

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 20 AOÛT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Ingénierie & Gestion de l'Eau

THEME

TRAITEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DE CHAUDIERE

Soutenu le 04/06/2023

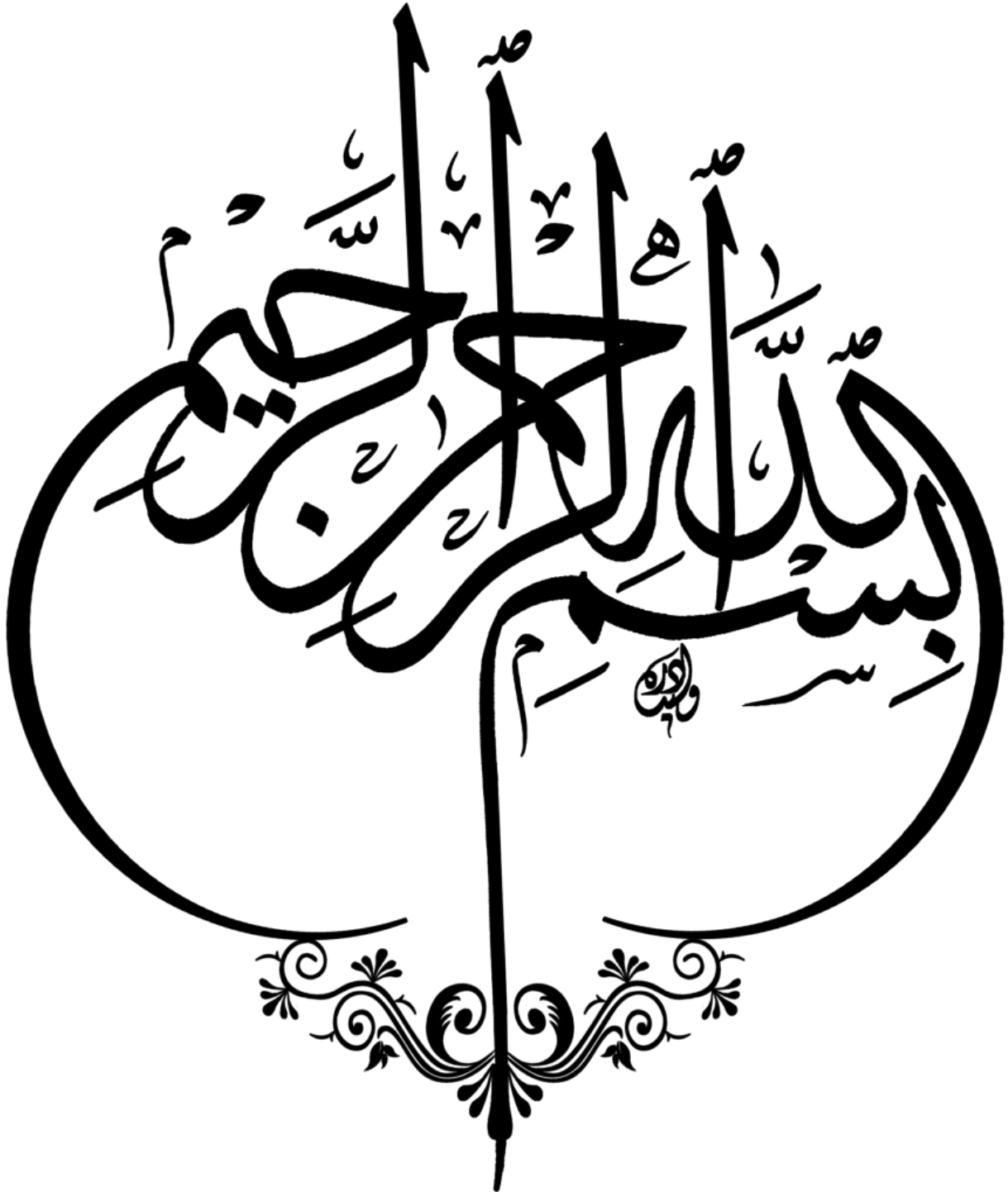
Réalisé par :

Remmache Faris

Mikimah Abd el Djalil

Encadré par : Rahim Mohamed

Année Universitaire 2022- 2023



Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant cette année. Nous souhaitons adresser nos remerciements aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année.

Nous tenons à remercier sincèrement **DR RAHIM MOHAMED**, qui nous a suivis avec une grande compétence et son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.

Dédicace

A mes très chers parents qui sont la lumière qui éclaire ma vie.

A mes frères et mes sœurs

A tous ceux qui m'aiment et qui ont cru en moi !

**Qu'ils trouvent dans ce modeste travail l'expression de ma reconnaissance,
mon amour, mon amitié et mon estime.**

FARIS

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Resumé	
Introduction générale	1
Chapitre I : Historique et Présentation de la RA1/K	3
I-1 Vue Historique sur l'Organisation de l'Activité Raffinage:	3
I-2 La Raffinerie de Skikda (RA1/K)	4
I-2.1 Présentation de la Raffinerie de Skikda :	4
I-2.2 Situation :	4
I-2.3. Construction :	5
I-2.4. Structure hiérarchique de la raffinerie de Skikda:	6
Direction du complexe RA1K	6
CHAUDIÈRES 1050- G- 1/2/3/4	7
1) Description générale	7
Chapitre II : Généralités sur les chaudières	9
Introduction	9
Différents types de chaudières :	9
II.2.2. Les chaudières à tubes d'eau	11
II.6. Conclusion :	26
Chapitre III : L'eau industriel	29
III.1. Introduction	29
III. 2.Effluent industriels	29
III.3.Principaux polluants de l'eau	30
III.3.1.Polluants physiques	30
III.3.2. Les éléments grossiers	30
III.3.3. Les sables	30
III.3.4. Les matières en suspension	30
III.3.5. Polluants chimiques	31
III.3.6.Pollution chimique minérale	31
III. 3.7.Pollution chimique organique	32
III.3.8. Polluants microbiologiques	35
I.3.9.Polluants métalliques	35
III.4. Paramètres physiques	36

III.4.1. Matières en suspension	36
III.4.2. pH	36
III.4.3. Température	37
III.4.4. Les paramètres chimiques	37
III.4.4.1. Demande chimique en oxygène (DCO) – Oxydabilité	37
III.4.4.2. Demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	38
III.4.4.3. Autres paramètres	38
III.4.4.4. Alcalinité	38
III.4.4.5. Turbidité	38
III.5. Epuration des eaux résiduaires industrielles	39
III.5.1. Les prétraitements	40
III.5.1.1. Dégrillage	40
III.5.1.2. Dessablage	40
III.5.1.3. Déshuilage – Dégraissage	41
III.6.1. Epuration physico-chimique	42
III.6.1.1. Particules colloïdales	42
III.6.1.2. Coagulation et Flocculation	45
III.6.1.3. Décantation	48
III.6.1.4. Flottation	49
III.6.2. Traitements Biologiques	51
III.6.2.1. Les procédés biologiques extensifs	51
III.6.2.2. Les procédés biologiques intensifs	51
Chapitre IV : Résultats	56
Interprétation des résultats	69
Résultats des analyses de l'eau de chaudière :	69
Présentation graphique des résultats d'analyses de l'eau de chaudière	70
Conclusion générale	74
Références Bibliographiques	75

Liste des figures

Fig I-1 : Situation géographique de la RA1K dans la zone industrielle deSkikda _____	5
Fig I-2 : historique de RA1K_____	6
Fig I-3 : Organigramme de la raffinerie de Skikda RA1K _____	6
Figure II -1 : Chaudière à tubes de fumée _____	10
Figure II -2 : Description chaudière à tubes de fumée _____	10
Figure II -3 : Chaudière à tubes d'eau. _____	12
Figure II -4 : Description chaudière à tubes d'eau _____	12
Figure II – 5 : Vue générale des approvisionnements et des mécanismes de la chaudière __	15
Figure III-1 : Dessableur circulaire à alimentation tangentielle _____	41
Figure III-2 : Principes de séparateur d'huile à CPI (Coalescent à plaque inclinée) . _____	42
Figure III-3 : Théorie du double couche . _____	44
Figure III-4 : Conditions hydrodynamiques des processus de coagulation-floculation _____	45
Figure III-5 : Phénomène de coagulation _____	45
Figure III-6 : Eau brute additionnée de coagulant . _____	46
Figure III-7: Chambre de mélange agitateur rapide _____	46
Figure III-8 : Phénomène de coagulation-floculation . _____	47
Figure III-9 : Décanteur floculateur, type clarifloculateurs, à pont racleur avec entraînement périphérique sans recirculation de boues . _____	49
Figure III-10 : Principe de flottation à air dissous (DAF) . _____	50
Figure III-11 : Schéma de principe d'une installation de traitement physico-chimique par aéroflottation [16]. _____	50
Figure III-12 : Principe de fonctionnement du traitement en forte charge _____	53
Figure IV – 1 : Dosage volumétrique du TA et TAC _____	56
Figure IV – 2 : Couple pH- mètre/Conductimètre _____	59
Figure IV – 3 : pH- mètre consort « C832 » _____	59
Figure IV – 4 : Conductimètre « E587 » _____	60
Figure IV – 5 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » _____	61
Figure IV – 6 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » Dosage du fer total _____	63
Figure IV – 7 : Turbidimètre AL450T-IR _____	64
Figure IV – 8 : Variation du TA de l'eau alimentaire en fonction du temps _____	66
Figure IV – 9 : Variation du TAC de l'eau alimentaire en fonction du temps _____	66

<i>Figure IV – 10 : Variation du pH de l'eau alimentaire en fonction du temps</i>	67
<i>Figure IV – 11 : Variation du TA de l'eau de chaudière en fonction du temps</i>	70
<i>Figure IV – 12 : Variation du TAC de l'eau de chaudière en fonction du temps</i>	70
<i>Figure IV – 13 : Variation du pH de l'eau de chaudière en fonction du temps</i>	71

Liste des tableaux

<i>Tableau II -1 : Caractéristiques de la chaudière Siterm</i>	13
<i>Tableau II -2 : Comparaison des performances entre chaudière à tubes de fumée et chaudière à tubes d'eau</i>	14
<i>Tableau III-1 : Caractéristiques physique et chimique d'une eau usée</i>	34
<i>Tableau III-2: Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de STOKES [15].</i>	43
<i>Tableau III-2 : Efficacité épuratoire de la décantation</i>	48
<i>Tableau IV – 1 : les normes pour les chaudières à tube d'eau</i>	65
<i>Tableau IV – 2 : Résultats d'analyse de l'eau alimentaire</i>	65
<i>Tableau IV – 3 : Résultats de calcul de pHS</i>	68
<i>Tableau IV – 4 : Résultats de calcul de l'indice de RYZNAR</i>	68
<i>Tableau IV – 5 : Résultats d'analyse de l'eau de Chaudière SITERM</i>	69

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de surveiller et de suivre la qualité de l'eau de la chaudière Dans le complexe pétrochimique de Skikda, plus précisément dans l'unité de puissance Électrique (CTE 2) Cela se fait en étudiant les facteurs physiques et chimiques de ces eaux, qui sont représentés.En pH, TA, TAC, TH, conductances, fer, phosphates, chlore et silice.Après des analyses effectuées au niveau de l'usine de la raffinerie de Skikda, nous avons constaté que tous les paramètres étaient dans les normes recommandées par les fabricants, à l'exception d Pour le pH et le fer n'étaient pas dans les normes, cela peut s'expliquer par la quantification L'adéquation de la morphine en chimiothérapie et celle du phosphate.Par conséquent, nous avons proposé quelques solutions pour éviter l'apparition de certains.Les problèmes qui peuvent survenir avec les chaudières, et parmi eux nous sommes.Ils comprennent l'érosion, l'encroûtement et les sédiments, dont la principale cause est leur présence oxygène dissous dans l'eau.Mots-clés : chaudière, traitement de l'eau, normes physico-chimiques,Raffinerie de Skikda corrodée

Abstract

The main objective of this study is to monitor and follow the water quality of the boiler In the petrochemical complex of Skikda, more precisely in the Electric power unit (CTE 2) This is done by studying the physical factors and chemicals of these waters, which are represented. In pH, TA, TAC, TH, conductances, iron, phosphates, chlorine and silica. After analyzes carried out at the level of the Skikda refinery plant, we found that all the parameters were within the standards recommended by the manufacturers, with the exception of For the pH and the iron were not within the standards, this can be explained by the quantification The adequacy of morphine in chemotherapy and that of phosphate .Therefore, we have offered some solutions to prevent the occurrence of some.Problems that can arise with boilers, and among them we are.They include erosion, crusting and sediment, the main cause of which is their presence of dissolved oxygen in the water.Keywords: boiler, water treatment, physico-chemical standards, Corroded Skikda Refinery.Abstract

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو مراقبة ومتابعة جودة مياه الغلاية في مجمع البتروكيماويات بسكيكدة وبشكل أكثر دقة في وحدة الطاقة الكهربائية (CTE 2) ويتم ذلك من خلال دراسة العوامل الفيزيائية والمواد الكيميائية لهذه المياه والتي ممثلة في الأس الهيدروجيني ، TA ، TAC ، TH ، الموصلات ، الحديد ، الفوسفات ، الكلور والسيليكا.بعد التحليلات التي أجريت على مستوى معمل تكرير سكيكدة ، وجدنا أن جميع المعلمات كانت ضمن المعايير الموصى بها من قبل الشركات المصنعة ، باستثناء حالة الأس الهيدروجيني والحديد لم تكن ضمن المعايير ، يمكن تفسير ذلك من

خلال القياس الكمي لمدى كفاية المورفين في العلاج الكيميائي وتلك الخاصة بالفوسفات ، لذلك قدمنا بعض الحلول لمنع حدوث بعض المشاكل. يمكن أن تنشأ مع الغلايات ومن بينها نحن: التعرية والقشور والرواسب ، وسببها الرئيسي وجود الأوكسجين الذائب في الماء. خلاصة

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est indispensable la vie. Elle constitue 70 % du poids du corps humain. Elle est utilisée pour de nombreux usages essentiels : la boisson, la préparation des repas, l'hygiène, l'entretien de l'habitation, les loisirs, la fabrication dans l'industrie, l'irrigation des cultures et l'abreuvement du bétail. Après avoir été captée, traitée, transportée, distribuée et puis consommée. Une eau potable est une eau qui l'on peut boire sans risque pour la santé, elle doit être claire, avoir une bonne odeur et bon goût. Il faut conforme aux normes de potabilités biologique et physico-chimique.

L'objectif du laboratoire du complexe RA1K est d'assurer le contrôle qualité de tous les produits, notamment, les produits issus de sa transformation ainsi que le contrôle de la qualité de l'eau industrielle. A cet effet, le laboratoire emploie des méthodes volumétriques et physico-chimiques mettant en œuvre des moyens humains et un matériel tels des chromatographes, spectrophotomètres et d'autres appareils utiles à des analyses immédiates. L'analyse de l'eau a pour objet de déterminer ses possibilités d'utilisation ; elle comporte principalement des analyses physico-chimiques. Elle fait connaître les emplois auxquels convient une eau donnée à des besoins industriels (eau de réfrigération ou de fabrication de vapeur ...) ; elle décèle les eaux qui risquent d'exercer une action chimique néfaste sur les canalisations et la qualité de la vapeur, elle facilite la mise au point des traitements qui supprimeront les inconvénients révélés.

Chapitre I

Historique et Présentation de la RA1/K

Chapitre I : Historique et Présentation de la RA1/K**I-1 Vue Historique sur l'Organisation de l'Activité Raffinage:**

À l'origine, le raffinage était une activité intégrée dans la société nationale SONATRACH.

A partir du 01 Janvier 1982, le raffinage et la distribution des produits pétroliers sont séparés et érigés en Entreprise Nationale de Raffinage et de Distribution de Produits Pétroliers (ERDP- NAFTAL).

L'E.R.D.P créée par décret N°80-101 du 06 Avril 1980 dans le cadre de la restructuration de SONATRACH, et mise en place le 01 Janvier 1982. L'E.R.D.P est placée sous tutelle du ministère de l'énergie et des industries pétrochimiques. A partir du 02 Février 1985, l'E.R.D.P a été transformée sous le nom commercial qui est "NAFTAL" cette dernière est subdivisée en 04 unités à savoir :

- ✓ Unité NAFTAL de Raffinage
- ✓ Unité NAFTAL de Distribution
- ✓ Unité NAFTAL Portuaire
- ✓ Unité NAFTAL de Maintenance

L'effectif de l'entreprise NAFTAL est environ de 35.000 travailleurs, elle est présente sur tout le territoire national.

A compter du 25 Août 1987 et par décret N°87-190 fut créé l'entreprise nationale "NAFTEC" de l'entreprise nationale NAFTAL et mise en place le 02 Janvier 1988. L'entreprise "NAFTEC" a pour mission de promouvoir, développer, gérer et organiser l'industrie du raffinage : traitement du pétrole brut et du condensât, ainsi que du brut réduit importé (BRI) en vue d'obtenir des produits raffinés destinés à la consommation nationale et à l'exportation.

Le nombre total des travailleurs est environ : 35000 travailleurs, présents sur l'ensemble de trois (03) raffineries (Skikda, Alger, Arzew) plus la direction générale.

La capacité totale de l'entreprise "NAFTEC" seulement est de (24.791.100 t/an).

Actuellement, Sonatrach gère l'ensemble des quatre (04) raffineries se trouvant dans les villes de : Skikda, Alger, Arzew et Hassi Messaoud.

Sonatrach « Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures S.P.A » est une entreprise publique algérienne et un acteur majeur de l'industrie pétrolière.

Sonatrach est une compagnie nationale algérienne d'envergure internationale ; c'est la

clé de voûte de l'économie algérienne.

Le groupe pétrolier et gazier Sonatrach intervient dans l'exploration, la production, le transport par canalisation, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés.

Sonatrach se développe également dans les activités de pétrochimie, de génération électrique, d'énergies nouvelles et renouvelables, de dessalement d'eau de mer et d'exploitation minière.

La création de Sonatrach, le 31 décembre 1963, répond au souci d'une mobilisation des ressources de la rente pétrolière perçue très tôt comme un élément moteur dans le développement de l'Algérie. Au fil des années, elle devient un puissant élément d'intégration nationale et de stabilité et de développement économique et social.

Sonatrach opère en Algérie et dans plusieurs régions du monde, notamment en Afrique (Mali, Tunisie, Niger, Libye, Égypte, Mauritanie), en Europe (Espagne, Italie, Portugal, Grande-Bretagne, France), en Amérique latine (Pérou) et aux États-Unis.

L'entreprise emploie 41 204 salariés (120 000 avec ses filiales), génère 30 % du PNB de l'Algérie. En 2005, sa production est de 232,3 millions de TEP, dont 11,7 % (24 millions de TEP) pour le marché intérieur.

En 2009, son chiffre d'affaires s'élevait à 77 milliards US\$. Par le chiffre d'affaires, Sonatrach est de loin la première compagnie africaine.

Sonatrach est le 12^{ème} groupe pétrolier au niveau mondial, le premier en Afrique et dans le Bassin méditerranéen, le 4^{ème} exportateur de GNL, le 3^{ème} 3e exportateur de GPL et le 5^{ème} exportateur de gaz naturel.

I-2 La Raffinerie de Skikda (RA1/K)

I-2.1 Présentation de la Raffinerie de Skikda :

Le complexe de raffinerie de pétrole de SKIKDA (RA1/K), a pour mission de transformer le pétrole brut provenant de Hassi-Messaoud avec une capacité de traitement (18 millions t/an), ainsi que le brut réduit importé (295.000 t/an).

I-2.2 Situation :

Cette raffinerie est située dans la zone industrielle à 7 Km à l'est de Skikda et à 2 Km de la mer, elle est aménagée sur une superficie de 190 hectares.

Elle est alimentée en brut algérien par l'unité de transport est ETU de Skikda (c'est une station intermédiaire de Hassi Messaoud). Le transport du pétrole brut est réalisé à l'aide d'un Pipe-line d'une longueur de 760 km depuis les champs pétroliers de Hassi-Messaoud.

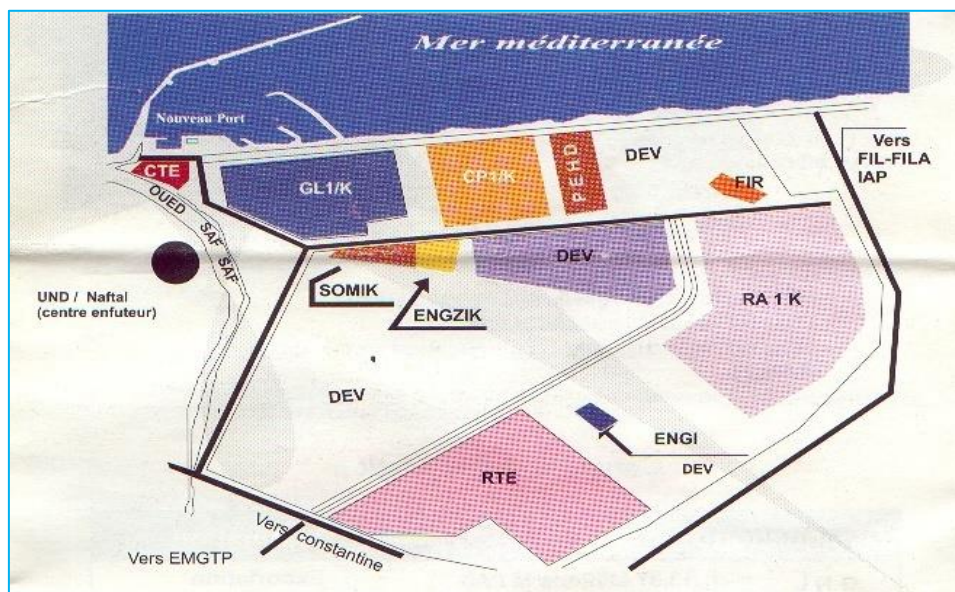


Fig I-1 : Situation géographique de la RA1K dans la zone industrielle deSkikda

I-2.3.Construction :

La raffinerie a été construite en janvier 1976 à la suite d'un contrat signé le 30 avril 1974 entre le gouvernement algérien et le constructeur italien SNAM PROGETTI et SAIPEM, il a été mis en vigueur du contrat une année après (le 11 mars 1975) assisté par la sous-traitante de trois principales sociétés nationales: SONATRO, SONATIBA et SNMETAL.

Le démarrage du chantier a commencé le 02 janvier 1976, et pris fin mars 1980, le démarrage progressif des unités de production est comme suit :

- 1^{ère} unité de distillation atmosphérique (U10) —————> en mars 1980.
- 1^{ère} unité de traitement et séparation des gaz (U-30) —————> en mars 1980.
- 2^{ème} unité de distillation atmosphérique (U11) —————> en juin 1980.
- 2^{ème} unité de traitement et séparation des gaz (U-31) —————> en juin 1980.
- Unité de production des bitumes (distillation sous vide U-70) —————> en juillet 1980.
- Unité de prétraitement et de reforming catalytique (U-100) —————> en septembre 1980.
- Unité d'extraction des aromatiques (U-200) —————> en octobre 1980.
- Unité de séparation du para xylène (U-400).
- Unité de stockage, mélange et expédition (MELEX.U-600).

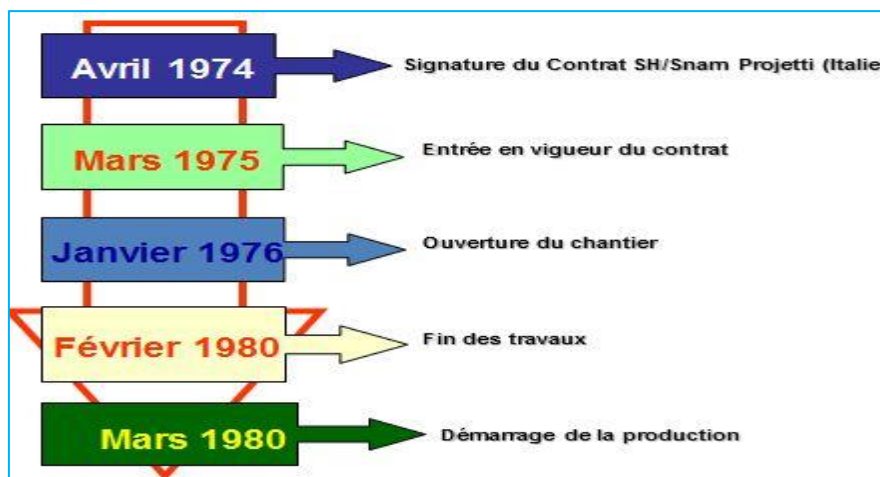


Fig I-2 : Historique de RA1K

L'inauguration officielle du complexe à lieu, environ 03 ans plus tard (27 novembre 1983), le coût total de cette réalisation étant de 3 402 872 000 DA (1 milliard \$).

Il faut noter qu'il y a deux nouvelles unités, construites par la société japonaise J-G-C Corporation, ces deux unités sont : l'unité de prétraitement et de reforming catalytique (platforming. U103) et l'unité de traitement et séparation des gaz (GPL.U104), ces deux unités ont démarré en octobre 1993.

I-2.4. Structure hiérarchique de la raffinerie de Skikda:

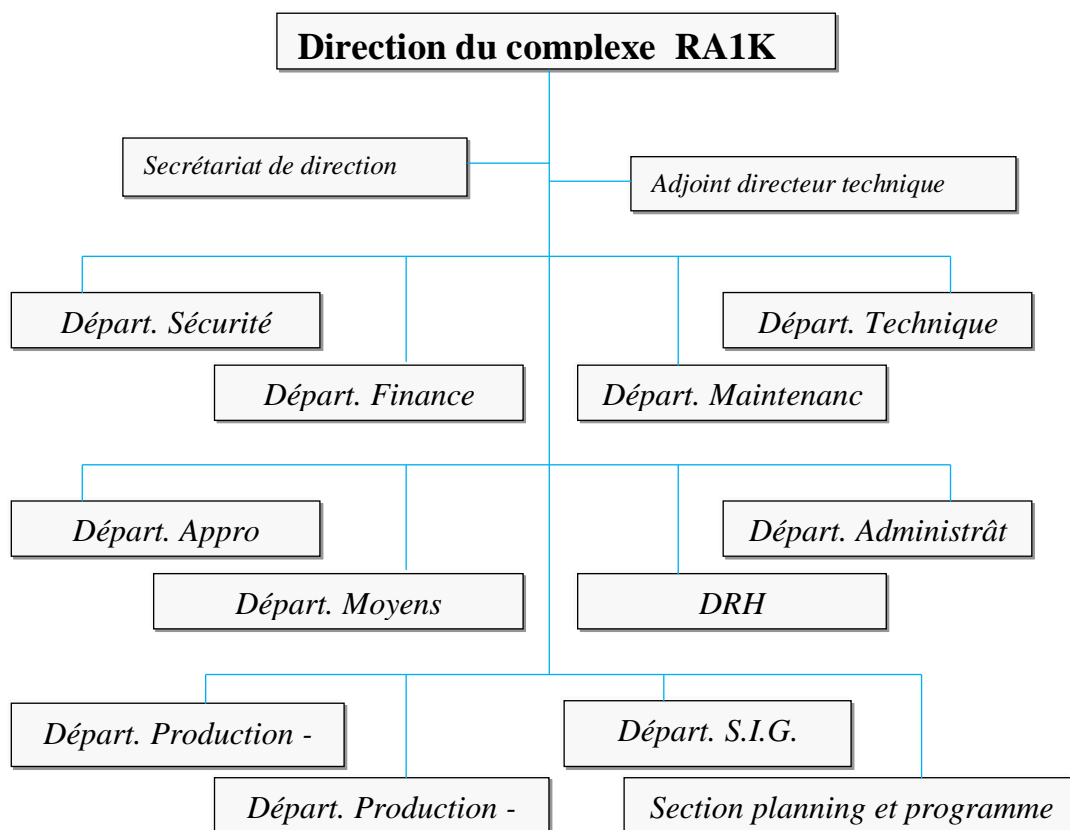


Fig I-3 : Organigramme de la raffinerie de Skikda RA1K

CHAUDIÈRES 1050- G- 1/2/3/4**1) Description générale**

La vapeur est produite par les trois chaudières **1050-G-1/2/3** dont deux sont en fonctionnement et une au repos la marche normale de la raffinerie.

Chaque chaudière a quatre brûleurs fonctionnant avec fuel gaz combustible et un ventilateur à tirage forcé, équipé d'un moteur électrique et d'une turbine à vapeur.

La chaudière est du type à tuyaux d'eau à circulation naturelle, avec deux corps cylindriques, l'un supérieur, l'autre inférieur, joints par un grand nombre de tuyaux lesquels emmagasinent la plus grande partie de la chaleur contenue dans les gaz de combustion.

La chambre de combustion est du type à écran tubulaire, les tuyaux formant les parois sont à ailettes et sont soudés l'un à l'autre de façon à former une chemise continue.

L'eau d'alimentation arrive au corps cylindrique supérieur et de là est distribuée, à travers plusieurs collecteurs secondaires, à tous les tuyaux de la chaudière.

Au corps cylindrique supérieur arrive la solution de phosphate trisodique, qui a le but d'abattre les possibles résidus de dureté.

La vapeur saturée qui se forme dans les tuyaux est recueillie dans le corps cylindrique supérieur et acheminée aux deux surchauffeurs et de là au réseau. Les surchauffeurs sont du type à U renversé, vertical, avec collecteurs dans la partie inférieure ? entre le premier et le deuxième banc de surchauffeurs il y a le désurchauffeur, de type à injection d'eau, pour la régulation de la température.

L'air de combustion fournie par le ventilateur est chauffé par un réchauffeur à vapeur et après par le réchauffeur rotatif du type Ljungström, qui transfère la chaleur contenue dans les fumées sortant de la chaudière à l'air qui arrive. L'air a la possibilité de bypasser le Ljungström, en passant à travers une autre conduite qui est généralement fermée.

L'air de combustion est réglé sur chaque brûleurs par un registre. Le parcours des fumées à l'intérieur de la chaudière peut être subdivisé en trois zones :

Chambre de combustion, zone des surchauffeurs et zone du faisceau des tuyaux des deux corps cylindrique. Pour éliminer la suie déposée sur les tuyaux de cette zone la chaudière est équipée avec deux souffleurs rétractiles et un fixe, fonctionnant avec la vapeur saturée, directement dérivée du corps cylindrique.

Chapitre II

Généralités sur les chaudières

Chapitre II : Généralités sur les chaudières**Introduction**

Une chaudière (*en anglais ; boiler*) peut être définie comme un système dans lequel l'énergie d'un combustible (entrée) est cédée et transférée à un liquide pris dans le cas des chaudières à vapeur, l'énergie produite permet de changer l'état d'une phase liquide à une phase gazeuse (sortie).

La chaudière est un dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique. Industriellement, on utilise les chaudières pour produire la vapeur nécessaire au fonctionnement des procédés. La source de chaleur peut être fournie par un combustible (gaz, fioul, charbon...) ou une résistance électrique. L'idée d'utiliser la vapeur comme force motrice remonte au 1er siècle Apr JC avec l'invention de l'éolipile par Héron d'Alexandrie. Mais ce n'est véritablement qu'à partir de la fin du 17ème siècle que les ingénieurs ont développé les machines à vapeur modernes. En 1800, l'ingénieur américain Evans mis au point la première chaudière à tubes de fumée qui servit dans les premières locomotives. La nécessité d'avoir des débits et pressions de vapeur importants aboutit en 1867 à la mise au point de la chaudière à tubes d'eau par les ingénieurs américains Babcock et Wilcox. Depuis, celles-ci se sont sans cesse perfectionnées permettant d'avoir notamment des rendements de 90,0 %.

Les chaudières à combustible Ce type de chaudière se compose de deux compartiments distincts :

- l'un dans lequel brûle le combustible : le foyer,
- un autre dans lequel l'eau est chauffée.

Différents types de chaudières :

On distingue ainsi deux types de chaudière à combustible en fonction de la circulation de l'eau à chauffer par rapport à la chaleur de combustion :

Les chaudières à tube de fumée Les chaudières à tube d'eau [3].

Les chaudières à tubes de fumée**a) Présentation :**

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée de 1 à 25 tonnes/heure, en basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fioul.



Figure II -1 : Chaudière à tubes de fumée

b) Fonctionnement :

Le tube foyer, qui se trouve dans le ballon même de la chaudière, sous le plan d'eau, collecte les gaz chauds en sortie de brûleur. Les gaz chauds, accumulés dans un premier caisson à l'arrière de la chaudière, sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans l'eau du ballon vers un second caisson à l'avant de la chaudière.

Un second groupe de tubes immergés emmène les gaz vers un troisième caisson à l'arrière de la chaudière, ce troisième caisson débouche sur la cheminée pour évacuation des fumées vers l'extérieur. Il y a donc circulation des gaz de combustion dans des tubes assurant, par conduction vers l'eau de la cuve, la vaporisation par apport de calories.

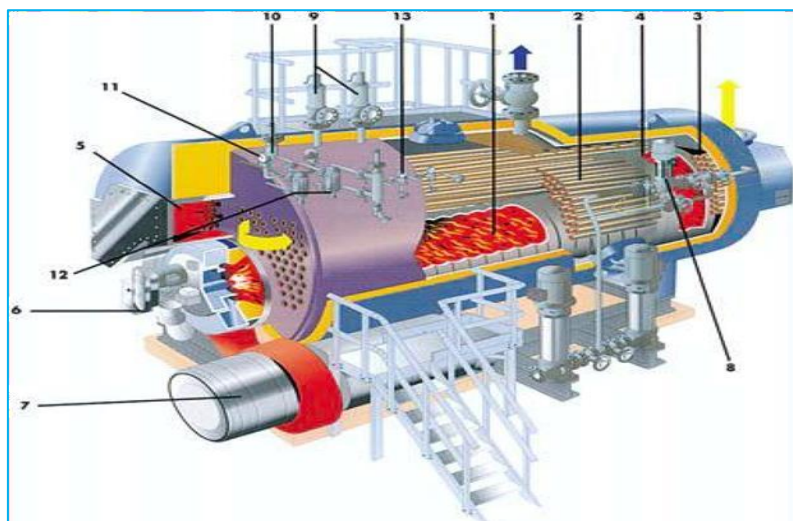


Figure II -2 : Description chaudière à tubes de fumée

1. Foyer
2. Tube de fumée 2^{ème} passe
3. Tube de fumée 3^{ème} passe
4. Boîte arrière à refroidissement par eau
5. Chambre de combustion
6. Brûleur
7. Ventilateur de combustion
8. Vanne de régulation
9. Soupape de sécurité
10. Indicateur de niveau de sécurité d'eau
11. Manomètre
12. Indicateur de niveau à glace
13. Bloc d'isolement

c) Précautions

Il est impératif de traiter l'eau de chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube foyer et des tubes de fumée. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mise en pression-température plus long, un risque de surchauffe au niveau de tube foyer, une surconsommation de combustible, une augmentation de la température des fumées au niveau de la cheminée...

d) Production de vapeur surchauffée

Il est nécessaire de recourir à un surchauffeur (source de chaleur indépendante), en aval de la chaudière à tubes de fumée.

II.2.2. Les chaudières à tubes d'eau

a) Présentation

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée supérieur à 20 tonnes/heure, en moyenne et haute pression. Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon ou déchets.



Figure II -3 : Chaudière à tubes d'eau.

b) Fonctionnement

Ce type de chaudière possède deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie inférieure) et ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs, dans cet ensemble circule l'eau qui se transforme en vapeur. Les gaz chauds produits par le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs, à l'intérieur de ceux-ci se produit la vaporisation. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur. Dans le domaine des hautes pressions, une pompe peut être installée pour faciliter cette circulation du haut vers le bas.

Il y a donc circulation de l'eau dans des tubes placés à l'intérieur d'une enceinte contenant les gaz chauds.

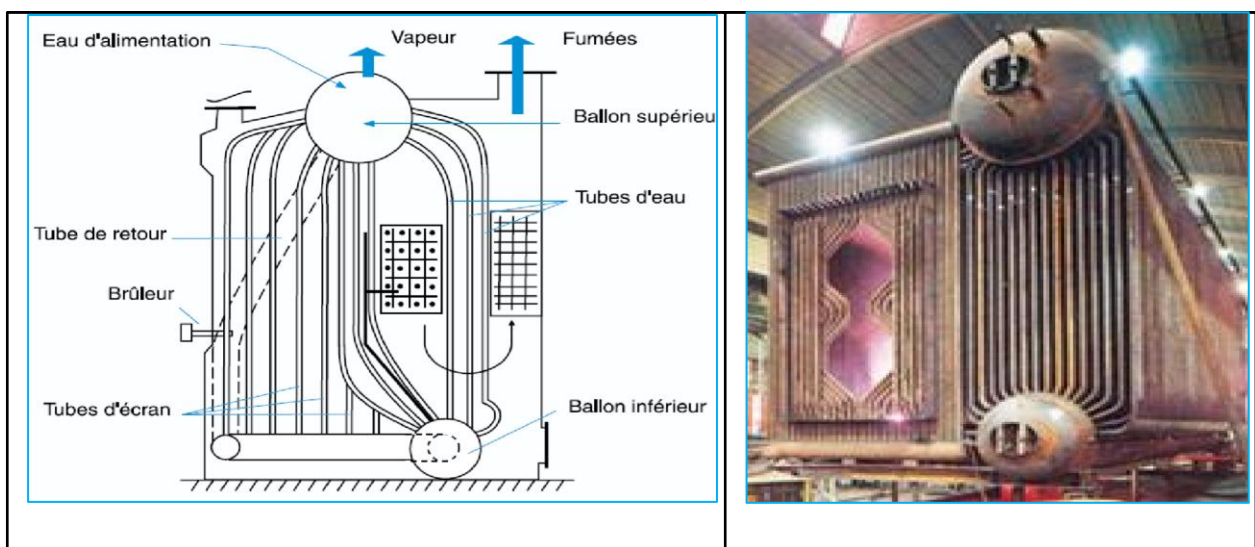


Figure II -4 : Description chaudière à tubes d'eau

c) Précautions

La formation de tartre dans les tubes serait préjudiciable au fonctionnement de la chaudière à tubes d'eau pour les mêmes raisons que celles évoquées à propos des chaudières à tubes de fumée. En outre, l'obturation des tubes pourrait se révéler dangereuse, ce qui ajoute à la nécessité de traiter l'eau de chaudière.

La paroi extérieure des tubes est exposée aux dépôts de suies et nécessite une action de ramonage pendant le fonctionnement de la chaudière. Cette action est obtenue par injection de vapeur ou d'air comprimé via un tube perforé.

d) Production de vapeur surchauffée

Dans une chaudière à tubes d'eau, la tuyauterie qui prend en charge la vapeur saturée retourne dans le foyer, les gaz chauds apportent à cette vapeur saturée une énergie supplémentaire qui en élève la température sans en modifier la pression. On obtient ainsi de la vapeur surchauffée à la sortie.

La chaudière que l'on a utilisée à la zone fluide est une chaudière à tube d'eau nommé Siterm de type SB-30/176/24OC/NG une marque Turque fabriquée en Istanbul en 2016

Tableau II -1 : Caractéristiques de la chaudière Siterm

Capacité	30 t/h
Volume	15 m³
Pression de travail	17 bars
Pression de design	25 bars
Pression max	45 bars
Pression de la valve de purge	22 bars
Température de travail	0-240°C
Température de l'eau d'alimentation	100~110°C
combustible	Gaz naturel
Pression d'alimentation	155 KW-28A-380V-50HZ

Comparaison des performances

Entre ces 2 types de chaudières il y a plusieurs paramètres qui diffèrent [3].

Tableau II -2 : Comparaison des performances entre chaudière à tubes de fumée et chaudière à tubes d'eau

Propriétés	Chaudières à tubes de fumée	Chaudières à tubes d'eau
Mise en route (à puissance équivalente)	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	rapide
Adaptation aux changements de régime	médiocre (inertie importante)	bonne
Surface de chauffe	moyenne	élevée
Sécurité	médiocres	bonne
Encombrement	faible	fort
Prix	limité	élevé
Applications usuelles	<ul style="list-style-type: none"> • moyennement élevée • 	<ul style="list-style-type: none"> • Importante
<ul style="list-style-type: none"> • Puissance • Débit 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,5 à 25 t/h • 10 à 20 bar 	<ul style="list-style-type: none"> • 4 à 200 t/h
<ul style="list-style-type: none"> • Timbre (pression max. d'utilisation) 		<ul style="list-style-type: none"> • 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (circulation forcée)

Mécanisme de la chaudière :

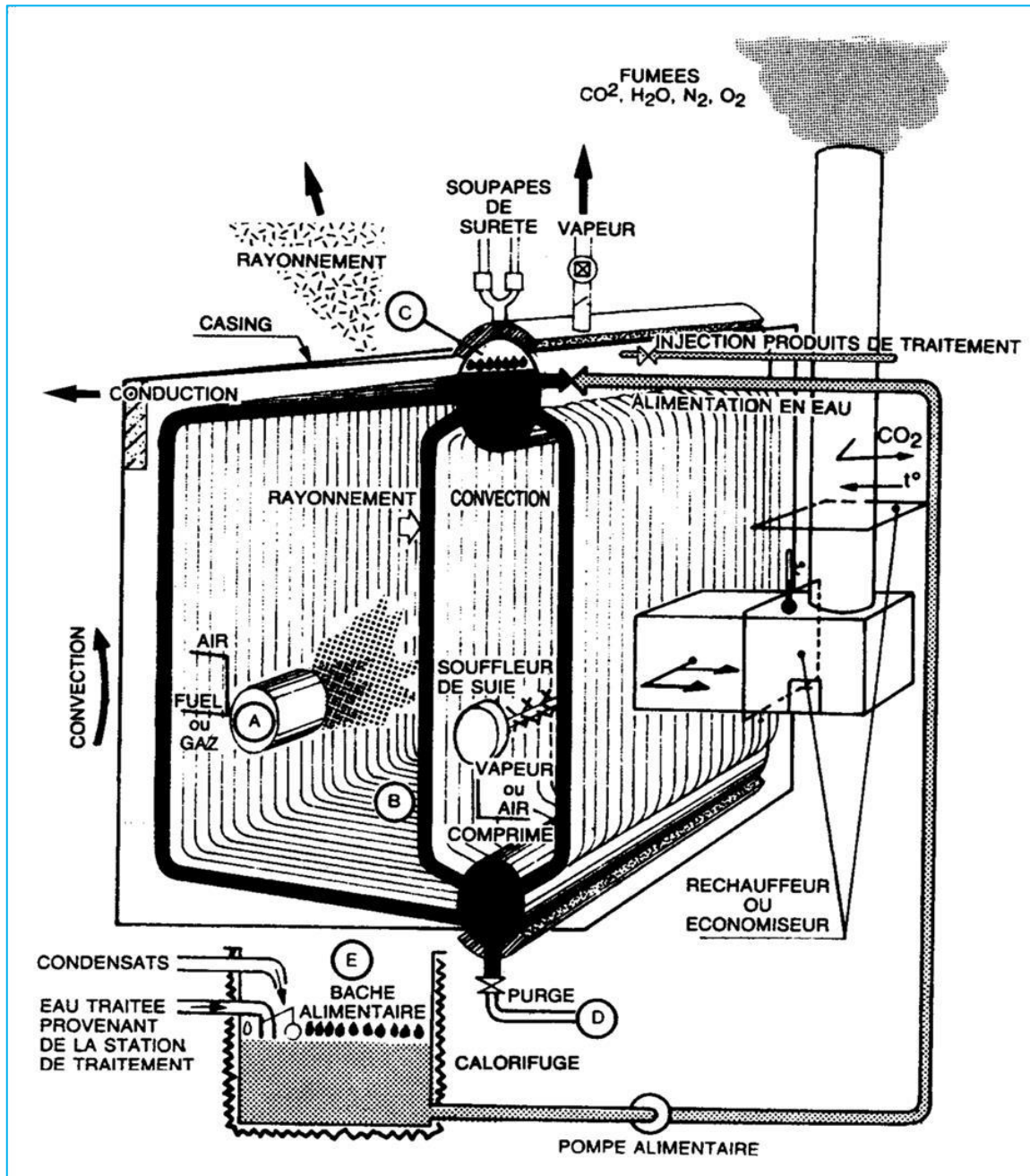


Figure II – 5 : Vue générale des approvisionnements et des mécanismes de la chaudière

Alimentation en eau

L'eau de chaudière provient de la station de traitement, de la bache de récupération des condensas, du dégazeur, l'appoint en eau dans la chaudière est réalisé grâce à une pompe alimentaire (souvent doublée) fonctionnant à une pression légèrement supérieure à la pression interne du ballon.

Extraction et purge continue sont deux opérations contribuant à maintenir la qualité de l'eau dans la chaudière, paramètre essentiel pour le bon fonctionnement de l'installation.

Extraction

L'eau d'alimentation contient des traces de produits de traitement, de sels minéraux et d'impuretés diverses ; les résidus se déposent au fond du ballon sous forme de boues et doivent être évacués à l'aide d'un robinet d'extraction. Ce robinet spécial, dont la manœuvre doit être :

- ✓ brutale,
- ✓ de courte durée (afin d'éviter d'entraîner trop d'eau avec les boues),
- ✓ répétée plusieurs fois par jour,

est généralement soit un robinet manuel équipé d'un levier allongé et d'un ressort de rappel en fermeture, soit un robinet $\frac{1}{4}$ tour automatisé. Il doit supporter la pleine ΔP et ne pas être endommagé par le passage des impuretés.

Dans un souci d'économies d'énergie, la vapeur de vaporisation, qui se forme lors de l'évacuation de l'eau chaude chargée dans ce que l'on appelle le pot de débouillage, peut être récupérée et envoyée dans un dégazeur, à température et pression faibles. Les boues et eau excédentaires sont par ailleurs évacuées après refroidissement.

Purge continue

Les produits de traitement et sels minéraux, arrivant avec l'eau d'alimentation et ne partant pratiquement pas avec la vapeur produite, ont tendance à se concentrer dans le ballon, qu'ils soient en solution ou en suspension. D'où la nécessité de procéder à une purge de déconcentration permanente, grâce à un robinet de dégazage spécial, à très faible débit. Le prélèvement continu se fait à environ 10,0 cm sous le plan d'eau, le dispositif pourra être mis à profit pour réaliser une prise d'échantillon pour analyse, après refroidissement.

Par ailleurs, la vapeur de revaporisation pourra être récupérée et réutilisée [3].

Les éléments constituant le site de la chaufferie

- a) **Bâche dégazant** : pour alimenter les deux chaudières en eau ultra pure avec une pression de service de 1.21 bar.
- b) **Bac pour eau déminéralisée** : assurer l'appoint de la bâche, d'une capacité de 300 M³.
- c) **Ballons** : Les chaudières sont équipées d'un ballon supérieur ou réservoir d'eau et d'un ballon inférieur. La vapeur occupe la partie supérieure du corps cylindrique et l'eau occupe la

partie inférieure et cela par différence de densité.

d) Faisceau tubulaire : Le faisceau tubulaire est constitué par des tubes verticaux ou fortement inclinés, ces tubes mettent les deux ballons en communication (interconnexion).

e) Appareils de récupération : Leur rôle est d'épuiser le plus possible la chaleur contenue dans les gaz brûlés avant leurs rejets dans l'atmosphère en améliorant le rendement de la chaudière. Trois appareils répondent à cet objectif.

➤ **Surchauffeur (S) :** Il est destiné pour produire de la vapeur surchauffée à partir de la vapeur saturée sortant du ballon supérieur, il est constitué d'un faisceau de tube en acier recourbé en serpentin placé devant le circuit des fumées.

➤ **Economiseur (ECO) :** C'est un échangeur de chaleur qui sert à récupérer une partie de la chaleur des fumées sortant de la chaudière à une température assez élevée et à les transmettre à l'eau d'alimentation. L'eau circule à l'intérieur des tubes et les fumées à l'extérieur.

➤ **Réchauffeur d'air (RA) :** Le réchauffeur d'air est situé entre l'économiseur et la cheminée, la récupération de la chaleur des fumées présente plusieurs avantages.

- amélioration du rendement par réduction des pertes par les fumées ;
- accélération de la réaction de combustion ;
- diminution de l'encrassement par réduction des suies du fait d'une combustion plus complète ;
- facilite le séchage et l'allumage des combustibles liquides.

f) Foyer « chambre de combustion » : La chambre de combustion est tapissée de tube d'eau qui composent les surfaces de chauffe soumises au rayonnement de la flamme.

g) Appareils de sécurité : Les causes d'explosion de la chaudière sont :

- l'élévation excessive de la pression ;
- l'abaissement du niveau d'eau.

Pour protéger la chaudière on utilise les dispositifs suivants :

- deux soupapes de sûreté au moins (installées sur le ballon supérieur), réglées de manière à s'ouvrir dès que la pression devient égale à la pression de calcul indiquée sur le timbre opposé sur la chaudière ;
- un manomètre sur le quel est clairement indiqué la valeur de la pression de calcul, permet à l'opérateur de vérifier que la pression de fonctionnement lui est

effectivement inférieure ;

- un autre dispositif de sécurité est installé sur la chaudière et peut provoquer l'arrêt total de l'alimentation en combustible si le niveau d'eau dans le ballon chute et cela pour éviter la déformation ou l'éclatement des tubes à cause de l'augmentation brusque de température ;
- par contre un autre dispositif de sécurité permet de diminuer le débit d'eau d'alimentation en cas d'augmentation de niveau dans le ballon supérieur [4].
- Rôle de la circulation naturelle : La circulation naturelle a deux principaux objectifs :
 - assurer le refroidissement correct des tubes situés dans les zones les plus chaudes ou exposés au rayonnement direct du feu, là où ils reçoivent le flux maximal de chaleur ;
 - assurer la génération de vapeur saturée, c'est-à-dire le passage du fluide chauffé de l'état eau à l'état émulsion et vapeur.

Circuits d'une chaudière :

La chaudière est constituée de deux circuits :

- le circuit air-gaz de combustion (porteur des calories de la combustion auquel on s'intéresse dans notre étude) ;
- le circuit eau-vapeur (récepteur de ces mêmes calories).

a) Le circuit air-gaz de combustion :

L'air destiné à la combustion est poussé par le ventilateur de soufflage, il traverse d'abord un réchauffeur où il récupère la chaleur encore contenue dans les gaz de sortie de la combustion ; ce qui a pour effet d'élever sa température. Puis l'air est envoyé aux brûleurs et participe à la production de la chaleur. Les gaz de combustion produits dans cette chambre de combustion cèdent une partie de la chaleur aux tubes vaporisateurs, ces gaz sont ensuite véhiculés au niveau des surchauffeurs où ils cèdent encore de la chaleur.

b) Le circuit eau- vapeur

L'eau d'alimentation est réchauffée dans l'économiseur avant d'être envoyée au ballon supérieur. Le ballon supérieur alimente en eau le ballon inférieur au moyen des tubes d'alimentation. Dans les tubes vaporisateurs l'eau se transforme en vapeur. La vapeur est collectée et retourne au ballon.

La circulation de l'eau dans les tubes se fait naturellement. En effet, à mesure que l'eau monte en température elle se charge de bulle de vapeur et devient de ce fait plus légère : elle a donc tendance à monter.

Par contre dans les tubes d'alimentation venant du ballon, l'eau est moins chaude, donc plus dense et de ce fait elle descend. Cette circulation naturelle est dite thermosiphon. Un schéma général de circulation eau et vapeur dans la chaudière.

Principe général de fonctionnement

Les chaudières à tube d'eau diffèrent des chaudières à tubes de fumées car l'eau circule à l'intérieur des tubes et la source de chaleur est à l'extérieur.

Ceci implique des limites de pression beaucoup plus élevées car la contrainte circonferentielle est plus faible. Ces chaudières sont utilisées lorsque l'on souhaite des productions vapeur, des pressions importantes ou de la vapeur surchauffée. Ces chaudières sont beaucoup plus onéreuses que les chaudières à tubes de fumées plus compactes.

A travers le monde, nous pouvons retrouver des chaudières à tubes d'eau jusqu'à des pressions de 270 bars. La gamme des chaudières à tubes d'eau s'étend de 2000 kg/h à 3500 Tonnes/h. Les plus petites peuvent être livrées montées en une partie. Les plus grosses sont assemblées sur site. Les chaudières à tubes d'eau fonctionnent sur le principe de la circulation d'eau.

Exploitation

Les appareils de contrôle et de sécurité équipant la chaudière et ses auxiliaires sont définis pour un fonctionnement en mode Surveillance Permanente depuis un local voisin selon la définition de la norme NFE 32020-1.

Ce mode d'exploitation nécessite la présence d'un opérateur près de la chaudière au moment du démarrage et en cas d'arrêt sur incident ; il n'y a pas de séquences programmées pour les démarrages et les arrêts.

Construction et architecture

Le brûleur est constitué des composants suivants :

1. Dispositif d'alimentation en air à double flux avec deux chambres.
2. Platine avant- registre à air avec un registre à air à réglage manuel monté.
3. Platine avant- dispositif d'alimentation en air.
4. Platine centrale avec raccordement des anneaux de distribution du gaz, tuyau pour le contrôle des flammes, trou de regard et tuyau de support pour écran d'allumage.

5. Anneau de distribution de gaz avec 8 lances à gaz pivotantes et extensibles.
6. Allumeurs électriques à gaz.
7. Pièce intercalaire.
8. Tuyau de support pour écran d'allumage avec écran d'allumage en rotation.
9. Contrôleur de flammes compact.

Mise en service des brûleurs et fonctionnement

La mise en service des brûleurs est réalisée suivant les instructions et les conditions ci-après

a) Brûleurs

- Contrôler si les brûleurs sont montés correctement et si toutes les connexions et raccords aux parties correspondantes des brûleurs sont correctement effectués.
- Contrôleur de flammes monté et câble électrique raccordé.
- Raccords d'air de refroidissement pour contrôleur de flammes monté.
- Robinet à boisseau sphérique ouvert au tuyau optique.
- Allumeur monté, câble électrique pour transformateur et contrôleur d'ionisation raccordé.
- Chambres à air de gaz d'allumage et de refroidissement montées.
- Commande pneumatique et interrupteur de fin de course par volet d'air secondaire monté et ajusté.
- Robinets à boisseau sphérique de la commande pneumatique d'approvisionnement en air de commande ouvert.

b) Combustion de gaz naturel

Le gaz à brûler passe dans l'anneau de distribution du gaz du brûleur par un raccord avec une quantité maximale de 6988 Nm³/h, une pression maximale de 2,0 bars. De là, le gaz se répand vers les 8 lances à gaz réparties uniformément sur la périphérie.

Les tuyères à gaz qui sont vissées sur les lances à gaz sont obliquées sous un angle. Sur ce biseau, il y a les trous des tuyères dont les dimensions dépendent de la quantité de gaz qui doit être brûlée et de la pression de gaz qui est à disposition. Le gaz émergeant à grande vitesse rencontre l'air de combustion déplacé par l'écran d'allumage en rotation. De cette façon, un mélange est créé qui est facile à allumer. Ce mélange est allumé par un allumeur électrique à gaz.

Approvisionnement en air de combustion des brûleurs

Le réglage de la quantité d'air de combustion ainsi que le mesurage sont effectués en commun pour les deux brûleurs. L'air de combustion est partagé en air primaire et air secondaire dans le dispositif d'alimentation en air. Ainsi, deux chambres séparées sont disposées à l'intérieur du dispositif d'alimentation en air. La chambre pour l'air primaire est munie d'un volet d'incidence manuel pour permettre une répartition optimale des quantités d'air de combustion [4].

a) Air primaire

- L'air primaire est conduit sans rotation dans le foyer par le tuyau d'air de chemise.
- L'écran d'allumage en rotation provoque une certaine rotation afin de stabiliser la flamme.

b) Air secondaire

L'air complémentaire entre encore dans le dispositif d'alimentation en air par un raccord. Ensuite, il traverse le registre à air qui se compose de pales directrices courbées. Puis, il passe dans le foyer par le passage annulaire entre le tube à air central et la pièce intercalaire. Suivant l'incidence des pales directrices, la rotation d'air est plus au moins forte. Les pales directrices sont ajustées à l'aide d'un levier actionné à la main et qui remue toutes les pales uniformément. De cette manière, les bords de la flamme sont refroidis, ce qui a pour conséquence une réduction de NOX. Plus le registre est fermé, plus l'air tourne et plus la flamme se raccourcit. Ainsi, il est possible dans certaines limites d'influencer la forme de la flamme par la rotation d'air. Le réglage du registre à air s'effectue pendant la mise en service et reste alors inaltéré.

c) Allumeur

L'allumage du brûleur s'effectue par un allumeur électrique à gaz qui utilise du gaz naturel comme gaz d'allumage. La flamme de l'allumeur est contrôlée par une électrode d'ionisation montée à l'allumeur qui est interrogée par un relais de flammes.

d) Contrôle flamme du brûleur principal

Chaque brûleur est surveillé par son propre contrôleur de flammes compact. Dans le cas où le contrôleur de flammes n'émet aucun signal de flammes, le brûleur concerné s'arrête sur le réglage du brûleur.

e) Approvisionnement en air de commande

L'air de commande est nécessaire à la manœuvre des soupapes d'arrêt d'urgence pneumatiques et des commandes pneumatiques pour la soupape de réglage du gaz et les volets d'air de combustion.

L'approvisionnement en air de commande pour l'installation de chauffe résulte du système d'air de commande. La conduite d'alimentation peut être arrêtée à l'aide d'un robinet à boisseau sphérique.

De la conduite d'alimentation, les câbles de dérivation dérivent à la soupape de réglage de gaz naturel, à la soupape pneumatique pour la décharge de pression de gaz naturel, à la commande pneumatique du régulateur de rotation de la soufflante d'air de combustion, aux combinaisons d'arrêt d'urgence de gaz naturel spécifiques aux brûleurs et aux commandes pour les volets d'air de combustion. Les câbles de dérivation, pour les récepteurs pneumatiques, sont munis de robinets en boisseau sphérique pour l'arrêt.

La pression d'air de commande minimale est contrôlée par un manostat qui arrête l'installation de chauffe de la chaudière quand la pression exigée est inférieure à 3,0 bars.

f) Démarrage depuis l'état froid

La croissance de la pression et de la température doit se faire graduellement, à la fois pour éviter des disparités internes de température, génératrices de contraintes, et pour faire face au problème du gonflement qui apparaît avec la création des premières bulles de vapeur.

Au premier démarrage (mise en marche après un long temps d'arrêt) la température de la chaudière est inférieure à 100°C, celle-ci est mise en communication avec l'atmosphère (vannes d'évents ouvertes) ; la circulation interne et l'homogénéisation des températures sont assurées en circulation naturelle par la différence de densité des colonnes d'eau plus ou moins chauffées, ce qui limite à 50/60 °C/h la vitesse d'échauffement admissible. Avec la circulation assistée par pompe, cette vitesse peut être doublée.

Lorsqu'une température de 100°C est atteinte sous 1 bar absolu de pression atmosphérique, l'apparition des bulles de vapeur provoque une augmentation très rapide du volume occupé par le fluide chauffé dans les tubes et chasse l'eau vers le réservoir : c'est le

phénomène du gonflement traité dont ce que l'on met un certain temps à maîtriser (arrêt de l'alimentation, purges, etc.). Ce n'est que vers 4 ou 5 bars que le système revient à peu près à l'équilibre et que l'on peut fermer progressivement les évènements, l'air antérieurement contenu en chaudière ayant été chassé pendant cette période.

g) Démarrage à chaud

Ce type de démarrage peut avoir lieu après un arrêt de courte durée (un quart d'heure, par exemple), dans ce cas, la procédure la plus directe consiste à reprendre très rapidement la charge, en profitant de l'inertie thermique des tuyauteries de liaison pour ne pas soumettre la turbine (ou un autre organisme connecté à la chaudière) à un coup de froid.

Après un arrêt de plus longue durée, huit heures par exemple, la turbine n'a pratiquement pas perdu de température alors que la chaudière a perdu une partie de sa pression et, repartant de zéro, n'obtiendra pas la température de surchauffe. Il est indispensable alors d'assurer un minimum de débit au moyen d'un by-pass pour avoir suffisamment de feu et faire remonter l'ensemble des températures.

h) La combustion

La combustion dans la chaudière, se produit grâce à des brûleurs dans un foyer ; on introduisant de l'oxygène nécessaire à cette combustion sous forme d'air. La combustion par les brûleurs dans le foyer est réalisée par un mélange d'air comburant et d'un combustible

Les produits de la combustion sortent à haute température du foyer sous forme de fumées et passent à travers des échangeurs qui transfèrent leur chaleur à de la vapeur saturée pour la surchauffer dans des surchauffeurs et des resurchauffeurs et progressivement, dans la mesure où la température des fumées diminue, vers des faisceaux vaporisateurs et vers l'économiseur, pour les rejetées dans l'atmosphère par une cheminée.

Le gaz naturel est un gaz incolore, inodore, et inflammable quand on l'extrait du sous-sol. Afin de pouvoir le détecter en cas de fuite, on lui rajoute une odeur caractéristique. C'est le combustible fossile le plus « propre ». Sa combustion ne génère ni poussière, ni suie, ni fumée. Elle dégage du dioxyde de carbone CO₂, de la vapeur d'eau, un peu d'oxyde d'azote NO_x et très peu de dioxyde de soufre SO₂.

Pour une production d'énergie équivalente, il dégage :

- Deux fois moins d'oxyde d'azote que le fioul et le charbon ;
- 30% de moins de dioxyde de carbone que le fioul lourd (fioul non catalysé) ;

- 45% de moins de dioxyde de carbone que le charbon.

Généralités sur le transport et le transfert de l'énergie thermique : [5]

De tous temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques. En effet, dans certains systèmes réactionnels, c'est la vitesse des échanges de chaleur et non la vitesse des réactions chimiques qui détermine le coût de l'opération (cas de réactions fortement endo- ou exothermique). En outre, de nos jours, par suite de l'accroissement relatif du prix de revient de l'énergie, on recherche dans tous les cas à obtenir le rendement maximal d'une installation pour une dépense d'énergie minimale. Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux, et on peut essayer de les différencier par les buts poursuivis dont les principaux sont :

- l'augmentation de l'énergie transmise ou absorbée par une surface,
- l'obtention du meilleur rendement d'une source de chaleur,
- la réduction ou l'augmentation du passage d'un débit de chaleur d'un milieu à un autre.

Le potentiel qui provoque le transport et le transfert de l'énergie thermique est la température. Si deux points matériels placés dans un milieu thermiquement isolé sont à la même température, on peut affirmer qu'il n'existe aucun échange thermique global entre ces deux points dits en équilibre thermique (il s'agit bien d'un équilibre thermique car chacun des points matériels émet une énergie thermique nette de même module, mais de signe opposé). Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois (3) façons :

Par conduction :

Ce transport de chaleur se produit au sein d'une même phase, au repos ou mobile, mais tranquille (absence de remous), en présence d'un gradient de température. Le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule

adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque. Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides que sont les gaz et les liquides, la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction.

Le flux de chaleur (dimension W/m^2) transféré par conduction dans une direction donnée est proportionnel au gradient de température dans cette direction. Cette loi, dite Fourier postulée dès 1822, est donc telle que la composante sur l'axe Ox du flux est égale à :

$$Q_x = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad \text{—}$$

Avec

Q_x : Direction débit de chaleur par unité de temps [J/s]

x : Direction du gradient de température et de déplacement de la chaleur λ : conductivité ou conductibilité thermique [W/m.K]

A : Surface d'échange [m^2] T : Température [K]

Par convection :

Le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement en présence d'un gradient de température. Par suite de l'existence du transfert de chaleur d'une phase à l'autre, il existe dans la phase mobile des fractions du fluide (ou agrégats) ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masse volumique due aux différences de températures (on parle alors de convection libre ou naturelle) ou à des moyens purement mécaniques (on parle alors de convection forcée). Lorsqu'un fluide est en écoulement, une partie du transfert de chaleur dans le fluide se fait également par conduction et, dans le cas d'un fluide transparent, un transfert de chaleur par rayonnement peut accompagner les deux transferts précédents.

La loi fondamentale qui régit la convection est la loi de NEWTON :

$$Q = h.A. (T_s - T_f)$$

Q : Débit de chaleur travers le solide [W]

h : Coefficient de chaleur [$W/m^2.K^{-1}$] A : Surface d'échange [m^2]

T_f : Température moyenne de fluide [K] T_s : Température moyenne de fluide [K]

Par rayonnement :

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchi, une autre transmise à travers le

corps (dit diathermique si tout est transmis), et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur. Si on place dans une enceinte deux corps capables d'émettre un rayonnement thermique, il existe entre ces deux corps à températures différentes un échange de chaleur dû à l'absorption et à l'émission de ces rayonnements thermiques. Cet échange de chaleur est désigné habituellement sous le nom de rayonnement. Les transferts par rayonnement se poursuivent même lorsque l'équilibre thermique est atteint, mais le débit net de chaleur échangé est nul. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière, et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques. Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique de l'appareil de transfert. Nous pouvons dire dès à présent, qu'aux températures ordinaires, le transport par rayonnement est négligeable, mais il peut devenir notable et prépondérant lorsque le niveau de température augmente. En outre, signalons que certains transferts thermiques sont accompagnés d'un transfert de matière entre deux phases. Le flux de chaleur transféré en présence d'un changement de phase dépend de la nature et des propriétés physico-chimiques des phases en présence. C'est le cas de l'ébullition, de la condensation, mais aussi des problèmes d'humidification, de séchage, de cristallisation, etc. Dans ce qui suit nous allons présenter, pour les trois types de transport de la chaleur, les lois générales qui les gouvernent. Puis nous traiterons, de manière simple, quelques applications où le mode de transport de chaleur étudié est prédominant.

La relation de base de rayonnement thermique est celle de STEPHAN BOLTZMANN :

$$e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

e : Densité du flux de chaleur

σ : La constante de Stephan-Boltzmann qui vaut dans le système international 5.666971 $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$

ε : Emissivité thermique [adimensionnelle] T : Température du corps [K]

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit la chaudière étudiée, son fonctionnement et ces différents éléments périphériques. Cette étude nous pouvons conclure que la chaudière est un système assez complexe vue sa composition en plusieurs sous-systèmes, Chacun d'entre eux

réalise une fonction spécifique (combustion, évaporation, surchauffage...etc.) et quelle nécessite un haut niveau de surveillance pour obtenir un degré de sécurité suffisant.

Chapitre III

L'eau industriel

Chapitre III : L'eau industriel

III.1. Introduction

L'objet de traitement étant de ramener les teneurs de corps indésirables en dessous des valeurs fixés par les normes de qualité choisies, le traitement ne portera pas sur l'eau elle-même mais sur les corps qui s'y trouvent en suspension vraie ou colloïdale et en solution.

D'une manière générale, une installation de traitement des rejets comporte classiquement la succession des stades de traitement suivants Prétraitements ;

- ❖ Traitements physico-chimiques ;
- ❖ Traitements biologiques ;
- ❖ Traitements tertiaires ou de finitions.

III. 2.Effluent industriels

Les eaux résiduaires industrielles (ERI) sont les déchets liquides résultant, selon les activités exercées, de l'extraction ou de la transformation de matières premières en produits industriels (produits primaires), de la transformation éventuelle de ces produits primaires (produits dérivés), ainsi que de l'utilisation des produits primaires ou dérivés pour la fabrication de biens de consommation. Tant au point de vue de leur volume qu'à celui de leur composition, et contrairement aux eaux résiduaires domestiques, les caractéristiques des eaux résiduaires industrielles sont variables pour chaque branche industrielle, voire pour chaque établissement d'une même branche [3].

L'industrie rejette bon nombre de substances qui vont polluer les rivières et les nappes, parfois même d'une manière d'autant plus pernicieuse que l'on n'en connaît pas les effets à long terme. On distingue selon leur caractère [3] :

- ❖ **Eaux à caractère minéral dominant** : c'est les eaux provenant des carrières (sidérurgie), mines et toutes activités d'extraction de minerais « industrie chimique minérale ».
- ❖ **Eaux à caractère organique dominant** : c'est les eaux provenant des usines, résidus industriels alimentaire tels que les laiteries, elles contiennent des graisses, protéines, glucides,...
- ❖ **Eaux à caractère mixte** : contiennent un ou plusieurs constituants biodégradables, mais aussi d'autres constituants provenant des raffineries, usines pétrochimiques, papeteries. En plus de matières organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des hydrocarbures dissous émulsionnés ou sous forme de film superficiel, tensioactifs, des phénols.

III.3.Principaux polluants de l'eau

III.3.1.Polluants physiques

La pollution physique représente les éléments solides entraînés par l'eau. Ils se subdivisent en plusieurs catégories selon leur nature et leur dimension [3].

III.3.2. Les éléments grossiers

Leur dimension est suffisamment grande pour être retenue par de simples grilles. Dans les eaux usées domestiques, ces déchets sont en général : les bouteilles plastic, les cheveux, les épilateursetc. [3].

Certaines industries de par leur spécificité, rejettent des éléments grossiers (industries textiles, papeteries...)

Les eaux de ruissellement entraînent aussi beaucoup d'éléments (brindilles, feuilles d'arbres...).

Tous ces éléments représentent un type de gêne particulier, au niveau des stations d'épuration, dont elles perturbent le fonctionnement, ou dans les exutoires où elles s'accumulent [3].

III.3.3. Les sables

Les sables sont des particules minérales d'une certaine dimension. Ils sont généralement à base de silice ou de composition minérale équivalente. Leur masse spécifique est de 2,5 à 2,6 g/cm³, ce qui permet leur élimination par simple décantation [3].

III.3.4. Les matières en suspension

En dehors des sables les eaux usées transportent d'autres matières solides en suspension désignées par le terme MES. Ces matières qui constituent les boues d'une eau usée se subdivisent soit selon leur nature soit selon leur dimension [3].

• **Selon leur dimension** : On distinguera les matières qui sont décantables (après 2h de repos une partie de ces MES décantent) on les désigne par « matières décantables » ces matériaux quelque soit leur nature peuvent être récupérés par simple décantation : cyclée décantation primaire .D'autres éléments ne décantent pas soit par leur poids spécifique soit par leur dimension soit par leur nature colloïdale. Ces éléments nécessitent des procédés de séparation plus élaborés [3].

• **Selon leur nature** : La nature des matières solides en suspension peut être soit minérale soit organique. Les polluants minéraux constituent une gêne physique pour l'environnement mais

n'évoluent pas dans le temps. Les rejets minéraux colmatent les sols sur lesquels ils sont évacués aboutissant ainsi à l'asphyxie de ce sol ou contribuent à une pollution par leur volumes (dépôts) ainsi que les polluants organiques évoluent au contraire dans le temps car ils sont constitués de matières vivantes qui ont besoin d'oxygène et qui dégageront des odeurs par putréfaction dans ce cas les métabolismes continuent créant des besoins et occasionnant des rejets qui gênent l'environnement ces éléments doivent être traités avant leur évacuation [3].

III.3.5. Polluants chimiques

La pollution chimique d'une eau est autrement plus complexe et peut provenir de plusieurs sources [3].

On distingue selon la nature de la pollution chimique [3] :

- Les éléments chimiques minéraux.
- Les éléments chimiques organiques.

III.3.6. Pollution chimique minérale

L'eau étant un très bon solvant permettra la mise en solution de nombreux composés avec lesquels elle sera en contact.

La dissolution des sels, la corrosion des métaux et dissolution des acides et des bases sont des phénomènes qui donnent lieu à des eaux de rejets caractérisées par certaines formes de pollution dont les plus représentatives sont [3] :

✓ La température

L'élévation de la température dépend du mode d'utilisation de l'eau avant son rejet et surtout le parcours de l'eau avant l'exutoire ou la station d'épuration. En général l'eau doit être évacuée vers l'environnement à des températures inférieures à 30°C une eau plus chaude constitue une pollution.

✓ Le PH

Le PH d'une eau est du à la concentration de cette eau en ions H^+ et OH^- une eau équilibrée aura un PH neutre de 7. Des variations trop élevées du PH par rapport à cette valeur moyenne de 7 constitue une pollution. Des eaux dont le PH présentent de grands écarts par rapport à la neutralité sont polluées.

✓ Les sels

Les sels dissout chargent une eau en cations et en anions dont la nature influe à des degrés différents sur l'environnement [3].

a) Les chlorures

En plus de l'agressivité et de la minéralisation qu'ils confèrent à ces eaux, des taux élevés modifient la saveur de l'eau et contribuent aux dépôts de sels néfastes pour l'agriculture [3].

b) Les sulfates (SO₄⁻)

En plus des inconvénients qui caractérisent les chlorures les sulfates participent au métabolisme des bactéries contenues dans l'eau, les bactéries sulfato-réduction transforment les sulfates en sulfures avec dégagement de gaz sulfureux (œufs pourris) créant des désagréments à l'environnement De plus dans les systèmes des épurations anaérobies ce type de bactéries constitue un gêne pour les autres populations bactériennes [3].

c) Les nitrates (NO₃)

Les nitrates sont des éléments essentiels dans les procédés utilisés dans l'épuration des eaux. Une trop forte concentration en nitrates nécessitera des installations de dénitrification quand le milieu ne se prête pas aux trop fortes doses de nitrate, les nitrates proviennent des rejets domestiques, du lessivage de terres agricoles [3].

d) Les autres anions

Les anions qu'il faudrait signaler au vu de leur grand impact sur l'environnement sont les cyanures (CN). Leur toxicité n'est pas à démontrer et leur élimination doit être considérée comme une priorité. Ils proviennent essentiellement de rejets industriels et doivent être traités à la sortie de l'industrie considérée [3].

III. 3.7. Pollution chimique organique

Elle se traduit par plusieurs formes et d'origine différentes.

1- Les hydrocarbures

L'eau entraîne différents hydrocarbures ; lors de son utilisation les hydrocarbures de par leur densité relativement faible par rapport à l'eau forment des filtres de surface et empêchent toute oxygénation de celle-ci occasionnant des asphyxies de la faune et de la flore. Leur élimination fera appel à des procédés aussi bien physiques que biochimiques ; ils proviennent aussi bien de rejets domestiques qu'industriels [3].

Effet de la pollution par les hydrocarbures

La demande en oxygène des hydrocarbures est très importante et le problème posé par ce type de polluant est lié à sa grande stabilité. Les hydrocarbures se dissolvent peu et se présentent généralement sous forme d'émulsion ou de surnageant.

Contribuant ainsi à la modification des échanges gazeux avec l'atmosphère: ce phénomène prend une importance particulière dans les zones calmes, où le film peut s'étendre sur une grande surface et modifier notablement la tension superficielle de l'eau; parallèlement, ce film influe directement sur les réactions photosynthétiques, ce qui a pour conséquence de freiner une source importante de production d'oxygène au milieu.

Enfin, on retiendra que les effets de toxicité des hydrocarbures, outre leur origine intrinsèque, sont souvent en grande partie liés aux additifs qui y ont été incorporés au stade de leur fabrication industrielle (phénols, amines aromatiques, ...) [3].

2- Les huiles et graisses

Très utilisées dans la consommation humaine les huiles et les graisses de toute nature se retrouvent dans les eaux de rejets sous forme de suspension flottante et agissent de la même manière que les hydrocarbures en provoquant une asphyxie des êtres vivants. Leur élimination est prévue dans les premiers stades de traitement.

Les huiles d'origines industrielles de nature différente sont en général traitées à la sortie d'usine et font l'objet d'attentions particulières lorsque les débits sont importants (industrie pétrochimique) [3].

3- Les pesticides

Ces composés chimiques proviennent essentiellement des lessivages des terres agricoles, ils se retrouvent dans les oueds ou les retenues d'eaux, rarement au niveau des stations d'épurations ils représentent une forme de pollution très difficile à maîtriser car répandus dans les champs agricoles. Ils sont difficilement éliminables dans ces cas seules des lois réglementant l'utilisation de pesticides peuvent atténuer leur effet. La recherche de nouveaux produits ayant les mêmes effets mais dégradables à moyen terme chimiquement ou biochimiquement [3]. Ces composées se subdivisent en trois grandes familles [3] :

- a- Les composées organophosphorés (Le phosphore est la matrice).
- b- Les composées organochlorés (Le chlore est la matière active).
- c- Les désherbants.

Leur action peut être directe (eaux de ruissellement) ou indirecte (accumulation dans les plantes).

4-Les phénols

Les produits phénoliques proviennent en général d'activités industrielles, ils donnent à l'eau un goût marqué de chlorophénol lorsqu'il est en présence de chlore ; ces produits sont souvent biodégradables ceci dépend de leur composition [3].

5- Les détergents

Ces composants proviennent aussi bien d'activités industrielles que domestiques. Leur propriété tension active leur attribuent de grandes capacités de flottation, et constituent un risque pour les opérations de décantation et d'aération des stations d'épuration (par protection de mousses).

Leur réticence à la biodégradation en font des composés qu'il s'agira d'éliminer dès les premières phases d'un traitement. Actuellement, les réglementations européennes et américaines, encouragent l'utilisation de produits détergents biodégradables.

Le type de nuisance qu'ils donnent à une eau est plus physique car leur toxicité n'est décelable qu'à des taux élevés [3].

Tableau III-1 : Caractéristiques physique et chimique d'une eau usée [3].

Caractéristiques	Source
1) Propriétés physiques	Rejet domestique et industriel
- Couleur	Décomposition, eau domestique et industrielle
- Odeur	industrielle
- Solides (Mes)	- Eau domestique, industrielle
- Température	- Erosion des sols
	- Infiltration dans les réseaux d'évacuation Eaux domestiques et industrielles
2) Constituants chimiques	
2.1. Constituants organiques	Rejet domestique, industriel
- Hydrocarbures	Rejets industriels, domestique, commerciaux
- Huiles – Graisses	Agriculture
- Pesticides	Rejets industriels
- Phénols	Rejets domestiques
- Protides	Rejets domestiques et industriels
- Détergents	
2.2. Constituants minéraux	
- Alcalinité	Rejets domestiques – infiltration du réseau
- Chlorures	Eaux domestiques, infiltration des réseaux, adoucisseur et industriels
- Métaux lourds	Rejets industriels
- Azote	Rejets agricoles, domestiques
- Phosphore	Rejets domestiques et industriels
- PH	Rejets industriels
- Soufre	Rejets domestiques et industriels
- Composés toxiques	Rejets industriels

III.3.8. Polluants microbiologiques

L'eau peut contenir des micro-organismes pathogènes (des virus, des bactéries, des parasites). Ils sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau (baignade, élevage de coquillage) [3]

I.3.9. Polluants métalliques

Les métaux sont naturellement présents dans les roches et les sols. La présence de gisements métallifères contribue à la contamination métallique des eaux. Néanmoins, l'essentiel provient des apports d'origine industrielle, qu'il s'agisse des exploitations minières, des activités industrielles anciennes, ou des activités actuelles [3].

Les éléments métalliques surveillés sont le fer, le chrome, le zinc, le nickel, qui sont utiles au monde vivant en très faible quantité, et les métaux lourds, dont on ne connaît aucune utilité pour l'homme: mercure, cadmium, plomb, arsenic, etc.

Les métaux lourds sont les métaux les plus dangereux. Ils ont une densité supérieure à 5 et c'est pour cette raison qu'on les qualifie de lourd. Les métaux lourds ont un fort caractère bioaccumulatif et ont la particularité de ne pouvoir être éliminés. Ils changent simplement de forme. Au-delà d'un certain seuil, ils deviennent des toxiques importants pour l'homme [3].

I.3.11. Pollution thermique

L'incidence des rejets d'eaux usées sur l'environnement peut s'apprécier au regard des élévations de température. Lorsqu'un changement soudain de température arrive, cela a des effets significatifs sur les performances et la survie des organismes aquatiques. La plupart des réactions chimiques vitales sont ralenties voire arrêtées par un abaissement important de température.

A contrario, des augmentations de température peuvent avoir pour effet de tuer certaines espèces, mais également de favoriser le développement d'autres espèces entraînant ainsi un déséquilibre écologique.

En plus le rejet d'eau plus ou moins chaude diminue la solubilité de l'oxygène dans l'eau et elle pousse aussi les organismes vivants dans l'eau à respirer plus rapidement [3].

I.3.12. Paramètres d'étude d'une pollution

L'étude de la pollution d'une eau, nécessite la connaissance d'un certain nombre de paramètres : qu'on appellera « paramètres de pollution », ils permettent de juger de la gravité d'un problème.

On distingue plusieurs paramètres tels que : paramètres physiques, chimiques ainsi que d'autres [3].

III.4. Paramètres physiques

Les paramètres physiques qui sont analysés sont [3] :

III.4.1. Matières en suspension

Les matières en suspension (M.E.S.), exprimées en milligrammes par litre, sont mesurées par pesée après filtration ou centrifugation et séchage à 105°C. Les procédés de séparation par filtration font appel, soit à des disques en fibres de verre, soit à des couches d'amiante dont la mise en œuvre fait partie intégrante du mode opératoire. La méthode par centrifugation est plus particulièrement réservée au cas où les méthodes par filtration ne sont pas applicables par suite d'un risque élevé de colmatage des filtres. Les matières en suspension comprennent :

1- Les matières décantables

Elles correspondent aux M.E.S. qui se déposent au repos pendant une durée fixée conventionnellement à 2 heures. Les matières décan tables, exprimées en cm^3/l , sont mesurées par lecture directe du volume occupé au fond d'un cône de décantation par le décantas;

2- Les matières colloïdales

Elles représentent la différence entre les M.E.S. et les matières décantables. La taille des particules correspondantes est approximativement comprise entre 10^{-8} et 10^{-2} mm.

Par ailleurs, les matières en suspension sont constituées de matières minérales et de matières organiques, ou matières volatiles en suspension (M.V.S.); une approche des matières organiques est donnée par l'essai de calcination à 525 °C, mais ne saurait être très précise dans la mesure où le traitement thermique de l'échantillon testé s'accompagne toujours d'une décomposition simultanée, partielle ou totale, de certains sels minéraux (bicarbonates, chlorures, nitrates, ...)

III.4.2. pH

Il s'agit évidemment d'un paramètre fondamental de caractérisation des eaux résiduaires. La mesure du pH peut s'effectuer par colorimétrie ou par procédé électrométrie à l'électrode de verre.

III.4.3. Température

La notion de température revêt un rôle très important et doit être prise en compte lorsqu'on cherche à déterminer l'incidence de rejets industriels.

Des modifications excessives de la température des milieux récepteurs sont en effet de nature à modifier le biotope et à perturber la vie piscicole.

III.4.4. Les paramètres chimiques**III.4.4.1. Demande chimique en oxygène (DCO) – Oxydabilité**

La demande chimique en oxygène (DCO) est un paramètre qui donne une indication sur les quantités de substances chimiquement oxydables présentes dans l'eau. Il s'agit là de la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder principalement les composés organiques présents dans l'eau. Les substances qui se trouvent dans l'eau sont traitées chimiquement dans des conditions d'oxydation très sévères, de façon à estimer aussi celles qui sont difficilement dégradables biologiquement, comme les composés organiques chlorés [3].

La détermination de la DCO se fait essentiellement par oxydation avec un excès de dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en milieu acide sulfurique porté à l'ébullition pendant deux heures en présence d'ions Ag^+ comme catalyseurs et des ions Hg^+ permettent de complexer les ions chlorures sans l'utilisation duquel ces composés minéraux sont de nature à perturber le résultat des mesures. Dans ces conditions 95% à 97% des composés organiques sont oxydés [3].

Plus il y a de substances oxydables dans un échantillon d'eau, plus on utilise des dichromates. A partir de la quantité de dichromate utilisée, on calcule la quantité équivalente en oxygène qui en théorie aurait réalisé la même oxydation [3].

Une autre méthode utilise comme oxydant le permanganate de potassium; on ne parle plus dans ce cas de demande chimique en oxygène mais d'oxydabilité au permanganate de potassium à chaud en milieu acide.

Cette méthode a pour inconvénient majeur de ne pas oxyder ou de n'oxyder que partiellement de très nombreux composés organiques.

Elle est généralement réservée à des eaux susceptibles d'être peu polluées comparativement aux charges véhiculées par les eaux résiduaires industrielles (eaux de surface, eaux potables) [3].

III.4.4.2 Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

Un autre paramètre de somme important est la valeur de la demande biochimique en oxygène (DBO), qui exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation des matières organiques d'une eau par les micro-organismes du milieu.

Il s'agit d'un paramètre mesurant une oxydation biologique des matières organiques qui fait intervenir des réactions enzymatiques. Pour une eau naturelle superficielle (rivière, étang, ...), ce paramètre traduit la consommation d'oxygène relative au phénomène d'auto-épuration [3].

III.4.4.3. Autres paramètres

Les paramètres qui viennent d'être exposés constituent des critères essentiels de caractérisation d'une eau résiduaire industrielle. Complémentairement, d'autres paramètres sont éventuellement employés selon la spécificité des effluents, la branche industrielle concernée et la nature du traitement envisagé. Les principaux paramètres rencontrés sont décrits ci-après [3].

III.4.4.4. Alcalinité

La connaissance de l'alcalinité présente un intérêt particulier lorsque des traitements physico-chimiques sont envisagés, car ce paramètre traduit la présence en solution d'éléments chimiques susceptibles d'exercer une influence directe sur les conditions techniques de l'épuration. Par exemple, l'alcalinité conditionne généralement les quantités de réactifs à utiliser pour les opérations de coagulation-floculation.

L'alcalinité représente le pouvoir tampon de l'effluent et est exprimée par le titre alcalimétrique complet (TAC). Elle est mesurée par acidification de l'échantillon testé avec contrôle du dosage par procédé colorimétrique (virage de l'hélianthine), ou potentiométrique lorsque la couleur ou la turbidité des eaux résiduaires rend difficile l'observation des variations de coloration [3].

III.4.4.5. Turbidité

La turbidité d'eau résiduaire se définit comme l'expression de la propriété optique qui fait que la lumière est dispersée et absorbée plutôt que transmise en ligne droite à travers l'échantillon.

Cette dispersion est provoquée par l'interaction de la lumière avec les particules en suspension et traduit la réduction de transparence du milieu du fait de la présence de ces particules. Elle se mesure généralement dans des néphélométries par comparaison de la

lumière diffusée et de la lumière transmise, d'une part, par l'échantillon testé et, d'autre part, par une gamme étalon constituée de solutions de formaline, sous une radiation incidente de longueur d'onde donnée [3].

III.4.4.5.1. Résistivité électrique

La résistivité représente l'inverse de la conductivité électrique, qui donne une évaluation de la teneur en sels dissous des eaux résiduaires [3].

III.4.4.5.2 Matières sèches

Les matières sèches sont mesurées par élimination de l'eau par évaporation et pesée ; elles rendent comptes à la fois des matières en suspension et des matières dissous. La température à laquelle le résidu est séché et la durée de chauffage ont une influence importante sur le résultat de la détermination; en pratique, on distingue [3] :

1- Le résidu sec à 100-105 °C

Qui résulte de l'évaporation simple de l'eau, mais aussi de l'évaporation, en totalité ou en partie, de l'eau occluse et de l'eau de cristallisation des sels. Des pertes en dioxyde de carbone peuvent résulter de la transformation des bicarbonates en carbonates. En outre, il peut y avoir une perte plus ou moins négligeable de matières organiques;

2-Le résidu sec à 175-185 °C

Qui peut encore résulter de la perte d'eau de cristallisation, notamment si des sulfates sont présents.

La presque totalité de l'eau occluse est éliminée, les bicarbonates sont transformés en carbonates, certains chlorures et certains nitrates sont décomposés ou volatilisés. Les matières organiques sont peu atteintes bien que certaines d'entre elles puissent être volatilisées.

des eaux naturelles, et enfin, l'évaluation des effets néfastes de la pollution des eaux.

III.5. Epuration des eaux résiduaires industrielles

L'épuration des ERI a pour objectif de réduire la charge polluante qu'elles véhiculent, afin de rendre au milieu aquatique qui est le milieu récepteur une eau de qualité, respectueuse des équilibres naturels et de ses usages futurs. Dans une STEP l'épuration des eaux passe par différentes étapes [10]; dont on va les présenter ci- dessous : les prétraitements suivis des traitements physicochimiques puis les traitements biologiques et enfin les traitements d'affinage.

III.5.1. Les prétraitements

Les prétraitements constituent l'ensemble des opérations physique et mécanique : dégrillage, dessablage et dégraissage-déshuilage. Ils dépendent de la nature et des caractéristiques des rejets industriels et de la ligne d'épuration prévue en aval [10].

III.5.1.1. Dégrillage

Le dégrillage, premier poste de traitement, indispensable aussi bien en eau de surface qu'en eau résiduaire ou pour des eaux brutes très chargées en matières grossières. Il permet [11] :

- De protéger les ouvrages en aval contre l'arrivée de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation.
- De séparer et d'évacuer facilement les matières volumineuses charriées par l'eau brute, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements suivants, ou à compliquer l'exécution.

L'opération est plus ou moins efficace, en fonction de l'écartement entre barreaux de la grille [11], on peut distinguer :

- ❖ Le dégrillage fin, pour écartement inférieur à 10 mm ;
- ❖ Le dégrillage moyen, pour écartement de 10 à 40 mm ;
- ❖ Le pré-dégrillage, pour écartement supérieur à 40 mm.

III.5.1.2. Dessablage

Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes et les rejets industriels les graviers, sables, et particules minérales plus au moins fines, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduites, à protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion, et à éviter de surcharger les stades de traitement [12].

Il existe trois types de dessableurs [12] :

- ❖ Les dessableurs couloirs (à écoulement rectiligne), dont la vitesse d'écoulement est variable ou constante ;
- ❖ Les dessableurs circulaires (Figure III-1), à alimentation tangentielle à brassage mécanique ou à insufflation d'air ;

❖ Les dessableurs rectangulaires à insufflation d'air. On insuffle de l'air qui provoque une rotation de liquide et crée ainsi une vitesse constante de balayage du fond.

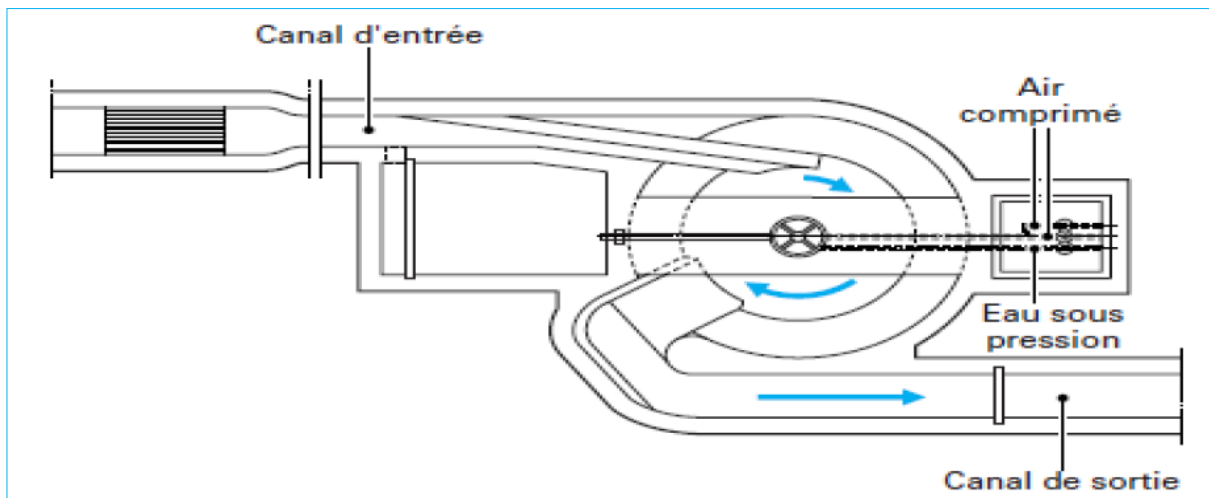


Figure III-1 : Dessableur circulaire à alimentation tangentielle [12].

III.5.1.3. Déshuilage – Dégraissage

Le déshuilage est une opération de séparation liquide- liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide- liquide.

Cette opération vise à éliminer la présence des huiles et des graisses dans les eaux. C'est une opération physique basée sur la flottation de particules huileuses plus légères que l'eau [11].

Les eaux résiduaires d'une raffinerie de pétrole contiennent des quantités variables d'hydrocarbures, présentes à l'état libre, soluble ou en émulsion plus ou moins importante. Le déshuilage complet nécessite, en fait, un traitement en deux stades [13] :

- ❖ Le pré-déshuilage par opération physique gravitaire sans adjonction de réactifs, réduisant la teneur en hydrocarbures à environ 15 à 100 mg/l ;
- ❖ Le déshuilage final (flottation par air dissous, filtration) avec utilisation de réactifs (coagulation par sels métalliques ou par polyélectrolyte) permettant d'obtenir l'épuration complète.

Le pré-déshuilage s'effectue par flottation naturelle des vésicules d'huile. Il est réalisé dans différents types d'appareils.

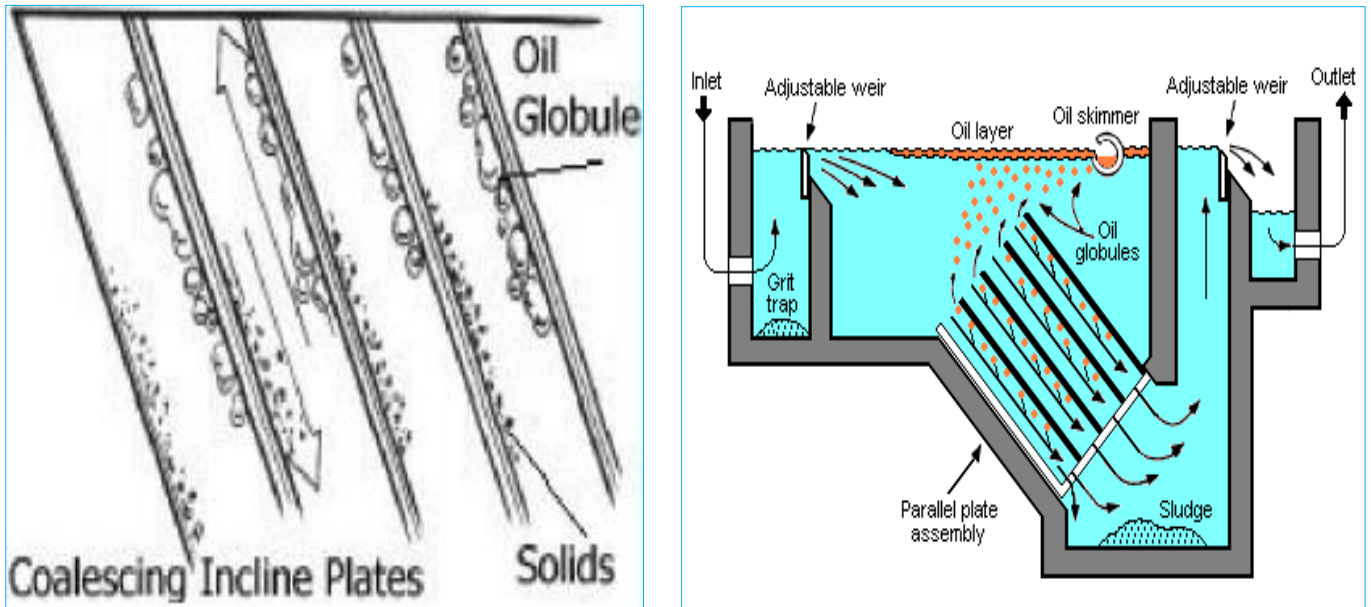


Figure III-2 : Principes de séparateur d'huile à CPI (Coalescent à plaque inclinée) [14].

III.6.1. Epuration physico-chimique

Si la décantation se faisait directement après le prélèvement dans le milieu aquatique, le temps de décantation d'un gravier dans un mètre d'eau serait d'une seconde par la seule influence de son poids, on passerait à 2 minutes pour le sable fin, à 2 heures pour l'argile, à 8 jours pour une bactérie et de 2 à 200 ans pour un colloïde. Ces durées étant bien évidemment beaucoup trop grandes. Les colloïdes peuvent même traverser un filtre très fin, ils sont les principales causes de la turbidité et la couleur d'une eau [10].

III.6.1.1. Particules colloïdales

Les colloïdes sont des macromolécules d'origine inorganique - minérale - (sables, limons, argiles, ..) ou organique et de diamètres plus petits inférieurs à 1 μm . Qui placées dans l'eau, ne forment pas une solution, mais forment une suspension colloïdale [10].

Tableau III-2: Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de STOKES [15].

Diamètre de particule		Type de particule	Temps de décantation pou 1m d'eau	Surface spécifique $m^2.m^{-3}$	
Mm	μm				
10	10^4	Gravier	1 seconde	6.10^2	MIES décantations
1	10^3	Sable	10 secondes	6.10^3	
10^{-1}	10^2	Sable fin	2 minutes	6.10^4	
10^{-2}	10	Limon	2 heures	6.10^5	
10^{-2}	10	Kyste de protozoaire	20 heures	6.10^5	Colloïdes
10^{-3}	1	Argile	2 jours	6.10^6	
10^{-3}	1	Bactérie	8 jours	6.10^6	
10^{-4}	10^{-1}	Colloïde	2 ans	6.10^7	
10^{-5}	10^{-2}	Colloïde	20 ans	6.10^8	

a. Théorie de la double couche

Les colloïdes présents dans l'eau brute sont très généralement chargés négativement (imperfections du réseau cristallin, ionisation des groupements chimiques périphériques, ...).

Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs, présents dans l'eau brute ou ajoutés, viennent former une couche autour du colloïde. Diverses théories ont été avancées [11].

1- Théorie de HELMHOLTZ: Une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche adhérente).

2- Théorie de GOUM-CHAPMAN: La couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde; la neutralité est obtenue à plus grande distance (couche diffuse).

3- Théorie de STERN qui rassemble les deux précédentes et considère la formation d'une double couche. La première couche est adhérente au colloïde, le potentiel y décroît rapidement. La seconde couche est plus diffuse, avec une diminution plus lente du potentiel [11].

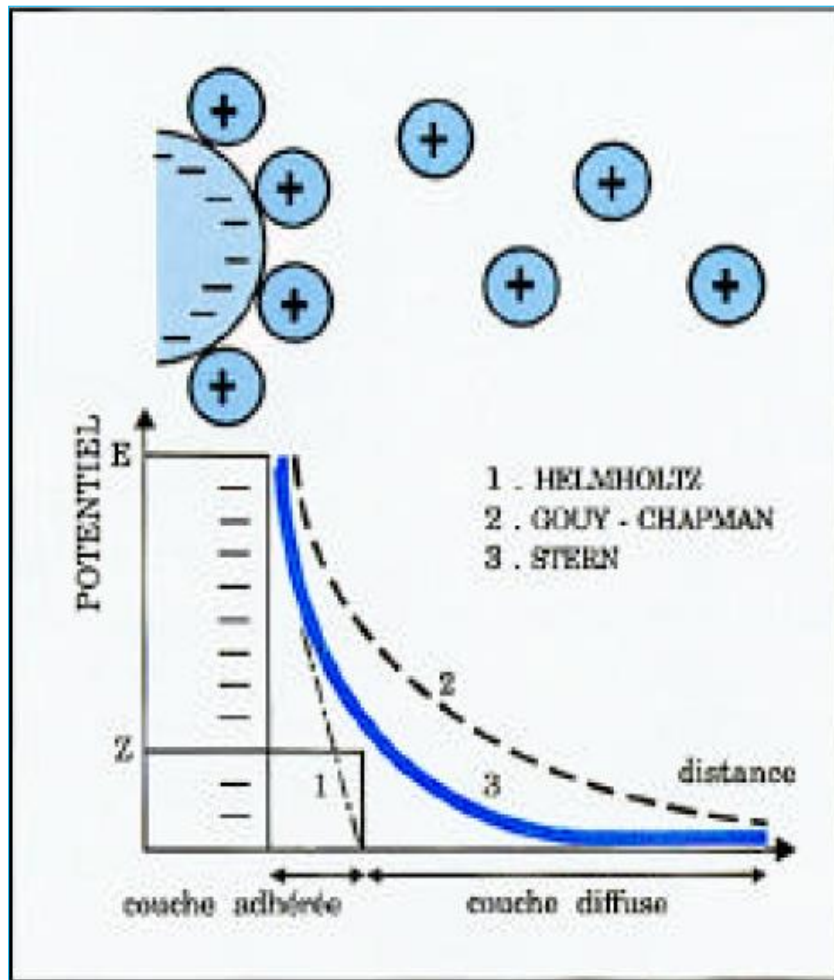


Figure III-3 : Théorie du double couche [11].

b. Potentiel Zêta

Le potentiel Zêta se situe à la limite extérieure de la couche liée. C'est ce potentiel qui persiste lorsque la particule se déplace. Le potentiel Zêta est important car il définit le comportement électrocinétique des particules et par voie de conséquence leur stabilité dans la solution. L'annulation du potentiel Zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leurs agglomérations [10]. En déduit donc que l'élimination des colloïdes passe par l'annulation du potentiel zêta afin d'annuler les forces de répulsion.

III.6.1.2. Coagulation et Floculation

L'opération de coagulation-floculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par leur déstabilisation puis formation de floccs par absorption et agrégation [10].

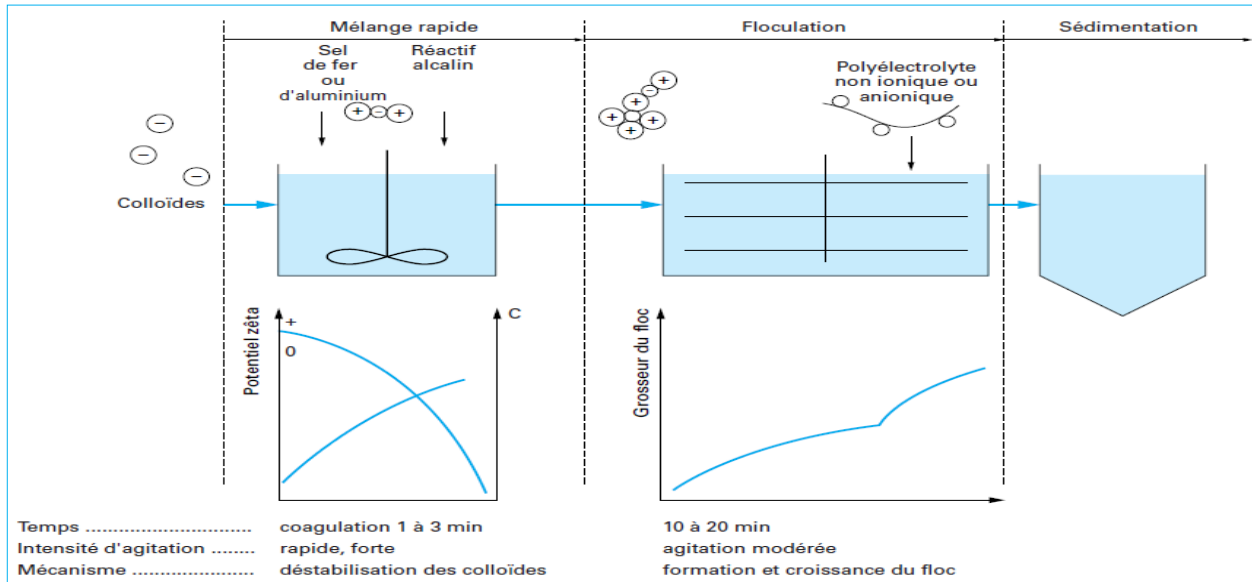


Figure III-4 : Conditions hydrodynamiques des processus de coagulation-floculation [16].

a. La coagulation

Le mot coagulation vient du latin 'coagulare' qui signifie -agglomérer-.

La coagulation consiste à ajouter à l'eau un réactif permettant la déstabilisation des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives qui sont à l'origine du maintien en suspension stable. L'efficacité de la coagulation dépend de l'influence du pH, la dose du coagulant, la température, la turbidité, les sels dissous, et l'alcalinité [17].

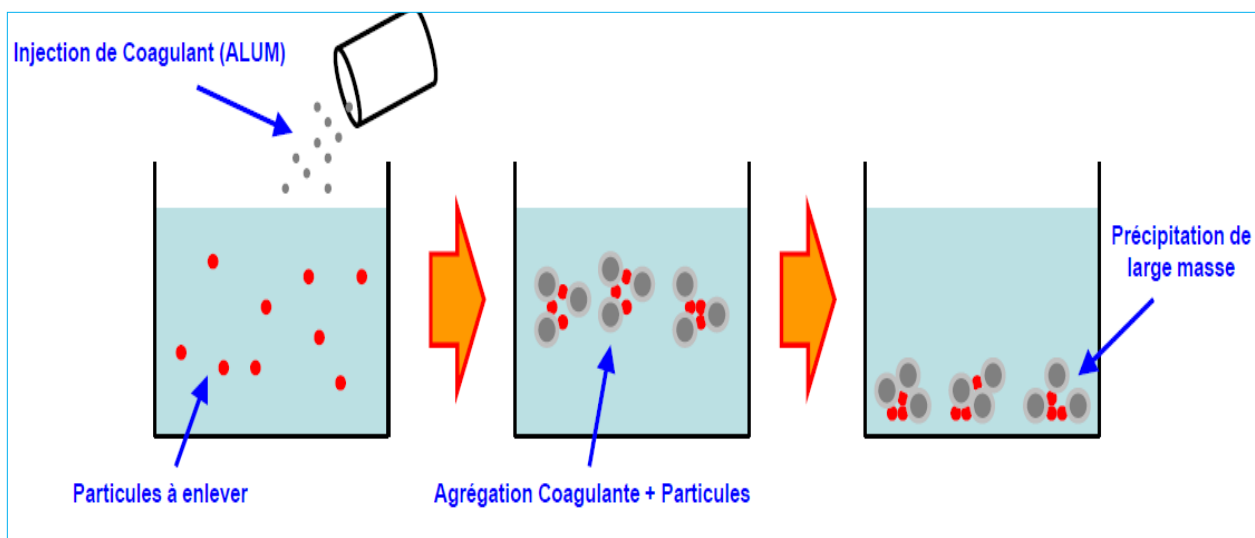


Figure III-5 : Phénomène de coagulation [14].

b. La floculation

La floculation est le processus de grossissement et d'uniformisation des petits flocons formés lors de l'introduction du coagulant (Figure III-8). Elle a pour but d'augmenter la probabilité des contacts entre les particules colloïdales déstabilisées et leur agglomération, pour accroître son volume, sa masse et sa cohésion. Une bonne floculation est favorisée par [20] :

- ❖ Une coagulation préalable aussi parfaite que possible ;
- ❖ Une augmentation de la quantité du floc dans l'eau ;
- ❖ Un brassage homogène et lent pour tout le volume d'eau.

Les floculant, appelés aussi 'adjuvants de coagulation', ou adjuvant de floculation, ou encore adjuvant de filtration, sont des produits destinés à favoriser chacune de ces opérations. L'action peut se produire au niveau de la vitesse de réaction (floculation plus rapide) ou au niveau de la qualité du floc (floc plus lourd, plus volumineux, plus cohérent).

On peut distinguer les floculant par leur nature (minérale ou organique), leur origine (synthétique ou naturelle), le signe de leur charge électrique (anionique, cationique, non anionique) [21]. Il existe plusieurs floculant ou adjuvants comme : la silice activée, les argiles, etc.

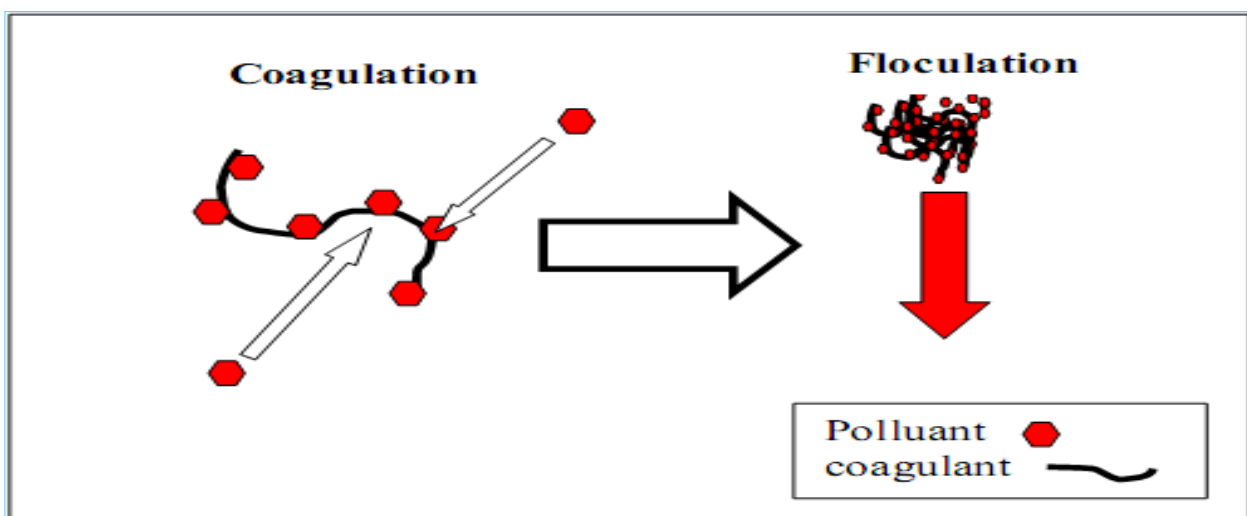


Figure III-8 : Phénomène de coagulation-floculation [20].

Enfin, on peut déduire que l'épuration par coagulation/floculation suivie d'une décantation lente permet d'éliminer jusqu'à 90 % des MES 70 % du phosphore total et 40 à 65% de la DBO₅ des eaux résiduaires [20, 21].

Par précision, le but de l'épuration physicochimique des effluents liquides d'une raffinerie de pétrole permet [21] :

- ❖ D'abord, d'éliminer les hydrocarbures insolubles jusqu'à des teneurs résiduelles de 2 à 20 mg/l ;
- ❖ Ensuite, d'assurer plusieurs opérations importantes, conjointes et nécessaires soit pour un rejet direct, ou pour alimenter l'épuration biologique :
 - Neutralisation du pH ;
 - Précipitation des métaux lourds toxiques ;
 - Oxydation ou précipitation des sulfures en excès par un sel de fer ;
 - Clarification des eaux.

Après l'étape de la coagulation floculation on passe soit à la décantation si les floccs formés sont de grosses tailles soit à la flottation si les floccs formés sont de petites tailles [18].

III.6.1.3. Décantation

La décantation est utilisée dans pratiquement toutes les usines d'épuration et de traitement des eaux, c'est un procédé de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en flocc dont la densité est supérieure à celle de l'eau ; elle s'effectue selon un processus dynamique, en assurant la séparation des deux phases solide-liquide de façon continue. Les particules décantées s'accumulent au fond du bassin, d'où on les extrait périodiquement. L'eau récoltée en surface est dite clarifiée. Elle est dirigée vers un autre stade d'épuration. La décantation a un rôle épuratoire non négligeable c'est ce que représente le tableau III-2. Il apparaît néanmoins vis-à-vis des MES, DCO et DBO₅ [20].

Tableau III-2 : Efficacité épuratoire de la décantation [20].

Paramètres	MES	DCO	DBO ₅	NTK	Hydrocarbures	Pb
Réduction de la pollution (%)	80 à 90	60 à 90	75 à 90	40 à 70	35 à 90	65 à 80

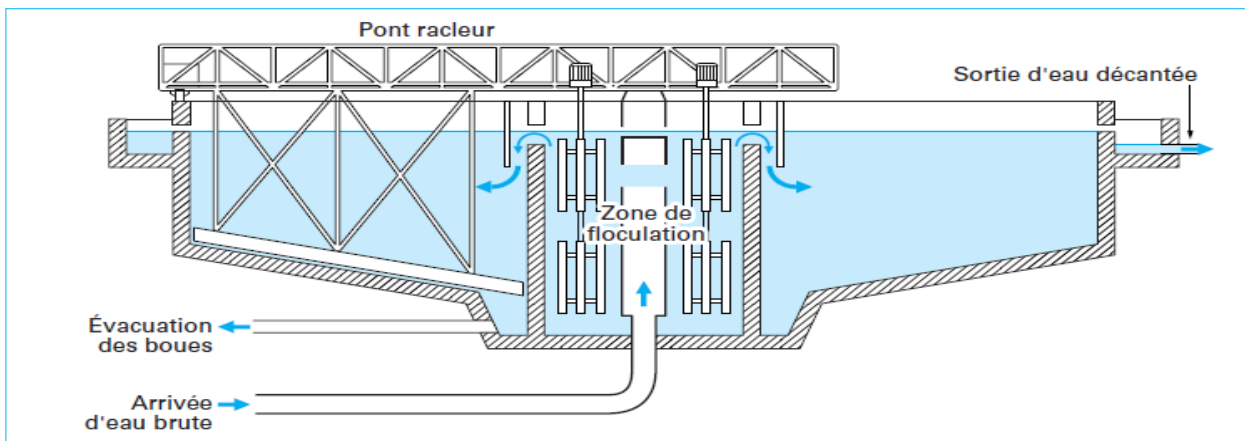


Figure III-9 : Décanteur flocculateur, type clarifloculateurs, à pont racleur avec entraînement périphérique sans recirculation de boues [16].

III.6.1.4. Flottation

C'est une technique qui peut remplacer la sédimentation et la flottation. C'est un procédé de séparation liquide-solide basé sur la formation d'un ensemble appelé 'attelage', formé des particules à éliminer, et plus léger que l'eau. Cette technique convient principalement pour éliminer les particules de diamètre compris entre 1 et 400 μm . Les solides sont transportés à la surface, fixés à des bulles, et sont ensuite écumés. Cette méthode permet d'éliminer des particules plus petites qu'avec la sédimentation. Elle convient davantage aux eaux présentant une haute teneur en algues, une faible turbidité naturelle ou une forte coloration [25].

La flottation n'est pas aussi efficace que la sédimentation pour éliminer les particules et réduire la turbidité. Ce procédé est sensible à la température et affiche un piètre (négligeable) de rendement par temps très froid [21].

a. Types des procédés de flottation

On distingue quelques types de flottation, parmi les quels on cite [10] :

- ✓ **Flottation naturelle** : lorsque la masse volumique des particules à éliminer est inférieure à celle de l'eau.
- ✓ **Flottation mécanique** : consiste en une dispersion mécanique de bulles d'air de 0,1 à 1 mm de diamètre. Il est surtout utilisé pour la séparation et la concentration par moussage des minerais.
- ✓ **Flottation par insufflation d'air** : c'est une flottation naturelle améliorée par l'insufflation au sein de la masse liquide de bulles d'air de quelques diamètres, on utilise pour cela des pompes poreuses.

✓ **Flottation par air dissous (DAF) ou aéroflottation** : on produit des microbulles au sein du liquide de 40 à 70 microns de diamètre, à détendre ensuite brutalement cette eau, par retour à la pression atmosphérique pour provoquer l'apparition spontanée d'un véritable "lait de micro bulles", qui, mélangé aux matières en suspension préalablement coagulées ou floculées provoquera leur flottation.

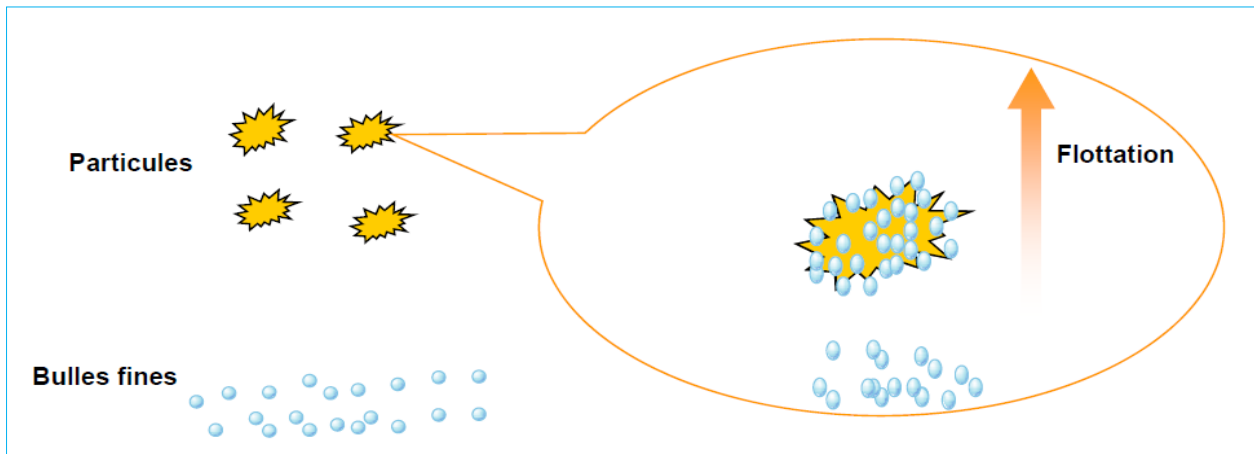


Figure III-10 : Principe de flottation à air dissous (DAF) [14].

- ❖ De larges bulles → Vitesse de flottation trop élevée de bulles → Faible efficacité de contact avec particules.
- ❖ De petites bulles → Vitesse de flottation trop basse de bulles → Réservoir de flottation à large volume demandé [14].

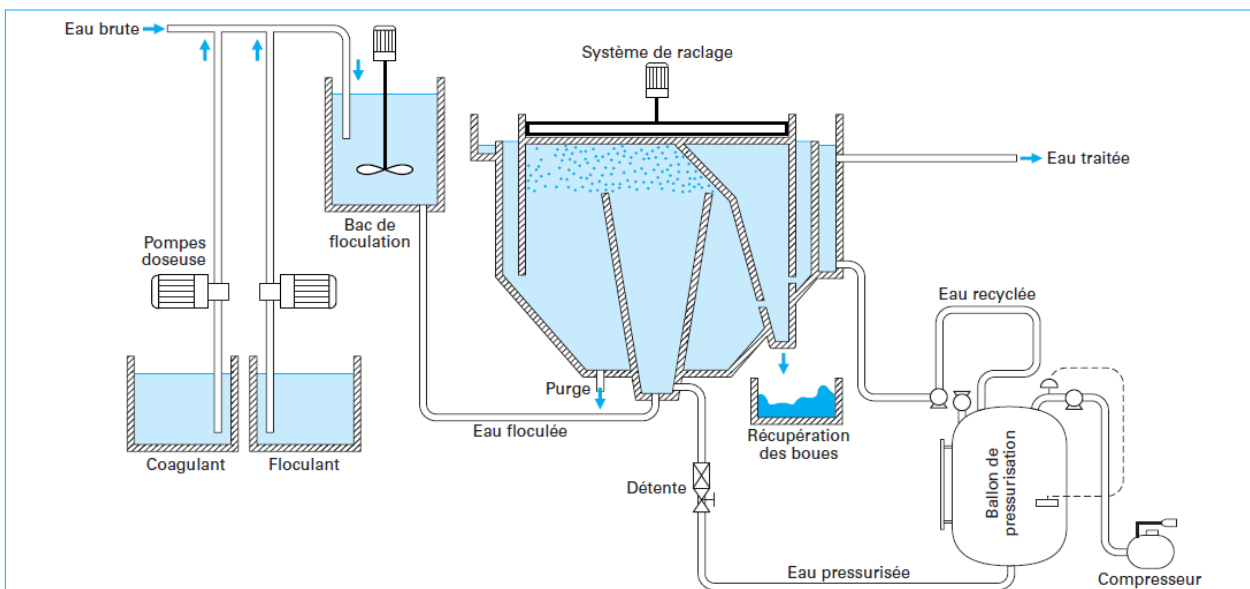
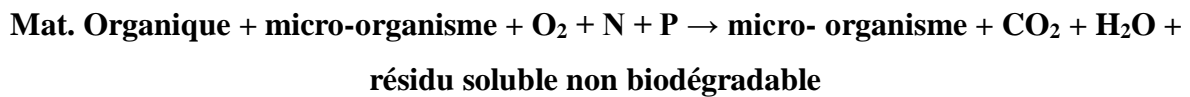


Figure III-11 : Schéma de principe d'une installation de traitement physico-chimique par aéroflottation [16].

✓ **Electroflottation** : c'est une technique de séparation analogue à l'aéro flottation, mais à la différence que les micros bulles sont produites par électrolyse de l'eau à traiter au moyen d'électrodes appropriées. Ce procédé présente l'intérêt d'assurer l'homogénéité du flux tant du point de vue de la dimension (100 microns) des bulles que de leur répartition spatiale [10].

III.6.2. Traitements Biologiques

L'épuration biologique aérobie des eaux résiduaires consiste, dans une première phase, à provoquer le développement des bactéries qui se rassemblent en films ou en flocons et qui, par action physique et physico- chimique, retiennent la pollution organique et s'en nourrissent [10]. Dans une seconde phase, on sépare généralement par décantation les boues ainsi développées.



En traitement biologique on distingue des procédés extensifs et d'autres intensifs :

III.6.2.1. Les procédés biologiques extensifs

Une lagune aérée utilise le même principe que le lagunage simple dans lequel, l'apport d'oxygène est augmenté par la mise en place d'aérateurs mécaniques. Une lagune aérée est assimilée à un vaste bassin aérobie. Il existe deux types de lagunes aérées [10] :

- ❖ Les lagunes aérobies dans lesquelles on maintient une concentration en oxygène dissous dans tout le bassin ;
- ❖ Les lagunes facultatives dans lesquelles l'oxygène n'est maintenu que dans la partie supérieure du bassin. Une zone anaérobie est donc présente au fond du bassin.

Ce mode d'épuration permet d'éliminer 80 % à 90 % de la DBO, 20 % à 30 % de l'azote et contribue à une réduction très importante des germes. Il a cependant l'inconvénient d'utiliser des surfaces importantes et de ne pas offrir des rendements constants durant l'année [26].

III.6.2.2. Les procédés biologiques intensifs

Le principe de ces procédés est de localiser sur des surfaces réduites et d'intensifier les phénomènes de transformation et de destruction des matières organiques que l'on peut observer dans le milieu naturel. Deux types d'installations sont utilisés [10] :

a. Les installations à "cultures fixées"

D'où on distingue différents types de supports pour les cultures bactériennes : les disques biologiques et lits bactériens.

Disques biologiques

C'est une technique faisant appel aux cultures fixées, et est constituée par les disques biologiques tournants où se développent les micro-organismes et forment un film biologique épurateur à la surface des disques. Les disques étant semi-immérgés, leur rotation permet l'oxygénation de la biomasse fixée [10].

❖ Lits bactériens

Le principe de fonctionnement d'un lit bactérien consiste à faire ruisseler les eaux usées, préalablement décantées sur une masse de matériaux poreux ou caverneux qui sert de support aux micro-organismes (bactéries) épurateurs [10].

Les sous-produits et le gaz carbonique produits par l'épuration s'évacuent dans les fluides liquides et gazeux. Le rendement maximum de cette technique est de 80 % d'élimination de la DBO₅ [20].

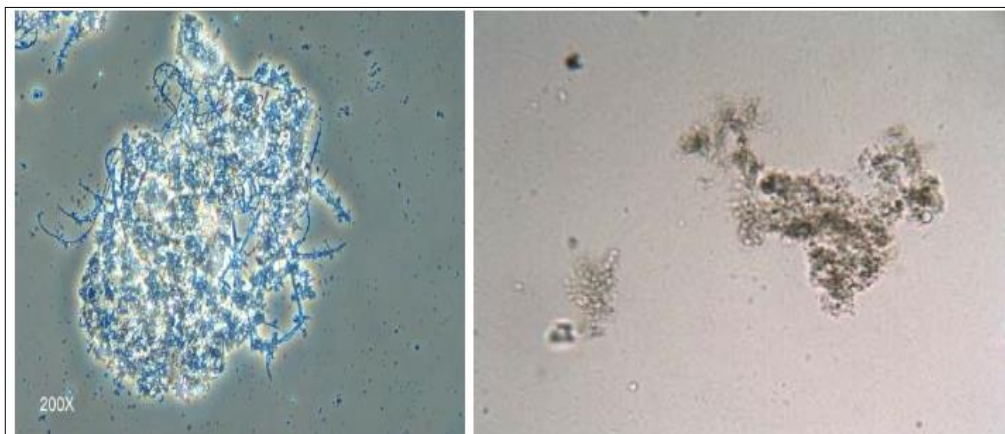
b. Les installations à "cultures libres", ou par boues activées

Le procédé à boues activées est un système fonctionnant en continu dans lequel, des micro-organismes sont mis en contact avec les eaux usées contenant des matières organiques.

De l'oxygène est injecté dans le mélange, permettant de fournir aux bactéries cet élément vital à leurs besoins respiratoires [10].

Lorsque la matière organique biodégradable est consommée par une masse sa, des micro-organismes, en lieu aérobie il y a [10] :

- ✓ D'une part, une consommation d'oxygène par ces micro-organismes pour leurs besoins énergétiques, leur reproduction par division cellulaire (synthèse de la matière vivante), et leur respiration endogène (auto- oxydation progressive de leur masse cellulaire) ;
- ✓ D'autres part, la production d'un excédent de matières vivantes et inertes appelées boues activées.



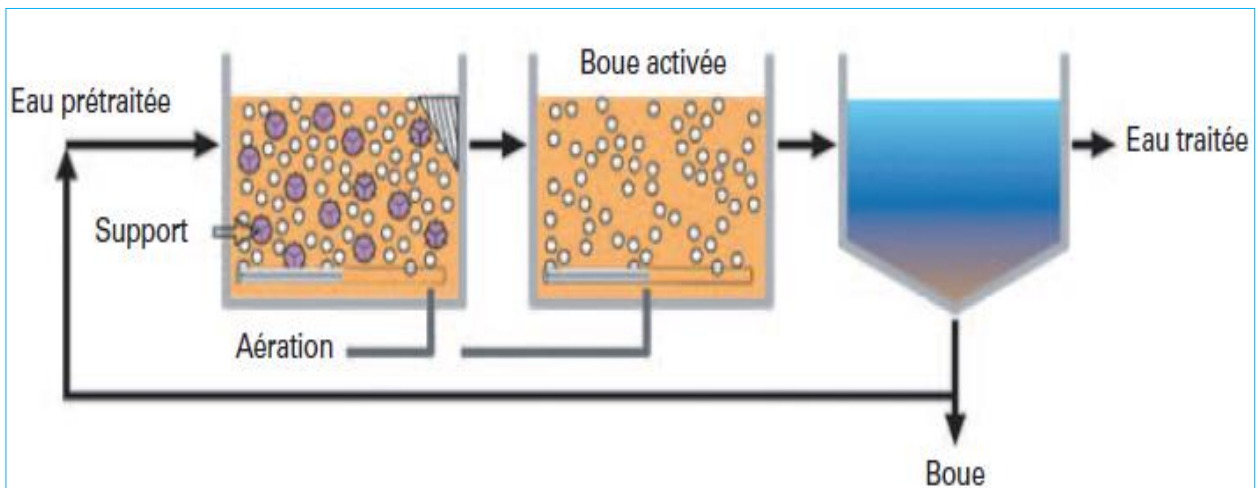
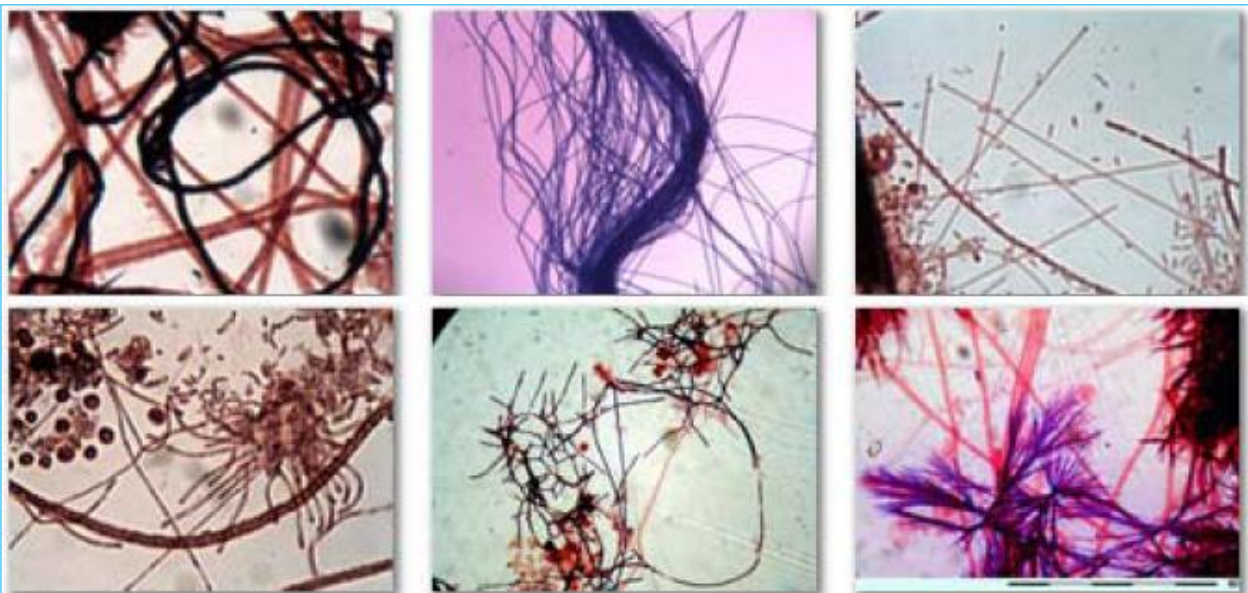


Figure III-12 : Principe de fonctionnement du traitement en forte charge [21].

Flocs de micro-organisme habituellement trouvés dans les boues bien activées



Bactéries filamenteuses trouvées dans les boues mal activées

Figure III-13 : Micro-organismes trouvés dans les boues activées [14].

I.4.3.1.4. Couleur

La couleur vraie après filtration est due à la présence de matières organiques dissoutes, de fer ferrique précipité à l'état d'hydroxyde colloïdal, de fer ferreux lié à des complexes organiques et de divers colloïdes. Il n'existe pas de lien entre la couleur et la concentration en matières organiques. Ce paramètre est mesuré par comparaison à une solution de référence (Platine cobalt).

Détermination de l'alcalinité**(Titre alcalimétrique et titre alcalimétrique complet)****Principe :**

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré, mesurés par la méthode volumétrique appliquée au laboratoire central Arcelor –Mittal (sider)

Réactifs :

- Acide sulfurique à 0.02N
- Phénolphtaléine à 0.5%
- Méthylorange à 0.5%

Mode opératoire :**a). Détermination de TA :**

- On prélève 100 ml d'eau à analyser dans un erlenmeyer.
- On ajoute 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine.
- Une coloration rose doit alors se développer ; dans le cas contraire le TA est nul.
- On verse ensuite lentement l'acide sulfurique dans l'erlenmeyer à l'aide d'une burette graduée, en agitant constamment jusqu'à décoloration complète de la solution. Le pH est alors de l'ordre de 8.3.
- On lit directement sur la burette le TA exprimé en degré français (°F). b).

Détermination de TAC :

- On utilise l'échantillon traité précédemment, ou la prise d'essai primitif s'il ya pas eu de coloration.
- On ajoute deux à trois gouttes de solution de méthylorange, on verse ou on continue à verser à l'aide de la burette le même acide, en agitant constamment, jusqu'au virage du jaune au jaune orangé. Le pH est alors de l'ordre de 4.3.
- On note le volume lu à la burette au moment du nouveau virage.

Chapitre IV

Résultats

Chapitre IV : Résultats**Expression des résultats :**

V 1 : volume d'acide en millilitres lu à la burette et exprime le TA en °F.

V 2 : volume d'acide en millilitre lu à la burette.

Retrancher ce volume V2 de 0.5 ml correspond à la quantité d'acide nécessaire pour le virage de l'indicateur, qui est un peu plus faible que le pH de neutralisation des bicarbonates.

Par conséquent $V_2 - 0.5$ exprime le TAC en °F

Pour convertir, ensuite, le TA et le TAC en milligrammes de CaCO_3 au litre, on a :

1°F = 10mg de CaCO_3 /L



Figure IV – 1 : Dosage volumétrique du TA et TAC

DETERMINATION DU TITRE HYDROTIMETRIQUE TH**.Principe :**

La détermination du TH est basé sur la formation de complexes entre les alcalino-terreux et le sel disodique de l'acide éthylènediamine tétra acétique (EDTA) en présence de noir ériochrome T en milieu tamponné.

Réactifs :

- Sel di sodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique : solution à 0.01 N ;

- Solution indicateur noir ériochrome T
- Solution tampon ammoniacale (pH 10).

Mode opératoire :

- On prélève 100ml d'eau à analyser dans un erlenmyer;
- On verse environ 2ml de la solution tampon ;
- On ajoute 4 à 5 gouttes de noir ériochrome T ;
- Si la coloration est bleu nous concluons une absence de calcium (Ca) et magnésium (Mg)
- si la coloration est rose violet, nous déduisons une présence de calcium (Ca) et magnésium (Mg) dans l'échantillon étudié ; pour ceci, il sera nécessaire de procéder à un titrage avec l'EDTA jusqu'à l'obtention de la coloration bleue.
- On lit directement sur la burette le TH exprimé en degré français (°F).

DOSAGE DU TITRE CALCIQUE**Principe :**

La détermination du TCa est basée sur la formation de complexes entre les ions calcium et le sel disodique de l'acide éthylène-diamine tétraacétique (EDTA) en présence de calconne carboxylique en milieu tamponné.

Réactifs :

- Hydroxyde de potassium 20% (solution tampon pH 12)
- Sel disodique de l'acide éthylène diamine tétraacétique : solution à 0.01 N ;
- Acide calconne carboxylique (indicateur coloré).

Mode opératoire :

- Prélever 100 ml d'eau à analyser ;
- Ajouter 2ml de KOH et environ 0.4 g de l'indicateur ;
- Mélanger et doser immédiatement. Ajouter la solution d'EDTA tout en continuant d'agiter ;
- Verser lentement en fin de dosage, le virage est atteint lorsque la couleur devient nettement bleue.
- On lit directement sur la burette le TCa⁺⁺ exprimé en degré français (°F).

DOSAGE DES CHLORURES

Elle se fait à l'aide d'un spectrophotomètre qui est un appareil qui permet de mesurer l'absorbance d'une solution homogène et d'une longueur d'onde donnée sur une région spectrale donnée [18].

Principe :

C'est le dosage du chlore combiné à des chlorures par le nitrate d'argent, en présence de chromate de potassium comme indicateur.

Réactifs :

- Chromate de potassium (K_2CrO_4) à 5% (indicateur) ;
- Nitrate d'argent ($AgNO_3$ à 0.1 N).

Mode opératoire :

- Prélever 100 ml d'eau à analyser ;
- Ajouter 1 ml de chromate de potassium ;
- Dans le cas où la coloration est rouge brique nous concluons une absence des chlorures.
- Si la coloration est jaune, nous déduisons une présence des chlorures dans l'échantillon étudié ; pour ceci, il sera nécessaire de procéder à un titrage avec le nitrate d'argent à 0.1 N jusqu'à l'apparition d'une teinte rouge brique.
- On lit directement sur la burette le volume de nitrate d'argent.

DETERMINATION DU pH

Elle est réalisée par un pH-mètre : le pH-mètre est un appareil électronique permettant de donner la mesure du pH d'une solution.

Principe :

Le PH de l'eau à analyser est déterminé à l'aide d'un pH mètre équipé d'une électrode de verre étalonnée.

Le pH mètre :

Le pH mètre est constitué d'une électrode que l'on plonge dans la solution dont on veut connaître l'acidité ; les valeurs du pH s'affiche alors sur l'écran du pH-mètre.

L'électrode doit être bien rincée à l'eau distillée avant chaque mesure et l'appareil doit être régulièrement étalonné pour que les mesures soient fiables.

Expression des résultats :

Les résultats sont exprimés en unités de pH à la température de l'eau.



Figure IV – 2 : Couple pH- mètre/Conductimètre



Figure IV – 3 : pH- mètre consort « C832 »

DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE**Principe :**

La conductivité de l'eau à analyser est déterminée à l'aide d'un conductimètre muni de deux électrodes de verre étalonnées.

Le conductimètre :

Cet appareil de mesure est constitué d'une électrode que l'on plonge dans la solution dont on veut connaître la salinité totale ; le résultat s'affiche sur l'écran du conductimètre.

L'électrode doit être bien rincée à l'eau distillée avant chaque mesure et l'appareil doit être régulièrement étalonné pour que ses mesures soient fiables.

Expression des résultats :

Les résultats sont exprimés en unités de $\mu\text{S} / \text{cm}$ à la température de l'eau. Grâce au facteur de conversion, la conductivité sera exprimée en TDS en mg / L .



Figure IV – 4 : Conductimètre « E587 »

DETERMINATION DES MATIERES EN SUSPENSION

Elle se fait à l'aide d'un spectrophotomètre qui est un appareil qui permet de mesurer l'absorbance d'une solution homogène et d'une longueur d'onde donnée sur une région spectrale donnée [18].

Principe :

L'analyse s'effectue par une méthode photométrique. La mesure se fait à l'aide d'un instrument « spectro H Dr 5000 » qui n'exige aucune étape de filtration ou pesage.

Mode opératoire :

- Sélectionner sur le spectrophotomètre le programme d'analyse : MES ;
- Etalonner l'appareil avant de mesurer l'échantillon ;
- Prélever dans une cuve l'échantillon d'eau à analyser ;
- La valeur des MES sera affichée directement sur l'écran de l'appareil.

Expression des résultats :

Les valeurs lues sur l'écran de l'appareil expriment la teneur en MES en mg /L.



Figure IV – 5 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 »

DOSAGE DU FER TOTAL

Elle se fait à l'aide d'un spectrophotomètre qui est un appareil qui permet de mesurer l'absorbance d'une solution homogène et d'une longueur d'onde donnée sur une région spectrale donnée.

Principe :

A l'ébullition l'acide chlorhydrique libère le fer sous forme ionique. Il est ensuite réduit à l'état ferreux par l'acide ascorbique et dosé colorimétriquement, en utilisant la coloration rouge donnée par les sels ferreux avec l'orthophénanthroline.

Réactifs :

- solution saturée d'acétate de sodium ;
- 0,3 ml de solution d'acide ascorbique à 1% ;
- solution d'orthophénanthroline à 0,1% ;

Mode opératoire :

Dans un tube à essais en pyrex prélever 10ml de l'eau à analyser. Ajouter 1ml de solution d'acide chlorhydrique et porter à l'ébullition pour assurer la solubilisation du fer, refroidir, ajuster à 10 ml avec de l'eau bidistillée bouillie, puis ajouter successivement :

- 0,5 ml de solution saturée d'acétate de sodium ;
- 0,3 ml de solution d'acide ascorbique à 1% ;
- 1 ml de solution d'orthophénanthroline à 0,1%.

Préparer un témoin avec 10 ml d'eau bidistillée. Ce témoin sera traité dans les mêmes conditions que l'essai. Laisser au repos les deux tubes à température ambiante pendant 30 min. Enfin effectuer les lectures au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 510nm

Expression des résultats :

La courbe donne la teneur en fer exprimée en mg /L.



Figure IV – 6 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » Dosage du fer total

Détermination de la turbidité

Elle est effectuée grâce à un turbidimètre : c'est un appareil permettant la détermination de la turbidité. La mesure est effectuée pour connaître le degré de la pollution physique de l'eau [18].

Principe :

La turbidimétrie fait partie de la photométrie ; elle repose sur la comparaison de la lumière diffusée par les matières en suspension, détectée à 90° à celle émanant d'une solution standard de turbidité connue.

Mode opératoire :

- Etalonner l'appareil avant de mesurer l'échantillon d'eau ;
- Mesurer la turbidité de l'échantillon ; l'unité usuelle est le NTU (unité de turbidité nephélogométrique)

Expression des résultats :

Les valeurs lues sur l'écran de l'appareil expriment la valeur de la turbidité en NTU



Figure IV – 7 : Turbidimètre AL450T-IR

Expression des résultats des analyses :

Le Tableau IV – 1 représente les caractéristiques des eaux pour les chaudières à tube d'eau à circulation naturelle et à eau d'appoint déminéralisée [11].

Tableau IV – 1 : les normes pour les chaudières à tube d'eau

Pression de service (bar)	5-15	15-40	40-60	60-75
Eau d'alimentation				
pH	≥ 8.5	≥ 8.5	≥ 8.5	≥ 8.5
TH (°F)	< 0.20	< 0.10	< 0.05	< 0.05
Eau de chaudière				
pH	10-12	10-11	10-11	10-11
TAC (°F)	≤ 25	≤ 20	≤ 15	≤ 10
TA (°F)	TA ≥ 0.5 TAC impératif			

Les résultats d'analyses effectués au niveau du laboratoire central pendant la période de notre stage sont montrés dans les tableaux.

Résultats des analyses de l'eau alimentaire

Les résultats d'analyses de l'eau alimentaire dégazée par un dégazage thermique (dégazage physique) sont représentés dans le Tableau IV – 2 :

Tableau IV – 2 : Résultats d'analyse de l'eau alimentaire

Jaures	TA (°F)	TAC (°F)	PH	TDS (mg/l)	χ (μS/cm)	T (°C)
21-05-23	0,00	0,60	7,09	28,00	18,00	15,00
22-05-23	0,00	0,70	7,80	28,00	18,50	15,50
23-05-23	0,00	0,00	7,08	74,00	18,60	14,00
24-05-23	0,00	0,50	11,90	26,00	16,00	13,00
25-05-23	0,00	0,50	7,25	22,00	13,80	14,00
26-05-23	0,00	0,50	7,00	18,00	11,80	15,00
27-05-23	0,00	0,60	7,67	25,00	15,80	14,50

Présentation graphique des résultats d'analyses de l'eau alimentaire

❖ Variation du TA :

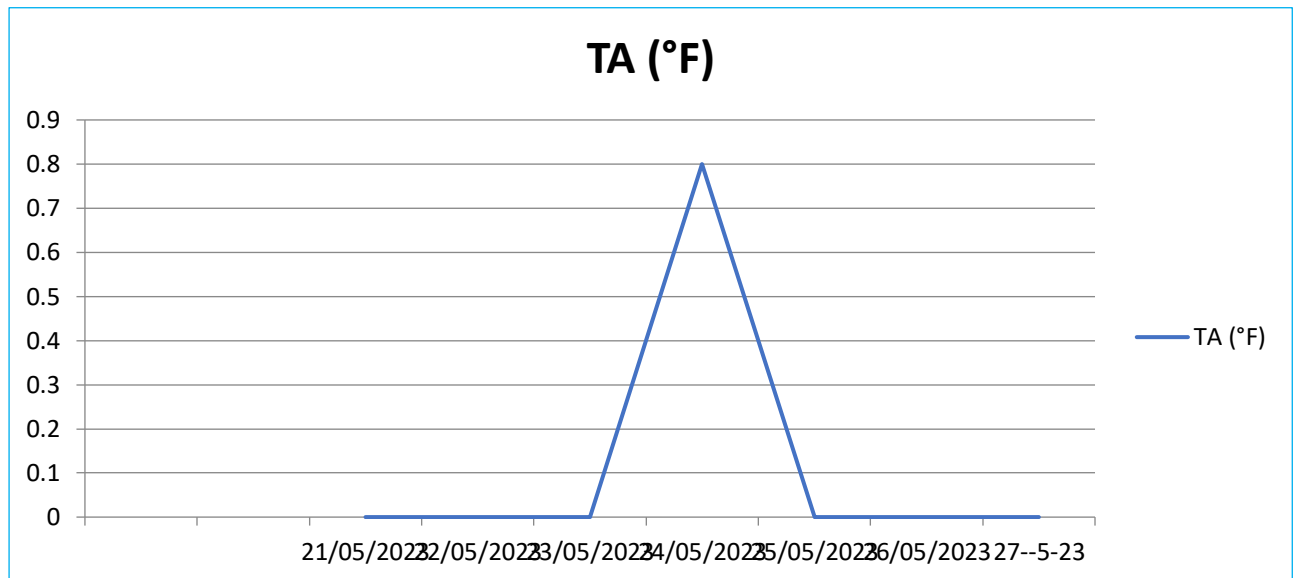


Figure IV – 8 : Variation du TA de l'eau alimentaire en fonction du temps

❖ Variation du TAC :

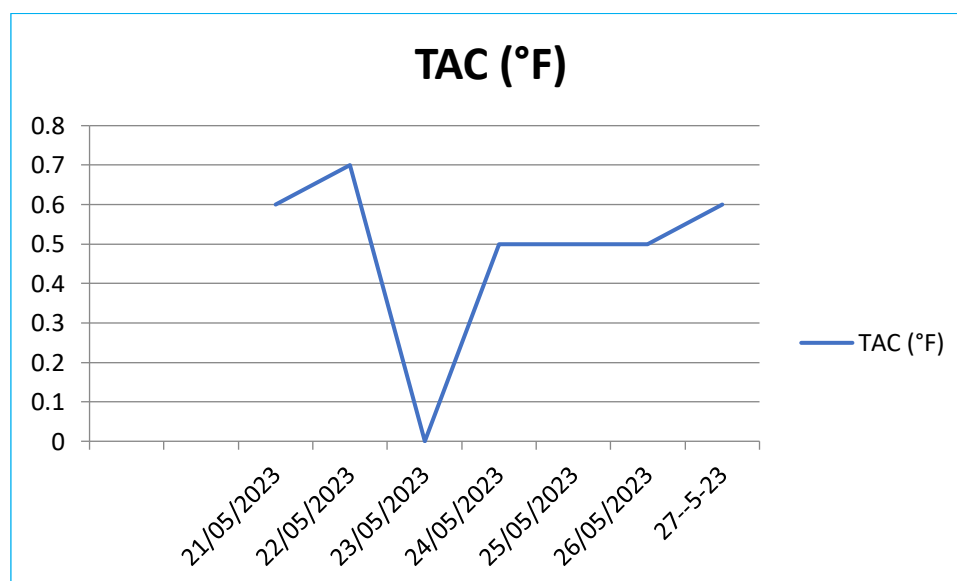


Figure IV – 9 : Variation du TAC de l'eau alimentaire en fonction du temps

L'ensemble des résultats du TA et du TAC permettent de connaître les concentrations en bicarbonates, carbonates et éventuellement en hydroxydes contenus dans l'eau. Nous remarquons un écart important entre les valeurs du TA et du TAC et cela dénote la présence de bicarbonate qui peut provoquer une forme libre de CO₂ agressif pour les chaudières. Il

apparaît clairement que le TAC est élevé par rapport aux normes, c'est -à- dire la teneur en bicarbonate est élevée dans notre échantillon analysé.

• **Variation du pH :**

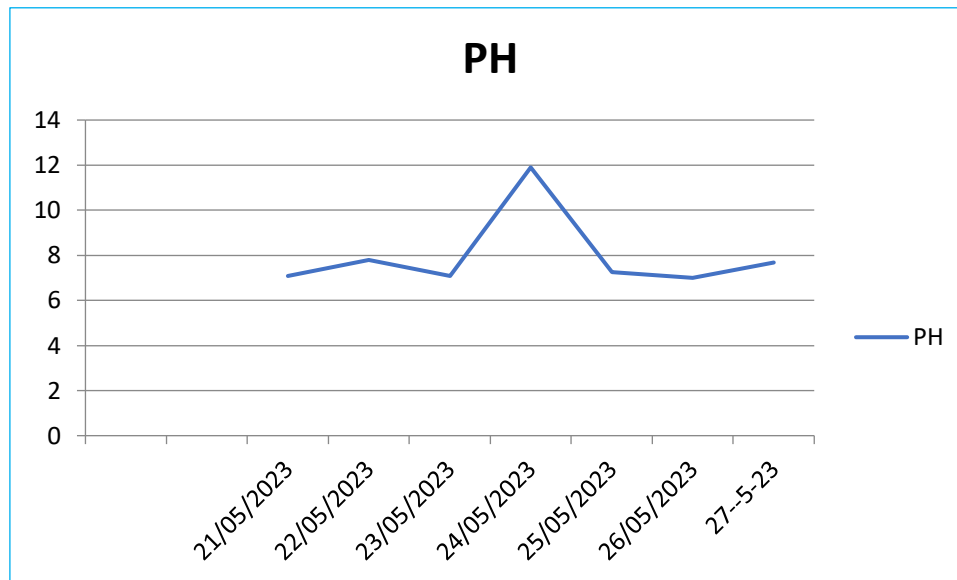


Figure IV – 10 : Variation du pH de l'eau alimentaire en fonction du temps

Les valeurs de pH doivent être dans l'intervalle de 8 à 9 et les valeurs optimales supérieures à 8,5. Les résultats d'analyses montrent des valeurs légèrement inférieures aux normes préconisés. L'ajustement de pH à ce niveau peut se remédier par l'injection de la soude ou de l'acide sulfurique. Au niveau de l'unité, le pH doit être ajusté normalement par l'injection de la soude afin d'avoir des valeurs de pH dans les normes.

Détermination du caractère de l'eau alimentaire :

Il existe différentes méthodes graphiques permettant la mesure et la caractérisation de la tendance d'une eau. Parmi ces méthodes, on a choisi d'utiliser la relation de l'indice de RYZNAR.

Le pHs est défini comme étant le pH théorique de saturation, et il est calculé en utilisant le tableau de TILLMANS (voir annexe). A noter qu'avant d'utiliser ce tableau, les valeurs du TAC exprimées en (°F) doivent être convertis en mg de CaCO₃ /L sachant que :

$$1^{\circ}\text{F} = 10\text{mg de CaCO}_3 /\text{L}$$

Les résultats de l'exploitation de cette méthode sont rassemblés dans les tableaux suivants :

Tableau IV – 3 : Résultats de calcul de pHS

Jaures	TAC (mg CaCO3/l)	pHs
21-05-23	6	8,15
22-05-23	7	8,13
23-05-23	8	8,07
24-05-23	5	8,23
25-05-23	5	8,23
26-05-23	5	8,23
27-05-23	6	8,15

Tableau IV – 4 : Résultats de calcul de l'indice de RYZNAR

Jours	pH	pHS	IR
21-05-23	7,09	8,15	9,21
22-05-23	7,80	8,13	8,43
23-05-23	7,14	8,07	8,14
24-05-23	11,90	8,23	4,56
25-05-23	7,25	8,23	9,21
26-05-23	7,00	8,23	9,43
27-05-23	7,67	8,15	8,66

Interprétation des résultats

L'analyse de l'indice de RYZNAR de notre eau d'alimentation montre un caractère moyennement corrosif à part quelques cas où l'eau dévient très entartrant ou très corrosive. On peut donc conclure que l'eau d'alimentation de la chaudière est moyennement corrosive car la moyenne de l'indice de RYZNAR est de 8,31.

Résultats des analyses de l'eau de chaudière :

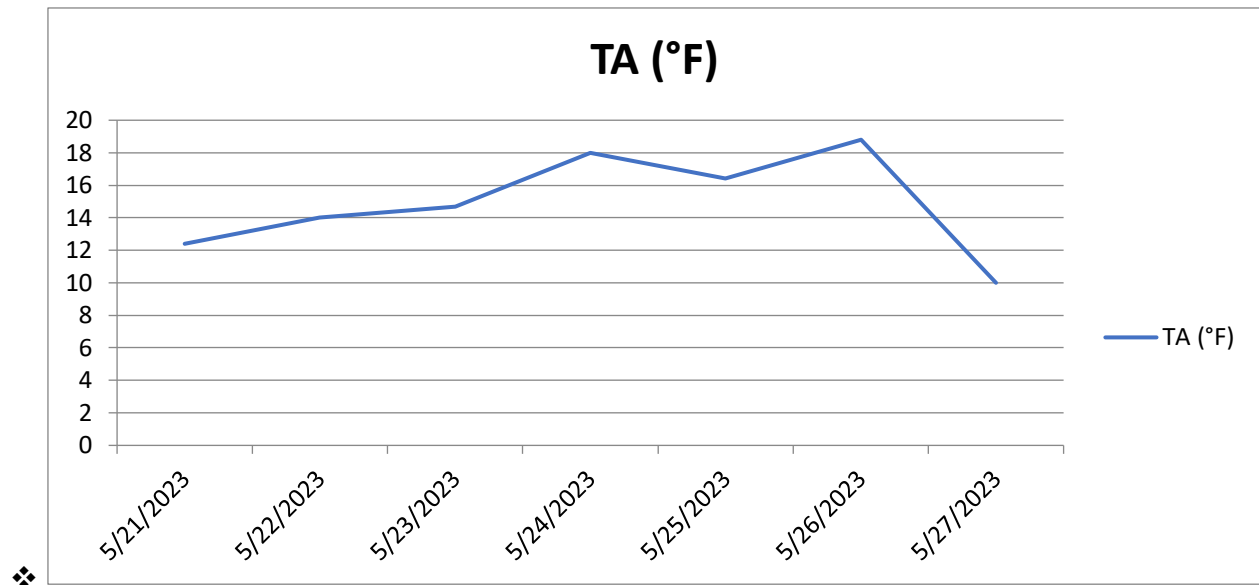
L'eau alimentaire subit un traitement chimique par injection des produits déjà cités (comme la morphine l'hydrazine...) avant qu'elle alimente la chaudière.

Les résultats de l'analyse de cette eau sont représentés dans le tableau IV – 5 :

Tableau IV – 5 : Résultats d'analyse de l'eau de Chaudière SITERM

Jours	TA (°F)	TAC (°F)	pH	TDS (mg/l)	χ (μ S/Cm)	T (°C)
21-05-23	12,40	14,80	11,87	764	930	16,00
22-05-23	14,00	17,00	11,87	846	980	14,50
23-05-23	14,70	10,80	11,75	960	1140	15,00
24-05-23	18,00	21,80	11,90	1035	1350	19,00
25-05-23	16,40	20,40	11,99	1151	1450	17,5
26-05-23	18,80	22,00	10,95	1152	1470	18,00
27-05-23	10,00	11,60	11,54	627	800	18,00

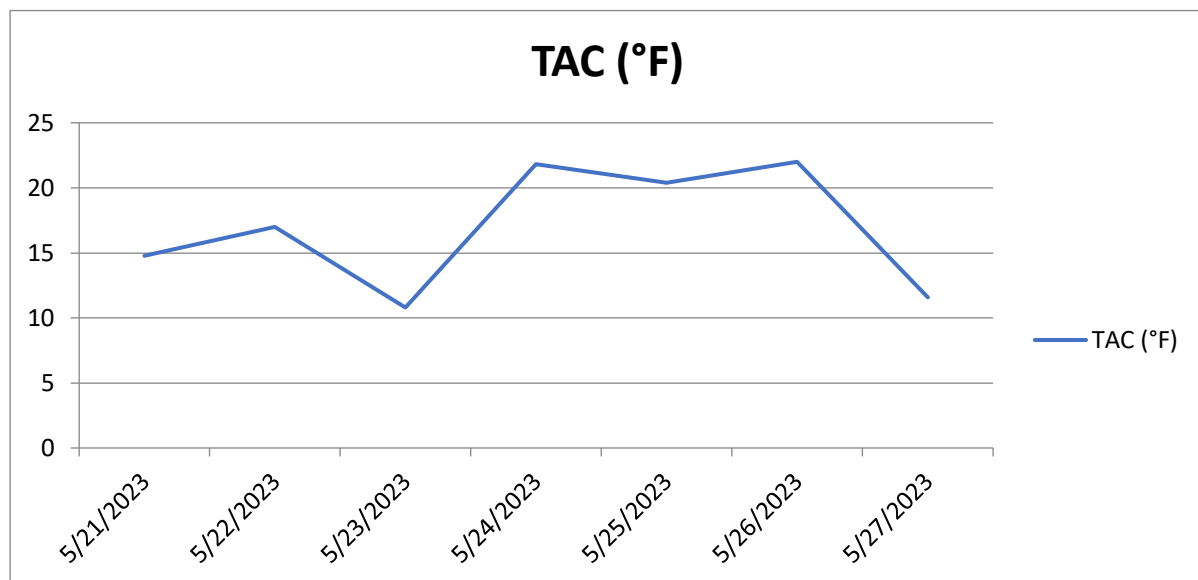
Présentation graphique des résultats d'analyses de l'eau de chaudière



❖ Variation du TA :

Figure IV – 11 : Variation du TA de l'eau de chaudière en fonction du temps

❖ Variation du TAC :



<www

Figure IV – 12 : Variation du TAC de l'eau de chaudière en fonction du temps

L'ensemble des résultats du TA et du TAC permettent de connaître les concentrations en bicarbonates, carbonates et éventuellement en hydroxydes contenus dans l'eau. Nous remarquons un écart important entre les valeurs du TA et du TAC.

Normalement le $TA \geq 0.5 TAC$ et dans notre cas majorité des analyses montre des $TA \geq 0.8 TAC$ alors que les valeurs optimum selon les normes se trouve autour de $TA \approx 0.7 TAC$ et cela dénote la présence de bicarbonate qui peut provoquer une forme libre de CO_2 agressif pour les chaudières. Il apparait clairement que le TAC est élevé par rapport aux normes, c'est - à- dire la teneur en bicarbonate est élevée dans notre échantillon d'eau.

❖ Variation du pH :

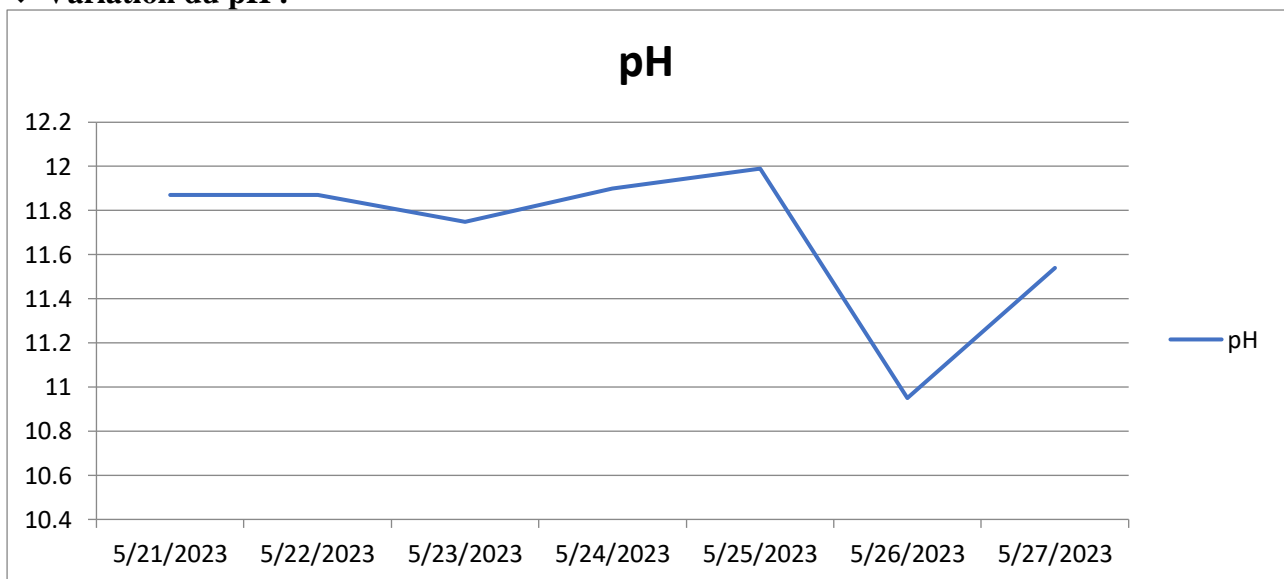


Figure IV – 13 : Variation du pH de l'eau de chaudière en fonction du temps

Les valeurs du pH selon les normes doivent être dans l'intervalle de 10 à 12 pour les eaux de chaudières. Les analyses du pH montrent des acceptables car ils se situent entre 10.95 et 11.99.

Les valeurs optimales se situent entre 10,5 et 11. L'ajustement du pH de l'eau de chaudière peut se faire par l'injection de la soude ou de l'acide sulfurique. Vu que les valeurs de l'analyse effectuée sont légèrement supérieures, une injection de l'acide sulfurique est fortement recommandée.

Interprétation des résultats

Il ressort de l'ensemble des résultats rapportés grâce à nos analyses que l'étude analytique du contrôle de l'eau d'alimentation et de la chaudière a montré un caractère agressif de ces eaux.

Nous suggérons à cet effet les correctifs suivants :

- ✓ Une vérification des modes opératoires pour confirmer le caractère répétitif des résultats.
- ✓ Accorder tous les soins dans la préparation des solutions.
- ✓ Veiller au respect du bon dosage des additifs.
- ✓ Une nécessité de l'ajustement du pH.
- ✓ Une nécessité de l'ajustement des inhibiteurs et leur suivi.
- ✓ L'analyse quotidienne des paramètres NaOH, SiO₂, P₂O₅.
- ✓ Il est nécessaire de se conformer aux normes préconisées par le constructeur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au cours de notre stage de fin d'études, qui a fait l'objet de ce mémoire, l'accent a été mis sur les principaux procédés de traitement des eaux.

A partir de ces résultats, on peut dire qu'une minimisation des dépôts de tartre et de corrosion dans les installations de production de vapeur est la clé d'une exploitation efficace et économique.

Aussi, un traitement rigoureux des eaux industrielles, des eaux déminéralisées avant l'entrée dans la chaudière protège celle-ci contre l'attaque agressive de l'eau.

Nous recommandons l'installation d'un système de contrôle et de correction automatique de la qualité de l'eau pour répondre aux exigences sévères du design afin d'augmenter la fiabilité de cette chaudière.

Enfin, nous pouvons dire que ce stage d'une courte durée effectué à LA Raffinerie SKIKDA nous a permis de mieux comprendre le traitement des eaux par différentes méthodes.

Aussi, nous avons eu l'occasion de mieux comprendre le phénomène de corrosion des circuits de l'eau de chaudière qui influence énormément le rendement de ces machines, et comment agir contre ce problème par un conditionnement des eaux d'alimentation.

Références Bibliographiques

- [1] : Document Arcelor Mittal.
- [2] : Dossier technique ACO₂
- [3] : J.J.BARON-« chaudière-technique de l'ingénieur », Ed ISTA, 1948
- [4] : M.PHILLIPE-« chaudière de récupération technique de l'ingénieur », génie énergétique, volume W₁, Ed ISTA 1980
- [5] : P.WUITHIER- « raffinage et génie chimique », Ed technique, tome II, 1972
- [6] : A.BOUSNOBRA et F. BOUDIB « Influence de la qualité d'eau sur les circuits de refroidissement au niveau de l'ACO₂ ». Mémoire de fin d'études. Département de chimie Université BADJI MOKHTAR-Annaba, 2000.
- [7] : B.LEGUBE, N.MERLET & COLL, « L'analyse de l'eau, techniques modernes d'analyse chimiques, biologiques et microbiologiques des eaux », Ed 9e, Dunod-Paris, 2009.
- [8] : J.REYNAUD « Concertation par évaporation et recompression mécanique de vapeur »,
Ed EYROLLES, 1984
- [9] : R.DESJARDINS « le traitement des eaux », Ed de l'école polytechnique de Montréal, 1997.
- [10]: Z.BOUZELIFA et S.MEDJANI. « Analyse et contrôle de la qualité de l'eau adoucie de refroidissement de l'ACO₁ (MITTAL STEEL) ». Mémoire de fin d'études. Département génie des procédés, Université BADJI MOKHTAR-Annaba, 2005.
- [11]: Mémento technique de l'eau. Processus élémentaire du Génie physico-chimique en traitement de l'eau. Tome1, 10^{ème} édition, Degrèment, mai 2005 p-185.
- [12]: S.KHARACHI et B.ZERARIA « Adoucissement et protection contre la corrosion chaufferie de l'ENCG –ANNABA » Mémoire de fin d'études, Département de génie des Procédés, Université BADJI MOKHTAR-Annaba, 2004.
- [13]: F.TAKABAIT « Traitement de l'Eau de Forage par Osmose Inverse au Niveau du Complexe Agroalimentaire Cevital ». Mémoire de fin d'études. Département de chimie, Université ABDERRAHMANE.MIRA - Béjaïa, 2012.

- [14]: J.RODIER, B.LEGUBE, N.MERLET & COLL, « L'analyse de l'eau ». Ed 9e Dunod-Paris, 2009.
- [15]: R.DJEBABLIA et W.MESSIKH. « Etude et impact de la qualité de l'eau de refroidissement du circuit semi-ouvert de la centrale et utilités II FERTIAL-ANNABA » Mémoire de fin d'études. Département génie des Procédés, Université BADJI MOKHTAR-Annaba, 2008.
- [16]: L.GERMAIN, L.COLAS, J.ROUQUET « Le traitement des eaux destinées à l'alimentation des chaudières à vapeur, aux circuits de réfrigération et aux réseaux de distribution d'eau industrielle et potable », Ed 5e Dunod- Paris, 1976.
- [17]: « F.ELLIS, S.CARLSON « Le traitement des eaux dans l'industrie pétrolière », Ed technique- Paris, 1954.
- [18]: F.MORAN « Chauffage climatisation installation sanitaire et traitement des eaux », Ed Parisienne, 2002.
- [19]: I.ABID. « Etude analytique et impact de la qualité d'eau adoucie sur le circuit d'eau de refroidissement de l'aciérie à oxygène N°2 (Arcelor Mittal-Annaba) ». Mémoire de fin d'études. Département génie des procédés, Université BADJI MOKHTAR-Annaba, 2013.
- [20] BITTEN J-F. FOCHTMAN E-G. 1972. Le traitement des eaux dans l'industrie pétrolière. Edition -TECHNIP- . 207 p.
- [21] MECHATI F. 2006. Etude des paramètres physico-chimiques avant et après traitement des rejets liquide de (RA1K). Mémoire de magister en chimie, option: pollution chimique et environnement. Université de SKIKDA. 87 p.