وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم و التكنو لوجيا قسم هندسة الطرائق
Faculté des sciences et de la technologie – Département de génie des procédés

Mémoire de Master
Filière : Génie pétrochimiques
Option :Génie des procédés

Etude de qualité et analyse de l'efficacité du traitement d'eau du complexe Fertial au niveau de l'utilité

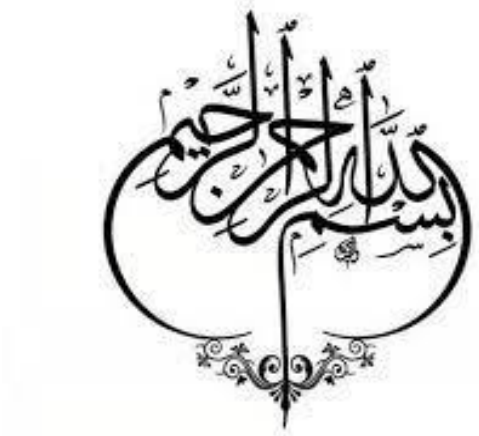
Présenté par :

1. HAMMOU ABDERRAHMANE
2. AKKOUDA SOFIANE

Soutenu le 30/09/2026 devant le jury composé de :

Présidente :	MEKIBES Zohra	MCB	Université de Mostaganem
Examinateur :	BENZEKRI BENALLOU Mokhtar	MCA	Université de Mostaganem
Encadrement :	CHEMRAK Mohammed Amin	MCA	Université de Tissemsilt

Année universitaire 2025/2026



{اقْرَأْ بِاسْمِ رَبِّكَ الَّذِي خَلَقَ ❶خَلَقَ الْإِنْسَانَ مِنْ عَلَقٍ ❷ اقْرَأْ وَرَبُّكَ
الْأَكْرَمُ ❸ الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ ❹ عَلَّمَ الْإِنْسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمْ❺}

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, nous tenons à remercier **Allah**, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force, la santé, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.*

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

*Nous adressons nos sincères et chaleureux remerciements à notre encadrant, **M. CHEMRAK Mohammed Amin,** Maître de conférences de classe A à l'Université de Tissemsilt, pour sa disponibilité, son accompagnement constant, ses précieux conseils, sa rigueur scientifique et la qualité de son encadrement tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Nous sommes particulièrement honorées par la présence de **Mme MEKIBES Zohra**, Maître de conférences de classe A à l'Université de Mostaganem, qui a bien voulu accepter de présider le jury de soutenance de ce mémoire. Nous lui exprimons nos sincères remerciements pour l'intérêt porté à notre travail et pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider ce jury.*

*Nous adressons également nos chaleureux remerciements à M. **BENZEKRI BENALLOU Mokhtar**, Maître de conférences de classe A à l'Université de Mostaganem, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant d'examiner ce mémoire, ainsi que pour le temps consacré à l'évaluation de notre travail.*

*Nos sincères remerciements s'adressent également à **l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences et de la Technologie – Département de Génie des Procédés**, pour la qualité de l'enseignement dispensé, ainsi que pour les connaissances et les compétences qu'ils nous ont permis d'acquérir tout au long de notre parcours universitaire.*

*Nous remercions également les responsables et **le personnel du laboratoire du Fertial** pour nous avoir permis de réaliser nos travaux expérimentaux dans de bonnes conditions et pour leur disponibilité.*

Enfin, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à nos familles et à nos amis pour leur soutien moral, leur patience, leurs encouragements constants et leur présence durant toutes les étapes de nos études.

À toutes et à tous, nous adressons nos plus sincères remerciements.

Dédicace

À ceux qui ont semé en nous l’amour du savoir et de la connaissance,

À nos chers parents,
Merci pour vos prières, votre amour et votre soutien constant.

À nos honorables enseignants, qui ne nous ont jamais refusé leur savoir, leurs conseils et leurs encouragements,

À toutes les personnes qui nous ont soutenues et accompagnées tout au long de notre parcours universitaire,

Nous dédions ce modeste travail, en signe de reconnaissance, de respect et de profonde gratitude.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE 9
Problématique ..... **Error! Bookmark not defined.**
Objectifs et Structure du Rapport ..... **Error! Bookmark not defined.**
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA QUALITÉ ET LE TRAITEMENT DES EAUX INDUSTRIELLES 12
Introduction 13
1.1 – Les ressources en eau et les différents types d'eaux industrielles 13
1.1.1 – Les ressources en eau à l'échelle mondiale et nationale 13
1.1.2 – Classification des eaux industrielles 14
1.1.3 – Rôles de l'eau dans les complexes industriels chimiques et pétrochimiques 15
1.2 – Caractéristiques des eaux dans les complexes d'engrais 15
1.2.1 – Spécificités des besoins en eau d'un complexe d'engrais azoté 15
1.2.2 – Qualité de l'eau requise selon les différentes utilisations industrielles 15
1.2.3 – Risques liés à une mauvaise qualité de l'eau dans les procédés de production d'engrais 16
1.3 – Paramètres physico-chimiques de qualité de l'eau 16
1.3.1 – Paramètres organoleptiques et physiques 17
1.3.2 – Paramètres électrochimiques 17
1.3.2.1 – pH 17
1.3.3 – Paramètres de dureté et d'alcalinité 18
1.3.4 – Paramètres ioniques 18
1.3.5 – Paramètres de pollution organique et gazeuse 20
1.4 – Les procédés de traitement des eaux industrielles 20
1.4.1 – Vue d'ensemble des filières de traitement 20
1.4.2 – Prétraitement et clarification 20
1.4.3 – Adoucissement 21
1.4.4 – Déminéralisation 21
1.4.5 – Traitement des gaz dissous 22
1.4.6 – Conditionnement chimique des eaux industrielles 23
1.5 – Normes et critères de qualité applicables aux eaux industrielles 23
1.5.1 – Normes internationales de qualité de l'eau industrielle 23
1.5.1.3 – Critères de qualité pour l'eau de procédé 23
1.5.2 – Réglementation algérienne applicable 23
1.6 – Méthodes d'évaluation de l'efficacité d'un procédé de traitement 24
1.6.1 – Taux d'abattement et rendement d'élimination 24
1.6.2 – Indice de Langelier 24

1.6.3 – Facteur de concentration pour les circuits de refroidissement 24
1.6.4 – Indicateurs globaux de performance du traitement ..... **Error! Bookmark not defined.**
Conclusion 24
Introduction 26
2.1. Présentation du complexe Fertial 26
2.1.1. Historique et localisation 26
2.1.2. Activités du complexe 27
2.1.3. Principales unités de production 27
2.1.4. Importance des utilités dans le fonctionnement du complexe 28
2.2. Présentation de l'Utilité 50 I 29
2.2.1. Rôle de l'Utilité 50 I 29
2.2.2. Origine et nature de l'eau traitée 29
2.2.3. Schéma général du traitement de l'eau 29
2.2.4. Principaux équipements de traitement 30
2.3. Filière de traitement de l'eau 30
2.3.1. Prétraitement de l'eau 30
2.3.2. Pompage et alimentation de l'installation 30
2.3.3. Dessalement / distillation 30
2.3.4. Déminéralisation 31
2.3.5. Traitement et conditionnement de l'eau 31
2.3.6. Production et utilisation de l'eau traitée 31
2.4. Principaux problèmes pouvant affecter la qualité de l'eau 31
2.4.1. Entartrage 32
2.4.2. Corrosion 32
2.4.3. Présence de silice 32
2.4.4. Augmentation de la conductivité 33
2.4.5. Mauvaise utilisation ou insuffisance des produits de traitement 33
2.5. Laboratoire et contrôle de la qualité 33
2.5.1. Présentation du laboratoire 33
2.5.2. Équipements disponibles 34
2.5.3. Méthodes d'analyse utilisées 37
2.5.4. Points de prélèvement 38
Conclusion 38
Introduction 39
3.1. Stratégie expérimentale 40
3.2. Prélèvement et conservation des échantillons 41

3.3. Analyses physico-chimiques 43
3.4. Matériels et équipements utilisés 45
3.5. Traitement des données 49
Conclusion 51
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION ..... **Error! Bookmark not defined.**
4.1. Caractérisation de l'eau avant traitement 53
4.1.1. Résultats du pH 54
Tableau Évolution du pH de l'eau produite par SIDEM A 55
4.1.2. Résultats de la conductivité 56
Tableau Évolution de la conductivité de l'eau produite par SIDEM A 56
4.1.3. Résultats des chlorures 57
Tableau Évolution des chlorures dans l'eau produite par SIDEM A 58
4.1.4. Résultats de la dureté 59
4.1.5. Résultats de la silice 59
4.1.6. Autres paramètres analysés 60
Tableau Évolution de l'ammonium dans l'eau produite par SIDEM A 60
4.2. Qualité de l'eau après traitement 60
4.2.1. Évolution du pH 61
Tableau Évolution du pH de l'eau déminéralisée du ballon A 61
4.2.2. Évolution de la conductivité 62
Tableau Évolution de la conductivité de l'eau déminéralisée du ballon A 62
4.2.3. Évolution des chlorures 63
4.2.4. Évolution de la dureté 63
4.2.5. Évolution de la silice 63
Tableau : Évolution de la silice dans l'eau de chaudière A 64
4.2.6. Évolution des autres paramètres 64
Tableau Résultats des autres paramètres de l'eau de chaudière A 65
4.3. Analyse de l'efficacité du traitement 66
4.3.1. Rendement d'élimination des différents paramètres 66
4.3.2. Comparaison entre l'eau avant et après traitement 66
4.3.3. Identification des paramètres les mieux éliminés 67
4.3.4. Identification des paramètres présentant un faible rendement 68
4.3.5. Évaluation globale de l'efficacité de l'Utilité 50 I 68
4.4. Évaluation de la conformité de l'eau traitée 69
4.4.1. Comparaison avec les spécifications utilisées par FERTIAL 69
4.4.2. Identification des éventuelles non-conformités 70
4.4.3. Analyse des causes possibles 71

4.5. Discussion des résultats 72
4.5.1. Interprétation des variations des paramètres 72
4.5.2. Influence des différentes étapes du traitement 72
4.5.3. Problèmes d'entartrage et de corrosion 73
4.5.4. Problème potentiel lié à la silice 74
4.5.5. Comparaison avec les résultats de la littérature 74
4.5.6. Recommandations pour améliorer le traitement 75
Conclusion 76
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS .. **Error! Bookmark not defined.**
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 77

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le contexte industriel moderne, les industries chimique et pétrochimique, notamment les complexes spécialisés dans la production d'engrais et de produits azotés tels que Fertial, occupent une place stratégique dans le secteur industriel. Le bon fonctionnement de ces installations repose non seulement sur la performance des unités de production, mais également sur celle des unités d'utilités, qui assurent la disponibilité des différents fluides indispensables au fonctionnement des procédés.

Parmi ces utilités, l'eau industrielle occupe une place essentielle. Selon son usage, elle peut être destinée à l'alimentation des chaudières haute pression, aux circuits de refroidissement ou encore à différents besoins liés aux procédés de fabrication. Elle doit, dans tous les cas, répondre à des exigences de qualité strictes afin de garantir la fiabilité des installations, leur bon fonctionnement et la durabilité des équipements. Une eau brute insuffisamment traitée ou mal conditionnée peut favoriser la formation de dépôts et de précipités, notamment par entartrage, ainsi que l'apparition de phénomènes de corrosion et de dépôt de silice. Ces phénomènes peuvent entraîner une diminution des performances thermiques et hydrauliques, une augmentation des coûts d'exploitation et de maintenance et, dans certains cas, des perturbations du fonctionnement des installations.

C'est dans ce contexte que s'inscrit l'étude de l'Utilité 50 I du complexe Fertial, unité dédiée au traitement, à la déminéralisation et au conditionnement de l'eau destinée aux différents usages industriels. La filière de traitement mise en œuvre comprend plusieurs étapes, notamment le prétraitement, le dessalement et la déminéralisation, dont l'efficacité conditionne directement la qualité de l'eau produite.

Malgré la présence de cette chaîne de traitement, la qualité de l'eau obtenue peut être influencée par les variations des caractéristiques de l'eau brute, les conditions opératoires ainsi que l'état et les performances des différents équipements. Il est donc essentiel de vérifier l'efficacité globale de la filière et de s'assurer que l'eau produite satisfait aux exigences de qualité requises pour les usages auxquels elle est destinée. Dans cette perspective, plusieurs paramètres physico-chimiques revêtent une importance particulière, notamment la conductivité, la dureté, la teneur en silice, les chlorures et le pH.

La problématique de cette étude consiste ainsi à évaluer l'efficacité de la chaîne de traitement de l'Utilité 50 I, à caractériser la qualité de l'eau avant et après traitement et à déterminer dans quelle mesure l'eau produite répond aux spécifications de qualité exigées au sein du complexe Fertial. Il s'agit également d'identifier les éventuels écarts ou risques de non-conformité et d'examiner leurs causes potentielles, qui peuvent être liées notamment au dosage des produits de traitement, aux conditions de fonctionnement ou aux performances des équipements.

Afin de répondre à cette problématique, une campagne analytique a été réalisée au niveau du laboratoire du complexe Fertial. Cette étude vise à caractériser les différentes qualités d'eau considérées, à suivre l'évolution des principaux paramètres physico-chimiques au cours de la chaîne de traitement, à évaluer les performances des différentes étapes de purification et à comparer les caractéristiques de l'eau produite aux spécifications requises. L'analyse des résultats permet également d'apprécier les risques potentiels liés à l'entartrage, à la corrosion et aux dépôts de silice et, sur cette base, de proposer des recommandations susceptibles de contribuer à l'amélioration de la maîtrise du procédé de traitement.

Le présent mémoire est organisé en plusieurs chapitres. Le Chapitre I : « Synthèse bibliographique sur la qualité et le traitement des eaux industrielles » présente les principales caractéristiques des eaux industrielles, les paramètres physico-chimiques utilisés pour leur caractérisation, les principales sources de pollution ainsi que les différents procédés et techniques de traitement et de purification des eaux destinées aux applications industrielles.

Le Chapitre II est consacré à la présentation du complexe Fertial et de l'Utilité 50 I, ainsi qu'à la description de la filière de traitement de l'eau et des principales exigences relatives à sa qualité. Le Chapitre III présente la méthodologie expérimentale adoptée, notamment les conditions de prélèvement, les méthodes d'analyses physico-chimiques utilisées ainsi que les méthodes de traitement et d'interprétation des données. Le Chapitre IV regroupe les résultats expérimentaux obtenus et leur discussion, en mettant l'accent sur l'évaluation des performances de la chaîne de traitement, la conformité de l'eau produite et l'analyse des risques potentiels associés à sa qualité. Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats de l'étude et présente les recommandations proposées en vue d'améliorer le fonctionnement de la filière et d'assurer une qualité d'eau conforme aux exigences du procédé.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA QUALITÉ ET LE TRAITEMENT DES EAUX INDUSTRIELLES

Introduction

L'eau constitue une matière première stratégique pour l'industrie chimique et pétrochimique, notamment pour les complexes de production d'engrais où elle intervient à la fois comme fluide caloporteur, comme solvant de procédé et comme vecteur de vapeur. La performance, la sécurité et la durée de vie des installations industrielles dépendent directement de la qualité de l'eau mise en œuvre : une eau mal traitée engendre entartrage, corrosion, encrassement biologique et pertes énergétiques considérables.

Ce premier chapitre présente une synthèse bibliographique consacrée à la ressource en eau, aux différents types d'eaux utilisées en milieu industriel, aux paramètres physico-chimiques qui définissent leur qualité, ainsi qu'aux principaux procédés de traitement mis en œuvre pour répondre aux exigences des utilités industrielles. Il se termine par un rappel des normes de référence et des méthodes usuelles d'évaluation de l'efficacité d'un procédé de traitement, qui serviront de base méthodologique aux chapitres suivants.

1.1 – Les ressources en eau et les différents types d'eaux industrielles

1.1.1 – Les ressources en eau à l'échelle mondiale et nationale

L'eau recouvre environ 71 % de la surface terrestre, mais l'eau douce directement mobilisable ne représente qu'une fraction infime des ressources globales : les océans concentrent près de 97 % du volume total, tandis que les glaciers et calottes polaires immobilisent la majeure partie de l'eau douce restante. Les eaux souterraines et les eaux de surface (lacs, rivières) ne constituent finalement qu'une part réduite, mais économiquement essentielle, des ressources exploitables.

À l'échelle nationale, l'Algérie se situe dans une zone de stress hydrique marquée, caractérisée par une pluviométrie irrégulière, une forte évaporation et une pression croissante de la demande industrielle, agricole et urbaine. Cette situation pousse les grands complexes industriels à recourir à des sources diversifiées (eaux souterraines, eaux de mer dessalées, eaux de surface régulées par barrage) et à optimiser fortement leurs procédés de traitement et de recyclage internes.

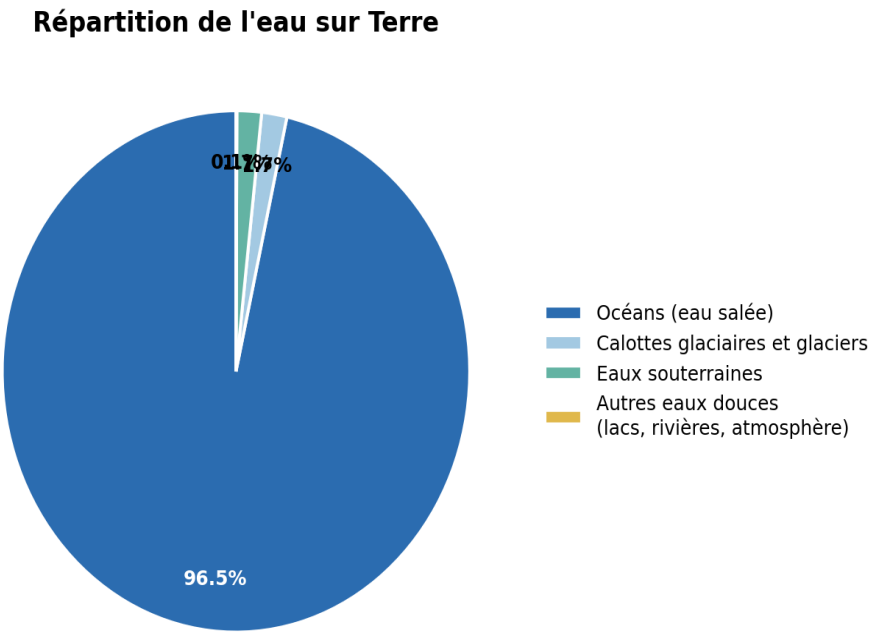


Figure 1.1. Répartition de l'eau sur Terre

1.1.2 – Classification des eaux industrielles

Les eaux mises en œuvre dans un complexe industriel peuvent être classées selon leur origine et selon leur usage. Selon l'origine, on distingue les eaux brutes (superficielles, souterraines ou de mer), les eaux de ville et les eaux recyclées issues des circuits internes de l'usine. Selon l'usage, on distingue principalement l'eau d'alimentation des chaudières, l'eau des circuits de refroidissement, l'eau de procédé (utilisée directement dans les réactions chimiques) et les eaux sanitaires ou de service.

Tableau 1.1 – Classification usuelle des eaux industrielles selon leur usage

Type d'eau	Usage principal	Exigence de qualité dominante
Eau d'alimentation chaudière	Génération de vapeur haute pression	Très faible dureté, TDS et silice ; absence d'oxygène dissous
Eau de circuit de refroidissement	Évacuation de chaleur (tours, échangeurs)	Maîtrise de l'entartrage, de la corrosion et de la prolifération biologique
Eau de procédé	Réactifs, dilution, lavage de gaz	Qualité spécifique selon la réaction ou l'unité concernée
Eau sanitaire / de service	Usages généraux, lavage, incendie	Conformité aux normes d'eau potable ou d'usage courant

1.1.3 – Rôles de l'eau dans les complexes industriels chimiques et pétrochimiques

Dans les complexes chimiques et pétrochimiques, l'eau assure plusieurs fonctions vitales : elle sert de fluide caloporteur pour le refroidissement des réacteurs et échangeurs, de matière première pour la génération de vapeur motrice et de procédé, de solvant ou diluant pour certaines réactions, et parfois de vecteur de transport de matières (hydraulique de procédé). Une utilité de traitement d'eau performante conditionne ainsi directement la disponibilité, la sécurité et le rendement énergétique global de l'ensemble du complexe.

1.2 – Caractéristiques des eaux dans les complexes d'engrais

1.2.1 – Spécificités des besoins en eau d'un complexe d'engrais azoté

Un complexe de production d'engrais azotés (ammoniac, acide nitrique, nitrate d'ammonium, urée) est particulièrement consommateur d'eau et de vapeur : les unités de synthèse de l'ammoniac exigent une vapeur de très haute pureté pour le reformage et les turbines, tandis que les circuits de refroidissement doivent évacuer d'importantes quantités de chaleur issues des réactions exothermiques. Ces besoins imposent des filières de traitement dimensionnées pour fournir simultanément plusieurs qualités d'eau distinctes, avec une disponibilité continue 24 h/24.

1.2.2 – Qualité de l'eau requise selon les différentes utilisations industrielles

Chaque utilisation impose ses propres spécifications : l'eau alimentant les chaudières haute pression doit présenter une conductivité, une dureté et une teneur en silice extrêmement

faibles afin d'éviter l'entartrage des tubes et le primage ; l'eau des circuits de refroidissement tolère des teneurs en sels plus élevées mais nécessite un contrôle strict de l'indice de saturation et un traitement anti-corrosion/anti-tartre ; l'eau de procédé, quant à elle, répond à des cahiers des charges propres à chaque réaction chimique.

1.2.3 – Risques liés à une mauvaise qualité de l'eau dans les procédés de production d'engrais

Une eau non conforme peut entraîner l'entartrage des surfaces d'échange (perte de rendement thermique), la corrosion des équipements métalliques (perforations, arrêts non programmés), l'encrassement biologique des circuits de refroidissement, ainsi que la contamination de certains produits finis. Ces désordres se traduisent par des coûts de maintenance élevés, une baisse de la disponibilité des installations et, dans les cas extrêmes, par des risques pour la sécurité des opérateurs (éclatement de tubes de chaudière notamment).

1.3 – Paramètres physico-chimiques de qualité de l'eau

La caractérisation d'une eau industrielle repose sur un ensemble de paramètres organoleptiques, physiques, électrochimiques, ioniques et de pollution organique, présentés dans les sous-sections suivantes et synthétisés dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 – Synthèse des principaux paramètres physico-chimiques de qualité de l'eau industrielle

Catégorie	Paramètres	Impact principal si non maîtrisé
Organoleptiques / physiques	Température, couleur, turbidité, MES	Colmatage des filtres et résines, baisse d'efficacité du traitement
Électrochimiques	pH, conductivité, TDS	Corrosion, primage, entartrage
Dureté / alcalinité	TH, TAC, TA, indice de Langelier	Entartrage ou corrosion selon le sens du déséquilibre
Ioniques	Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-/NO_2^-, PO_4^{3-}, Ca^{2+}/Mg^{2+}, Fe, SiO_2	Corrosion par piqûration, dépôts durs sur turbines
Pollution organique / gazeuse	DCO, DBO_5, O_2 dissous	Encrassement biologique, corrosion par l'oxygène

1.3.1 – Paramètres organoleptiques et physiques

1.3.1.1 – Température

La température influence la solubilité des gaz dissous, la cinétique des réactions de précipitation et l'efficacité de la coagulation-floculation. Elle doit être surveillée en continu, notamment sur les circuits de refroidissement, car un écart important modifie le pouvoir entartrant et la vitesse de corrosion de l'eau.

1.3.1.2 – Couleur et turbidité

La couleur traduit la présence de matières organiques dissoutes ou colloïdales, tandis que la turbidité mesure la trouble de l'eau liée aux matières en suspension. Une turbidité élevée pénalise l'efficacité des étapes ultérieures de filtration et d'échange ionique en colmatant prématurément les médias filtrants et les résines.

1.3.1.3 – Matières en suspension (MES)

Les MES regroupent les particules minérales et organiques non dissoutes. Leur élimination, généralement par décantation puis filtration, conditionne la protection des équipements avals (échangeurs, résines, membranes) contre l'encrassement et l'abrasion.

1.3.2 – Paramètres électrochimiques

1.3.2.1 – pH

Le pH conditionne la spéciation des espèces dissoutes, la vitesse de corrosion des métaux et l'efficacité de la coagulation. Il doit être maintenu dans des plages étroites propres à chaque circuit (souvent légèrement alcalin pour limiter la corrosion des circuits vapeur).

1.3.2.2 – Conductivité électrique

La conductivité est proportionnelle à la teneur globale en ions dissous ; elle constitue un indicateur rapide et continu de la minéralisation de l'eau, très utilisé pour le suivi en ligne des unités de déminéralisation et des circuits de chaudière.

1.3.2.3 – Solides totaux dissous (TDS)

Les TDS quantifient l'ensemble des sels dissous. Une teneur excessive favorise l'entartrage, la formation de mousse dans les chaudières (primage) et augmente les purges nécessaires sur les circuits de refroidissement.

1.3.3 – Paramètres de dureté et d'alcalinité

1.3.3.1 – Dureté totale (TA)

La dureté totale exprime la somme des ions calcium et magnésium. Elle constitue le paramètre le plus critique vis-à-vis du risque d'entartrage des surfaces chaudes et justifie la mise en place d'étapes d'adoucissement ou de déminéralisation en amont des chaudières.

1.3.3.2 – Alcalinité totale (TAC) et titre alcalimétrique (TA)

Le TAC mesure la teneur en carbonates, bicarbonates et hydroxydes ; associé au TA, il permet de caractériser le pouvoir tampon de l'eau et son potentiel de dégagement de CO2 lors du chauffage, phénomène impliqué dans la corrosion des réseaux de retour condensats.

1.3.3.3 – Relations entre TA, TAC et risques d'entartrage – Indice de Langelier

L'indice de saturation de Langelier combine pH, TA, TAC, TDS et température pour prédire la tendance d'une eau à précipiter (entartrante) ou à dissoudre (agressive/corrosive) le carbonate de calcium. Cet indice, largement utilisé dans le suivi des circuits de refroidissement, sera calculé et discuté au chapitre 4.

1.3.4 – Paramètres ioniques

1.3.4.1 – Chlorures (Cl^-)

Les chlorures, très solubles, sont peu retenus par les traitements conventionnels et s'accumulent par concentration dans les circuits de refroidissement ; à forte teneur, ils favorisent la corrosion par piqûration des aciers inoxydables.

1.3.4.2 – Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates contribuent à la salinité globale et, combinés au calcium, peuvent former du sulfate de calcium peu soluble, source d'entartrage dans les zones de forte concentration thermique.

1.3.4.3 – Nitrates (NO_3^-) et nitrites (NO_2^-)

Ces espèces azotées, particulièrement suivies dans un complexe d'engrais du fait des activités de production, renseignent sur d'éventuelles contaminations croisées entre ateliers et sur la qualité microbiologique indirecte de l'eau.

1.3.4.4 – Phosphates (PO_4^{3-})

Les phosphates peuvent provenir des réactifs de conditionnement anti-tartre ou d'une contamination de procédé ; leur suivi permet de contrôler le dosage des inhibiteurs et de prévenir l'eutrophisation des rejets.

1.3.4.5 – Calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+})

Ces deux cations constituent les principaux responsables de la dureté de l'eau ; leur élimination sélective (adoucissement) ou totale (déminéralisation) est au cœur des filières de traitement destinées aux eaux d'alimentation chaudière.

1.3.4.6 – Fer total (Fe^{2+} + Fe^{3+})

Le fer, souvent issu de la corrosion des canalisations ou de l'eau brute elle-même, entraîne des dépôts colorés, un encrassement des résines échangeuses d'ions et peut catalyser des phénomènes de corrosion localisée.

1.3.4.7 – Silice (SiO_2)

La silice est l'un des paramètres les plus critiques pour les chaudières haute pression, car elle peut se volatiliser avec la vapeur et former des dépôts très durs et difficiles à éliminer sur les aubes de turbine ; son élimination pousse au recours à la déminéralisation complète, voire à l'osmose inverse.

1.3.5 – Paramètres de pollution organique et gazeuse

1.3.5.1 – Demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO quantifie la matière organique oxydable chimiquement ; un niveau élevé peut favoriser l'encrassement biologique des circuits et perturber le fonctionnement des résines échangeuses d'ions.

1.3.5.2 – Demande biochimique en oxygène (DBO_5)

La DBO5 mesure la fraction biodégradable de la matière organique et complète la DCO pour évaluer le pouvoir polluant d'une eau, notamment en sortie de traitement avant rejet.

1.3.5.3 – Oxygène dissous (OD)

L'oxygène dissous est un facteur majeur de corrosion des circuits métalliques ; son élimination par dégazage thermique ou chimique est une étape incontournable du conditionnement de l'eau d'alimentation chaudière.

1.4 – Les procédés de traitement des eaux industrielles

1.4.1 – Vue d'ensemble des filières de traitement

Les filières de traitement des eaux industrielles s'organisent généralement en une succession d'étapes complémentaires : prétraitement et clarification, filtration, adoucissement ou déminéralisation selon la qualité visée, dégazage des gaz dissous, puis conditionnement chimique final. Le choix et le dimensionnement de chaque étape dépendent de la qualité de l'eau brute disponible et des spécifications de l'utilisation finale (schéma de principe présenté en figure 1.2).

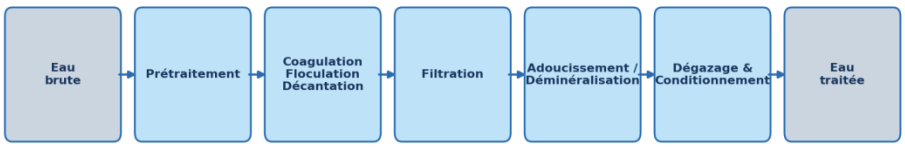


Figure 1.2 – Filière générale de traitement des eaux industrielles

1.4.2 – Prétraitement et clarification

1.4.2.1 – Coagulation-floculation

La coagulation, généralement réalisée par ajout de sels métalliques (sulfate d'aluminium, chlorure ferrique) ou de coagulants organiques, neutralise les charges de surface des colloïdes ; la floculation, souvent assistée par un polymère, favorise ensuite leur agglomération en flocs facilement décantables.

1.4.2.2 – Décantation

La décantation sépare par gravité les flocs formés, réduisant fortement la turbidité et la charge en matières en suspension avant les étapes de filtration fine.

1.4.2.3 – Filtration sur sable et sur matériaux granulaires

La filtration sur lit de sable, éventuellement associée à d'autres médias (anthracite, grenat), retient les particules résiduelles non éliminées par décantation, protégeant ainsi les résines échangeuses d'ions et les membranes situées en aval.

1.4.3 – Adoucissement

1.4.3.1 – Adoucissement par échange ionique (résines cationiques Na^+)

Ce procédé remplace les ions calcium et magnésium par des ions sodium sur une résine cationique forte, réduisant fortement la dureté sans modifier de façon significative la minéralisation totale de l'eau.

1.4.3.2 – Régénération des résines adoucissantes

La saturation progressive de la résine impose une régénération périodique à la saumure (chlorure de sodium concentré), qui restitue les sites d'échange sous forme sodique.

1.4.3.3 – Adoucissement par précipitation alcaline (chaulage)

Le chaulage, éventuellement complété par de la soude, précipite le calcium et le magnésium sous forme de carbonate et d'hydroxyde ; ce procédé, adapté aux grands débits, génère cependant des boues qu'il faut extraire et traiter.

1.4.4 – Déminéralisation

1.4.4.1 – Déminéralisation par échange ionique (résines cationiques H^+ et anioniques OH^-)

Cette filière associe une résine cationique forte sous forme H^+, qui échange les cations contre des ions hydrogène, et une résine anionique forte sous forme OH^-, qui échange les anions contre des ions hydroxyde, produisant une eau de très faible conductivité, indispensable à l'alimentation des chaudières haute pression.

1.4.4.2 – Décarbonatation (élimination de CO_2 libre)

Le CO2 libéré lors du passage sur résine cationique est généralement éliminé par un dégazeur atmosphérique (tour de stripping) avant l'étape anionique, afin de limiter la charge sur la résine et la production ultérieure de CO2 dans la vapeur.

1.4.4.3 – Lit mixte (mixed bed)

Le lit mixte, mélange intime de résine cationique et anionique dans une même colonne, constitue l'étape de finition qui permet d'atteindre les très faibles conductivités exigées par les chaudières les plus critiques.

1.4.4.4 – Régénération des résines de déminéralisation

La régénération s'effectue à l'acide (généralement chlorhydrique ou sulfurique) pour la résine cationique et à la soude pour la résine anionique, avec des étapes de rinçage soignées afin d'éviter toute fuite ionique résiduelle.

1.4.4.5 – Osmose inverse (présentation bibliographique comparative)

L'osmose inverse, procédé membranaire à haute pression, retient la quasi-totalité des sels dissous et constitue une alternative ou un complément à l'échange ionique, avec l'avantage de réduire fortement la consommation de réactifs chimiques et le volume d'effluents de régénération, moyennant un investissement et une consommation énergétique plus élevés.

1.4.5 – Traitement des gaz dissous

1.4.5.1 – Dégazage thermique (déaération)

Le dégazage thermique, réalisé dans un bac dégazeur alimenté en vapeur, élimine l'oxygène et le CO2 dissous par élévation de température, réduisant fortement leur solubilité dans l'eau.

1.4.5.2 – Dégazage chimique

Le dégazage chimique complète le dégazage thermique par l'ajout de réactifs réducteurs (sulfite de sodium, hydrazine ou substituts) qui piègent les traces résiduelles d'oxygène dissous, protégeant les circuits contre la corrosion.

1.4.6 – Conditionnement chimique des eaux industrielles

1.4.6.1 – Conditionnement de l'eau d'alimentation chaudière

Le conditionnement de l'eau chaudière associe des agents anti-tartre (phosphates, polymères), des agents anti-corrosion et des correcteurs de pH, afin de maintenir les conditions optimales de fonctionnement du générateur de vapeur.

1.4.6.2 – Conditionnement des circuits de refroidissement

Les circuits de refroidissement ouverts font l'objet d'un traitement combiné anti-tartre, anti-corrosion et biocide, destiné à limiter simultanément l'entartrage, la corrosion et le développement microbiologique favorisé par le contact continu avec l'atmosphère.

1.5 – Normes et critères de qualité applicables aux eaux industrielles

1.5.1 – Normes internationales de qualité de l'eau industrielle

1.5.1.1 – Critères de qualité pour l'eau d'alimentation chaudière

Les référentiels internationaux (normes ASME, VGB, ABMA notamment) fixent des limites très strictes de dureté, de conductivité, de silice et d'oxygène dissous, d'autant plus sévères que la pression de service de la chaudière est élevée.

1.5.1.3 – Critères de qualité pour l'eau de procédé

Les critères applicables à l'eau de procédé varient selon la réaction ou l'unité concernée et sont généralement fixés par les concepteurs des unités (licenciés de procédé) dans les fiches techniques des équipements.

1.5.2 – Réglementation algérienne applicable

La réglementation algérienne encadre la qualité des eaux utilisées et rejetées à travers plusieurs textes relatifs à la protection des ressources en eau et à la limitation des rejets

industriels, auxquels les complexes tels que Fertial doivent se conformer, en complément de leurs propres spécifications internes de procédé

1.6 – Méthodes d'évaluation de l'efficacité d'un procédé de traitement

1.6.1 – Taux d'abattement et rendement d'élimination

Le taux d'abattement, calculé comme la variation relative de concentration d'un paramètre entre l'entrée et la sortie d'une étape ou de la filière complète, constitue l'indicateur de référence pour comparer l'efficacité des différents traitements.

1.6.2 – Indice de Langelier

Déjà présenté au paragraphe 1.3.3.3, l'indice de Langelier permet également d'évaluer, après traitement, si l'eau produite reste dans une plage non entartrante et non agressive vis-à-vis des matériaux du circuit.

1.6.3 – Facteur de concentration pour les circuits de refroidissement

Le facteur de concentration, rapport entre la teneur en sels du circuit et celle de l'eau d'appoint, permet de piloter les purges nécessaires pour maintenir la qualité de l'eau de refroidissement dans les limites acceptables.

Conclusion

Cette synthèse bibliographique a permis de situer les enjeux liés à la ressource en eau et à ses usages industriels, de détailler les paramètres physico-chimiques qui définissent sa qualité, et de présenter les principaux procédés mobilisés pour la traiter, du prétraitement à la déminéralisation. Elle constitue le socle théorique nécessaire à la compréhension de la filière de traitement de l'Utilité 50 I du complexe Fertial, qui sera décrite en détail dans le chapitre suivant, ainsi qu'à l'interprétation des résultats expérimentaux présentés au chapitre 4.

CHAPITRE II

PRÉSENTATION DU COMPLEXE FERTIAL

Introduction

Ce chapitre présente le cadre général dans lequel s'inscrit ce travail. Il décrit d'abord le complexe industriel Fertial d'Arzew, son historique, sa situation géographique et ses principales unités de production, avant de resituer la place qu'occupent les utilités, et en particulier l'Utilité 50 I, dans le fonctionnement de l'ensemble du site. La filière de traitement de l'eau mise en œuvre au sein de cette utilité est ensuite détaillée, de la prise d'eau de mer jusqu'à la production d'eau déminéralisée, ainsi que les principaux problèmes susceptibles d'en altérer la qualité. Le chapitre se termine par une présentation du laboratoire de contrôle qui assure le suivi analytique de cette filière.

2.1. Présentation du complexe Fertial

2.1.1. Historique et localisation

La réalisation du complexe industriel de production d'ammoniac (NH_3), d'acide nitrique (HNO_3), de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) et d'urée a été confiée le 28 juillet 1966 par Sonatrach au groupe français Technip-Enia, auquel la société Chemico avait fourni les procédés. Le chantier a démarré officiellement le 9 juillet 1967, la mise en route du complexe a eu lieu en mars 1969 et l'inauguration a été prononcée le 19 juin 1970 par le président Houari Boumediene. Face à l'augmentation constante des besoins nationaux en engrais, de nouvelles unités ont ensuite été mises en service : la société française Creusot-Loire Entreprise a réalisé une unité d'ammoniac selon le procédé Kellogg, tandis que la société autrichienne Voest-Alpine a réalisé deux unités d'acide nitrique, deux unités de nitrate d'ammonium et deux unités d'utilités.

En 1984, la restructuration de Sonatrach a donné naissance à treize entreprises, dont l'entreprise nationale des engrais et des produits phytosanitaires Asmidal, qui a repris le complexe d'ammoniac et d'engrais azotés d'Arzew. Au début de l'année 2005, deux filiales publiques d'Asmidal, Alzofert et Fertial, ont fusionné pour donner naissance à la société Fertial ; le 4 août de la même année, l'entreprise a été privatisée au profit du groupe espagnol Villar Mir, qui détient 66 % des actions à travers une augmentation de capital.

Le complexe Fertial est implanté au bord de la mer, sur la plate-forme industrielle d'Arzew, à environ 40 km à l'ouest d'Oran, 3 km à l'est d'Arzew et 4 km à l'ouest de Bethioua.

Cette position littorale n'est pas fortuite : elle permet au complexe de puiser directement l'eau de mer nécessaire à ses procédés et à son refroidissement, ce qui explique en grande partie l'organisation de ses installations d'utilités.



Figure 2.1 : Vue du complexe industriel Fertial (Arzew)

2.1.2. Activités du complexe

Fertial a été conçu pour répondre à trois objectifs essentiels : valoriser localement les hydrocarbures, dégager un surplus exportable d'engrais et d'ammoniac, et satisfaire la demande nationale en engrais azotés. Pour atteindre ces objectifs, le complexe regroupe des unités de production, des unités de stockage et de conditionnement, ainsi que des installations d'utilités et un laboratoire de contrôle qui assure le suivi de la qualité tout au long du procédé.

2.1.3. Principales unités de production

Le complexe Fertial est organisé autour de trois grandes filières de production, appuyées par des unités connexes :

- Production d'ammoniac (U10 I et U10 II) : deux unités d'une capacité de 1000 tonnes/jour chacune, fonctionnant respectivement selon les procédés Chemico et Kellogg ;
- Production d'acide nitrique (U20 II A/B) : trois unités fonctionnant selon le procédé Chemico, d'une capacité de 400 tonnes/jour par unité ;

- Production de nitrate d'ammonium (U30 II A/B) : unités fonctionnant selon le procédé Chemico, d'une capacité de 500 tonnes/jour par unité, l'unité U30 I étant à l'arrêt définitif ;
- Utilités (U50 I, U50 II, U50 III) : traitement de l'eau de mer, production d'eau distillée et de vapeur d'eau ;
- Unité de pompage d'eau de mer (U90), groupe turbo-alternateur pour la production d'énergie électrique, unités de stockage et de conditionnement des engrais (U70) et centre de stockage d'ammoniac (U80).



Figure 2.2 : Installations de production du complexe Fertial

2.1.4. Importance des utilités dans le fonctionnement du complexe

L'eau occupe une place centrale dans le fonctionnement de Fertial : elle intervient directement dans les procédés de fabrication de l'ammoniac, de l'acide nitrique et du nitrate d'ammonium, et sert également d'agent d'échange thermique pour le refroidissement des installations. Compte tenu de l'importance de cette consommation, le complexe a été implanté en bord de mer afin de disposer d'une ressource abondante, traitée sur place avant utilisation. Les utilités U50 I, U50 II et U50 III assurent ce traitement, qui comprend la distillation, la déminéralisation, le dégazage ainsi que la production de vapeur nécessaire à la production d'énergie électrique. Sans le fonctionnement continu et la qualité constante de l'eau produite

par ces utilités, aucune des unités de production ne pourrait fonctionner de manière fiable, ce qui justifie l'attention particulière portée dans ce travail à l'Utilité 50 I.

2.2. Présentation de l'Utilité 50 I

2.2.1. Rôle de l'Utilité 50 I

L'Utilité 50 I a pour mission de transformer l'eau de mer brute prélevée au niveau de l'unité de pompage (U90) en eau distillée puis en eau déminéralisée, répondant aux exigences de qualité des différents consommateurs internes du complexe. L'eau ainsi produite alimente notamment les chaudières de production de vapeur, les circuits de refroidissement et certaines étapes des procédés de fabrication d'ammoniac, d'acide nitrique et de nitrate d'ammonium. L'Utilité 50 I constitue donc un maillon indispensable entre la ressource brute disponible en mer et les besoins en eau de procédé du complexe.

2.2.2. Origine et nature de l'eau traitée

L'eau traitée à l'Utilité 50 I provient de la mer, prélevée au niveau du bassin d'eau de mer alimenté par l'unité de pompage U90. Cette eau brute présente une charge saline importante, caractéristique du milieu marin, avec notamment une teneur notable en calcium, en magnésium, en potassium, en chlorures et en bicarbonates. Cette composition minérale impose un traitement en plusieurs étapes, combinant dessalement et déminéralisation, avant que l'eau ne puisse être utilisée dans les circuits sensibles du complexe, en particulier ceux liés à la production de vapeur haute pression.

2.2.3. Schéma général du traitement de l'eau

Le traitement mis en œuvre à l'Utilité 50 I suit une filière linéaire, dans laquelle l'eau de mer subit des transformations successives : un prétraitement qui élimine les matières en suspension et limite le développement biologique, un pompage vers les installations de traitement, un dessalement par distillation qui sépare l'eau des sels dissous, une déminéralisation qui élimine les traces d'ions résiduels, puis un conditionnement final avant stockage et distribution vers les utilisateurs internes. Chaque étape conditionne la qualité de l'eau obtenue à l'étape suivante, ce qui rend le suivi analytique réalisé par le laboratoire indispensable tout au long de la chaîne.

2.2.4. Principaux équipements de traitement

La filière de l'Utilité 50 I repose sur un ensemble d'équipements complémentaires : des filtres et bacs de décantation pour le prétraitement, des pompes de reprise et de transfert, des évaporateurs et distillateurs assurant le dessalement de l'eau de mer, des colonnes échangeuses d'ions (cationiques et anioniques) pour la déminéralisation, des dégazeurs thermiques, ainsi que des bacs de stockage d'eau distillée et d'eau déminéralisée. Des points de contrôle sont répartis tout au long de cette chaîne afin de permettre le prélèvement régulier d'échantillons destinés au laboratoire.

2.3. traitement de l'eau

2.3.1. Prétraitement de l'eau

L'eau de mer brute est d'abord soumise à un prétraitement destiné à éliminer les matières en suspension, les débris et les micro-organismes susceptibles d'encrasser ou de dégrader les équipements situés en aval. Cette étape associe généralement une filtration mécanique et une chloration modérée, avant que l'eau ne soit dirigée vers les installations de dessalement proprement dites.

2.3.2. Pompage et alimentation de l'installation

L'alimentation en eau de mer de l'Utilité 50 I est assurée par l'unité de pompage U90, qui refoule l'eau prélevée en mer vers le bassin de stockage puis vers les installations de traitement. Des pompes de reprise assurent ensuite le transfert de l'eau prétraitée vers les unités de dessalement, en garantissant un débit et une pression compatibles avec le fonctionnement continu de la chaîne.

2.3.3. Dessalement - distillation

Le dessalement constitue l'étape centrale du traitement : l'eau de mer prétraitée est chauffée puis évaporée, la vapeur produite étant ensuite condensée pour obtenir une eau distillée débarrassée de l'essentiel des sels dissous. Ce procédé permet d'abaisser fortement la teneur en chlorures et en éléments minéraux dissous, tout en laissant subsister une faible minéralisation résiduelle que la déminéralisation vient ensuite éliminer.

2.3.4. Déminéralisation

L'eau distillée obtenue est ensuite déminéralisée par passage sur des résines échangeuses d'ions, qui retiennent les cations et les anions résiduels pour produire une eau de très faible conductivité, adaptée aux exigences des circuits de vapeur haute pression. Ces résines doivent faire l'objet d'une régénération périodique, sous peine de percée qui se traduit par une remontée de la conductivité de l'eau produite.

2.3.5. Traitement et conditionnement de l'eau

Avant sa mise en stockage, l'eau déminéralisée est conditionnée : dégazage thermique pour éliminer l'oxygène et le gaz carbonique dissous, ajustement du pH et, selon les besoins, addition de réactifs anti-tartre ou anti-corrosion. Ce conditionnement vise à limiter les phénomènes d'entartrage et de corrosion décrits plus loin, en stabilisant la qualité de l'eau jusqu'à son utilisation.

2.3.6. Production et utilisation de l'eau traitée

L'eau distillée et l'eau déminéralisée produites par l'Utilité 50 I sont stockées dans des bacs dédiés avant d'être distribuées vers les principaux consommateurs du complexe : les chaudières de production de vapeur, les circuits d'appoint des unités d'ammoniac, d'acide nitrique et de nitrate d'ammonium, ainsi que le groupe turbo-alternateur. La régularité et la qualité de cette production conditionnent directement la disponibilité et la fiabilité de l'ensemble des unités de production du complexe.

2.4. Principaux problèmes pouvant affecter la qualité de l'eau

Malgré le traitement mis en œuvre, la qualité de l'eau produite par l'Utilité 50 I reste exposée à plusieurs risques, résumés dans le tableau suivant :

Tableau Principaux problèmes pouvant affecter la qualité de l'eau

Problème	Origine principale	Conséquence sur l'installation
Entartrage	Dureté calcique et magnésienne résiduelle, précipitation de carbonates et de sulfates	Dépôts sur les surfaces d'échange, perte de rendement thermique, réduction de section de passage
Corrosion	Oxygène dissous, gaz carbonique, pH mal ajusté, faible teneur en inhibiteurs	Amincissement des parois, piqûres, fuites, contamination du circuit par les produits de corrosion
Présence de silice	Silice dissoute ou colloïdale non retenue par la déminéralisation	Dépôts silicatés durs sur les aubages de turbines et les surfaces de chauffe haute pression
Augmentation de la conductivité	Percée ou saturation des résines échangeuses d'ions, fuite au niveau des échangeurs	Dégradation de la qualité de l'eau déminéralisée, risque pour les circuits vapeur
Mauvaise utilisation ou insuffisance des réactifs	Dosage non maîtrisé des produits anti-tartre, anti-corrosion ou de neutralisation	Cumul des effets précédents, instabilité de la qualité de l'eau traitée

2.4.1. Entartrage

L'entartrage résulte de la précipitation des sels de calcium et de magnésium encore présents dans l'eau, sous forme de dépôts durs sur les surfaces d'échange thermique. Ce phénomène réduit progressivement les coefficients de transfert de chaleur et peut, à terme, obstruer certaines sections des circuits concernés.

2.4.2. Corrosion

La corrosion des circuits est favorisée par la présence d'oxygène dissous, de gaz carbonique et par un pH mal maîtrisé. Elle se traduit par un amincissement progressif des parois métalliques, des piqûres localisées et, dans les cas les plus avancés, par des fuites qui compromettent l'intégrité des installations.

2.4.3. Présence de silice

La silice, dissoute ou colloïdale, n'est que partiellement retenue par les étapes de dessalement et de déminéralisation. Lorsqu'elle subsiste en quantité excessive, elle forme des

dépôts durs particulièrement difficiles à éliminer, notamment sur les aubages des turbines et les surfaces de chauffe des générateurs de vapeur haute pression.

2.4.4. Augmentation de la conductivité

Une hausse anormale de la conductivité de l'eau déminéralisée traduit généralement une percée ou une saturation des résines échangeuses d'ions, ou encore une fuite au niveau d'un échangeur. Ce paramètre constitue de ce fait un indicateur précoce de dérive de la qualité de l'eau, suivi de façon régulière par le laboratoire.

2.4.5. Mauvaise utilisation ou insuffisance des produits de traitement

Un dosage mal maîtrisé des réactifs de conditionnement, qu'il s'agisse des produits anti-tartre, anti-corrosion ou de neutralisation, peut à lui seul aggraver l'ensemble des phénomènes précédents. Un suivi rigoureux des consommations et des concentrations de ces produits est donc nécessaire pour garantir l'efficacité du traitement.

2.5. Laboratoire et contrôle de la qualité

2.5.1. Présentation du laboratoire

Le laboratoire de contrôle du complexe Fertial assure le suivi analytique de l'ensemble des étapes du procédé, depuis les matières premières jusqu'aux produits finis, en passant par les eaux de procédé issues des différentes utilités. Il occupe une place centrale dans la démarche qualité du complexe, en fournissant aux unités de production les données nécessaires au pilotage de leurs installations.



Figure 2.3 : Vue du laboratoire de contrôle du complexe Fertial

2.5.2. Équipements disponibles

Le laboratoire dispose d'un ensemble d'appareils permettant de couvrir les principales analyses physico-chimiques réalisées sur l'eau et sur les produits du complexe : conductimètre et pH-mètre pour le contrôle courant de l'eau déminéralisée, spectrophotomètres (notamment de type DR 2800, DR 2010 et Camspec M107) pour le dosage colorimétrique des ions, distillateur semi-automatique pour la détermination de l'azote par la méthode Kjeldahl, digesteur pour la minéralisation des échantillons, ainsi qu'une balance de précision et un appareil de détermination de l'humidité.



Figure 2.5 : multimètre au niveau de laboratoire de contrôle



Figure 2.6 : Spectrophotomètre utilisé pour le dosage colorimétrique



Figure 2.7 : Distillateur semi-automatique (méthode Kjeldahl)



Figure 2.8 : Digesteur pour la minéralisation des échantillons



Figure 2.9 : Balance de précision du laboratoire



Figure 2.10 : Appareil de détermination de l'humidité

2.5.3. Méthodes d'analyse utilisées

Les méthodes appliquées au laboratoire combinent des techniques volumétriques, électrométriques et spectrophotométriques. La conductivité et le pH de l'eau déminéralisée sont mesurés par méthode électrométrique, à l'aide de conductimètres et de pH-mètres préalablement étalonnés. Les teneurs en chlorures, en ammonium, en nitrates et en nitrites font l'objet de dosages volumétriques ou colorimétriques spécifiques. La silice, les phosphates, le cuivre et le fer sont déterminés par spectrophotométrie d'absorption moléculaire, sur la base de la loi de Lambert-Beer, tandis que l'azote total est dosé par la méthode Kjeldahl. Les matières en suspension sont quant à elles déterminées par filtration et pesée différentielle.

2.5.4. Points de prélèvement

Les échantillons sont prélevés à différents points caractéristiques de la filière : au niveau des bacs de stockage des utilités, en sortie des ballons de déminéralisation des utilités 1 et 2, ainsi qu'aux points d'alimentation des principales unités consommatrices. Ces prélèvements sont réalisés dans des flacons en polyéthylène préalablement rincés, transportés rapidement au laboratoire afin de limiter toute altération des paramètres mesurés, en particulier le pH et la teneur en gaz dissous.

Conclusion

Ce chapitre a permis de situer le complexe Fertial dans son contexte historique et géographique, de présenter ses principales unités de production et de mettre en évidence le rôle central que jouent les utilités, et plus particulièrement l'Utilité 50 I, dans l'alimentation en eau traitée de l'ensemble du site. La description de la filière de traitement, des principaux problèmes susceptibles d'en affecter la qualité et du laboratoire chargé de son contrôle constitue le cadre nécessaire à l'analyse des résultats qui sera développée dans les chapitres

Chapitre III — Matériels et méthodes

Introduction

Le présent chapitre décrit la méthodologie adoptée pour mener à bien l'évaluation de la performance de l'Utilité 50 I du complexe Fertial. Pour atteindre les objectifs fixés, une démarche expérimentale rigoureuse a été mise en place, allant de la stratégie de prélèvement jusqu'au traitement statistique et mathématique des données. Cette approche permet de caractériser l'eau à différentes étapes de la chaîne de traitement, d'identifier les paramètres physico-chimiques clés et d'analyser l'efficacité des procédés de purification mis en œuvre au sein du complexe.

3.1. Stratégie expérimentale:

La mise en place d'une campagne analytique au sein d'une infrastructure industrielle telle que l'Utilité 50 I nécessite une organisation méthodique afin de garantir la fiabilité, la représentativité et l'exploitabilité des données recueillies.

3.1.1. Objectifs de la campagne analytique

La campagne analytique menée dans le cadre de cette étude répond à plusieurs objectifs précis :

- Évaluer la qualité de l'eau brute entrant dans l'unité de traitement afin de cerner sa variabilité et ses caractéristiques initiales.
- Suivre l'évolution des paramètres physico-chimiques tout au long de la chaîne de traitement (prétraitement, dessalement, déminéralisation).
- Déterminer l'efficacité épuratoire des différentes étapes en calculant les rendements d'élimination des polluants et des ions indésirables (silice, dureté, chlorures, etc.).
- Vérifier la conformité de l'eau traitée par rapport aux spécifications strictes requises par les procédés industriels du complexe Fertial.

3.1.2. Choix des points de prélèvement

Le choix des points de prélèvement est stratégique : il doit refléter fidèlement le parcours de l'eau au sein de l'Utilité 50 I. Les échantillons sont prélevés à des endroits clés :

- À l'entrée de l'unité (Eau brute / d'alimentation) : pour caractériser l'eau avant tout traitement et identifier la charge polluante initiale.
- Après les étapes intermédiaires (Prétraitement et dessalement) : pour évaluer l'abattement partiel des matières en suspension, des sels dissous et de la dureté.
- À la sortie de l'unité (Eau déminéralisée / traitée) : pour contrôler la qualité finale de l'eau avant son acheminement vers les chaudières et les unités de production de Fertial.

3.1.3. Organisation des analyses

L'organisation des analyses s'articule autour d'une routine bien établie au laboratoire du complexe. Elle combine :

- Des mesures in situ pour les paramètres instables (pH, température, conductivité).
- Des analyses en laboratoire nécessitant des réactifs chimiques et des instruments de mesure étalonnés (titrimétrie, spectrophotométrie).
- Un suivi temporel permettant de croiser les données de production avec les variations de qualité observées.

3.2. Prélèvement et conservation des échantillons :

La fiabilité des résultats analytiques dépend en grande partie de la rigueur avec laquelle les échantillons sont prélevés, transportés et conservés. Toute altération de l'échantillon entre le moment du prélèvement et son analyse au laboratoire pourrait fausser l'évaluation de la performance de l'Utilité 50 I.

3.2.1. Matériel de prélèvement

Pour garantir l'intégrité des échantillons d'eau et éviter toute contamination ou interaction avec les contenants, le matériel suivant a été rigoureusement sélectionné :

- Flacons de prélèvement : Utilisation de flacons en polyéthylène haute densité (PEHD) ou en verre borosilicaté, préalablement nettoyés, rincés à l'eau distillée et conditionnés selon les normes en vigueur.
- Dispositifs de purge : Vannes et robinets de prélèvement dédiés sur les lignes de l'unité, permettant d'éliminer l'eau stagnante avant de recueillir l'échantillon représentatif.
- Équipements de protection et de sécurité : Gants, lunettes de protection et équipements adaptés pour manipuler l'eau en milieu industriel en toute sécurité.

3.2.2. Procédure de prélèvement

La procédure de prélèvement s'est déroulée selon un protocole standardisé :

1. **Purge de la conduite :** Laisser couler l'eau pendant 2 à 3 minutes au niveau du point de prélèvement pour purger la canalisation et s'assurer de prélever un échantillon directement issu du flux en circulation.
2. **Rinçage du flacon :** Rincer le flacon de prélèvement et son bouchon deux à trois fois avec l'eau à analyser.
3. **Remplissage :** Remplir le flacon jusqu'à ras bord pour minimiser l'espace de tête (volume d'air résiduel), limitant ainsi les échanges gazeux (notamment le dioxyde de carbone pouvant influencer le pH), puis fermer hermétiquement.
4. **Étiquetage :** Identifier immédiatement chaque flacon de manière claire (date, heure, point de prélèvement, nature de l'eau).

3.2.3. Conditions de conservation

Les échantillons prélevés ont été acheminés dans les plus brefs délais vers le laboratoire du complexe Fertial. Lorsque l'analyse immédiate n'était pas possible, les conditions de conservation suivantes ont été respectées :

- **Température :** Stockage des flacons dans une glacière ou un réfrigérateur à une température avoisinant les 4 °C pour ralentir toute activité biologique ou réaction chimique indésirable.
- **Protection contre la lumière :** Utilisation de flacons opaques ou protection des échantillons contre les rayons solaires directs pour éviter la photodégradation de certains composés.
- **Délais d'analyse :** Respect des délais maximaux recommandés entre le prélèvement et l'analyse pour chaque paramètre physico-chimique afin de garantir l'exactitude des mesures.

3.2.4. Fréquence des prélèvements

La fréquence des prélèvements a été planifiée pour capturer la dynamique de fonctionnement de l'Utilité 50 I :

- **Prélèvements réguliers (quotidiens/hebdomadaires) :** Assurant un suivi de routine de la qualité de l'eau brute et de l'eau traitée.

- **Prélèvements ciblés :** Réalisés lors de situations particulières ou pour valider l'impact de variations opérationnelles sur la chaîne de traitement

3.3. Analyses physico-chimiques

Pour évaluer la qualité de l'eau et l'efficacité de la chaîne de traitement de l'Utilité 50 I, une batterie complète d'analyses physico-chimiques a été réalisée. Conformément aux méthodes standardisées, cette campagne s'appuie sur des mesures in situ, de la titrimétrie, des méthodes gravimétriques, des techniques colorimétriques/spectrophotométriques ainsi que **sur des calculs dérivés.**

3.3.1. Mesure de pH

Le pH (potentiel hydrogène) indique le caractère acide, neutre ou basique de l'eau. Sa mesure est primordiale pour prévenir les risques de corrosion ou d'entartrage dans les équipements.

- **Méthode :** Mesure in situ ou au laboratoire par potentiométrie à l'aide d'un pH-mètre étalonné avec des solutions tampons (pH 4,01, 7,00 et 10,01).

3.3.2. Mesure de la conductivité électrique

La conductivité traduit la capacité de l'eau à conduire le courant électrique, ce qui reflète directement la concentration totale inions dissous (sels minéraux).

- **Méthode :** Utilisation d'un conductimètre étalonné avec une solution de référence de chlorure de potassium permettant d'exprimer les résultats en micro-siemens par centimètre ($\mu S/cm$) à une température de référence de 25 °C.

3.3.3. Mesure de la turbidité

La turbidité mesure la présence de matières en suspension (argile, limon, micro-organismes) qui troublent l'eau.

- **Méthode :** Analyse par néphélométrie, mesurant l'intensité de la lumière dispersée à 90° par les particules en suspension dans l'échantillon.

3.3.4. Dosage des chlorures

Les ions chlorure sont des indicateurs majeurs de la salinité et peuvent accentuer fortement les phénomènes de corrosion des métaux.

- **Méthode :** Dosage volumétrique par titrimétrie (méthode de Mohr), consistant à titrer les ions chlorure par une solution standard de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium comme indicateur de fin de réaction.

3.3.5. Détermination de la dureté

La dureté (titre hydrotimétrique) représente la concentration totale en ions calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+}, principaux responsables est l'entartrage thermique.

- **Méthode :** Dosage complexométrique par titrage à l'aide d'une solution d'EDTA (acide éthylène-diamine-tétraacétique) en milieu tamponné (pH 10), en présence d'un indicateur coloré (le noir de ériochrome T).

3.3.6. Détermination de l'alcalinité

L'alcalinité correspond à la teneur inions bicarbonates carbonates renseignant sur le pouvoir tampon de l'eau.

- **Méthode :** Titrage acido-basique par l'acide chlorhydrique de normalité connue, en présence d'indicateurs colorés appropriés (phénolphtaléine et hélianthine) pour déterminer le TAC (Titre Alcalimétrique Complet).

3.3.7. Dosage la longer de silice

La longer de silice dissoute ou colloïdale est un paramètre critique dans l'eau d'alimentation des chaudières haute pression en raison de son risque de dépôt sur les aubes de turbines.

- **Méthode :** Méthode colorimétrique/spectrophotométrique. La silice réagit avec le molybdate d'ammonium en milieu acide pour former un complexe silicomolybdique de couleur jaune, dont l'absorbance est mesurée à une longueur d'onde spécifique.

3.3.8. Dosage du fer

La présence de fer dans l'eau témoigne soit de la corrosion des canalisations en amont, soit d'un dysfonctionnement des filtres.

- **Méthode :** Dosage par spectrophotométrie UV-Visible, basé sur la formation d'un complexe coloré entre le fer ferreux et un réactif spécifique (comme la phénanthroline).

3.3.9. Dosage des nitrates et nitrites

Ces ions azotés proviennent généralement de pollutions organiques ou d'un déséquilibre biologique du milieu d'origine.

- **Méthode :** Méthodes colorimétriques adaptées sur spectrophotomètre UV-Visible à l'aide de réactifs spécifiques.

3.3.10. Autres paramètres disponibles au laboratoire

D'autres analyses complémentaires (telles que les sulfates, les phosphates ou les matières en suspension) peuvent être réalisées ponctuellement au laboratoire selon les besoins spécifiques du complexe Fertial, en combinant des méthodes tétramétriques, gravimétriques et spectrophotométriques

3.4. Matériels et équipements utilisés

Pour mener à bien la campagne analytique et l'évaluation de la qualité de l'eau au sein du laboratoire du complexe Fertial, un ensemble d'instruments de mesure, de réactifs et de verrerie de laboratoire a été utilisé :

3.4.1. pH-mètre et système électrochimique

Instrument potentiométrique muni d'une électrode combinée sensible aux ions H^+ et étalonné à l'aide de solutions tampons certifiées. Il a permis d'effectuer les mesures de pH des échantillons d'eau afin d'évaluer le caractère acide ou basique du milieu. Pour ce faire, le laboratoire s'appuie sur un équipement de pointe de marque **Metrohm** :

- **Le module pH / Ion-mètre (Modèle Metrohm 867 pH Module) :** Situé sur la partie gauche de l'appareil, ce boîtier électronique gère l'acquisition des mesures électrochimiques (notamment le pH et le potentiel redox). Il est relié à un écran ou un terminal de commande, permettant de suivre en temps réel les courbes de titrage ou les valeurs numériques.
- **L'agitateur magnétique intégré (Modèle Metrohm 801 Stirrer) :** Situé sur la partie droite, ce socle intègre un système d'agitation magnétique. Il supporte un bécher contenant la solution à analyser dans lequel plonge une électrode combinée. L'utilisation de cet agitateur garantit l'homogénéité instantanée de la solution lors des dosages acido-basiques ou des mesures de pH, assurant ainsi une excellente reproductibilité et une grande fiabilité des résultats.
- **La potence et la tête de support :** La tige métallique verticale et la tête de fixation permettent de maintenir fermement l'électrode et les éventuelles burettes ou canules de distribution de réactifs au-dessus du bécher d'échantillon, stabilisant l'ensemble du dispositif pendant les manipulations.

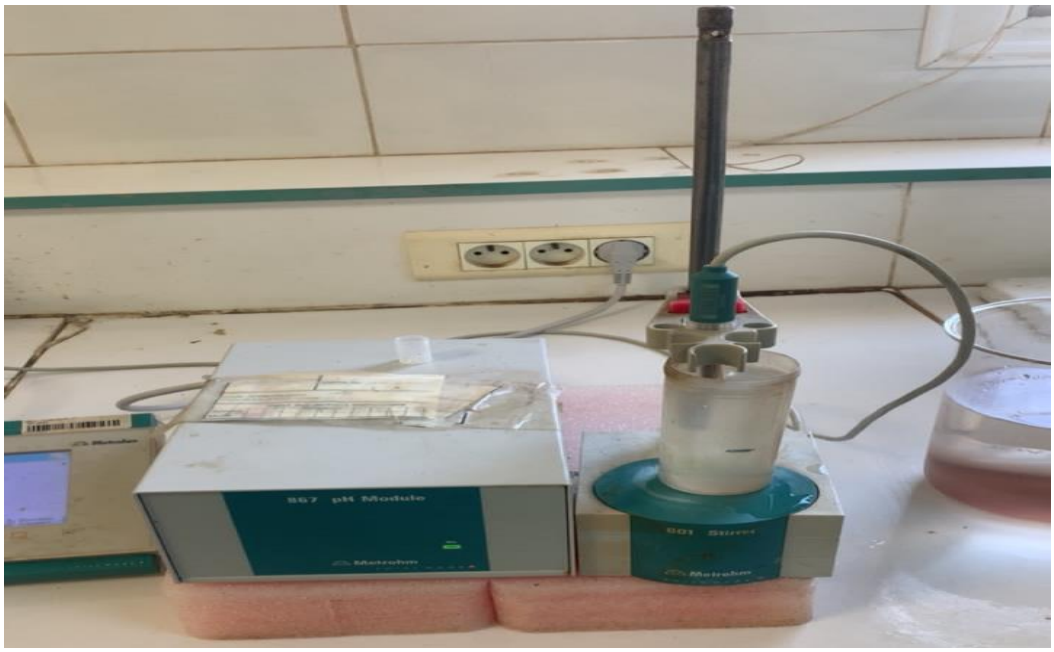


FIGURE 3.1. Titrage pH-métrique

3.4.2. Conductimètre :

Appareil équipé d'une cellule de mesure étalonnée avec une solution de référence de chlorure de potassium Il a été utilisé pour déterminer la conductivité électrique, traduisant directement la concentration globale en sels dissous dans l'eau.



FIGURE 3.2 : Titrage conductimétrique

Cette photographie présente le module utilisé pour la mesure de la conductivité électrique, de marque **Metrohm** :

- **Le module de conductivité (Modèle Metrohm 856 Conductivity Module) :** Situé sur la partie gauche, ce boîtier électronique spécialisé est dédié à l'acquisition et au traitement des mesures de conductivité et de résistivité des échantillons d'eau. Il permet de quantifier avec une grande précision la concentration globale en sels dissous.
- **L'agitateur magnétique associé (Modèle Metrohm 801 Stirrer) et la potence :** À l'instar du montage précédent, le module est couplé à un support d'agitation magnétique et à une tige verticale permettant de maintenir la cellule de mesure de conductivité plongée de manière stable dans l'échantillon, garantissant ainsi l'homogénéité de la solution pendant les analyses.

3.4.3. Spectrophotomètre UV-Visible : Appareil optique indispensable pour les analyses colorimétriques et spectrophotométriques (notamment pour le dosage des phosphates et de la silice). Comme l'illustrent les manipulations en laboratoire, l'utilisation de réactifs spécifiques tels que le **molybdate d'ammonium à 2,5 %** et l'acide **amino-naphtol-sulfonique** (contenus dans les flacons de réactifs de la paillasse) provoque des réactions chimiques au sein des **fioles jaugées de 100 mL**. Ces réactions se traduisent par un développement colorimétrique progressif, allant d'une teinte claire initiale jusqu'à l'obtention d'une **coloration bleu foncé / noire caractéristique** dont l'absorbance est mesurée pour quantifier l'élément recherché.

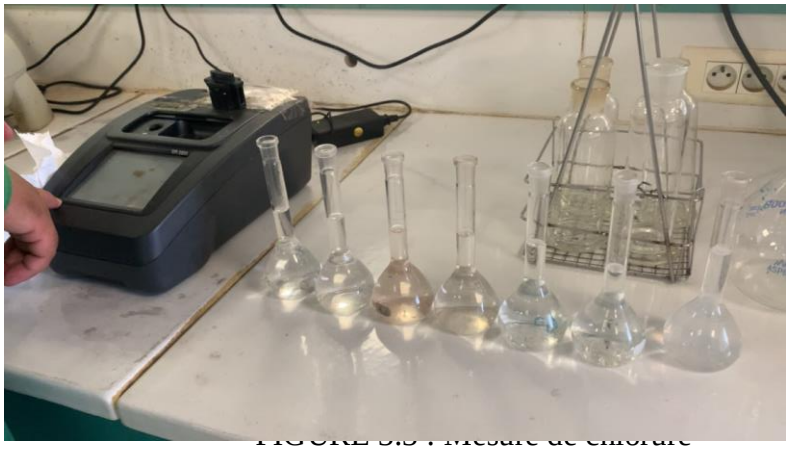


FIGURE 3.3 : Mesure de chlorure

3.4.4. Matériel de titrage

Composé de burettes graduées de précision, de pipettes jaugées et d'agitateurs, ce matériel a été consacré aux méthodes volumétriques et titrimétriques. Il a permis de réaliser les dosages des ions chlorures (par la méthode de Mohr) et la détermination de la dureté totale par complexométrie à l'aide d'une solution d'EDTA.

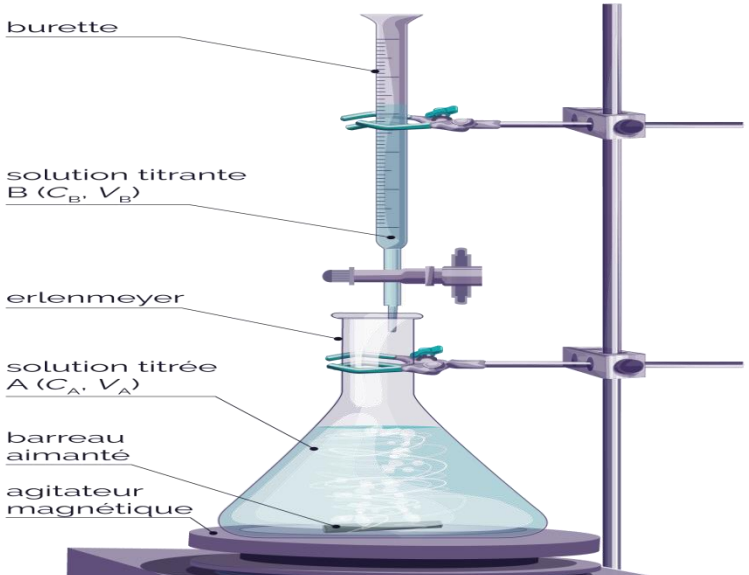


FIGURE 3.4 : Montage de titrage

La burette graduée : Maintenue verticalement par une potence, elle contient la solution titrante et permet un écoulement maîtrisé et précis goutte à goutte du réactif.

L'erlenmeyer : Placé sous la burette, il contient la solution à titrer (de volume et de concentration ainsi qu'un indicateur coloré adapté.

L'agitateur magnétique et le barreau aimanté : Disposés sous l'erlenmeyer, ils assurent une agitation homogène et continue du mélange réactionnel tout au long du dosage jusqu'à l'atteinte du point d'équivalence.

Ce matériel a permis de réaliser les dosages spécifiques au laboratoire, tels que le dosage des chlorures (méthode de Mohr) et la détermination de la dureté totale par complexométrie (EDTA).

3.4.5. Matériel de prélèvement

Constitué de flacons de prélèvement adaptés (en polyéthylène haute densité et flacons spécifiques visibles sur la paillasse du laboratoire), de dispositifs de purge et de pissettes de rinçage. Ce matériel garantit l'acheminement sécurisé des échantillons d'eau depuis les différents points de l'Utilité 50 I jusqu'aux postes d'analyse sans risque de contamination extérieure.

3.5. Traitement des données

Pour exploiter l'ensemble des mesures recueillies lors de la campagne analytique et évaluer la performance de l'Utilité 50 I, plusieurs outils mathématiques, statistiques et graphiques ont été appliqués :

3.5.1. Calcul des concentrations

À partir des volumes équivalents mesurés lors des titrages, des masses pesées ou des absorbances lues au spectrophotomètre, les concentrations des différents éléments (chlorures, dureté, silice, etc.) ont été calculées en appliquant les formules stœchiométriques et les facteurs de dilution correspondants. Les résultats sont exprimés en unités adaptées (mg/L, µS/cm, ou unités pH).

3.5.2. Calcul du rendement d'élimination

Pour quantifier l'efficacité épuratoire des différentes étapes de traitement de l'unité, le rendement d'élimination (N) de chaque paramètre a été calculé selon la formule :

$$N\ (\%) = \frac{(C_e - C_s)}{C_e} \times 100\%$$

Où Ce : représente la concentration du paramètre dans l'eau brute et Cs : sa concentration dans l'eau après traitement.

3.5.3. Calcul des moyennes

Pour lisser la variabilité temporelle et obtenir une valeur représentative sur l'ensemble de la période d'étude, la moyenne arithmétique des séries de mesures a été calculée pour chaque point de prélèvement :

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Xi$$

3.5.4. Écart-type et coefficient de variation

Afin d'évaluer la dispersion des résultats analytiques autour de la moyenne et de juger de la stabilité du procédé de traitement, l'écart-type et le coefficient de variation ont été déterminés

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\Sigma(i = 1 \text{ à } n)(Xi - \bar{X})^2} \quad CV = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}}\right) \times 100\%$$

3.5.5. Comparaison des résultats aux spécifications

Les valeurs obtenues pour l'eau traitée ont été systématiquement comparées aux seuils limites et aux spécifications techniques requises par le complexe Fertial pour l'alimentation de ses équipements et chaudières, permettant ainsi de statuer immédiatement sur la conformité de l'eau produite.

3.5.6. Représentation graphique des résultats

L'évolution spatiale et temporelle des paramètres physico-chimiques, ainsi que les rendements d'élimination, ont été traduits sous forme de graphiques (histogrammes, courbes d'évolution) afin de faciliter l'interprétation critique des performances de l'Utilité 50 I dans le chapitre suivant.

Conclusion

Ce troisième chapitre a permis de définir l'ensemble de la méthodologie expérimentale et analytique retenue, depuis la stratégie rigoureuse de prélèvement jusqu'aux outils de traitement des données, en passant par la description détaillée du plateau technique du laboratoire de Fertial (pH-mètre Metrohm, conductimètre, spectrophotomètre et matériel de titrage). Cette démarche méthodologique constitue le socle indispensable pour aborder l'analyse et la discussion des résultats obtenus au sein du chapitre suivant.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus lors du suivi de la qualité de l'eau produite par les distillateurs SIDEM du complexe FERTIAL. L'étude a porté sur plusieurs paramètres physico-chimiques, notamment le pH, la conductivité électrique et la teneur en chlorures. Les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs de référence du design**,** afin d'évaluer la conformité et la stabilité du procédé de distillation.

Les prélèvements ont été réalisés durant la période allant du **01 - 15 janvier 2026**, sur les trois distillateurs étudiés : **SIDEM A, SIDEM B et SIDEM C**. L'analyse comparative permet d'identifier les éventuelles variations des paramètres étudiés et de mettre en évidence les anomalies pouvant affecter la qualité de l'eau produite et le fonctionnement des installations.

4.1. Caractérisation de l'eau avant traitement

L'évaluation de la qualité de l'eau a été réalisée à travers plusieurs paramètres physico-chimiques. Les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs prévues par les anciens et nouveaux designs des installations.

Pour le distillateur **SIDEM A**, les valeurs relevées au cours de la période d'étude sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau de L'évaluation de la qualité de l'eau a été réalisée à travers plusieurs paramètres physico-chimiques

Jour	PH	Conductivité (µS/cm)	Cl^- (mg/L)	NH_4 (mg/L)
2	7,20	12,80	1,60	<0,01
4	7,20	10,00	1,60	<0,01
6	7,20	12,00	1,20	<0,01
8	7,50	10,80	1,00	<0,01
10	7,60	13,30	2,40	<0,01
12	7,40	14,00	2,80	<0,01
14	7,60	9,20	1,70	<0,01

Les valeurs de référence indiquées par les designs sont :

Paramètre	Ancien design	Nouveau design
PH	6,50–7,20	6,50–8,20
Conductivité	0,30–10,00 µS/cm	0,30–15,00 µS/cm
Cl^-	0,00–1,00 mg/L	0,00–3,00 mg/L
NH_4	0,00–1,00 mg/L	0,00–1,00 mg/L

Ces résultats montrent que les paramètres étudiés présentent des variations au cours de la période de suivi. L'analyse détaillée de chaque paramètre permet de mieux apprécier la qualité de l'eau produite et le comportement des différents distillateurs.

4.1.1. Résultats du pH

Le pH constitue un paramètre important dans l'évaluation de la qualité de l'eau produite par le distillateur. Il permet de caractériser le degré d'acidité ou d'alcalinité de l'eau et de suivre la stabilité du procédé de distillation.

Pour le SIDEM A, les valeurs du pH enregistrées durant la période d'étude varient entre 7,20 et 7,60. Les valeurs de 7,20 sont observées aux jours 2, 4 et 6, puis le pH augmente progressivement pour atteindre 7,50 au jour 8, 7,60 au jour 10, 7,40 au jour 12 et 7,60 au jour 14.

La comparaison avec le nouveau design (6,50–8,20) montre que toutes les valeurs mesurées restent dans la plage de référence. Ainsi, malgré les légères fluctuations observées au cours de la période de suivi, le pH de l'eau produite par le SIDEM A demeure conforme aux spécifications du nouveau design.

En revanche, par rapport à l'ancien design, dont la limite supérieure est fixée à 7,20, les valeurs enregistrées à partir du jour 8 dépassent légèrement cette limite. Cette différence doit toutefois être interprétée en tenant compte du fait que le nouveau design élargit la plage admissible jusqu'à 8,20.

Tableau 4.3. Évolution du pH de l'eau produite par SIDEM A

jour	pH	Ancien design	Nouveau design	Conformité au nouveau design
2	7,20	6,50–7,20	6,50–8,20	Conforme
4	7,20	6,50–7,20	6,50–8,20	Conforme
6	7,20	6,50–7,20	6,50–8,20	Conforme
8	7,50	6,50–7,20	6,50–8,20	Conforme
10	7,60	6,50–7,20	6,50–8,20	Conforme
12	7,40	6,50–7,20	6,50–8,20	Conforme
14	7,60	6,50–7,20	6,50–8,20	Conforme

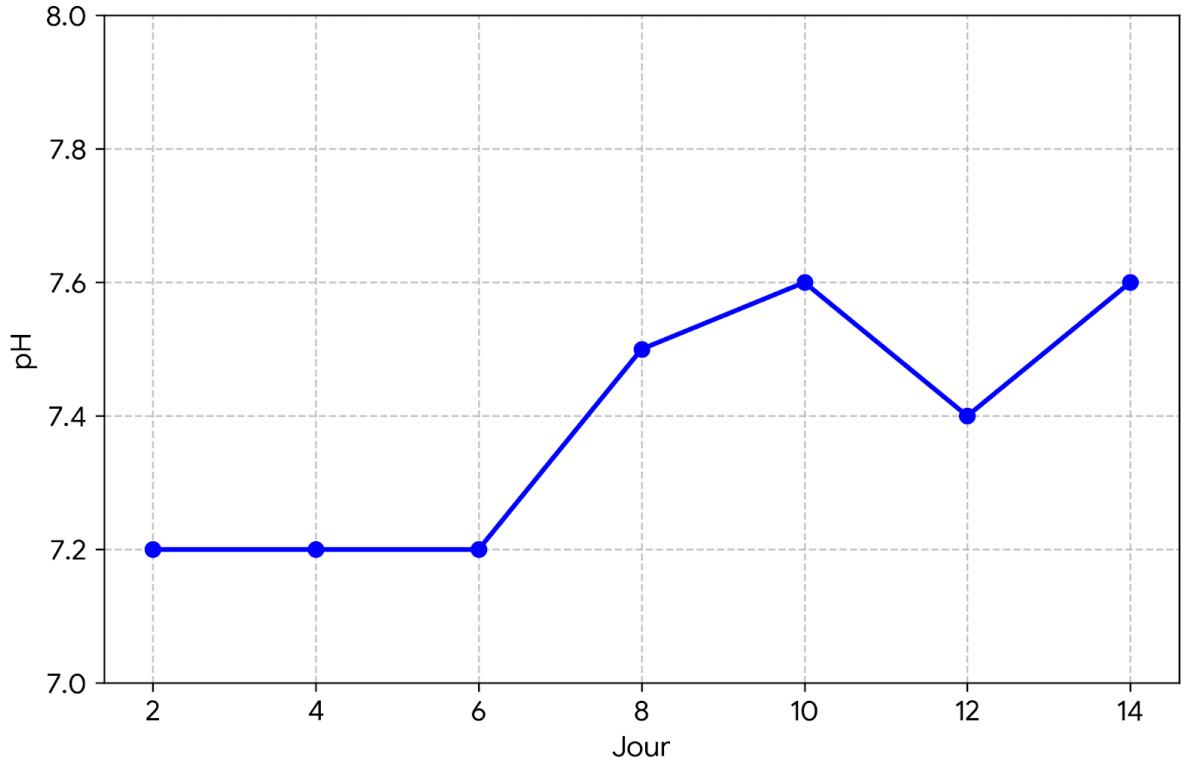


Figure 4.1. Evolution du pH en fonction du temps

Voici le graphique représentant l'évolution de ph en fonction du temps (en jours) d'après vos données :

- Du jour 2 au jour 6 : La valeur du pH est restée stable à 7,20.
- Du jour 6 au jour 10 : Le pH a augmenté progressivement pour atteindre un pic à 7,60.

- Du jour 10 au jour 14 : Le pH a légèrement baissé à 7,40 au douzième jour, avant de remonter pour s'établir à 7,60 au quatorzième jour

4.1.2. Résultats de la conductivité

La conductivité électrique constitue un indicateur important de la qualité de l'eau produite, car elle est directement liée à la présence d'ions dissous. Une faible conductivité traduite généralement une faible teneur en espèces ioniques dans l'eau distillée.

Pour le SIDEM A, les valeurs de conductivité enregistrées varient entre 9,20 et 14,00 µS/cm. La valeur minimale, 9,20 µS/cm, est enregistrée au jour 14, tandis que la valeur maximale, 14,00 µS/cm, est observée au jour 12.

Selon le nouveau design, la conductivité doit être comprise entre 0,30 et 15,00 µS/cm. Toutes les valeurs enregistrées pour le SIDEM A se situent donc dans cette plage. Le procédé présente ainsi une conductivité globalement conforme au nouveau design durant la période étudiée.

Cependant, lorsque les résultats sont comparés à l'ancien design, fixé entre 0,30 et 10,00 µS/cm, plusieurs valeurs dépassent la limite supérieure de 10,00 µS/cm. Ces dépassements sont observés notamment aux jours 2, 6, 8, 10 et 12.

Cette évolution montre que l'adoption du nouveau design permet de considérer ces valeurs comme conformes aux spécifications actuelles de l'installation.

Tableau 4.4. Évolution de la conductivité de l'eau produite par SIDEM A

Jour	Conductivité (µS/cm)	Ancien design	Nouveau design	Conformité au nouveau design
2	12,80	0,30–10,00	0,30–15,00	Conforme
4	10,00	0,30–10,00	0,30–15,00	Conforme
6	12,00	0,30–10,00	0,30–15,00	Conforme
8	10,80	0,30–10,00	0,30–15,00	Conforme
10	13,30	0,30–10,00	0,30–15,00	Conforme
12	14,00	0,30–10,00	0,30–15,00	Conforme
14	9,20	0,30–10,00	0,30–15,00	Conforme

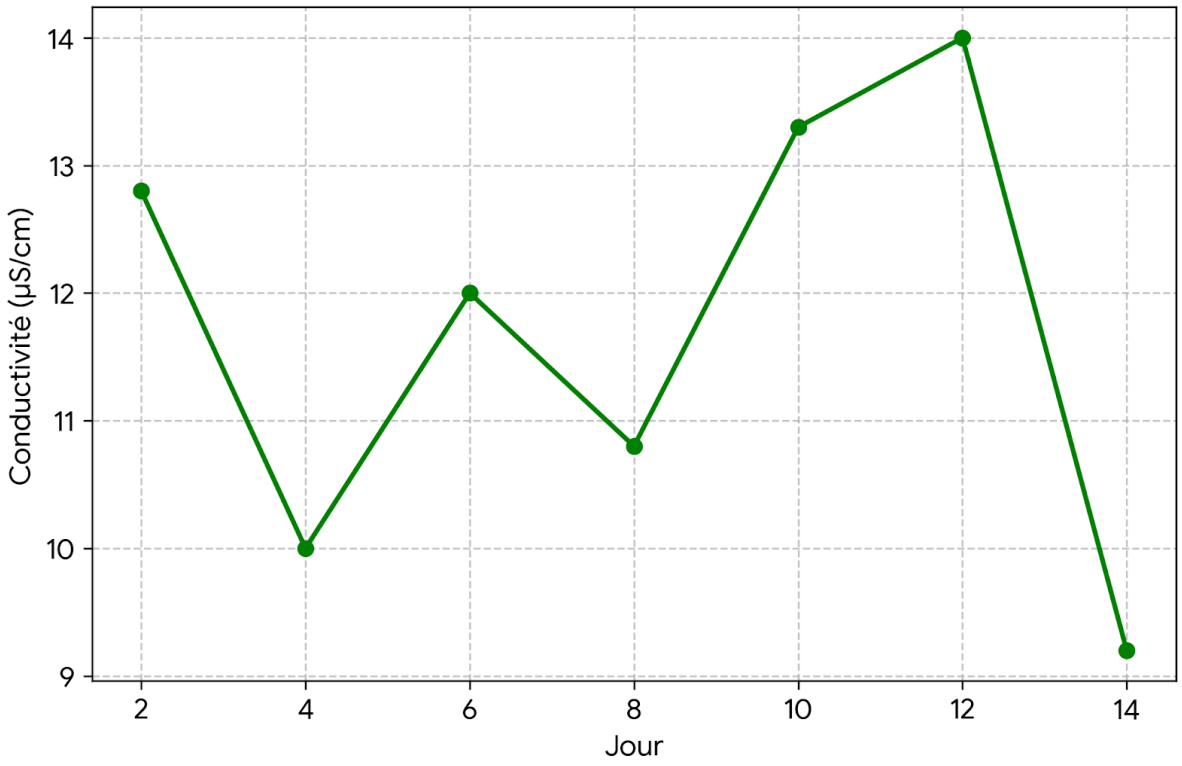


Figure 4.2. Evolution de la conductivité en fonction du temps

Voici le graphique représentant l'évolution de la conductivité en fonction du temps (en jours) d'après vos données :

- **Du jour 2 au jour 4 :** La conductivité diminue de 12,80 µS/cm à 10,00 µS/cm.
- **Du jour 4 au jour 6 :** Elle augmente pour atteindre 12,00 µS/cm, puis redescend à **10,80 µS/cm** au jour 8.
- **Du jour 8 au jour 12 :** Une hausse marquée est observée, culminant au maximum de **14,00 µS/cm** au douzième jour.
- **Au jour 14 :** La conductivité chute brusquement pour atteindre la valeur minimale de 9,20 µS/cm.

4.1.3. Résultats des chlorures

Les chlorures constituent un paramètre important dans le contrôle de la qualité de l'eau. Leur concentration peut également contribuer à l'augmentation de la conductivité et doit donc être surveillée dans une eau destinée à des usages industriels.

Au niveau du SIDEM A, la concentration en chlorures varie entre 1,00 et 2,80 mg/L au cours de la période étudiée. La valeur minimale de 1,00 mg/L est enregistrée au jour 8, tandis que la valeur maximale de 2,80 mg/L est observée au jour 12.

Selon l'ancien design, la concentration admissible en chlorures est comprise entre 0,00 et 1,00 mg/L. Ainsi, les valeurs enregistrées aux jours 2, 4, 6, 10, 12 et 14 dépassent la limite supérieure de l'ancien design.

En revanche, le nouveau design fixe une plage comprise entre 0,00 et 3,00 mg/L. Toutes les valeurs mesurées restent inférieures à cette limite. Les résultats obtenus sont donc conformes au nouveau design.

L'évolution observée montre une augmentation de la concentration en chlorures jusqu'au jour 12, suivie d'une diminution au jour 14. Cette variation reste néanmoins à l'intérieur de la plage définie par le nouveau design.

Tableau 4.5. Évolution des chlorures dans l'eau produite par SIDEM A

Jour	**Cl^- (mg/L)**	**Ancien design**	**Nouveau design**	**Conformité au nouveau design**
2	1,60	0,00–1,00	0,00–3,00	Conforme
4	1,60	0,00–1,00	0,00–3,00	Conforme
6	1,20	0,00–1,00	0,00–3,00	Conforme
8	1,00	0,00–1,00	0,00–3,00	Conforme
10	2,40	0,00–1,00	0,00–3,00	Conforme
12	2,80	0,00–1,00	0,00–3,00	Conforme
14	1,70	0,00–1,00	0,00–3,00	Conforme

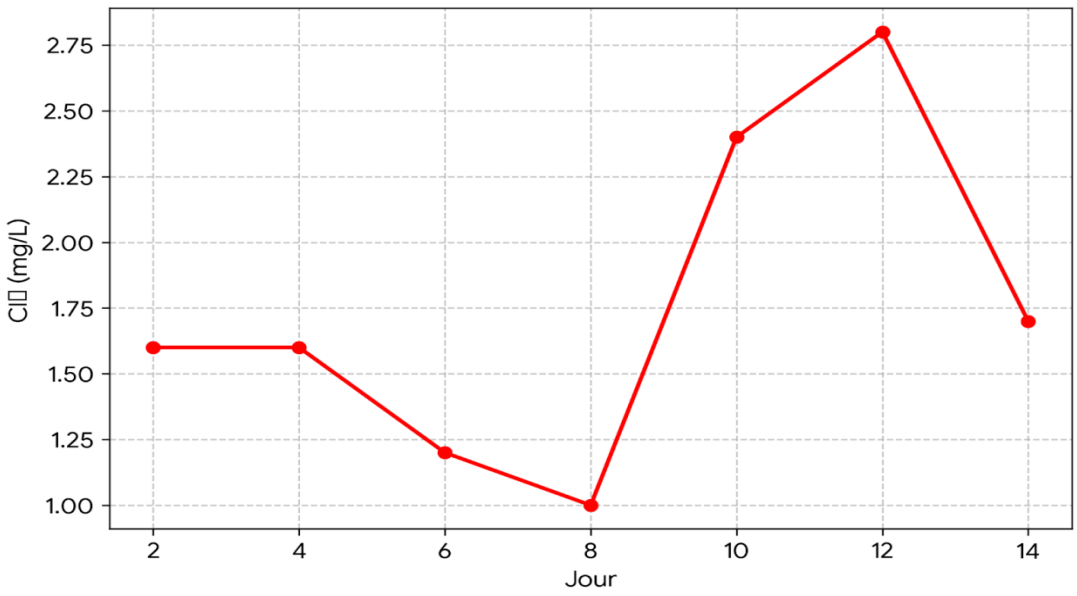


Figure4.3. Évolution des ions Chlorure en fonction du temps

Voici le graphique représentant l'évolution de la concentration en ions chlorure (Cl^-) en fonction du temps (en jours) :

- **Du jour 2 au jour 4 :** La concentration reste stable à 1,60 mg/L.
- **Du jour 4 au jour 8 :** Elle diminue progressivement pour atteindre la valeur minimale de **1,00 mg/L** au jour 8.
- **Du jour 8 au jour 12 :** Une forte augmentation est observée, atteignant un pic maximal de **2,80 mg/L** au douzième jour.
- **Au jour 14 :** La concentration baisse de nouveau pour s'établir à 1,70 mg/L.

4.1.4. Résultats de la dureté

Pour cette partie**,** ne mets pas de valeurs inventées. Dans le tableau SIDEM A que tu viens de montrer, la dureté n'a pas été analysée.

La dureté n'a pas été retenue parmi les paramètres analysés au niveau du suivi des distillateurs SIDEM A durant la période étudiée. Par conséquent, aucune valeur de dureté n'est présentée dans cette partie. Ce paramètre pourra être examiné dans les analyses réalisées au niveau des autres étapes de traitement lorsque les données correspondantes sont disponibles.

4.1.5. Résultats de la silice

Même principe : ne pas inventer une valeur de silice pour SIDEM A, puisque ton tableau actuel ne contient pas SiO_2.

La silice ne figure pas parmi les paramètres analysés dans le tableau de suivi du distillateur SIDEM A présenté précédemment. Son étude sera donc abordée dans la partie correspondant aux analyses où ce paramètre a effectivement été mesuré, notamment au niveau de l'eau de chaudière.

4.1.6. Autres paramètres analysés

Dans ton tableau SIDEM A, tu as également **NH_4^+**. Toutes les valeurs sont : < 0,01 mg/L pendant toute la période étudiée.

Tableau 4.6. Évolution de l'ammonium dans l'eau produite par SIDEM A

Jour	**NH_4^+ (mg/L)**	**Nouveau design (mg/L)**	**Conformité**
2	<0,01	0,00–1,00	Conforme
4	<0,01	0,00–1,00	Conforme
6	<0,01	0,00–1,00	Conforme
8	<0,01	0,00–1,00	Conforme
10	<0,01	0,00–1,00	Conforme
12	<0,01	0,00–1,00	Conforme
14	<0,01	0,00–1,00	Conforme

Les résultats montrent que la concentration en ammonium reste inférieure à 0,01 mg/L pendant toute la période de suivi. Cette valeur est largement inférieure à la limite supérieure fixée par le nouveau design, soit 1,00 mg/L. L'ammonium ne présente donc pas de variation significative au cours de la période étudiée.

4.2. Qualité de l'eau après traitement

Après les différentes étapes de traitement, l'eau obtenue est soumise à des analyses physico-chimiques afin d'évaluer sa qualité et de vérifier son adéquation avec les exigences de fonctionnement des installations. Le suivi porte notamment sur le pH, la conductivité, les chlorures, la dureté, la silice ainsi que sur d'autres paramètres tels que les phosphates, le titre alcalimétrique (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC).

Les résultats obtenus permettent d'apprécier l'évolution de la qualité de l'eau après traitement et de mettre en évidence les éventuelles variations au cours de la période d'étude.

4.2.1. Évolution du pH

Le pH constitue un paramètre essentiel pour le suivi de la qualité de l'eau après traitement. Son contrôle permet notamment de vérifier la stabilité chimique de l'eau et de surveiller les conditions de fonctionnement des installations.

Pour l'eau déminéralisée du ballon A, les valeurs de pH enregistrées au cours de la période étudiée sont comprises entre 6,10 et 7,20.

Tableau 4.7. Évolution du pH de l'eau déminéralisée du ballon A

Jour	Ph	Plage de référence
1	6,40	6,30–6,80
2	7,20	6,30–6,80
3	6,40	6,30–6,80
4	6,30	6,30–6,80
5	6,10	6,30–6,80
6	6,30	6,30–6,80
7	6,20	6,30–6,80
8	6,20	6,30–6,80
9	6,30	6,30–6,80
10	6,30	6,30–6,80
11	6,30	6,30–6,80
12	6,30	6,30–6,80
13	6,40	6,30–6,80
14	6,40	6,30–6,80

Les résultats montrent une évolution relativement stable du pH autour de 6,2–6,4 pendant la majorité de la période étudiée. Une valeur plus élevée de 7,20 est toutefois observée au deuxième jour, tandis que la valeur minimale de 6,10 est enregistrée au cinquième jour.

La majorité des valeurs se situent donc autour de la plage de référence, avec quelques valeurs légèrement inférieures à la limite de 6,30. Ces variations peuvent traduire des

fluctuations temporaires dans les conditions de fonctionnement du procédé de déminéralisation.

4.2.2. Évolution de la conductivité

La conductivité est l'un des principaux indicateurs de la qualité d'une eau déminéralisée. Une faible valeur traduit une faible concentration en ions dissous et indique généralement une bonne performance du procédé de déminéralisation.

Pour le ballon A, les valeurs de conductivité enregistrées sont comprises entre 0,24 et 0,75 µS/cm.

Tableau 4.8. Évolution de la conductivité de l'eau déminéralisée du ballon A

Jour	Conductivité (µS/cm)	Limite du design (µS/cm)
1	0,37	0,50
2	0,75	0,50
3	0,26	0,50
4	0,28	0,50
5	0,30	0,50
6	0,31	0,50
7	0,33	0,50
8	0,36	0,50
9	0,34	0,50
10	0,38	0,50
11	0,35	0,50
12	0,24	0,50
13	0,45	0,50
14	0,55	0,50

On constate que la conductivité est généralement inférieure à 0,50 µS/cm, ce qui indique une bonne qualité de l'eau déminéralisée pendant la majorité de la période.

Cependant, deux dépassements sont observés : 0,75 µS/cm au jour 2 et 0,55 µS/cm au jour 14. La valeur de 0,75 µS/cm constitue le dépassement le plus important. D'après les

observations réalisées au niveau de l'installation, une augmentation de la conductivité peut être associée à une diminution temporaire de la capacité des résines échangeuses d'ions.

Après la valeur élevée observée au deuxième jour, la conductivité diminue fortement dès le troisième jour et reste ensuite majoritairement inférieure à la limite de 0,50 µS/cm. Cette évolution traduit une amélioration de la qualité de l'eau déminéralisée.

4.2.3. Évolution des chlorures

Les chlorures constituent un indicateur important de la qualité de l'eau après traitement. Leur diminution est particulièrement recherchée dans une eau déminéralisée, car elle traduit l'élimination d'une partie des ions présents dans l'eau initiale.

Pour les ballons d'eau déminéralisée, les données numériques détaillées concernant les chlorures ne sont pas disponibles dans le tableau que tu m'as fourni précédemment. Il ne serait donc pas correct d'introduire des valeurs qui ne figurent pas dans les résultats expérimentaux.

La concentration en chlorures sera donc présentée à partir du tableau d'analyses correspondant, lorsque celui-ci est disponible.

4.2.4. Évolution de la dureté

La dureté constitue un paramètre essentiel pour évaluer l'efficacité d'un traitement de déminéralisation. Elle est principalement liée à la présence d'ions calcium et magnésium dans l'eau.

Dans les résultats actuellement disponibles pour les ballons, aucune série numérique complète concernant la dureté n'a été fournie. Par conséquent, aucune valeur ne sera ajoutée artificiellement.

L'analyse de la dureté devra être réalisée à partir des résultats expérimentaux correspondants

4.2.5. Évolution de la silice

La silice constitue un paramètre particulièrement important dans le suivi de l'eau destinée à l'alimentation des chaudières. Une concentration élevée peut favoriser la formation de dépôts et poser des problèmes dans certaines conditions de fonctionnement.

Les résultats des analyses de l'eau de chaudière A montrent toutefois une concentration en silice inférieure à 0,01 mg/L pour les 15 jours de suivi.

Tableau 4.9. Évolution de la silice dans l'eau de chaudière A

Jour	**SiO_2 (mg/L)**
1	<0,01
2	<0,01
3	<0,01
4	<0,01
5	<0,01
6	<0,01
7	<0,01
8	<0,01
9	<0,01
10	<0,01
11	<0,01
12	<0,01
13	<0,01
14	<0,01
15	<0,01

Les résultats montrent une très faible concentration en silice pendant toute la période de suivi. La valeur reste inférieure à 0,01 mg/L, ce qui indique que la silice n'a pas présenté de variation mesurable dans les échantillons analysés.

Ainsi, même si la silice constitue un paramètre à surveiller dans les chaudières en raison du risque potentiel de formation de dépôts, les résultats obtenus dans cette étude ne montrent pas de teneur élevée en silice dans l'eau de chaudière A.

4.2.6. Évolution des autres paramètres

En complément du pH, de la conductivité et de la silice, plusieurs paramètres ont été suivis au niveau de l'eau de chaudière A : chlorures (Cl^-), titre alcalimétrique (TA), titre alcalimétrique complet (TAC) et phosphates (PO3-).

Tableau 4.9. Résultats des autres paramètres de l'eau de chaudière A

Jour	Cl^- (mg/L)	TA	TAC	PO3- (mg/L)
1	0,10	2,00	4,40	36,40
2	0,20	1,80	4,00	33,20
3	0,10	1,60	3,60	27,70
4	0,20	1,60	3,60	28,40
5	0,20	1,80	4,00	33,20
6	0,10	1,60	3,60	30,80
7	0,10	1,00	2,20	18,60
8	0,20	2,00	4,40	34,30
9	0,20	1,60	3,40	28,50
10	0,70	2,60	5,60	46,20
11	0,80	2,40	5,20	43,80
12	0,40	3,00	6,40	57,80
13	0,60	3,00	6,40	58,00
14	0,60	2,80	5,80	55,60
15	0,40	2,40	5,40	46,00

Les résultats montrent une variation des différents paramètres au cours de la période étudiée. Les concentrations en chlorures restent relativement faibles durant les premiers jours, puis une augmentation est observée à partir du dixième jour, avec un maximum de 0,80 mg/L au jour 11.

Le titre alcalimétrique varie entre 1,00 et 3,00, tandis que le TAC varie entre 2,20 et 6,40. Une augmentation de ces deux paramètres est observée à partir du dixième jour, avec les valeurs maximales enregistrées aux jours 12 et 13.

Concernant les phosphates, les valeurs varient de 18,60 à 58,00 mg/L. Les concentrations les plus faibles sont observées durant les premiers jours, tandis qu'une augmentation importante apparaît à partir du dixième jour.

Ces variations montrent que les caractéristiques chimiques de l'eau de chaudière ne sont pas constantes durant toute la période de suivi. Elles justifient la surveillance régulière de ces paramètres afin de maintenir les conditions de fonctionnement de la chaudière dans les plages prévues.

4.3. Analyse de l'efficacité du traitement

Cette partie vise à évaluer l'efficacité globale du traitement mis en œuvre au niveau de l'Utilité 50 I, à partir de l'évolution des principaux paramètres physico-chimiques suivis. L'analyse repose sur la comparaison des résultats obtenus avant et après les différentes étapes de traitement, ainsi que sur leur comparaison avec les valeurs de référence du design. Une attention particulière est accordée au pH, à la conductivité, aux chlorures et aux autres paramètres disponibles, afin d'identifier les paramètres présentant une bonne maîtrise et ceux nécessitant une surveillance plus importante.

4.3.1. Rendement d'élimination des différents paramètres

Le rendement d'élimination constitue un indicateur permettant d'évaluer la capacité du procédé à réduire la concentration d'un paramètre entre l'eau avant traitement et l'eau après traitement. Concentration du paramètre avant traitement ;

L'application de cette relation nécessite toutefois de disposer de valeurs mesurées pour un même paramètre, avant et après traitement, dans des conditions comparables. Dans les données disponibles, les résultats complets permettant un calcul direct du rendement ne sont pas disponibles pour l'ensemble des paramètres. Il convient donc de limiter le calcul aux paramètres pour lesquels les deux séries de mesures sont effectivement disponibles.

Les résultats obtenus montrent néanmoins une amélioration importante de certains paramètres au cours du processus de traitement, notamment en ce qui concerne la conductivité de l'eau déminéralisée, qui atteint généralement des valeurs faibles au niveau du ballon A. La silice présente également des teneurs inférieures à 0,01 mg/L dans l'eau de chaudière durant toute la période étudiée, ce qui traduit une très faible présence de ce paramètre dans les analyses réalisées.

4.3.2. Comparaison entre l'eau avant et après traitement

La comparaison entre les différentes étapes du traitement met en évidence une évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'eau.

Pour l'eau produite par les distillateurs SIDEM, le pH du SIDEM A varié entre 7,20 et 7,60 durant la période étudiée. Ces valeurs restent dans la plage du nouveau design, fixée entre 6,50 et 8,20. Toutefois, à partir du jour 8, les valeurs dépassent la limite supérieure de l'ancien design, fixée à 7,20.

La conductivité de l'eau issue du SIDEM A varié entre 9,20 et 14,00 µS/cm. Elle respecte la limite du nouveau design, fixée à 15,00 µS/cm, mais plusieurs valeurs dépassent l'ancienne limite supérieure de 10,00 µS/cm. Cette évolution traduit une différence entre les exigences de l'ancien et du nouveau design.

Concernant les chlorures, les concentrations mesurées au niveau du SIDEM A se situent entre 1,00 et 2,80 mg/L. Elles restent inférieures à la limite du nouveau design de 3,00 mg/L, mais dépassent à plusieurs reprises l'ancienne limite de 1,00 mg/L.

Après traitement complémentaire, notamment au niveau du ballon A, la conductivité devient beaucoup plus faible, avec des valeurs comprises entre 0,24 et 0,75 µS/cm. La majorité des valeurs se situent dans la plage de référence de 0,00 à 0,50 µS/cm. Deux dépassements sont cependant observés, soit 0,75 µS/cm au deuxième jour et 0,55 µS/cm au quatorzième jour.

Ces résultats montrent donc une diminution importante de la conductivité au cours du traitement, ce qui témoigne d'une réduction de la charge ionique de l'eau.

4.3.3. Identification des paramètres les mieux éliminés

Sur la base des résultats disponibles, la conductivité apparaît comme l'un des paramètres les plus significativement réduits au cours du traitement. L'eau issue du SIDEM A présente des conductivités comprises entre 9,20 et 14,00 µS/cm, tandis que l'eau du ballon A présente généralement des valeurs inférieures à 0,50 µS/cm.

La silice présente également une teneur très faible dans l'eau de chaudière, avec des valeurs < 0,01 mg/L durant les quinze jours de suivi. Cette situation indique une bonne maîtrise de ce paramètre dans les conditions étudiées.

Le pH ne doit toutefois pas être considéré comme un paramètre à éliminer au sens strict, puisque l'objectif du traitement est plutôt de maintenir sa valeur dans une plage appropriée au fonctionnement de l'installation.

4.3.4. Identification des paramètres présentant un faible rendement

Certains paramètres montrent une maîtrise moins régulière au cours de la période étudiée. La conductivité de l'eau du ballon A présente notamment deux dépassements de la limite de 0,50 µS/cm, aux jours 2 et 14.

Au niveau de l'eau de chaudière, une augmentation de plusieurs paramètres est observée à partir du jour 10. La conductivité atteint 234 µS/cm au jour 10, 295 µS/cm au jour 12 et un maximum de 304 µS/cm au jour 13, alors que la plage de référence est de 100 à 200 µS/cm.

Les chlorures dépassent également la limite de 0,50 mg/L à certains jours, avec notamment 0,70 mg/L au jour 10, 0,80 mg/L au jour 11, puis 0,60 mg/L aux jours 13 et 14.

De même, le TAC et les phosphates présentent des dépassements de leurs valeurs de référence durant plusieurs jours de la seconde partie de la période étudiée.

Ces variations montrent que certains paramètres nécessitent une surveillance régulière afin de maintenir les conditions de fonctionnement souhaitées.

4.3.5. Évaluation globale de l'efficacité de l'Utilité 50 I

L'analyse globale des résultats montre que l'Utilité 50 I assure plusieurs fonctions importantes dans la production et le traitement de l'eau destinée aux besoins du complexe. Les résultats obtenus au niveau du SIDEM A respectent globalement les limites du nouveau design pour le pH, la conductivité, les chlorures et l'ammonium.

Le traitement complémentaire permet ensuite d'obtenir une eau présentant une conductivité très faible au niveau du ballon A, ce qui traduit une réduction importante de la teneur en espèces ioniques. La teneur en silice mesurée dans l'eau de chaudière reste également inférieure à 0,01 mg/L pendant toute la période étudiée.

Cependant, l'évolution de la conductivité, des chlorures, de l'alcalinité totale (TA), du titre alcalimétrique complet (TAC) et des phosphates dans l'eau de chaudière à partir du jour 10 montre l'existence de variations nécessitant une surveillance accrue. Ces évolutions peuvent être liées aux conditions de fonctionnement de la chaudière et à l'accumulation progressive de certains constituants dans l'eau.

Ainsi, l'efficacité de l'Utilité 50 I peut être appréciée à travers sa capacité à produire une eau répondant globalement aux exigences du nouveau design, tout en maintenant une surveillance régulière des paramètres susceptibles de varier au cours du fonctionnement des installation

4.4. Évaluation de la conformité de l'eau traitée

L'évaluation de la conformité de l'eau traitée a été réalisée par comparaison des résultats analytiques obtenus au cours de la période d'étude avec les valeurs de référence utilisées au niveau de FERTIAL. Cette comparaison permet de déterminer si les paramètres étudiés respectent les limites fixées par le nouveau design et d'identifier les éventuels dépassements nécessitant une attention particulière.

4.4.1. Comparaison avec les spécifications utilisées par FERTIAL

Les résultats obtenus montrent que la conformité de l'eau varie selon le type d'eau considéré et selon le paramètre analysé.

Pour l'eau produite par le SIDEM A, les valeurs de pH enregistrées varient de 7,20 à 7,60. Elles sont toutes comprises dans la plage du nouveau design, fixée entre 6,50 et 8,20. La conductivité varie entre 9,20 et 14,00 µS/cm, avec une limite du nouveau design fixée à 15,00 µS/cm. Les concentrations en chlorures sont comprises entre 1,00 et 2,80 mg/L, alors que la limite du nouveau design est de 3,00 mg/L. Enfin, l'ammonium reste inférieur à 0,01 mg/L, largement inférieur à la limite de 1,00 mg/L.

Au niveau du ballon A, la conductivité varie entre 0,24 et 0,75 µS/cm, pour une valeur de référence comprise entre 0,00 et 0,50 µS/cm. La majorité des mesures respecte donc la spécification, à l'exception de quelques valeurs dépassant légèrement la limite supérieure.

Pour l'eau de chaudière A, plusieurs paramètres ont été suivis. Le pH est généralement compris dans la plage de référence de 9,90 à 10,40, mais atteint 10,50 aux jours 12, 13 et 14. La conductivité, dont la plage de référence est de 100 à 200 µS/cm, dépasse cette limite à partir du jour 10 et atteint un maximum de 304 µS/cm au jour 13.

La comparaison montre ainsi que l'eau produite par le SIDEM A respecte globalement les nouvelles spécifications, tandis que certains paramètres de l'eau de chaudière présentent des dépassements durant la deuxième partie de la période étudiée.

4.4.2. Identification des éventuelles non-conformités

L'analyse des résultats permet d'identifier plusieurs dépassements par rapport aux valeurs de référence.

Pour le SIDEM A, aucune non-conformité n'est observée par rapport au nouveau design pour le pH, la conductivité, les chlorures et l'ammonium. Toutefois, plusieurs résultats dépassent les anciennes limites, notamment le pH à partir du jour 8, la conductivité à plusieurs jours et les chlorures à plusieurs reprises. Ces dépassements ne constituent pas une non-conformité vis-à-vis du nouveau design, mais montrent une différence entre les anciennes et les nouvelles spécifications.

Pour le ballon A, deux dépassements de la conductivité sont observés : 0,75 µS/cm au jour 2 et 0,55 µS/cm au jour 14, alors que la limite supérieure est de 0,50 µS/cm.

Pour l'eau de chaudière A, plusieurs dépassements sont observés :

- pH : 10,50 aux jours 12, 13 et 14, pour une limite supérieure de 10,40 ;
- conductivité : dépassement à partir du jour 10, avec un maximum de 304 µS/cm au jour 13 ;
- chlorures : dépassement aux jours 10, 11, 13 et 14 ;
- TA : dépassement aux jours 12, 13 et 14 ;
- TAC : dépassement aux jours 10, 12, 13, 14 et 15 ;

- PO_4 : dépassement à partir du jour 10.

En revanche, la silice reste inférieure à 0,01 mg/L pendant les quinze jours de suivi, ce qui ne met pas en évidence de dépassement pour ce paramètre.

4.4.3. Analyse des causes possibles

Les dépassements observés ne permettent pas, à eux seuls, d'identifier une cause unique. Ils peuvent résulter de plusieurs facteurs liés aux conditions de fonctionnement et au suivi des installations.

L'augmentation simultanée de la conductivité et des chlorures dans l'eau de chaudière, particulièrement à partir du jour 10, peut être associée à une augmentation de la concentration en espèces dissoutes dans le circuit. Cette évolution peut être favorisée par la concentration progressive des sels dans l'eau de chaudière lorsque les conditions de purge ou de renouvellement de l'eau ne permettent pas de maintenir les paramètres dans la plage souhaitée.

Les variations observées au niveau du pH, de la TA et du TAC peuvent également être liées aux conditions de traitement et au contrôle chimique de l'eau de chaudière. Ces paramètres sont directement influencés par l'équilibre alcalin du milieu et par les produits utilisés pour le conditionnement de l'eau.

Concernant les phosphates, leur augmentation au cours de la deuxième partie de la période peut être liée au traitement chimique appliqué à l'eau de chaudière. Une concentration excessive peut indiquer que le dosage ou les conditions de fonctionnement doivent être surveillés.

Pour le ballon A, les dépassements ponctuels de conductivité peuvent être liés à une diminution temporaire de l'efficacité du système de déminéralisation. Dans les données étudiées, la valeur élevée de 0,75 µS/cm au jour 2 est suivie d'une diminution de la conductivité, ce qui traduit une amélioration de la qualité de l'eau au cours des jours suivants.

Enfin, la faible teneur en silice mesurée dans l'eau de chaudière (< 0,01 mg/L) ne permet pas d'attribuer les variations observées à un problème de silice. L'identification précise des causes nécessiterait un suivi complémentaire des paramètres de fonctionnement, des purges, du dosage des produits chimiques et de l'état des équipements

4.5. Discussion des résultats

L’analyse des résultats obtenus au cours de la période d’étude permet de mettre en évidence le comportement des différentes étapes de traitement de l’eau au niveau de l’Utilité 50 I du complexe FERTIAL. Les paramètres étudiés présentent globalement une évolution cohérente avec les différentes étapes de production et de traitement de l’eau. Toutefois, certaines variations et certains dépassements des valeurs de référence apparaissent au cours de la période étudiée, notamment au niveau de l’eau de chaudière.

4.5.1. Interprétation des variations des paramètres

Les résultats obtenus pour le SIDEM A montrent une relative stabilité du pH, avec des valeurs comprises entre 7,20 et 7,60. Une légère augmentation est observée à partir du jour 8. Malgré cette variation, toutes les valeurs restent comprises dans la plage du nouveau design, fixée entre 6,50 et 8,20. Le dépassement de l'ancienne limite supérieure de 7,20 à partir du jour 8 ne constitue donc pas une non-conformité par rapport aux nouvelles spécifications.

La conductivité du SIDEM A varié entre 9,20 et 14,00 µS/cm. Les valeurs restent inférieures à la limite du nouveau design de 15,00 µS/cm, mais plusieurs mesures dépassent l'ancienne limite de 10,00 µS/cm. L'évolution de la conductivité est également accompagnée de variations de la concentration en chlorures. Les chlorures atteignent notamment 2,80 mg/L au jour 12, tout en restant inférieurs à la limite du nouveau design de 3,00 mg/L.

Au niveau du ballon A, la conductivité présente des valeurs nettement plus faibles, comprises entre 0,24 et 0,75 µS/cm. La majorité des résultats se situe dans la limite de 0,50 µS/cm. Les deux dépassements observés aux jours 2 et 14 montrent cependant que les performances du traitement peuvent varier temporairement.

L'eau de chaudière présente une évolution différente. À partir du jour 10, une augmentation de la conductivité, des chlorures, de la TA, du TAC et des phosphates est observée. La conductivité passe notamment de valeurs généralement inférieures ou proches de 200 µS/cm durant les premiers jours à 234 µS/cm au jour 10, puis atteint 304 µS/cm au jour 13. Cette évolution traduit une augmentation de la concentration en espèces dissoutes dans l'eau de chaudière et constitue un point nécessitant une surveillance particulière.

4.5.2. Influence des différentes étapes du traitement

Les résultats mettent en évidence l'influence successive des différentes étapes du traitement sur la qualité de l'eau.

La distillation au niveau des SIDEM permet d'obtenir une eau dont les caractéristiques sont relativement stables. Toutefois, la présence résiduelle de conductivité et de chlorures montre que la qualité de l'eau produite dépend également des conditions de fonctionnement des équipements.

L'étape de déminéralisation permet ensuite de réduire fortement la conductivité. Le passage d'une conductivité comprise entre 9,20 et 14,00 µS/cm au niveau du SIDEM A à des valeurs généralement inférieures à 0,50 µS/cm au ballon A constitué un indicateur important de la réduction de la charge ionique de l'eau.

Les résultats obtenus pour l'eau de chaudière montrent ensuite une évolution différente. La concentration de certains paramètres augmente progressivement au cours du fonctionnement, notamment à partir du jour 10. Cette situation est cohérente avec le fait que l'eau de chaudière est soumise à des conditions de fonctionnement particulières et à des phénomènes de concentration des espèces dissoutes.

Ainsi, chaque étape joue un rôle spécifique : la distillation contribue à la production d'une eau de qualité améliorée, la déminéralisation réduit davantage la teneur en ions dissous et le traitement de l'eau de chaudière vise à maintenir les paramètres chimiques dans les plages nécessaires au bon fonctionnement de l'installation.

4.5.3. Problèmes d'entartrage et de corrosion

Les variations de la conductivité et des chlorures constituent des indicateurs importants pour la surveillance du fonctionnement des installations. Une augmentation de la concentration en espèces dissoutes dans l'eau peut favoriser, selon les conditions physico-chimiques du système, la formation de dépôts et contribuer à des problèmes d'exploitation.

Dans les résultats obtenus au niveau de l'eau de chaudière, l'augmentation de la conductivité à partir du jour 10, accompagnée de l'augmentation des chlorures, de la TA et du TAC, montre une évolution de la composition chimique de l'eau qui doit être surveillée.

L'entartrage peut être favorisé par la présence et la concentration de certaines espèces minérales, notamment lorsque les conditions de température et de concentration deviennent favorables à la précipitation. Cependant, les données disponibles ne permettent pas de confirmer directement la présence d'un dépôt d'entartrage dans les équipements.

La corrosion constitue également un risque à surveiller lorsque les conditions chimiques de l'eau deviennent défavorables. Les chlorures sont notamment un paramètre important dans le suivi de la qualité de l'eau, car leur accumulation doit être évitée dans les circuits où elle peut contribuer à la dégradation des matériaux.

Ainsi, les résultats obtenus ne permettent pas d'affirmer l'existence d'un problème avéré d'entartrage ou de corrosion, mais ils mettent en évidence certains paramètres dont l'évolution pourrait favoriser ces phénomènes et qui nécessitent donc un contrôle régulier.

4.5.4. Problème potentiel lié à la silice

La silice constitue un paramètre particulièrement important dans le suivi de l'eau destinée aux installations thermiques, car sa présence excessive peut contribuer à la formation de dépôts et poser des problèmes dans certains équipements.

Dans la présente étude, les résultats obtenus pour l'eau de chaudière A montrent cependant une concentration en silice inférieure à 0,01 mg/L pendant les quinze jours de suivi. Cette valeur reste très faible et ne met pas en évidence une accumulation importante de silice durant la période étudiée.

Par conséquent, contrairement à certains autres paramètres ayant présenté des dépassements, notamment la conductivité, les chlorures, la TA, le TAC et les phosphates, la silice ne constitue pas un problème identifié dans les conditions étudiées.

Il demeure néanmoins important de maintenir son suivi régulier, particulièrement dans le cas des installations fonctionnant à température élevée, afin de détecter rapidement toute évolution défavorable.

4.5.5. Comparaison avec les résultats de la littérature

Les résultats obtenus dans cette étude sont globalement cohérents avec les principes décrits dans la littérature concernant le traitement des eaux destinées aux installations industrielles et aux chaudières. Les procédés de distillation et de déminéralisation ont notamment pour objectif de réduire la présence des matières dissoutes et des ions susceptibles d'affecter le fonctionnement des équipements.

La diminution importante de la conductivité observée entre l'eau produite par le SIDEM A et l'eau du ballon A confirmé l'efficacité du traitement de déminéralisation pour réduire la charge ionique de l'eau. De même, la faible concentration en silice observée dans l'eau de chaudière constitue un résultat favorable au regard des problèmes potentiels associés à l'accumulation de ce composé dans les installations thermiques.

En revanche, l'augmentation de la conductivité, des chlorures et des paramètres alcalins dans l'eau de chaudière durant la deuxième partie de la période étudiée montre l'importance d'un contrôle régulier de la qualité de l'eau. La littérature consacrée au traitement des eaux de chaudière souligne généralement l'importance du contrôle de la concentration des espèces dissoutes, du pH, de l'alcalinité et des produits de conditionnement afin de limiter les risques liés aux dépôts et à la corrosion.

La comparaison avec la littérature confirme donc l'intérêt du suivi régulier des paramètres physico-chimiques pour maintenir les conditions de fonctionnement des installations et prévenir les évolutions défavorables de la qualité de l'eau.

4.5.6. Recommandations pour améliorer le traitement

À partir des résultats obtenus, plusieurs recommandations peuvent être formulées afin d'améliorer le suivi et la maîtrise de la qualité de l'eau au niveau de l'Utilité 50 I :

- assurer un suivi régulier de la conductivité, du pH et des chlorures, particulièrement au niveau de l'eau de chaudière ;
- renforcer la surveillance à partir des périodes où une augmentation simultanée de plusieurs paramètres est observée ;

- contrôler régulièrement l'efficacité du système de déminéralisation afin de limiter les variations de conductivité ;
- assurer un contrôle approprié des paramètres TA, TAC et phosphates afin de maintenir l'équilibre chimique de l'eau de chaudière ;
- maintenir le suivi de la silice, même lorsque les valeurs mesurées restent très faibles ;
- vérifier régulièrement les conditions de fonctionnement et les opérations de purge de la chaudière lorsque la concentration des espèces dissoutes augmente ;
- assurer un suivi périodique des équipements afin de détecter précocement d'éventuels dépôts ou signes de corrosion ;
- conserver un historique des analyses afin de faciliter l'identification des tendances et des variations anormales ;
- réaliser des contrôles supplémentaires lorsqu'un dépassement des spécifications est observé pendant plusieurs jours consécutifs.

Ces recommandations permettraient d'améliorer la surveillance du procédé et de contribuer au maintien d'une qualité d'eau compatible avec les exigences de fonctionnement des installations.

Conclusion

L'étude réalisée au niveau de l'Utilité 50 I du complexe FERTIAL a permis d'évaluer l'évolution de plusieurs paramètres physico-chimiques au cours du traitement de l'eau. Les résultats obtenus montrent que la qualité de l'eau produite par le SIDEM A reste globalement conforme aux nouvelles spécifications de design pour les paramètres étudiés. Le pH, la conductivité, les chlorures et l'ammonium respectent notamment les limites fixées par le nouveau design.

L'étape de déminéralisation permet également d'obtenir une eau présentant une conductivité généralement faible au niveau du ballon A, ce qui traduit une réduction importante de la charge ionique. Toutefois, quelques dépassements ponctuels de la conductivité ont été observés et nécessitent une surveillance.

Au niveau de l'eau de chaudière, plusieurs paramètres présentent une augmentation durant la deuxième partie de la période étudiée, notamment la conductivité, les chlorures, la TA, le TAC et les phosphates. Ces variations montrent l'importance du suivi régulier des paramètres chimiques et du contrôle des conditions de fonctionnement de la chaudière.

La silice, quant à elle, reste inférieure à 0,01 mg/L pendant toute la période d'étude et ne constitue donc pas un problème identifié dans les conditions étudiées. Globalement, les résultats montrent que le système de traitement permet d'assurer une qualité d'eau satisfaisante pour plusieurs paramètres, tout en mettant en évidence certains points nécessitant une surveillance renforcée afin de maintenir la stabilité du procédé et de limiter les risques liés à la concentration des espèces dissoutes, à l'entartrage et à la corrosion.

La Conclusion Générale

Conclusion générale

Le présent travail de fin d'études a été réalisé au niveau de l'Utilité 50 I / 52 I du complexe industriel FERTIAL, dans le but d'évaluer la qualité des eaux produites et traitées ainsi que les performances des différentes étapes de la chaîne de traitement. L'étude s'est appuyée sur le suivi et l'analyse de plusieurs paramètres physico-chimiques, notamment le pH, la conductivité, les chlorures, l'ammonium, la dureté, la silice, les phosphates, la titre alcalimétrique (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC), au cours de la période de suivi considérée en janvier 2026.

L'exploitation des résultats expérimentaux ainsi que des fiches de suivi du laboratoire a permis de mettre en évidence une qualité globalement satisfaisante de l'eau à plusieurs étapes du procédé. Au niveau du SIDEM A, les paramètres suivis ont présenté une relative stabilité durant la période étudiée. Le pH a varié entre 7,20 et 7,60, tandis que la conductivité a été comprise entre 9,20 et 14,00 µS/cm et les chlorures entre 1,00 et 2,80 mg/L. Ces valeurs demeurent conformes aux limites du nouveau design retenues comme références dans le cadre de cette étude. La teneur en ammonium est également restée inférieure à 0,01 mg/L, ce qui traduit une bonne maîtrise de ce paramètre au niveau de l'eau produite.

L'étude de l'eau déminéralisée au niveau du ballon A a montré une diminution importante de la conductivité par rapport à l'eau produite par le SIDEM A. Les valeurs mesurées étaient généralement inférieures à 0,50 µS/cm, témoignant d'une réduction significative de la charge ionique de l'eau après l'étape de déminéralisation. Toutefois, deux dépassements ponctuels ont été relevés au cours de la période étudiée. Ces écarts, bien que limités, soulignent l'importance d'un suivi régulier afin de détecter rapidement toute diminution des performances du système de déminéralisation et d'en rechercher les causes éventuelles.

Concernant l'eau de chaudière A, une évolution plus marquée de plusieurs paramètres a été observée au cours de la deuxième partie de la période de suivi. À partir du jour 10, les valeurs de la conductivité, des chlorures, de la TA, du TAC et des phosphates ont présenté une tendance à l'augmentation, avec plusieurs dépassements des limites de référence. Cette évolution constitue un point de vigilance, car une modification simultanée de plusieurs paramètres peut traduire une variation des conditions de fonctionnement, de la concentration

des espèces dissoutes ou du régime de conditionnement de l'eau de chaudière. Elle justifie ainsi un contrôle régulier de la qualité de l'eau et des conditions opératoires associées.

Une attention particulière a également été accordée à la silice (SiO_2), en raison de son rôle potentiel dans la formation de dépôts au niveau des équipements thermiques. Des teneurs relativement élevées, de l'ordre de 36 à 38 mg/L, ont été relevées sur certains points de suivi de la chaîne de traitement, ce qui montre l'importance de surveiller son évolution au cours du procédé. En revanche, au niveau de l'eau de chaudière A, la teneur en silice est restée inférieure à 0,01 mg/L pendant les quinze jours de suivi, aucun problème particulier lié à une accumulation de silice dans cette eau n'ayant ainsi été mis en évidence au cours de la période étudiée. Le maintien de ce niveau de qualité demeure néanmoins essentiel compte tenu des risques associés aux dépôts de silice dans les installations thermiques.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus montrent que la filière de traitement mise en œuvre au niveau de l'Utilité 50 I / 52 I permet d'assurer une réduction importante de la charge minérale de l'eau et d'atteindre des niveaux de qualité satisfaisants pour plusieurs paramètres, particulièrement après l'étape de déminéralisation. La maîtrise de la conductivité, des chlorures et de l'ammonium au niveau des eaux produites constitue notamment un indicateur favorable du fonctionnement de la filière. Néanmoins, les variations observées au niveau de l'eau de chaudière, ainsi que les fluctuations enregistrées pour certains paramètres sur les différents points de suivi, montrent que les performances du système restent étroitement liées aux conditions d'exploitation, à l'efficacité des équipements et à la maîtrise du conditionnement chimique.

L'analyse des données a également fait ressortir certaines limites méthodologiques et opérationnelles, notamment le caractère incomplet de certaines fiches de suivi, avec des données manquantes pour certains paramètres tels que le fer, le cuivre ou l'oxygène dissous, ainsi que le nombre limité de journées de relevés. Ces limites doivent être prises en considération lors de l'interprétation des résultats et plaident en faveur d'un suivi analytique plus régulier et plus complet.

Au terme de cette étude, il apparaît nécessaire de maintenir une surveillance rigoureuse et régulière des principaux paramètres de qualité de l'eau, en particulier le pH, la conductivité, les chlorures, la TA, le TAC, les phosphates et la silice. Une attention particulière doit être portée aux périodes caractérisées par une augmentation simultanée de plusieurs paramètres. Le

contrôle des opérations de purge, du dosage des produits de conditionnement, des conditions opératoires et de l'état des équipements constitue également un levier important pour maintenir la qualité de l'eau et limiter les risques de corrosion et d'entartrage.

En définitive, cette étude a permis d'évaluer les performances de la chaîne de traitement de l'eau de l'Utilité 50 I / 52 I du complexe FERTIAL, tout en mettant en évidence certains paramètres nécessitant une surveillance renforcée. Les résultats obtenus constituent une base utile pour améliorer le suivi analytique du procédé, optimiser les conditions de traitement et contribuer à la fiabilité, à la sécurité et à la durabilité des installations industrielles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Degrémont, S.A. (2005). Mémento technique de l'eau. 10e éd., 2 tomes. Rueil-MalmaisonDegrémont-Suez.
2. Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & Brunet, R. (2009). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 9e éd. Paris : Dunod.
3. El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. (2002). Fundamentals of Salt Water Desalination. Amsterdam : Elsevier.
4. Al-Shammiri, M., & Safar, M. (1999). Multi-effect distillation plants: State of the art. Desalination, 126, 45–59.
5. Kemmer, F. N. (1988). The NALCO Water Handbook. 2nd ed. New York : McGraw-Hill.
6. Babcock & Wilcox Company. (1992). Steam: Its Generation and Use. 40th ed. Barberton, Ohio : Babcock & Wilcox.
7. Betz Laboratories. (1991). Betz Handbook of Industrial Water Conditioning. 9th ed. Trevose, Pennsylvania : Betz Laboratories.
8. Harland, C. E. (1994). Ion Exchange: Theory and Practice. 2nd ed. Cambridge : Royal Society of Chemistry.
9. ISO 10523:2008. Water quality — Determination of pH. International Organization for Standardization.
10. ISO 7888:1985. Water quality — Determination of electrical conductivity. International Organization for Standardization.
11. ISO 9297:1989. Water quality — Determination of chloride — Silver nitrate titration with chromate indicator (Mohr's method). International Organization for Standardization.
12. ISO 6059:1984. Water quality — Determination of the sum of calcium and magnesium — EDTA titrimetric method. International Organization for Standardization.
13. Complexe FERTIAL. (2026). Documentation technique et manuels opératoires de l'Utilité 50 I. Document interne.
14. Complexe FERTIAL. (2026). Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de l'Utilité 50 I. Département Qualité et Contrôle, document interne.

15. Complexe FERTIAL. (2026). Spécifications techniques de la qualité des eaux et valeurs de référence de l'Utilité 50 I. Document interne.
16. SIDEM. (s.d.). Documentation technique des unités de dessalement thermique. Documentation constructrice.