

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'études en vue de l'obtention du diplôme de d'ingénieur d'état

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Traitement et réutilisation des eaux usées

Thème :

Vers une STEP durable en zone saharienne :
Evaluation environnementale et électro-énergétique de
la STEP Hassi R'mel- Sonatrach

Présenté par :

CHAITER Khouloud & KHELFAOUI Faten

Soutenu le 27/06/2026, devant le jury composé de :

M, Mme **GHAZALI Katia**

MCB

ENSSMAL Président

M, **MAZIGHI Hichem**

Docteur

GCB-DTE Promoteur

M , Mme **BENTABA Aicha**

MAA

ENSSMAL Co-Promoteur

M, Mme **CHARIFI Salima**

MCB

ENSSMAL Examineur

Année universitaire: 2025- 2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
Bismillahir Rahmanir Rahim

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je remercie **Dieu**, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail et accomplir mon parcours universitaire. J'exprime ma profonde gratitude à **l'École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL)** pour la qualité de la formation dispensée durant ces cinq années d'études, qui m'ont permis d'acquérir des connaissances solides ainsi que les compétences indispensables à mon développement académique et professionnel.

Mes sincères remerciements s'adressent également au **Réseau Thématique de Traitement et de Réutilisation des Eaux Usées** pour la richesse des enseignements et l'accompagnement scientifique dont j'ai bénéficié au cours des trois années de spécialisation.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadrant, **M. Mazighi Hichem**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa rigueur scientifique et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères vont également à ma co-encadrante, Mme **Bentabba Aïcha**, pour son accompagnement, ses orientations pertinentes et l'intérêt qu'elle a porté à ce travail.

Je remercie chaleureusement **la SONATRACH**, et plus particulièrement la station d'épuration de **Hassi R'Mel**, de m'avoir accueillie et offert les moyens nécessaires à la réalisation de cette étude. J'adresse une gratitude particulière à **Mme Ourassi Fatima Zohra** pour son encadrement, sa disponibilité et l'aide précieuse qu'elle m'a apportée durant mon stage.

J'adresse également mes sincères remerciements à la société **Zargoun Green Energy**, et tout particulièrement à M. **Goudjili Tayeb**, pour son soutien, son aide et les conseils qu'il m'a généreusement prodigués.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail et m'ont soutenue tout au long de cette expérience

Dédicace

اللهم لك الحمد على ما أنعمت به عليّ من قوة وصبر وعزيمة، ولك الفضل أولاً وآخراً في كل نجاح حققته. أسألك أن تجعل هذا العمل خالصاً لوجهك الكريم، وأن تنفعني به، وتنفع به غيري، وأن تبارك لي فيما هو آت

À mes yeux qui ont veillé durant de longues nuits,
à mon cœur qui a traversé des moments difficiles,
à ma santé qui a supporté la fatigue et les épreuves tout au long de mon parcours universitaire.
Je dédie ce travail à moi-même, en reconnaissance des efforts consentis, de la patience dont j'ai fait preuve et de la persévérance qui m'ont permis d'avancer malgré les obstacles. À moi-même, avec fierté, car derrière chaque réussite se cachent des sacrifices silencieux et une volonté de ne jamais abandonner.

I baba ezizen-iw, **Ahmed Lamine Khelfaoui**, cek d argaz n tudert-iw. Tanemmirt i tayri-k ur nesēi tilas, i leetab-ik d wayen akk i tdefdeḍ fell-i iwakken ad awḍeḍ ɣer wayen ssaramey. D kečč i yellan d tazmert-iw d lmutel-iw deg tudert. Ma uḍeḍ ass-a ɣer uswir-agi, d ssebba n yisefra-inek d useggeḍ-inek. Ad yili umahil-agi d azamul n leqder-iw d tayri tameqqrant i k-ḥemmleḍ.

À la femme de ma vie, ma très chère mère, **Fouzia Mekharbeche**, pour sa tendresse infinie, ses prières, sa patience et ses encouragements qui m'ont accompagnée à chaque étape de mon parcours. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir appris à avancer avec courage et humilité.

À mon chat Claud **Loulou**, mon fidèle compagnon de vie, dont la présence discrète et affectueuse a souvent apaisé mes moments de fatigue et de doute.

À mes chers frères et à ma sœur, **Khaled** et **Nourel Houda**, ainsi qu'à mon beau-frère **Hamza**, pour leur affection, leur soutien et leur confiance.

To my beloved little brother, **Iyed**, my favorite and my constant source of joy, thank you for your love, your laughter, and for always brightening my days. May life grant you happiness and success in everything you do.
À mes adorables neveux, **Nader** et **Adem**, dont les sourires innocents ont illuminé mes journées et rempli mon cœur de bonheur.

À mes chères amies de la résidence universitaire, avec qui j'ai partagé des souvenirs inoubliables, des fous rires, des larmes, des réussites et des épreuves. Merci pour votre présence précieuse : **Malak, Hasna, Hayfa, Raghda, Nouha, Ghania** et toutes celles qui ont marqué ce chemin.

À mes amis de l'ENSSMAL : **Anis, Asmaa, Oumnia** et **Kenzee**, pour les moments d'entraide, de partage et d'amitié sincère.

A mis queridos amigos cercanos, **Hiba, Ahmed, Alaaeddine** y **Rania**, por su escucha, su bondad y su constante apoyo y aliento. Gracias por estar siempre presentes y por acompañarme a lo largo de este camino.
à **Tores-Team**, mes collègues et mes amis, pour les expériences enrichissantes vécues ensemble et les liens précieux que nous avons tissés.

إلى من جمعني بهم الحياة صدفة، فكانوا من أجمل هدايا القدر، شكراً لكم على الذكريات التي تقاسمناها، وعلى الضحكات الصادقة، وعلى الدعم الذي منحتموني إياه في أصعب اللحظات.
سيبقى أثركم الجميل محفوراً في قلبي ما حيي

Faten Khelfaoui





Remerciements

À mon Dieu Tout-Puissant,

Merci pour Ta lumière qui a guidé mes pas, pour Ta force qui m'a accompagnée dans les moments difficiles et pour Ta bénédiction qui m'a permis d'achever ce travail avec courage et persévérance.

À moi-même,

Merci d'avoir cru en mes rêves, d'avoir affronté les obstacles avec détermination et d'avoir continué à avancer malgré les difficultés. Cette réussite est le reflet de mes efforts, de ma patience et de ma volonté.

À ma merveilleuse mère, Samira Gouicem,

Merci pour ton amour infini, tes sacrifices silencieux, tes prières qui m'ont toujours accompagnée et ton soutien qui a été ma plus grande force. Tu es la raison derrière beaucoup de mes réussites, et cette victoire est aussi la tienne.

À mon cher père, Nouredine Chaïter,

Merci pour ton amour, tes sacrifices, tes conseils précieux et ta présence qui m'a toujours donné confiance. Tu as été un pilier essentiel dans mon parcours et une source de courage inestimable.

À mon encadrant, Monsieur Hicham Mazighi,

Merci pour votre accompagnement, votre confiance, votre disponibilité et vos précieux conseils qui ont enrichi ce travail. Votre soutien et votre expertise ont été une grande valeur ajoutée dans la réalisation de ce mémoire.

À mes chères sœurs Yasmine, Hadjer et Doua,

Merci pour votre amour, votre présence et vos encouragements qui ont illuminé mon chemin.

À mes frères et aux petits enfants de ma famille,

Merci pour vos sourires, votre affection et les moments de bonheur que vous m'avez offerts.

À mes chères amies Maria, Sara, Souhila, Abir et Chaima,

Merci pour votre amitié sincère, votre soutien et tous les souvenirs précieux partagés durant cette aventure.

À ma chère tante Wassila Gouicem, Amir et Lilya,

Merci pour votre affection, votre générosité et votre présence qui a toujours occupé une place particulière dans mon cœur.

À toute ma famille,

Merci pour votre amour, votre confiance et vos encouragements. Vous êtes la force qui m'a permis d'aller toujours plus loin.

*Avec toute ma reconnaissance et mon amour,
je vous dédie cette réussite.*

المخلص

يتناول هذا العمل التقييم البيئي والطاقي الكهربائي لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي بحاسي الرمل التابعة لسوناطراك، وذلك في إطار تحقيق الاستدامة وتقليل التأثيرات البيئية. يهدف البحث إلى دراسة كفاءة المعالجة من خلال تحليل أهم المؤشرات الفيزيائية والكيميائية، مثل الطلب البيولوجي على الأكسجين، الطلب الكيميائي على الأكسجين، المواد العالقة، والمركبات الأزوتية، بالإضافة إلى تقييم استهلاك الطاقة الكهربائية لمختلف تجهيزات المحطة. أظهرت النتائج مردودية عالية في إزالة التلوث العضوي والمواد العالقة، مع احترام عام للمعايير الجزائرية الخاصة بتصريف المياه المعالجة. غير أن تركيز النترات يبقى قريبا نسبيا من الحد المسموح به، مما يستدعي مراقبة دورية وتحكما أفضل في عملية التهوية. كما بين التدقيق الطاقي أن أكثر التجهيزات استهلاكا للطاقة هي أنظمة التهوية البيولوجية، الضخ النهائي، ورفع المياه. ومن أجل تحسين أداء المحطة، تم اقتراح عدة حلول مثل تحسين التهوية، استعمال مغيرات السرعة، إنشاء أحواض معالجة احتياطية، وإدماج الطاقة الشمسية الكهروضوئية. وتساهم هذه الحلول في تعزيز استدامة المحطة، تقليل التكاليف، وحماية الموارد المائية والبيئية.

الكلمات المفتاحية

محطة معالجة مياه الصرف الصحي (STEP)؛ اللاغوناج (البحيرات)؛ التدقيق الطاقي الكهربائي؛ الطاقة الكهروضوئية؛ التقييم البيئي.

RESUME

Ce travail porte sur l'évaluation environnementale et électro-énergétique de la station d'épuration des eaux usées de Hassi R'Mel – SONATRACH, dans une perspective de durabilité et de réduction des impacts environnementaux. L'étude vise à analyser la performance épuratoire de la STEP à travers le suivi des principaux paramètres physico-chimiques, notamment la DBO₅, la DCO, les MES et les formes azotées, ainsi qu'à évaluer la consommation électrique des différents équipements de la station. Les résultats montrent des rendements élevés pour la DBO₅, la DCO et les MES, avec une conformité globale aux normes algériennes de rejet. Toutefois, les nitrates nécessitent un suivi régulier en raison de leur proximité avec la limite réglementaire. L'audit énergétique révèle que les principaux postes consommateurs sont l'aération biologique, le refoulement final et le relevage des eaux. Des solutions d'amélioration telles que l'optimisation de l'aération, l'installation de variateurs de vitesse, la mise en place d'un lagunage de secours et l'intégration de l'énergie photovoltaïque sont proposées afin de renforcer la durabilité de la STEP et de réduire son impact environnemental.

Mots-clés :

STEP ; lagunage ; audit électroénergétique ; énergie photovoltaïque ; évaluation environnemental

ABSTRACT

This study focuses on the environmental and electro-energy assessment of the Hassi R'Mel wastewater treatment plant operated by SONATRACH, with the aim of improving sustainability and reducing environmental impacts. The work evaluates the treatment performance of the plant through the analysis of key physicochemical parameters, including BOD₅, COD, suspended solids and nitrogen compounds, while also assessing the electrical energy consumption of the main equipment. The results show high removal efficiencies for BOD₅, COD and suspended solids, with overall compliance with Algerian discharge standards. However, nitrate concentrations require regular monitoring because they remain relatively close to the regulatory limit. The energy audit shows that the main energy-consuming units are biological aeration, final pumping and wastewater lifting systems. Improvement measures such as aeration control, variable speed drives, emergency lagooning and photovoltaic energy integration are proposed to enhance the sustainability of the plant, reduce operating costs and limit its environmental footprint.

Keywords:

Wastewater Treatment Plant (WWTP/STEP); Waste Stabilization Ponds (Lagooning); Electro-Energy Audit; Photovoltaic Energy; Environmental Assessment.

TABLE DES MATIERES:

DEDICACE.....	4
DEDICASE	5
الملخص	6
RESUME.....	6
ABSTRACT	7
LISTE D'ABREVIATIONS	11
LISTE FIGURES	12
LISTE DES TABLEAUX	13
INTRODUCTION GENERALE.....	14
Chapitre I: Généralités sur les eaux usées	5
Introduction	5
1. Définition des eaux usées :	5
2. Origines des eaux usées.....	6
3. Définition de la pollution :	7
4. Particularité essentielle :.....	10
5. Importance de traitements des eaux usées :	11
6. Normes de rejet des eaux usées	11
7. Procédure de traitement des eaux usées par boues activées.....	13
Conclusion :	20
Chapitre II : présentation de l'entreprise Station d'épuration de Hassi R'mel Sonatrach.....	22
1. Présentation de la région de Hassi R'mel :	22
2. Zones industrielles Hassi R'mal:.....	22
3. Présentation de la station d'épuration des eaux usées urbaines de Hassi R'mel Sonatrach :	24
4. La réutilisation des eaux usées traitées au niveau de la station d'épuration de Hassi R'mel :	34
Chapitre III : Évaluation environnementale et performance épuratoire de la STEP de Hassi R'mel	37
I. Méthodologie de prélèvement et d'analyse	37
I.1. Points de prélèvement	37
I.2. Fréquence et conditions de prélèvement.....	38
I.3. Méthodes analytiques utilisées.....	38
II. Présentation des résultats analytiques.....	44
II.1 Résultats des eaux brutes à l'entrée.....	44
II.2 Résultats des eaux traitées à la sortie.....	44
III. Calcul des rendements épuratoires :	45
IV. Calcul des charges polluantes :	46

V. Indice de biodégradabilité	47
V.1 Calcul du rapport DBO5/DCO ou DCO/DBO5.....	47
V.2 Interprétation.....	48
VI. Analyse graphique des résultats.....	48
VI.1 Courbes sortie STEP / normes :	48
VI.2 Interprétation des courbes :	50
VI.2.1 Demande chimique en oxygène :	50
VI.2.2 Demande biologique en oxygène (5 jours):	51
VI.2.3 Matière en suspension :	51
VI.2.4 Nitrates (NO₃⁻) :	51
VII. Discussion générale des performances :	51
VIII. Bilan environnemental de la STEP :	53
Conclusion:	55
Chapitre IV: Audit électro-énergétique de la STEP de Hassi R'Mel	57
Introduction	57
1. Méthodologie de calcul énergétique.....	57
2. Inventaire énergétique des bâtiments annexe	58
3. Inventaire énergétique de la zone processus	61
3.3 Etape de recirculation et d'épaississement des boues :	63
3.4 Étape de Désinfection au Chlore.....	64
3.5 Étape de relevage et de transfert des eaux	65
3.6 Étape de refoulement et de distribution finale des eaux épurées	67
4. Répartition globale de la consommation énergétique	68
Interprétation.....	69
4.2 Répartition par étape de traitement	69
5. Analyse des équipements les plus énergivores	71
5.1 Impact énergétique de l'aération sur les performances biologiques.....	74
6. Analyse des équipements les moins énergivores	75
7. Analyse de la facture Sonelgaz	77
7.1 Énergie active.....	77
7.2 Énergie réactive	77
7.3 Facteur de puissance.....	77
7.4 Puissances.....	77
7.5 Périodes tarifaires	77
7.6 Montant global	78
7.7 Synthèse.....	78

8. Comparaison entre bilan théorique et bilan réel	78
9. Consommation spécifique d'énergie SEC	80
9.1 Interprétation de la consommation spécifique d'énergie.....	81
Conclusion.....	82
Chapitre V : Propositions d'amélioration environnementale et énergétique de la STEP de Hassi R'Mel	86
Introduction :	86
1. Proposition d'une filière de lagunage de secours pour la gestion des surcharges hydrauliques	86
1.1 Problématique des rejets vers le bourbier.....	86
1.2 Principe du lagunage.....	87
1.3 Intérêt du lagunage pour la STEP de Hassi R'Mel	88
2. Contribution des solutions proposées au développement durable	89
Conclusion :	92
Chapitre VI : Intégration de l'énergie photovoltaïque pour l'amélioration de la performance	
environnementale de la STEP de Hassi R'Mel	93
Introduction :	93
1. Relation entre consommation énergétique et impact environnemental	93
2. Choix de la solution photovoltaïque adaptée à la STEP	96
3. Recommandations et perspectives	96
Conclusion :	98
CONCLUSION GENERALE	99
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	102
ANNEXES	105

LISTE D'ABREVIATIONS

- STEP : Station d'Épuration des Eaux Usées
- DBO₅ : Demande Biochimique en Oxygène à 5 jours
- DCO : Demande Chimique en Oxygène
- MES : Matières en Suspension
- NO₃⁻ : Nitrates
- NH₄⁺ : Ammonium
- pH : Potentiel Hydrogène
- O₂ : Oxygène dissous
- Qj : Débit journalier
- R% : Rendement d'épuration
- EU : Eaux Usées
- EUE : Eaux Usées Épurées
- AER : Bassin d'aération
- CP_{ent} : Charge polluante entrante (kg/j)
- CP_{el} : Charge polluante éliminée (kg/j)
- kg/j : kilogramme par jour (unité de débit massique)
- m³/j : mètre cube par jour
- kWh : kilowattheure
- kW : Kilowatt (unité de puissance électrique)
- h/j : Heures par jour
- kWh/j : Kilowattheures par jour
- kWh/mois : Kilowattheures par mois
- kg : Kilogramme (unité de masse)
- DA : Dinar Algérien (unité monétaire)
- % : Pourcentage
- E: Énergie consommée
- P : Puissance électrique
- t : Durée de fonctionnement
- HMT : Hauteur Manométrique Totale (liée à l'effort des pompes hydrauliques)
- SEC : Specific Energy Consumption / Consommation Spécifique d'Énergie
- DA : Dinar Algérien (unité monétaire de la facture Sonelgaz)
- CAPEX : Capital Expenditure (Dépenses d'investissement initial)
- OPEX : Operational Expenditure (Coûts d'exploitation et de maintenance)
- VAN : Valeur Actuelle Nette
- MWh : Mégawattheure
- kWp : Kilowatt-peak (Kilowatt-crête)
- WP : Watt-peak (Watt-crête)

LISTE FIGURES

Figure I-1: Schéma des procédés de la station d'épuration	19
Figure II-2: Localisation géographique de la station d'épuration de Hassi R'mel.	22
Figure II- 3: Logo De Sonatrach.....	23
Figure II-4: Vue aérienne des installations de la station d'épuration de Hassi R'mel.	25
Figure II-5: bac de régulation	27
Figure II-6: dégrilleur	28
FigureII-7: représente combine (dessableur- déshuileur)	29
Figure II-8: bassin d'aération.....	30
Figure II-9: représente un lit de séchage.....	33
Figure II-10: Schéma représente le procédé de traitement des eaux usées de la station d'épuration de Hassi R'mel depuis l'arrivée des eaux brutes jusqu'à l'obtention des eaux épurées et le traitement des boues	34
Figure III- 11: pH-mètre de laboratoire HACH sensION+ PH3	39
Figure III-12: filtre à pompe à 6 postes (unité de filtration sous vide).....	41
Figure III-13: Bloc de digestion thermique RECOD (thermoréacteur) employé pour le prétraitement des échantillons avant l'analyse de la demande chimique en oxygène (DCO).	42
Figure III-14: Variation de la DBO ₅ en sortie de la STEP par rapport à la norme du décret exécutif n° 06-141 (35 mg/L).....	48
Figure III-15: Variation de la DCO en sortie de la STEP par rapport à la norme du décret exécutif n° 06-141 (120 mg/L).....	49
Figure III-16: Variation de les MES en sortie de la STEP par rapport à la norme du décret exécutif n° 06-141 (35 mg/L).....	50
Figure III-17: Variation de la NO ₃ ⁻ en sortie de la STEP par rapport à la norme du décret exécutif n° 06-141 (50 mg/L).....	50
Figure IV- 19: Répartition de la consommation énergétique globale de la STEP.	69
Figure IV- 20: Répartition de la consommation énergétique mensuelle par étape de traitement	71
Figure IV-21: Consommation énergétique mensuelle des équipements les plus énergivores de la station (kWh/mois).....	73
Figure IV-22: consommations énergétique mensuelles des équipements les moins énergivores de la station (kWh/mois)	76
Figure IV-23: comparaison entre bilan théorique et réelle	79
Figure V- 24: Schéma de principe de la filière de lagunage de secours associée à la STEP de Hassi R'Mel.....	91
Figure VI-25: Répartition du potentiel solaire en Algérie – irradiation solaire globale horizontale moyenne annuelle (Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), 2022)	95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: caractéristiques des différentes qualités d'eau (DRICHE, 2006).....	11
Tableau I-2: Valeurs limite des paramètres de rejets dans un milieu récepteur en Algérie 06-141	13
Tableau III-3 : Résultats des eaux brutes à l'entrée	44
Tableau III-4 : Résultats des eaux traitées à l'entrée et la conformité aux normes de rejets du décret exécutif n°06-141	45
Tableau III-5: Rendement d'élimination de la DBO5	46
Tableau III-6: Rendement d'élimination de la DCO	46
Tableau III- 7: Rendement d'élimination des MES	46
Tableau III-8: Rendement des formes azotées	46
Tableau III-9: Charges entrantes CPent	47
Tableau III-10: Charges éliminées CPél en kg/j	47
Tableau III-11: Tableau de synthèse du bilan environnemental	53
Tableau IV- 12: Consommation énergétique des bâtiments annexe.....	59
Tableau IV-13: Consommation énergétique des équipements de prétraitement	62
Tableau IV-14: Consommation énergétique des équipements de traitement Biologique par Aération	63
Tableau IV-15: Consommation énergétique des équipements de recirculation et d'épaississement des boues	64
Tableau IV-16: Consommation énergétique des équipements désinfection au Chlore	65
Tableau IV-17: Consommation énergétique des équipements de relevage et de transfert des eaux	65
Tableau IV-18: Consommation énergétique des équipements refoulement et de distribution finale des eaux épurées.....	67
Tableau IV-19: Consommation électrique du site (zone process / zone annexe).....	68
Tableau IV-20: Répartition de la consommation énergétique mensuelle par étape de traitement	70
Tableau IV-21: Répartition de la consommation énergétique des équipements les plus énergivores	72
Tableau IV- 22: Consommation électrique des postes les moins énergivores de la STEP.....	76
Tableau IV-23: Comparaison des consommations électrique théorique et réelle	78

INTRODUCTION GENERALE

L'eau constitue une ressource naturelle indispensable au maintien de la vie, au développement socio-économique et à la préservation des équilibres écologiques. Toutefois, l'accroissement démographique, l'urbanisation rapide, l'intensification des activités industrielles ainsi que les effets des changements climatiques exercent une pression croissante sur les ressources hydriques disponibles. Cette situation est particulièrement préoccupante dans les régions arides et sahariennes, caractérisées par la faiblesse des précipitations, l'irrégularité des apports en eau et une forte dépendance vis-à-vis des ressources souterraines. Dans ce contexte, la gestion durable de l'eau et la maîtrise des rejets liquides constituent aujourd'hui des enjeux majeurs pour la protection de l'environnement et l'atteinte des objectifs du développement durable.

Les eaux usées domestiques et industrielles représentent une source potentielle de pollution lorsqu'elles sont rejetées sans traitement approprié. Elles renferment diverses substances polluantes, notamment des matières organiques biodégradables, des matières en suspension, des composés azotés et phosphorés, ainsi que des micro-organismes pathogènes susceptibles d'altérer la qualité des milieux récepteurs et de compromettre la santé publique. Face à ces risques, les stations d'épuration des eaux usées (STEP) jouent un rôle fondamental dans la réduction de la charge polluante avant le rejet dans le milieu naturel ou la réutilisation des eaux traitées. Elles constituent ainsi un maillon essentiel de la gestion intégrée des ressources en eau.

Dans les régions sahariennes, où l'eau représente une ressource stratégique, la valorisation des eaux usées traitées apparaît comme une alternative prometteuse pour atténuer la pression exercée sur les ressources conventionnelles. Leur réutilisation pour des usages non potables, tels que l'irrigation des espaces verts, l'arrosage des pistes ou certaines applications industrielles, s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire et de préservation des ressources hydriques. Néanmoins, les contraintes climatiques, les fluctuations des débits et les besoins croissants en énergie imposent une réflexion approfondie sur la durabilité des infrastructures d'assainissement implantées dans ces territoires.

C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude, consacrée à la Station d'Épuration des Eaux Usées (STEP) de Hassi R'Mel, exploitée par SONATRACH. Mise en service en 2001, cette installation, dimensionnée pour une capacité de 15 000 équivalents-habitants et un débit moyen d'environ 3 000 m³/j, repose sur un procédé de traitement par boues activées à faible charge avec aération prolongée, suivi d'une clarification, d'une désinfection par chloration et d'un traitement

des boues par épaissement et séchage naturel. En raison de son implantation en zone saharienne et de son importance dans la gestion des effluents produits localement, cette STEP constitue un cas d'étude particulièrement pertinent pour l'évaluation de la durabilité des systèmes d'assainissement.

L'appréciation des performances d'une station d'épuration ne peut cependant se limiter à la seule qualité des eaux traitées. Si l'évaluation environnementale permet de mesurer l'efficacité épuratoire à travers le suivi des principaux paramètres physico-chimiques et la vérification de la conformité aux normes réglementaires, elle doit être complétée par une analyse des performances électro-énergétiques. En effet, les STEP figurent parmi les installations les plus énergivores du secteur de l'eau, notamment en raison des besoins liés au pompage, à l'aération et aux opérations de transfert des effluents. La maîtrise de ces consommations représente un enjeu économique majeur et contribue à la réduction de l'empreinte environnementale des infrastructures d'assainissement.

Par ailleurs, la recherche de solutions innovantes adaptées aux spécificités des régions sahariennes apparaît indispensable afin de renforcer la résilience et la durabilité de ces installations. Dans cette optique, le recours à un système de lagunage de secours peut constituer une alternative environnementale pertinente pour faire face aux surcharges hydrauliques exceptionnelles, limiter les rejets non maîtrisés vers le bournier et assurer une gestion plus sécurisée des effluents. De même, l'intégration de l'énergie photovoltaïque, particulièrement adaptée au fort potentiel solaire du Sahara algérien, représente une opportunité majeure pour réduire la dépendance énergétique des STEP, diminuer les coûts d'exploitation et limiter les émissions de gaz à effet de serre associées à leur fonctionnement.

Dans ce cadre, la présente étude vise à réaliser une évaluation environnementale et électro-énergétique de la STEP de Hassi R'Mel afin d'apprécier son efficacité globale, d'identifier les équipements les plus consommateurs d'énergie et de mettre en évidence les possibilités d'optimisation susceptibles d'améliorer sa durabilité. Elle s'intéresse également à l'analyse de solutions complémentaires, notamment la mise en place d'une filière de lagunage de secours et l'intégration d'un système photovoltaïque, en vue d'améliorer la gestion des surcharges hydrauliques, d'optimiser les performances énergétiques et de renforcer la résilience de la station face aux contraintes propres au contexte saharien.

Cette approche intégrée permettra non seulement d'évaluer la conformité des performances épuratoires de la station vis-à-vis des exigences réglementaires, mais également de proposer des pistes d'amélioration adaptées aux enjeux environnementaux, énergétiques et opérationnels des systèmes d'assainissement en zones saharienne.

Dès lors, la problématique de ce travail peut être formulée comme suit :

Comment optimiser les performances environnementales et électro-énergétiques de la STEP de Hassi R'Mel afin d'assurer sa durabilité, de garantir le respect des normes de rejet des eaux usées, d'améliorer son efficacité énergétique grâce à l'intégration des énergies renouvelables, et de renforcer sa résilience face aux contraintes hydrauliques et climatiques propres au contexte saharien, notamment par le recours à des solutions complémentaires telles que le lagunage de secours ?

Afin d'atteindre les objectifs fixés, le présent mémoire est structuré comme suit :

- **Chapitre I : Généralités sur les eaux usées**

ce chapitre présente les définitions, les origines et les caractéristiques des eaux usées, les différents paramètres de pollution, les normes de rejet ainsi que les principaux procédés de traitement.

- **Chapitre II : Présentation de la zone d'étude et de la STEP de Hassi R'Mel :**

il est consacré à la présentation de la région de Hassi R'Mel, de SONATRACH et de la station d'épuration étudiée, ainsi qu'à la description de sa filière de traitement et de la réutilisation des eaux épurées.

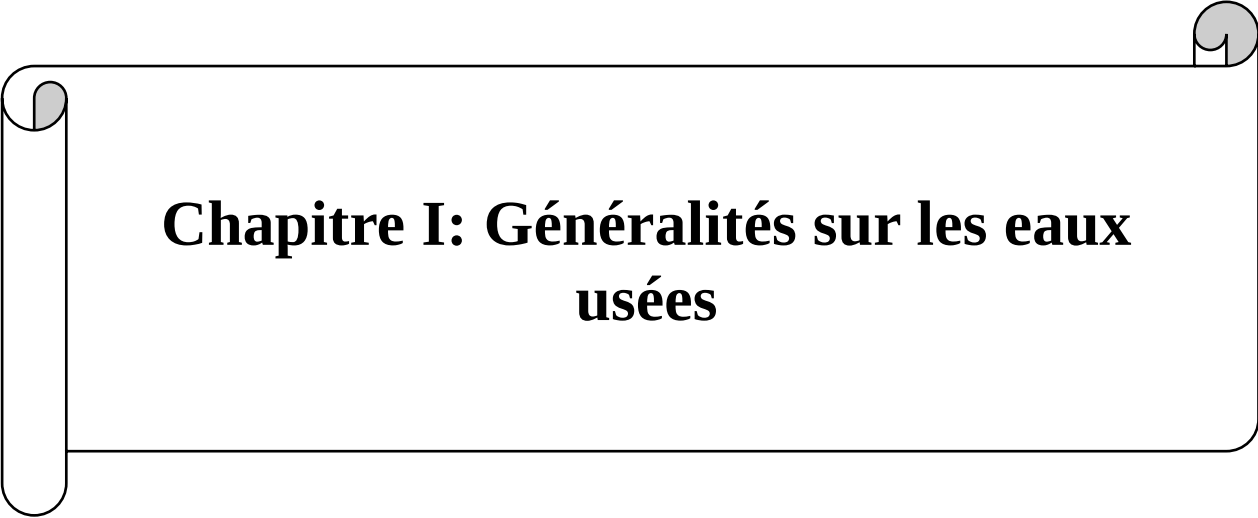
- **Chapitre III : Évaluation environnementale et performance épuratoire de la STEP :**

ce chapitre porte sur l'analyse des paramètres physico-chimiques, l'évaluation des rendements d'épuration, le calcul des charges polluantes et la vérification de la conformité des rejets aux normes réglementaires.

- **Chapitre IV : Évaluation électro-énergétique de la STEP**

- il traite de l'analyse des consommations électriques de la station, de l'identification des équipements les plus énergivores et de l'établissement du bilan énergétique.

- **Chapitre V : Propositions d'amélioration environnementale** : ce chapitre présente des solutions visant à renforcer la durabilité de la STEP, notamment la mise en place d'une filière de lagunage de secours pour la gestion des surcharges hydrauliques.
- **Chapitre VI : Intégration de l'énergie photovoltaïque** : il étudie l'apport de l'énergie solaire photovoltaïque comme alternative permettant d'améliorer l'efficacité énergétique de la station et de réduire son empreinte environnementale.

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical bar on the left and rounded ends on the top and bottom. The text is centered within the scroll.

Chapitre I: Généralités sur les eaux usées

Chapitre I: Généralités sur les eaux usées

Introduction

Les eaux usées constituent l'un des principaux défis environnementaux auxquels sont confrontées les collectivités modernes. Issues des activités domestiques, industrielles, agricoles ou encore des eaux de ruissellement urbain, elles contiennent une grande variété de polluants organiques, minéraux, chimiques et microbiologiques susceptibles d'altérer la qualité des ressources en eau et de perturber l'équilibre des écosystèmes aquatiques. Lorsqu'elles sont rejetées sans traitement adéquat dans le milieu naturel, elles peuvent provoquer une dégradation significative des cours d'eau, des nappes souterraines et des zones côtières, tout en représentant un risque important pour la santé publique en raison de la présence éventuelle d'agents pathogènes et de substances toxiques.

L'étude des eaux usées est donc essentielle pour comprendre leur origine, leur composition et leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Cette connaissance permet d'évaluer leur niveau de pollution, de prévoir leur comportement au cours des différentes étapes de traitement et de sélectionner les procédés les plus appropriés pour leur épuration. Elle constitue également une base indispensable pour le dimensionnement, l'exploitation et l'optimisation des stations d'épuration, ainsi que pour la protection durable des ressources hydriques et de l'environnement. Par ailleurs, dans un contexte marqué par la rareté croissante de l'eau et les exigences de développement durable, la valorisation et la réutilisation des eaux usées traitées deviennent des enjeux stratégiques nécessitant une compréhension approfondie de leurs propriétés et de leur qualité

1. Définition des eaux usées :

Les eaux usées sont des eaux ayant subi une dégradation de leur qualité suite à leur utilisation dans les activités humaines (domestiques, industrielles ou autres).

Elles sont constituées principalement d'eau ($\approx 99,9 \%$) et d'une faible proportion de matières polluantes ($\approx 0,1 \%$) comprenant :

- matières organiques
- matières inorganiques
- micro-organismes

Cette faible fraction est responsable de la pollution et nécessite un traitement avant rejet dans le milieu naturel.

La composition des eaux usées dépend fortement :

- des usages de l'eau
- des conditions climatiques
- des habitudes de consommation
- du niveau socio-économique (**Von Sperling and Marcos, 2007**)

2. Origines des eaux usées

Les rejets des eaux usées sont de diverses origines ils peuvent être classés comme suit:

2-1 :Les eaux usées d'origine domestique

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique. Elles se répartissent en eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines (généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques, etc.,) et les eaux de vannes qui sont les rejets des toilettes, chargés de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux . (**BENSABRI, 2017; Yahiatene and Tahirime, 2010**)

2-2 Les eaux usées d'origine agricole

Ce sont des eaux qui ont été polluées par des substances utilisées dans le domaine agricole. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, sachant que l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement:

- Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation);
- Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides,...) (**Bengouga, 2010;BENSABRI, 2017**)

2-3 Les eaux usées d'origine industrielles

Tous les rejets résultant d'une utilisation de l'eau autre que domestique sont qualifiés de rejets industriels. Cette définition concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales: blanchisserie, restaurant, laboratoire d'analyses médicales, etc. La

variété des eaux usées industrielles est très grande. Certains de ces eaux sont toxiques pour la flore et la faune aquatiques, ainsi que pour l'homme. (BENSABRI, 2017; Wahiba, 2012)

2-4 Les eaux usées d'origine pluviales

Elles sont issues du ruissellement de l'eau de pluie, et peuvent provoquer des pollutions importantes des cours d'eau. L'eau de pluie englobe les impuretés de l'air et ruisselle sur des surfaces terrestres contenant des résidus d'hydrocarbures, de métaux lourds, d'huiles...etc.

(BENSABRI, 2017; El aloui and Taoussi, 2013)

3. Définition de la pollution :

L'eau constitue une ressource essentielle au maintien de la vie, au développement des activités humaines et à l'équilibre des écosystèmes. Notre eau se compose d'eaux de surface telles que les rivières, les lacs, les mers et les eaux souterraines.(GAAMOUNE, 2010)

La pollution de l'eau décrit généralement l'introduction ou la présence de substances nocives ou inacceptables d'une ampleur suffisante pour altérer les indicateurs naturels de la qualité de l'eau. C'est la pollution de l'eau douce (par exemple par l'eutrophisation, l'acidification et la contamination des eaux souterraines) qui réduit sa pureté. (GAAMOUNE, 2010)

3-1 Classification selon le mode de pollution

Les eaux usées peuvent aussi être classées selon leur mode de transfert :

Pollution ponctuelle :rejet en un point précis (domestique, industriel)

Pollution diffuse :rejet dispersé (eaux pluviales) (Von Sperling and Marcos, 2007)

3-2 Paramètres de pollution des eaux usées :

3-2-1 Paramètres organoleptiques :

a) **Odeur** : L'eau d'égout contient une odeur désagréable, mais après avoir retardé 4 heures, tout l'oxygène dissous dans les eaux usées est épuisé et commence à apparaître avec une mauvaise odeur due au sulfure d'hydrogène et à d'autres composés de soufre produits par des micro-organismes anaérobie. (Labbaci and Boumenkar, 2018)

b) **Couleur** : La couleur foncée indique généralement que l'eau est impure, à l'inverse, plus on a une couleur claire plus l'eau n'est pas polluée.

3-2-2 Paramètres physiques :

- a) **Température** : La température de l'eau affecte de nombreux autres facteurs. Ainsi, la température élevée de l'eau de la rivière peut conduire à des états catastrophiques de carence en oxygène dissous pouvant entraîner : disparition de certaines espèces, autoépuration réduite, accumulation de sédiments nauséabonds (odeurs), croissance accélérée des végétaux (dont les algues). (CPEPESC - Commission de Protection des Eaux, 2017)
- b) **La turbidité** : La turbidité varie avec les solides en suspension (MES) présents dans l'eau. C'est de loin le coefficient de pollution qui indique la présence d'une substance organique ou minérale sous forme colloïdale en suspension dans les eaux usées. (AMAUCHE et MALIKI, 2023)
- c) **Les matières en suspension (MES)** : Les matières en suspension (MES) désignent les particules solides présentes dans un liquide. Elles sont perceptibles à l'œil nu et peuvent être de nature organique ou minérale, étant insolubles. La quantification des matières en suspension se réalise en utilisant des méthodes de filtration ou de centrifugation, et leur concentration est exprimée en milligrammes par litre (mg/L). (CPEPESC - Commission de Protection des Eaux, 2017)

$$\text{MES} = 30\% \text{ MMS} + 70\% \text{ MVS}$$

- d) **Les matières volatiles en suspension (MVS)** : Elles correspondent à la partie organique des matières en suspension (MES) et sont obtenues en soumettant ces MES à une calcination à 525°C pendant deux heures. La variation de poids entre les MES à 105°C et les MES à 525°C est appelée "perte au feu" et correspond à la concentration en matières volatiles en suspension (MVS) d'une eau, exprimée en milligrammes par litre (mg/l). Les MVS sont mesurées en mg/l. (Metahri, 2012)
- e) **Les matières minérales sèches (MMS)** : Elles correspondent à la composante minérale des matières en suspension, Elles sont déterminées par la différence entre les matières en suspension totales et les matières volatiles en suspension. (CPEPESC - Commission de Protection des Eaux, 2017)
- f) **Conductivité** : La conductivité est une propriété caractéristique d'une eau qui facilite le passage d'un courant électrique. Elle offre une indication précise de la concentration en sels dissous (salinité de l'eau). La conductivité est exprimée en micro siemens par centimètre

($\mu\text{S}/\text{cm}$) et elle est inversement proportionnelle à la résistivité, qui est exprimée en ohm par centimètre ($\Omega \cdot \text{cm}$). Généralement, la conductivité électrique est mesurée en micro siemens/cm, mais elle est souvent rapportée sous forme de résistivité électrique exprimée en ohm.cm. (AMAUCHE and MALKI, 2023)

3-2-3 Paramètres chimiques :

Potentiel d'hydrogène pH : Il exprime le degré d'acidité ou d'alcalinité des eaux usées. Ce paramètre joue un rôle primordial :

- Dans les propriétés physico-chimiques (acidité, agressivité)
- Dans les processus biologiques, dont certains exigent des limites de pH très étroites se situent entre 6,5 et 8,5 (unité pH).

La détermination de la valeur du pH des eaux d'égout est importante puisque certains modes de traitement sont sensibles à la valeur du pH pour leur fonctionnement. (Labbaci and Boumenkar, 2018)

- Demande biochimique en oxygène (DBO5) :** La DBO5, ou Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours, quantifie la quantité d'oxygène requise par les micro-organismes pour dégrader la totalité de la matière organique biodégradable présente dans un échantillon d'eau maintenu à une température de 20°C, dans l'obscurité, pendant une durée de 5 jours. (AMAUCHE and MALKI, 2023)
- Demande chimique en oxygène (DCO) :** La DCO ou Demande Chimique en Oxygène, représente la quantité d'oxygène requise pour oxyder chimiquement les matières organiques présentes dans un effluent. Elle permet une évaluation globale des matières oxydables présentes dans l'eau, indépendamment de leur origine. On estime que cette oxydation couvre environ 90 à 95 % des composés oxydables. (CPEPESC - Commission de Protection des Eaux, 2017)
- Oxygène dissous :** La respiration des organismes aquatiques aérobies dépend de la présence d'oxygène dans l'eau. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est influencée par des facteurs tels que la température, la pression et la force ionique de l'environnement. La concentration d'oxygène dissous est exprimée en milligrammes d'oxygène par litre mg O_2 .
- $L-1$.** (CPEPESC - Commission de Protection des Eaux, 2017)
L'azote : L'azote organique est principalement constitué de composés tels que : les protéines, les acides aminés et les polypeptides. En effet, pour l'azote minéral (ammoniac, nitrates et nitrites), l'azote de l'eau peut avoir soit un caractère organique, soit un caractère

minéral, il constitue l'essentiel de l'azote total et ces produits ne sont présents qu'en très faible concentration. (AMAUCHE and MALKI, 2023)

- e **La Phosphore** : C'est un élément essentiel au développement de tous les organismes vivants, il ne doit être présent naturellement qu'en très faible quantité dans le sol et dans l'eau, qui constituent alors une pollution en perturbant le milieu aquatique. On en distingue deux formes : (CPEPESC - Commission de Protection des Eaux, 2017)

- Le phosphore organique, résidu de la matière vivante.
- Le phosphore minéral, essentiellement constitué de phosphate (PO_4) qui représente 50 à 90% de la totalité du phosphore dans les eaux usées urbaines.

3-2-4 Paramètres microbiologiques

Généralement, tous les ressources d'eaux soit des lacs, des rivières, des fleuves, aussi bien des nappes phréatiques un peu profondes, contient 3 type des germes : typiquement aquatique, tellurique (due par ruissellement) et des germes de contamination humaine ou animale (contamination fécal) ; que ce soit le type du germe il peut engendrer des maladies infectieuses chez l'homme. (MERAH, 2019)

- a **Les germes totaux** : Sa recherche vise à dénombrer non spécifiquement le plus grand nombre de microorganismes, le dénombrement des bactéries aérobies à 22°C et 37°C s'effectue dans La gélose glucosée à l'extrait de levure ou PCA. La charge mésophile totale n'est pas un paramètre d'appréciation de la qualité bactériologique mais quand même peut nous renseigner sur le degré de potabilité des eaux et tous produits alimentaires.
- b **Les coliformes totaux** : Sous le terme de « coliformes » est regroupé un certain nombre d'espèces bactériennes appartenant en fait à la famille des Enterobacteriaceae, correspondent à des bacilles Gram négatif, non sporulés, aéro/anaérobies facultatifs, possèdent des propriétés caractéristiques de structure et de culture à 3537C°, ils sont sensibles au chlore. Ils se répartissent en deux catégories:
- Les germes thermophiles ;
 - Les germes psychrophiles (aquatique ou terrigène).
- c **Les coliformes fécaux** : Les coliformes fécaux sont un sous-groupe de coliformes totaux, l'existence de ces germes peut être une indication de la présence des micro-organismes entéropathogènes comme les salmonelles. (AMAUCHE and MALKI, 2023)

4. Particularité essentielle :

Les eaux usées domestiques contiennent principalement de l'eau (99,9 %), alors que les matières polluantes n'en constituent qu'une faible fraction (0,1 %). Toutefois, cette fraction renferme des composés organiques, minéraux et microbiologiques susceptibles de dégrader la qualité des milieux récepteurs et de perturber les écosystèmes aquatiques en l'absence d'un traitement adéquat. (Von Sperling and Marcos, 2007)

5. Importance de traitements des eaux usées :

Le traitement des eaux usées a pour objectif de prévenir la transmission des maladies véhiculées par les eaux et préserver l'environnement. Le traitement des eaux usées a pour but la protection de la vie dans les cours d'eau et surtout dans les eaux littorale et pourquoi pas pour produire de l'eau potable. Le tableau suivant représente certaines caractéristiques des différentes qualités d'eaux : (REZIG and OULD AMAR, juin2010)

Tableau I-1: caractéristiques des différentes qualités d'eau (DRICHE, 2006)

Polluant	Eau potable	Eau à usage agricole	Eau industrielle
DBO ₅ (mg/L)	0-3	10	100-300
DCO	0-10	150	300-2000
MES	0-25	15	15-45
Azote	-	40 (NH ₄)	1-10
Phosphore	-	1	0.2
Ph	7-8.5	6.5-8.5	6-9
Cr	0.00	100	-
Pb	<0.05	0.001	-

6. Normes de rejet des eaux usées

6-1 Définition :

Les normes de rejet désignent l'ensemble des exigences réglementaires fixant les seuils maximaux de pollution autorisés dans les effluents traités avant leur déversement dans le milieu récepteur. Elles ont pour objectif de préserver la qualité des ressources en eau, de protéger les écosystèmes aquatiques et de garantir la santé publique. Ces normes définissent les concentrations admissibles

des différents polluants présents dans les eaux usées traitées. **(Von Sperling and Marcos, 2007)**

6-2 Paramètres de contrôle des rejets

L'évaluation de la qualité des eaux usées traitées repose sur plusieurs indicateurs physicochimiques permettant d'apprécier les performances de la station d'épuration. Les principaux paramètres surveillés sont :

Matière organique

- La Demande Biochimique en Oxygène sur cinq jours (DBO_5) ;
- La Demande Chimique en Oxygène (DCO).

Matières solides

- Les Matières En Suspension (MES).

Nutriments

- L'azote total (N) ;
- Le phosphore total (P).

Le suivi de ces paramètres permet de vérifier l'efficacité des procédés de traitement et la conformité des effluents aux exigences réglementaires. **(Von Sperling and Marcos, 2007)**

6-3 Objectifs des normes de rejet

Les normes de rejet ont pour finalité de réduire les impacts environnementaux liés aux effluents urbains et industriels. Elles visent notamment à :

- préserver la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines ;
- limiter les apports excessifs de matières organiques dans les milieux récepteurs ;
- prévenir les phénomènes d'eutrophisation causés par les nutriments ;
- protéger les organismes aquatiques et maintenir l'équilibre des écosystèmes ;
- garantir une gestion durable des ressources en eau.

6-4 Les normes algériennes de rejet des effluents

Le décret exécutif n°93-160 du 10 juillet 1993, du Journal Officiel de la République Algérienne réglementant les rejets d'effluents liquides dans son chapitre I, article 2.

Ces mêmes valeurs viennent d'être renforcées par un nouveau texte réglementaire ; le Décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 Avril 2006, section (1), article 3. les valeurs limites maximales des rejets d'effluents fixés par ces deux décrets sont regroupées dans le tableau suivant :(Décret exécutif n° 06-141, 2006)

Tableau I-2: Valeurs limite des paramètres de rejets dans un milieu récepteur en Algérie 06-141

Paramètres	Valeur limites	Unités
Température	30	°C
pH	6,5 à 8,5	-
MES	35	mg/l
DBO5	35	mg/l
DCO	120	mg/l
Azote Kjeldahl	30	mg/l
Phosphates	02	mg/l
Phosphore total	10	mg/l
Cyanure	0,1	mg/L
Aluminium	03	mg/l
Cadmium	0,2	mg/l
Fer	03	mg/l
Manganèse	01	mg/l
Mercure total	0,01	mg/l
Nickel total	0,5	mg/l
Plomb total	0,5	mg/l
Cuivre total	0,5	mg/l
Zinc total	03	mg/l
Huiles et Graisses	20	mg/l
Hydrocarbures totaux	10	mg/l
Indice phénols	0,3	mg/l
Fluor et composés	15	mg/l
Etain total	02	mg/l
Composés organiques chlorés	05	mg/l
Chromes total	0,5	mg/l

7. Procédure de traitement des eaux usées par boues activées

Le traitement des eaux usées constitue un élément fondamental dans la protection de l'environnement et la gestion durable des ressources hydriques. En effet, les eaux usées contiennent une grande quantité de polluants organiques et minéraux susceptibles de perturber les écosystèmes aquatiques si elles sont rejetées sans traitement préalable. Les stations d'épuration (STEP) sont donc conçues pour réduire ces charges polluantes à travers une succession d'étapes complémentaires. Parmi les procédés utilisés, le traitement biologique par boues activées est

reconnu pour son efficacité dans l'élimination de la matière organique. Toutefois, son bon fonctionnement dépend de la mise en œuvre préalable de traitements physiques, notamment le prétraitement et le traitement primaire, ainsi que d'une gestion adéquate des boues produites.

A) Les étapes Traitement des eaux usées :

7.1 Prétraitement :

Les prétraitements consistent en un traitement mécanique afin de retirer les déchets volumineux, sables, macropolluants et graisses de l'effluent brut. Ils permettent de protéger les ouvrages et d'en réduire la taille. De préserver les organes tournant et de faciliter le transfert d'oxygène au sein de la boue biologique.

Le prétraitement se situe en tête de station d'épuration et consiste :

7.1.1 Dégrillage :

Le dégrillage permet de protéger les ouvrages situés en aval contre l'arrivée de gros objets tels que les souches d'arbres, les chiffons et divers déchets domestiques susceptibles d'obstruer les canalisations et de perturber le fonctionnement des installations. Les grilles de dégrillage se distinguent selon l'espacement entre leurs barreaux ainsi que par leur mode de fonctionnement. On distingue principalement les grilles à nettoyage manuel et les grilles à nettoyage mécanique.(OURAHMOUNE et al., 2006)

7.1.2 Dessablage – Déshuilage

Après le dégrillage les effluents sont dirigés vers le dessablage et le déshuilage qui constituent deux opérations complémentaires souvent réalisées dans une même unité. Le dessablage repose sur le principe de la décantation gravitaire, où les particules minérales lourdes telles que le sable et le gravier se déposent au fond du bassin lorsque la vitesse de l'écoulement est suffisamment réduite. Cette étape est essentielle pour éviter l'abrasion des équipements mécaniques et l'accumulation de dépôts dans les ouvrages. Parallèlement, le déshuilage permet d'éliminer les graisses et les huiles présentes dans les eaux usées, qui, en raison de leur faible densité, remontent à la surface. Leur séparation peut être améliorée par injection d'air, favorisant leur flottation. L'élimination de ces substances contribue à améliorer significativement les performances du traitement biologique en aval. (Von Sperling and Marcos, 2007)

7.2 Traitement primaire

L'opération consiste à éliminer les matières en suspension et les matières colloïdales par décantation, ce dernier est le premier type de traitement primaire possible, on distingue la décantation simple et la décantation physico-chimique' qui consiste à injecter des coagulants et des floculant qui permettent de décanter les particules solides aux fond. **(GOUJOUS, 1995)**

Cette étape de traitement comprend :

7.2.1 La décantation :

La décantation est un procédé qu'on utilise dans pratiquement toutes les usines d'épuration et de traitement des eaux. Elle a pour but d'éliminer les particules en suspensions dont la densité est supérieure à celle de l'eau. Ces particules s'accumulent au fond du bassin de décantation d'où on les extrait périodiquement, l'eau clarifiée, située près de la surface ; est dirigée vers l'unité de filtration.**(RAYMOND, 1988)**

7.3 Traitement biologique par boues activées

Le traitement biologique par boues activées repose sur l'utilisation de microorganismes aérobies capables de dégrader la matière organique présente dans les eaux usées. Ce procédé consiste à maintenir une biomasse bactérienne en suspension dans un bassin où l'oxygène est continuellement apporté afin de favoriser l'activité biologique. Les microorganismes utilisent les polluants organiques comme source de nourriture, les transformant en biomasse, en dioxyde de carbone et en eau. Ce processus complexe dépend de plusieurs paramètres tels que la concentration en oxygène dissous, la température, le temps de séjour et la charge organique. Il s'agit d'un système dynamique basé sur des phénomènes de croissance bactérienne et de transfert d'oxygène, permettant d'obtenir une épuration efficace des eaux usées. **(Von Sperling and Marcos, 2007)**

7.3.1 Bassin d'aération

Le bassin d'aération constitue l'élément central du procédé des boues activées. Il s'agit d'un réacteur biologique dans lequel les eaux usées sont mises en contact avec des boues activées riches en microorganismes, tout en assurant un apport continu en oxygène. Ce dernier est introduit à l'aide de systèmes d'aération tels que les diffuseurs ou les turbines, permettant de maintenir des conditions aérobies optimales. Dans ce milieu, les bactéries dégradent la matière organique dissoute en produisant de nouveaux floccs biologiques. Le bon fonctionnement de ce bassin dépend du contrôle rigoureux de plusieurs paramètres, notamment la concentration en oxygène dissous, le temps de séjour hydraulique et la charge massique appliquée.

L'injection de l'air dans le procédé des boues activées s'effectue au niveau du bassin d'aération, qui constitue l'élément central du traitement biologique. Elle est assurée par des dispositifs tels que les diffuseurs d'air immergés ou les aérateurs mécaniques, permettant d'apporter l'oxygène dissous indispensable à l'activité des microorganismes aérobies. Cet apport en oxygène favorise la dégradation de la matière organique par les bactéries, tout en assurant un mélange homogène entre les eaux usées et les boues activées, évitant ainsi la décantation prématurée des solides. Au cours de ce processus, les microorganismes se regroupent pour former des floccs biologiques, qui sont des agrégats complexes constitués principalement de bactéries hétérotrophes, de protozoaires et de particules organiques et minérales. Ces floccs sont maintenus grâce à une matrice de substances polymériques extracellulaires (EPS) produites par les bactéries, assurant leur cohésion et leur stabilité. La formation de ces floccs est essentielle pour garantir une bonne décantation dans le clarificateur, conditionnant ainsi l'efficacité globale du procédé des boues activées. **(Von Sperling and Marcos, 2007)**

7.3.2 Clarificateur (décantation secondaire) :

Le clarificateur, ou bassin de décantation secondaire, intervient après le bassin d'aération et permet de séparer les boues biologiques de l'eau traitée. Le mélange issu du bassin d'aération, appelé liqueur mixte, est introduit dans ce bassin où la vitesse d'écoulement est fortement réduite. Sous l'effet de la gravité, les floccs biologiques se déposent au fond du bassin, formant des boues secondaires, tandis que l'eau clarifiée est récupérée en surface. Cette étape est essentielle pour assurer la qualité de l'effluent final avant son rejet dans le milieu naturel. **(Marcos von Sperling, 2007)**

7.4 Traitement Tertiaire :

L'objectif principal est d'améliorer la qualité microbiologique de l'eau grâce à deux procédés complémentaires : irradiation UV et filtration sur lit de sable. L'ultraviolet agit comme un agent physique de désinfection, neutralisant les microorganismes pathogènes dont la présence dans le réservoir accélérerait la croissance bactérienne et compromettrait la stabilité biochimique. **(Merabet and Zeroual, 2025)**

Les filtres Aquazur exploitent un média sableux pour créer une barrière filtrante. Bien qu'efficaces, ils n'assurent pas une rétention intégrale de MES résiduelles; certaines particules subsistent malgré l'optimisation du procédé. Le sable utilisé, homogène en texture et granulométrie, doit être couvert

de bâches opaques pour bloquer la lumière. Cette prévention est importante afin d'inhiber le développement d'algues et les risques d'eutrophisation associés.

En sortie de traitement, l'eau présente ces caractéristiques : MES résiduelles : 10%, DBO : 20 mg/L DCO : 100 mg/L **(Merabet and Zeroual, 2025)**

La chloration : est une méthode de désinfection visant à éliminer les micro-organismes pathogènes présents dans les boues. Elle repose sur l'utilisation de composés chlorés capables d'oxyder et de détruire les agents infectieux, assurant ainsi la sécurité sanitaire des boues avant leur valorisation ou élimination. Cette étape est particulièrement importante lorsque les boues sont destinées à un usage agricole ou à un contact avec l'environnement. **(Von Sperling and Marcos, 2007)**

Traitement des boues :

B) Les étapes de Traitement des boues :

Le traitement des boues est une étape essentielle dans une station d'épuration, visant à réduire leur volume, leur teneur en eau et leur charge polluante avant leur élimination finale.

Le traitement des boues constitue une étape essentielle dans le fonctionnement d'une station d'épuration, car il permet de gérer les résidus solides issus des différentes phases de traitement. Ces boues contiennent une forte teneur en eau ainsi que des matières organiques et des microorganismes. L'objectif principal est de réduire leur volume, leur teneur en eau et leur potentiel polluant avant leur élimination finale. Plusieurs opérations sont mises en œuvre, notamment l'épaississement, qui permet d'augmenter la concentration en solides, le séchage naturel, qui repose sur l'évaporation de l'eau sous l'effet des conditions climatiques, et la chloration, qui assure la désinfection en éliminant les agents pathogènes. Ces traitements permettent d'obtenir des boues stabilisées, plus faciles à manipuler et à valoriser ou éliminer. **(Von Sperling and Marcos, 2007)**

7.5 Épaississement

Avant leur élimination finale, les boues sont soumises à un processus spécifique adapté à leur composition et à leur destination. L'objectif principal est de diminuer leur masse en supprimant une partie de l'eau qu'elles contiennent, étant donné qu'elles sont initialement récupérées sous forme liquide du système d'épuration des eaux. **(MAZOUNI and RAMDANI, 2017)**

L'épaississement des boues vise à concentrer les matières en suspension de la manière la plus économique possible. Ce processus réduit le volume des boues en éliminant une masse d'eau par décantation, flottation, centrifugation ou égouttage. Il représente une phase transitoire essentielle pour la réduction de la quantité de boues générées par une installation de traitement **(Gouffi and Dali, 2019)** .On distingue deux grandes familles de procédés d'épaississement : gravitaire et dynamique.

7.6 Séchage naturel(lit de séchage):

Les lits de séchage sont particulièrement adaptés aux boues fortement minéralisées provenant d'une station d'épuration complète ou d'un système de digestion des boues. La déshydratation naturelle des boues se réalise de deux manières distinctes lorsque la boue est introduite dans des bassins peu profonds garnis de graviers et de sable dotés d'un système de drainage : Le processus de filtration naturel à travers le substrat qui peut engendrer une diminution de jusqu'à 80% du niveau d'humidité et l'évaporation naturelle.**(MAZOUNI and RAMDANI, 2017)**

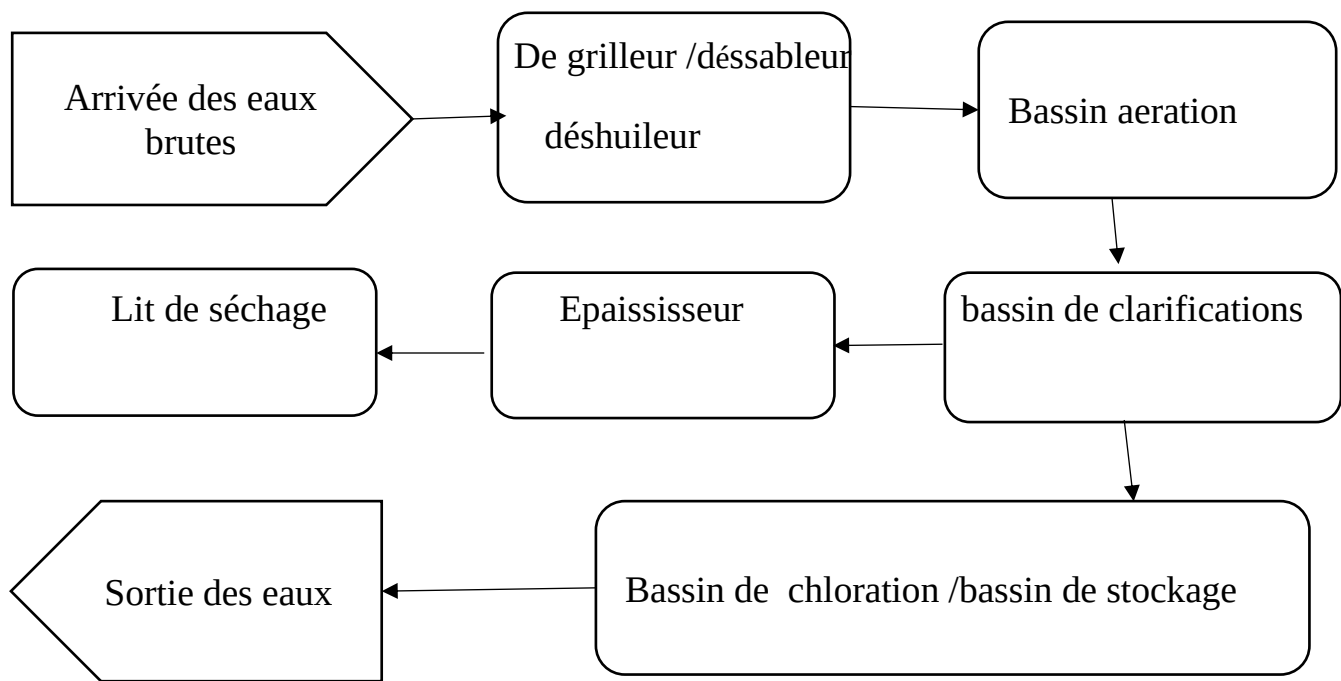


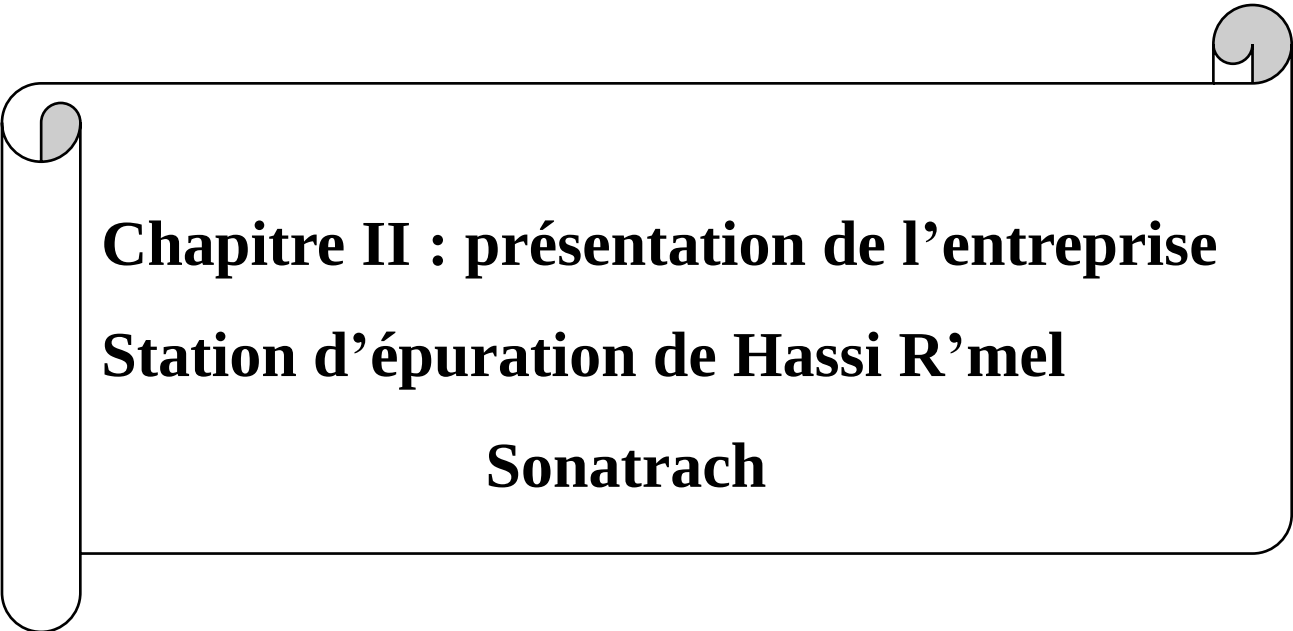
Figure I-1: Schéma des procédés de la station d'épuration

Conclusion :

Les eaux usées représentent un enjeu majeur pour la protection de l'environnement et de la santé publique. En raison des activités domestiques, industrielles et agricoles, elles contiennent divers polluants, notamment des matières organiques, des nutriments, des micro-organismes pathogènes et parfois des substances toxiques. Leur rejet direct dans le milieu naturel, sans traitement adéquat, peut entraîner une dégradation significative des ressources en eau, affectant ainsi les écosystèmes aquatiques et la qualité de vie des populations.

Ainsi, le traitement des eaux usées est très nécessaire, reposant sur une succession d'étapes physiques, chimiques et biologiques visant à éliminer ou réduire les polluants à des niveaux acceptables. Par ailleurs, la valorisation des sous-produits issus du traitement, tels que les boues, s'inscrit aujourd'hui dans une logique de développement durable.

En définitive, une gestion efficace des eaux usées contribue non seulement à la préservation des ressources hydriques, mais également à la protection de la santé humaine et au maintien de l'équilibre écologique.



Chapitre II : présentation de l'entreprise

Station d'épuration de Hassi R'mel

Sonatrach

Chapitre II : présentation de l'entreprise Station d'épuration de Hassi R'mel Sonatrach

1. Présentation de la région de Hassi R'mel :

1.1 Localisation géographique de la zone d'étude :

La zone Hassi R'mel est située à 120 Km au sud-est de la wilaya de Laghouat qui est au sud de l'Algérie et environ 70 Km à l'ouest de Berriane, à 120 Km au nord-ouest de Ghardaïa et à 525 Km au sud d'Alger.



Figure II-2: Localisation géographique de la station d'épuration de Hassi R'mel.

1.2 Climat de la zone :

le climat de la région se distingue par une faible pluviométrie et une aridité marquée. L'humidité relative moyenne est d'environ 19 % durant la saison estivale et atteint 34 % en hiver. Les températures présentent une forte amplitude thermique, variant généralement de -5 °C en hiver à +45 °C en été.

2. Zones industrielles Hassi R'mal:

Le champ gazier de Hassi R'mel est réparti en trois zones principales : le Nord, le Sud et le Centre. Cette dernière constitue le chef-lieu de la commune ainsi que de la daïra de Hassi R'mel. Ces zones comprennent plusieurs installations industrielles, notamment des modules (centres de traitement du gaz), des stations de compression, des centres de traitement d'huile, des unités de déshuilage des rejets industriels, ainsi qu'une station d'épuration destinée au traitement des eaux usées domestiques

2.1 SONATRACH : Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures) :

Créée le 31 décembre 1963, SONATRACH constitue le pilier fondamental de l'économie algérienne. En tant que compagnie pétrolière et gazière intégrée, elle intervient sur l'ensemble de la chaîne de valeur des hydrocarbures, incluant l'exploration, la production, le transport par canalisation, la transformation, le raffinage et la commercialisation du pétrole et du gaz naturel.

SONATRACH joue un rôle stratégique dans la **sécurité énergétique** de l'Algérie en assurant l'approvisionnement régulier du marché national en hydrocarbures. Et aussi un rôle déterminant dans la **balance commerciale** du pays .

Sur le plan macroéconomique, SONATRACH représente la principale source de revenus du pays. Les exportations d'hydrocarbures, dominées par le gaz naturel et le pétrole brut, constituent l'essentiel des recettes en devises. L'entreprise contribue à environ **26 % du produit intérieur brut (PIB)** et génère près de **50 % des revenus fiscaux de l'État**, tout en représentant une part significative des exportations nationales. Cette contribution permet le financement des politiques publiques, des infrastructures et des programmes de développement socio-économique.



Figure II- 3: Logo De Sonatrach

2.2 Le rôle de SONATRACH dans traitement et réutilisation des eaux usées :

Dans une perspective de gestion intégrée et durable des ressources en eau, SONATRACH met en œuvre une politique proactive de réutilisation des eaux usées traitées, particulièrement dans les

régions sahariennes caractérisées par la rareté des ressources hydriques. Cette démarche vise à optimiser l'utilisation de l'eau tout en réduisant la pression exercée sur les ressources conventionnelles et en limitant les impacts environnementaux des activités industrielles. Les eaux épurées issues des stations de traitement sont ainsi valorisées dans plusieurs applications, notamment l'irrigation des espaces verts au sein des bases de vie et des installations industrielles, contribuant à l'amélioration du cadre de vie et à la lutte contre la désertification. Elles sont également utilisées pour l'arrosage des pistes afin de maîtriser les émissions de poussières, fréquentes dans les environnements désertiques, ainsi que dans certains procédés industriels tels que les systèmes de refroidissement et le lavage des équipements, lorsque leur qualité répond aux exigences techniques requises. Dans certains cas, ces eaux peuvent également être destinées à la recharge artificielle des nappes phréatiques, participant ainsi à la préservation des ressources souterraines. Cette stratégie traduit l'engagement de SONATRACH en faveur du développement durable, en conciliant performance industrielle, protection de l'environnement et gestion rationnelle des ressources naturelles.

3. Présentation de la station d'épuration des eaux usées urbaines de Hassi R'mel Sonatrach :

Dans le cadre de sa politique de protection de l'environnement, la SONATRACH, à travers sa direction régionale de Hassi R'mel, a engagé un programme ambitieux visant à réduire, voire éliminer, les impacts négatifs liés à ses activités industrielles et urbaines.

C'est dans cette optique qu'une **station d'épuration des eaux usées urbaines (STEP)** a été réalisée afin d'assurer un traitement efficace des effluents générés dans la région.

Mise en service en **2001**, cette station a été dimensionnée pour une capacité de **15 000 équivalents-habitants (EH)**. Elle répond à plusieurs objectifs essentiels

- **Préservation de la santé publique** en limitant la propagation des maladies d'origine hydrique ;
- **Protection des milieux récepteurs**, notamment les sols et les nappes phréatiques ;
- **Conformité à la réglementation environnementale** en vigueur ;
- **Valorisation des eaux épurées**, notamment pour la réutilisation (REUSE), en particulier dans un contexte saharien marqué par la rareté de la ressource en eau.



Figure II-4: Vue aérienne des installations de la station d'épuration de Hassi R'mel.

3.1 Données de base de la station d'épuration de Hassi R'mel :

- **Population équivalente (EH) :** Il est utilisé pour établir une relation d'équivalence entre les différentes sources de pollutions et le nombre d'habitants. Il est exprimé en équivalent habitant (eq ha). Nombre représentant la charge polluante produite par habitant elle est estimée à **15 000 EH**
- **Consommation en eau potable (m³/j) :** Volume d'eau consommé quotidiennement par la population, elle est estimée à **3 750 m³/j**.
- **Coefficient de rejet (%) :** Rapport entre le volume des eaux usées rejetées et l'eau consommée .elle est estimée à **80%**.
- **Moyen des eaux usées (m³/h ; m³/j) :**Volume moyen d'eaux usées généré par unité de temps.Elle est estimée à 125 m³ /h, ou sur 24 heures (débit moyen journalier) à 3000 m³/j.
- **Charge polluante journalière (kg/j) :** Elle est définie par la relation qui suit:

$$C = \text{DBO}_5 \times Q$$

Avec

C : charge de pollution exprimée en Kilogramme de DBO₅ par jour et qui est de 810 kg DBO₅/j. Ou bien, $C = \text{MES} \times Q$

Avec C : charge de pollution exprimée en Kilogramme de MES par jour et qui est de 1050 (kg/j).

Q : Débit moyen journalier des eaux usées.

- **Concentration en DBO₅ (mg/L)** : C'est la teneur en charge polluante déterminée par la demande biochimique en oxygène pendant cinq jours exprimée en milligramme par litre, elle est estimée à 270mg/l.
- **Concentration en MES (mg/L)** : C'est la teneur en charge polluante des matières en suspension exprimée en milligramme par litre, elle est estimée à 350 mg/l.
- **Charge massique (kg DBO₅/kg MVS/j)** : Rapport entre la charge organique et la masse de biomasse active. elle est estimée à **0,1 kg DBO₅/kg MVS/j**
- **Charge volumique (kg DBO₅/m³/j)** : Quantité de pollution appliquée par unité de volume du bassin. elle est estimée à **0,351 kg DBO₅/m³/j**

3.2 procédé de traitement de la station de Hassi R'mel

Le traitement des eaux usées a pour objectif de produire un effluent épuré dont le niveau de pollution est compatible avec les exigences du milieu récepteur, afin d'éviter tout impact négatif sur la faune et la flore.

La station d'épuration de Hassi R'mel, destinée au traitement des eaux usées domestiques urbaines de la région centrale, repose sur un procédé de **boues activées à faible charge avec aération prolongée**. Ce procédé reproduit, à échelle contrôlée, le phénomène naturel d'autoépuration des milieux aquatiques.

Il repose sur la dégradation de la matière organique par des micro-organismes en présence d'oxygène dissous. Cette activité biologique nécessite une quantité d'oxygène mesurée par la **DBO₅**, exprimée en mg O₂/L.

Le traitement par boues activées comprend principalement deux étapes :

- **Une phase d'aération**, assurant le contact entre les eaux usées et la biomasse (floc bactérien) en présence d'oxygène ;

- **Une phase de clarification**, permettant la séparation des boues formées de l'eau épurée.

3.2.1 Amenée des eaux brutes

Les eaux usées arrivent à la station d'épuration à partir de deux stations de relevage principales, (Hay Ezouhour et OPGI). Elles sont acheminées vers les ouvrages de la station par deux collecteurs principaux et relevées à l'entrée de la station.

3.2.2 Un bac de régulation de 1 500 m³

Un bac de régulation d'une capacité de 1 500 m³ a été réalisé en amont de la station, implanté en point haut afin d'assurer un écoulement gravitaire. L'ouvrage est équipé d'un canal déversoir ainsi que d'un système d'aération permettant l'homogénéisation des effluents.

Cette étape a permis de récupérer l'excédent de débit en période de pointe et de le stocker temporairement pour un traitement en période diurne, assurant ainsi une meilleure gestion hydraulique de la station.



Figure II-5: bac de régulation

3.2.3 Filière de traitement des eaux usées

3.2.3.1 Prétraitement :

Le prétraitement constitue la première étape indispensable du processus d'épuration. Il a pour objectif d'éliminer les matières grossières, les sables, les huiles et les graisses susceptibles de

perturber le fonctionnement des unités de traitement situées en aval, d'endommager les équipements électromécaniques ou de réduire les performances du traitement biologique.

a dégrillage :

La première opération de ce prétraitement est le, qui vise à retenir les déchets solides volumineux tels que les chiffons, plastiques, bois et autres matières flottantes susceptibles d'entraver le bon fonctionnement des installations. Cette opération est réalisée dans un canal d'une largeur de 5 mètres et se déroule en deux étapes successives.

- **Le dégrillage grossier** : est assuré par une grille à nettoyage manuel dont l'espacement entre les barreaux est de 5 cm, permettant l'élimination des éléments de grande taille.
- **dégrillage fin** : effectué à l'aide d'une grille automatique rotative présentant un espacement de 1,5 mm, une capacité hydraulique de 430 m³/h et entraînée par un moteur d'une puissance de 0,55 kW. Les refus de dégrillage ainsi collectés sont évacués manuellement et dirigés vers une décharge contrôlée, contribuant ainsi à la protection des équipements en aval et à l'amélioration de l'efficacité globale du traitement.



Figure II-6: dégrilleur

b dessablage–désuilage

Destinée à éliminer les matières minérales lourdes, telles que les sables et graviers, ainsi que les graisses et huiles susceptibles de gêner le fonctionnement du traitement biologique. Cette phase est réalisée dans un canal de configuration rectangulaire présentant une hauteur de 3,61 m, une longueur totale de 7 m, une largeur totale de 2,5 m et un volume de 45,8 m³, où la vitesse d'écoulement est maintenue à environ 0,3 m/s afin de favoriser la décantation des particules minérales tout en évitant la sédimentation des matières organiques. L'aération par insufflation d'air joue un rôle essentiel en facilitant, d'une part, la séparation des sables qui se déposent au fond de l'ouvrage avant d'être relevés vers une trémie puis acheminés vers les lits de séchage, et, d'autre part, la flottation des graisses et des huiles en surface. Ces dernières sont récupérées dans une zone de tranquillisation et transférées vers un puisard à graisses avant d'être pompées vers les lits de séchage. Cette étape permet ainsi de protéger efficacement les ouvrages en aval et d'optimiser les performances du traitement biologique.



FigureII-7: représente combine (dessableur- déshuileur)

3.2.3.2 Traitement biologique :

Le traitement biologique constitue l'étape essentielle de l'épuration des eaux usées et repose sur l'action de micro-organismes capables de dégrader la matière organique biodégradable, permettant ainsi la réduction des paramètres de pollution comme la DBO₅, la DCO et les matières en suspension (MES). Les micro-organismes impliqués sont classés en trois catégories : aérobies, anaérobies et facultatifs, ces derniers étant majoritaires dans les procédés de boues activées en raison de leur capacité d'adaptation aux variations des conditions d'oxygénation. Le procédé adopté au niveau de la station d'épuration est celui des boues activées à aération prolongée et il est assuré par un ensemble d'ouvrages fonctionnant de manière intégrée, à savoir :

- **Le bassin d'aération :**
- **Le bassin de clarification :**
- **Le poste de recirculation :**

a. Bassin d'aération

Les eaux usées prétraitées sont acheminées vers le bassin d'aération, après leur relevage par la station de pompage, où se déroule l'étape principale du traitement biologique. Cet ouvrage, de forme circulaire, présente un diamètre de 28 m, une surface de 615,44 m² et une hauteur d'eau de 3,6 m. Il est équipé de trois aérateurs de surface de type turbine à axe vertical, fonctionnant à deux vitesses, chacun d'une puissance de 35 kW et d'une performance d'environ 92 %. Un oxymètre permet le suivi continu de la concentration en oxygène dissous, maintenue entre 1 et 5 mg·L⁻¹ selon la saison. L'aération assure l'apport d'oxygène nécessaire à l'activité des micro-organismes, le maintien des boues activées en suspension et un contact efficace entre la biomasse et la matière organique, garantissant ainsi une réduction significative de la DBO₅, de la DCO et des MES.



Figure II-8: bassin d'aération

a Bassin de clarification :

Le bassin de clarification, ou décanteur secondaire, constitue une étape essentielle du traitement biologique, agissant en complément du bassin d'aération avec lequel il forme une unité fonctionnelle unique. Cet ouvrage, de forme circulaire, présente un diamètre de **20,5 m**, une surface de **330 m²**, un volume de **977 m³** et une hauteur d'eau de **2,96 m**. La liqueur mixte issue du bassin d'aération y est acheminée pour subir une séparation solide-liquide. L'alimentation s'effectue par une conduite en siphon située au centre du bassin et équipée d'une jupe de répartition assurant une distribution homogène de l'effluent.

Au sein de cet ouvrage, les floccs biologiques se séparent de l'eau interstitielle et se déposent au fond du bassin sur le radier, formant les boues secondaires, tandis que l'eau clarifiée est évacuée par surverse dans une rigole périphérique. Ce processus permet d'obtenir un effluent clarifié prêt pour les étapes ultérieures de traitement, tout en assurant la récupération des boues destinées à la recirculation ou à l'extraction .

b. Poste de recirculation et d'extraction des boues

Les boues reprises au centre du décanteur sont transférées par gravité vers le poste de recirculation et d'extraction des boues pour être recirculées ou dirigées vers le traitement des boues en fonction de la destination des boues produite.

c. Boues de recirculation :

L'efficacité du procédé de traitement biologique par boues activées repose sur la recirculation d'une partie des boues issues de la décantation secondaire vers le bassin d'aération. Cette recirculation permet de maintenir une concentration adéquate de micro-organismes, indispensable à la dégradation de la matière organique et à la stabilité du processus épuratoire. Au niveau de la station d'épuration de Hassi R'mel, cette opération est assurée par deux groupes d'électropompes, chacun ayant un débit de **125 m³/h**. Le recyclage des boues contribue non seulement à garantir un niveau d'épuration biologique optimal, mais également à prévenir le colmatage et l'accumulation excessive des boues dans le bassin de décantation.

d. Boues en excès

Les boues en excès, résultant de la croissance de la biomasse au cours du traitement biologique, sont extraites du poste de pompage afin de maintenir l'équilibre du système. Cette extraction est réalisée à l'aide d'une pompe d'un débit de **125 m³/h**, les boues présentant une teneur moyenne en matière sèche de **8 g/L**. Le volume journalier de boues produites est estimé à environ **96 m³/j**. Ces boues sont ensuite dirigées vers la filière de traitement des boues pour leur stabilisation et leur déshydratation avant leur élimination ou leur valorisation éventuelle

3.2.3.3 Désinfection des eaux

La désinfection est mise en œuvre afin d'éliminer les germes pathogènes et de réduire les nuisances olfactives. L'eau clarifiée issue du bassin de décantation secondaire est introduite dans un bassin de stérilisation où elle subit une désinfection par injection d'**hypochlorite de sodium à 47°**. L'unité de chloration est constituée d'un groupe de dosage comprenant **deux pompes doseuses** ainsi que des **cuves de stockage** installées dans un local séparé, garantissant ainsi la sécurité et la continuité de l'exploitation. La concentration appliquée en désinfectant est de **1,2 mg/L**, assurant une qualité microbiologique conforme aux normes environnementales en vigueur.

3.2.4 Filière de traitement des boues

L'opération de traitement des boues au niveau de la STEP sert à réduire le volume des matières à manipuler en enlevant une partie de l'eau, à cet effet les étapes de la filière de traitement des boues sont comme suit :

3.2.4.1 Épaississement des boues :

L'épaississement constitue la première étape du traitement des boues et vise à réduire leur volume sans dépense énergétique notable. Cette opération permet de concentrer les boues avant leur acheminement vers les lits de séchage, facilitant ainsi les étapes ultérieures de déshydratation. La suspension boueuse est introduite dans un épaississeur équipé d'un racleur, où un temps de séjour d'environ **23 heures** favorise le tassement des particules solides. Les boues épaissies sont ensuite évacuées gravitairement par le fond vers les lits de séchage, tandis que le liquide interstitiel est récupéré en surface et renvoyé vers la station de pompage des eaux usées pour un nouveau traitement. L'ouvrage se présente sous la forme d'un cylindre à fond conique et à faible pente, présentant un **diamètre de 5,5 m**, une **hauteur de 3,80 m**, une **surface de 32,75 m²** et un **volume de 91,7 m³**.

3.2.4.2 Séchage naturel des boues (lit de séchage)

Après épaissement, les boues, ayant une concentration moyenne d'environ **30 g·L⁻¹**, sont dirigées vers les lits de séchage où elles subissent une déshydratation naturelle par drainage et évaporation. La station dispose de **huit lits de séchage**, chacun présentant une **surface unitaire de 160 m²**. Les boues y sont épandues avec une **hauteur moyenne de 0,4 m**, Longueur : 20m, largeur : 8m permettant un séchage efficace sur une **durée d'environ 20 jours**, en fonction des conditions climatiques. Le **nombre de rotations annuelles** des lits est estimé à **18**, ce qui conduit à une **production annuelle de boues d'environ 936 m³**. Ce procédé, simple et économique, est particulièrement adapté aux



Figure II-9:représente un lit de séchage

régions à climat aride, favorisant une réduction significative de la teneur en eau des boues avant leur évacuation ou leur valorisation éventuelle.

3.3. Système de commande et de supervision

La station d'épuration est équipée d'un système moderne de commande et de supervision permettant une gestion efficace et sécurisée de l'ensemble des installations. La conduite des opérations peut être réalisée à distance depuis une salle de contrôle dotée d'un **ordinateur (PC)** muni d'un logiciel de supervision. Ce système permet le suivi en temps réel des principaux paramètres de fonctionnement, la commande des équipements électromécaniques ainsi que la visualisation des schémas du procédé, garantissant ainsi une exploitation optimale, une réactivité accrue en cas d'anomalie et une meilleure fiabilité du système d'épuration. **(fiche technique de la step de Hassi R'mel Sonatrach)**

3.4. Particularités de la station d'épuration de Hassi R'mel

À l'instar des autres stations d'épuration en Algérie utilisant le procédé des boues activées à faible charge, la station de Hassi R'mel respecte les normes préconisées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Elle se distingue par ses installations modernisées, ses méthodes d'analyse performantes ainsi que par l'automatisation de son procédé. La gestion de l'exploitation et de la maintenance est assurée par un système assisté par ordinateur, basé sur un automate programmable industriel (API) et un logiciel de supervision. La figure N°2 présente le schéma de la station.

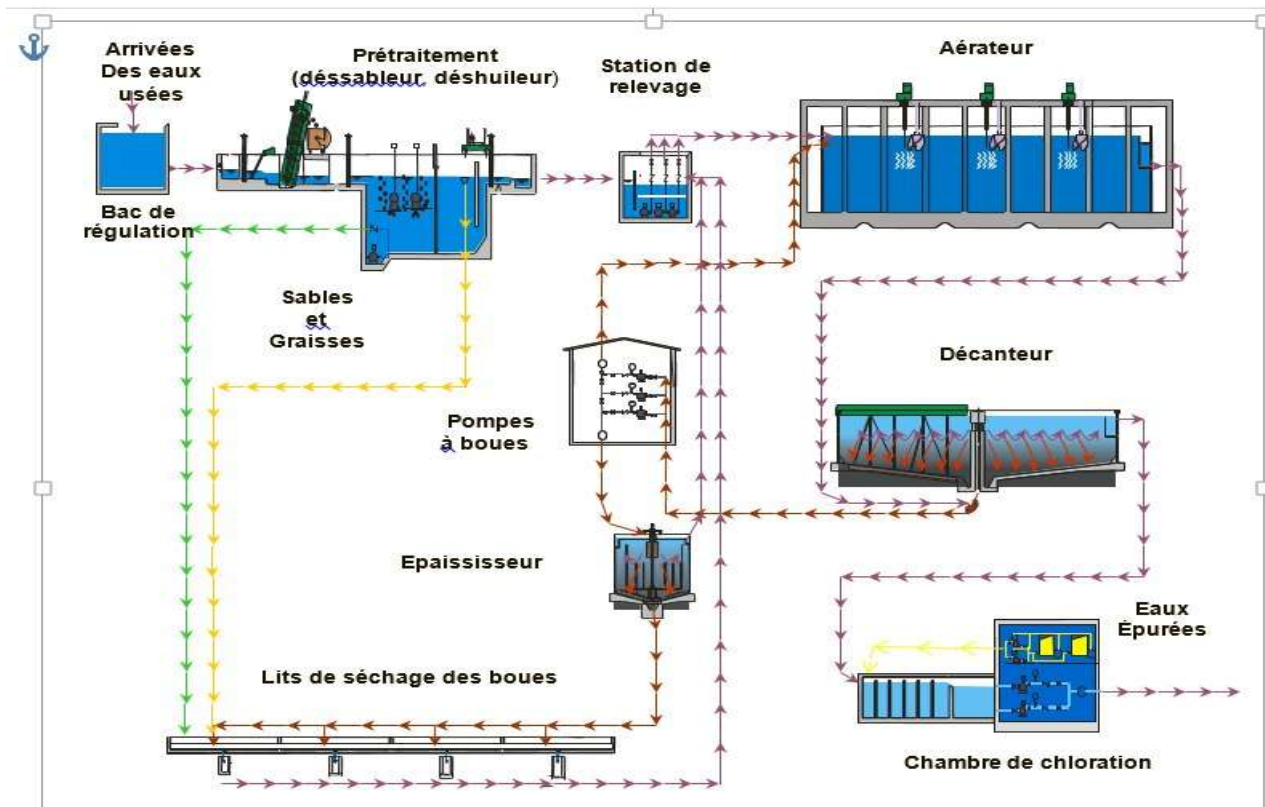


Figure II-10: Schéma représente le procédé de traitement des eaux usées de la station d'épuration de Hassi R'mel depuis l'arrivée des eaux brutes jusqu'à l'obtention des eaux épurées et le traitement des boues

4. La réutilisation des eaux usées traitées au niveau de la station d'épuration de Hassi R'mel :

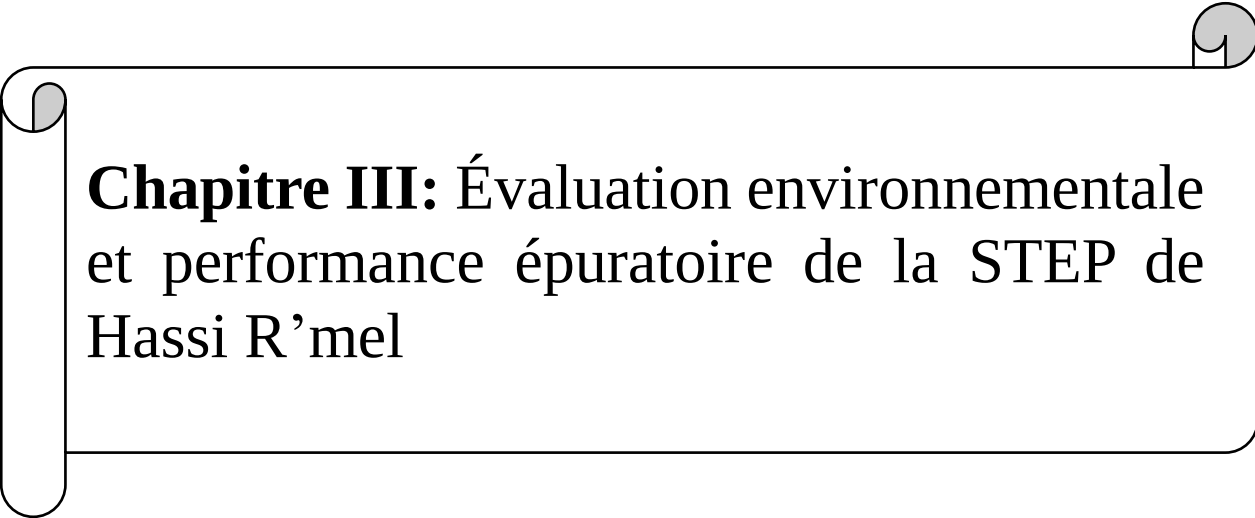
La réutilisation des eaux usées traitées issues de la station d'épuration de Hassi R'mel constitue une alternative stratégique face au stress hydrique caractérisant les zones arides. Le traitement adopté, basé sur le procédé des boues activées à faible charge avec aération prolongée, permet une élimination efficace de la pollution organique, traduite par une réduction significative de la demande biochimique en oxygène (DBO5) et des matières en suspension (MES). À l'issue du traitement biologique et de la

clarification, suivis d'une désinfection par chloration, l'effluent traité présente une qualité compatible avec plusieurs usages non potables, notamment l'irrigation agricole, l'arrosage des espaces verts et certaines applications industrielles. De plus, la présence résiduelle de nutriments tels que l'azote et le phosphore confère à cette eau un intérêt agronomique, contribuant à l'amélioration de la fertilité des sols et à la réduction des apports en engrais chimiques.

Cependant, malgré ces avantages, la réutilisation des eaux usées traitées présente certaines limites qui nécessitent une attention particulière. En effet, une désinfection insuffisante peut entraîner la persistance de germes pathogènes, représentant un risque sanitaire, tandis qu'une concentration élevée en sels dissous peut engendrer des phénomènes de salinisation des sols à long terme. De même, la présence éventuelle de micropolluants ou de substances indésirables peut affecter la qualité des cultures et des ressources souterraines. Par ailleurs, des problèmes techniques tels que le colmatage des systèmes d'irrigation peuvent survenir en cas de teneurs élevées en matières en suspension.

Afin d'optimiser la réutilisation de ces eaux, il est recommandé de mettre en place un système de suivi rigoureux basé sur le contrôle régulier des paramètres physico-chimiques et microbiologiques (pH, conductivité, DBO5, DCO, MES, germes pathogènes), ainsi que d'envisager, si nécessaire, des traitements complémentaires tels que la filtration ou la désinfection avancée. En outre, une gestion adaptée des pratiques d'irrigation et une sensibilisation des utilisateurs sont essentielles pour minimiser les impacts négatifs potentiels.

Ainsi, la réutilisation des eaux usées traitées au niveau de la STEP de Hassi R'mel s'inscrit pleinement dans une démarche de développement durable, en permettant à la fois la préservation des ressources en eau conventionnelles, la protection de l'environnement et la valorisation d'une ressource alternative, répondant aux besoins croissants en eau dans la région.

A decorative scroll frame with a light gray background and a black border. The frame has a vertical scroll on the left side and a horizontal scroll on the top right side.

Chapitre III: Évaluation environnementale et performance épuratoire de la STEP de Hassi R'mel

Chapitre III : Évaluation environnementale et performance épuration de la STEP de Hassi R'mel

Introduction du chapitre :

La gestion des eaux usées représente un enjeu environnemental majeur, particulièrement dans les régions où les ressources hydriques sont limitées et soumises à une forte pression. Les stations d'épuration (STEP) jouent un rôle central dans la réduction de la pollution et la préservation des milieux naturels.

L'évaluation environnementale de la STEP de Hassi R'mel s'inscrit dans cette perspective, en cherchant à apprécier la capacité de l'installation à améliorer la qualité des effluents avant leur rejet. L'étude repose sur le suivi de paramètres physico-chimiques représentatifs de la pollution et sur la comparaison des résultats obtenus avec les normes réglementaires algériennes.

Cette démarche met en évidence l'importance de ces infrastructures pour la protection de l'environnement et la santé publique, tout en soulignant la nécessité d'un suivi régulier afin de garantir la conformité des rejets et l'efficacité durable du traitement.

I. Méthodologie de prélèvement et d'analyse

I.1. Points de prélèvement

I.1.1 Entrée STEP :

Les analyses effectuées à l'entrée de la station permettent de :

- Caractériser la charge polluante brute reçue par la station.
- Déterminer les concentrations initiales des paramètres (DBO5, DCO, MES, azote, phosphore, etc.).
- Vérifier l'adéquation entre la charge entrante et la capacité nominale de traitement.
- Évaluer les performances épuratoires des ouvrages par comparaison avec les résultats obtenus en sortie.

Les analyses dans le bassin d'aération permettent de :

- Contrôler l'activité biologique de la biomasse épuratrice.
- Vérifier les conditions nécessaires à la dégradation de la matière organique.
- Suivre le bon fonctionnement du procédé de traitement biologique.
- Détecter rapidement les dysfonctionnements du système.

I.1.2 Sortie STEP :

Les analyses dans le bassin d'aération permettent de :

- Contrôler l'activité biologique de la biomasse épuratrice.
- Vérifier les conditions nécessaires à la dégradation de la matière organique.
- Suivre le bon fonctionnement du procédé de traitement biologique.
- Détecter rapidement les dysfonctionnements du système.

I.2. Fréquence et conditions de prélèvement

Dans le cadre de l'étude environnementale de la STEP de Hassi R'Mel, une campagne de prélèvements a été réalisée sur une durée de **16 jours** correspondant à la période de stage. Afin d'assurer une représentation fidèle des performances de l'installation, les échantillons ont été collectés selon une fréquence planifiée. Ainsi, un prélèvement a été effectué **tous les cinq jours**, ce qui a permis de disposer de **trois séries distinctes d'analyses** (désignées J1, J2 et J3).

Conditions de prélèvement : Afin de standardiser les résultats et d'assurer leur comparabilité, tous les prélèvements manuels ont été effectués systématiquement à 07h00 du matin.

Conditions de conservation et analyse : Le laboratoire étant situé au sein du bâtiment administratif de la station, l'analyse immédiate des échantillons après prélèvement a permis d'éliminer les risques de dégradation liés au transport ou à une conservation prolongée.

I.3. Méthodes analytiques utilisées

I.3.1. Mesure du pH, de la Conductivité et de la Température :

La mesure simultanée de ces paramètres est indispensable pour évaluer le caractère corrosif ou entartrant de l'effluent et pour confirmer son origine (industrielle ou urbaine).

➤ Principe de la mesure

- **pH** : Mesure de l'activité des ions hydrogène (H^+) par une électrode combinée en verre (potentiométrie). (AFNOR., 2007)
- **Conductivité** : Mesure de la capacité de l'eau à conduire le courant électrique, directement proportionnelle à la concentration en sels dissous (ionisation). (AFNOR., 2012)
- **Température** : Mesure par sonde thermométrique (thermistance) intégrée au multiparamètre.(Hach Company., 2020)

➤ Mode opératoire

1. **Étalonnage** : Le conductimètre et le pH-mètre sont calibrés quotidiennement avec des solutions tampons certifiées (pH 4,01 ; 7,00 ; 10,01) et des solutions standards de conductivité (1413 $\mu S/cm$).
2. **Mesure** : Les électrodes sont rincées à l'eau distillée, séchées, puis immergées dans l'échantillon. La valeur est relevée après stabilisation du signal sur l'afficheur numérique.
3. **Entretien** : Les électrodes sont conservées dans une solution de stockage appropriée pour éviter la déshydratation de la membrane en verre.



Figure III- 11: pH-mètre de laboratoire HACH sensION+ PH3

I.3.2. Turbidité (Colorimétrie DR900)

➤ **Appareillage :** Spectrophotomètre portatif Hach DR900.

➤ **Mode opératoire :**

1. Rincer la cuve avec l'échantillon.
2. Introduire l'échantillon dans la cuve, nettoyer les parois extérieures (traces de doigts).
3. Sélectionner le programme "Turbidité" sur le DR900.
4. Insérer la cuve, fermer le couvercle et lancer la mesure (unité NTU ou FNU). (**Hach Company., 2020**)

I.3.3. Mesure de la matière en suspension (MES)

La détermination des matières en suspension a été réalisée par la méthode de filtration sur membrane en fibre de verre de porosité 0,45 µm.

➤ **But de l'analyse :**

Cette analyse a pour objectif de mesurer la concentration des matières en suspension présentes dans les eaux usées par filtration sur filtre en fibres de verre.

➤ **Mode opératoire**

- Les échantillons sont d'abord laissés à température ambiante.
- La capsule en aluminium contenant le filtre est pesée à l'aide d'une balance analytique.
- Le filtre est ensuite placé dans l'entonnoir du dispositif de filtration, avec la face lisse orientée vers le bas.
- Un volume de 50 mL est utilisé pour l'eau brute et de 200 mL pour l'eau épurée, selon la charge de l'échantillon.
- L'échantillon est versé dans l'entonnoir, puis l'éprouvette est rincée avec une petite quantité d'eau distillée afin de récupérer toutes les particules.
- La filtration est effectuée sous vide à l'aide d'une pompe d'aspiration.
- Après filtration, les parois internes de l'entonnoir sont rincées avec de l'eau distillée, puis cette eau est également filtrée.
- Lorsque le filtre devient pratiquement sec, le vide est interrompu.
- Le filtre est retiré délicatement à l'aide d'une pince plate.
- Les capsules sont ensuite placées dans une étuve à 105 ± 2 °C pendant au moins deux heures.

- Après séchage, les capsules sont mises dans un dessiccateur durant environ 30 minutes avant la pesée finale.

La teneur en matières en suspension est calculée par la relation suivante :

$$MES = \frac{(M1 - M0) \times 1000}{V}$$

Avec :

MES : concentration des matières en suspension (mg/L) ;

V : volume filtré (mL) ;

M0 : masse du filtre vide (mg) ;

M1 : masse du filtre après filtration et séchage (mg).

(Hach Company., 2020)



Figure III-12: filtre à pompe à 6 postes (unité de filtration sous vide)

I.3.4. Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)

La détermination de la demande chimique en oxygène a été réalisée à l'aide des kits Hach LCK114 pour les eaux brutes et LCK314 pour les eaux épurées, conformément aux recommandations du fabricant.

But de l'analyse

Cette analyse permet de déterminer la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation chimique des matières organiques présentes dans l'eau.

Mode opératoire

- Une cuve adaptée à la gamme de mesure est sélectionnée puis homogénéisée.
- Deux millilitres d'échantillon sont introduits dans la cuve.
- La cuve est agitée soigneusement.
- Les tubes sont chauffés pendant deux heures à 148 °C à l'aide d'un thermostat.
- Après chauffage, les cuves sont laissées à refroidir puis agitées de nouveau.
- Les cuves sont nettoyées avant d'être placées dans le spectrophotomètre réglé à la longueur d'onde appropriée.
- La concentration de la DCO est affichée directement sur l'écran de l'appareil en mg O₂/L.



Figure III-13: Bloc de digestion thermique RECOD (thermoréacteur) employé pour le prétraitement des échantillons avant l'analyse de la demande chimique en oxygène (DCO).

Détermination de la demande biologique en oxygène (DBO₅)

But de l'analyse

La DBO₅ permet d'évaluer la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour dégrader la matière organique biodégradable pendant une période de cinq jours.

Mode opératoire

- Le volume approprié d'échantillon est introduit dans les flacons de l'appareil BODTrak contenant un agitateur magnétique.
- Une graisse d'étanchéité est appliquée sur le bord des flacons et sur la lèvre de la cupule.
- Environ 0,4 g d'hydroxyde de potassium est placé dans chaque cupule.
- Les flacons sont ensuite installés sur l'appareil BODTrak.
- Les tuyaux correspondants sont raccordés puis les bouchons sont serrés correctement.

- L'appareil est placé dans un incubateur maintenu à 20 °C.

(Hach Company., 2020)

I.3.5. Détermination des Nitrates (NO_3^-) et Nitrites (NO_2^-)

Ces paramètres sont indicateurs du degré de traitement biologique et de l'efficacité de la nitrification/nitrification dans les stations d'épuration à boues activées.

➤ Principe de la méthode (Spectrophotométrie)

La détermination repose sur la formation d'un complexe coloré dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en ions nitrates ou nitrites, mesurée par spectrophotométrie dans le visible.

➤ Mode opératoire

1. **Préparation** : L'échantillon est filtré pour éliminer les matières en suspension.
2. **Réaction** : Utilisation de réactifs pré-dosés (type Hach NitraVer® ou NitriVer®).
3. **Mesure** : Après un temps de réaction spécifique, l'intensité de la coloration est mesurée au spectrophotomètre (longueur d'onde appropriée selon la gamme).

(AFNOR., 2000; Hach Company., 2020)

I.3.6. Dosage des orthophosphates (PO_4^{3-}) – Hach TNTplus

- **Méthode** : Acide ascorbique (Ascorbic Acid Method) – Hach Method 10209.
- **Gamme de mesure (exemple TNT843)** : 0,15 – 4,50 mg/L PO_4 .

➤ Mode opératoire :

1. Homogénéiser l'échantillon.
2. Prélever le volume indiqué (généralement 5 mL selon le kit TNT).
3. Introduire l'échantillon dans le tube TNTplus.
4. Fermer et mélanger par retournements.
5. Attendre 10 minutes pour le développement de la couleur bleue.
6. Essuyer le tube.
7. Insérer le tube dans le spectrophotomètre DR3900.
8. Lire directement la concentration en PO_4^{3-} .

I.3.7. Dosage des sulfates (SO_4^{2-}) – Hach TNTplus

- **Méthode** : Turbidimétrie (formation de sulfate de baryum). Hach Method 10227.

- **Exemple de gamme (TNT865) :** 150 – 900 mg/L SO_4^{2-} .

➤ **Mode opératoire :**

01. Homogénéiser l'échantillon.
02. Introduire le volume requis dans le tube TNTplus.
03. Fermer puis agiter vigoureusement afin de former la suspension.
04. Attendre le temps de réaction indiqué par la méthode (environ 5 minutes, selon le kit).
05. Nettoyer l'extérieur du tube.
06. Introduire le tube dans le DR3900.
07. Lire directement la concentration en SO_4^{2-}

II. Présentation des résultats analytiques

II.1 Résultats des eaux brutes à l'entrée

Tableau suivant présente les résultats des analyses physico-chimiques des eaux brutes effectuées à l'entrée de la step :

Tableau III-3 : Résultats des eaux brutes à l'entrée

PARAMETRE	Unité	J1	J2	J3	moy Entrée
Température	°C	13,9	11,9	14,1	13,30
Ph	/	7,94	7,92	7,75	7,87
Conductivité	$\mu\text{s}/\text{cm}$	1719	1824	1927	1823,33
Turbidité	FTU	206	209	158	191,00
M.E.S	mg/l	247	234	177	219,33
DCO	mg/l	691,6	655,2	495	613,93
DBO5	mg/l	274,2	259,7	196,3	243,40
NO_3^-	mg/l	86,5	86,2	121	97,90
NO_2^-	mg/l	0,16	0,174	0,126	0,15
NH_4^+	mg/l	1,4	0,91	1,4	1,24
PO_4^{3-}	mg/l	1,78	2,9	3,04	2,57
SO_4^{2-}	mg/l	98	152	158	136,00

II.2 Résultats des eaux traitées à la sortie

Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées à sortie de la step ainsi que leur comparaison aux valeurs limites fixées par le Décret n°06-141 sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III-4 : Résultats des eaux traitées à l'entrée et la conformité aux normes de rejets du décret exécutif n°06-141

PARAMETRE	Unité	J1	J2	J3	Moy sortie	Norme(D.E. 06-141)	Conforme (oui /non)
Température	°C	13,9	12,4	14,5	13,67	≤ 30	Oui
Ph	/	7,94	8,29	8,43	8,34	6,5 - 8,5	Oui
Conductivité	µs/cm	1719	1425	1594	1543,33	-	-
Turbidité	FTU	206	17	10	11,33	-	-
M.E.S	mg/l	247	21	14	15,33	≤ 35	Oui
DCO	mg/l	691,6	40,5	27	29,56	≤ 120	Oui
DBO5	mg/l	274,2	17,4	11,6	12,7	≤ 35	Oui
NO3-	mg/l	86,5	44,2	42,5	42	≤ 50	Oui
NO2-	mg/l	0,16	0,066	0,03	0,045	-	-
NH4+	mg/l	1,4	0,54	0,13	0,24	-	-
PO4-3	mg/l	1,78	3,26	3,56	4,2	≤ 10 (P total)	Oui
SO4-2	mg/l	98	269	316	289,67	-	-

III. Calcul des rendements épuratoires :

$$R\% = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}}$$

Ou :

C_{in} : concentration du paramètre à l'entrée (mg/L)

C_{out} : concentration du paramètre à la sortie (mg/L)

Ainsi, pour chaque journée, 4 rendements ont été déterminés :

- R_{DCO}
- R_{DBO5}
- R_{MES}
- $R_{azote} \%$

III.1 Rendement d'élimination de la DBO5

Tableau suivant présente les rendements de DBO₅ dans les trois jours analyses et le rendement moyen :

Tableau III-5: Rendement d'élimination de la DBO₅

Paramètre	J1 (%)	J2 (%)	J3 (%)	Rendement moyen (%)
DBO₅	96,68	93,30	94,09	94,69

III.2 Rendement d'élimination de la DCO

Tableau suivant présente les rendements de DCO dans les trois jours analyses et le rendement moyen :

Tableau III-6: Rendement d'élimination de la DCO

Paramètre	J1 (%)	J2 (%)	J3 (%)	Rendement moyen (%)
DCO	96,93	93,82	94,55	95,10

III.3 Rendement d'élimination des MES

Tableau suivant présente les rendements de MES dans les trois jours analyses et le rendement moyen :

Tableau III- 7: Rendement d'élimination des MES

Paramètre	J1 (%)	J2 (%)	J3 (%)	Rendement moyen (%)
MES	95,55	91,03	92,09	92,89

III.4 Rendement des formes azotées :

Tableau suivant présente les rendements des formes azotées dans les trois jours analyses et le rendement moyen :

Tableau III-8: Rendement des formes azotées

Paramètre	J1 (%)	J2 (%)	J3 (%)	Rendement moyen (%)
NO₃⁻	54,57	48,72	64,88	56,06
NO₂⁻	74,38	62,07	76,19	70,88
NH₄⁺	96,43	40,66	90,71	75,93

IV. Calcul des charges polluantes :

IV.1 Charges entrantes CP_{ent} :

Les charges polluantes entrantes peuvent être calculées à partir du débit journalier et les concentrations des eaux brutes selon la formule suivante :

$$CP_{ent} = Q_j \times C_{in} / 1000$$

Tableau III-9: Charges entrantes CP_{ent}

Paramètre	$C_{entrée}$ (mg/L)	Charge entrante (CP_{ent}) (kg/j)
DCO	613,93	1841,79
DBO5	243,40	730,20
MES	219,33	657,99

IV.2 Charges éliminées CP_{el} en kg/j :

Les charges polluantes éliminées peuvent être calculées à partir du débit journalier et les concentrations des eaux brutes et eaux traitées selon la formule suivante :

$$CP_{el} = Q_j \times (C_{in} - C_{out}) / 1000$$

Tableau III-10: Charges éliminées CP_{el} en kg/j

Paramètre	C_{in} (mg/L)	C_{out} (mg/L)	Charge éliminée (CP_{el}) (kg/j)
DCO	613,93	29,56	1753,11
DBO5	243,40	12,70	692,10
MES	219,33	15,33	612,00

V. Indice de biodégradabilité

V.1 Calcul du rapport DBO5/DCO ou DCO/DBO5

La biodégradabilité traduit l'aptitude d'un effluent à être décomposé ou oxydé par les micro-organismes qui interviennent dans le processus d'épuration biologique des eaux.

La biodégradabilité est exprimée par un coefficient K, tel que, $K = DCO / DBO5$:

Si $k < 1,5$: cela signifie que les matières oxydables sont constituées en grande partie de matières fortement biodégradable ;

Si $1,5 < K < 2,5$: cela signifie que les matières oxydables sont moyennement biodégradables.

Si $2,5 < K < 3$: les matières oxydables sont peu biodégradables.

Si $K > 3$: les matières oxydables sont non biodégradables.

(Metahri, 2012)(Jean Rodier et al., 2016; Metcalf & Eddy, 2014)

En utilisant les valeurs moyennes de DCO et de DBO₅ mesurée à l'entrée de la step pour obtenir le résultat de l'indice K.

$$K = \frac{DCO_{\text{moy entrée}}}{DBO_{5\text{ moy entrée}}} = \frac{613,93}{243,4} = 2,5$$

V.2 Interprétation

L'indice de biodégradabilité, mesuré par le rapport DCO/DBO₅, est d'environ 2,5 à l'entrée de la STEP sur les trois jours de suivi. Cette valeur indique qu'il s'agit d'eaux usées de type urbain. Leur biodégradabilité étant jugée moyenne à bonne, elles sont parfaitement adaptées à un traitement biologique à boue activée et lagunage.

(Jean Rodier et al., 2016; Metcalf & Eddy, 2014)

VI. Analyse graphique des résultats

VI.1 Courbes sortie STEP / normes :

VI.1.1 Demande biologique en oxygène (5 jours):

La figure suivante représente la variation de la concentration de la DBO₅ mesurée à la sortie de la step et la comparaison avec la valeur limite fixée par décret exécutif n°06-141 (DBO₅ Norme=35 mg /l) (Décret exécutif n° 06-141, 2006)

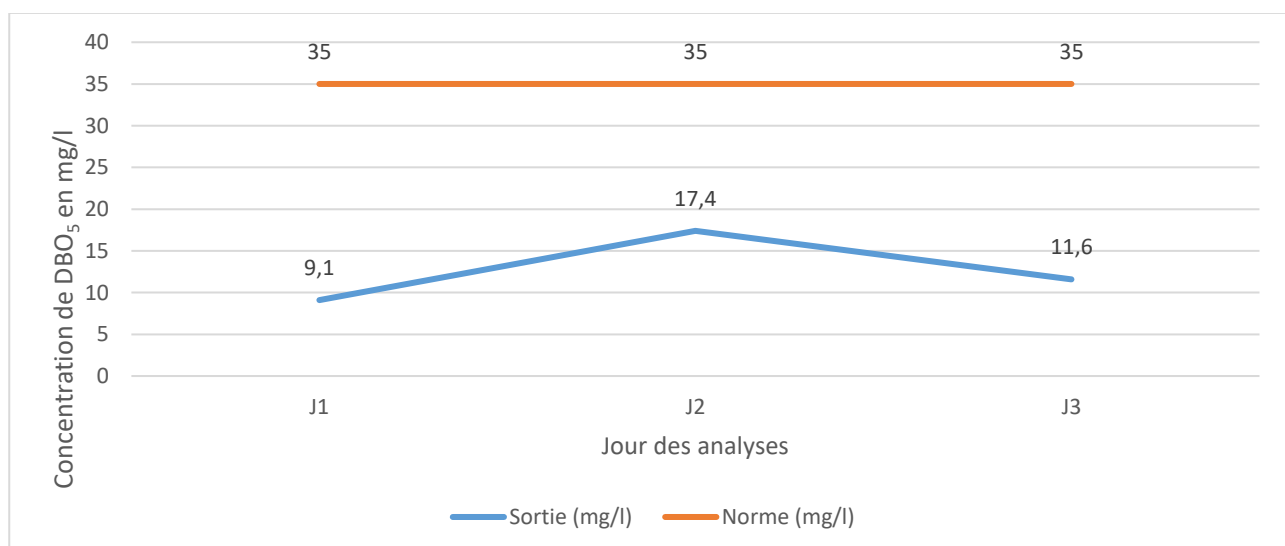


Figure III-14: Variation de la DBO₅ en sortie de la STEP par rapport à la norme du décret exécutif n° 06-141 (35 mg/L).

VI.1.2 Demande chimique en oxygène :

La figure suivante représente la variation de la concentration de la DCO mesurée à la sortie de la step et la comparaison avec la valeur limite fixée par décret exécutif n°06-141 ($DCO_{Norme}=120 \text{ mg /l}$) (Décret exécutif n° 06-141,2006)

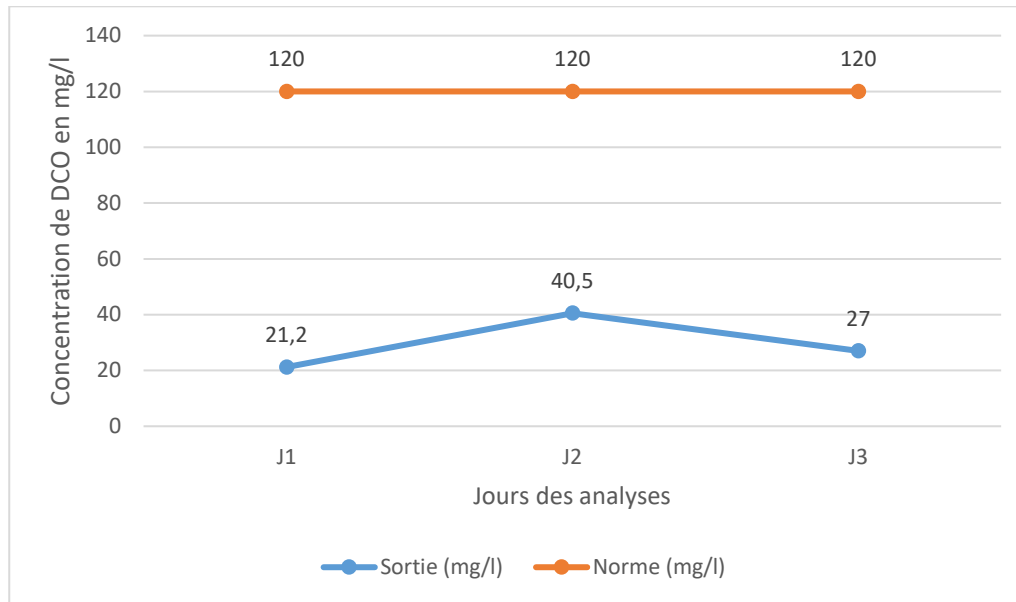


Figure III-15: Variation de la DCO en sortie de la STEP par rapport à la norme du décret exécutif n° 06-141 (120 mg/L).

VI.1.3 Matière en suspension :

La figure suivante représente la variation de la concentration de la MES mesurée à la sortie de la step et la comparaison avec la valeur limite fixée par décret exécutif n°06-141 ($MES_{Norme}=35 \text{ mg /l}$) (Décret exécutif n° 06-141, 2006)

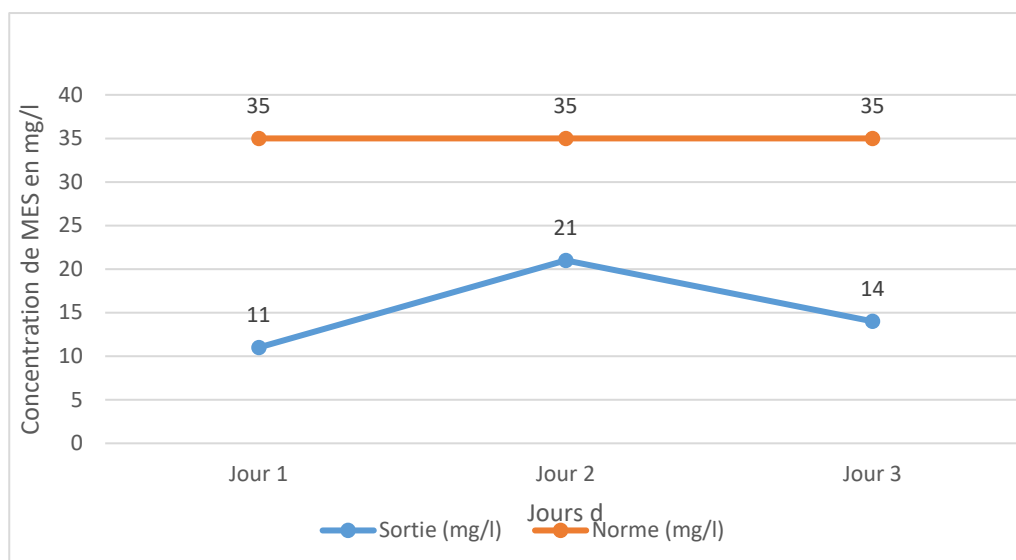


Figure III-16: Variation de les MES en sortie de la STEP par rapport à la norme du décret exécutif n° 06-141 (35 mg/L).

VI.1.4 Nitrates (NO_3^-) :

La figure suivante représente la variation de la concentration de la NO_3^- mesurée à la sortie de la step et la comparaison avec la valeur limite fixée par décret exécutif n°06-141 (NO_3^- Norme=50 mg /l) (Décret exécutif n° 06-141, 2006)

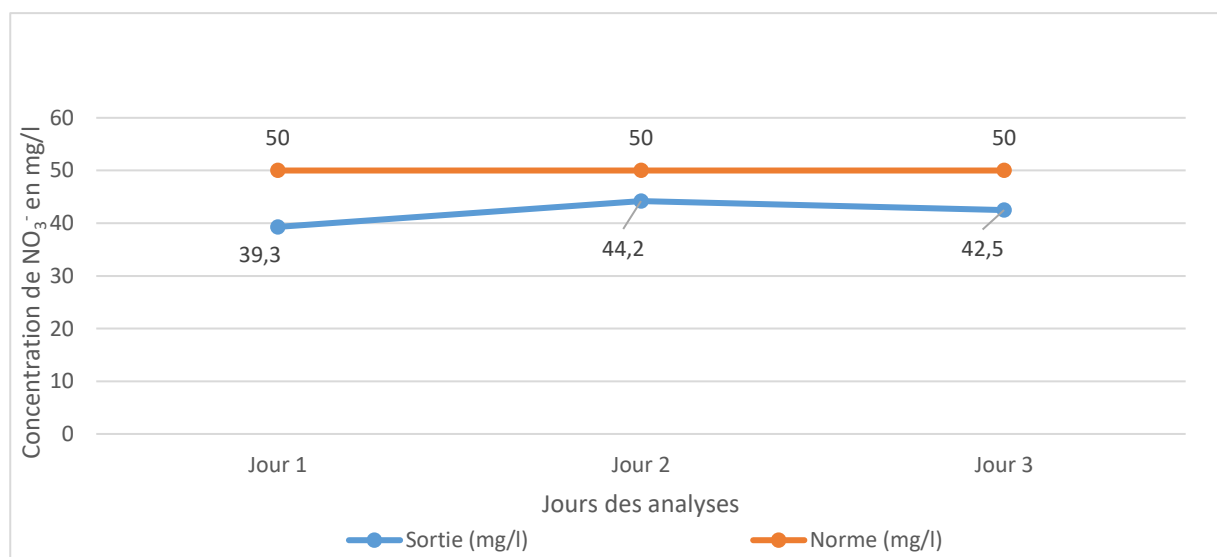


Figure III-17: Variation de la NO_3^- en sortie de la STEP par rapport à la norme du décret exécutif n° 06-141 (50 mg/L).

VI.2 Interprétation des courbes :

VI.2.1 Demande chimique en oxygène :

La courbe montre que les concentrations de **DCO** des eaux traitées à la sortie varient entre **21,2 mg/l** et **40,5 mg/l** durant la période des études ; la concentration moyenne de la DCO en sortie est de **29,56 mg/L**, soit une valeur nettement inférieure à la norme de rejet **fixée à 120 mg/L**. Cette faible concentration indique une réduction importante de la charge organique totale avec un bon rendement de **95,10%**, qu'elle soit biodégradable ou non biodégradable. Elle reflète ainsi une bonne performance globale du procédé d'épuration.

VI.2.2 Demande biologique en oxygène (5 jours):

La courbe montre que les concentrations de **DBO5** des eaux traitées à la sortie varient entre **9,1 mg/l** et **17,4 mg/l** durant la période des études, la concentration moyenne de la DBO5 en sortie de la station est de **12,7 mg/L**, valeur largement inférieure à la limite réglementaire **de 35 mg/L**. Ce résultat traduit une élimination efficace de la matière organique biodégradable par les microorganismes présents dans le bassin d'aération avec un bon rendement de **94,69%**. Il témoigne également du bon fonctionnement du traitement biologique et de la qualité satisfaisante de l'effluent rejeté.

VI.2.3 Matière en suspension :

La courbe montre que les concentrations des **MES** des eaux traitées à la sortie varient entre **11 mg/l** et **21 mg/l** durant la période des études, la concentration moyenne des matières en suspension (MES) en sortie est de **15,33 mg/L**, valeur inférieure à la **limite réglementaire de 35 mg/L**. Ce résultat montre une élimination efficace des particules solides en suspension grâce aux processus de décantation et de clarification avec un bon rendement de **92,89%**. Il confirme également la bonne qualité de l'eau traitée avant son rejet dans le milieu récepteur.

VI.2.4 Nitrates (NO₃⁻) :

La courbe des nitrates montre que les concentrations de sortie varient entre **39,3** et **44,2 mg/L**, avec une moyenne de **42 mg/L**. Ces valeurs restent inférieures à la limite de **50 mg/L**, ce qui confirme la conformité du rejet pour ce paramètre. Toutefois, la proximité relative avec la valeur limite indique que le suivi des nitrates doit rester régulier, notamment en cas de variation de charge ou de modification des conditions d'aération (voir la recommandation concernant la sonde de O₂)

VII. Discussion générale des performances :

L'évaluation globale des performances de la STEP de Hassi R'mel met en évidence une efficacité épuratoire satisfaisante, particulièrement pour l'élimination de la pollution organique et particulaire.

Les rendements moyens obtenus sont élevés, avec **95,10 %** pour la **DCO**, **94,69 %** pour la **DBO₅** et **92,89 %** pour les **MES**. Ces résultats témoignent du **bon fonctionnement général** du procédé de traitement et de sa capacité à réduire significativement la charge polluante reçue à l'entrée de la station.

La performance observée pour la **DBO₅** confirme l'efficacité du traitement biologique. La faible concentration moyenne en sortie, estimée à **12,70 mg/L**, montre que la matière organique biodégradable est correctement dégradée par la biomasse présente dans le bassin d'aération. Ce résultat traduit une activité microbienne satisfaisante et une bonne adaptation du procédé aux caractéristiques des eaux usées reçues par la station.

La DCO présente également une réduction très importante, avec une concentration moyenne en sortie de **29,56 mg/L**, nettement inférieure à la limite réglementaire de **120 mg/L**. Cette performance indique que la STEP assure non seulement l'élimination de la matière organique biodégradable, mais aussi une réduction significative de la matière organique oxydable totale. Le rendement moyen de **95,10 %** confirme donc la stabilité et l'efficacité globale du traitement.

Concernant les matières en suspension, les résultats montrent une bonne efficacité de clarification. La concentration moyenne en sortie est de **15,33 mg/L**, inférieure à la norme de **35 mg/L**, avec un rendement moyen de **92,89 %**. Ces valeurs indiquent que la séparation entre l'eau traitée et les boues est globalement maîtrisée. Cela confirme le bon fonctionnement des ouvrages de décantation et limite les risques de rejet de particules solides dans le milieu récepteur.

L'analyse des formes azotées montre une situation plus nuancée. Le rendement d'élimination de l'ammonium NH_4^+ est relativement satisfaisant, avec une moyenne de 75,93 %, ce qui traduit une nitrification active au sein du bassin d'aération. Toutefois, les nitrates NO_3^- présentent des concentrations en sortie relativement **proches de la limite** réglementaire, avec une moyenne d'environ **42 mg/L** pour une norme de **50 mg/L**.

Cette accumulation relative des nitrates peut être expliquée par une aération excessive ou élevée au niveau des turbines. Une forte aération favorise l'oxydation de l'ammonium en nitrates, mais si les conditions nécessaires à la dénitrification ne sont pas réunies, notamment l'existence de zones pauvres en oxygène, les nitrates formés ne sont pas suffisamment réduits. Par conséquent, ils peuvent se retrouver en quantité importante dans l'eau traitée.

Malgré cela, la comparaison avec les valeurs limites du décret exécutif n°06-141 montre que les eaux épurées respectent les normes de rejet pour les principaux paramètres étudiés, à savoir la DBO₅, la DCO, les MES et les nitrates. Cette conformité réglementaire confirme que la STEP joue correctement son rôle dans la réduction de la pollution et dans la protection du milieu récepteur.

Cependant, certaines limites doivent être signalées. La principale concerne le suivi des formes azotées, en particulier les nitrates, dont les valeurs restent proches de la limite admissible. Il est donc recommandé de contrôler plus régulièrement le taux d'oxygène dissous dans le bassin d'aération, d'optimiser le fonctionnement des turbines et de vérifier l'équilibre entre les phases d'aération et les conditions favorables à la dénitrification.

D'une manière générale, la STEP de Hassi R'mel présente une performance environnementale satisfaisante. Les résultats obtenus montrent une bonne réduction de la pollution organique, une clarification efficace et une conformité globale aux normes de rejet. Néanmoins, l'optimisation de l'aération constitue un axe d'amélioration important, non seulement pour mieux maîtriser les nitrates, mais **aussi pour réduire la consommation énergétique liée au fonctionnement des turbines.**

VIII. Bilan environnemental de la STEP :

Tableau III-11:Tableau de synthèse du bilan environnemental

Aspect évalué	Résultat observé	Interprétation environnementale	Niveau de performance
Pollution organique biodégradable, DBO₅	Moyenne sortie : 12,70 mg/L ; rendement : 94,69 %	Très bonne élimination de la matière organique biodégradable ; faible risque de consommation d'oxygène dans le milieu récepteur.	Très satisfaisant
Pollution organique oxydable, DCO	Moyenne sortie : 29,56 mg/L ; rendement : 95,10 %	Réduction importante de la charge organique globale ; bonne efficacité du traitement biologique.	Très satisfaisant
Matières en suspension, MES	Moyenne sortie : 15,33 mg/L ; rendement : 92,89 %	Bonne clarification de l'eau traitée ; limitation du rejet de particules solides.	Satisfaisant à très satisfaisant
Ammonium, NH₄⁺	Rendement moyen : 75,93 %	Nitrification active ; transformation importante de l'ammonium en formes oxydées de l'azote.	Satisfaisant

Nitrates, NO₃⁻	Moyenne sortie : environ 42 mg/L ; norme : 50 mg/L	Rejet conforme, mais concentration proche de la limite ; effet probable d'une aération élevée par les turbines.	À surveiller
Conformité réglementaire	DBO ₅ , DCO, MES et NO ₃ ⁻ conformes	La STEP respecte les principales exigences du décret exécutif n°06-141.	Conforme
Impact sur le milieu récepteur	Rejet globalement épuré	Réduction significative du risque de pollution organique et particulaire.	Impact maîtrisé
Point sensible	Nitrates élevés	Nécessité d'optimiser l'aération et de surveiller les formes azotées.	Amélioration possible

Le bilan environnemental de la STEP de Hassi R'mel est globalement positif. Les résultats analytiques montrent une réduction importante de la pollution organique et particulaire, avec des rendements supérieurs à **90 %** pour la DBO₅, la DCO et les MES. Ces performances indiquent que le traitement assure une bonne protection du milieu récepteur contre les rejets chargés en matière organique et en particules solides.

Cependant, le paramètre des nitrates nécessite une attention particulière. Bien que les concentrations restent conformes à la norme, leur niveau relativement élevé peut être associé à une aération importante au niveau des turbines. Cette situation favorise la nitrification, mais peut limiter l'équilibre global du traitement de l'azote si la dénitrification n'est pas suffisante.

Ainsi, la station présente une bonne performance environnementale, mais une optimisation du fonctionnement des turbines d'aération pourrait améliorer davantage la qualité finale de l'eau épurée. Cette optimisation permettrait également de réduire la consommation énergétique, ce qui renforcerait la performance environnementale globale de la STEP.

Conclusion:

L'évaluation environnementale de la STEP de Hassi R'mel montre que le traitement assure une réduction importante de la pollution organique et particulaire. Les rendements moyens obtenus pour la DCO, la DBO₅ et les MES sont supérieurs à 90 %, ce qui confirme la bonne efficacité du procédé biologique. Les eaux traitées présentent des concentrations moyennes conformes aux valeurs réglementaires pour les principaux paramètres étudiés

La comparaison avec le décret exécutif n°06-141 confirme la conformité du rejet pour la température, le pH, la DBO₅, la DCO, les MES, les nitrates et les phosphates. Cette conformité montre que la STEP remplit correctement son rôle de protection du milieu récepteur. Néanmoins, le suivi régulier des formes azotées reste nécessaire afin de garantir la stabilité du traitement dans le temps.

Enfin, l'amélioration continue du fonctionnement de la station peut passer par une meilleure maîtrise de l'aération, une surveillance des boues activées et une optimisation énergétique. Ces actions permettraient de maintenir la qualité du rejet tout en réduisant les coûts d'exploitation et l'impact environnemental global de la STEP.

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical bar on the left and rounded corners on the right, containing the chapter title.

Chapitre IV: Audit électro-énergétique de la STEP de Hassi R'Mel

Chapitre IV: Audit électro-énergétique de la STEP de Hassi R'Mel

Introduction

Les stations d'épuration des eaux usées (STEP) sont des installations fortement consommatrices d'énergie, principalement en raison du fonctionnement continu des équipements électromécaniques tels que les systèmes de pompage, d'aération et de traitement des boues. Dans ce contexte, l'audit énergétique constitue un outil essentiel pour évaluer les performances de l'installation, identifier les postes les plus énergivores et mettre en évidence les opportunités d'optimisation. Au-delà des aspects techniques, la maîtrise de la consommation électrique contribue à la réduction des coûts d'exploitation ainsi qu'à la limitation des impacts environnementaux. Ainsi, ce chapitre présente le diagnostic électro-énergétique de la STEP de Hassi R'Mel à travers l'analyse de sa consommation électrique, l'identification des principaux postes de consommation et la proposition de solutions visant à améliorer son efficacité énergétique et sa durabilité.

1. Méthodologie de calcul énergétique

1.1 Collecte des données

La collecte des données a constitué la première étape de l'étude électro-énergétique de la STEP de Hassi R'Mel. Elle a consisté à recenser l'ensemble des équipements électriques et électromécaniques de la station afin de déterminer leur contribution à la consommation énergétique globale. Les informations relatives aux puissances nominales, aux durées de fonctionnement et aux conditions d'exploitation ont été obtenues à partir des fiches techniques des équipements, des documents d'exploitation et des observations réalisées sur site. Les données de consommation électrique ont également été complétées par l'analyse des factures Sonelgaz. L'ensemble de ces informations a permis d'établir un inventaire énergétique détaillé de la station, servant de base à l'évaluation des consommations électriques et à l'identification des postes les plus énergivores.

1.2 Méthode de calcul

L'évaluation de la consommation énergétique de la station d'épuration repose sur un inventaire détaillé de l'ensemble des équipements électriques installés sur le site. Pour chaque équipement, la consommation d'énergie a été déterminée à partir de sa puissance nominale et de sa durée de fonctionnement.

L'énergie consommée est calculée selon la relation suivante :

$$E = P \times t \text{ (ISO and ASME, 2019)}$$

où :

- **E** : énergie consommée (kWh) ;
- **P** : puissance électrique de l'équipement (kW) ;
- **t** : durée de fonctionnement (h).

1. 3 Classification des zones de la station

Afin de faciliter l'analyse du bilan énergétique, les équipements ont été répartis en deux grandes catégories :

- **Zone annexe** : elle regroupe les équipements liés à l'administration, à la supervision, à l'éclairage et aux services généraux de la station (bureaux, laboratoire, salle de contrôle, cuisine, poste de garde, éclairage extérieur, etc.).
- **Zone processus** : elle comprend les équipements directement impliqués dans les différentes étapes du traitement des eaux usées, tels que les pompes, les aérateurs, les agitateurs et les systèmes de recirculation.

2. Inventaire énergétique des bâtiments annexe

Cette section présente le bilan détaillé des consommations électriques et l'inventaire des équipements (éclairage, climatisation, bureautique) des locaux administratifs et techniques secondaires de la station. Ce tableau recense les puissances nominales ainsi que les consommations électriques journalières et mensuelles des différents équipements (éclairage, climatisation, bureautique) des locaux de la station.

Tableau IV- 12:Consommation énergétique des bâtiments annexe

Emplacement	Équipement	Puissance (kW)	Temps (h/j)	Temps (h/mois)	Énergie Jour (kWh/j)	Énergie Mois (kWh/mois)
Salle de contrôle	Climatiseur CONDOR 18K - 1	1,80	24	720	43,20	1 296,00
	Climatiseur CONDOR 18K - 2	1,80	24	720	43,20	1 296,00
	Unité Centrale COMPAQ	0,30	24	720	7,20	216,00
	Écran 17"	0,04	24	720	0,96	28,80
	Onduleur Infosic	0,60	24	720	14,40	432,00
	Unité Centrale DELL	0,30	24	720	7,20	216,00
	Ampoules d'éclairage	0,11	24	720	2,64	79,20
Le Laboratoire	Climatiseur CONDOR 12K	1,20	12	360	14,40	432,00
	Four à Moufle CONTROL AB	2,00	3	90	6,00	180,00
	Incubateur ISCO	0,70	12	360	8,40	252,00
	Autoclave 20L WR	2,00	2	60	4,00	120,00
	Distillateur d'eau QUICKFIT	3,00	4	120	12,00	360,00

Emplacement	Équipement	Puissance (kW)	Temps (h/j)	Temps (h/mois)	Énergie Jour (kWh/j)	Énergie Mois (kWh/mois)
	Étuve JP SELECTA	1,50	6	180	9,00	270,00
	Petits appareils	0,20	12	360	2,40	72,00
	Ampoules d'éclairage (4)	0,08	12	360	0,96	28,80
Les Bureaux	Conditionneur d'air ENIEM - 1	2,20	12	360	26,40	792,00
	Climatiseur split	1,20	12	360	14,40	432,00
	Conditionneur d'air ENIEM - 2	2,20	12	360	26,40	792,00
	Unité centrale + écran FUJITSU	0,12	12	360	1,44	43,20
	Conditionneur d'air ENIEM - 3	0,35	12	360	4,20	126,00
	Ampoules d'éclairage (6)	1,20	24	720	28,80	864,00
La Cuisine	Réfrigérateur FAGOR	0,20	24	720	4,80	144,00
	Climatiseur	1,20	12	360	14,40	432,00
	Ampoules d'éclairage (2)	0,06	12	360	0,72	21,60

Emplacement	Équipement	Puissance (kW)	Temps (h/j)	Temps (h/mois)	Énergie Jour (kWh/j)	Énergie Mois (kWh/mois)
Poste de Garde	Conditionneur d'air ENIEM	2,20	24	720	52,80	1 584,00
	Réfrigérateur SONELEC	0,20	24	720	4,80	144,00
	Ampoules d'éclairage	0,06	12	360	0,72	21,60
Éclairage Extérieur	Lampadaires LED	0,07	12	360	0,84	25,20
SOUS-TOTAL ANNEXES	Ensemble	28,26	-	-	356,68	10 700,40

Interprétation

D'après IV- 12 le tableau La zone annexe représente une faible part de la consommation totale. Elle regroupe principalement les équipements de confort, d'éclairage, de supervision et de laboratoire. Son impact énergétique reste secondaire par rapport à la zone processus.

3. Inventaire énergétique de la zone processus

Cette section recense les puissances nominales ainsi que les consommations électriques journalières et mensuelles des différents équipements liés directement aux étapes de traitement de la station.

3.1 Etape de Prétraitement

Cette étape assure l'élimination des matières solides grossières, des sables et des graisses en amont du traitement biologique. Ce tableau représente la consommation énergétique des principaux équipements de l'étape de prétraitement, en fonction de leur puissance et de leur durée de fonctionnement. Il permet d'estimer les besoins énergétiques de cette étape du traitement des eaux usées

Tableau IV-13:Consommation énergétique des équipements de prétraitement

Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
Grille automatique	0,75	0,8	24	0,60	18,0
Pompe de dessablage	1,10	1,6	48	1,76	52,8
Pompe de dégraissage	1,10	3,2	96	3,52	105,6
TOTAL	2.95	-	-	5.88	176,4

Interprétation

D'après le tableau **IV - 13** les deux pompes (dessablage et dégraissage) possèdent la puissance la plus élevée de cette zone avec 1,10 kW chacune, tandis que la grille automatique est la plus faible avec 0,75 kW. Bien que les deux pompes aient la même puissance installée, c'est leur temps de fonctionnement qui fait la différence : la pompe de dégraissage fonctionne deux fois plus longtemps (3,2 h/j contre 1,6 h/j), ce qui en fait l'équipement qui consomme le plus d'énergie.

3.2 Étape de Traitement Biologique par Aération

Cette étape assure l'apport en oxygène indispensable à l'activité des bactéries pour éliminer la pollution organique. Ce tableau représente la consommation énergétique des principaux équipements de l'étape de traitement biologique, en fonction de leur puissance et de leur durée de fonctionnement. Il permet d'estimer les besoins énergétiques de cette étape du traitement des eaux usées.

Tableau IV-14:Consommation énergétique des équipements de traitement Biologique par Aération

Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
Turbine d'aération	108,0	24	720	2 592,0	77 760,0
Clarificateur	1,0	24	720	24,0	720,0
Aérateur	0,65	24,0	720	15,60	468,0
SOUS-TOTAL BIOLOGIQUE	109,65	-	-	2 631,6	78 948

Interprétation :

Le tableau précédent montre que la turbine d'aération est le moteur le plus énergivore de cette zone avec 108 kW, alors que le clarificateur (1 kW) et l'aérateur (0,65 kW) sont très petits. Comme tout fonctionne 24h/24, c'est cette turbine qui consomme presque toute l'électricité de la zone biologique.

3.3 Etape de recirculation et d'épaississement des boues :

Cette étape comprend le retour des boues activées vers le bassin biologique pour maintenir la concentration en biomasse, ainsi que l'épaississement des boues excédentaires afin de réduire leur volume avant leur déshydratation. Ce tableau représente la consommation énergétique des principaux équipements de l'étape de de recirculation et d'épaississement des boues, en fonction de leur puissance et de leur durée de fonctionnement. Il permet d'estimer les besoins énergétiques de cette étape du traitement des eaux usées.

Tableau IV-15: Consommation énergétique des équipements de recirculation et d'épaississement des boues

Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
Pompe de recirculation	4,00	24	720	96,00	2 880,00
Épaississeur	0,75	18	540	13,50	405,00
TOTAL	4,75	—	1 260	109,50	3 285

Interprétation

Le tableau IV- 15 présente La zone de traitement des boues consomme un total de 3 285 kWh/mois. Le bilan est largement dominé par la pompe de recirculation : avec une puissance plus élevée (4 kW contre 0,75 kW) et un fonctionnement continu (24h/24).

3.4 Étape de Désinfection au Chlore

Cette étape vise à garantir la qualité microbiologique de l'eau traitée avant son rejet ou sa réutilisation. L'agitateur assure l'homogénéisation de la solution chlorée dans la cuve de stockage tandis que la pompe doseuse injecte la quantité de chlore nécessaire en fonction des besoins de désinfection. Ce tableau représente la consommation énergétique des principaux équipements de l'étape de désinfection au Chlore, en fonction de leur puissance et de leur durée de fonctionnement. Il permet d'estimer les besoins énergétiques de cette étape du traitement des eaux usées.

Tableau IV-16: Consommation énergétique des équipements désinfection au Chlore

Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
Agitateur cuve chlore	0,25	24	720	6,00	180,00
Pompe doseuse de dosage chlore	0,20	12	360	2,40	72,00
TOTAL	0,45	—	—	8,40	252,00

Interprétation

Le Tableau IV- 16 montre que l'ensemble des équipements de désinfection au chlore présente une puissance totale très faible de 0,45 kW, pour une consommation globale de seulement 252,00 kWh/mois.

Bien que l'agitateur fonctionne en continu, ces équipements consomment globalement très peu d'énergie. Par conséquent, ce poste ne représente pas une priorité d'optimisation énergétique.

3.5 Étape de relevage et de transfert des eaux

Cette étape consiste à acheminer les eaux usées d'un ouvrage à un autre à l'aide de pompes, afin d'assurer leur circulation continue à travers les différentes unités de traitement de la station d'épuration. Ce tableau représente la consommation énergétique des principaux équipements de l'étape de relevage et de transfert des eaux, en fonction de leur puissance et de leur durée de fonctionnement. Il permet d'estimer les besoins énergétiques de cette étape du traitement des eaux usées

Tableau IV-17: Consommation énergétique des équipements de relevage et de transfert des eaux

Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
Pompe de relevage eaux usées (A)	10,70	24	720	256,80	7 704,00

Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
Pompe de relevage eaux usées (B)	10,70	24	720	256,80	7 704,00
Pompe de relevage eaux usées ©	10,70	24	720	256,80	7 704,00
Pompe bac tampon 1	5,90	10	300	59,00	1 770,00
Pompe de transfert (KSL) (A)	5,90	24	720	141,60	4 248,00
Pompe de transfert (KSL) (B)	5,90	24	720	141,60	4 248,00
Pompe de transfert (KSL) ©	5,90	24	720	141,60	4 248,00
SOUS-TOTAL RELEVAGE & TRANSFERT	55,70	-	-	1 254,20	37 626,00

Interprétation

Le tableau IV- 17 montre que les pompes de relevage des eaux usées (A,B,C) sont deux fois plus puissantes (10,7 kW) que les pompes du bac tampon et de transfert (5,9 kW). Par conséquent, en fonctionnant en continu (24h/24), les pompes de relevage représentent la plus grande part de la consommation électrique de cette section, tandis que la pompe du bac tampon reste la moins énergivore grâce à son temps de fonctionnement réduit (10h/j).

3.6 Étape de refoulement et de distribution finale des eaux épurées

Cette étape correspond au transfert de l'eau épurée en sortie de traitement vers les ouvrages de stockage ou les points de distribution. Elle est assurée par des pompes de refoulement garantissant l'acheminement de l'eau traitée vers sa destination finale. Ce tableau représente la consommation énergétique des principaux équipements de l'étape de refoulement et de distribution finale des eaux épurées, en fonction de leur puissance et de leur durée de fonctionnement. Il permet d'estimer les besoins énergétiques de cette étape du traitement des eaux usées

Tableau IV-18: Consommation énergétique des équipements refoulement et de distribution finale des eaux épurées

Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
Pompe de refoulement eau épurée (A)	9,20	12	360	110,40	3 312,00
Pompe de refoulement eau épurée (B)	9,20	12	360	110,40	3 312,00
Pompe vers château (1)	30,00	24	720	720,00	21 600,00
Pompe vers château (2)	30,00	24	720	720,00	21 600,00
Pompe vers château (3)	30,00	24	720	720,00	21 600,00

Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
SOUS-TOTAL REFOULEMENT FINAL	108,4	—	—	2 380,80	71 424,00

Interprétation

D'après le tableau IV- 18 les pompes vers le château d'eau sont les équipements les plus énergivores de l'installation. Avec une puissance unitaire de 30 kW et un fonctionnement continu (24h/24), chaque pompe vers le château consomme plus de 6 fois plus d'énergie par mois qu'une pompe de refoulement d'eau épurée (3 312 kWh contre 21 600 kWh). Le poste château d'eau représente donc l'équipement le plus puissant.

4. Répartition globale de la consommation énergétique

Ce tableau présente le bilan de la consommation électrique du site, exprimée en kilowattheures (kWh) par jour et par mois. Il compare la consommation de la Zone Process (les moteurs) à celle de la Zone Annexe, tout en indiquant la part en pourcentage de chaque zone sur la consommation totale.

Tableau IV-19: Consommation électrique du site (zone process / zone annexe)

Équipements installés	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)	Part Relative (%)
Zone Processus (Moteurs)	6 390,38	191 711,40	94,50 %
Zone Annexe	356,68	10 700,40	5,50 %
TOTAL GÉNÉRAL	6 747,06	202 411,80	100,00%

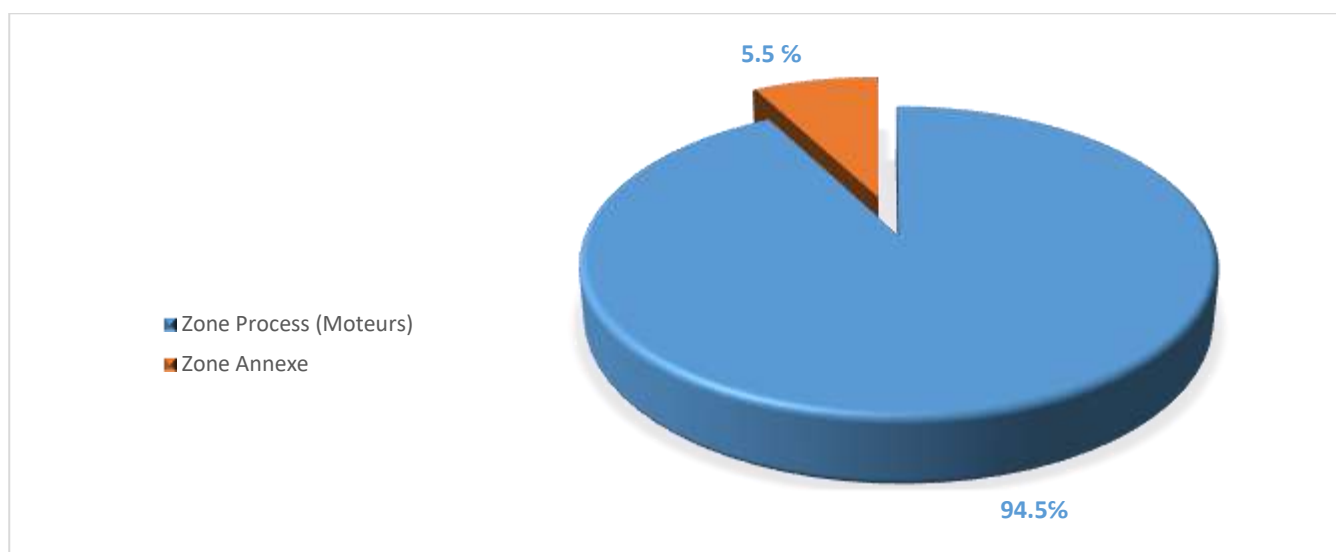


Figure IV- 18:Répartition de la consommation énergétique globale de la STEP.

Interprétation

La figure IV- 19 présente la répartition de la consommation énergétique globale de la STEP la station. La zone processus domine la consommation globale de la station en absorbant une part largement dominante de 94,50 %. À l'inverse, la zone annexe reste secondaire, ne représentant que 5,50 % des besoins énergétiques totaux.

4.2 Répartition par étape de traitement

La répartition par étape de traitement est une méthode de sectorisation énergétique qui consiste à diviser la consommation électrique globale d'une station d'épuration selon ses différentes phases opératoires (prétraitement, traitement biologique, clarification). Elle permet d'isoler la consommation de chaque étape afin d'identifier précisément les postes les plus énergivores.

Le tableau ci-dessous présente la répartition de la puissance installée et de la consommation électrique pour chaque étape du procédé de traitement de la station.

Tableau IV-20: Répartition de la consommation énergétique mensuelle par étape de traitement

Étape de Traitement	Puissance installée (kW)	Énergie Journalière (kWh/j)	Énergie Mensuelle (kWh/mois)	Part Relative (%)
Aération Biologique	109,65	2 631,6	78 948,00	41,18 %
Refoulement Final (Distribution)	108,40	2 380,80	71 424,00	37,26 %
Relevage et Transfert des Eaux	55,70	1 254,20	37 626,00	19,63 %
Recirculation et Épaississement des Boues	4,75	109,50	3 285,00	1,71 %
Prétraitement Mécanique	2,95	5,88	176,40	0,09 %
Chloration / Désinfection	0,45	8,40	252,00	0,13 %
TOTAL ZONE PROCESS	280,25	6 390,38	191 711,40	100,00 %

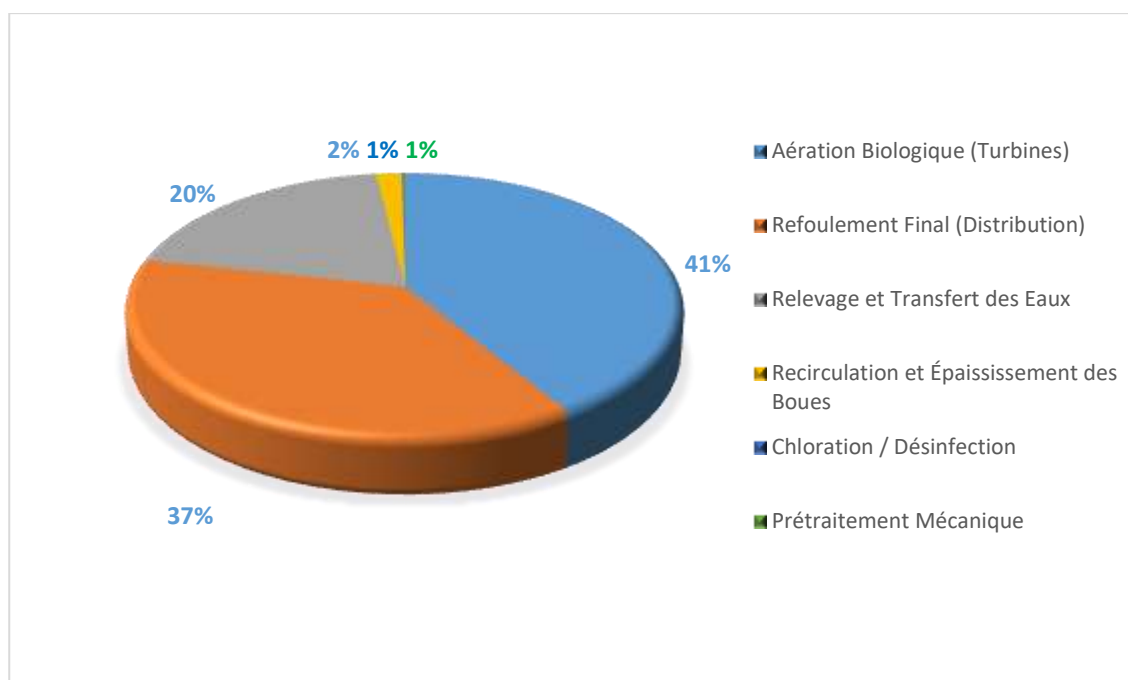


Figure IV- 19: Répartition de la consommation énergétique mensuelle par étape de traitement

Interprétation

La figure IV- 20 présente la répartition de la consommation énergétique mensuelle par étapes du traitement des eaux usées au sein de la station d'épuration de Hassi Rmel .

La consommation énergétique de la STEP est principalement concentrée au niveau de l'aération biologique (41,18 %%) et du refoulement final (37,26 %). Le relevage et transfert des eaux représente également une part importante (19,63 %). En revanche, la recirculation et l'épaississement des boues (1,71 %), le prétraitement (0,09 %) et la chloration/désinfection (0,13 %) contribuent faiblement à la consommation totale. Ainsi, les actions d'optimisation énergétique doivent cibler en priorité l'aération biologique et le refoulement final.

Cette répartition montre que les efforts d'optimisation énergétique doivent être concentrés principalement sur l'aération biologique et le refoulement final.

5. Analyse des équipements les plus énergivores

Ce tableau présente la consommation d'énergie journalière, mensuelle et annuelle de chaque étape de traitement de la station.

Tableau IV-21:Répartition de la consommation énergétique des équipements les plus énergivores

Ordre	Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
1	Turbine d'aération	36,00	24	720	864,00	25 920,00
2	Pompes vers château	30,00	24	720	720,00	21 600,00
3	Pompes de relevage des eaux usées	10,70	24	720	256,80	7 704,00
4	Pompes de transfert (KSL)	5,90	24	720	141,60	4 248,00
-	TOTAL	82,60	-	-	1 982,40	59 472,00

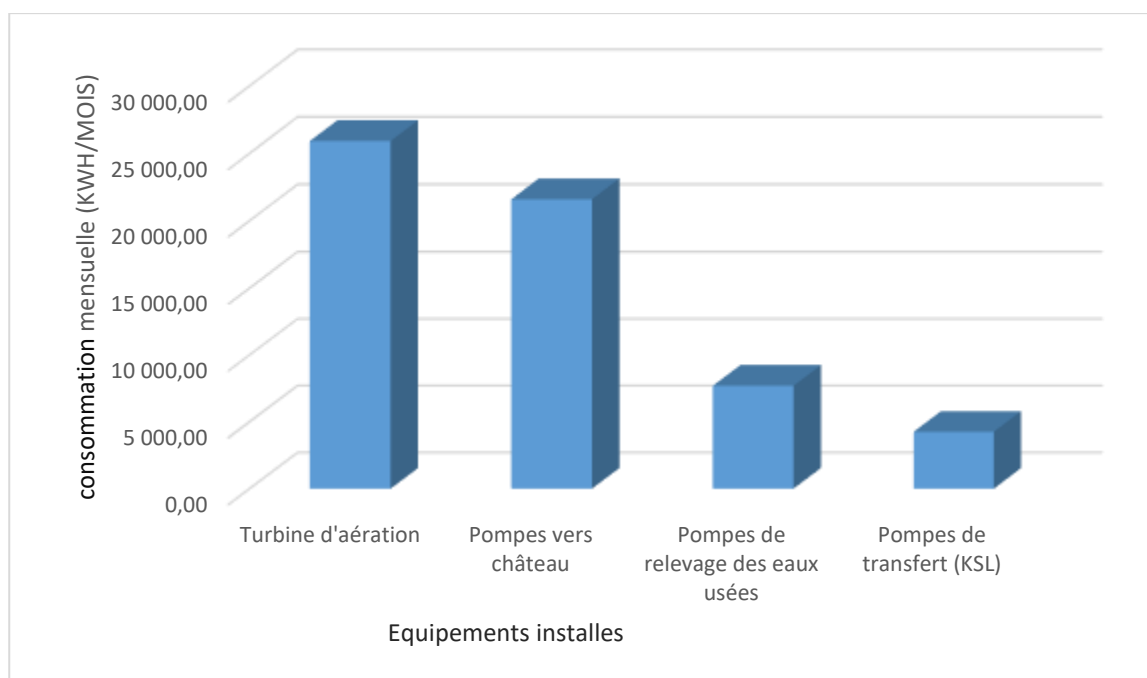


Figure IV-20: Consommation énergétique mensuelle des équipements les plus énergivores de la station (kWh/mois)

Interprétation

L'analyse de figure IV - 21 permet de hiérarchiser les quatre équipements les plus énergivores de la station. Cette classification est essentielle pour identifier les gisements d'économies d'énergie et structurer l'intégration de la future centrale solaire photovoltaïque.

La turbine d'aération se classe en première position avec une consommation d'environ 25 920 kWh/mois. Son rôle est d'apporter l'oxygène nécessaire à la biodégradation de la charge organique (DCO) et de maintenir la biomasse en suspension. Cette forte consommation s'explique par son fonctionnement obligatoire en continu (24h/24), indispensable à la survie des bactéries. Pour optimiser ce poste, l'installation d'un variateur électronique de vitesse asservi à une sonde d'oxygène dissous permettrait d'ajuster l'aération aux flux polluants réels, évitant ainsi toute sur-aération inutile.

Les pompes de refoulement vers le château d'eau occupent la deuxième place avec 21 600 kWh/mois. Elles assurent le transfert de l'eau épurée vers le réservoir surélevé pour permettre une distribution gravitaire ultérieure. La sévérité de ce poste est liée à l'effort hydraulique requis pour vaincre une Hauteur Manométrique Totale (HMT) importante. L'optimisation repose ici sur une gestion horaire intelligente.

En tête de station, les pompes de relevage des eaux usées brutes affichent une consommation d'environ 7 704,00 kWh/mois. Leur fonction est de relever les effluents du réseau bas vers le niveau

des prétraitements. Bien que leur hauteur de refoulement soit modérée, elles voient passer la totalité du débit d'entrée de la station, soumis aux variations de l'afflux urbain. L'intégration de capteurs de niveau à ultrasons couplés à des variateurs de fréquence permettrait de lisser le pompage, éliminant les cycles de démarrage/arrêt très consommateurs d'énergie.

Enfin, les pompes de transfert (KSL) représentent le quatrième poste avec 4248 kWh/mois. Elles gèrent les transits internes des fluides process et des boues biologiques. Sa consommation est plus modérée car l'équipement fonctionne de manière intermittente selon une configuration optimisée en alternance (deux unités en marche et une en secours). Néanmoins, la viscosité élevée des boues génère des pertes de charge importantes. Ce poste peut être optimisé par une maintenance préventive rigoureuse des canalisations et des roues pour maintenir le rendement hydraulique à son niveau maximal.

5.1 Impact énergétique de l'aération sur les performances biologiques

Bien que la STEP dispose d'une étape de dénitrification, son efficacité peut être limitée si les conditions anoxiques nécessaires ne sont pas correctement maintenues. En effet, dans les procédés biologiques à boues activées, la nitrification et la dénitrification sont deux processus complémentaires mais qui se déroulent dans des conditions différentes. La nitrification est un processus aérobie permettant l'oxydation de l'ammonium NH_4^+ en nitrites NO_2^- puis en nitrates NO_3^- , en présence d'oxygène dissous. À l'inverse, la dénitrification correspond à la réduction biologique des nitrates NO_3^- en azote gazeux N_2 , et elle nécessite des conditions anoxiques, c'est-à-dire un milieu où l'oxygène dissous est absent ou très faible **(EPA, 2010; Henze, et al., 2008; Metcalf & Eddy, 2014)**

Dans le cas de la STEP étudiée, l'absence éventuelle d'une sonde d'oxygène dissous ou d'un système de régulation automatique de l'aération peut conduire à un fonctionnement continu des turbines d'aération, généralement 24 h/24. Ce mode d'exploitation permet de maintenir de bonnes conditions aérobies pour l'élimination de la matière organique et la nitrification, mais il peut également entraîner une concentration excessive en oxygène dissous dans le bassin biologique. Or, en présence d'oxygène disponible, les bactéries hétérotrophes utilisent préférentiellement l'oxygène comme accepteur final d'électrons au lieu des nitrates, ce qui limite l'activité de dénitrification **(EPA, 2010; Metcalf & Eddy, 2014)**

Ainsi, même en présence d'une phase ou d'une zone dédiée à la dénitrification, une aération continue mal contrôlée peut réduire l'efficacité de cette étape. Cette situation peut expliquer la présence de

nitrates en sortie : l'ammonium est correctement oxydé en nitrates grâce aux conditions aérobies, mais la réduction des nitrates en azote gazeux reste incomplète en raison d'un manque de conditions anoxiques suffisantes. Autrement dit, une forte aération favorise la nitrification, mais peut pénaliser la dénitrification lorsque l'oxygène dissous n'est pas maîtrisé (**Henze, et al., 2008; Metcalf & Eddy, 2014**)

Cette observation présente également un intérêt énergétique important. Les systèmes d'aération constituent généralement l'un des principaux postes de consommation électrique dans les stations d'épuration à boues activées. Un fonctionnement permanent des turbines, sans asservissement à une mesure d'oxygène dissous, peut donc conduire à une surconsommation énergétique, notamment pendant les périodes où la charge polluante est plus faible. Plusieurs guides techniques soulignent l'intérêt de la régulation de l'aération pour réduire la consommation d'énergie tout en maintenant les performances biologiques du traitement (**EPA, 2010; Water Environment Federation (WEF), 2010**).

Par conséquent, l'installation ou la remise en service d'une sonde d'oxygène dissous, associée à une régulation automatique des turbines d'aération, pourrait constituer une amélioration importante. Cette solution permettrait d'adapter l'apport d'oxygène aux besoins réels du bassin biologique, de limiter les situations de suraération, de réduire la consommation électrique et de favoriser de meilleures conditions pour la dénitrification. Elle contribuerait ainsi à améliorer simultanément la performance énergétique et la performance épuratoire de la STEP.

6. Analyse des équipements les moins énergivores

Le tableau suivant présente les équipements les moins énergivores de la station d'épuration, en indiquant leur puissance, leur temps de fonctionnement et leur consommation énergétique. Cette analyse permet d'évaluer leur contribution au bilan énergétique global de la STEP.

Tableau IV- 22:Consommation électrique des postes les moins énergivores de la STEP

Ordre	Équipements installés	Puissance (kW)	Temps journalier (h/j)	Temps mensuel (h/mois)	Énergie journalière (kWh/j)	Énergie mensuelle (kWh/mois)
1	Dégrilleur	0,75	0,8	24	0,60	18,00
2	Dessableur	1,10	1,6	48	1,76	52,80
3	Dégraisseur	1,10	3,2	96	3,52	105,60
4	Éclairage	0,07	12,0	360	0,84	25,20
-	TOTAL	3,02	-	-	6,72	201,60

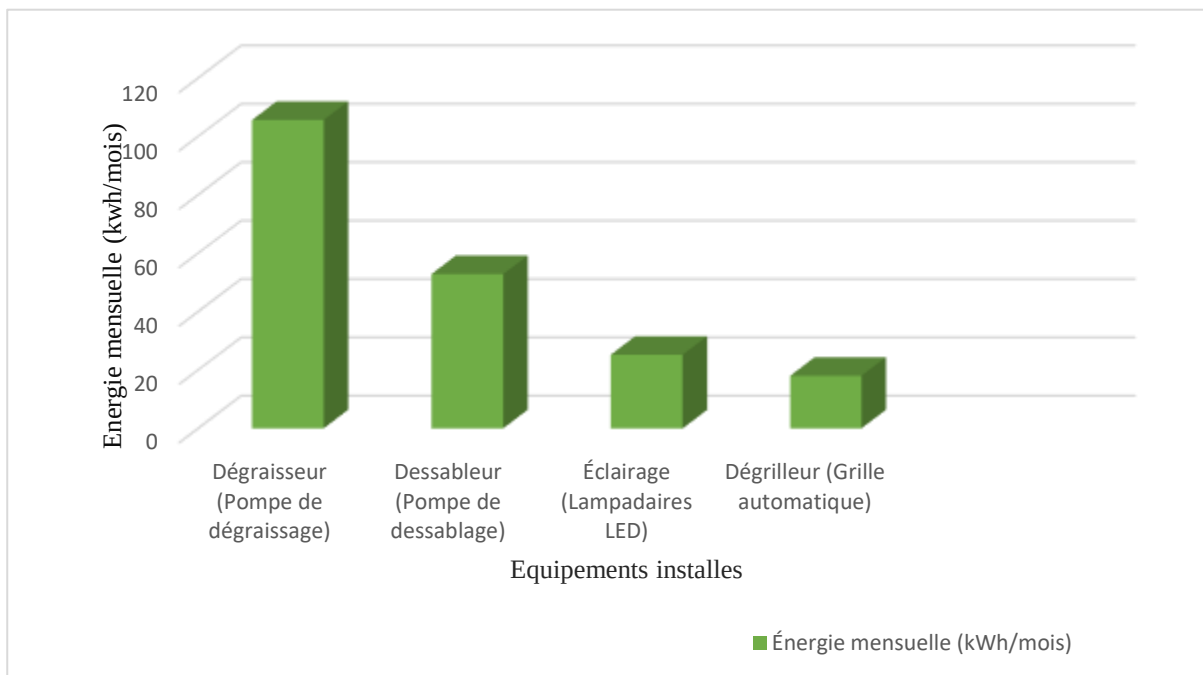


Figure IV-21:consommations énergétique mensuelles des équipements les moins énergivores de la station (kWh/mois)

Interprétation

La figure (IV- 22) présente les consommations mensuelles des quatre équipements les moins énergivores de la des consommations mensuelles permet de hiérarchiser les quatre postes les moins

énergivores de la station d'épuration. Le classement met en évidence une consommation maximale pour la pompe de dégraissage avec 105,60 kWh/mois, suivie de la pompe de dessablage avec 52,80 kWh/mois, puis de l'éclairage extérieur par lampadaires LED s'élevant à 25,20 kWh/mois. Le dégrilleur automatique ferme cette marche en affichant la consommation la plus marginale de l'installation, soit seulement 18,00 kWh/mois.

Ces équipements consomment peu d'énergie car leur fonctionnement est cyclique ou intermittent. Ils ne représentent pas une priorité d'optimisation énergétique.

7. Analyse de la facture Sonelgaz

L'analyse de la facture Sonelgaz permet d'évaluer les performances électriques réelles de la station d'épuration à travers les principaux indicateurs énergétiques et économiques. Elle met en évidence le niveau de consommation de l'installation ainsi que les paramètres influençant le coût de l'énergie.

7.1 Énergie active

La consommation d'énergie active s'élève à **70 028 kWh**. Elle correspond à l'énergie effectivement utilisée par les équipements de traitement, principalement les systèmes d'aération et de pompage, qui constituent les principaux postes de consommation.

7.2 Énergie réactive

La consommation d'énergie réactive est de **69 838 kWh**. Elle est principalement liée aux moteurs électriques et reste correctement maîtrisée grâce à une compensation efficace de l'installation.

7.3 Facteur de puissance

Le facteur de puissance atteint 99,27 %, traduisant une excellente qualité de compensation électrique et un fonctionnement efficace de l'installation, avec des pertes et des pénalités limitées.

7.4 Puissances

La puissance maximale atteinte est de 186 kW, tandis que la puissance mise à disposition est de 500 kW. Cet écart montre que la station fonctionne dans les limites de sa puissance contractuelle, garantissant une exploitation sûre et sans dépassement.

7.5 Périodes tarifaires

Une part importante de la consommation est enregistrée durant les périodes tarifaires les plus coûteuses. Cette répartition met en évidence un potentiel d'optimisation des coûts par une meilleure gestion des charges électriques.

7.6 Montant global

Le montant total de la facture est de 315 026,33 DA. Il reflète principalement les consommations d'énergie active ainsi que les coûts associés aux conditions tarifaires d'exploitation.

7.7 Synthèse

L'analyse de la facture met en évidence une installation présentant une bonne qualité électrique, caractérisée par un facteur de puissance élevé et une puissance appelée inférieure à la puissance souscrite. En revanche, la consommation importante d'énergie active et son poids durant les périodes tarifaires de pointe soulignent l'intérêt de mettre en œuvre des actions d'optimisation énergétique afin de réduire les coûts d'exploitation.

8. Comparaison entre bilan théorique et bilan réel

La comparaison directe entre la consommation électrique mensuelle théorique de tous les équipements installés et la consommation réelle facturée par Sonelgaz, permettant de mesurer précisément l'écart existant. Ce tableau compare la consommation électrique mensuelle théorique de tous les équipements installés avec la consommation réelle facturée par Sonelgaz, afin de mesurer l'écart existant.

Tableau IV-23: Comparaison des consommations électrique théorique et réelle

Indicateur	Bilan Théorique (équipements Installé)	Bilan Réel (Facture Sonelgaz)	Écart
Consommation Mensuelle (kWh/mois)	191 711,40	79 030	112 681.4

Pourcentage du Total (%)	100 %	40,6 %	59,4 %
--------------------------	-------	--------	--------

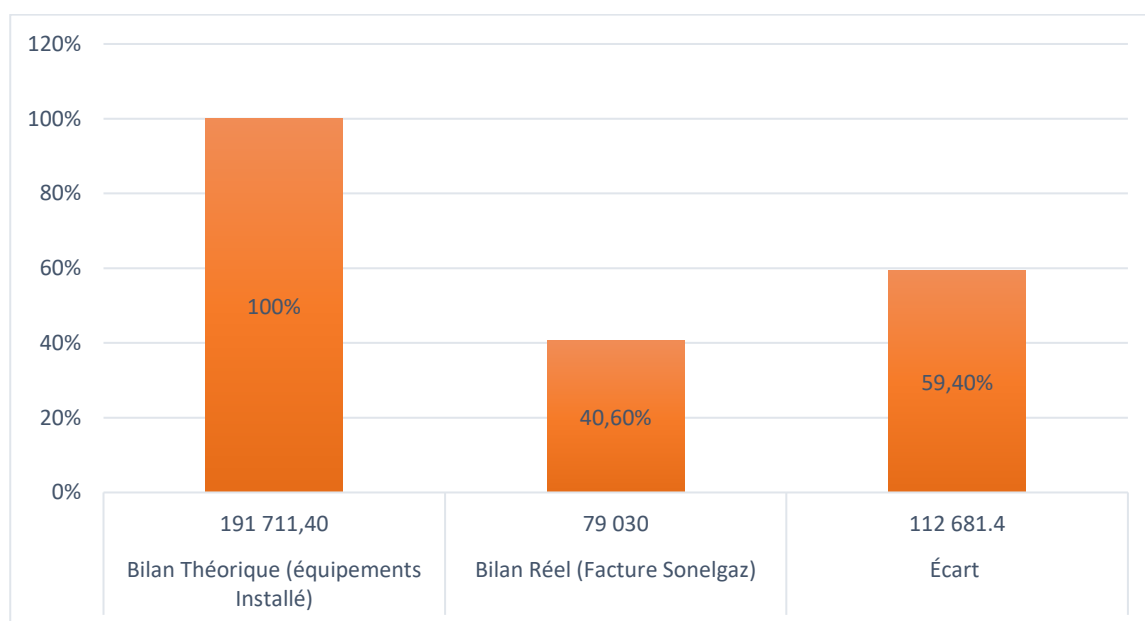


Figure IV-22: comparaison entre bilan théorique et réelle

Interprétation

La figure IV- 23 présente l'analyse comparative entre le bilan énergétique théorique et le bilan énergétique réel de la station met en évidence un écart significatif entre la consommation électrique estimée à partir des puissances installées et celle effectivement enregistrée sur la facture de consommation de Sonelgaz. En effet, le bilan théorique évalue la consommation mensuelle de la station à 191 711,40kWh/mois, tandis que la consommation réelle relevée sur la facture du mois de juin est de 79 030.4kWh/mois, soit un écart de 112 681.4 kWh/mois, correspondant à environ 59,4 % de la consommation théorique.

Toutefois, cet écart ne doit pas être interprété comme une perte énergétique. Le bilan théorique est calculé à partir des puissances nominales des équipements installés et de temps de fonctionnement supposés, représentant ainsi une situation de fonctionnement proche des conditions maximales

d'exploitation. À l'inverse, le bilan réel correspond à l'énergie effectivement consommée et enregistrée durant la période considérée.

Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs d'exploitation. La station n'a pas nécessairement fonctionné à sa pleine capacité durant le mois de juin. Certains équipements peuvent avoir fonctionné de manière intermittente ou alternée, tandis que d'autres ont pu être maintenus en réserve ou temporairement arrêtés pour des opérations de maintenance. De plus, les débits d'eaux usées entrants peuvent être inférieurs au débit nominal de dimensionnement, ce qui réduit naturellement les besoins énergétiques de certaines unités de traitement, notamment les systèmes de pompage et d'aération.

Par ailleurs, le mois de juin constitue une période d'observation limitée et ne reflète pas nécessairement les conditions d'exploitation annuelles de la STEP. Les variations saisonnières des débits et des charges polluantes influencent directement le niveau de sollicitation des équipements et, par conséquent, la consommation électrique globale de l'installation.

Ainsi, la consommation facturée représente le fonctionnement réel de la station sur une période donnée, tandis que le bilan théorique constitue une estimation majorante basée sur les caractéristiques des équipements installés et sur des hypothèses de fonctionnement. L'écart observé met donc en évidence la différence entre le potentiel énergétique installé de la STEP et son niveau réel d'exploitation durant le mois étudié, sans pour autant traduire une inefficacité énergétique de l'installation.

9. Consommation spécifique d'énergie SEC

L'indicateur de consommation spécifique d'énergie (SEC) représente la quantité d'énergie électrique nécessaire pour éliminer une unité de pollution organique. Il constitue un critère pertinent d'évaluation de la performance énergétique des stations d'épuration puisqu'il relie directement l'énergie consommée à l'efficacité réelle du traitement.

Dans le cadre de cette étude, l'indicateur retenu est la consommation spécifique exprimée en kWh/kg DCO éliminée, car la DCO (Demande Chimique en Oxygène) représente la charge polluante effectivement éliminée par le procédé d'épuration. Cet indicateur permet ainsi d'apprécier l'efficacité énergétique du traitement en tenant compte de la pollution réellement traitée.

La masse journalière de DCO éliminée a été déterminée à partir des concentrations moyennes en entrée et en sortie de la station ainsi que du débit journalier traité :

$$\text{Energie specifique} = \frac{E_{TOTAL}}{M_{DCO\ eliminie}}$$

$$M_{DCO\ eliminie} = \frac{(DCO_{entre'e} - DCO_{sortie}) \times Q}{1000}$$

$$M_{DCO\ eliminie} = \frac{(613,93 - 29,56) \times 3000}{1000} = 1753,11$$

L'énergie électrique consommée sur la même période est estimée à :

$$E_{Total} = 6\,747,06 \text{ kWh/j}$$

- **Masse de DCO éliminée** Quantité de pollution organique éliminée par la station.
- **Énergie totale** Consommation électrique totale de la STEP
- **Masse de DCO éliminée** Quantité de pollution organique éliminée par la station.
- **Q (Débit)** : Volume d'eau usée traité par la station pendant une période donnée.
- **Énergie spécifique** Énergie consommée pour éliminer 1 kg de DCO

9.1 Interprétation de la consommation spécifique d'énergie

Le calcul de la consommation spécifique d'énergie de la STEP de Hassi R'Mel a donné une valeur de 3,84 kWh/kg DCO éliminée. Cette valeur signifie que, selon le bilan énergétique théorique établi, la station consomme environ 3,84 kWh pour éliminer un kilogramme de pollution organique exprimée en DCO. Cette valeur peut être considérée comme relativement élevée pour une station d'épuration à boues activées. Elle montre que, malgré des performances épuratoires satisfaisantes, la station présente un potentiel d'amélioration sur le plan énergétique. Autrement dit, le problème ne concerne pas forcément l'efficacité du traitement biologique, mais plutôt la quantité d'énergie mobilisée pour atteindre cette performance. Cette consommation spécifique élevée s'explique

principalement par le poids important de l'aération dans le bilan énergétique global de la station. Les turbines d'aération fonctionnent en continu, 24 h/24, afin d'assurer l'apport d'oxygène nécessaire à l'activité biologique. Cependant, en absence de régulation automatique basée sur une sonde d'oxygène dissous, l'aération peut rester constante même lorsque la charge polluante ou hydraulique diminue. Cette situation peut entraîner une suraération, notamment pendant les périodes de faible charge, et donc une consommation électrique qui n'est pas toujours proportionnelle au besoin réel du procédé. Le poste de refoulement et de distribution finale contribue également à l'augmentation de la consommation énergétique globale. En effet, les pompes doivent assurer le transfert de l'eau traitée vers le château ou le point de rejet, ce qui nécessite de vaincre la hauteur manométrique totale et les pertes de charge du réseau. Cette énergie est indispensable au fonctionnement hydraulique de la station, mais elle ne participe pas directement à l'élimination de la DCO. Elle influence donc directement la valeur de la consommation spécifique. Il est également important de rappeler que la valeur obtenue correspond à un SEC théorique, car elle est calculée à partir du bilan énergétique estimatif des équipements et non directement à partir de la facture Sonelgaz. Elle doit donc être interprétée comme un indicateur d'évaluation du potentiel énergétique de la station. La consommation réelle peut varier selon le débit traité, la charge polluante reçue, l'état de fonctionnement des équipements, les cycles automatiques, les arrêts éventuels pour maintenance et les conditions d'exploitation du mois considéré. Ainsi, la valeur de 3,84 kWh/kg DCO éliminée met en évidence une marge d'optimisation énergétique importante. Les actions prioritaires doivent être orientées vers la régulation de l'aération, l'installation ou la remise en service de sondes d'oxygène dissous, l'adaptation du fonctionnement des turbines aux besoins réels du bassin biologique, ainsi que l'optimisation des groupes de pompage. Ces mesures permettraient de réduire les consommations électriques inutiles, d'améliorer le rendement énergétique global et de diminuer progressivement la consommation spécifique d'énergie de la STEP

Conclusion

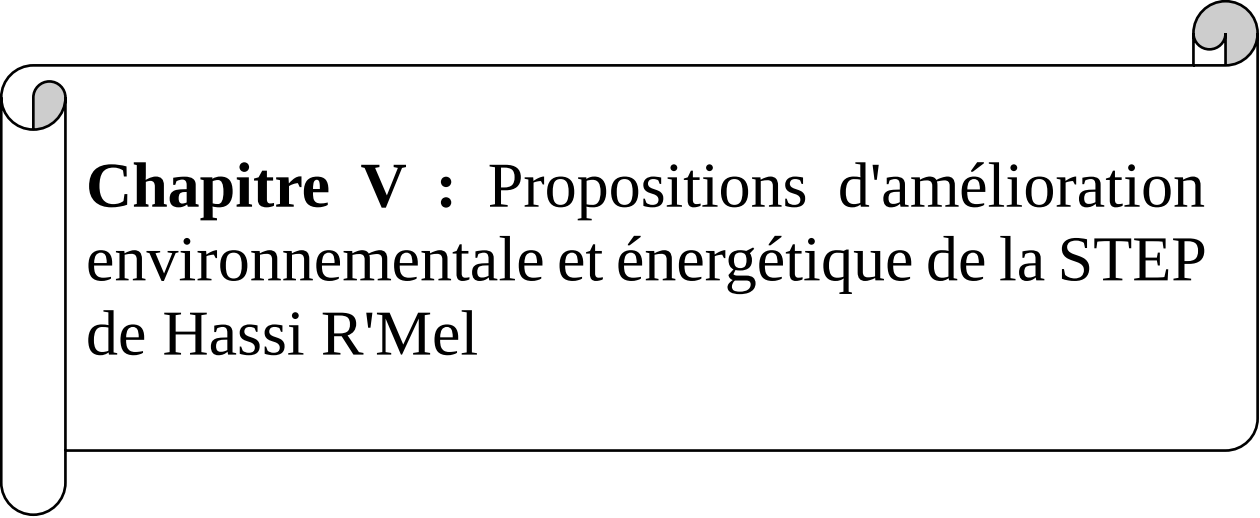
L'analyse du bilan électroénergétique de la STEP de Hassi R'Mel a permis d'identifier la répartition de la consommation électrique entre les différentes zones et étapes de traitement. Les résultats montrent que la zone process est la plus consommatrice d'énergie, contrairement aux zones annexes qui restent peu énergivores. À l'échelle des procédés, l'aération biologique constitue le principal poste de consommation, suivie du refoulement final vers le réseau de distribution. Ces deux étapes représentent donc les principales cibles d'amélioration énergétique.

La comparaison entre le bilan énergétique théorique et les données réelles de consommation issues des factures Sonelgaz met en évidence un écart notable. Cet écart s'explique principalement par les conditions réelles d'exploitation, notamment les variations de débit, l'alternance de fonctionnement des équipements, ainsi que les arrêts de maintenance.

Par ailleurs, le calcul de la consommation spécifique d'énergie (SEC) a permis d'évaluer l'efficacité énergétique du procédé par rapport à la quantité de pollution éliminée (DCO). Les résultats montrent qu'il existe un potentiel d'amélioration, en particulier au niveau du système d'aération, où une mauvaise régulation de l'oxygène dissous peut entraîner une surconsommation d'énergie.

Ainsi, plusieurs actions d'optimisation peuvent être proposées, telles que l'installation de sondes d'oxygène dissous, l'asservissement de l'aération aux besoins réels du procédé, l'utilisation de variateurs de vitesse pour les équipements, ainsi que l'optimisation des systèmes de pompage. Le suivi régulier de l'indicateur SEC permet également d'améliorer la performance énergétique de la station.

Enfin, compte tenu du fort potentiel solaire de la région, l'intégration d'un système photovoltaïque constitue une solution intéressante. Elle permettrait de réduire les coûts d'exploitation, d'améliorer l'autonomie énergétique de la STEP et de limiter son impact environnemental.

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre V : Propositions d'amélioration environnementale et énergétique de la STEP de Hassi R'Mel

Chapitre V : Propositions d'amélioration environnementale et énergétique de la STEP de Hassi R'Mel

Introduction :

La STEP de Hassi R'Mel assure le traitement des eaux usées par un procédé à boues activées, permettant de réduire la charge polluante avant le rejet ou une éventuelle réutilisation des eaux traitées. Toutefois, en cas de surcharge hydraulique, de dysfonctionnement, de maintenance ou de bypass partiel, une partie des eaux peut être orientée vers le bournier sans traitement suffisant. Cette situation représente un risque environnemental important, notamment pour le sol et les eaux souterraines.

Dans le contexte saharien de Hassi R'Mel, la protection des ressources en eau constitue un enjeu prioritaire. Les eaux rejetées vers un bournier non parfaitement étanche peuvent s'infiltrer progressivement dans le sol et entraîner le transfert de matières organiques, de matières en suspension, de nutriments et de germes pathogènes vers le milieu naturel. La stagnation de ces eaux peut également provoquer des nuisances olfactives et favoriser la prolifération d'insectes.

Afin de limiter ces risques, ce chapitre propose la mise en place d'une filière de lagunage de secours, composée de bassins étanches destinés à recevoir les eaux excédentaires ou bypassées. Cette solution permettrait d'assurer un stockage contrôlé et un traitement complémentaire des eaux avant tout rejet éventuel. Elle présente également un intérêt particulier dans les zones sahariennes, où l'espace disponible, le fort ensoleillement et les températures élevées sont favorables aux procédés extensifs de traitement.

Ce chapitre présente donc la problématique des rejets vers le bournier, le principe du lagunage de secours ainsi que son intérêt environnemental et opérationnel pour améliorer la résilience de la STEP de Hassi R'Mel face aux situations exceptionnelles (Metcalf & Eddy, 2014; Von Sperling, 2007).

1. Proposition d'une filière de lagunage de secours pour la gestion des surcharges hydrauliques

1.1 Problématique des rejets vers le bournier

La STEP de Hassi R'Mel, fonctionnant selon un procédé à boues activées, peut être confrontée, en cas de surcharge hydraulique, de maintenance ou de dysfonctionnement, à des situations nécessitant un bypass partiel de la filière principale de traitement. Dans ces conditions, une partie des effluents peut être dirigée vers un bournier sans traitement suffisant, ce qui soulève des enjeux environnementaux et sanitaires importants (Mara, 2004; Metcalf & Eddy, 2014).

Les principaux impacts identifiés sont les suivants :

- **Dégradation des sols et des eaux souterraines** : en l'absence d'une étanchéité suffisante, le bournier peut favoriser l'infiltration de polluants tels que la matière organique, les matières en suspension et les germes pathogènes vers le sol. Cette situation peut menacer la qualité des nappes souterraines, qui constituent des ressources stratégiques en zone saharienne (Mara, 2004; Von Sperling, 2007).
- **Risques sanitaires et nuisances environnementales** : la stagnation des effluents peut favoriser des phénomènes de fermentation anaérobie, générant des nuisances olfactives et des conditions favorables à la prolifération d'insectes et de vecteurs de maladies. Elle peut également dégrader les conditions d'exploitation et l'environnement immédiat de la station (Mara, 2004; Metcalf & Eddy, 2014).
- **Vulnérabilité du contexte saharien** : bien que l'évaporation intense caractéristique du climat saharien puisse réduire une partie des volumes stockés, elle ne permet pas d'éliminer totalement les risques d'infiltration et de contamination chronique du sol et des eaux souterraines. Cette situation justifie l'intérêt d'une filière de traitement ou de stockage contrôlé en secours (Von Sperling, 2007).

Ainsi, le bournier ne doit pas être considéré comme une filière de traitement contrôlée, mais plutôt comme une zone de réception ou de stockage temporaire. Son utilisation peut présenter des risques environnementaux importants lorsqu'il n'est pas parfaitement étanche ou lorsqu'il reçoit des effluents insuffisamment traités.

1.2 Principe du lagunage

Le lagunage est un procédé extensif de traitement des eaux usées reposant principalement sur des mécanismes naturels, physiques et biologiques. Il consiste à faire circuler les eaux usées dans des bassins aménagés, où se produisent progressivement la décantation des matières en suspension, la dégradation de la matière organique par les microorganismes, l'activité des algues, l'action du rayonnement solaire ainsi que la réduction des germes pathogènes. Ce procédé est particulièrement adapté aux régions disposant de grandes superficies et bénéficiant d'un ensoleillement important (Mara, 2004; Von Sperling, 2007).

Une filière classique de lagunage peut être composée de plusieurs bassins disposés en série, chacun assurant une fonction spécifique dans le traitement. Le premier bassin est généralement un bassin facultatif, destiné principalement à la décantation des matières solides, à la stabilisation partielle de la charge organique et au début du traitement biologique. Dans ce type de bassin, la partie supérieure peut présenter des conditions aérobies grâce aux échanges avec l'atmosphère et à l'activité algale, tandis que les couches profondes peuvent évoluer vers des conditions anaérobies favorisant la digestion des boues décantées (Mara, 2004; Von Sperling, 2007).

Après cette première étape, l'eau partiellement traitée peut être dirigée vers un bassin de maturation. Ce dernier a pour rôle d'améliorer la clarification de l'eau et de contribuer à la réduction des germes pathogènes. Son efficacité repose principalement sur le temps de séjour, le rayonnement solaire, l'activité biologique et la sédimentation des particules résiduelles. Le bassin de maturation constitue donc une étape d'affinage permettant d'améliorer la qualité finale de l'eau traitée (**Metcalf & Eddy, 2014; Von Sperling, 2007**).

Le temps de séjour hydraulique constitue un paramètre essentiel dans le fonctionnement d'une filière de lagunage. Il doit être suffisant pour permettre les phénomènes de décantation, de biodégradation et de désinfection naturelle. De même, la profondeur des bassins, la charge organique appliquée, les conditions climatiques, l'entretien des ouvrages et leur étanchéité sont des éléments déterminants pour assurer le bon fonctionnement du système et éviter les risques d'infiltration vers le sol et les eaux souterraines (**Mara, 2004; Von Sperling, 2007**).

1.3 Intérêt du lagunage pour la STEP de Hassi R'Mel

La mise en place d'une filière de lagunage de secours présente un intérêt particulier pour la STEP de Hassi R'Mel, car elle permettrait d'améliorer la gestion des eaux excédentaires ou bypassées en cas de surcharge hydraulique, de maintenance ou de dysfonctionnement temporaire de la filière principale. Au lieu d'être dirigées directement vers le bournier, ces eaux seraient orientées vers des bassins contrôlés et étanches, assurant à la fois un stockage temporaire, une réduction partielle de la charge polluante et une régulation progressive des volumes à traiter (**Mara, 2004; Metcalf & Eddy, 2014**).

L'intérêt principal de cette solution réside dans sa capacité à réduire les risques environnementaux liés au rejet direct vers le bournier. En effet, l'utilisation de bassins aménagés et étanches permettrait de limiter la stagnation non contrôlée des eaux usées, de réduire les risques d'infiltration vers le sol et les eaux souterraines, et d'améliorer la maîtrise des situations exceptionnelles. Dans le contexte saharien de Hassi R'Mel, où les ressources en eau souterraines sont sensibles et stratégiques, cette protection constitue un enjeu important.

Le lagunage présente également un avantage opérationnel. Il peut jouer le rôle d'ouvrage tampon en cas de surcharge ou d'arrêt partiel de la station, en évitant que les eaux excédentaires soient rejetées directement dans le milieu naturel. Après un temps de séjour suffisant, les eaux stockées pourraient être orientées, selon leur qualité, soit vers la filière aval de la STEP pour désinfection et refoulement, soit réintégrées progressivement vers la filière biologique principale lorsque la capacité de traitement redevient disponible.

Cette solution est aussi adaptée aux conditions locales de Hassi R'Mel. La disponibilité de l'espace, le fort ensoleillement et les températures élevées sont favorables à l'intégration d'une filière extensive de secours. Contrairement à une extension intensive classique, le lagunage nécessite moins d'équipements électromécaniques et présente donc une consommation énergétique limitée. Il constitue ainsi une solution simple, robuste et compatible avec une démarche d'amélioration environnementale et énergétique de la station **(Von Sperling, 2007; Water Environment Federation (WEF), 2010)**.

Afin de garantir son efficacité et d'éviter tout risque de contamination du milieu naturel, les bassins proposés doivent toutefois être réalisés avec une étanchéité adaptée, notamment par géomembrane. Cette disposition est indispensable pour assurer le confinement des eaux et protéger le sol ainsi que les nappes souterraines.

Ainsi, la filière de lagunage proposée ne doit pas être considérée comme un remplacement de la STEP existante, mais comme une solution de secours permettant de renforcer la sécurité environnementale et la résilience de la station. Sa mise en œuvre nécessitera néanmoins une étude de dimensionnement détaillée, tenant compte des débits à gérer, du temps de séjour hydraulique, de la surface disponible, de la profondeur des bassins, du type d'étanchéité et des modalités de contrôle de la qualité des eaux avant leur orientation finale.

2. Contribution des solutions proposées au développement durable

La mise en place d'une filière de lagunage de secours étanche s'inscrit dans une démarche de développement durable, car elle permet d'associer protection de l'environnement, amélioration de l'exploitation et maîtrise de l'énergie. Elle ne constitue pas seulement une solution technique de gestion des eaux de bypass, mais également une mesure préventive visant à réduire les impacts négatifs sur le milieu naturel.

Sur le plan environnemental, cette solution permettrait de limiter les rejets directs vers le borbier et de mieux maîtriser les eaux excédentaires. L'utilisation de bassins étanches, notamment par géomembrane, contribuerait à protéger les sols et à réduire les risques d'infiltration vers les nappes souterraines. Cette protection est particulièrement importante dans un contexte saharien, où les ressources en eau souterraines représentent une ressource stratégique.

Sur le plan opérationnel, le lagunage de secours renforcerait la résilience de la STEP face aux surcharges hydrauliques, aux opérations de maintenance ou aux dysfonctionnements temporaires. Il offrirait une capacité tampon permettant de stocker et de stabiliser temporairement les eaux excédentaires, au lieu de les rejeter directement vers le milieu naturel.

Sur le plan énergétique, le lagunage présente l'avantage de reposer principalement sur des mécanismes naturels, nécessitant peu d'équipements électromécaniques par rapport à une extension intensive classique. Cette sobriété énergétique peut être renforcée par une gestion optimisée de l'exploitation et, éventuellement, par l'intégration d'une alimentation photovoltaïque pour les équipements auxiliaires.

Ainsi, la solution proposée contribue à améliorer la durabilité globale de la STEP de Hassi R'Mel. Elle permet de réduire les risques de pollution, de protéger les ressources en eau, de sécuriser l'exploitation de la station et de limiter les besoins énergétiques supplémentaires, tout en restant adaptée aux contraintes climatiques et spatiales de la région saharienne.

(International Water Association (IWA), 2018; Mara, 2004; Metcalf & Eddy, 2014; Von Sperling, 2007; Water Environment Federation (WEF), 2010)

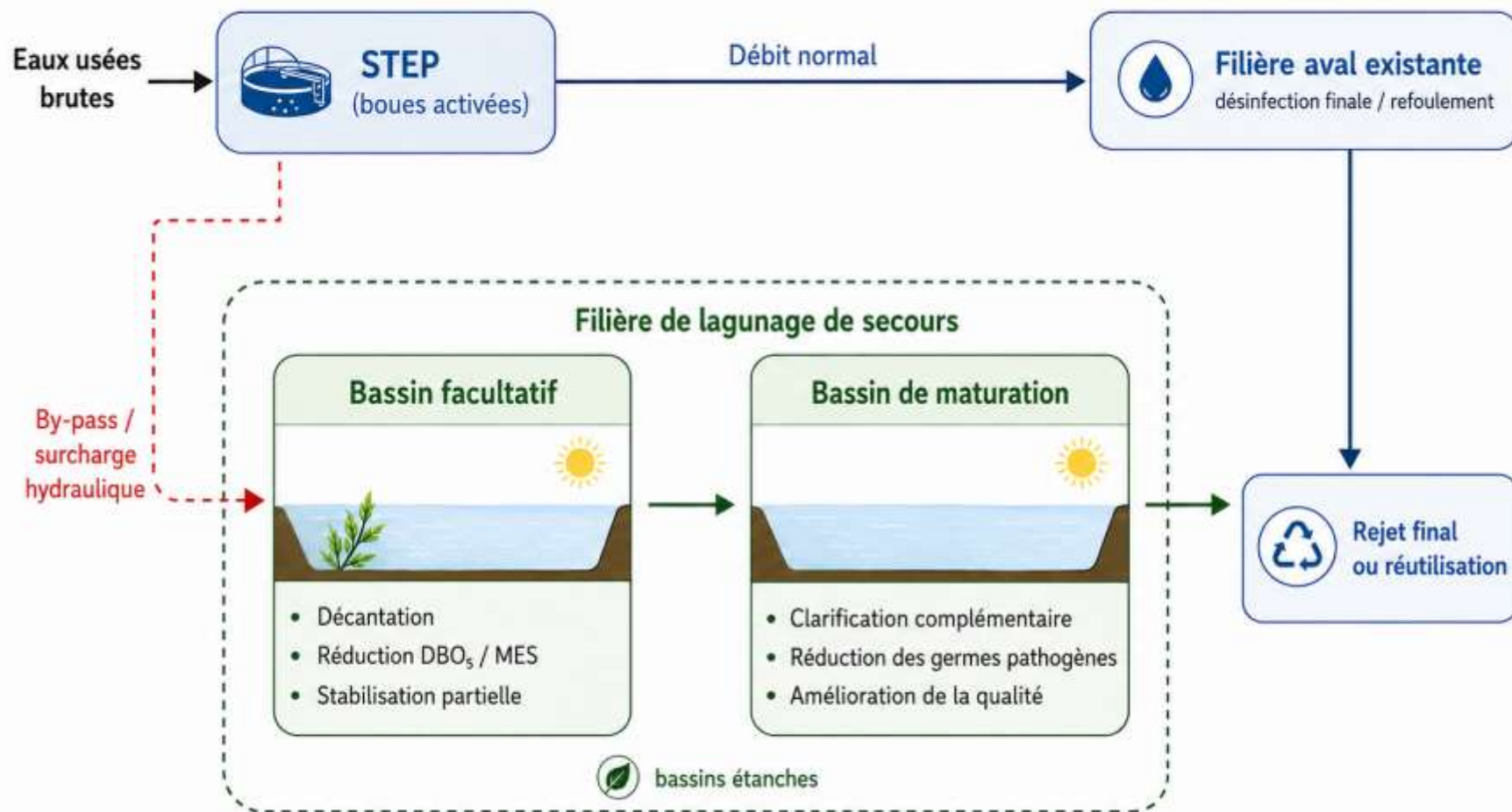


Figure V- 23: Schéma de principe de la filière de lagunage de secours associée à la STEP de Hassi R'Mel.

Conclusion :

La mise en place d'une filière de lagunage de secours constitue une solution pertinente pour améliorer la gestion des eaux de bypass et des excédents hydrauliques de la STEP de Hassi R'Mel. Composée d'un bassin facultatif suivi d'un bassin de maturation, cette filière permettrait d'assurer un stockage contrôlé, une décantation des matières en suspension, une réduction partielle de la charge polluante et une amélioration progressive de la qualité des eaux.

Cette solution permettrait de limiter le rejet direct vers le bournier et de réduire les risques environnementaux associés, notamment la contamination des sols, l'infiltration vers les eaux souterraines et les nuisances liées à la stagnation des eaux usées. L'utilisation d'une géomembrane d'étanchéité apparaît indispensable afin d'assurer le confinement des eaux et de protéger durablement le milieu naturel, particulièrement dans un contexte saharien où les ressources en eau sont limitées et stratégiques.

Grâce à la disponibilité de l'espace, au fort ensoleillement et à sa faible consommation énergétique, le lagunage de secours représente une solution techniquement réalisable, économiquement intéressante et environnementalement durable. Toutefois, sa mise en œuvre nécessite une étude de dimensionnement détaillée, tenant compte des débits à gérer, du temps de séjour hydraulique, de la surface disponible, de la profondeur des bassins, du type d'étanchéité et des modalités de contrôle de la qualité des eaux avant leur orientation finale

Chapitre VI : Intégration de l'énergie photovoltaïque pour l'amélioration de la performance environnementale de la STEP de Hassi R'Mel

Introduction :

Le chapitre précédent a permis d'établir un diagnostic électro-énergétique de la STEP de Hassi R'Mel et d'identifier les principaux postes de consommation électrique. Les résultats ont montré que l'aération biologique et les systèmes de pompage constituent les équipements les plus énergivores de la station. Cette situation met en évidence la nécessité de rechercher des solutions capables de réduire la consommation d'électricité, de maîtriser les coûts d'exploitation et de limiter l'impact environnemental lié au fonctionnement de l'installation.

Dans un contexte de transition énergétique et de développement durable, l'intégration des énergies renouvelables représente une option pertinente pour améliorer la performance énergétique des infrastructures d'assainissement. Parmi ces solutions, l'énergie solaire photovoltaïque présente un intérêt particulier pour la région de Hassi R'Mel, caractérisée par un fort ensoleillement et des conditions climatiques favorables à la production d'électricité solaire.

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'intégration d'un système photovoltaïque au niveau de la STEP de Hassi R'Mel. Il présente le lien entre la consommation énergétique et l'impact environnemental, le potentiel solaire du site, le choix de la solution photovoltaïque adaptée ainsi que les principaux éléments de dimensionnement et d'évaluation des performances énergétiques, économiques et environnementales du projet.-

1. Relation entre consommation énergétique et impact environnemental

Les stations d'épuration des eaux usées jouent un rôle essentiel dans la protection de l'environnement, puisqu'elles permettent de réduire la charge polluante avant le rejet ou la réutilisation éventuelle des eaux traitées. Cependant, leur fonctionnement nécessite une consommation importante d'énergie électrique, principalement liée aux équipements électromécaniques tels que les systèmes d'aération, les pompes de relevage, les pompes de refoulement et les équipements de recirculation.

Dans le cas de la STEP de Hassi R'Mel, l'audit électro-énergétique réalisé précédemment a montré que la zone process représente la part dominante de la consommation électrique de la station. Cette consommation est principalement concentrée au niveau de l'aération biologique, du refoulement final des eaux épurées ainsi que du relevage et du transfert des eaux. Ces équipements sont indispensables

au bon fonctionnement du procédé, mais ils constituent également les principaux postes consommateurs d'énergie.

Au-delà de son impact économique, cette consommation électrique entraîne un impact environnemental indirect. En effet, lorsque l'électricité consommée provient de sources conventionnelles, elle est associée à des émissions de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone CO₂. Ainsi, plus la consommation énergétique de la station est élevée, plus son empreinte carbone indirecte augmente.

La réduction de la consommation électrique et le recours à des sources d'énergie renouvelable constituent donc des leviers importants pour améliorer la performance environnementale de la STEP. Dans ce cadre, l'intégration de l'énergie photovoltaïque apparaît comme une solution adaptée pour réduire la dépendance au réseau électrique, limiter les émissions indirectes de CO₂ et renforcer la durabilité énergétique de la station (**International Energy Agency (IEA), 2023; Metcalf & Eddy, 2014; Water Environment Federation (WEF), 2010**)

Potentiel solaire de la région de Hassi R'Mel

L'intégration d'une installation photovoltaïque dépend principalement du potentiel solaire disponible sur le site. En Algérie, le gisement solaire est particulièrement important, notamment dans les régions des Hauts Plateaux et du Sahara, où l'irradiation solaire annuelle atteint des valeurs favorables à la production d'électricité photovoltaïque.

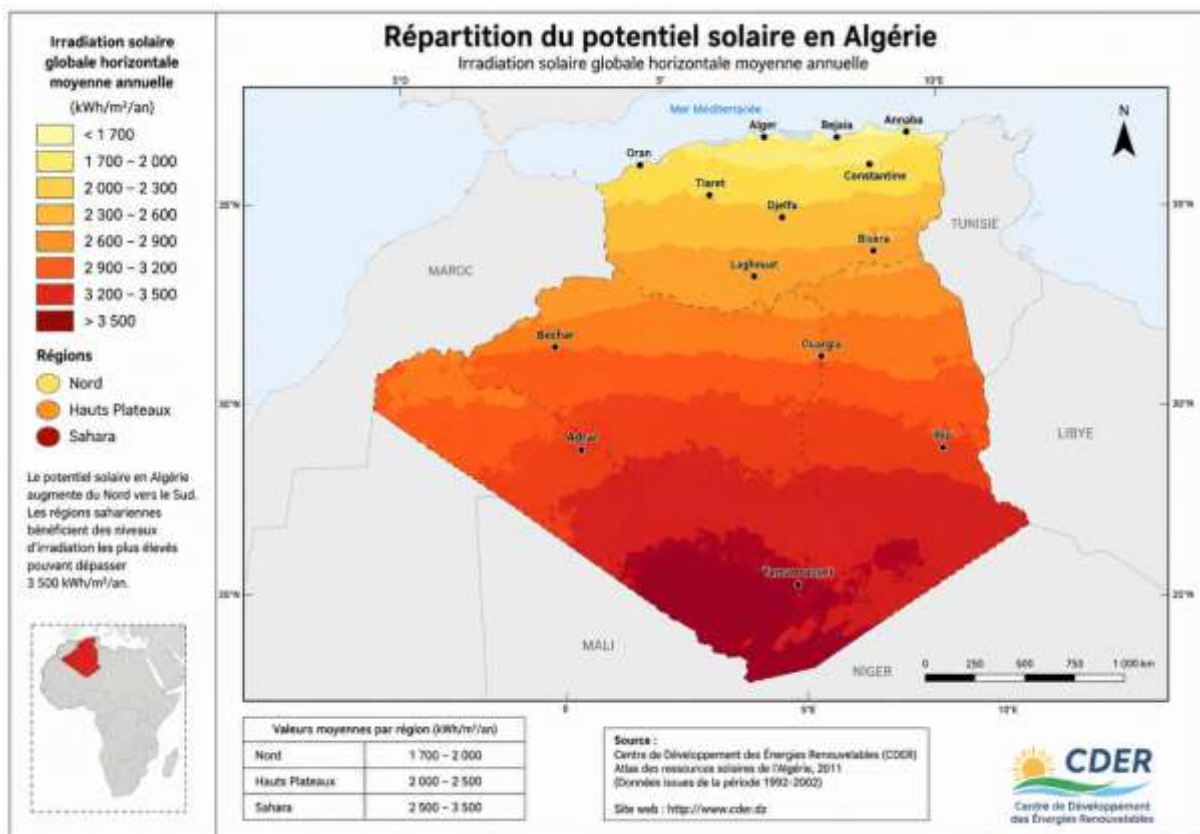


Figure VI-24:Répartition du potentiel solaire en Algérie – irradiation solaire globale horizontale moyenne annuelle (Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), 2022)

L'analyse de la cartographie du gisement solaire montre que le potentiel solaire en Algérie augmente progressivement du Nord vers le Sud. Les régions sahariennes présentent les niveaux d'irradiation les plus élevés, avec des valeurs pouvant atteindre ou dépasser 3 000 kWh/m²/an dans certaines zones. Cette répartition confirme que les zones du Sud et des Hauts Plateaux disposent d'un potentiel particulièrement favorable à l'implantation de systèmes photovoltaïques.

La région de Hassi R'Mel, située dans la wilaya de Laghouat, se trouve dans une zone caractérisée par un fort ensoleillement, une faible nébulosité et une pluviométrie limitée. Ces conditions climatiques permettent d'assurer une production solaire régulière durant une grande partie de l'année. Elles constituent donc un atout important pour l'intégration d'une installation photovoltaïque destinée à contribuer à l'alimentation énergétique de la STEP.

En plus du potentiel solaire, la disponibilité d'espaces libres autour des installations représente un avantage pour l'implantation des panneaux photovoltaïques. Cette disponibilité foncière facilite le choix de l'orientation, de l'inclinaison et de l'espacement entre les rangées, afin de réduire les effets d'ombrage et d'optimiser la production électrique.

Ainsi, le contexte climatique et spatial de Hassi R'Mel constitue un environnement favorable à l'exploitation de l'énergie solaire. Cette ressource locale peut être valorisée pour réduire la

consommation d'électricité prélevée sur le réseau et améliorer la performance énergétique et environnementale de la station (**Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), 2022; International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022**)

2. Choix de la solution photovoltaïque adaptée à la STEP

Compte tenu du potentiel solaire disponible dans la région de Hassi R'Mel et du profil de consommation électrique de la station, l'intégration d'un système photovoltaïque raccordé au réseau apparaît comme une solution adaptée. La STEP fonctionne de manière continue, avec des besoins électriques permanents liés principalement aux systèmes d'aération, de pompage, de recirculation et de refoulement. Cette continuité de fonctionnement favorise l'autoconsommation directe de l'électricité produite par les panneaux solaires durant la journée.

Le choix d'un système raccordé au réseau, sans stockage par batteries, présente plusieurs avantages. Il permet de réduire le coût d'investissement initial, de limiter les opérations de maintenance et d'éviter les contraintes liées au remplacement périodique des batteries. Dans cette configuration, l'énergie solaire produite est utilisée en priorité par les équipements de la station, tandis que le réseau électrique assure l'alimentation complémentaire lorsque la production photovoltaïque est insuffisante, notamment durant la nuit ou lors des périodes de faible ensoleillement.

Cette solution permet donc de couvrir une partie des besoins électriques de la station sans modifier profondément son mode d'exploitation. Elle constitue une approche progressive et réaliste, car elle s'intègre à l'infrastructure existante tout en réduisant la quantité d'énergie prélevée sur le réseau. Elle est particulièrement intéressante pour les équipements fonctionnant en journée, notamment les pompes et les auxiliaires, dont une partie de la consommation peut être compensée par la production solaire.

Ainsi, le photovoltaïque raccordé au réseau représente une solution technique cohérente pour la STEP de Hassi R'Mel. Il permet d'améliorer la performance énergétique de la station, de réduire sa dépendance à l'électricité conventionnelle et de préparer une transition progressive vers une exploitation plus durable. Cette solution vient en complément des actions d'efficacité énergétique déjà identifiées, telles que la régulation de l'aération, l'optimisation du pompage et le suivi des indicateurs de consommation.

3. Recommandations et perspectives

L'évaluation économique de ce projet repose sur la valorisation de l'électricité produite par la centrale solaire et injectée dans le réseau de la Sonelgaz. Avec une production annuelle estimée à 262,32

MWh, ce système remplace une partie importante de l'électricité conventionnelle utilisée par la station d'épuration. Cela permet de réduire les coûts d'électricité et d'améliorer la rentabilité de l'installation. Les résultats montrent également que le système photovoltaïque permet d'éviter l'émission d'environ 131,16 tonnes de CO₂ par an, ce qui réduit l'impact environnemental de la STEP.

La réduction des émissions de CO₂ représente l'un des principaux avantages environnementaux du projet. En produisant de l'électricité à partir de l'énergie solaire, l'installation diminue le recours à l'électricité produite à partir des combustibles fossiles. Cette énergie propre contribue ainsi à limiter les émissions de gaz à effet de serre liées au fonctionnement de la station. Avec 131,16 tonnes de CO₂ évitées chaque année, le projet participe à la protection de l'environnement, à la lutte contre le changement climatique et au développement durable.

Sur le plan financier, le choix d'un système raccordé au réseau (On-Grid) sans batteries présente plusieurs avantages. Cette solution réduit les coûts d'investissement (CAPEX) et les dépenses d'exploitation et de maintenance (OPEX), puisqu'elle ne nécessite pas le remplacement périodique des batteries. L'électricité solaire est utilisée en priorité par la station, tandis que le réseau de la Sonelgaz assure l'alimentation lorsque la production solaire est insuffisante. Les coûts d'investissement du projet sont estimés entre 11 700 000 DA et 14 300 000 DA, ce qui reste intéressant au regard des économies d'énergie réalisées sur le long terme.

La puissance installée de 130 kWc a été déterminée en fonction des besoins énergétiques de la station et de l'espace disponible. L'installation comprend 320 panneaux photovoltaïques de 405 Wc et 5 onduleurs de 25 kWac. Le rapport DC/AC de 1,04 permet d'assurer un bon fonctionnement du système tout en limitant les pertes d'énergie. Les panneaux sont orientés plein sud avec une inclinaison de 32° afin de maximiser la production solaire. De plus, l'espacement de 40 % entre les rangées réduit les effets d'ombrage et améliore les performances du champ photovoltaïque.

La station d'épuration consomme de l'énergie en continu, car ses équipements fonctionnent jour et nuit. Cette caractéristique rend l'autoconsommation photovoltaïque particulièrement adaptée. Pendant la journée, l'énergie solaire alimente directement les équipements les plus énergivores, notamment les aérateurs et les pompes, tandis que le réseau électrique prend le relais durant la nuit. Cette configuration permet d'atteindre un taux de couverture solaire de 100 % pendant les périodes diurnes.

En conclusion, ce projet confirme l'intérêt de l'intégration de l'énergie solaire dans les stations d'épuration. Il permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de diminuer la dépendance aux énergies fossiles, de maîtriser les coûts énergétiques et de contribuer aux objectifs de transition énergétique en Algérie. L'installation photovoltaïque proposée pour la STEP de Hassi R'Mel constitue ainsi une solution durable, performante et respectueuse de l'environnement.

Conclusion :

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'intérêt de l'intégration de l'énergie photovoltaïque au niveau de la STEP de Hassi R'Mel, en lien avec les résultats de l'audit électro-énergétique réalisé précédemment. La consommation électrique de la station, principalement liée aux équipements d'aération et de pompage, constitue un enjeu important à la fois sur le plan économique et environnemental.

L'analyse du potentiel solaire de la région a montré que Hassi R'Mel présente des conditions favorables à l'exploitation de l'énergie photovoltaïque, notamment grâce à son fort ensoleillement, sa faible nébulosité et la disponibilité d'espaces adaptés à l'implantation des panneaux. Dans ce contexte, le recours à une installation photovoltaïque raccordée au réseau apparaît comme une solution pertinente pour produire localement une partie de l'électricité nécessaire au fonctionnement de la station.

Sur le plan énergétique, cette solution permettrait de réduire partiellement la quantité d'électricité prélevée sur le réseau, notamment durant les heures d'ensoleillement. Sur le plan environnemental, elle contribuerait à limiter les émissions indirectes de CO₂ associées à la consommation électrique de la STEP. Elle permettrait également de renforcer la cohérence environnementale de l'installation, en associant le traitement des eaux usées à l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable.

Ainsi, l'intégration du photovoltaïque constitue une piste d'amélioration intéressante pour renforcer la durabilité énergétique et environnementale de la STEP de Hassi R'Mel. Cette solution ne remplace pas les actions d'efficacité énergétique, telles que l'optimisation de l'aération et du pompage, mais elle vient les compléter dans une démarche globale de réduction des coûts d'exploitation, de maîtrise de l'empreinte carbone et de valorisation des ressources solaires locales.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude, il ressort que la Station d'Épuration des Eaux Usées (STEP) de Hassi R'Mel constitue un ouvrage stratégique dans la protection de l'environnement et la gestion durable des ressources hydriques en contexte saharien. L'évaluation des performances environnementales a permis de mettre en évidence l'efficacité du procédé biologique par boues activées à faible charge avec aération prolongée, caractérisé par des rendements épuratoires élevés. Les résultats obtenus montrent des abattements supérieurs à 90 % pour la Demande Biochimique en Oxygène à cinq jours (DBO_5), la Demande Chimique en Oxygène (DCO) et les Matières En Suspension (MES), confirmant la capacité de la station à réduire efficacement la charge polluante avant rejet. Les paramètres analysés en sortie respectent globalement les exigences réglementaires algériennes, traduisant une maîtrise satisfaisante du traitement biologique.

Toutefois, l'analyse approfondie des performances met en évidence la nécessité d'une optimisation continue du traitement de l'azote, notamment par une meilleure maîtrise des phénomènes de nitrification et de dénitrification. Bien que les concentrations en nitrates restent conformes aux normes en vigueur, leur proximité avec les valeurs limites souligne l'importance d'un contrôle renforcé des conditions opératoires. La nitrification, nécessitant des conditions aérobies favorables et une disponibilité suffisante en oxygène dissous, doit être assurée par une gestion précise du système d'aération. Dans ce contexte, l'installation et l'exploitation optimale des sondes d'oxygène dissous représentent une solution technologique essentielle permettant un suivi en temps réel des besoins en oxygène des microorganismes nitrifiants. Ces dispositifs permettent d'éviter les insuffisances d'aération responsables d'une nitrification incomplète, mais également les excès d'oxygénation entraînant une consommation énergétique inutile.

Par ailleurs, le fonctionnement des turbines d'aération 24h/24 constitue un élément déterminant pour maintenir la stabilité biologique du bassin d'aération. Cependant, une stratégie de pilotage intelligente basée sur les mesures continues de l'oxygène dissous

permettrait d'adapter automatiquement l'intensité d'aération aux besoins réels du procédé. L'utilisation de variateurs de vitesse, associée aux données fournies par les sondes, permettrait ainsi d'optimiser le temps de fonctionnement des turbines, d'améliorer le rendement de nitrification-dénitrification et de réduire significativement la consommation électrique de la station. Cette approche s'inscrit dans une logique d'efficacité énergétique et de gestion durable des installations d'épuration.

L'audit électro-énergétique réalisé a confirmé que la zone process représente le principal poste de consommation énergétique, principalement en raison des équipements d'aération, de relevage et de pompage. Cette situation démontre que l'amélioration de la performance globale de la STEP doit nécessairement intégrer une démarche d'optimisation énergétique. Dans cette perspective, l'intégration d'une production d'énergie photovoltaïque apparaît comme une solution particulièrement adaptée au contexte saharien de Hassi R'Mel, caractérisé par un fort potentiel solaire. L'exploitation de cette énergie renouvelable permettrait de couvrir une partie des besoins électriques de la station, de réduire la dépendance au réseau conventionnel et de diminuer l'empreinte carbone associée au traitement des eaux usées.

En complément du procédé biologique existant, l'intégration de solutions naturelles telles que les bassins de lagunage facultatif et de maturation pourrait représenter une amélioration pertinente pour renforcer la qualité finale des eaux traitées. Le lagunage facultatif favoriserait une épuration complémentaire grâce à l'action combinée des microorganismes aérobies et anaérobies, tandis que les bassins de maturation permettraient une réduction supplémentaire des microorganismes pathogènes et une amélioration de la qualité sanitaire de

l'effluent. Cette association entre procédés intensifs et procédés extensifs apparaît particulièrement adaptée aux régions sahariennes, où la disponibilité foncière et les conditions climatiques favorables peuvent être exploitées pour développer des solutions d'épuration plus durables.

En définitive, la STEP de Hassi R'Mel présente aujourd'hui des performances environnementales satisfaisantes et joue un rôle majeur dans la préservation du milieu

récepteur et la valorisation des ressources hydriques. Néanmoins, son évolution vers une station plus performante, plus autonome et plus durable nécessite une approche intégrée combinant le suivi permanent de la qualité des eaux, l'optimisation des processus biologiques, la maîtrise énergétique des équipements, la surveillance de l'oxygène dissous, l'amélioration des mécanismes de nitrification-dénitrification, ainsi que l'intégration progressive des énergies renouvelables et des procédés naturels de traitement. Ces orientations permettraient non seulement d'améliorer la fiabilité du traitement, mais également de transformer la STEP de Hassi R'Mel en un modèle de gestion durable de l'eau adapté aux contraintes environnementales du Sahara algérien.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

AFNOR., 2012. NF EN 27888 : Qualité de l'eau - Détermination de la conductivité électrique. Paris.

AFNOR., 2007. NF EN ISO 10523 : Qualité de l'eau: Détermination du pH. Paris.

AFNOR., 2000. NF EN ISO 13395 : Qualité de l'eau - Dosage de l'azote nitreux et de l'azote nitrique par analyse en flux. Paris.

AMAOUCHE, MALKI, 2023. Conception d'une station d'épuration des eaux usées dans la commune de Metlili en vue de la réutilisation pour l'irrigation Wilaya de Ghardaïa (Master hydraulique). Université de Ghardaïa.

Bengouga, 2010. Contribution à l'étude du rôle de la végétation dans l'épuration des eaux usées dans des eaux usées dans les régions arides (mémoire de master). université Mohamed Khider, Biskra.

BENSABRI, 2017. Performances épuratoires d'une station d'épuration fonctionnant par le procédé d'oxydation alternée : Etude expérimentale sur la station d'épuration des eaux usées de Ain Tolba - Wilaya de Ain Temouchent (Master hydraulique). université ABOU BEKR BELKAID, TLEMCEM.

CPEPESC - Commission de Protection des Eaux, 2017. Les différents paramètres physiques et chimiques des eaux et commentaires.* -.

Décret exécutif n° 06-141, 2006. Décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels, Décret exécutif n° 06-141.

Décret exécutif n°09-147 du 7 Joumada El Oula 1430, 2009

DRICHE, 2006. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux usées traitées par lagunage naturel, cas de la lagune de Béni Messous (mémoire d'ingénieur). ENSSMAL, Dely Brahim.

El aloui, Taoussi, 2013. L'impact du Chrome VI sur le traitement des eaux usées dans la station d'épuration de Marrakech (Master). Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

EPA, 2010. Nutrient Control Design Manual (No. EPA/600/R-10/100.). U.S. Environmental Protection Agency.

France, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2015. Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif.

GAAMOUNE, 2010. LE ROLE DES BIOFILMS D'ALGUES DANS LES TRAITEMENTS BIOLOGIQUES DES EAUX (mémoire Magister). UNIVERSITE FARHAT ABBAS, Setif.

Gouffi, Dali, 2019. Les boues d'épuration: Caractéristiques, traitement, gestion et valorisation (Mémoire de Master). Université A. MIRA, BEJAIA.

GOUJOUS D., 1995. La pollution des milieux aquatiques, 2eme édition revue. ed. Lavoisier tec et doc Paris.

Hach Company., 2020. Water Analysis Handbook, 5th ed. ed. Loveland, CO, USA.

Henze, van Loosdrecht, Ekama, G, Brdjanovic, D, 2008. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. IWA Publishing.

International Energy Agency (IEA), 2023. World Energy Outlook 2023. International Energy Agency, Paris.

International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022. Renewable Energy Targets in 2022: A Guide to Design. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, United Arab Emirates.

International Water Association (IWA), 2018. The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities.

ISO, ASME, 2019. ISO/ASME 14414:2019 – Pump System Energy Assessment.

Jean Rodier, Bernard Legube, Nicole Merlet, 2016. L'analyse de l'eau, 10th ed. Paris.

Labbaci, Boumenkar, 2018. Analyse des anomalies et redimensionnement de la STEP de la Wilaya de SKIKDA (PFE Master). UNIVERSITÉ Badji Mokhtar, Annaba.

Mara, 2004. Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. Earthscan.

MAZOUNI, RAMDANI, 2017. Traitement et valorisation des boues de station d'épuration d'Oued D'Hous, la ville de Bouira (Mémoire de Master). Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira.

Merabet, Zeroual, 2025. Caractérisation Physico-Chimique Et Microbiologique Des Boues De La STEP De Baraki En Vue De Leur Réutilisation (mémoire d'ingénieur). ENSSMAL, Dely Brahim, Alger.

MERAH, 2019. ETUDE DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DE L'EAU DES PUITES DE LA REGION EL HASSIANE (W. Mostaganem) (Master en biologie). Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.

Metahri, 2012. Elimination Simultanée De La Pollution Azotée Et Phosphatée Des Eaux Usées Traitées, Par Des Procédés Mixtes. Cas De La STEP Est De La Ville De Tizi-Ouzou (Thèse Doctorat). Ummto, Tizi-ouzou.

Metcalf & Eddy, 2014. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5th ed. McGraw-Hill Education, New York.

OURAHMOUNE, FERHAT, CHAMI, 2006. Evaluation de la qualité physico-chimique et bacteriologique des eaux usees traitees par lagunage naturel : cas de la lagune de Beni Messous (mémoire d'ingenieur). ISMAL, Dely Brahim, Alger.

RAYMOND., 1988. Le traitement des eaux usées, 2ème édition. ed. revue édition de l'école polytechnique, Montréal.

REZIG, OULD AMAR, juin2010. Contrôle des paramètres chimiques et physico-chimiques des eaux usées avant et après traitement au niveau de la STEP de Boumardes (mémoire d'ingenieur). ENSSMAL, Dely Brahim.

Von Sperling, 2007. Waste Stabilisation Ponds. IWA Publishing.

Von Sperling, Marcos, 2007. Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal, Biological Wastewater Treatment Series. IWA Publishing, London.

Wahiba, 2012. Traitement des eaux usées urbaines par boues activées au niveau de la ville de Bordj Bou Arreridj en Algérie effectué par la station d'épuration des eaux usées ONA (Master de chimie et microbiologie de l'eau). Université Mohamed El Bachir Elibrahimi, Bordj Bou Arreridj.

Water Environment Federation (WEF), 2010. Energy Conservation in Water and Wastewater Facilities.

Yahiatene, Tahirime, 2010. Réflexion sur la caractérisation physico-chimique des effluents liquides rejetés dans la grande sebkha d'Oran (licence batiment). université d'Oran, Oran.

ANNEXES

Annexe 1: décret exécutif 06-141 le 19 Avril 2006 (rejets liquides) :

4

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 26

24 Rabie El Aouel 1427
23 avril 2006

DECRETS

Décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.

Le Chef du Gouvernement,

Sur le rapport du ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement,

Vu la Constitution, notamment ses articles 85-4° et 125 (alinéa 2) ;

Vu la loi n° 90-08 du 7 avril 1990, complétée, relative à la commune ;

Vu la loi n° 90-09 du 7 avril 1990, complétée, relative à la wilaya ;

Vu la loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable ;

Vu la loi n° 04-04 du 5 Joumada El Oula 1425 correspondant au 23 juin 2004 relative à la normalisation ;

Vu la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005 relative aux hydrocarbures ;

Vu le décret présidentiel n° 04-136 du 29 Safar 1425 correspondant au 19 avril 2004 portant nomination du Chef du Gouvernement ;

Vu le décret présidentiel n° 05-161 du 22 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 1er mai 2005 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels ;

Décète :

Article 1er. — En application des dispositions de l'article 10 de la loi n° 03-10 du 19 juillet 2003, susvisée, le présent décret a pour objet de définir les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.

SECTION 1

DES DISPOSITIONS PRELIMAIRES

Art. 2. — Au sens du présent décret on entend par rejet d'effluents liquides industriels tout déversement, écoulement, jet et dépôt d'un liquide direct ou indirect qui provient d'une activité industrielle.

Art. 3. — Les valeurs limites de rejets d'effluents liquides industriels sont celles fixées en annexe du présent décret.

Toutefois, en attendant la mise à niveau des installations industrielles anciennes dans un délai de cinq (5) ans, les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels prennent en charge l'ancienneté des installations industrielles en déterminant une tolérance pour les rejets d'effluents liquides industriels émanant de ces installations. Ces valeurs sont fixées et annexées au présent décret.

Pour les installations pétrolières, le délai est de sept (7) ans conformément aux dispositions législatives en vigueur, et notamment celles de la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005, susvisée,

En outre et en raison des particularités propres aux technologies utilisées, des tolérances particulières aux valeurs limites sont également accordées selon les catégories industrielles concernées. Ces tolérances sont annexées au présent décret.

SECTION 2

DES PRESCRIPTIONS TECHNIQUES RELATIVES AUX REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS

Art. 4. — Toutes les installations générant des rejets d'effluents liquides industriels doivent être conçues, construites et exploitées de manière à ce que leurs rejets d'effluents liquides industriels ne dépassent pas à la sortie de l'installation les valeurs limites des rejets définies en annexe du présent décret et doivent être dotées d'un dispositif de traitement approprié de manière à limiter la charge de pollution rejetée.

Art. 5. — Les installations de traitement doivent être conçues, exploitées et entretenues de manière à réduire à leur minimum les durées d'indisponibilité pendant lesquelles elles ne peuvent assurer pleinement leur fonction.

Si une indisponibilité est susceptible de conduire à un dépassement des valeurs limites imposées, l'exploitant doit prendre les dispositions nécessaires pour réduire la pollution émise en réduisant ou en arrêtant, si besoin, les activités concernées.

SECTION 3

DU CONTROLE DES REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS

Art. 6. — Au titre de l'autocontrôle et de l'auto-surveillance les exploitants d'installations générant des rejets d'effluents liquides industriels doivent tenir un registre où sont consignés la date et les résultats des analyses qu'ils effectuent selon des modalités fixées par arrêté du ministre chargé de l'environnement et, le cas échéant, du ministre chargé du secteur concerné.

Les mesures sont effectuées sous la responsabilité de l'exploitant et à ses frais dans les conditions fixées par la réglementation en vigueur.

Art. 7. — Les résultats des analyses doivent être mises à la disposition des services de contrôle habilités.

Art. 8. — Les services habilités en la matière effectuent des contrôles périodiques et ou inopiné des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des rejets d'effluents liquides industriels visant à assurer de leur conformité aux valeurs limites fixées en annexe du présent décret.

Art. 9. — Le contrôle des rejets comporte un examen des lieux, des mesures et analyses opérées sur place et des prélèvements d'échantillons aux fins d'analyses.

Art. 10. — L'exploitant de l'installation concernée est tenu d'expliquer, commenter ou fonder tout dépassement éventuellement constaté et fournir les actions correctives mises en œuvre ou envisagées.

24 Rabie El Aouel 1427
23 avril 2006

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 26

5

Art. 11. — Les opérations de contrôle, telles que définies ci-dessus, donnent lieu à la rédaction d'un procès-verbal établi à cet effet.

Le procès-verbal comporte :

— les noms, prénoms et qualité des personnes ayant effectué le contrôle,

— la désignation du ou des générateurs du rejet d'effluents liquides industriels et de la nature de leur activité,

— la date, l'heure, l'emplacement et les circonstances de l'examen des lieux et des mesures faites sur place,

— les constatations relatives à l'aspect, la couleur, l'odeur du rejet, l'état apparent de la faune et de la flore à proximité du lieu de rejet et les résultats des mesures et des analyses opérées sur place,

— l'identification de chaque échantillon prélevé, accompagné de l'indication de l'emplacement, de l'heure et des circonstances de prélèvement,

— le nom du ou des laboratoires destinataires de l'échantillon prélevé.

Art. 12. — Les méthodes d'échantillonnage, de conservation et de manipulation des échantillons ainsi que les modalités d'analyses sont effectuées selon les normes algériennes en vigueur.

Art. 13. — Toutes dispositions contraires au présent décret et notamment les dispositions du décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993, susvisé, sont abrogées.

Art. 14. — Le présent décret sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006.

Ahmed OUYAHIA.

ANNEXE 1

VALEURS LIMITES DES PARAMETRES DE REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES INDUSTRIELS

N°	PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCES AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
1	Température	°C	30	30
2	PH	-	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
3	MES	mg/l	35	40
4	Azote Kjeldahl	"	30	40
5	Phosphore total	"	10	15
6	DCO	"	120	130
7	DBO5	"	35	40
8	Aluminium	"	3	5
9	Substances toxiques bioaccumulables	"	0,005	0,01
10	Cyanures	"	0,1	0,15
11	Fluor et composés	"	15	20
12	Indice de phénols	"	0,3	0,5
13	Hydrocarbures totaux	"	10	15
14	Huiles et graisses	"	20	30
15	Cadmium	"	0,2	0,25
16	Cuivre total	"	0,5	1
17	Mercurie total	"	0,01	0,05
18	Plomb total	"	0,5	0,75
19	Chrome Total	"	0,5	0,75
20	Etain total	"	2	2,5
21	Manganèse	"	1	1,5
22	Nickel total	"	0,5	0,75
23	Zinc total	"	3	5
24	Fer	"	3	5
25	Composés organiques chlorés	"	5	7

PH : Potentiel d'hydrogène

DBO5 : Demande biologique en oxygène pour une période de cinq (5) jours

DCO : Demande chimique en oxygène

MES : Matière en suspension

[illegible]

Energies	Consommations			Périodes Tarifaires	
	Cadran 1	Cadran 2	Cadran 3	H.Piote	Piote
Consom. Active	22 426,00	13 446,00	43 156,00		
P.E.C. Active	336,39	201,69	647,34	67 645,73	13 863,69
P.A.V Active	405,00	216,00	675,00		
Consom. Réactive	69 830,00				
P.E.C Réactive	2 793,52				80911,52
P.A.V Réactive	8 280,00				

FACTURATION

Veuillez régler par :

- Virement au compte CCP ou bancaire sus indiqué

- Chèque CCP ou bancaire adressé à notre unité

Contribution aux coûts permanents du système:611.32

Avis:

Un délai de paiement de 15 jours à dater de la réception de la présente facture vous est accordé. Passé ce délai, nous serons dans l'obligation d'entamer la procédure de suspension de la fourniture d'énergie.

Energie consommée

H.Pointe

Pointe

Quantité

67 645,73

13 863,69

P.U. (cDA)

120,64

872,02

A déduire

A ajouter(DA)

122 195,21

120 894,15

Facteur de Puissance (ER-EA)

99,27 %

Majoration

40 150,81

45,53

Puissance Mise à Disposition

500

3 870,00

Puissance Maximale atteinte

188

18 058,00

Primes Fixes (DA)

1

Montant énergie HT

TVA énergie

Taux 10 %

Location (Comptage, Transformateur)

Entretien du poste transformateur

Frais de coupure,remise et autres prestations

Montant prestation Hors Taxes

TVA prestation

Taux 10 %

Taxe d'habitation

Soutien de l'état

Taxe sur vente de produits énergétiques

0,00

TOTAL FACTURE:

315 026,33

La présente facture est établie à la somme de :
Trois cent quinze mille vingt-six Dinars et trente-trois centimes

LAGHOUAT, le 14/07/2025

Coupon détachable à joindre à votre correspondance

N° Client : 8391132

Facture N° 832508A00000

Référence : 035032101132159

Montant : 315 026,33 DA

C:_ESP: 102



Annexe 3:PV



MONO-PERC TECHNOLOGY M3 72 CELL 390W – 405W POWER RANGE



HIGH RETURN ON INVESTMENT

- Excellent for large scale installations.
- 1500V IEC certified.
- High power reduces installation time and BOS costs.

HIGHER OUTPUT POWER PER SURFACE

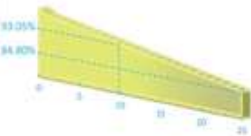
- High quality monocrystalline PERC M3 cells.

EXCELLENT WITHSTAND CHALLENGING ENVIRONMENTAL CONDITIONS

- 35mm hail stones at 97 km/h.
- 2400Pa wind load and 5400 Pa snow load.

EXCELLENT DURABILITY RELIABILITY PERFORMANCE

- Excellent PID resistant.
- All modules have to pass electroluminescence inspection.



PRODUCT CERTIFICATES

- IEC 61 215 : 2016
- IEC 61 730 : 2016
- OHSAS 18 001 : 2007

MANAGEMENT CERTIFICATES

- ISO 9 001:2015
- ISO 14 001 :2015



Zergsun Green Energy (Zergsun Group)
www.zergsungenenergy.com
contact@zergsungenenergy.com
+313 33 70 61 31



ZGE_FM72_390W – 405W

MECHANICAL SPECIFICATIONS

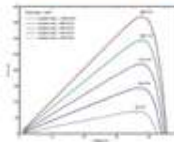
Module dimension	1091x1004x35mm	Back-sheet	White back sheet
Number of Cells	72	Frame	Aluminum
Weight	23Kg	Junction box	IP67, 3 diodes
Cell type	Peric Monocrystalline M3 cells	Cables	4mm ² (1500V)
Front-sheet	3.2mm tempered glass	Connector	QC4.10 (1500V)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

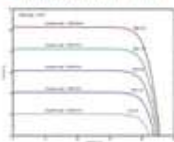
	390	395	400	405
STC Air Mass 1.5, Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C	Maximum rated power (P _m) [W ±5%] 40.53 Maximum power voltage (V _m) 47.8 Open circuit voltage (V _{oc}) 48.02 Maximum power current (I _m) 9.62 Short circuit (I _{sc}) 10.07	39.5 40.81 48.02 9.68 10.12	400 41.15 48.35 9.73 10.17	405 41.47 48.65 9.78 10.22
Module efficiency (%)	19.5	19.7	19.9	20.1
NOCT Air Mass 1.5, Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C	Maximum rated power (P _m) [W ±5%] 37.65 Maximum power voltage (V _m) 44.26 Open circuit voltage (V _{oc}) 44.46 Maximum power current (I _m) 7.68 Short circuit (I _{sc}) 8.05	395 37.85 44.46 7.73 8.09	400 38.05 44.71 7.79 8.13	405 38.25 44.93 7.84 8.17

Measuring power tolerance: ±3%

POWER-VOLTAGE CURVE



CURRENT-VOLTAGE CURVE



MAXIMUM RATINGS

Operational temperature	-40 o +85°C
Maximum system voltage	1500 V
Maximum series fuse rating	20 A

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Temperature coefficient of P _m max	-0.390%/°C
Temperature coefficient of V _{oc}	-0.300%/°C
Temperature coefficient of I _{sc}	0.060%/°C
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C

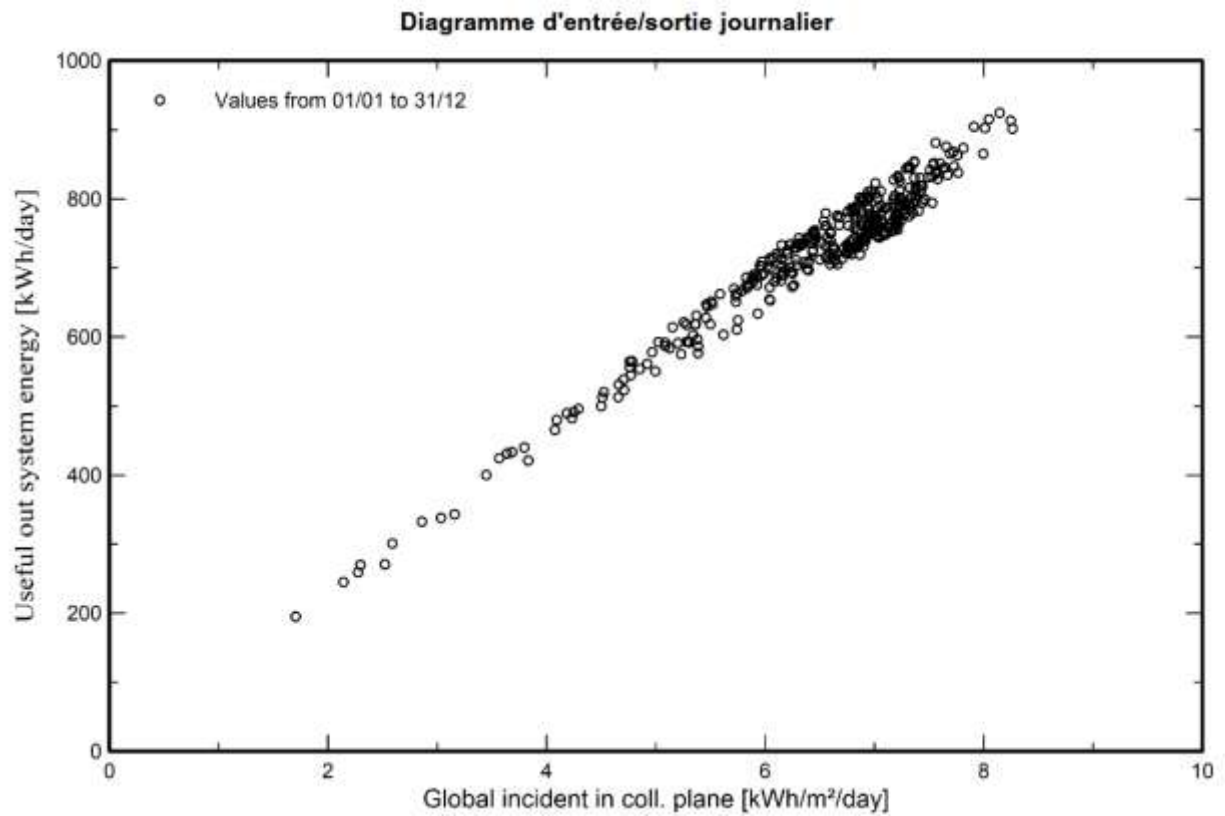
Zergsun Green Energy (Zergsun Group)
www.zergsungenenergy.com
contact@zergsungenenergy.com
+313 33 70 61 31



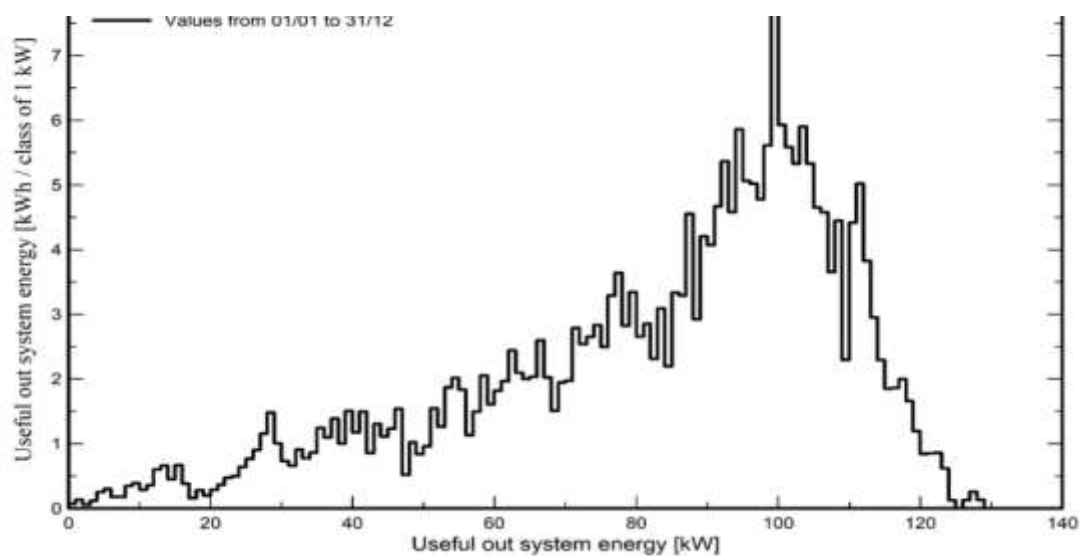
Annexe 4:les caractéristiques de pv array

PV Array Characteristics			
Array #4 - Sous-champ #4			
Number of PV modules	64 units	Number of inverters	2 * MPPT 50% 1 unit
Nominal (STC)	25.92 kWp	Total power	25.0 kWac
Modules	4 string x 16 in series		
At operating cond. (50°C)		Operating voltage	200-1000 V
Pmpp	23.77 kWp	Max. power (=>42°C)	27.5 kWac
U mpp	606 V	Pnom ratio (DC:AC)	1.04
I mpp	39 A	No power sharing between MPPTs	
Array #5 - Sous-champ #5			
Number of PV modules	64 units	Number of inverters	2 * MPPT 50% 1 unit
Nominal (STC)	25.92 kWp	Total power	25.0 kWac
Modules	4 string x 16 in series		
At operating cond. (50°C)		Operating voltage	200-1000 V
Pmpp	23.77 kWp	Max. power (=>42°C)	27.5 kWac
U mpp	606 V	Pnom ratio (DC:AC)	1.04
I mpp	39 A	No power sharing between MPPTs	
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	130 kWp	Total power	125 kWac
Total	320 modules	Number of inverters	5 units
Module area	640 m²	Pnom ratio	1.04
		No power sharing	

Annexe5 :Diagramme d'entrée / sortie journalier



Annexe 6 :Diagramme de distribution des puissances





Certificate Of Participation

This certificate is awarded to

Chaïter Khouloud, Khelfaoui Faten, Mazighi Hichem

In recognition of the participation in the 2nd edition of the conference entitled "**Anthropogenic Interactions with the Sea and the Coastal Zone:**

Observation and Ecosystem-Based Management"

Held on June 8th 2026 with a poster "**Toward a Sustainable WWTP in a Saharan Region: Environmental and Electro-energetic Assessment of the WWTP A Case Study of Hassi R'Mel**".

The Director of LCVRM



The Director of ENSSMAL

مكلف بتمثيل المدير

