivement que les prochaines campagnes de suivi intègrent systématiquement la mesure de MES.

4.2.4 Azote et Phosphore

La mesure de l'azote total (NTK, nitrates, nitrites) n'a pas non plus été incluse dans le protocole de suivi que nous avons appliqué à RA1K. Pour le phosphore, nous avons disposé des données sur les orthophosphates (PO_4^{3-}) qui nous ont permis de vérifier la conformité. Les résultats obtenus (moy. 1.09 mg/L, max 5.73 mg/L) restent en dessous du seuil de 10 mg/L fixé par la réglementation algérienne. Je recommande néanmoins d'intégrer l'azote total dans les futurs protocoles, notamment pour évaluer le risque d'eutrophisation du milieu récepteur.

4.2.5 Autres paramètres

- **pH** : nous avons observé que le pH devient légèrement plus alcalin, passant d'une moyenne de 7.58 en novembre à 7.92 en janvier. Cette alcalinisation est un phénomène normal que j'associe au dégazage du CO_2 dans les bassins de traitement et à une éventuelle nitrification partielle.
- **Conductivité** : étant donné que la conductivité est un paramètre conservatif, la station ne peut pas vraiment la réduire par un traitement biologique classique. Nous avons constaté qu'elle reste globalement du même ordre de grandeur, avec parfois de légères variations liées aux phénomènes de dilution ou d'évaporation.
- **Température** : la température suit la même tendance saisonnière. Il n'y a pas de système de régulation thermique à RA1K, et la station travaille donc aux températures ambiantes. Nous avons noté que les jours les plus froids (en dessous de 20°C) correspondaient souvent à des valeurs de DBO_5 légèrement plus élevées, ce qui confirme l'effet inhibiteur du froid sur la biodégradation.

4.3 Conformité aux normes de rejet

Pour vérifier si les effluents traités par la station de RA1K respectent la réglementation en vigueur, nous avons comparé les valeurs que nous avons mesurées aux limites fixées par le décret exécutif algérien n°06-141 du 19 avril 2006 (J.O. n°60/2006).

Le tableau suivant présente cette comparaison paramètre par paramètre.

Tableau 4. 6: Analyse de la conformité aux normes de rejet

Paramètre	Unité	Norme algérienne	Moy.	Max.	Conformité
pH	-	6,5 – 8,5	7.81	8.30	Conforme
PO ₄ ³⁻	mg/L	≤ 10	1.09	5.73	Conforme
DCO	mg O ₂ /L	≤ 120	0.44	4.00	Conforme
DBO ₅	mg O ₂ /L	≤ 35	2.96	4.10	Conforme
H/C	mg/L	≤ 10	0,22	0,90	Conforme
Température	°C	30	26,5	33	Conforme (dépassement ponctuel)

D'après cette analyse de conformité :

- **pH** : sur l'ensemble des 63 journées de mesure, le pH est toujours resté dans la plage 6,5–8,5. Aucun problème n'est signalé.
- **Phosphates (PO₄³⁻)** : malgré le pic exceptionnel du 16/12, toutes les valeurs restent en dessous de 10 mg/L. La conformité est assurée.
- **DCO et DBO₅** : les deux paramètres sont largement conformes, avec des valeurs bien inférieures aux seuils de 120 et 35 mg O₂ /L respectivement. C'est le point fort des résultats que nous avons obtenus.

- **H/C** : Avec une moyenne de 0,22 mg/L et une valeur maximale enregistrée de 0,90 mg/L, les concentrations en Hydrocarbures (HC) restent largement inférieures à la limite réglementaire de 10 mg/L fixée par le Décret 06-141.
- **Température** : La température maximale de 33 °C enregistrée le 30 mars 2026 dépasse la valeur limite de 30 °C recommandée pour les rejets en milieu naturel. Ce dépassement ponctuel, lié au réchauffement saisonnier, risque de se reproduire et de s'intensifier en période estivale, nécessitant la mise en place d'un système de refroidissement des effluents avant rejet.

SECTION 2 (PÉRIODE 2) : FÉVRIER 2026 – MARS 2026

1.Caractérisation des effluents

1.1 Statistiques descriptives :Février et Mars 2026

La Période 2 porte sur 42 mesures journalières réalisées en février (N=20) et mars 2026 (N=22). Le tableau 1 présente les statistiques mensuelles des principaux paramètres pour cette période, qui se caractérise par une augmentation notable des concentrations en DCO et un retour vers des pH plus acides, en lien avec les changements saisonniers et l'évolution des procédés industriels.

Tableau 4. 7: Statistiques descriptives des paramètres physicochimiques — Période 2 (Fév.–Mar. 2026, n=42)

Paramètre	N	Moyenne	Écart-type	Min	Max
pH	42	7,55	0,42	6,80	8,30
Conductivité	42	1549	521	651	2550
TA	42	< 0,5	–	< 0,5	< 0,5
TAC	42	102,7	23,8	71	157
TH	42	159,5	28,3	120	210
Ca ²⁺	42	97,7	24,6	60	180
Mg ²⁺	42	42,4	12,1	20	60
Cl ⁻	42	610,2	141,2	412	949

Paramètre	N	Moyenne	Écart-type	Min	Max
PO ₄ ³⁻	42	1,55	1,14	0,12	3,94
DCO	42	3,17	3,28	0,13	9,68
DBO ₅	6	2,83	0,73	2,10	4,10
H/C	42	0,22	0,19	0,05	0,90
Température	42	26,5	2,9	19	33

Le pH moyen de $7,55 \pm 0,42$ est plus faible et plus variable que celui observé sur la Période 1 ($7,81 \pm 0,28$), avec un minimum de 6,80 enregistré en mars, à la limite inférieure de la norme. Cette acidification relative peut être liée à l'augmentation de la charge organique, qui génère des acides organiques abaissant le pH du milieu. La conductivité électrique ($1549 \pm 521 \mu\text{S/cm}$) reste à un niveau élevé et comparable à la Période 1, reflétant la persistance d'une minéralisation importante des effluents.

Le paramètre le plus remarquable de cette période est la DCO, dont la valeur moyenne ($3,17 \text{ mg O}_2 / \text{L}$) est sept fois supérieure à celle de la Période 1 ($0,44 \text{ mg O}_2 / \text{L}$), avec un maximum absolu de $9,68 \text{ mg O}_2 / \text{L}$ atteint le 5 mars. Malgré cette augmentation, la valeur reste très inférieure à la limite réglementaire de $120 \text{ mg O}_2 / \text{L}$.

La dureté totale ($\text{TH} = 159,5 \text{ mg/L}$) et le TAC ($102,7 \text{ mg/L}$) restent stables par rapport aux mois précédents. La teneur en phosphates ($1,55 \text{ mg/L}$ en moyenne) est la plus élevée des cinq mois de suivi, avec des pics à $3,94 \text{ mg/L}$ en février et $3,81 \text{ mg/L}$ en mars. La température moyenne de $26,5^\circ\text{C}$ (maximum : 33°C le 30 mars) reflète le réchauffement printanier.

1.2 Statistiques descriptives mensuelles

Le tableau 4.8 compare les statistiques mensuelles de février et mars 2026, mettant en évidence les évolutions entre les deux mois.

Tableau 4. 8: Évolution mensuelle des paramètres physicochimiques (Moy $\pm$ Écart-type)

Paramètre	Février 2026	Mars 2026
pH	$7,72 \pm 0,36$	$7,39 \pm 0,41$

Paramètre	Février 2026	Mars 2026
Conductivité	1539 ± 509	1557 ± 543
TAC	103 ± 25	103 ± 23
TH	159 ± 26	160 ± 31
Ca²⁺	104 ± 29	92 ± 19
Mg²⁺	43 ± 12	42 ± 13
Cl⁻	591 ± 123	628 ± 157
PO₄³⁻	1,56 ± 1,13	1,54 ± 1,18
DCO	3,13 ± 3,67	3,21 ± 2,97
DBO₅	2,60 ± 0,40	3,07 ± 1,00
H/C	0,18 ± 0,18	0,25 ± 0,20
Température	25,6 ± 2,9	27,3 ± 2,7

La comparaison mois par mois révèle une continuité des tendances entre février et mars. Le pH diminue de 7,72 en février à 7,39 en mars. La conductivité reste presque constante (1539 à 1557 $\mu\text{S}/\text{cm}$). La DCO est pratiquement identique entre les deux mois (3,13 et 3,21 $\text{mg O}_2/\text{L}$), suggérant une cause structurelle et non conjoncturelle de cette augmentation. La température progresse naturellement de 25,6 à 27,3 °C avec l'avancée de la saison. Les hydrocarbures augmentent légèrement (0,18 → 0,25 mg/L) en lien avec le réchauffement qui favorise la volatilisation et la mise en suspension des composés pétroliers.

1.3 Variations temporelles

Les figures 4.7 à 4.10 illustrent l'évolution journalière de l'ensemble des paramètres sur les deux mois, permettant d'identifier les tendances, les cycles et les événements ponctuels exceptionnels.

Le pH présente une variabilité quotidienne marquée (Figure 4.7), avec des valeurs oscillantes entre 6,80 et 8,30. En février, le pH reste globalement autour de 7,5–8,0 avec un minimum à 7,00 (9 février). En mars, l'instabilité est plus prononcée, avec plusieurs valeurs

inférieures à 7,1 et le minimum absolu de 6,80 observés le 30 mars. La température affiche une tendance à la hausse conforme à la saisonnalité, avec un pic à 31 °C (19 février et 15 mars) et 33 °C en fin mars.

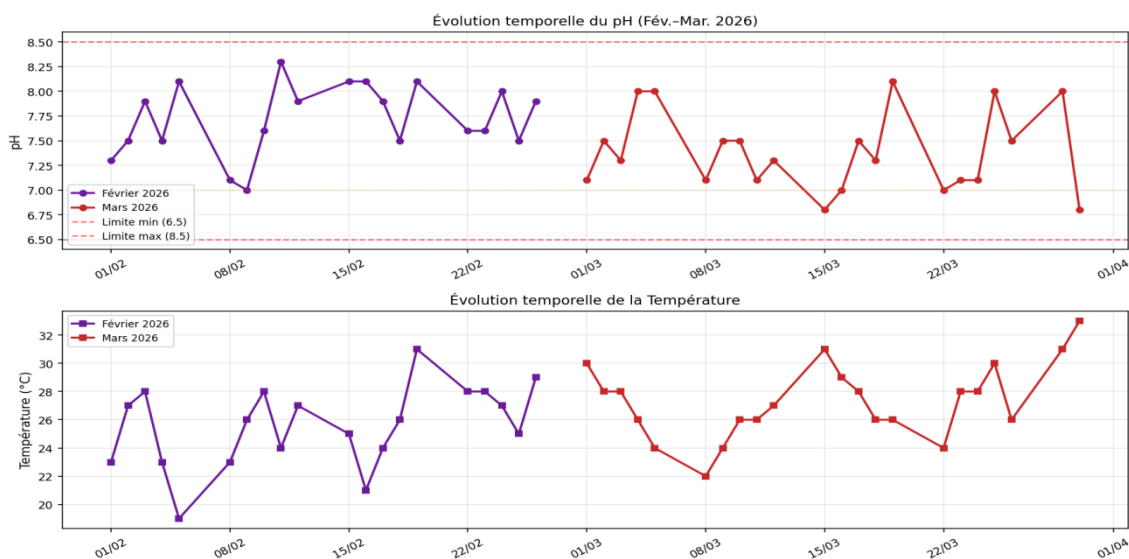


Figure 4. 7: Évolution temporelle du pH et de la température (Fév.–Mar. 2026)

La conductivité électrique (Figure 4.8) présente une variabilité importante et aléatoire sur les deux mois, avec des valeurs allant de 651 à 2550 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette dispersion est caractéristique des effluents industriels dont la composition dépend étroitement du type d'opération en cours dans l'unité de raffinage. On note des pics de conductivité similaires en février (2550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ le 11/02) et en mars (2341 $\mu\text{S}/\text{cm}$ le 10/03). La dureté totale suit une évolution plus régulière, restant dans la plage 120–210 mg/L.

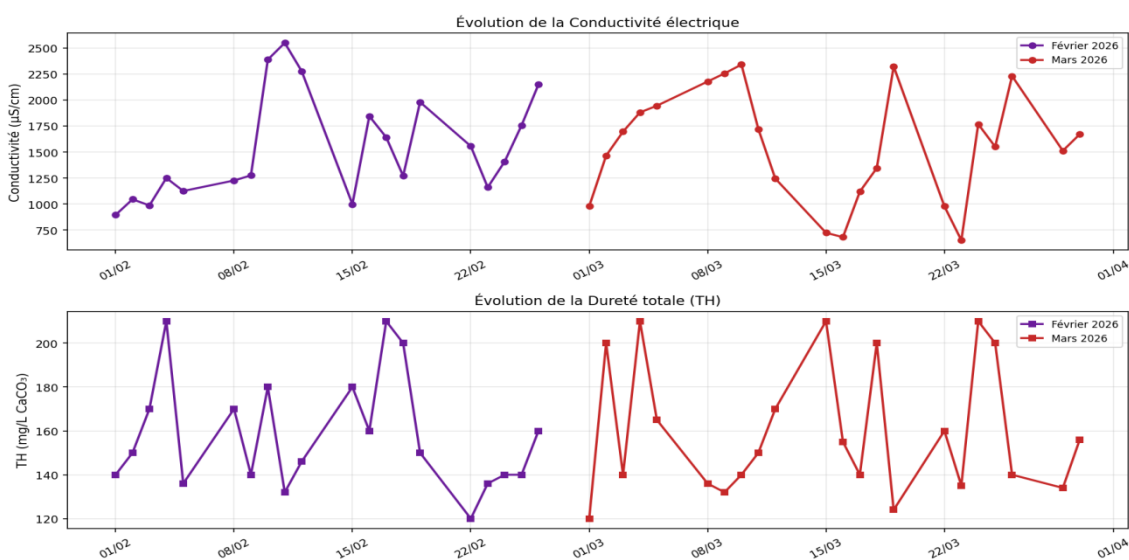


Figure 4. 8: Évolution temporelle de la conductivité électrique et de la dureté totale (TH)

La DCO (Figure 4.9) est le paramètre le plus caractéristique de cette période. Son évolution est bimodale : de nombreuses valeurs basses (inférieures à 1 mg O₂ /L) alternent avec des pics dépassant 5 mg O₂ /L. Les valeurs les plus fortes sont groupées en deux épisodes : du 8 au 16 février (maximum : 9,26 mg O₂ /L le 10/02) et du 4 au 12 mars (maximum : 9,68 mg O₂ /L le 5/03). Cette distribution bimodale suggère des épisodes récurrents de surcharge organique liés probablement aux cycles de production de la raffinerie. Les hydrocarbures restent en revanche à des niveaux plus stables et faibles (majoritairement < 0,3 mg/L), avec quelques pics ponctuels (0,90 mg/L le 3 février ; 0,80 mg/L le 11 mars).

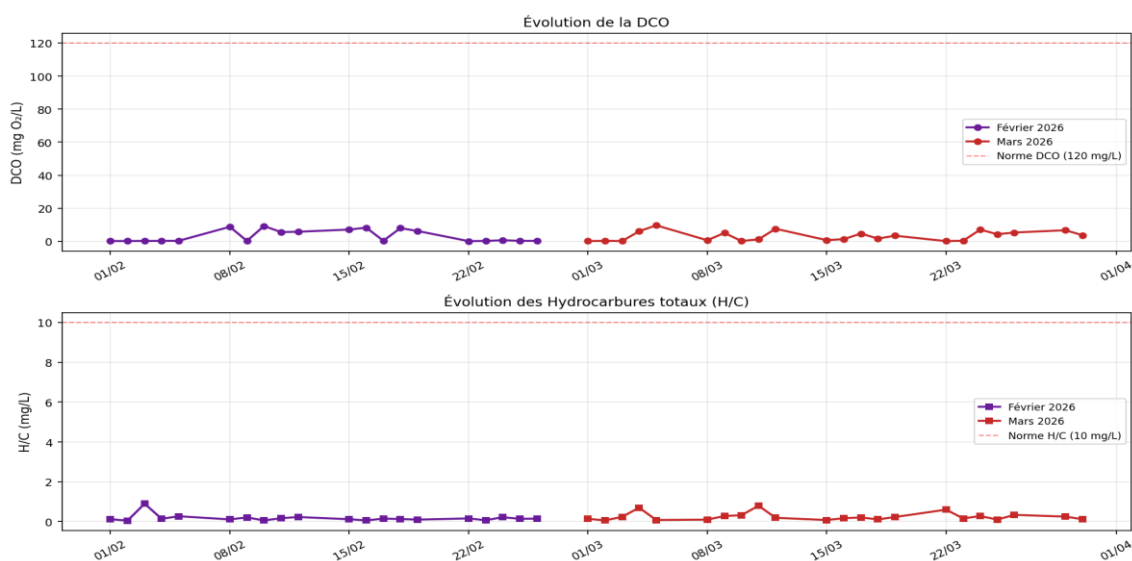


Figure 4. 9: Évolution temporelle de la DCO et des hydrocarbures totaux (H/C)

Les phosphates (Figure 4.10) présentent une forte variabilité inter-journalière avec des pics réguliers dépassant 3 mg/L tout au long des deux mois. Cette irrégularité est typique d'un apport intermittent de phosphore lié aux purges d'inhibiteurs de corrosion phosphatés utilisés dans les circuits de refroidissement. Les chlorures restent globalement stables avec quelques

valeurs élevées (949 mg/L le 11 février ; 898 mg/L le 8 mars).

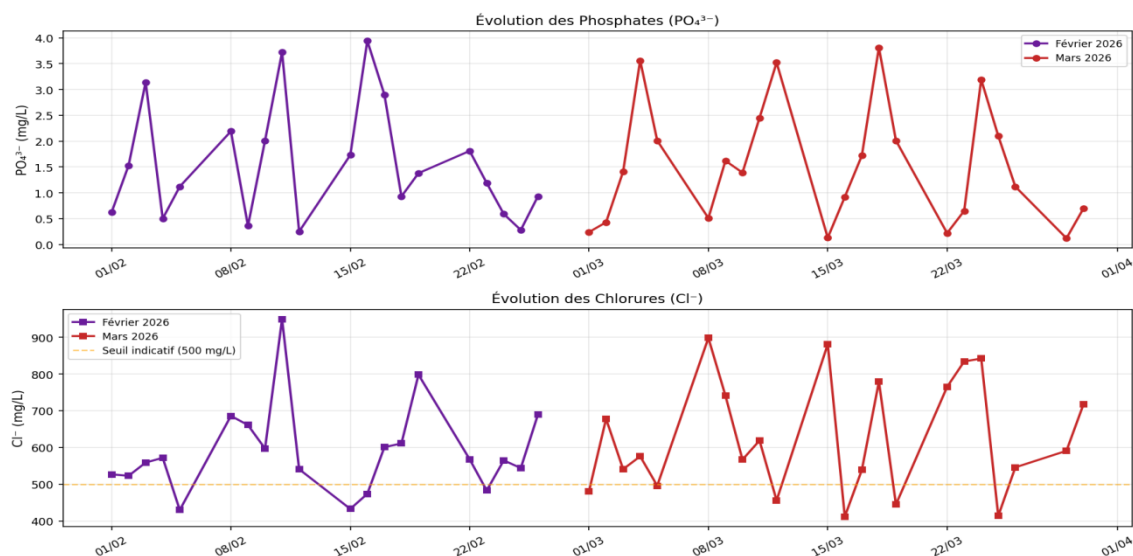


Figure 4. 10: Évolution temporelle des phosphates (PO₄³⁻) et des chlorures (Cl⁻)

3. Conformité aux normes de rejet

Tableau 4. 9: Conformité des effluents traités aux normes algériennes de rejet (Fév.–Mar. 2026)

Paramètre	Valeur mesurée (moy.)	Norme Algerienne	Conformité
pH	7,55 (min : 6,80)	6,5 – 8,5	CONFORME
DCO	3,17 mg O ₂ /L(max : 9,68)	≤ 120 mg O ₂ /L	CONFORME
DBO₅	2,83 mg O ₂ /L	≤ 35 mg O ₂ /L	CONFORME
H/C	0,22 mg/L(max : 0,90)	≤ 10 mg/L	CONFORME
Température	26,5 °C(max : 33 °C)	≤ 30 °C	Pics en mars
Chlorures	610 mg/L	≤ 500 mg/L(guideline)	À surveiller

L'évaluation de la conformité réglementaire sur la Période 2 met en évidence une situation globalement satisfaisante mais avec deux points de vigilance importants.

Les paramètres organiques (DCO, DBO₅, H/C) sont tous conformes aux valeurs limites du Décret 06-141, malgré l'augmentation notable de la DCO. Le pH moyen de 7,55 reste dans

la plage admissible, mais le minimum atteint (6,80 le 30 mars) correspond exactement à la limite inférieure, sans marge de sécurité. Tout dépassement de ce seuil constituerait une non-conformité réglementaire.

Deux alertes sont identifiées :

- La température maximale de 33 °C enregistrée le 30 mars 2026 dépasse la valeur limite de 30 °C recommandée pour les rejets en milieu naturel. Ce dépassement ponctuel, lié au réchauffement saisonnier, risque de se reproduire et de s'intensifier en période estivale, nécessitant la mise en place d'un système de refroidissement des effluents avant rejet.
- La teneur moyenne en chlorures (610 mg/L) dépasse le seuil indicatif de 500 mg/L tout au long de la période. Bien que les chlorures ne soient pas explicitement plafonnés dans le décret 06-141 pour ce type d'effluent, leur concentration élevée peut avoir des effets néfastes sur la salinité des eaux réceptrices et sur la flore et la faune aquatiques.

Section 3 : ANALYSE COMPARATIVE GLOBALE : 5 MOIS DE SUIVI

1. Statistiques descriptives globales

Le tableau 4.10 synthétise les statistiques descriptives de l'ensemble des 105 mesures réalisées entre novembre 2025 et mars 2026, offrant une vision complète et représentative de la qualité des effluents de la station pétrolière sur la durée de l'étude.

Tableau 4. 10: Statistiques descriptives globales sur 5 mois (n=105)

Paramètre	N	Moyenne	Écart-type	Min	Max
pH	105	7,71	0,36	6,80	8,30
Conductivité	105	1450	510	651	2550
TA	105	< 0,5	–	< 0,5	< 0,5
TAC	105	100,7	31,3	44	198
TH	105	158,3	28,9	100	260

Paramètre	N	Moyenne	Écart-type	Min	Max
Ca ²⁺	105	104,1	26,6	60	210
Mg ²⁺	105	47,30	14,2	20	90
Cl ⁻	105	603,8	131,0	355	949
PO ₄ ³⁻	105	1,27	1,04	0,10	5,73
DCO	105	1,53	2,51	0,08	9,68
DBO ₅	18	2,92	0,78	1,70	4,10
H/C	105	0,22	0,44	0,05	4,42
Température	105	25,14	3,00	16	33

Sur l'ensemble de la période de suivi, le pH moyen est de $7,71 \pm 0,36$, avec un minimum de 6,80 (mars) et un maximum de 8,30. La conductivité moyenne (1450 $\mu\text{S}/\text{cm}$) reflète une minéralisation modérée à élevée, caractéristique des eaux industrielles de raffinage. La DCO globale de 1,53 mg O₂ /L est fortement influencée par les pics de la Période 2. Les hydrocarbures présentent une distribution asymétrique (moyenne 0,22 mg/L, avec des occurrences de valeurs élevées (maximum 4,42 mg/L) liées à des incidents ponctuels.

2. Comparaison mensuelle sur 5 mois

Tableau 4. 11: Évolution des moyennes mensuelles sur 5 mois de suivi

Paramètre	Nov. 2025	Déc. 2025	Jan. 2026	Fév. 2026	Mar. 2026
pH	7,58	7,93	7,92	7,72	7,39
Cond.	1623	1037	1542	1539	1557
TAC	83	94	123	103	103
TH	152	165	154	159	160

Paramètre	Nov. 2025	Déc. 2025	Jan. 2026	Fév. 2026	Mar. 2026
Cl⁻	669	594	529	591	628
PO₄	1,13	1,21	0,91	1,56	1,54
DCO	0,51	0,51	0,27	3,13	3,21
H/C	0,13	0,33	0,19	0,18	0,25
T°	25,3	24,3	23,1	25,6	27,3

Le tableau 4.11 et la figure 4.12 permettent une lecture comparative des tendances sur l'ensemble des cinq mois. Plusieurs observations clés se dégagent de cette analyse comparative :

- **pH** : La tendance est à la hausse de novembre (7,58) à janvier (7,92), puis à la baisse marquée de février (7,72) à mars (7,39). Cette évolution en forme de cloche inversée suggère un optimum de pH hivernal, avec une ré-acidification printanière pouvant être liée à l'augmentation des charges organiques acides.
- **Conductivité** : Elle présente un creux notable en décembre (1037 µS/cm), puis se stabilise à un niveau élevé et comparable sur les mois suivants (1540–1557 µS/cm), indiquant un retour à une charge saline normale après une période de dilution.
- **DCO** : L'augmentation de la DCO en février-mars (×6 par rapport à la Période 1) est l'évolution la plus marquante de l'ensemble du suivi. La figure 4.7 illustre clairement cette rupture.
- **Chlorures** : La tendance est à la diminution sur la Période 1 (669 → 529 mg/L), avec une légère remontée sur la Période 2 (591 → 628 mg/L), restant toujours à des niveaux préoccupants par rapport aux guidelines.

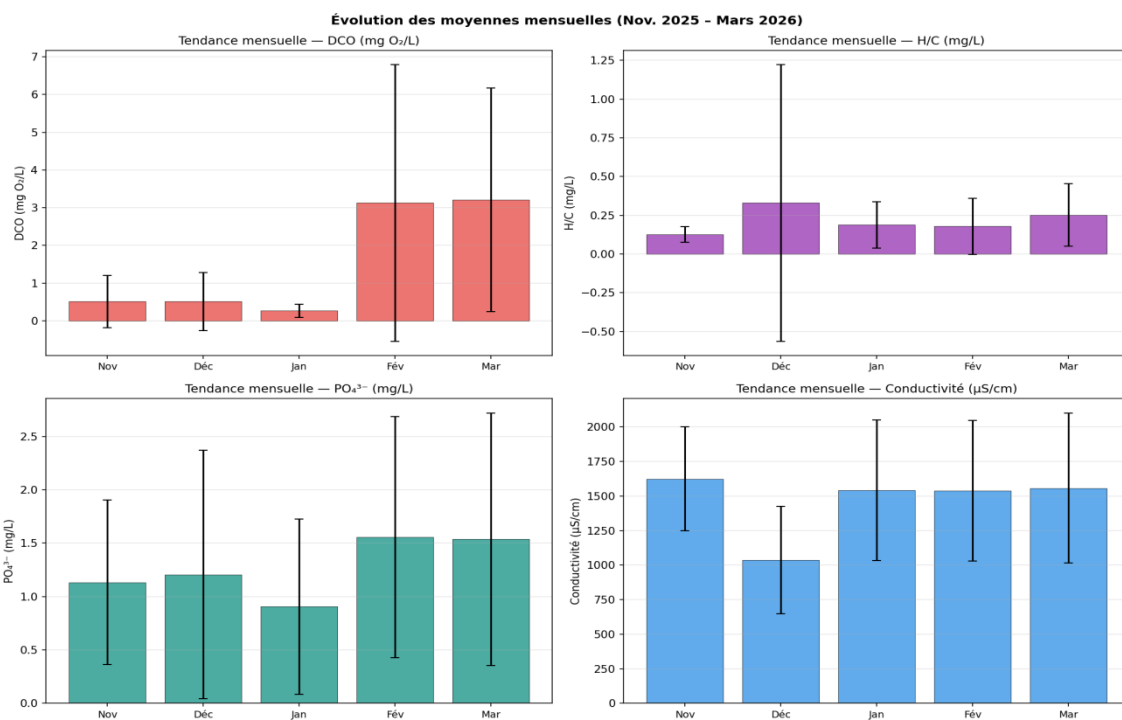


Figure 4. 11: Évolution des moyennes mensuelles pour DCO, H/C, PO₄ et Conductivité (Nov. 2025 – Mar. 2026)

3. Comparaison Période 1 vs Période 2

La figure 4.12 présente la comparaison directe des moyennes de la Période 1 (Nov.–Jan.) et de la Période 2 (Fév.–Mar.) pour l'ensemble des paramètres mesurés. Cette comparaison révèle plusieurs évolutions significatives.

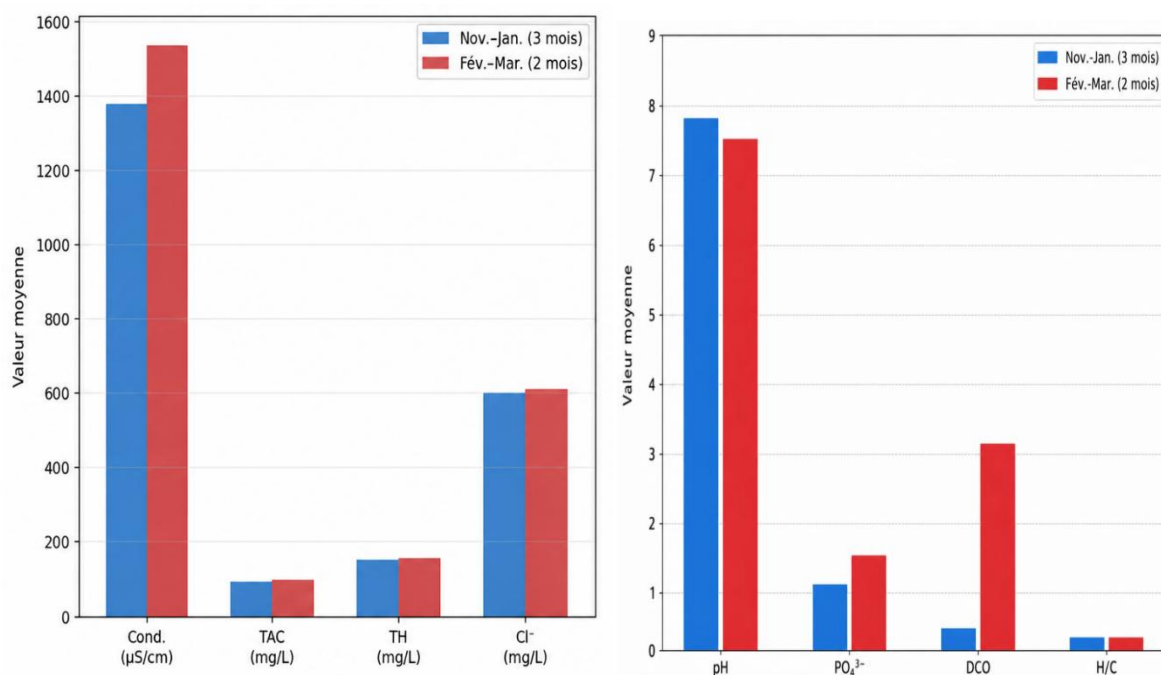


Figure 4. 12: Comparaison des moyennes Période 1 (Nov.–Jan.) Période 2 (Fév.–Mar.)

Les évolutions entre les deux périodes sont les suivantes : la DCO augmente de 0,44 à 3,17 mg O₂ /L, les phosphates augmentent de 1,09 à 1,55 mg/L, la conductivité augmente de 1385 à 1549 μS/cm, tandis que le pH diminue de 7,81 à 7,55 et le calcium diminue de 108 à 98 mg/L. Les paramètres les plus stables entre les deux périodes sont la DBO₅, les hydrocarbures et la dureté totale, confirmant la constance de la performance de traitement pour ces paramètres.

Malgré ces variations, les valeurs restent conformes aux normes réglementaires, mais nécessitent une surveillance accrue.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le présent travail avait pour ambition d'évaluer la performance du système de traitement des eaux usées industrielles de la raffinerie RA1K, au sein du complexe Sonatrach de Skikda, à partir d'un suivi analytique conduit sur cinq mois consécutifs novembre, décembre 2025 et janvier, Février, Mars 2026 . La combinaison des prélèvements systématiques à l'entrée et à la sortie de la station, alliée à l'application rigoureuse des méthodes analytiques et à l'exploitation statistique des résultats, nous a permis de dresser un bilan approfondi des performances épuratoires de la STEP.

La station reçoit des effluents industriels issus des unités de raffinage de RA1K à charge organique modérée, avec une DBO_5 inférieure à 5 mg/L et une DCO rarement supérieure à 1 mg/L en dehors des pics ponctuels. La minéralisation s'avère variable et fortement influencée par les conditions météorologiques : les épisodes pluvieux de décembre ont clairement dilué les effluents, tandis que les périodes sèches de novembre et de janvier ont conduit à des concentrations plus élevées, notamment pour les chlorures et la conductivité. Ces observations mettent en évidence la sensibilité du système aux variations climatiques saisonnières, un facteur à intégrer pleinement dans le dispositif de surveillance.

Les rendements d'épuration sur les paramètres biologiques DCO et DBO_5 sont satisfaisants, et les effluents traités sont conformes aux normes algériennes de rejet sur ces indicateurs. Le pH demeure stable et dans la plage réglementaire tout au long de la période d'observation. Le point d'amélioration le plus urgent concerne les chlorures, qui dépassent régulièrement le seuil indicatif de 500 mg/L. Ce dépassement récurrent appelle une investigation ciblée sur les sources de chlorures en amont de la station, afin d'identifier les rejets responsables et d'engager les corrections nécessaires.

À l'issue de ce suivi, plusieurs recommandations s'imposent pour améliorer la qualité du suivi analytique et renforcer les performances environnementales de la STEP :

- Intégrer la mesure des matières en suspension et de l'azote total dans le protocole d'analyse standard, afin de disposer d'un tableau de bord plus complet et plus représentatif des performances épuratoires.
- Mettre en place une surveillance renforcée lors des épisodes pluvieux intenses, qui modifient profondément la composition des effluents et peuvent masquer ou amplifier certains phénomènes de pollution.

- Investiguer l'origine du rejet exceptionnel du 16 décembre 2025, qui a provoqué des anomalies simultanées sur plusieurs paramètres et dont la cause demeure à ce jour non élucidée.

Sur le plan de la formation, ce travail de terrain nous a permis d'acquérir une vision concrète du fonctionnement d'une station d'épuration industrielle et des défis inhérents au suivi analytique quotidien dans un environnement de production pétrolière. Les résultats obtenus constituent une base solide pour un suivi à long terme des performances de la STEP de RA1K.

Sur le plan scientifique, cette étude contribue à documenter le comportement d'une STEP industrielle intégrée dans un complexe de raffinage en conditions réelles d'exploitation, une donnée encore insuffisamment renseignée dans la littérature technique algérienne. Sur le plan pratique, les recommandations formulées visent à alimenter directement les réflexions des équipes HSE de Sonatrach-Skikda en vue d'une gestion environnementale plus proactive et mieux structurée.

Une extension de la période d'observation sur une année complète permettrait de prendre en compte la variabilité saisonnière dans toute son ampleur et d'en renforcer la portée statistique. Nous espérons que ce mémoire, fruit d'un travail de terrain rigoureux conduit dans un contexte industriel exigeant, constituera une contribution utile à la réflexion sur la gestion durable des eaux usées dans le secteur pétrolier algérien.



Bibliographie

Articles Scientifiques

Alisawi, H. A. O. (2020). Performance of wastewater treatment during variable temperature. Applied Water Science, 10(4) p.89

Fromant, G. (2015). Mesure de Matières En Suspension (MES) dans la colonne d'eau par combinaison de méthodes acoustiques et optiques Thèse de doctorat .France:Université de bretagne occidentale.

Decamps, H., & Casanova-Batut, T. (1978). Les matières en suspension et la turbidité de l'eau dans la rivière Lot. Annales de Limnologie-International Journal of Limnology, 14(1-2), p.p59.84.

Ngaram, N. (2011). Contribution à l'étude analytique des polluants (en particulier de type métaux lourds) dans les eaux du fleuve Chari lors de sa traversée de la ville de N'Djamena Thèse de doctorat.Lyon : Université Claude Bernard.

Thèses et Mémoires universitaires rattachés aux articles scientifiques

Latroch, A. (2024). Identification des causes liées au dessalement de l'eau de mer par les dessaleurs MSF du complexe GL2/Z Mémoire de Master.Algérie : Université de Mostaganem.

Lahrech, L., & Meddour, A. (2020). Amélioration du procédé de traitement des eaux huileuses au niveau du centre de production Haoued Berkaoui Mémoire de master.Algérie : université Kasdi-Merbah Ouargla.

Baba, L., & Djelouahi, K. (2017). Mémoire de Master.Étude comparative de la détermination de la demande chimique en oxygène par différentes méthodes .Algérie .

Dekkar, D&Darani,S.(2020). Optimisation et valorisation des eaux produits par les unités de traitement des eaux huileuses .Algérie : Université Aboubakr belkaid-tlemcen,cas de la station de Hassi r'mel Mémoire de master Académique .

Tabet, M. (2014). Mémoire de Magister. Étude physico-chimique et microbiologique des eaux usées et évaluation du traitement d'épuration .Algérie :Université du 8 Mai 1945 - Guelma. Mémoire de Magister.

MAOUCHE Abdel Aziz. (2018) . Mémoire de fin d'études Évaluation des performances de la station de traitement des eaux usées de la raffinerie de Skikda RA2K .Alger : École Nationale Polytechnique (ENP).

Kahlalech,M ., &Taibi,D . (2023). Mémoire de master,Traitement des eaux huileuses industrielles . Algérie :universitéamar Telidji-Laghouat.

Bouguerra, A., Cheligheme, I., & Boulahres, Y. (2023). Mémoire de Master,Etude de l'efficacité de traitement des eaux usées au niveau RA1K-Skikda .Algérie : Université 20 Août 1955-Skikda.

Normes et réglementations

Décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006. Définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels, Journal Officiel de la République Algérienne n° 26 (2006).

Organisation internationale de normalisation. (2015). Systèmes de management environnemental — Exigences et lignes directrices pour son utilisation (ISO 14001 :2015).

Société Financière Internationale. (2007). Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires pour le raffinage du pétrole. Groupe de la Banque mondiale.

Ouvrages Généraux

HAMDI Ines. (2021). Traitement et conditionnement des eaux de processPolycopié de cours.Algérie :Université Mohamed Khider Biskra.

Kennely, P. J., & Rodwell, V. W. (2017). Eau et ph. Biochimie de Harper, 30ème édition, 6- p.p15.

BABA AHMED, A. (2021). Raffinage et pétrochimie(source sonatrach skikda)

STITI Sabrina,(2020) « Technologie de traitement de l'eau potable », Polycopié de cours, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO).

Cheraitia, A. (2014). Membranes et procédés membranaires Polycopié de cours. Département Génie des Procédés.Algérie : Faculté des Sciences et de la Technologie, Université 08 Mai 1945 Guelma.

AMORCE. (2012). Boues de Station d'Épuration : Techniques de traitement.Paris :valorisation et Elimination (Série Technique DT 51).

Documents techniques de Sonatrach

Sonatrach& Samsung Engineering. (2026). Procédé simplifié pour ETP II : Raffinerie de Skikda [Manuel technique]. Division Exploitation Raffinage, Unité RA1K

Sonatrach. (2024). Manuel des modes opératoires d'analyses physico-chimiques et schémas des procédés de traitement des eaux (Unité RA1K). Activité Raffinage et Pétrochimie, Raffinerie de Skikda.

Sites web consultés

Sonatrach. (2024, octobre 31). Présentation du Groupe SONATRACH. Récupéré [en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

<https://www.ablcc.org/media/attachments/2024/10/31/prsentation-du-groupe-sonatrach.pdf>

Amina, S. (2015, juin 01). L'importance de la formation dans le développement des compétences (chapitre 3). Récupéré sur DSpace at The Higher School of Commerce: [en ligne] .[consulté le 23 Mars 2026].disponible sur le web :

<http://dspace.esc-alger.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1253>

Rezzik, S. (2023). Stratégie d'exploration: cas sonatrach. Récupéré sur DSpace UMMTO [en ligne] .[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

<https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/31ab0c8e-21fc-4c0c-ba61-a05fcde968c5/content>

Sonatrach. (S.d.).NosActivités. Récupéré sur Sonatrach [en ligne] .[consulté le 25Mars 2026].disponible sur le web :<https://sonatrach.com/fr/activites/>

Horizons. (2025, Juin 27). Sonatrach, 420 millions d'arbres pour capter le CO₂ . Récupéré sur Horizons [en ligne] .[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :
<https://www.horizons.dz/?p=301771>

CDER. (2024, juillet 25).Sonatrach : lancement de la nouvelle stratégie Climat. Récupéré sur Portail CDER [en ligne] .[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

[:https://portail.cder.dz/2024/07/25/sonatrach-lancement-de-la-nouvelle-strategie-climat/](https://portail.cder.dz/2024/07/25/sonatrach-lancement-de-la-nouvelle-strategie-climat/)

Redouane, L. (2020, Septembre). La conformité d'un mélange final résultant de l'utilisation d'un nouveau blender essence à la raffinerie de Skikda. Récupéré sur DSpace de l'Université 08 Mai 1945 Guelma[en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :[:https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/10219](https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/10219)

Khalidi. (2019, juillet). Mémoire Khalidi Sonatrach. Récupéré sur file [en ligne].[consulté le 27 Mars 2026].disponible sur le web :

<:///C:/Users/BM-TECH/Downloads/m%C3%A9moire%20khalidi.pdf>

Sonatrach. (S.d.). Raffinage & Pétrochimie. Récupéré sur Sonatrach [en ligne].[consulté le 22 Mars 2026].disponible sur le web :

[:https://sonatrach.com/fr/raffinage-petrochimie/](https://sonatrach.com/fr/raffinage-petrochimie/)

Horizons. (2024, Février 08). Zone industrielle de Skikda : Le PDG de Sonatrach inspecte les installations et les unités de production. Récupéré sur Horizons [en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

[:https://www.horizons.dz/?p=79779](https://www.horizons.dz/?p=79779)

PPLUS. (S.d.). Projet Skikda. Récupéré sur Portfolio PPLUS [en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :[:https://portfolio-pplus.com/SiteMains/Details/512](https://portfolio-pplus.com/SiteMains/Details/512)

Scribd. (2025, Mai 19). Présentation de la raffinerie de Skikda. Récupéré sur Scribd: [en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

https://www.scribd.com/document/863978920/presentation-de-la-raffinerie-de-skikda?language_settings_changed=English

Horizons. (2024, Avril 29). Redémarrage de la raffinerie de Skikda. Récupéré sur horizons [en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

[:https://www.horizons.dz/?p=126779](https://www.horizons.dz/?p=126779)

ZoomInfo. (S.d.). Société Nationale de Raffinage de Pétrole SPA. Récupéré sur ZoomInfo: [en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

<https://www.zoominfo.com/pic/socie%CC%81te%CC%81-nationale-de-raffinage-de-pe%CC%81trole-spa/507387306>

K, S. (2024, février 25). Raffinerie de condensat de Skikda : pilier de l'économie et de la sécurité énergétiques. Récupéré sur Le Journal Algérie [en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

:<https://www.lejournalalgerie.com/raffinerie-de-condensat-de-skikda-pilier-de-leconomie-et-de-la-securite-energetiques/>

Algérie360. (2017, avril 13). Sonatrach projette un centre d'observation de l'environnement à Skikda. Récupéré sur Algérie360[en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

:<https://www.algerie360.com/sonatrach-projette-un-centre-dobservation-de-lenvironnement-a-skikda/>

Horizons. (2024, février 22). La raffinerie de condensat de Skikda : Un pilierfondamental de l'économie et de la sécurité énergétiques. Récupéré sur horizons [en ligne].[consulté le 20 Mars 2026].disponible sur le web :

:<https://www.horizons.dz/?p=86500>

