

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJIMOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénierat

Année 2019

Département de Génie des Procédés

Filière: Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **Master**

Contrôle de qualité de l'eau d'alimentation de la chaudière SITERM (SIDER EL HADJAR-ANNABA)

Présenté par:

DIALLO Salé

DJIBRINE Gombo Adef

Directeur de mémoire: Pr. TOUBAL Abdelaziz

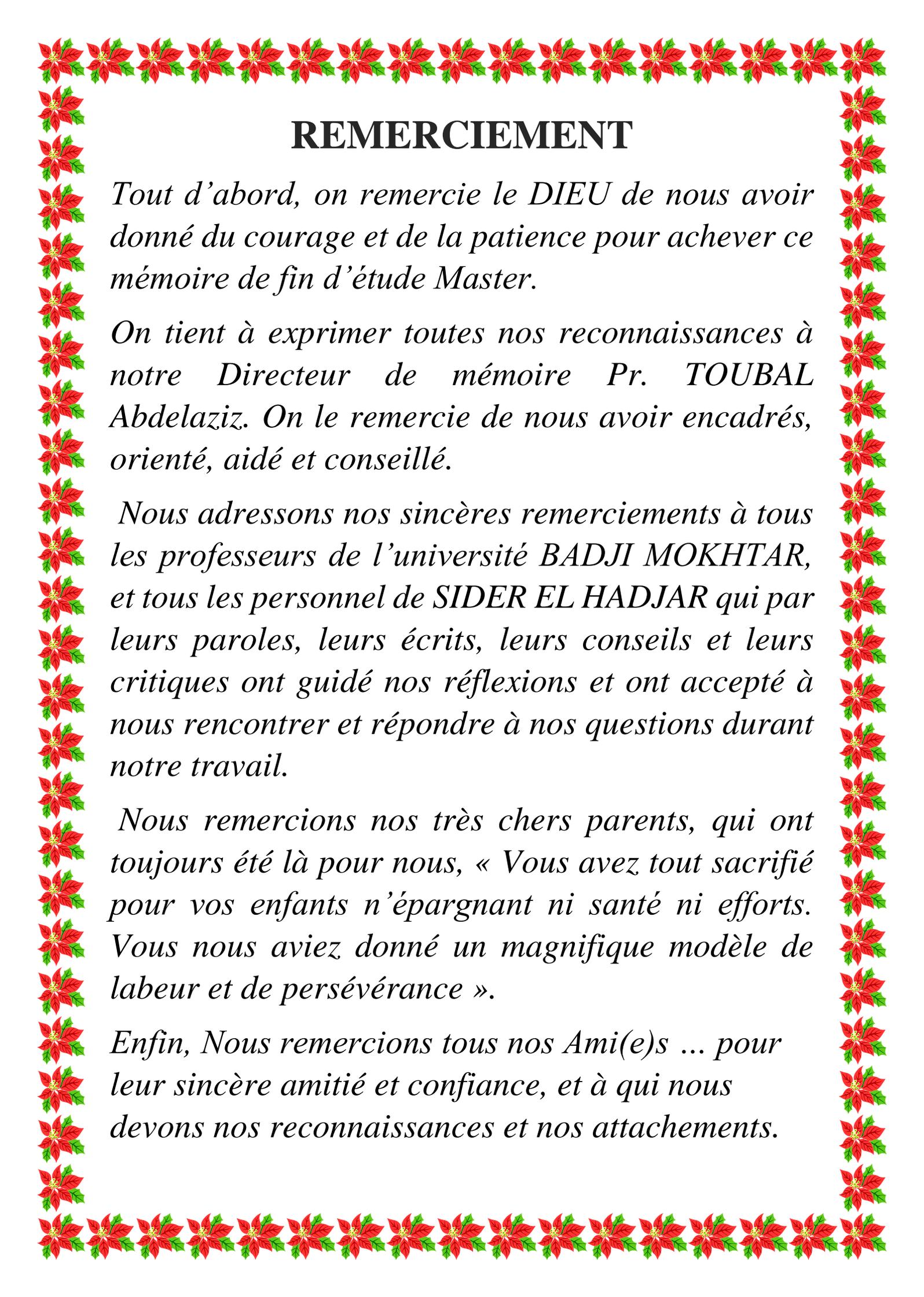
Université Badji Mokhtar- Annaba

Devant le jury :

Président : TOUBAL Abdelaziz Pr. Université Badji Mokhtar-Annaba

Examineurs : LARBI Lynda M.A.A Université Badji Mokhtar-Annaba

ABIDI Abdenabi M.C.A Université Badji Mokhtar-Annaba



REMERCIEMENT

Tout d'abord, on remercie le DIEU de nous avoir donné du courage et de la patience pour achever ce mémoire de fin d'étude Master.

On tient à exprimer toutes nos reconnaissances à notre Directeur de mémoire Pr. TOUBAL Abdelaziz. On le remercie de nous avoir encadrés, orienté, aidé et conseillé.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs de l'université BADJI MOKHTAR, et tous les personnel de SIDER EL HADJAR qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant notre travail.

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous nous aviez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance ».

Enfin, Nous remercions tous nos Ami(e)s ... pour leur sincère amitié et confiance, et à qui nous devons nos reconnaissances et nos attachements.



Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce mémoire de Master :

A ma tendre Mère Fadima Collo Diarra : vous représentez pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Vous avez fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

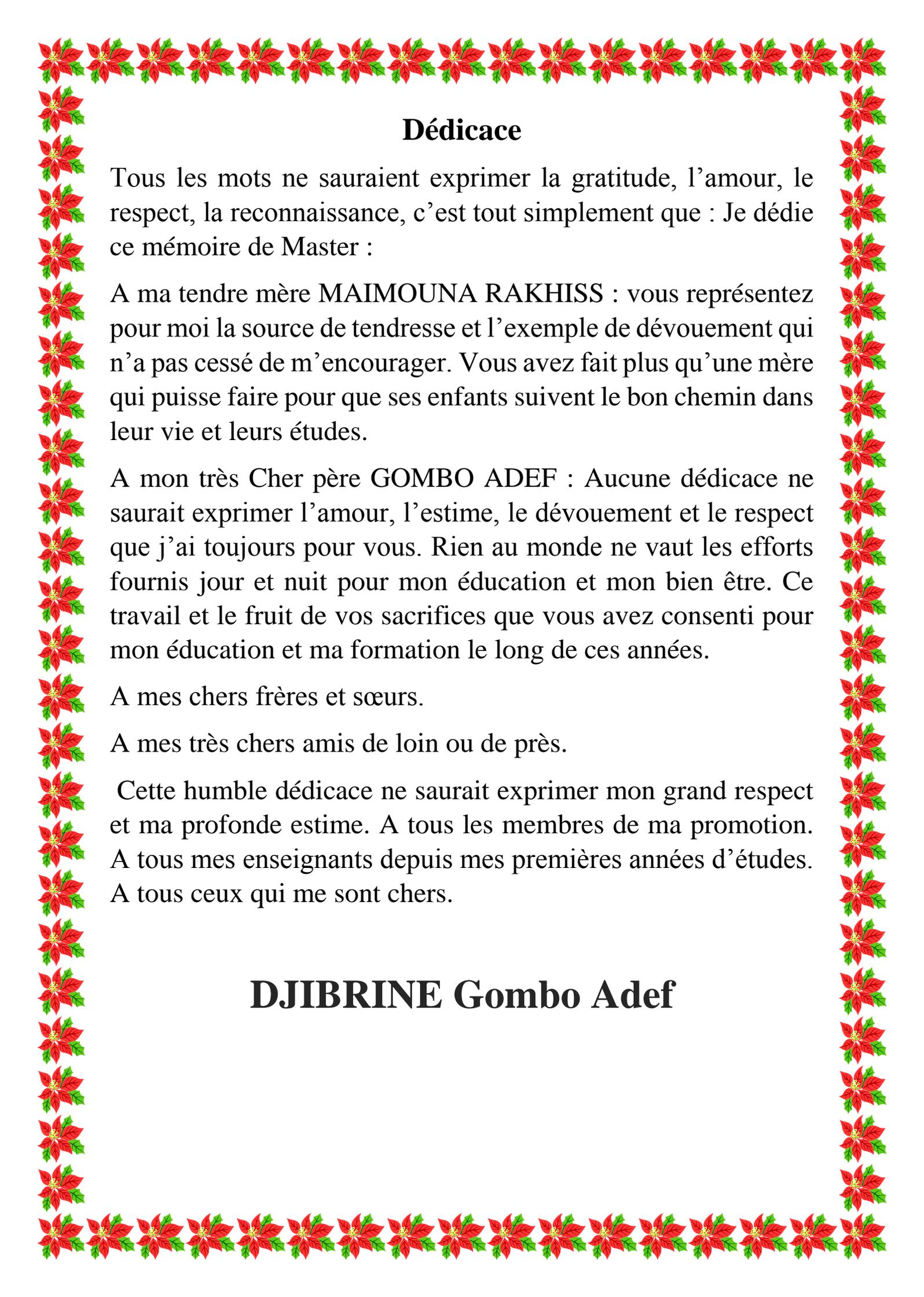
A mon très Cher père Nouhoum : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de vos sacrifices que vous avez consenti pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

A mon chers frère : Aboubacar

A mes très chers amis de loin ou de près.

Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profonde estime. A tous les membres de ma promotion. A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études. A tous ceux qui me sont chers.

DIALLO Salé



Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce mémoire de Master :

A ma tendre mère **MAIMOUNA RAKHISS** : vous représentez pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Vous avez fait plus qu'une mère qui puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A mon très Cher père **GOMBO ADEF** : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de vos sacrifices que vous avez consenti pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

A mes chers frères et sœurs.

A mes très chers amis de loin ou de près.

Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profonde estime. A tous les membres de ma promotion. A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études. A tous ceux qui me sont chers.

DJIBRINE Gombo Adef

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I. CHAPITRE I : PRESENTATION DU COMPLEXE SIDER-EL HADJAR.....	3
I.1 Historique :	3
I.2 Description du Complexe :	4
I.3 Activité(s) principale(s) :	4
I.4 Unités :	5
I.5 Zone fluide :	5
I.6 CONCLUSION :	7
II. CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES CHAUDIERES	8
II.1 Introduction	8
II.2 Différents types de chaudières :	8
II.2.1 Les chaudières à tubes de fumée	9
a) Présentation.....	9
b) Fonctionnement.....	9
c) Précautions.....	11
d) Production de vapeur surchauffée.....	11
II.2.2 Les chaudières à tubes d'eau.....	11
a) Présentation.....	11
b) Fonctionnement.....	12
c) Précautions.....	13
d) Production de vapeur surchauffée.....	13
II.3 Comparaison des performances.....	14
II.4 Mécanisme de la chaudière :	15
II.4.1 Alimentation en eau	15
II.4.2 Extraction	16
II.4.3 Purge continue.....	16
II.4.4 Les éléments constituant le site de la chaufferie	16
II.4.5 Circuits d'une chaudière :	18

II.5	Principe général de fonctionnement	19
II.5.1	Exploitation	19
II.5.2	Mise en service des brûleurs et fonctionnement	20
II.5.3	Approvisionnement en air de combustion des brûleurs	21
II.6	Généralités sur le transport et le transfert de l'énergie thermique : [5].....	24
II.6.1	Par conduction :.....	24
II.6.2	Par convection :.....	25
II.6.3	Par rayonnement :.....	26
III.	CHAPITRE III : TRAITEMENT DES EAUX	28
III.1	Introduction :	28
III.2	Production de l'eau industrielle :.....	28
III.2.1	Dégrillage	28
III.2.2	Coagulation- floculation- décantation :.....	28
III.2.3	Décarbonatation à la chaux :.....	35
III.2.4	Filtration :.....	36
III.3	Production de l'eau adoucie :	38
III.3.1	L'adoucissement :	38
III.3.1.1	Définition de l'échangeur d'ion :.....	39
III.3.1.2	Différents types d'échangeur d'ions :.....	40
III.3.2	La régénération :.....	41
III.3.2.1	Etapas de régénération :.....	41
III.3.2.2	Méthode de Régénération :	42
III.3.3	Ultrafiltration :.....	42
III.3.3.1	Fonctionnement.....	44
III.3.3.2	Grandeurs principales et loi de filtration :	45
III.3.3.3	Lavage des membranes :.....	46
III.3.4	Osmose inverse :	48
III.3.4.1	Définition et mécanisme :	48
III.3.4.2	Conception générale d'une installation d'osmose inverse.....	50
III.4	Paramètres à suivre :.....	52
III.4.1	Titre hydrotimétrique (TH) :	52
III.4.2	Titre alcalimétrique (TA) et titre alcalimétrique complet (TAC) :	53
III.4.3	Les matières en suspension (MES) :	54
III.4.4	Le total des solides dissous (TDS) :.....	54
III.4.5	Turbidité.....	55

III.4.6	Le potentiel d'hydrogène (pH) :	56
III.4.7	La conductivité :	57
III.4.8	Le fer :	57
III.4.9	Les phosphates :	58
III.5	Problèmes causés par l'eau :	59
III.5.1	La corrosion :	59
III.5.2	L'entartrage :	60
III.5.3	L'encrassement biologique :	60
III.5.4	. Moussage et primage.....	61
III.5.5	Quelques contaminants de l'eau :	62
III.6	. Lutte contre les problèmes causés par l'eau	63
III.7	Le principe de conditionnement de l'eau de chaudière :	65
III.8	Conclusion :	67
IV.	CHAPITRE IV : Partie expérimentale	68
IV.1	Détermination de l'alcalinité	68
IV.1.1	Principe :	68
IV.1.2	Réactifs :	68
IV.1.3	Mode opératoire :	68
IV.1.4	Expression des résultats :	69
IV.2	DETERMINATION DU TITRE HYDROTOMETRIQUE TH.....	69
IV.2.1	.Principe :	69
IV.2.2	Réactifs :	69
IV.2.3	Mode opératoire :	70
IV.2.4	Expression des résultats :	70
IV.3	DOSAGE DU TITRE CALCIQUE.....	71
IV.3.1	Principe :	71
IV.3.2	Réactifs :	71
IV.3.3	Mode opératoire :	71
IV.3.4	Expression des résultats :	71
IV.4	DOSAGE DES CHLORURES.....	72
IV.4.1	Principe :	72
IV.4.2	Réactifs :	72
IV.4.3	Mode opératoire :	72
IV.4.4	Expression des résultats :	72
IV.5	DETERMINATION DU pH	73

IV.5.1	Principe :	73
IV.5.2	Le pH mètre :	73
IV.5.3	Expression des résultats :	73
IV.6	DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE.....	75
IV.6.1	Principe :	75
IV.6.2	Le conductimètre :	75
IV.6.3	Expression des résultats :	75
IV.7	DETERMINATION DES MATIERES EN SUSPENSION.....	76
IV.7.1	Principe :	76
IV.7.2	Mode opératoire :	76
IV.7.3	Expression des résultats :	76
IV.8	DOSAGE DU FER TOTAL.....	77
IV.8.1	Principe :	77
IV.8.2	Réactifs :	77
IV.8.3	Mode opératoire :	77
IV.8.4	Expression des résultats :	77
IV.9	DOSAGE DE L'ACIDE ORTHOPHOSPHORIQUE	78
IV.9.1	Principe :	78
IV.9.2	Réactifs :	78
IV.9.3	Mode opératoire :	78
IV.9.4	Expression des résultats :	79
IV.10	Détermination de la turbidité	79
IV.10.1	Principe :	79
IV.10.2	Mode opératoire :	80
IV.10.3	Expression des résultats :	80
IV.11	Expression des résultats des analyses :	80
IV.11.1	Résultats des analyses de l'eau alimentaire	81
IV.11.2	Présentation graphique des résultats d'analyses de l'eau alimentaire	83
IV.11.3	Détermination du caractère de l'eau alimentaire :	87
IV.11.4	Interprétation des résultats.....	90
IV.12	Résultats des analyses de l'eau de chaudière :	90
IV.12.1	Présentation graphique des résultats d'analyses de l'eau de chaudière.....	92
IV.12.2	Interprétation des résultats.....	96
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	99

Liste des tableaux

Tableau II -1 : : Caractéristiques de la chaudière Siterm	13
Tableau II -2 : Comparaison des performances entre chaudière à tubes de fumée et chaudière à tubes d'eau.....	14
Taleau III – 1 : Consignes d'exploitation des décanteurs des usines à eau à SIDER	34
Tableau III – 2 : Paramètres physico-chimiques et méthodes de mesure	58
Tableau IV – 1 : les normes pour les chaudières à tube d'eau	81
Tableau IV – 2 : Résultats d'analyse de l'eau alimentaire	82
Tableau IV – 3 : Résultats de calcul de pH _s	88
Tableau IV – 4 : Résultats de calcul de l'indice de RYZNAR.....	89
Tableau IV – 5 : Résultats d'analyse de l'eau de Chaudière SITERM	91

Liste des figures

Figure I-1 : Logo SIDER EL HADJAR	3
Figure I-2 : Situation géographiques de SIDER EL HADJAR	4
Figure II -1 : Chaudière à tubes de fumée	9
Figure II -2 : Description chaudière à tubes de fumée	10
Figure II -3 : Chaudière à tubes d'eau	11
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 : Phénomène de coagulation/floculation	30
Figure III - 2 : Décanteur	34
Figure III - 3 : Machine pour produire le lait de chaux	36
Figure III - 4 : Filtre aquazur V	37
Figure III - 5 : Filtre aquazur T	37
Figure III - 6 : Schéma de principe de la production de l'eau industrielle au niveau de l'usine à eau	38
Figure III - 7 : Schéma de principe du mécanisme de l'adoucissement.	39
Figure III - 8 : Schéma du principe du mécanisme de la régénération.	41
Figure III - 9 : Schéma du mécanisme de filtration sur membrane	43
Figure III - 10 : Schéma d'un écoulement frontal	44
Figure III - 11 : Schéma d'un écoulement tangentiel	45
Figure III - 12 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	49
Figure III - 13 : Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse	50
Figure III - 14 : Prétraitement conventionnel typique	52
Figure IV - 1 : Dosage volumétrique du TA et TAC	69
Figure IV - 2 : Dosage volumétrique du TH.	70
Figure IV - 3 : Dosage volumétrique du $T_{Ca^{++}}$	71
Figure IV - 4 : Dosage volumétrique du Cl^{-}	73
Figure IV - 5 : Couple pH- mètre/Conductimètre	74
Figure IV - 6 : pH- mètre consort « C832 »	74
Figure IV - 7 : Conductimètre « E587 »	75
Figure IV - 8 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 »	76
Figure IV - 9 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » Dosage du fer total	78
Figure IV - 10 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » dosage de l'acide ortho phosphorique....	79
Figure IV - 11 : Turbidimètre AL450T-IR	80
Figure IV - 12 : Variation du TA de l'eau alimentaire en fonction du temps	83

Figure IV – 13 : Variation du TAC de l'eau alimentaire en fonction du temps.....	84
Figure IV – 14 : Variation du TH de l'eau alimentaire en fonction du temps	85
Figure IV – 15 : Variation du Cl ⁻ de l'eau alimentaire en fonction du temps	86
Figure IV – 16 : Variation du pH de l'eau alimentaire en fonction du temps.....	87
Figure IV – 17 : Variation du TA de l'eau de chaudière en fonction du temps.....	92
Figure IV – 18 : Variation du TAC de l'eau de chaudière en fonction du temps	93
Figure IV – 19 : Variation du TH de l'eau de chaudière en fonction du temps.....	94
Figure IV – 20 : Variation du Cl ⁻ de l'eau de chaudière en fonction du temps	95
Figure IV – 21 : Variation du pH de l'eau de chaudière en fonction du temps	96

RESUME :

Notre travail a été effectué au niveau de SIDER EL HADJAR (dans la zone fluide et au niveau du laboratoire central) reposant sur la qualité de l'eau d'alimentation de la chaudière.

Le générateur de vapeur installé dans l'unité est appelé SITERM, est une chaudière à tube d'eau très récente qui doit être alimenté par une eau bien traitée et conditionnée d'une façon stricte pour sa protection.

Pendant notre stage, on a analysé les teneurs des eaux selon une étude statistique permettant de déterminer l'incontestable fréquence d'échantillonnage, la conformité de la qualité de l'eau distribuée dans la chaudière et la détermination du caractère de cette eau.

الملخص:

لقد أجرينا عملنا على مستوى مركب سيدار الحجار (داخل منطقة الموانع وعلى مستوى المختبر الرئيسي)، هذا العمل يهتم بمعرفة نوعية الماء المغذي للمرجل.

إن مولد بخار المستخدم داخل وحدة الإنتاج يعرف بـ SITERM، وهو مرجل حديث ذو أنابيب مانية يشترط في تغذيته مياه معالجة بشكل جيد، وبطريقة صارمة، من أجل حمايته.

أثناء فترة التدريب، قد قمنا بتحليل محتويات المياه حسب دراسة إحصائية تسمح بتحديد التكرار القطعي للمعايرة، مطابقة نوعية المياه الموزعة داخل المرجل وتحديد ميزة هذه المياه.

ABSTRACT :

Our work was carried out at SIDER EL HADJAR (in the fluid zone and at the central laboratory level) based on the quality of the boiler feed water.

The steam generator installed in the unit is called SITERM, is a very recent water tube boiler which must be fed with water well treated and conditioned in a strict way for its protection.

During our internship we analyzed the water content according to a statistical study to determine the undeniable sampling frequency, the conformity of the quality of the water distributed in the boiler and the determination of the character of this water.

Contexte de l'étude :

Les thèmes qui ont été proposés sont :

- Phénomène d'entartrage des membranes d'ultra filtration
- Corrosion du circuit d'eau de refroidissement
- Efficacité des échangeurs ioniques

Cependant, on n'a pas choisi ces sujets pour des raisons suivantes :

- Pour le premier sujet ; le manque de moyens spécifiques d'une part et l'absence d'une expérience scientifique d'autre part ne pouvant pas nous permettre de suivre d'une manière représentative l'évolution de la vitesse de dépôt en fonction de la température.
- Pour le deuxième ; il est difficile de mesurer la corrosion à cause de l'indisponibilité du matériel adéquat au niveau de l'unité.
- Pour le troisième, on n'a pas voulu choisir ce thème car il ne nous passionnait pas

De ce fait on a été donc dans l'obligation de cibler un thème d'étude applicable dans le site et qui nous passionne contrôle de qualité de l'eau d'alimentation de la chaudière SITERM de SIDER EL HADJAR-ANNABA.

Problématique :

La zone fluide est considérée comme une cellule pour de multiples besoins, en eau ainsi qu'en vapeur générée. Cette dernière est produite en général à partir de différentes qualités d'eau d'alimentation telles que : l'eau adoucie, déminéralisée...

Actuellement l'alimentation de la chaudière se réalise avec l'osmosée. Vu que la chaudière est nouvellement installé (il y'a 2 ans), il n'a y a pas trop de problèmes.

En générale, les chaudières sont sujets à certains problèmes comme :

- Le soutirage de vapeur entraînant des retours brusques des vapeurs en sortie de pompe causant ainsi des déformations des tubes ainsi que la perturbation du niveau du ballon supérieur de la chaudière.
- Suite au vieillissement des différents instruments de commande, il y'a souvent des alarmes parasites comme blocage des paramètres de marche de la chaudière.
- Formation de résidu entartrant causant des points chauds.

Objectifs de l'étude :

Dans ce travail, notre objectif a été de contrôler la qualité de l'eau d'alimentation de la chaudière SITERM de Sider. Pour s'y faire, on a recueilli des informations relevées des archives de prestation analytique au laboratoire central de l'industrie. Ces données analytiques nous ont permis grâce à des analyses quotidiennes durant la période de stage, de déterminer la véritable fréquence d'échantillonnage à laquelle l'entreprise doit procéder pour répondre aux exigences du constructeur de la chaudière.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau, sur terre, est un or bleu omniprésent et indispensable à la vie, elle revêt donc une grande importance pour tous les êtres vivants. Elle est source de vie, mais aussi objet de culte. De nos jours elle est même devenue un produit commercial très important.

On peut trouver l'eau sous trois formes ou « états » : liquide, solide et gazeux. Sur terre c'est sous sa forme liquide qu'elle est la plus répandue. C'est pourquoi notre planète est aussi appelée " planète bleue ". En effet près de 70% de la surface de la terre est recouverte d'eau (97% d'eau salée et 3% d'eau douce). On trouve aussi l'eau sous forme gazeuse. Celle-ci provient de l'évaporation des étendues d'eau (salées et douces) et de l'évapotranspiration des plantes. Elle génère souvent des nuages qui peuvent être à leur tour sources de pluies. Enfin, on trouve également l'eau sous forme solide : glaciers, icebergs etc. Le passage de l'eau d'une forme à l'autre sur terre est décrit par le « Cycle de l'eau ».

L'eau circule en permanence dans l'atmosphère sur et sous la terre, entraînée dans un cycle sans fin.

Sous l'effet de la chaleur du soleil, l'eau des mers, des fleuves et des lacs s'évapore et forme les nuages. Ceux-ci sont poussés par le vent, traversant des régions froides se condensent et engendrent des pluies, de la neige ou des grêles. L'eau ainsi retombée ruisselle sur le sol ou s'infiltre dans le sous-sol. Elle vient grossir les fleuves, qui eux-mêmes retournent à la mer et le cycle recommence. L'eau possède des propriétés particulières : elle est qualifiée de « solvant universel ».

Du point de vu physique, l'eau sert de référence à la normalisation internationale des échelles numériques : température, densité, masse, chaleur spécifique. Sa chaleur spécifique est exceptionnellement élevée. Cet état de fait explique la grande inertie thermique et son rôle régulateur de la température de la surface terrestre. L'état physique de l'eau dépend de la température et de la pression. Le passage liquide-gaz se fait classiquement à 100°C à la pression normale. L'eau à l'état solide est plus légère que l'eau liquide.

L'eau possède un fort pouvoir mouillant qui lui donne des propriétés capillaires particulièrement importantes, par exemple, pour comprendre son comportement dans les sols. En outre, sa viscosité est très variable selon sa composition chimique ou sa température.

Du point de vu chimique, l'eau est un excellent solvant qui dissout un très grand nombre de composés minéraux et organiques. L'obtention de l'eau pure (eau sans contaminants bactériens et chimiques) est très difficile. Même l'eau distillée contient des traces d'ions ou de molécules.

Dans les réactions chimiques, l'eau intervient d'abord par sa dissociation en protons H^+ , souvent associés à H_2O pour former des protons hydratés H_3O^+ et en ions hydroxyle OH^- . C'est la prédominance entre ces deux types d'ions qui détermine le pH de la solution.

Les eaux de pluies, pourtant issues essentiellement de l'évaporation de l'eau de mer, se chargent de minéraux dans l'atmosphère. Une fois tombée, et qu'elle ruisselle ou s'infiltré dans le sous-sol, l'eau se charge de beaucoup de minéraux et de matières organiques. Certaines de ces substances sont polluantes ou toxiques et d'autres sont très dangereuses pour les chaudières.

CHAPITRE I : PRESENTATION DU COMPLEXE SIDER EL HADJAR

I.1 Historique :

L'entreprise nationale de sidérurgie a été créée par la société bônoise de sidérurgie (SBS) en 1959 suite à la mise en application du plan de Constantine.

Après l'indépendance, celle-ci devient Société Nationale Sidérurgie (SNS) et ceci dans le cadre de la récupération des richesses du pays.

Elle fut créée le 03 septembre 1964 en tant que moyen pour assurer le développement du pays et améliorer les conditions de vie du peuple, c'est-à-dire répondre aux impératifs économiques et sociaux du développement du pays.

La SNS a bénéficié des différents plans de développement pour s'étendre aux files des nécessités et devenir enfin Entreprise Nationale de Sidérurgique (ENS).

L'ENS a développé en 1969 un pôle sidérurgique à EL HADJAR pouvant répondre à une gamme de produit très variée, en devenant SIDER.

En 2000, et avec la nouvelle politique de partenariat, le complexe prend le sigle ISPAT et 5 ans après prend le nom MITTAL STEEL et actuellement il est ensuite nommé ARCELOR MITTAL et actuellement nommé [1].



Figure I-1 : Logo SIDER EL HADJAR

I.2 Description du Complexe :

Le complexe Arcelor-Mittal d'El-Hadjar (SIDER) est situé à 15 Km de la ville d'Annaba, occupant une périphérie de 830 Hectares. Le démarrage du complexe a commencé en 1969 ; il a pour mission de transformer le minerai de fer et de fabriquer les divers produits sidérurgiques. L'usine dispose de ses propres installations maritimes reliées au réseau ferroviaire pour le transport des matières premières et les expéditions des produits finis. Elle dispose d'un réseau commercial composé de 9 points de vente à travers le pays. Il est alimenté en minerai par voie ferrée à partir des mines de fer de l'OUANZA et BOUKHADRA, distantes de 150 Km, au sud du complexe [1].

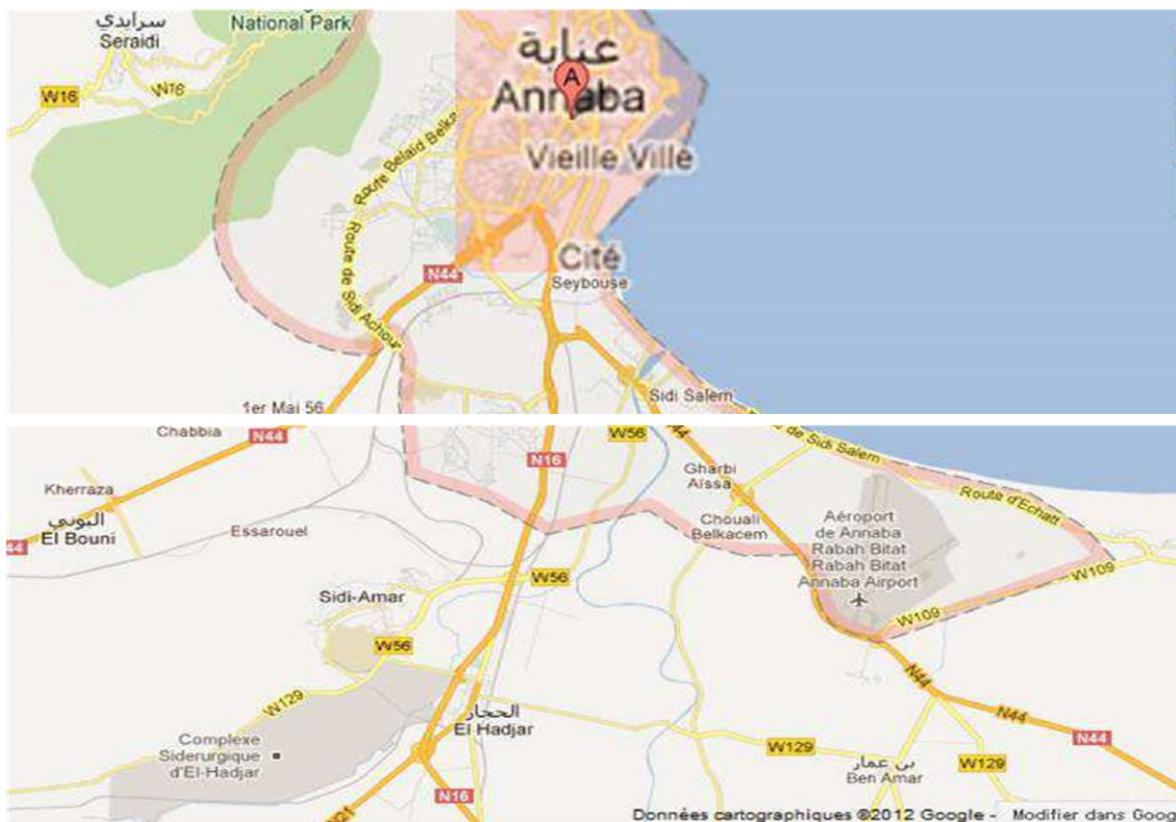


Figure I-2 : Situation géographique de SIDER EL HADJAR

I.3 Activité(s) principale(s) :

Fabrication de produits plats et longs : Bobines et tôles d'acier, ronds à béton et tubes sans soudure.

- Bobines et tôles laminées à chaud pour : La métallurgie, la mécanique, les chantiers navals et les industries pétrolière et de transformation (Tubes, bouteilles à gaz).
- Tôles fines et bobines laminées à froid pour : Industries de transformation, électroménager, mobilier métallique, fûts, tubes...
- Tôles nervurées pour : Bardage pour unités industrielles, couvertures de bâtiments pour l'agronomie, l'industrie alimentaire et l'élevage...
- Rond à béton pour construction de bâtiments, travaux publics et ouvrages d'art.

I.4 Unités :

- Une unité de préparation de matières premières et agglomérées
- Un haut fourneau
- 2 aciéries à oxygène
- Une aciérie électrique
- Un laminoir à chaud
- Un laminoir à froid
- Une ligne de galvanisation, des lignes de cisailage à froid
- Un laminoir à rond à béton
- Des unités de support et de maintenance

I.5 Zone fluide :

Dans ces dernières années, on a ajouté une autre unité qui est la zone fluide. Le secteur fluide représente une grande importance dont les installations représentent 80 % et a pour but de gérer et assurer la circulation des différents types de fluides en fonction des normes technologiques.

Le secteur fluide comprend les principaux circuits :

- Air comprimé ;
- Eau potable ;
- Eau industrielle ;
- Gaz naturel ;
- Eau brute ;
- Oxygène à une pression de 20 bars ;

- Azote à une pression de 10 bars.

L'eau est classée en trois catégories :

- L'eau industrielle ;
- L'eau adoucie ;
- L'eau déminéralisée

a) Utilisation de l'eau industrielle :

Cette eau est utilisée essentiellement pour le refroidissement de certains mécanismes où la température est moins importante, à titre d'exemple on cite :

- ❖ Le refroidissement des machines à couler continue et des billettes ;
- ❖ Le refroidissement, l'épuration des gaz (CO, CO₂) et les poussières (calamines et graphites) des convertisseurs ;
- ❖ Le refroidissement des échangeurs des paliers presse-étoupes des pompes, des moteurs et divers.

b) Utilisation de l'eau adoucie :

L'eau adoucie destinée spécialement pour le refroidissement des installations si la température est assez élevée pour éviter la corrosion, à titre d'exemple : les lances, les puits de lance, les goulottes d'addition et les lingotières.

Elle est aussi utilisée pour le refroidissement des systèmes de captation des gaz et des poussières des convertisseurs (jupe, hotte mobile, hotte fixe).

La partie consacrée au refroidissement par l'eau adoucie dans notre circuit est essentiellement la lance qui est décrite d'une façon plus approfondie ci-après :

c) Utilisation de l'eau déminéralisée :

L'eau déminée est destinée à l'alimentation des chaudières à partir de laquelle est produite de la vapeur surchauffée pour faire tourner les turbines qui entraînent les alternateurs.

Donc à partir de l'énergie thermique on produit de l'énergie mécanique et ensuite de l'énergie électrique.

I.6 CONCLUSION :

Vu l'importance de la qualité de l'eau de chaudière pour la production de la vapeur surchauffée alimentant les turbines, nous avons mis l'accent sur l'étude de l'influence de ce paramètre essentiel (qualité de l'eau de chaudière) pour le bon fonctionnement de l'installation (chaudière).

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES CHAUDIERES**II.1 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.

II.2 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].

II.2.1 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.

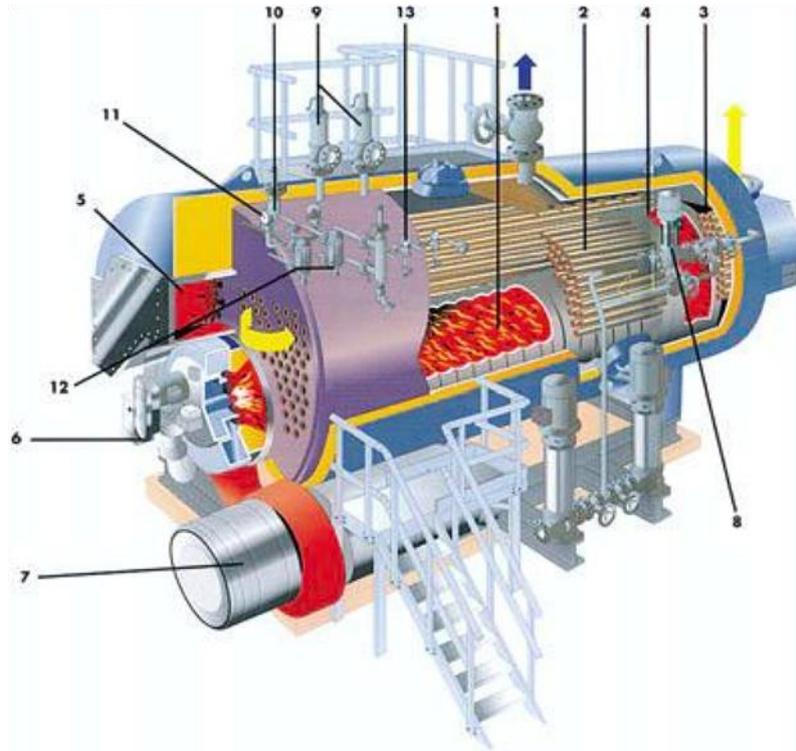


Figure II -2 : Description chaudière à tubes de fumée

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.

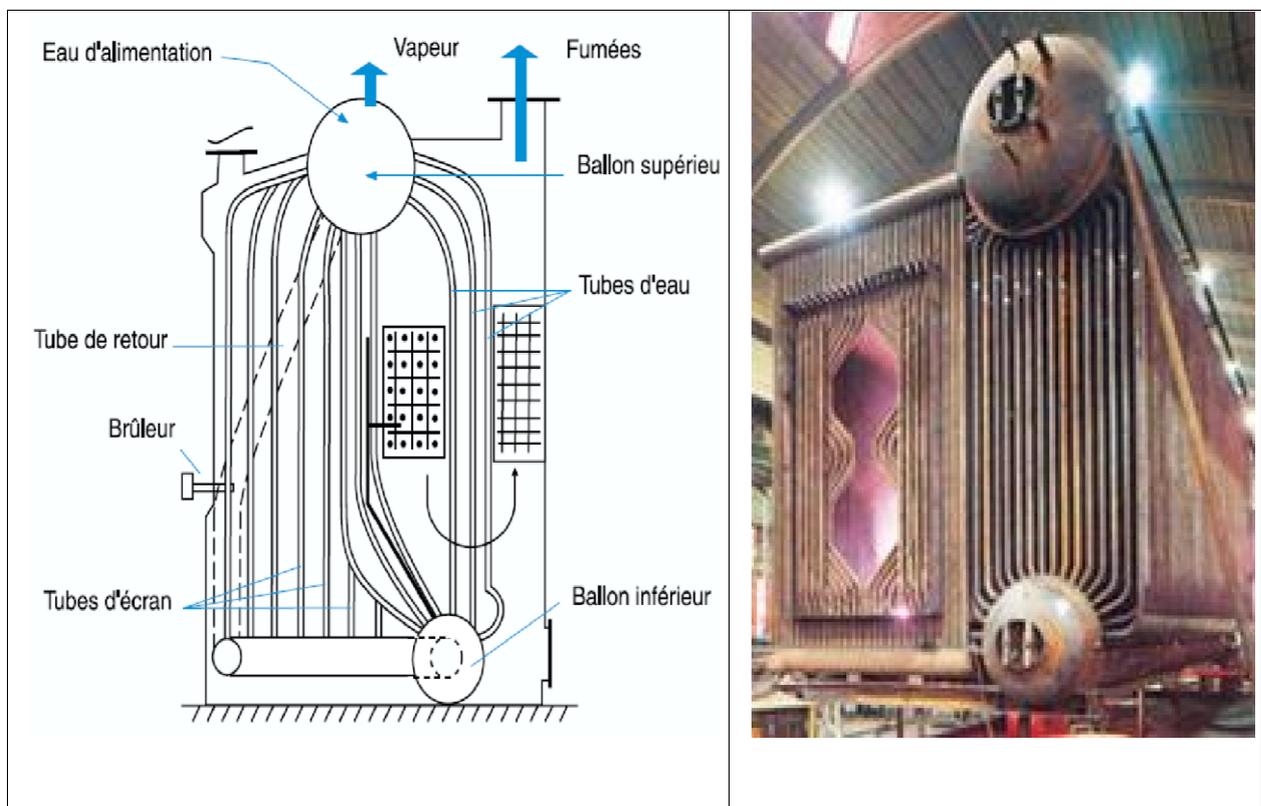


Figure II -4 : Description chaudière à tubes d'eau

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 m ³
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

II.3 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"> • Puissance • Débit • Timbre (pression max. d'utilisation) 	<ul style="list-style-type: none"> • moyennement élevée • 1,5 à 25 t/h • 10 à 20 bar 	<ul style="list-style-type: none"> • importante • 4 à 200 t/h • 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (circulation forcée)

II.4 Mécanisme de la chaudière :

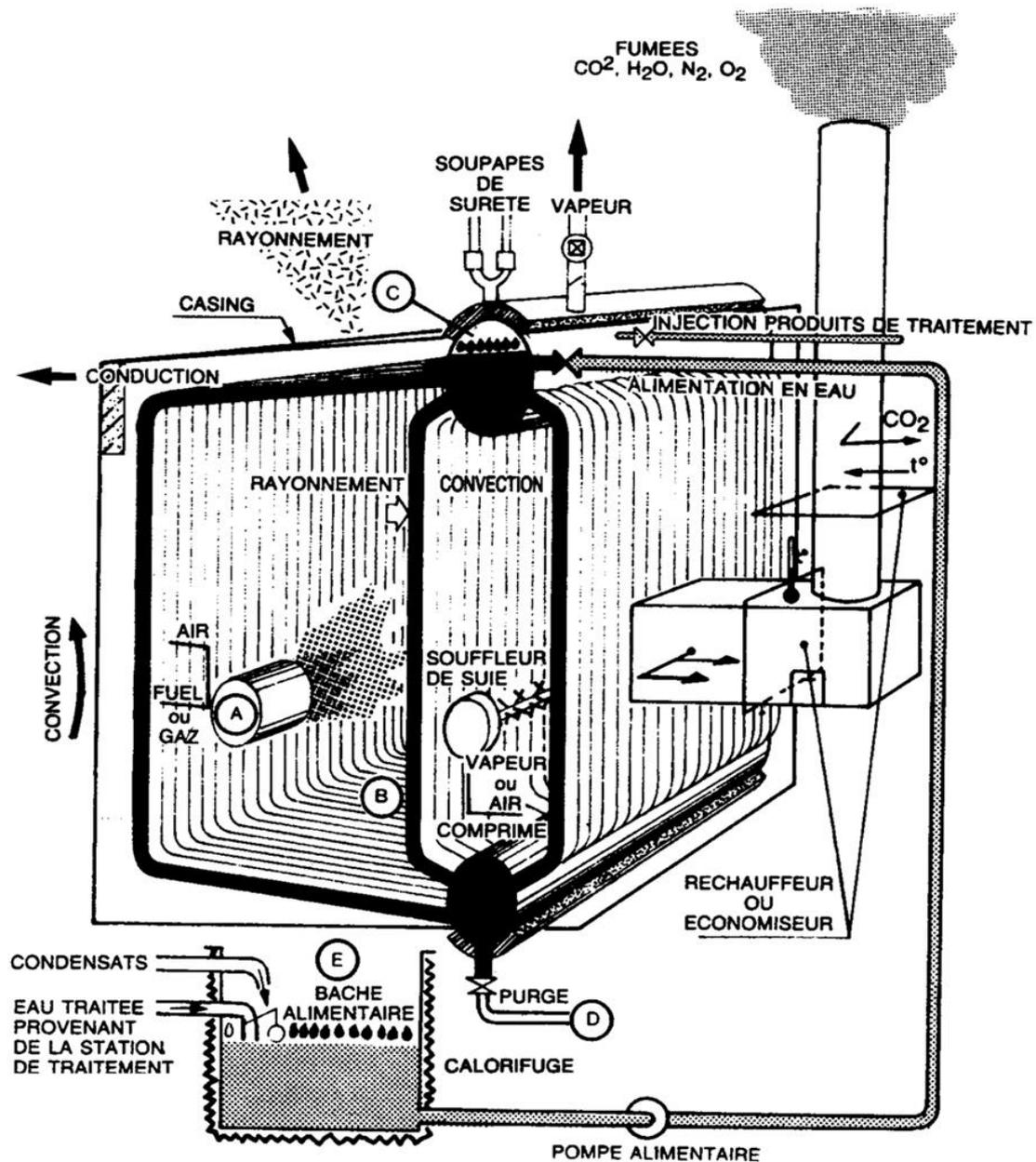


Figure II – 5 : Vue générale des approvisionnements et des mécanismes de la chaudière

II.4.1 Alimentation en eau

L'eau de chaudière provient de la station de traitement, de la bache de récupération des condensats, 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.

II.4.2 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 débouage, peut être récupérée et envoyée dans un dégazeur, à température et pression faibles. Les boues et eau excédentaire sont par ailleurs évacuées après refroidissement.

II.4.3 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].

II.4.4 Les éléments constituant le site de la chaufferie

- Bâche dégazant** : pour alimenter les deux chaudières en eau ultra pure avec une pression de service de 1.21 bar.
- 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.

II.4.5 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 envoyé 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.

II.5 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 circonférentielle 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.

II.5.1 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.

II.5.2 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.

II.5.3 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 NO_x . 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 événements, 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.

II.6 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 :

II.6.1 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 :

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

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]

II.6.2 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 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$]

A : Surface d'échange [m^2]

T_f : Température moyenne de fluide [K]

T_s : Température moyenne de fluide [K]

II.6.3 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 réfléchiée, 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 [W/m².K⁴]

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 ça 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 : TRAITEMENT DES EAUX

III.1 Introduction :

L'eau dont nous disposons dans la nature n'est pas directement utilisable pour la consommation humaine ou industrielle, parce qu'elle se pollue et se charge de matières en suspension, de déchets des végétaux, des organismes et de sels divers. La présence de ces nombreux intrants de différentes natures impose un traitement des eaux avant l'utilisation.

On trouvera rassemblées dans cette partie les chaînes de traitement permettant d'obtenir, à partir d'eau brute, les eaux déminéralisées de qualité suffisante pour alimenter sans problème la chaudière.

III.2 Production de l'eau industrielle :

L'eau utilisée dans le Complexe d'Arcelor Mittal (SIDER) provient en grande partie du barrage BOUNAMOUSA. Cette eau arrivant à l'usine à eau est stockée généralement dans des réservoirs en béton de capacité considérable sous une pression de 2 à 6 bars, avant qu'elle ne soit envoyée pour les diverses utilisations des unités du Complexe. Elle subit un traitement préalable au niveau de l'usine à eau dont le but est de produire une eau industrielle ensuite une eau adoucie puis enfin une eau déminéralisée par les procédés suivants :

- Dégrillage
- Coagulation- Flocculation - Décantation ;
- Décarbonatation à la chaux ;
- Filtration sur un filtre à sable monocouche [6].
- Ultrafiltration(UF)
- Osmose inverse(OI)

III.2.1 Dégrillage

Le rôle principal du dégrillage est une préfiltration pour éliminer les gros matériaux qui peuvent endommager les installations et réduire l'efficacité globale du procédé de traitement [7].

III.2.2 Coagulation- flocculation- décantation :

L'eau brute contient des particules extrêmement fines. Ces particules peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes ; c'est la raison à laquelle il est nécessaire d'ajouter à l'eau traitée un électrolyte permettant de neutraliser les charges négatives qui sont à

l'origine du maintien des suspensions stables. On utilise généralement des sels d'un métal trivalent ; Fe^{3+} ou Al^{3+} .

La coagulation et la floculation sont des opérations essentielles notamment pour le traitement des eaux de surface. Bien que constituant deux étapes distinctes (théoriquement comme techniquement), la coagulation et la floculation sont inséparables dans la majorité des cas. Cette double opération précède toujours une ou plusieurs étapes de séparation liquide/solide, classiquement la décantation ou la flottation et/ou la filtration en profondeur ou encore, plus récemment, la filtration sur membranes.

Les objectifs de cette double opération sont nombreux. Historiquement, le seul objectif était la contribution à l'abattement de la turbidité et des matières en suspension. Aujourd'hui, c'est l'action très importante de ces opérations dans l'élimination des matières organiques dissoutes qui est principalement recherchée. La coagulation et la floculation peuvent aussi participer à l'élimination de nombreux micropolluants minéraux ainsi qu'à celle des micro-organismes.

a) Coagulation :

La coagulation est définie théoriquement comme l'opération conduisant à la déstabilisation des particules colloïdales « stables » pour permettre leur agrégation quand le contact a lieu et pour rendre ainsi la décantation ou la flottation plus performante. Techniquement, on la définit plus simplement par « agitation rapide » ou « flash mixing » [7].

La coagulation se déroule en deux étapes successives :

- Décharger les colloïdes généralement électronégatifs présents dans l'eau ;
- Favoriser l'agglomération des particules en floes plus volumineux et accélérer leurs chutes. [6-8]

b) La floculation

La floculation est l'opération conduisant à l'agglomération des particules déstabilisées par coagulation. C'est aussi le terme utilisé pour définir l'étude de la cinétique de cette agglomération. Techniquement, on la définit plus simplement par « agitation lente ». Cette opération se situe donc toujours après une coagulation.

Au plan théorique, la floculation est représentée par une expression de la cinétique d'agglomération qui montre que la vitesse d'agglomération des particules sous agitation dépend principalement :

- de l'efficacité de la coagulation ;
- de la concentration en particules ;
- du gradient de vitesse (G) du mélangeur [7].

On peut donc retenir qu'après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a effectivement pour but d'augmenter la probabilité de rencontre entre les particules grâce à l'agitation du fluide [9].



Figure III – 1 : Phénomène de coagulation/floculation

Dans le cas du traitement des eaux de surface, la coagulation et la floculation sont pratiquement toujours utilisées et ce sont des opérations déterminantes sur l'efficacité de la clarification dans son ensemble, donc sur la qualité des eaux traitées. La coagulation doit être fréquemment optimisée (dose de coagulant et pH de coagulation). En effet, bien que le coût du coagulant représente une part importante des frais d'exploitation, le rapport « gain de qualité/coût » de cette opération est toujours le meilleur par rapport aux autres opérations, comme par exemple les traitements d'affinage (ozonation/CAG, CAP/séparation liquide-solide).

Choix du coagulant :

Le coagulant est de préférence choisi suite à des d'essais. Ces essais doivent être guidés par les connaissances acquises et habituellement vérifiées en usine :

-le chlorure ferrique est plutôt utilisé pour les eaux peu minéralisées, riches en matière organique naturelle dissoute (eau douce de cours d'eau et eau de retenue) ;

-le sulfate d'aluminium et les polychlorures d'aluminium (PCA) sont plutôt utilisés pour des eaux minéralisées, peu chargées en matières organiques (eau de cours d'eau) avec une préférence pour les PCA en eau froide.

Choix de la dose et du pH :

Les variables permettant d'agir sur le processus de coagulation pour obtenir le meilleur résultat possible sont pour un coagulant donné, sa dose, le pH de coagulation, ainsi que secondairement les conditions d'agitation (gradient de vitesse et durée d'agitation). Cependant, la complexité du système est telle que les bases théoriques de la coagulation/floculation ne permettent pas à elles seules de préciser les conditions optimales de traitement pour une eau donnée. Il faut toujours avoir recours à l'expérience dite du « flocculateur à hélices » ou « Jar-test ».

Appareillage et méthode du « Jar-test » :

L'appareillage utilisé est généralement constitué d'un agitateur à hélices multipostes (3 ou plus), muni d'un variateur de vitesse et d'un compte-tours.

1. Remplir des béciers d'un litre d'eau à traiter,
2. A l'aide d'une pipette introduire à dose croissante dans les béciers une solution de sulfate d'alumine à 10g/l,
3. Plonger l'hélice dans le premier bécier et mettre le flocculateur en marche en agitant vigoureusement (100 à 200 trs/min). Plonger le pH-mètre dans le premier bécier et à l'aide d'une pipette ajouter une suspension de chaux à 1g/l jusqu'à l'obtention du pH de floculation,
4. Retirer l'hélice et la sonde de pH-mètre et noter la quantité de chaux injectée,
5. Reprendre les étapes 3, 4, et 5 pour le deuxième béciers mais sans enlever l'hélice et calculer la différence de la quantité de chaux injectée entre le premier et le deuxième béciers,

6. Plonger les hélices dans tous les béchers et ajouter les quantités de chaux proportionnellement aux quantités de sulfate injectées par rapport au résultat obtenu à l'étape 6,
7. Ajouter, s'il existe, à dose constante la quantité optimale de polymère 1g/l,
8. Agiter vigoureusement pendant 2 à 3 minutes (100 à 200 trs/min) et réduire en suite la vitesse d'agitation à environ (30 à 40trs/min) pendant 15 à 20 minutes,
9. A la fin de l'agitation lente retirer doucement les hélices des béchers sans casser les floccs et laisser décanter pendant 20 à 30 minutes,
10. A l'aide d'une pipette ou d'une seringue, prendre une quantité d'eau décantée et déterminer les turbidités,
11. Plonger la sonde de pH-mètre dans les béchers, les pH de floculation doivent être presque identiques,
12. Appliquer les taux de sulfate, chaux et polymère du bécher ayant la plus faible valeur de turbidité en eau décantée.

Objectifs recherchés

Les objectifs principaux de l'expérience du « Jar-test » sont très fréquemment de deux ordres, et ce pour un paramètre donné de qualité (turbidité, MES, COD, métaux) :

- déterminer la dose optimale de coagulant (et de floculant) ;
- déterminer la zone optimale de pH de coagulation.

c) Décantation :

La décantation gravitaire tient une place primordiale dans les filières de traitement d'eaux de surface pour la production d'eau potable. Ce phénomène est assuré par voie physique, il s'opère par effet de gravité.

Elle est toujours précédée de la double opération de coagulation/ floculation et toujours suivie d'une filtration. La décantation est parfois remplacée par la flottation. Une fois le floc formé, il faut réaliser la séparation solide-liquide qui permettra d'obtenir d'une part l'eau clarifiée et d'autre part les boues ; on utilise, en général, l'action de la pesanteur sur les particules en suspension et l'on recueille ensuite l'eau claire à la partie supérieure de l'appareil, alors qu'on soutire les boues sédimentées dans la partie inférieure [8].

La coagulation floculation se déroule généralement de la suite

Coagulation/floculation par l'aluminium ou le fer (ferrique)

Les effets du fer ferrique et de l'aluminium en coagulation sont dus à leurs produits d'hydrolyse qui sont des complexes hydroxo-métalliques principalement insolubles dans les conditions de leur utilisation.

Des diagrammes théoriques de solubilité de l'aluminium et du fer dans l'eau pure en fonction du pH peuvent être facilement calculés et tracés à partir des valeurs des constantes d'hydrolyse. Dans des conditions proches de la neutralité, ce sont donc les solides $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ qui sont formés majoritairement et qui précipitent dans le milieu sous forme de micro-flocs.

La formation de ces précipités s'accompagne toujours de libération d'acidité qui peut être neutralisée par la base faible que représente l'ion hydrogénocarbonate (HCO_3^-), très souvent présent dans l'eau à traiter. Si cette neutralisation « naturelle » est insuffisante pour stabiliser le pH, il sera nécessaire d'injecter une base forte (généralement la chaux ou parfois la soude) dans l'eau.

Il existe deux mécanismes principaux de coagulation des colloïdes par l'aluminium ou le fer ferrique qui se positionnent dans deux zones (de conditions optimales) des diagrammes de solubilité. La première est située dans des zones de pH proche de (ou légèrement supérieure à la neutralité); le mécanisme prépondérant est le piégeage dans un précipité et le potentiel zêta résultant est généralement négatif même en conditions optimales. La seconde zone correspond à des milieux légèrement acides (pH 5 à 6); le mécanisme principal est la neutralisation de la charge primaire des colloïdes et le potentiel zêta résultant est nul pour des conditions optimales.

Coagulation/floculation complémentaire par les polymères

Ce mode de coagulation/floculation par les polymères naturels ou (surtout) de synthèse est de plus en plus utilisé en seconde étape après l'ajout de sels de fer ou d'aluminium, notamment en usine de traitement des eaux de surface avec un décanteur à grande vitesse. Pour cette application, les réactifs polymères sont généralement appelés « floculants », bien que leur rôle soit également de coaguler.

Les mécanismes induits par l'ajout de polymère (généralement anionique) sont la coagulation par neutralisation de la charge primaire et/ ou l'adsorption suivie d'une floculation par pontage inter-particulaire des particules coagulées.



Figure III – 2 : Décanteur

Pour savoir que le décanteur marche normale on fait des prélèvements de boues au niveau du compartiment central du décanteur

Taleau III – 1 : Consignes d’exploitation des décanteurs des usines à eau à SIDER

	Hauteur de boues mesurées en éprouvette de 250 après 10 minutes de repos		
	Hauteur inférieur à 20	Hauteur inférieur à 20	Hauteur supérieur à 30
TA inférieur a (TAC/2) – 0.5	Augmenter la chaux	Augmenter la chaux	Augmenter la chaux Augmenter les purges
TA égale (TAC/2) +/-0.5	Vérifier l’injection de FeCl ₃ , si elle est normale diminuer les purges	Si l’eau est limpide tout va bien Si l’eau est trouble augmenter le FeCl ₃	Augmenter les purges
TA supérieur a (TAC/2) + 0.5	Diminuer la chaux Cesser les purges Augmenter le FeCl ₃	Diminuer la chaux	Diminuer la chaux Augmenter les purges

III.2.3 Décarbonatation à la chaux :

La décarbonatation à la chaux est un traitement de précipitation qui a pour effet de réduire la dureté temporaire d'une eau qui est due à la présence des bicarbonates de calcium $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ et de magnésium $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. [10].

La chaux employée sous forme de lait de chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ précipite les bicarbonates de calcium et de magnésium sous forme de cristaux (petits grains fins). Les réactions de décarbonatation sont les suivantes :

En premier temps, l'eau contient du CO_2 ; celui-ci réagit le premier sur la chaux pour former de l'hydrogencarbonate de calcium :



Par conséquent, une augmentation du TAC et de $\text{T}_{\text{Ca}^{++}}$ favorise la précipitation du CaCO_3 , selon la réaction :



Si $\text{T}_{\text{Ca}^{++}} < \text{TAC}$, on a ensuite la réaction suivante :



Un excès de chaux conduira à la réaction :



Il suffit de retirer les petits grains contenus dans l'eau pour avoir une eau partiellement épurée [10].



Figure III – 3 : Machine pour produire le lait de chaux

III.2.4 Filtration :

La filtration a pour but de retenir sur un support les matières en suspension apportées par l'eau brute ou résultante d'un traitement préalable dans lequel on fait percoler l'eau décantée à travers un milieu poreux qui idéalement retient les particules solides, et laisse passer le liquide.

La rétention des matières solides contenues dans l'eau provoque une obstruction progressive des interstices entre les éléments constitutifs de la matière filtrante. Après un temps de fonctionnement les filtres seraient colmatés ce qui nécessitent un lavage. Les filtres sont lavés par brassage à l'air fourni par un compresseur et simultanément avec un retour d'eau fournie par une pompe de lavage pour faciliter l'évacuation des impuretés.

Il y a deux types de filtres, les filtres aquazur **T** et les filtres aquazur **V**. Ces deux types sont caractérisés par :

- une filtration sur haute couche de sable homogène,
- une grande hauteur d'eau assurant une pression positive en tout point du filtre, ce qui permet d'éviter les dégazages dans le lit filtrant.

L'eau filtrée ayant traversée le sable, puis les buselures, est reprise sous le plancher par le canal de sortie d'eau filtrée.



Figure III – 4 : Filtre aquazur V



Figure III – 5 : Filtre aquazur T

On peut résumer les procédés de traitement dans le schéma ci-après :

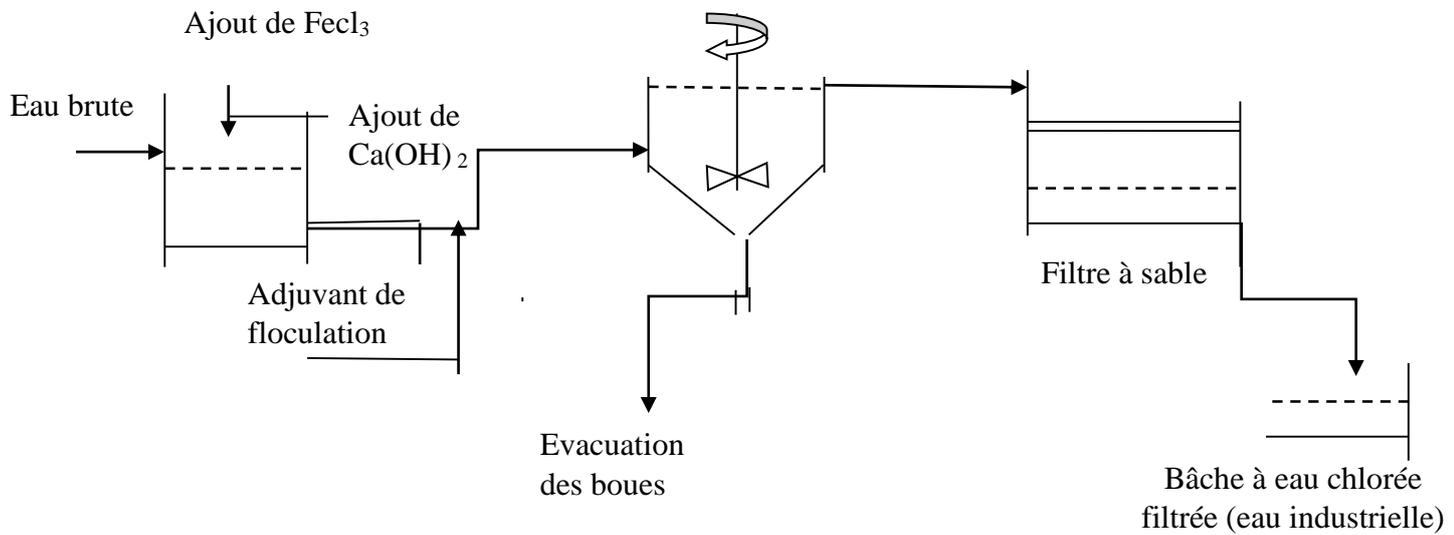


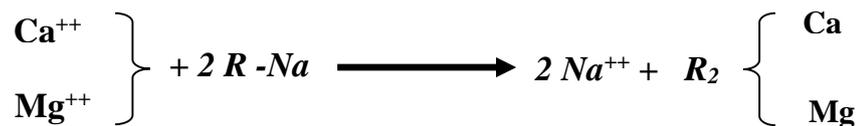
Figure III – 6 : Schéma de principe de la production de l'eau industrielle au niveau de l'usine à eau.

III.3 Production de l'eau adoucie :

La présence d'une forte concentration en minéraux dans une eau conduira dans certaines conditions à des phénomènes de précipitation et donc à l'apparition de dépôt. En particulier, pour éviter la formation de tartre, le constructeur procède alors aux traitements d'adoucissement à l'aide d'une résine échangeuse d'ions.

III.3.1 L'adoucissement :

L'adoucissement est une technique qui élimine les ions qui cause la dureté de l'eau en général, les ions calciums et magnésiums. L'eau percole sur une résine échangeuse de cations sous la forme ionique sodium qui permet la substitution aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} présents dans l'eau, d'ions Na^+ fixés sur la résine, selon la réaction suivante :



La figure III – 7 illustre cette réaction : les billes de résine sont initialement chargées avec des ions sodium (Na^+). Comme on le voit schématiquement, chaque ion calcium ou magnésium qui pénètre dans la résine est remplacé par deux ions sodium qui en sortent.

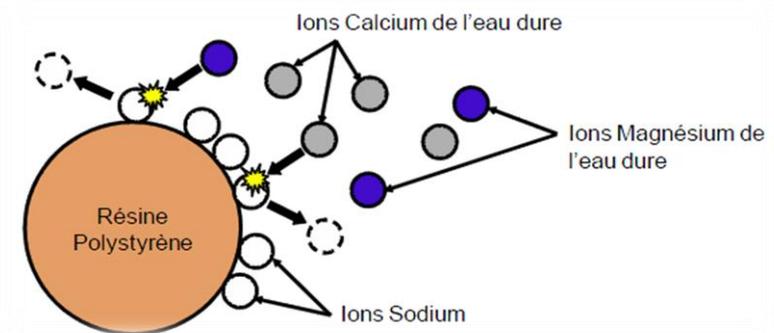


Figure III – 7 : Schéma de principe du mécanisme de l'adoucissement.

Il est essentiel de faire l'adoucissement sur une résine échangeuse d'ion à partir d'une eau parfaitement clarifiée (turbidité inférieure à 2 NTU) avec un TAC de l'ordre de 2 à 6 °F.

Lors de l'usage d'un échangeur d'ion il faut tenir compte des facteurs limitant l'usage des résines tels que :

- ✓ La charge organique dissoute ou certains agents complexants pouvant empoisonner la résine ;
- ✓ Une forte teneur en matières en suspension pouvant engendrer facilement le colmatage de la colonne [10].

III.3.1.1 Définition de l'échangeur d'ion :

Les échangeurs d'ions sont des substances granulaires insolubles, comportant dans leur structure moléculaire, des radicaux acides ou basique susceptibles de permuter, sans modification apparente de leur aspect physique, et sans altération ou solubilisation, les ions positifs ou négatifs, fixés sur ces radicaux, contre des ions de même signe se trouvant en solution dans le liquide pendant leur contact.

Cette permutation est appelée échange d'ion [11].

III.3.1.2 Différents types d'échangeur d'ions :

La plupart des résines utilisées de nos jours sont des matières synthétique produites à partir d'un polymère (habituellement des chaînes de polystyrène reliées entre elles par du divinylbenzène).

Fondamentalement, on distingue :

A) Echangeur de cations :

- *Echangeur de cations fortement acide :*

Ce sont des copolymères styrène-divinylbenzène, dotés de groupement fonctionnel sulfoné (R-SO₃H), fixé par action de l'acide sulfonique après polymérisation, d'où leur désignation courante des résines « polystyrène sulfoné ». Ces résines se présentent sous forme de bille plus ou moins colorées en jaune. C'est pratiquement le type utilisé pour la production de l'eau adoucie au niveau de l'ACO₂.

- *Echangeurs de cations faiblement acides :*

Ce sont des résines polyacryliques caractérisées par la présence de radicaux carboxyliques COOH, pouvant s'apparenter à certains acides organiques tels que l'acide formique ou acétique. Elles se différencient des échangeurs fortement acides sur deux points :

- ✓ Elles fixent seulement les cations Ca²⁺, Mg²⁺, Na²⁺ liés aux bicarbonates mais ne peuvent échanger les cations en équilibre avec des anions forts (SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻);
- ✓ Elles se régénèrent facilement (réaction d'un acide fort sur des sels d'acides faibles) ; la réaction est totale, avec des taux de régénération voisins de la stœchiométrie.

B) Echangeur d'anions :

- *Echangeur d'anions fortement basique :*

Les résines fortement basiques sont des amines quaternaires. Leur squelette est soit acrylique, soit polystyrénique, à structure gel ou macroporeuse. Elles servent pour fixer les acides faibles comme l'acide carbonique ou la silice. Elles peuvent également libérer les bases et leurs sels.

- *Echangeur d'anions faiblement basique :*

Ces produits sont des amines généralement tertiaires. Les amines primaire sont rarement utilisées et ont une basicité très faible.

Leur squelette est soit polystyrénique à structure macroporeuse, soit polyacrylique. Les résines polyacryliques ont plus de capacité et retiennent l'acide carbonique mais sont difficiles à rincer [11] [12].

III.3.2 La régénération :

Les résines ont une capacité de fixation de calcium limitée, lorsque cette capacité limite est atteinte après passage d'un certain nombre de mètres cubes, le calcium de l'eau brute n'est plus fixé et réapparaît en sortie d'adoucisseur : c'est la fuite de dureté. L'adoucisseur n'est plus en mesure de remplir son rôle et il faut donc procéder à la régénération [12].

La figure.6 illustre la réaction réversible où les billes de résine sont chargées avec des ions calcium et magnésium. Après ce procédé, la résine retourne à sa forme ionique afin qu'elle puisse être réutilisée pour un nouveau cycle.

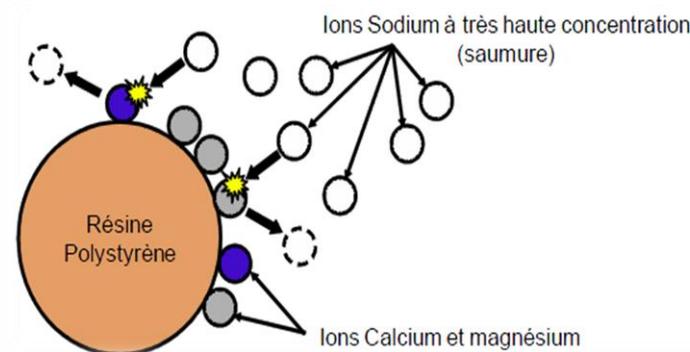


Figure III – 8 : Schéma du principe du mécanisme de la régénération.

III.3.2.1 Etapes de régénération :

➤ *Détassage :*

Cette étape consiste à établir un courant d'eau ascendant qui met la résine en expansion. Contrairement les particules solides ainsi que les fines particules de la résine sont évacuées vers l'égout. Cette opération est extrêmement importante car elle permet d'éliminer les matières en suspension qui auraient décanté et facilite la fixation du sodium. On admet que le débit nécessaire est le même que le débit instantané en phase de production d'eau adoucie [8] [9].

➤ **Régénération :**

On introduit alors la solution régénérante, généralement concentrée, en la faisant percoler lentement.

➤ **Rinçage :**

On déplace ensuite le régénérant par de l'eau, à faible débit, jusqu'à ce que le lit de résine n'en contienne plus que des traces. C'est la phase de déplacement ou rinçage lent.

Ensuite, on procède à un rinçage rapide à un débit plus élevé de façon à éliminer les dernières traces de régénérant. L'opération se termine lorsque tous les chlorures de sodium sont totalement éliminés et la dureté à la sortie de l'adoucisseur est voisine de zéro [8].

III.3.2.2 Méthode de Régénération :

- ❖ **Régénération à Contre-courant :** pour ce procédé, on injecte la solution concentrée en ion A de bas en haut, de couches moins saturées aux couches complètement saturées pour ne pas laisser de places à l'ion B à s'accrocher, d'où on aura un meilleur rendement.
- ❖ **Régénération à Co-courant :** pour cette opération, la solution concentrée en ion A, est mis au contact avec les couches d'échangeur saturées en ion B, qui vont être chassées de la résine, limogées de la couche supérieure vers les couches moins saturées. Dans ce cas on aura une mauvaise régénération dû à la présence des ions B dans les couches inférieures.

Les avantages de la régénération à contre-courant se présentent comme suit :

- Amélioration de rendement et par conséquent diminution de la consommation des réactifs ;
- Amélioration de la qualité de l'eau traitée.

III.3.3 Ultrafiltration :

La membrane est définie comme une couche mince semi-perméable qui joue le rôle d'une barrière sélective, sous l'effet d'une force motrice, elle permet l'arrêt ou le passage de substances dissoutes [7] [13].

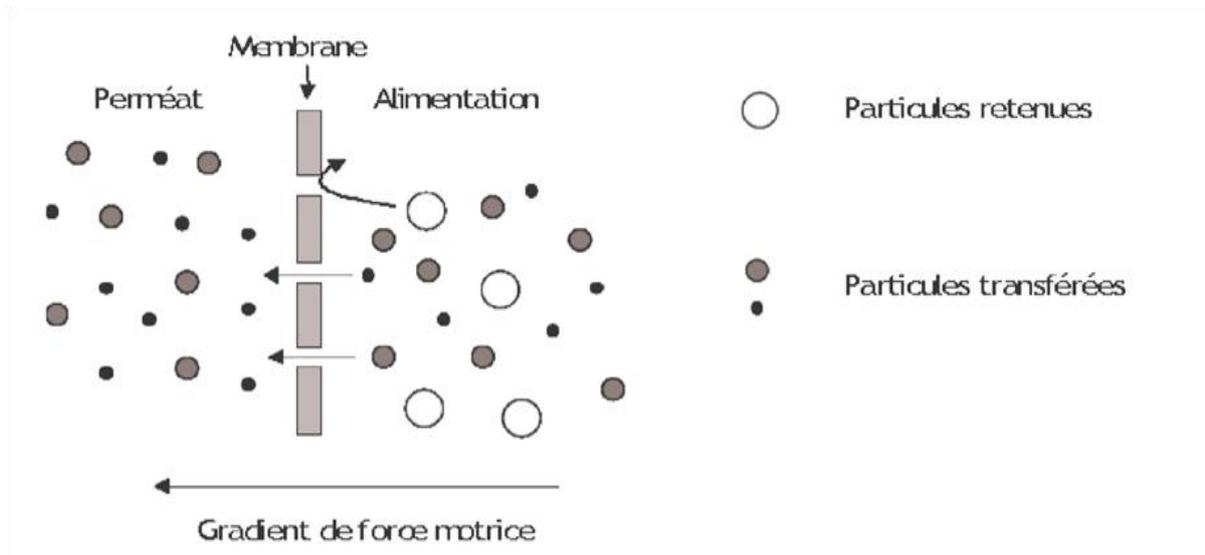


Figure III – 9 : Schéma du mécanisme de filtration sur membrane

Le résultat d'une opération de filtration membranaire est la séparation du fluide à traiter en deux parties de concentrations différentes :

- Le retentât qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane ;
- Le perméat qui contient les molécules qui traversent la membrane.

La clarification membranaire est très utilisée pour la production d'eau potable à partir d'eaux souterraines pour lutter contre la turbidité des eaux d'origine karstique et/ou pour traiter les eaux souterraines contenant des matières organiques naturelles ou anthropiques (avec injection de coagulant et/ou de charbon actif en poudre dans ce cas).

Les membranes d'UF utilisées, depuis la fin des années 1980 jusqu'à aujourd'hui, ont été et sont toujours organiques, principalement en polysulfone (PSf) ou en acétate de cellulose (AC), voire en polypropylène (PP) ou encore en fluorure de polyvinylidène (PVDF). Utilisées pour séparer des macromolécules et d'espèces colloïdales. Le solvant ainsi que les solutés de faible masse molaire traversent la membrane selon un mécanisme convectif sous l'effet de la pression, tandis que les espèces de taille supérieures (colloïdes, protéines, polymères) sont retenues [7].

Les pressions (jusqu'à 5 bar) sont supérieures à celles rencontrées en microfiltration et le seuil de coupure se situe entre 103 et 106 Dalton. Elles sont disposées dans des modules en fibres creuses mises à part quelques exceptions. Ces membranes peuvent être à peau interne ou externe.

Utilisées seules pour le traitement de l'eau les membranes d'ultrafiltration connaissent des limites pour la rétention des pollutions dissoutes telles que les micropolluants organiques mais aussi le fer, les nitrates, l'ammoniaque. C'est pourquoi leur avenir passe par leur combinaison avec d'autres types de traitement qu'ils soient physico-chimiques (adsorption sur charbon actif, oxydation) ou biologiques et c'est ainsi qu'on traite encore l'eau en utilisant la technique de l'osmose inverse.

III.3.3.1 Fonctionnement

On distingue deux modes d'alimentation en modules à fibres creuses, pour la clarification par UF [7].

a) Écoulement frontal :

L'eau à traiter peut être amenée perpendiculairement à la membrane. Il s'agit alors d'un écoulement dit « frontal », souvent pratiqué en MF et UF. Le mode d'alimentation frontal assuré par une pompe dite « de gavage », mode de plus en plus utilisé même en UF : l'extrémité aval des fibres est obstruée, noyée dans le carter. Le taux de conversion Y est de 80 à 100 %. C'est le mode le moins consommateur d'énergie et d'investissement [13].

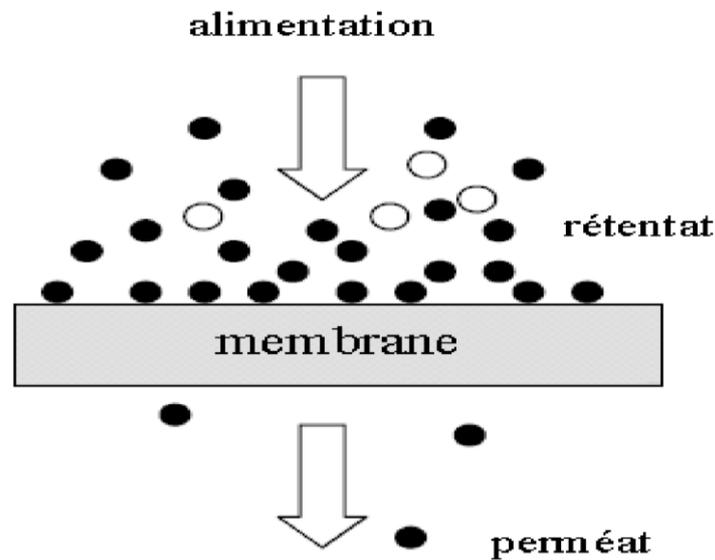


Figure III – 10 : Schéma d'un écoulement frontal

b) Écoulement frontal :

L'écoulement de l'eau à filtrer peut être aussi tangentiel afin de limiter l'accumulation progressive de solutés sur la membrane et la formation de « gâteau ». Dans ce cas, La recirculation assurée par une seconde pompe : le flux de retentât est évacué par l'extrémité aval des fibres et est relié à l'aspiration de la pompe de recirculation. L'eau sortante est alors séparée en deux flux, le perméat qui passe au travers de la membrane et le retentât ou concentrât qui est recyclé à un débit bien plus important. En UF, le débit de recirculation peut être plusieurs centaines de fois plus importante que le débit de perméat.

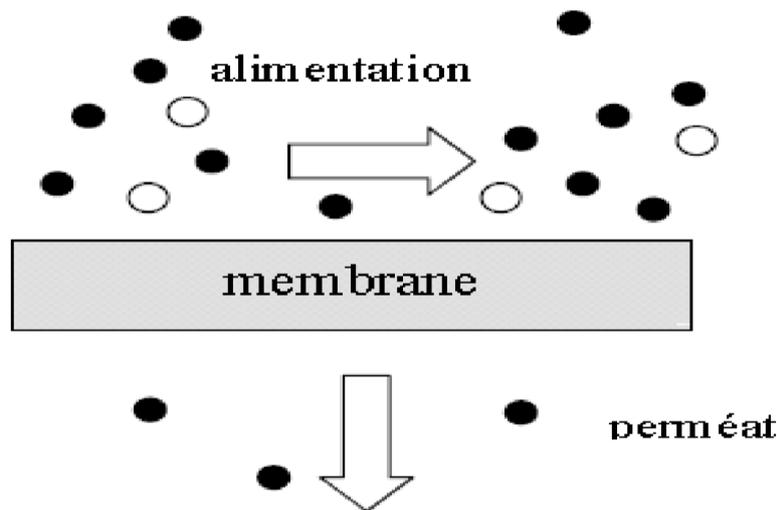


Figure III – 11 : Schéma d'un écoulement tangentiel

III.3.3.2 Grandeurs principales et loi de filtration :

Quels que soient le mode de filtration et la mise en œuvre des membranes en différents modules, les principaux paramètres utilisés dans les modèles de filtration, ainsi que dans la pratique pour le dimensionnement et l'exploitation, sont la pression transmembranaire (ΔP ou PTM, par exemple en bar), le taux de rejet ou de rétention observé (TR 0 bs' sans unité), le flux de perméation (J , par exemple en $m^3/(m^2.h)$) et le taux de conversion (Y , sans unité).

La loi de filtration de base, régissant le transfert à travers une membrane poreuse, découle de l'expression de DARCY, comme dans le cas d'un matériau granulaire, mais avec des symboles différents.

$$J = A^* \cdot \Delta P = \Delta P \cdot A / \eta L$$

J : flux de perméation (en $m^3/(m^2.s)$)

A : perméabilité de la membrane à une température donnée (m^3/m^2)

A*: perméabilité standard de la membrane (par exemple en $L/(h.m^2.bar)$)

η_L : viscosité dynamique de l'eau (Pa.s, ou poiseuilles)

ΔP : pression transmembranaire (Pa)

Les UF sont généralement sujets à des accumulations de matières favorisant ainsi le colmatage. Le colmatage est dû à l'accumulation de matière en surface et dans la membrane. Il conduit à une diminution de l à pression constante ou à une augmentation de ΔP à flux constant, ainsi qu'une modification des propriétés filtrantes de la membrane. Les deux mécanismes principaux de colmatage en MF et UF «lâche» sont le dépôt et l'adsorption à la surface de la membrane et à l'intérieur des pores. Et pour éviter ce phénomène de colmatage on peut utiliser plusieurs méthodes.

III.3.3.3 Lavage des membranes :

a) Rétrolavage :

Le but du rétro lavage est de nettoyer la membrane des dépôts créant une résistance facilement éliminable (comme un dépôt de type « gâteau »). Ce rétro lavage présente généralement les caractéristiques suivantes :

pour l'ultrafiltration en mode tangentiel ou mixte : avec perméat chloré (à $0,3 \text{ g/m}^3$) pendant environ 60 s avec une périodicité de 1 à 3 h et un débit au moins deux fois égal à celui de l'alimentation.

Le rétro lavage est programmé par temporisation, mesure de la pression ou encore de la turbidité. Malgré ces rétro lavages, la perméabilité des membranes de MF et (surtout) de UF diminue au fur et à mesure des cycles de filtration. En mode frontal (mixte), une méthode de lutte consiste à effectuer un « flushing », c'est-à-dire une ouverture de la boucle de recirculation.

b) Nettoyage chimique :

Des nettoyages chimiques sont également indispensables. Ce nettoyage chimique est généralement réalisé quand le flux a diminué de 40 % (en moyenne). Les conditions sont très variables d'une installation à une autre. Plusieurs types de réactifs sont utilisés :

-la soude pour dissoudre les dépôts de matières organiques naturelles ;

-l'acide nitrique ou citrique pour dissoudre les dépôts métalliques et/ou les complexer ;

- les oxydants (chlore principalement ou peroxyde d'hydrogène) pour les dépôts de biofilms ;
- des complexants et détergents divers.

On peut citer quelques cas pratiqués sur plusieurs usines. Très variables, ils sont plus le résultat d'habitudes d'exploitation que de l'application de consignes définies par le dimensionnement initial. Par exemple :

- pour une installation donnée d'ultrafiltration, il est pratiqué un lavage chimique une fois par jour à pH 13, et une fois tous les 4 jours à pH 2 (10 min chacun) ;
- pour une autre installation en UF, la pratique est de laver avec un détergent (à 70 g/m²), tous les 200 à 600 m³ d'eau traitée par m² ;
- pour certaines filtrations membranaires en UF et en MF, c'est plutôt l'eau chlorée (à 200 mg/L) et des solutions d'acide citrique (à 20 g/L) qui sont utilisées ;
- pour une autre installation en MF, il est pratiqué un nettoyage chimique une fois par mois à la soude et à l'acide et si nécessaire avec du peroxyde d'hydrogène [7].

On procède généralement au lavage comme suite :

Traitement à la soude :

Pour éliminer les composés organiques 500 µl de NaOH concentré (32%) sont ajoutés à 4 litres d'eau osmosée. Cette solution est filtrée à 15 bars ; 0,7 m/s et 40°C pendant 30 minutes.

Rinçage :

La membrane est rincée avec de l'eau osmosée à 15 bars et 0,7 m/s à température ambiante jusqu'à ce que le pH redevienne normal (6,2).

Traitement à l'acide :

L'acide est utilisé pour éliminer les composés minéraux. Plusieurs acides ont été testés : citrique, sulfurique, chlorhydrique, phosphorique. Les deux derniers semblent être les plus efficaces. Le traitement est effectué à 15 bars ; 0,7 m/s et 40°C pendant 30 minutes avec 1,5 ml d'acide chlorhydrique concentré dans 4 l d'eau osmosée.

Rinçage :

La membrane est à nouveau rincée avec de l'eau osmosée à 15 bars et 0,7 m/s à température ambiante jusqu'à ce que le pH redevienne normal.

III.3.4 Osmose inverse :

III.3.4.1 Définition et mécanisme :

L'Osmose inverse, procédé relativement ancien, a été développé pour le dessalage de l'eau. C'est un procédé haute pression, énergétiquement performant, utilisé pour l'élimination de l'eau par concentration de composés à faible poids moléculaire. Elle peut aussi être utilisée pour le traitement des eaux usées. Ce procédé est couramment utilisé pour la pré-concentration des produits laitiers ou alimentaires avant l'évaporation, le traitement des condensats des évaporateurs et la purification des eaux de process. La membrane a donc été conçue comme semi-perméable ne laissant passer que l'eau et arrêtant tous les sels.

Le phénomène d'osmose est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Le phénomène d'osmose est un phénomène naturel courant, notamment à travers les membranes cellulaires. La membrane semi-perméable laissera passer le solvant (le soluté ne passe pas) pour équilibrer la concentration. La différence de concentration crée une pression, appelée Pression osmotique. Pour inverser le passage du solvant et augmenter la différence de concentration, il faut appliquer une pression supérieure à la pression osmotique.

Ce procédé permet de filtrer des solutions contenant des espèces de très faible masse molaire et ne laisse passer que le solvant et qui arrête tous les sels. Il utilise des membranes denses. La séparation solvant – soluté se fait par un mécanisme de solubilisation-diffusion, La pression appliquée doit être supérieure à la pression osmotique exercée en amont de la membrane par la solution filtrée pour observer un flux de perméat à travers la membrane. Les pressions appliquées varient de 20 à 80 bars. Considérons un système de deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure ci-dessous). Le solvant (généralement l'eau) s'écoule à travers la membrane du compartiment de la solution moins concentrée vers le compartiment contenant la solution la plus concentrée, c'est le phénomène d'osmose. Si on applique progressivement une pression sur le compartiment de la solution la plus concentrée, le flux d'eau qui traverse la membrane va diminuer, puis s'annuler quand la pression appliquée atteindra à la pression osmotique. Si on applique une pression supérieure à la pression osmotique, l'eau va traverser la membrane dans le sens inverse du flux osmotique, c'est le phénomène d'osmose inverse [13].

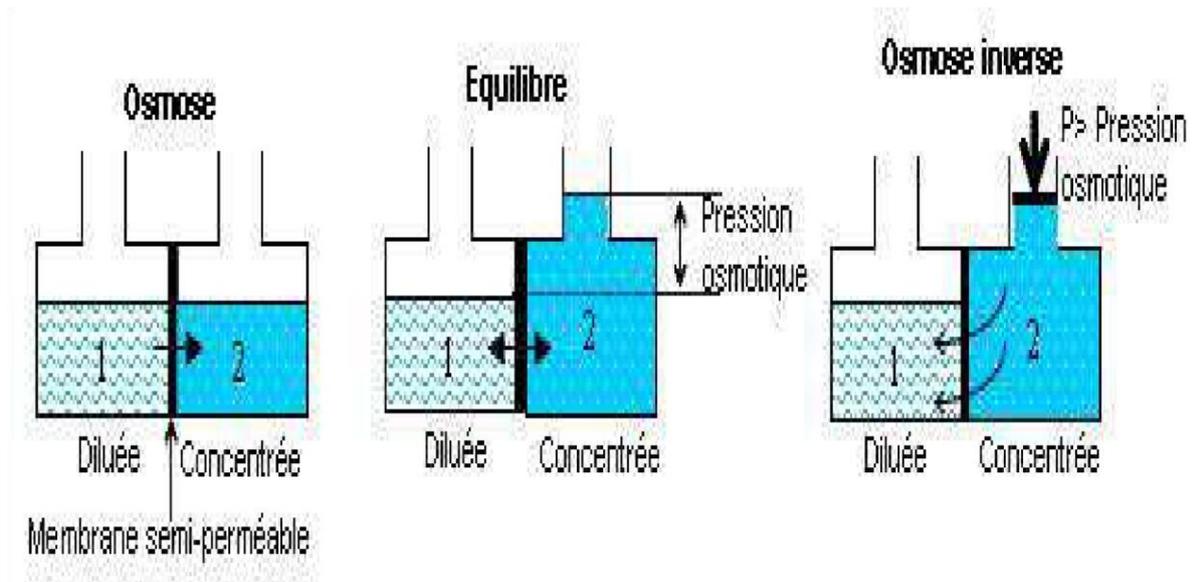


Figure III – 12 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

La pression osmotique peut être calculée par la loi de Van't Hoff qui stipule que la pression osmotique exercée par un soluté est égale à la pression que ce corps aurait exercé dans l'état gazeux parfait dans le même volume (V) et à la même température (T). Si le soluté est dissocié en n ions, la pression osmotique sera n fois supérieure. La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en solutés.

L'expression de la pression osmotique est donnée par l'équation de Van t'Hoff qui s'écrit :

$$\pi = iMRT$$

Où :

- π est la pression osmotique exprimée en pascal (dans l'industrie, on utilise plutôt le bar ou le psi [101 325 Pa vaut 1,013 bar ou 14,65 psi]) ;
- M est la molarité exprimée en mol/m³ ;
- R est la constante des gaz parfaits, soit 8,314 J/mol·K ;
- T est la température en degré Kelvin (K) ;
- i est un facteur égal à un pour les molécules qui ne se dissocient pas, sinon il est égal au nombre d'ions libres (comprendre dissociés) pour les électrolytes. Pour les solutions diluées, le chiffre i correspond au nombre d'ions. Par exemple, pour une solution diluée de chlorure d'aluminium (AlCl₃), i sera égal à 4. Si le milieu est concentré, i est plus faible que la valeur attendue, car une partie des ions restent associés et il peut alors prendre des valeurs non entières.

Comme sa détermination est problématique lorsqu'on s'écarte de l'idéalité, des corrélations semi-empiriques entre les paramètres des solutions et la pression osmotique ont été développées au fil du temps pour permettre d'en estimer la valeur à partir de facteurs facilement mesurables, comme les solides dissous pour les eaux, le degré Brix pour les sucres, etc...

III.3.4.2 Conception générale d'une installation d'osmose inverse

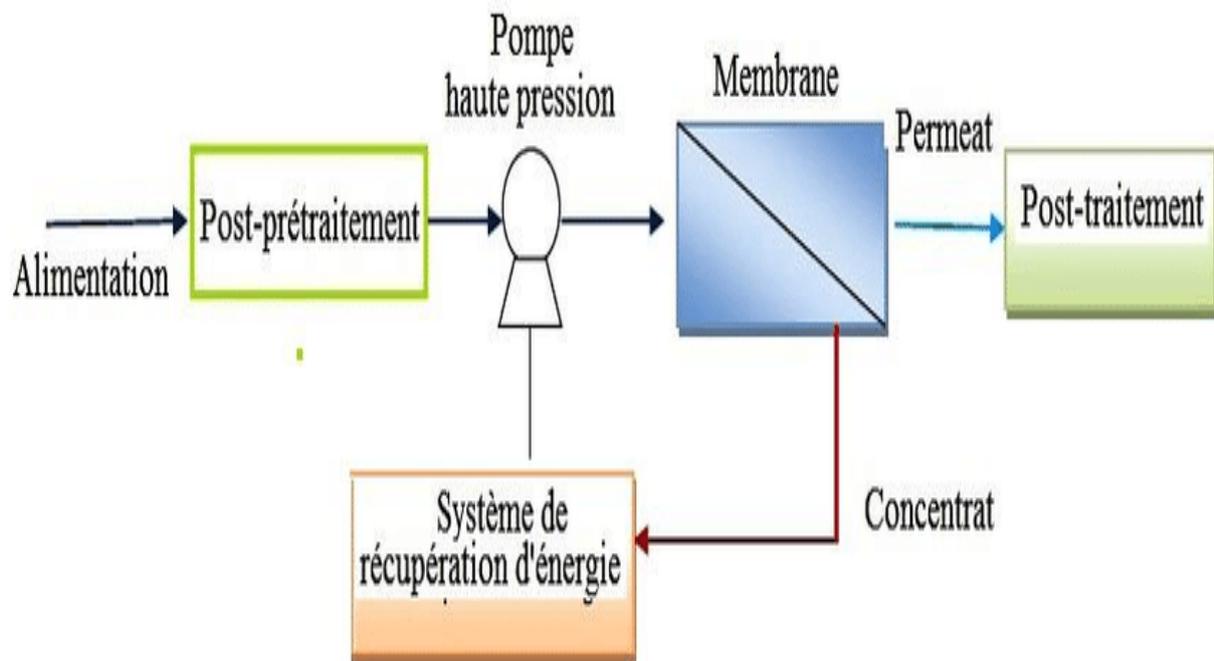


Figure III – 13 : Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont :

- Membranes et modules
- pompe à haute pression
- Plusieurs cuves de stockage, ainsi que tous les appareils de mesures nécessaires (conductimètre, débitmètre, manomètre, thermomètre,...)
- pompes doseuses
- le poste de prétraitement

- le poste de nettoyage

Le prétraitement de l'eau avant osmose inverse est absolument nécessaire car les membranes d'osmose inverse sont très sensibles au colmatage et une bonne qualité de l'eau en entrée des modules d'osmose inverse est indispensable pour assurer des performances stables de l'osmose inverse sur le long terme.

Le prétraitement a pour objectif la réduction du colmatage, l'augmentation de la durée de vie des membranes, l'amélioration de la qualité de l'eau produite et la maintenance des performances de l'osmose inverse.

Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories : les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques. Les prétraitements physiques incluent les préfiltres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire. Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants, de désinfectants et de polyélectrolytes.

Au cours du temps la concentration en solution salée augmente puisque la majorité des molécules sont retenues d'un seul côté de la membrane. De ce fait la pression osmotique augmente également près de la couche limite, avec des risques de précipitation des composés à faible produit de solubilité. Pour le même rendement, la pression à appliquer est donc plus élevée. Pour éviter ce phénomène on balaye la membrane du côté de la solution salée par un flux d'eau continu. Toute l'eau n'est pas filtrée, une partie sert à nettoyer la membrane. Ce procédé est donc semblable à une filtration tangentielle. L'eau non filtrée est appelé retentât tandis que l'eau qui a traversé la membrane est appelé perméat.

Afin de limiter la consommation d'énergie du procédé, on place sur le circuit du retentât une turbine qui permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans ce fluide sous haute pression.

A l'heure actuelle, la plupart des usines d'osmose inverse utilisent un procédé de prétraitement conventionnel qui généralement consiste en un prétraitement physique et chimique [13].

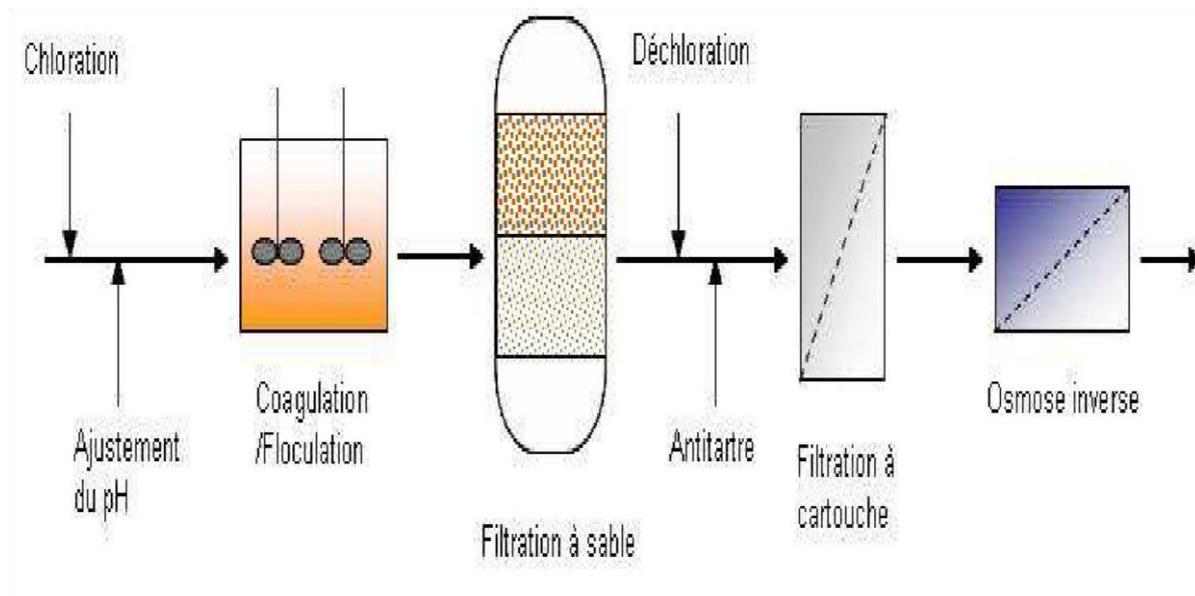


Figure III – 14: Prétraitement conventionnel typique

III.4 Paramètres à suivre :

Pour identifier la qualité d'eau, il est indispensable de connaître certains paramètres utilisés pour l'analyse de l'eau, et donc la caractériser. Les paramètres les plus courants sont :

III.4.1 Titre hydrotimétrique (TH) :

La dureté ou titre hydrotimétrique d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins et de l'ion hydrogène. Dans la plupart des cas la dureté est surtout due aux ions calcium et magnésium auxquels s'ajoutent quelquefois les ions fer, aluminium, manganèse, strontium.

La dureté est encore appelée dureté calcique et magnésienne ou consommation de savon. Elle s'exprime en milliéquivalents de concentration en CaCO_3 . Elle est aussi très souvent donnée en degrés français.

Le titre hydrotimétrique indique la teneur globale en ions alcalino-terreux présents dans l'eau [10] ; on distingue :

La totalité des sels de calcium et de magnésium ; désignée par TH totale

Où $TH = TH_{Ca^{++}} + TH_{Mg^{++}}$

La totalité des sels de calcium ; désignée par TH calcique ;

La totalité des sels de magnésium ; désignée par TH magnésium ;

La dureté carbonatée correspond aux carbonates et de bicarbonates de calcium susceptibles de précipiter par ébullition ; désignée par TH temporaire ;

La dureté non carbonatée correspond au sulfate et au chlorure de calcium, il est égal à la différence entre le TH et le TAC ; désignée par TH permanent [10]

Le titre hydrotimétrique s'exprime en degré français (°F), qui correspond à la dureté d'une solution contenant 10mg /L de CaCO₃ [10].

III.4.2 Titre alcalimétrique (TA) et titre alcalimétrique complet (TAC) :

À l'inverse de l'acidité, l'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte le plus généralement à la présence d'hydrogencarbonates, carbonates et hydroxydes.

D'autres sels d'acides faibles peuvent aussi être dosés et interfèrent dans la mesure : acides humiques, phosphates, citrates, tartrates... La silice ionique peut aussi interférer notamment lorsque le pH est supérieur à 8,5.

On distingue comme pour la mesure de l'acidité, deux titres qui sont le titre alcalimétrique ou titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC). L'unité utilisée est le degré français (1°f = 10 mg. L⁻¹ de CaCO₃ = 0,2 mil- liéquivalent. L⁻¹).

On trouve parfois des ouvrages qui mentionnent l'alcalinité exprimée en mg. L⁻¹ de CaO. Dans les pays anglo-saxons l'alcalinité (notée Alk) est exprimée en mg. L⁻¹ de CaCO₃. Le TA et le TAC étant mesurés successivement sur un même échantillon, les deux méthodes de dosage seront présentées en même temps. Il convient tout d'abord de préciser les conditions et la signification de ces mesures.

Ces deux valeurs permettent de connaître les concentrations en bicarbonates, carbonates et éventuellement en hydroxydes contenus dans l'eau.

Le TA permet de déterminer la teneur en hydroxydes et seulement la moitié de celle du carbonate dont les sels fixent le pH au-dessus de 8,3.

$$TA = [OH^-] + \frac{1}{2} [CO_3^{2-}]$$

Le TAC permet de déterminer la teneur en hydrogencarbonates, carbonates et hydroxydes dont les sels fixent le pH au-dessus de 4,3.

$$TAC = [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] + [OH^-]$$

III.4.3 Les matières en suspension (MES) :

Les matières en suspension (MES) constituent l'ensemble des particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée. Elles peuvent être composées de particules de sable, de terre et de sédiment arrachées par l'érosion, de divers débris apportés par les eaux usées ou les eaux pluviales très riches en MES, d'êtres vivants planctoniques (notamment les algues). Elles correspondent à la concentration en éléments non dissous d'un échantillon. L'abondance des matières en suspension dans l'eau favorise la réduction de la luminosité et abaisse la production biologique du fait, en particulier, d'une chute de l'oxygène dissous consécutive à une réduction des phénomènes de photosynthèse [14].

Toute particule en suspension peut être théoriquement sédimentée (ou décantée) sous l'action de la pesanteur (gravité), mais à une vitesse qui dépend principalement de la taille et de la densité de la particule, ainsi que de la température de l'eau.

Pour les particules en suspension dans les eaux naturelles, c'est généralement l'expression de STOKES (chute en régime laminaire) qui permet de calculer cette vitesse de sédimentation, connaissant les caractéristiques physiques de la particule (diamètre équivalent à la sphère de même volume, masse volumique ou densité) et la température de l'eau. Cette expression permet aussi d'évaluer le diamètre d'une particule connaissant sa masse volumique (ou sa densité), après mesure de sa vitesse dans une eau dont on connaît la température. C'est le diamètre équivalent à la sphère de même volume que la particule (d_v).

$$v_s = (\rho_s - \rho_L) \cdot g \cdot d_v^2 / 18 \cdot \mu_L$$

v_s : vitesse de sédimentation ($m \cdot s^{-1}$).

ρ_s et ρ_L : masses volumiques de la particule et de l'eau, respectivement ($kg \cdot m^{-3}$).

μ_L : viscosité dynamique de l'eau ($Pa \cdot s$).

$g = 9,81 m \cdot s^{-2}$.

Les matières en suspension sont des impuretés caractérisées par le fait qu'elles sont visibles à l'œil nu. Cette quantité de matière peut être déterminée directement par une méthode spectrophotométrie qui n'exige aucune étape de filtration [14].

III.4.4 Le total des solides dissous (TDS) :

Le TDS signifie le total des solides dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Il est composé de sels inorganiques tels que (calcium,

magnésium, potassium et sodium) et des carbonates (nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates) ainsi que quelques matières organiques. Des sources d'eaux minérales contiennent de l'eau avec un taux élevé de solides dissous parce qu'elles ont coulé au travers des régions où les roches contiennent beaucoup de sel.

L'eau dans les prairies contient beaucoup de solide dissous dus aux fortes quantités de calcium et magnésium dans le sol. Ces minéraux peuvent aussi provenir d'activités humaines. Les eaux de ruissellements agricoles et urbains peuvent provoquer un surplus de minéraux dans les sources d'eaux comme les bassins d'eaux usées, eaux industrielles et le sel qui est utilisé pour dégivrer les routes.

Les substances minérales dissoutes dans les eaux naturelles pratiquement toutes plus ou moins ionisées. La salinité totale d'une eau est par définition égale à la somme des cations et des anions contenus dans cette eau [15].

III.4.5 Turbidité

La turbidité est le caractère trouble de l'eau. Elle est due à la présence des matières en suspension finement divisées : argiles, limons grains de silice, matières organiques, etc. L'appréciation de l'abondance de ces matières mesure son degré de turbidité. Celui-ci sera d'autant plus faible que le traitement de l'eau aura été plus efficace. La variabilité de la turbidité dépend des facteurs locaux et des conditions spécifiques :

-L'état des sols avant les chutes de pluies et le degré de cohésion des particules.

-La fréquence et l'intensité des pluies.

-L'arrivée d'une grande quantité de boue liée au rôle du ruissellement de surface et celle ramenée par les Oueds affluents et les effondrements locaux des berges en périodes de hautes-eaux ce qui augmente la turbidité des eaux.

Les mesures de turbidité ont donc un grand intérêt dans le contrôle de l'épuration des eaux brutes.

De toute façon, les échantillons doivent être agités vigoureusement avant la mesure. En raison des caractéristiques propres aux matières en suspension, telles que taille, forme, indice de réfraction, couleur, etc., les difficultés de comparaison sont évidentes. Il en est de même si l'on veut rapprocher les mesures de turbidité des mesures de matières en suspension [7] [14].

III.4.6 Le potentiel d'hydrogène (pH) :

C'est une échelle logarithmique qui varie de 0 à 14 qui traduit l'acidité ou la basicité d'une solution ; la neutralité étant à pH 7. Le pH est l'un des paramètres importants influençant la tendance entartrante ou agressive d'une eau naturelle : d'une manière générale, une baisse de pH favorise le caractère agressif et une élévation de pH favorise le caractère entartrant [10] [14].

Le pH est relié à l'activité en protons par :

$$\text{pH} = -\log_{10} a_{\text{H}}$$

a_{H} : activité en ions H^+ à l'équilibre, avec confusion généralement admise entre l'activité et la concentration, erreur qui peut être considérée comme négligeable en eau douce, mais qui devient significative en eau fortement minéralisée, saumâtre ou en eau de mer.

Les valeurs du pH peuvent être calculées dans des cas simples. Si on confond activité et concentration, la valeur approchée du pH d'une solution d'acide fort ou de base forte (dits « totalement dissociés ») est directement relié à la concentration de l'acide ou de la base :

$$\text{pH} = -\log_{10} [\text{acide fort}] \text{ ou } \text{pH} = 14 + \log_{10} [\text{base forte}]$$

Pour un monoacide faible, dont l'équilibre acide/base, défini par une constante d'équilibre ou constante d'acidité K_a , est le suivant $\text{HB} \leftrightarrow \text{B} + \text{H}^+$ avec $K_a = a_{\text{H}} \cdot a_{\text{B}}/a_{\text{HB}}$, l'expression du pH est :

$$\text{pH} = \text{p}K_a + \log a_{\text{B}}/a_{\text{HB}}$$

En confondant activité et concentration et avec quelques approximations, la valeur du pH dans ce cas peut être reliée à la concentration en acide faible :

$$\text{pH} = \frac{1}{2} \text{p}K_a - \frac{1}{2} \log_{10} [\text{acide faible}]$$

Pour une base faible, la même approche conduit à :

$$\text{pH} = 7 + \frac{1}{2} \text{p}K_a + \frac{1}{2} \log_{10} [\text{base faible}]$$

La valeur du pH a une importance primordiale sur de nombreuses étapes de traitement, comme la coagulation/floculation, la rétention des métaux sur les filtres, la désinfection, les traitements de finition (mise à l'équilibre, décarbonatation, adsorption, ozonation, nanofiltration) et la plupart des traitements spécifiques (nitrification, dénitrification, déferrisation, démanganisation, élimination de nombreux métaux et métalloïdes).

III.4.7 La conductivité :

La conductivité est la mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Elle varie en fonction de la présence d'ions, de leur concentration, de leur mobilité et de la température de l'échantillon. Elle est liée à la concentration et à la nature des substances dissoutes. En général, les sels minéraux sont de bons conducteurs par opposition à la matière organique et colloïdale, qui conduit peu. Par conséquent, dans le cas des eaux usées fortement chargées en matière organique, la conductivité ne donnera pas forcément une idée immédiate de la charge du milieu. Dans les autres cas, elle permet d'évaluer rapidement le degré de minéralisation de l'eau et d'estimer le volume d'échantillon nécessaire pour certaines déterminations chimiques.

La mesure de la conductivité électrique est l'une des plus simples. Elle repose sur la capacité de la solution à transmettre le courant entre deux électrodes. Cette capacité dépend de la concentration en molécules chargées de la solution. Elle est importante pour le contrôle de la qualité des eaux résiduaires. Valeur inverse de la résistivité, paramètre très largement utilisé en hydrogéologie, la conductivité est en fonction de la concentration en espèces ionisées, principalement la matière minérale.

Ce paramètre doit impérativement être mesuré sur le terrain. La procédure est facile et permet d'obtenir une information très utile pour caractériser l'eau.

Elle est en relation directe avec la salinité totale de l'eau. Elle augmente si la salinité totale de l'eau est élevée, donc augmente le courant de corrosion pour un potentiel donné [15].

La conductivité électrique d'une eau (γ) est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique (ρ) [14].

$$\gamma = 1/\rho = (1/R). (L/S)$$

γ : conductivité (en $\Omega^{-1}.m^{-1}$ ou S. m⁻¹).

ρ : résistivité (en $\Omega. m$).

R : résistance (en Ω).

L : distance entre les deux électrodes (en m). S : surface de chaque électrode (en m²).

III.4.8 Le fer :

Le fer se trouve dans l'eau sous différentes formes ; on peut théoriquement distinguer :

Fer en suspension (à l'état ferrique, principalement) ;

Fer dissous (fer à l'état ferrique solubilisé et fer à l'état ferreux) [12]

III.4.9 Les phosphates :

Apportés par certains types de traitement, ils existent sous forme libre (orthophosphate), de polyphosphates ou de phosphate lié à des produits organiques (phosphonates). Le maximum autorisé est de 5mg /L exprimé en P₂O₅. [15]

Tableau III – 2 : Paramètres physico-chimiques et méthodes de mesure

Paramètres	Unités	Méthodes	Instruments	Normes des analyses
pH	/	Electrochimique	pH-mètre	NFT90-008
χ	$\mu\text{s/cm}$	électrochimique	conductimètre	NFT90-031
TA	mg CaCO ₃ /L	Volumétrique : titrage acide jusqu'à pH= 8,3	/	NFT90-36
TAC	mg CaCO ₃ /L	Volumétrique : titrage acide jusqu'à pH= 4,3	/	NFT90-36
TH	mg CaCO ₃ /L	Volumétrique : complexométrie à l'EDTA avec le noir ériochrome T	/	NFT90-003
Cl ⁻	mg /L	Volumétrique : au nitrate d'argent	/	NFT90-14
MES	mg /L	Spectrophotométrie	Spectrophotomètre à 810 nm de longueur d'onde	NFT 90-105-2
NaOH	mg/L	Volumétrique	/	NFT 90-019

PO ₄ ³⁻	mg /L	Spectrophotométrie au molybdate d'ammonium	Spectrophotomètre à 608 nm de longueur d'onde	NFT 90-105
Fer total	mg /L	Spectrophotométrie à l'orthophénanthroline	Spectrophotomètre à 510 nm de longueur d'onde	NFT 90-017
SiO ₂ ⁻	mg /L	Spectrophotométrie	Spectrophotomètre à 815 nm de longueur d'onde	NFT 90-007

III.5 Problèmes causés par l'eau :

III.5.1 La corrosion :

Elle est causée en raison de l'aération permanente de l'eau ainsi saturée en oxygène, de la qualité de l'eau disponible et des micro-organismes. [16]

La corrosion est le retour d'un métal à sa forme de minerai. Le fer, par exemple, retourne sous forme d'oxyde de fer sous l'effet de la corrosion. Cependant, le procédé de corrosion est une réaction électrochimique complexe et prend diverses formes.

La corrosion peut produire une attaque générale sur une large surface ou peut résulter en une attaque très localisée. La corrosion est un problème pertinent causée par l'eau dans les chaudières. La corrosion peut avoir énormément d'origine et la nature différentes dû à l'action de l'**oxygène** dissous, elle peut résulter d'hétérogénéités à la surface du métal ou au fer directement attaque par l'eau.

a) Types de corrosion :

- ❖ **Corrosion uniforme** : se caractérise par une attaque de toute la surface de l'échantillon expose au milieu.
- ❖ **Corrosion caverneuse** : due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant une pile électrochimique.
- ❖ **Corrosion par piqûres** : produite par certains anions, notamment les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince.

- ❖ **Corrosion sélective** : oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.
- ❖ **Corrosion bactérienne** : cette forme de l'attaque se reconnaît à certaines caractéristiques, selon que les micro-organismes agissent directement sur le procédé de corrosion ou qu'ils participent indirectement, par leur métabolisme, à la détérioration [16].

III.5.2 L'entartrage :

L'entartrage résulte de la précipitation cristalline directement sur les surfaces métalliques avec formation d'incrustations adhérentes ce qu'on appelle le tartre [17].

Les principaux paramètres contrôlant la précipitation de ces tartres sont généralement la température, dont l'élévation diminue la solubilité des sels concernés, ainsi la concentration en ions. Ce phénomène concerne les sels dissous dans l'eau principalement :

- Carbonate de calcium ;
- Hydroxyde de magnésium ;
- Sulfate de calcium.

La déposition des couches de tartres sur la surface du métal diminue le coefficient du transfert de chaleur et peut conduire à l'éclatement des tubes sous l'effet du point chaud [18].

III.5.3 L'encrassement biologique :

Les algues, les champignons et les bactéries filamenteuses ont la propriété de piéger toutes les matières minérales en suspension dans l'eau recirculé et de former ainsi des magmas gélatineux très volumineux qui adhèrent aux surfaces et entraînent ainsi une perte de transfert de chaleur et une diminution du débit d'eau. Car un circuit de refroidissement constitue un milieu privilégié pour le développement des organismes vivants. On y trouve air, chaleur et lumière, qui peuvent générer dans des conditions favorables pour leur développement. [10]

Afin d'éviter tous ces problèmes, il est nécessaire de conditionner les eaux destinées à l'utilisation avec des additifs chimiques spécifiques, généralement par des pompes doseuse dans les circuits.

Tout métal a une tendance à revenir à son état où se trouve dans la nature sous forme d'oxyde, sulfates, carbonates, etc. Les réactions anodiques et cathodiques se déroulent principalement en présence d'oxygène qui influe directement sur la vitesse de corrosion

Le pH est aussi un facteur déterminant, il entre dans le calcul de l'indice de RYZNAR (I_R) qui reste la meilleure approche pour déterminer le caractère d'une eau.

Cet indice est très utilisé dans les études de conditionnement sur les eaux bicarbonatées calciques.

Il permet de définir empiriquement la tendance à la corrosion ou à l'entartrage d'une eau aérée, sa définition est comme ci-joint :

$$I_R = 2pH_s - pH_{réel}$$

Où :

- pH_s est le pH théorique de saturation, calculé d'après le tableau de TILLMANS (voir annexe), et il est en fonction de :
 - ❖ Du CO_2 semi combiné ;
 - ❖ Le titre alcalimétrique complet (TAC) ;
- $pH_{réel}$ est mesuré à la température considérée.

Tableau III – 3 : Tendance de l'eau suivant I_R

Les valeurs de l'indice de RYZNAR	Le caractère de l'eau
$I_R < 3.7$	Très entartant
$3.7 < I_R < 6.4$	Moyennement entartant
$6.4 < I_R < 6.65$	Légèrement entartant
$I_R = 6.65$	A l'équilibre
$6.65 < I_R < 6.9$	Légèrement corrosif
$6.9 < I_R < 8.7$	Moyennement corrosif
$I_R > 8.7$	Très corrosif

III.5.4 . Moussage et primage

a) Moussage :

Le moussage sont les bulles ou la mousse qui sont créés à la surface de l'eau des chaudières et sortent avec la vapeur, et sont causées par la forte concentration en solide dans l'eau des

chaudières. Cependant, on ne croit généralement que les surfaces spécifiques telles que les semences alcalines, les huiles ; les corps gras, les graisses, certains types de matière organique et les solides suspendus sont particulièrement favorables à la formation de moussage. En théorie, les solides en suspension se rassemblent sur un film à la surface entourant la bulle de vapeur et la rendent plus dure. Ainsi, la bulle de vapeur résiste à la cassure et s'accumule en mousse. Plus les particules sont fines, meilleur est leur accumulation en bulle [16].

b) Primage :

Le primage est le transfert de grandes quantités en gouttelettes d'eau dans la vapeur, qui baisse le rendement énergétique de la vapeur et entraîne des dépôts des cristaux de sels sur les surchauffeurs et dans les turbines. Le primage peut être causé par une mauvaise construction de la chaudière, des régimes excessifs, ou des fluctuations soudaines en demande de vapeur. Le primage est parfois aggravé par les impuretés dans l'eau des chaudières [17].

III.5.5 Quelques contaminants de l'eau :

On cite quelques contaminants de l'eau d'alimentation des chaudières, leurs effets et les traitements possibles :

- la température, elle provoque, notamment quand elle s'élève une meilleure diffusion permet un meilleur contact avec l'oxygène.
- Dioxyde de carbone, élément corrosif, forme l'acide carbonique en condensat, s'élimine par désaération.
- Oxygène ; il favorise la corrosion notamment par piqûres des tubes de la chaudière. pour éliminer ce gaz on utilise la désaération ou le traitement chimique (par exemple le sulfite de sodium, l'hydrazine).
- Dureté ; elle forme un dépôt de calcaire dans la chaudière, empêche le transfert thermique, et diminue l'efficacité thermique. L'élimination se fait par adoucissement en plus d'un traitement interne dans la chaudière.
- Chlorures ; ils provoquent le primage ; des dépôts de sels dans les surchauffeurs... on applique la déionisation pour éliminer les chlorures.
- Le cuivre ; il peut provoquer des corrosions dangereuses. Il est souvent apporté par des condensats mal conditionnés qui ont été en contact avec des appareils de cuivre ou alliage cuivreux. Il arrive dans la chaudière en état d'oxyde de cuivre plus ou moins soluble et est réduit à l'état métal, donc insoluble par le milieu réducteur qui règne dans

l'eau de chaudière. Il se dépose sur les tubes ou il forme des couples galvaniques très dangereux étant donné leur forte localisation [18].

III.6 . Lutte contre les problèmes causés par l'eau

La corrosion démographique dans le monde s'accompagne d'une augmentation de la demande d'eau potable. L'industrie est un utilisateur de premier plan. Les qualités nécessaires dans l'industrie sont variées et correspondant à des emplois de valeur ajoutée inégale. Si les petites et moyennes entreprises peuvent souvent se satisfaire d'eau potable ou d'un forage, la taille et la situation des grandes usines les conduisent à utiliser des sources moins coûteuses pouvant aller jusqu'à l'eau de mer.

En méditerranée, les besoins en eau conséquence dans le future accuse une croissance effective.

Pour couvrir ces demandes, l'industrie se tourne d'une manière générale, vers les eaux de surfaces moins coûteuses. Les utilisations de l'eau dans l'industrie sont extrêmement variées et pour suites les conditions de qualité imposées à l'eau oscillent dans d'assez larges limites. Parmi les principales utilisations de l'eau, on cite le refroidissement, la desserte industrielle et commerciale, la production d'énergie et aussi l'alimentation des chaudières.

Dans les chaudières nous sommes obligés de se poser la question, quelles sont les caractéristiques de cette eau ?

L'eau alimentaire des chaudières peut contenir des impuretés concentrées à un seuil raisonnable, sans dépasser les limites de tolérance.

Il est stipulé que l'eau doit, autant que possible, être exempte de matières en suspension, avoir un résidu sec faible et une faible teneur en éléments tels que l'oxygène dissous, le fer, le cuivre, la silice....

a) Protection contre la corrosion :

Les méthodes de lutte contre la corrosion, les plus utilisées sont :

- La protection active : protection cathodique et anodique ;
- L'emploi d'inhibiteur de corrosion ;
- La protection passive par revêtement ;
- La protection par modification du milieu.

b) Protection contre l'entartrage :

- Les solutions les couramment appliqués sont :
- Décarbonatations à la chaux ;
- Décarbonatations sur les résines carboxyliques ;
- Injection des acides (lessivage) ;
- Séquestration par polyphosphate ;
- Adoucissement sur résines échangeuses d'ions.

c) Protection contre le moussage et le primage :

La mesure la plus courante pour empêcher le moussage et le primage est de maintenir la concentration en solides dans l'eau de chaudières à des niveaux raisonnablement faibles. En évitant de hautes teneurs dans l'eau, des charges excessives dans les chaudières et les changements soudains de charge on aide aussi à éviter ces problèmes [16].

Très souvent, les condensats contaminés retournent dans les systèmes de chaudières entraînant des problèmes de transfert. Dans ce cas, le condensat devrait être temporairement rejeté jusqu'à la source de contamination soit trouvée et éliminée. L'utilisation d'agents chimiques anti-moussage et anti-primage, mélanges d'agents tensio-actifs, élimine la mousse, empêche le transfert de fines particules dans la vapeur, et peut être très efficace en empêchant le primage dû aux hautes concentrations d'impuretés dans l'eau de chaudière.

Les chaudières sont exigeantes pour leur l'eau d'approvisionnement. Comme de la vapeur est produite la concentration en sels dissous augmente et forme des dépôts à l'intérieur de la chaudière. Ceci conduit à des faibles transferts de chaleur et réduit l'efficacité de celle-ci. Les gaz dissous tel que l'oxygène et le dioxyde de carbone réagiront avec les métaux dans les systèmes de chaudière et entraîneront une corrosion.

Afin de protéger la chaudière de ces contaminants, ils devraient être contrôlés ou éliminés, grâce à des traitements internes ou externes.

Le traitement externe est la réduction ou l'élimination des impuretés de l'eau hors de la chaudière. En générale, le traitement externe est utilisé quand la quantité de telles ou telles impuretés de l'eau d'alimentation est trop élevée pour être tolérée par le système de la chaudière en question.

Le traitement interne est le traitement des impuretés à l'intérieur du système de la chaudière. Les réactions se produisent dans les lignes d'alimentation ou dans la chaudière. Ce traitement peut être utilisé seul ou avec un traitement externe. Son but est de réagir correctement à la dureté de l'eau d'alimentation, d'éliminer les boues, de réduire l'oxygène et d'empêcher le moussage de l'eau des chaudières.

III.7 Le principe de conditionnement de l'eau de chaudière :

Le principe de conditionnement de l'eau de chaudière est simple [17] :

- Toute dureté apportée par l'eau d'alimentation doit être soit précipité dans la chaudière sous forme non entartrant, soit chélate ;
- L'eau de la chaudière doit contenir un excès de réactif afin de précipiter une quantité supplémentaire de dureté qui pourrait arriver accidentellement.
- Des dispositions sont à prendre pour éviter les dépôts de silice.

Pour ce faire on a ces principaux réactifs de conditionnement :

- ✓ Les phosphates : utilisés en conditionnement sont de 2 types les mono et les poly phosphates. à partir de 40 bars environ, on maintient habituellement le rapport : $\text{PO}_4\text{NA}_3 / \text{NaOH}$ supérieur à 1.
L'action protectrices du phosphate trisodique est due à une phosphatation superficielle qui passive le fer. L'excès de phosphate trisodique est indispensable pour prévenir les corrosions dues à la soude libre que pour empêcher l'entartrage.
- ✓ Les séquestrant ou chélatants : les plus connus sont les sels de sodium des acides nitrilotriacétique.
- ✓ Les dispersants : il s'agit d'une catégorie de produit agissant davantage sur la boue formée dans la chaudière que sur la précipitation de la dureté. les plus anciennement utilisés sont les tanins, les produits naturels, les lignosulfonates, les polymères synthétiques, etc.
- ✓ Les agents anti-moussage et anti-primage : les facteurs permettant d'éviter ou éliminer le primage ne correspondent pas, dans le cas le plus général, à l'introduction d'un réactif de conditionnement.

Les seuls réactifs de conditionnement qui puissent être introduits pour lutter contre le primage sont des dispersants et les antimousse : alcool à longues chaînes, polyols, polyamides, silicones, etc. l'emploi de ces produits est généralement utilisés pour les chaudières à basse et a moyenne pression ; leur dose d'emploi est de quelques

milligrammes par litre d'eau. Dans le cas de la chaudière à très haute pression, certaines spécifications imposent comme traitements de base la distillation ou la déminéralisation.

- ✓ Dégazeur thermique : délivrant une eau à quelques grammes d'oxygène par litre. A basse pression, ce traitement est souvent suffisant, mais quand la pression en chaudière s'élève, la solubilité de l'oxygène augmente et, à partir d'une eau d'appoint dégazée on peut retrouver en chaudière une centaine de grammes d'oxygène.

C'est pourquoi on ajoute à l'eau dégazée un réducteur chimique qui détruit les dernières traces d'oxygène dissous et constitue dans l'eau de chaudière une réserve de produit réducteur capable de parer aux aléas de fonctionnement. Des produits peuvent être utilisés :

- Sulfite de sodium

Il agit suivant la réaction :



Aux températures qui règnent en chaudière, la vitesse de réaction du sulfite est suffisante, même sans catalyseur.

- Hydrazine

Elle réduit l'oxygène suivant la réaction :



L'hydrazine n'apporte aucune salinité à l'eau puisque elle-même et ses produits de décomposition sont volatils. Cependant, au-delà de 270°C, elle se décompose partiellement en ammoniac.

Ces deux réducteurs peuvent également être utilisés pour déduire la totalité de l'oxygène dissous si on ne se dispose pas de dégazeur. Les doses doivent être ajustées en conséquence et, dans le cas de sulfite de sodium, on doit tenir compte de la salinité supplémentaire apportée, tant pour la détermination des purges nécessaires que pour se prémunir contre la formation de dépôts de sulfate de calcium. Le hydrazine est fortement déconseillé à cause de sa toxicité (effet cancérigène)

En absence de dégazeur thermique, la réduction de l'oxygène pourrait s'effectuer avantageusement avec de la tanate de sodium. Son emploi est très économique sur les chaudières à moyen pression et d'ailleurs, il coute trois fois moins cher que l'hydrazine et il n'apporte aucune salinité à l'eau.

- ✓ Les produits neutralisants : ils sont volatils et se condensent en même temps que la vapeur. Deux caractéristiques de ces composés sont importante leur pouvoir neutralisant et leur coefficient de partage entre l'eau et la vapeur. les plus utilisés sont :
 - L'ammoniaque ;
 - Le cyclohexylamine
 - La benzylamine
 - La morphine

Ceci étant l'ammoniaque est généralement déconseillée à cause de son action corrosive sur le cuivre et ces alliages. Le choix entre les trois aminés dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels l'odeur, celle de la benzylamine étant particulièrement désagréable. Le cyclohexylamine et la morphine ont n pouvoir dissolvant beaucoup moindre que l'ammoniaque, d'ailleurs ils sont préférés.

III.8 Conclusion :

La conclusion que l'on peut tirer de cette partie est qu'il est bien connu qu'un conditionnement soit possible, mais il doit être contrôlé avec une grande rigueur.

Les chaudières elles-mêmes semblent avoir quelques peines à établir les spécifications de l'eau d'appoint, car il est inconvenable d'avoir une chaudière en zéro absolu en sodium, chlorure ou silices.

Seul un conditionnement correct de l'eau d'appoint, à l'aide des additifs chimiques et des bons matériels nous permettent d'avoir une qualité d'eau optimale pour l'alimentation des chaudières.

CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE**IV.1 Détermination de l'alcalinité****(Titre alcalimétrique et titre alcalimétrique complet)****IV.1.1 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)

IV.1.2 Réactifs :

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

IV.1.3 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.

IV.1.4 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 V_2 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

IV.2 DETERMINATION DU TITRE HYDROTIMETRIQUE TH

IV.2.1 .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.

IV.2.2 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).

IV.2.3 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).

IV.2.4 Expression des résultats :

V : volume de la solution d'EDTA lu à la burette et qui exprime le TH en °F. Pour convertir le TH en milligrammes de CaCO_3 au litre, on a :

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



Figure IV – 2 : Dosage volumétrique du TH.

IV.3 DOSAGE DU TITRE CALCIQUE

IV.3.1 Principe :

La détermination du T_{Ca} 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.

IV.3.2 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).

IV.3.3 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 $T_{Ca^{++}}$ exprimé en degré français (°F).

IV.3.4 Expression des résultats :

V : volume de la solution d'EDTA lu à la burette et qui exprime le $T_{Ca^{++}}$ en °F. Pour convertir le TH en milligrammes de $CaCO_3$ au litre, on a :

$$1^{\circ}F = 10mg \text{ de } CaCO_3 / L$$



Figure IV – 3 : Dosage volumétrique du $T_{Ca^{++}}$

IV.4 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].

IV.4.1 Principe :

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

IV.4.2 Réactifs :

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

IV.4.3 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.

IV.4.4 Expression des résultats :

V : Volume de nitrate d'argent lu directement sur la burette dont la teneur en ions chlorures est mesuré par la relation :

$$Cl^- \text{ (en mg/L)} = V \text{ nitrate d'argent en ml} \times 35,5$$

Avec : V : volume du nitrate d'argent en ml ; 35,5 : est la masse molaire du chlorure (Cl^-)



Figure IV – 4 : Dosage volumétrique du Cl⁻

IV.5 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.

IV.5.1 Principe :

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

IV.5.2 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 étalonnée pour que les mesures soient fiables.

IV.5.3 Expression des résultats :

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



Figure IV – 5 : Couple pH- mètre/Conductimètre



Figure IV – 6 : pH- mètre consort « C832 »

IV.6 DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE

IV.6.1 Principe :

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

IV.6.2 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.

IV.6.3 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 – 7 : Conductimètre « E587 »

IV.7 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].

IV.7.1 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.

IV.7.2 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.

IV.7.3 Expression des résultats :

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



Figure IV – 8 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 »

IV.8 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.

IV.8.1 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.

IV.8.2 Réactifs :

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

IV.8.3 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

IV.8.4 Expression des résultats :

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



Figure IV – 9 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » Dosage du fer total

IV.9 DOSAGE DE L'ACIDE ORTHOPHOSPHORIQUE

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.

IV.9.1 Principe :

Les phosphates en solution acide et en présence de molybdate d'ammonium donnent un complexe phosphomolybdique qui est réduit par l'acide ascorbique en développant une coloration bleue. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre.

IV.9.2 Réactifs :

- Sulfomolybdique ;
- Acide ascorbique à 20 g / L.

IV.9.3 Mode opératoire :

- Prendre 40 ml d'échantillon ;
- Ajouter 4 ml sulfomolybdique puis ajouter environ 0.1 gr d'acide ascorbique ;
- Mettre sur la plaque chauffante pour une minute d'ébullition ;

- Bien mélanger ;
- Refroidir, et compléter à 50 ml avec de l'eau distillée ;
- Régler la longueur d'onde à 608 nm ;
- Faire la lecture d'absorbance sur le spectrophotomètre ;
- On effectue la lecture par rapport à l'essai à blanc.

IV.9.4 Expression des résultats :

La lecture d'absorbance sur le spectrophotomètre donne directement la teneur en PO_4^{3-} exprimé en mg/L.



Figure IV – 10 : Spectrophotomètre « H Dr 5000 » dosage de l'acide ortho phosphorique

IV.10 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].

IV.10.1 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.

IV.10.2 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)

IV.10.3 Expression des résultats :

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



Figure IV – 11 : Turbidimètre AL450T-IR

IV.11 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
O ₂ (mg/l)	< 0.02			
Fe total (mg/l)	< 1	< 0.05	< 0.05	< 0.03
Cu total (mg/l)	< 0.05	< 0.03	< 0.03	< 0.01
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			
Salinité totale (mg/l)	≤ 900	≤ 700	≤ 500	≤ 300
Cl ⁻ (mg/l)	≤ 200	≤ 150	≤ 100	≤ 50
NaOH (mg/l)	< 30	< 20	< 10	< 5
Si O ₂ (mg/l)	≤ 20	≤ 20	≤ 15	≤ 10
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	30-80	20-60	10-40	5-20

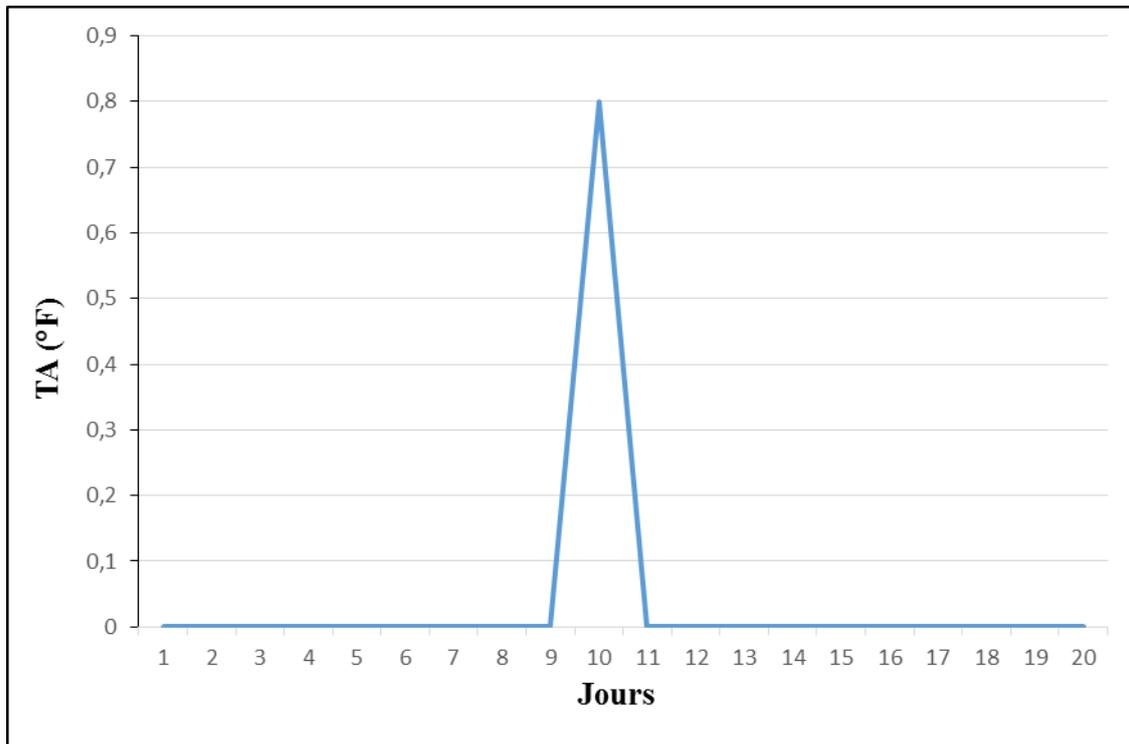
Les résultats d'analyses effectués au niveau du laboratoire central pendant la période de notre stage sont montrés dans les tableaux.

IV.11.1 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

Jours	TA (°F)	TAC (°F)	TH (°F)	Ca (°F)	Mg (°F)	Cl ⁻ (mg/ Cl ⁻)	PH	TDS (mg/l)	χ (μS/cm)	T (°C)
1	0,00	0,60	0,50	0,30	0,20	3,55	7,09	28,00	18,00	15,00
2	0,00	0,70	0,80	0,60	0,20	3,55	7,80	28,00	18,50	15,50
3	0,00	0,00	3,40	3,00	0,40	7,10	7,08	74,00	18,60	14,00
4	0,00	0,50	0,60	0,40	0,20	3,55	11,90	26,00	16,00	13,00
5	0,00	0,50	0,60	0,40	0,20	3,55	7,25	22,00	13,80	14,00
6	0,00	0,50	0,40	0,30	0,10	3,55	7,00	18,00	11,80	15,00
7	0,00	0,60	0,60	0,40	0,20	3,55	7,67	25,00	15,80	14,50
8	0,00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	8,10	28,00	17,20	13,00
9	0,00	0,60	0,70	0,50	0,20	7,10	7,25	25,00	16,00	14,50
10	0,80	1,40	0,80	0,60	0,20	10,60	8,75	47,00	30,00	14,00
11	0,00	0,80	0,70	0,50	0,20	7,10	7,12	22,00	14,50	16,00
12	0,00	1,00	0,80	0,60	0,20	7,10	7,48	35,00	23,00	15,00
13	0,00	1,00	0,90	0,70	0,20	7,10	7,37	38,00	24,00	13,50
14	0,00	0,60	0,60	0,40	0,20	3,55	7,45	13,00	9,10	15,50
15	0,00	0,60	0,60	0,40	0,20	7,10	7,98	17,15	11,50	16,00
16	0,00	0,80	0,80	0,60	0,20	7,10	7,80	22,00	15,50	18,00
17	0,00	0,90	0,90	0,70	0,20	7,10	8,14	27,00	18,40	16,00
18	0,00	0,80	0,80	0,60	0,20	7,10	7,67	25,00	17,00	15,50
19	0,00	0,90	0,90	0,70	0,20	7,10	7,44	27,00	18,00	16,00
20	0,00	0,50	0,50	0,30	0,20	3,55	7,15	14,00	8,60	13,50

IV.11.2 Présentation graphique des résultats d'analyses de l'eau alimentaire**❖ Variation du TA :****Figure IV – 12 : Variation du TA de l'eau alimentaire en fonction du temps**

❖ Variation du TAC :

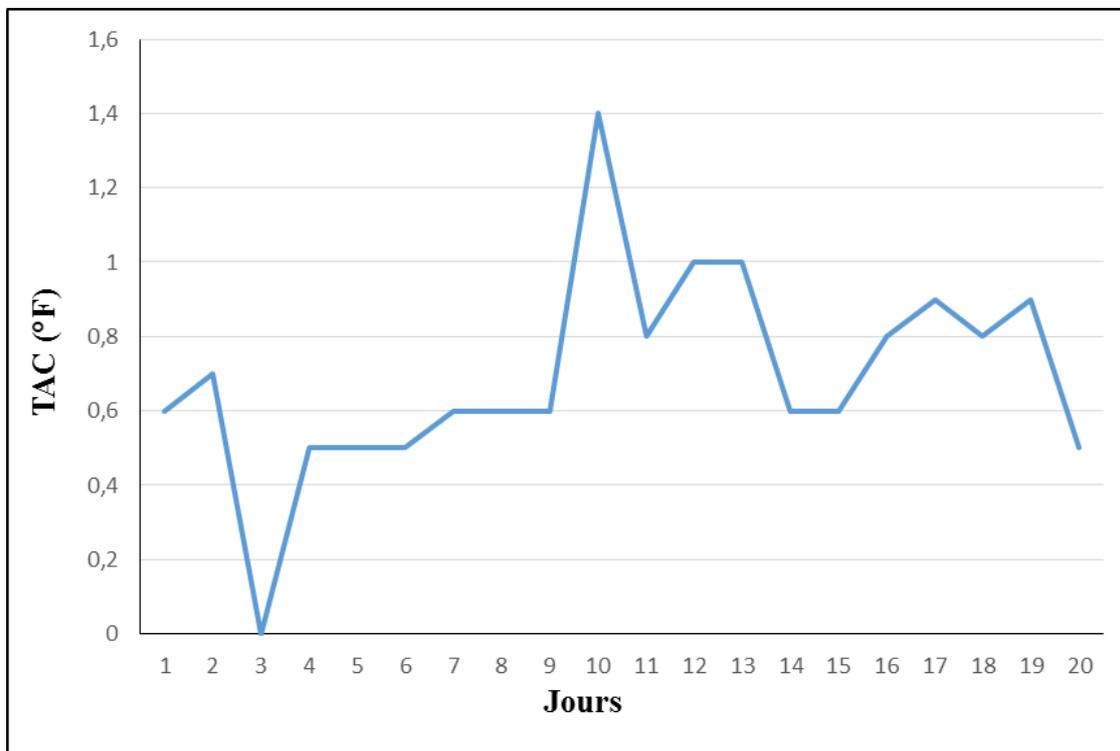


Figure IV – 13 : Variation du TAC de l'eau alimentaire en fonction du temps

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 CO_2 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 TH :

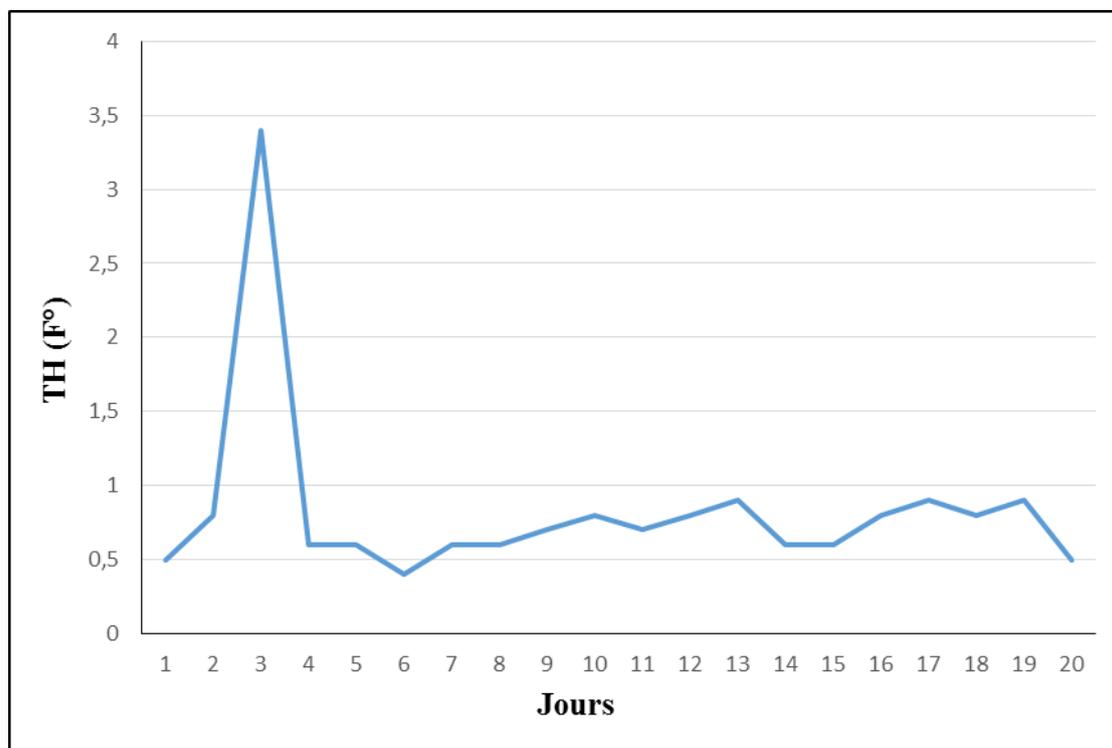


Figure IV – 14 : Variation du TH de l'eau alimentaire en fonction du temps

D'après les résultats regroupés dans le tableau et le graphique tracé ci-dessus, il apparaît clairement que la valeur de la dureté totale de l'eau adoucie, se situe entre 0,5 °F et 0,9 °F excepté un pique supérieur à 3 °F. On remarque alors que le TH est supérieur à celui des normes opérationnelles et qui ne devait pas dépasser les 0,20 °F ; ceci révèle un mauvais fonctionnement des membranes d'ultrafiltration et des osmoseurs. Cette fuite de dureté est probablement due soit à la mauvaise régénération des résines soit au colmatage des résines à cause de la mauvaise qualité de l'eau d'alimentation des membranes d'ultrafiltration. Une dureté non conforme conduit évidemment à la formation de tartre au niveau des tubes de la chaudière ainsi que plusieurs problèmes perturbant le fonctionnement de l'installation.

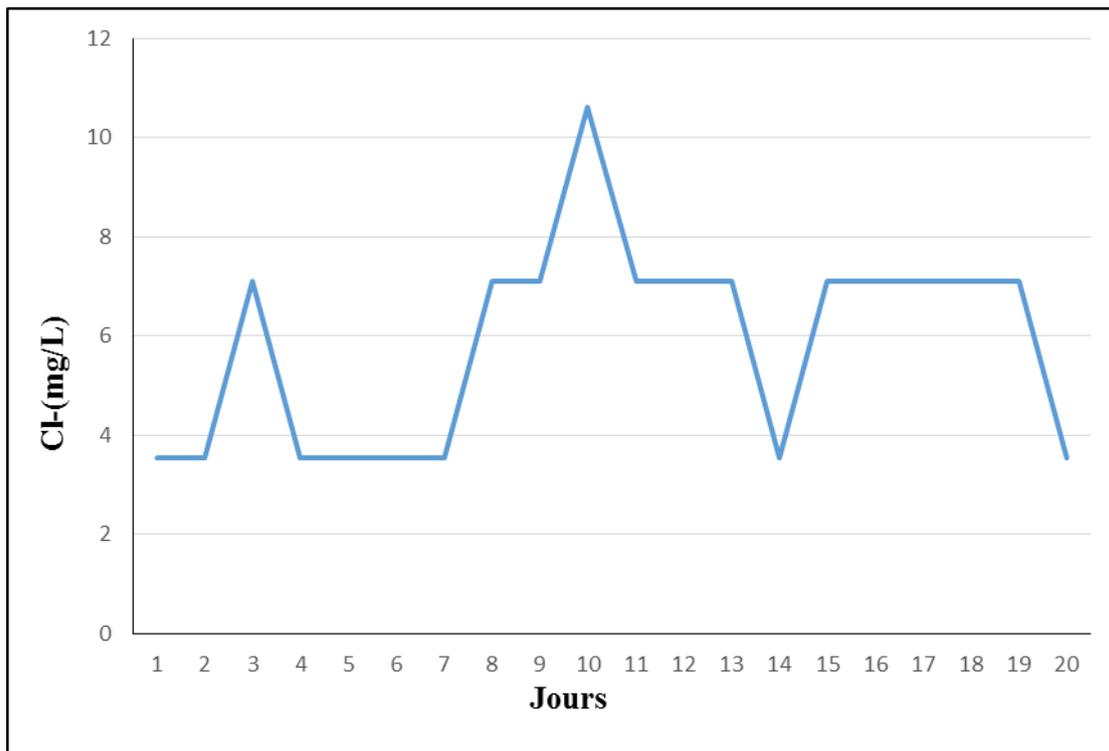
❖ Variation du Cl⁻ :

Figure IV – 15 : Variation du Cl⁻ de l'eau alimentaire en fonction du temps

Il est important de noter que les ions chlorures sont susceptibles de réagir avec l'eau en produisant de l'acide chlorhydrique. Par conséquent, il s'ensuit localement des zones à pH très faibles qui accélèrent la corrosion du métal. Suite à l'analyse de l'eau d'alimentation, on remarque une présence de chlore acceptable qui doit être inférieur à 30 mg/cl⁻ selon les normes.

❖ Variation du pH :

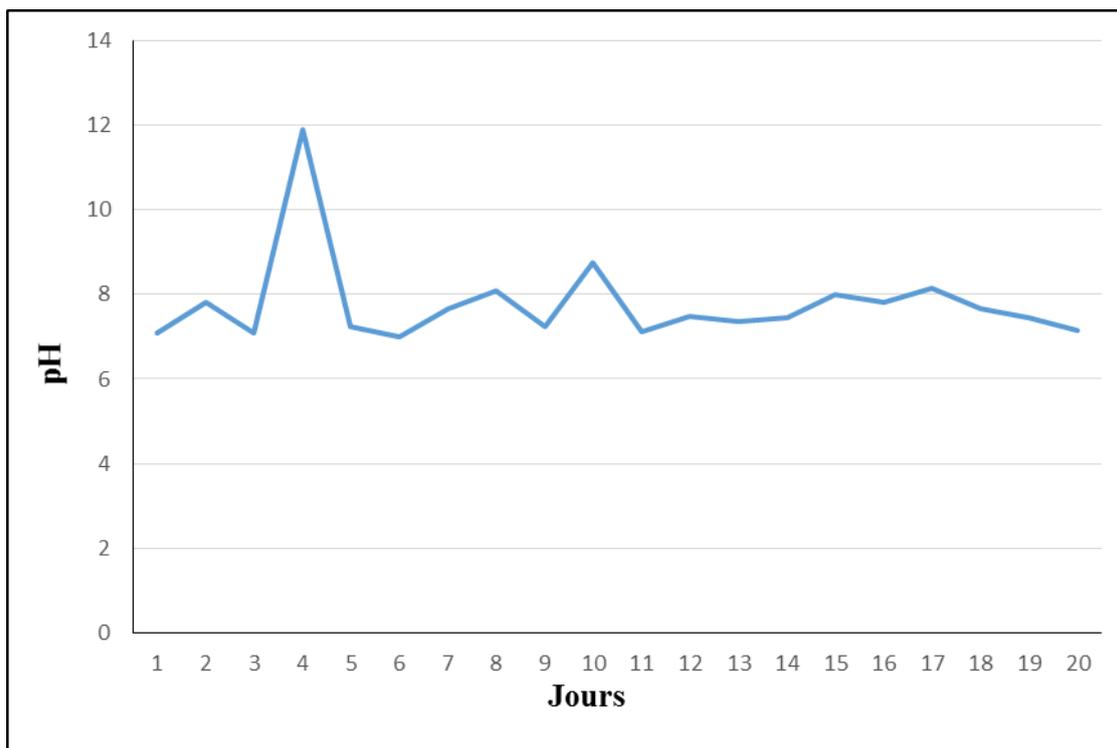


Figure IV – 16 : Variation du pH de l'eau alimentaire en fonction du temps

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 préconisées. 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.

IV.11.3 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 converties en mg de CaCO_3 /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

Jours	TAC (mg CaCO₃/l)	pHs
1	6	8,15
2	7	8,13
3	8	8,07
4	5	8,23
5	5	8,23
6	5	8,23
7	6	8,15
8	6	8,15
9	6	8,15
10	14	7,70
11	8	8,07
12	10	7,95
13	10	7,95
14	6	8,15
15	6	8,15
16	8	8,07
17	8	8,07
18	8	8,07
19	9	8,03
20	5	8,23

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

Jours	pH	pHs	IR
1	7,09	8,15	9,21
2	7,80	8,13	8,43
3	7,14	8,07	8,14
4	11,90	8,23	4,56
5	7,25	8,23	9,21
6	7,00	8,23	9,43
7	7,67	8,15	8,66
8	8,10	8,15	8,20
9	7,25	8,15	9,05
10	8,75	7,70	6,65
11	7,12	8,07	9,02
12	7,48	7,95	8,42
13	7,37	7,95	8,53
14	7,45	8,15	8,85
15	7,98	8,15	8,32
16	7,80	8,07	8,34
17	8,14	8,07	8,00
18	7,67	8,07	8,47
19	7,44	8,03	8,62
20	7,15	8,23	9,31

IV.11.4 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.

IV.12 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)	TH (°F)	Ca (°F)	Mg (°F)	Cl ⁻ (mg/ Cl ⁻)	pH	TDS (mg/l)	χ (μS/Cm)	T (°C)
1	12,40	14,80	8,00	7,60	0,40	142,0	11,87	764	930	16,00
2	14,00	17,00	9,80	9,40	0,40	163,3	11,87	846	980	14,50
3	14,70	10,80	10,0	9,60	0,40	177,2	11,75	960	1140	15,00
4	18,00	21,80	11,0	10,80	0,20	181,7	11,90	1035	1350	19,00
5	16,40	20,40	11,0	10,60	0,40	215,5	11,99	1151	1450	17,5
6	18,80	22,00	11,0	10,60	0,40	220,0	10,95	1152	1470	18,00
7	10,00	11,60	8,00	7,40	0,60	71,0	11,54	627	800	18,00
8	11,00	14,40	7,40	6,80	0,60	78,0	11,68	716	850	15,00
9	37,00	40,00	8,00	7,80	0,20	99,4	11,11	1574	2210	22,5
10	14,40	16,00	9,40	9,00	0,40	142,0	11,82	962	1200	17,00
11	19,60	23,00	8,00	7,40	0,60	134,9	11,82	1144	1660	24,00
12	17,00	19,00	8,60	8,40	0,20	142,0	11,90	1095	1300	15,00
13	31,00	34,00	10,8	10,40	0,40	99,4	11,96	1474	2180	25,00
14	22,00	26,00	8,80	8,40	0,40	106,5	11,90	1095	1300	16,00
15	14,00	16,80	7,40	7,20	0,20	106,0	11,75	858	1130	19,5
16	13,00	15,00	7,60	6,40	1,20	106,5	11,73	723	880	16,00
17	10,00	12,00	6,40	6,00	0,40	106,5	11,61	611	710	14,00
18	10,00	13,00	7,00	6,20	0,80	106,5	11,57	637	775	16,00
19	10,40	13,00	6,60	6,20	0,40	106,5	11,57	668	852	18,00
20	14,00	16,60	5,40	5,20	0,20	71,0	11,74	820	950	14,5

IV.12.1 Présentation graphique des résultats d'analyses de l'eau de chaudière

❖ Variation du TA :

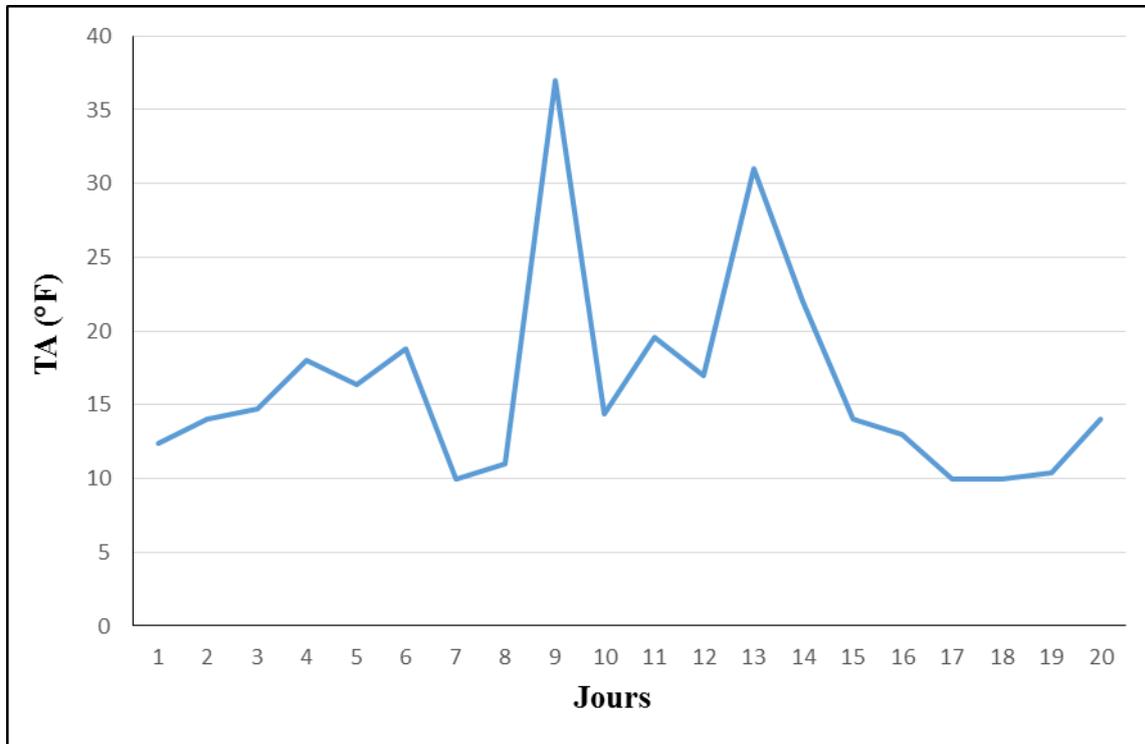


Figure IV – 17 : Variation du TA de l'eau de chaudière en fonction du temps

❖ Variation du TAC :

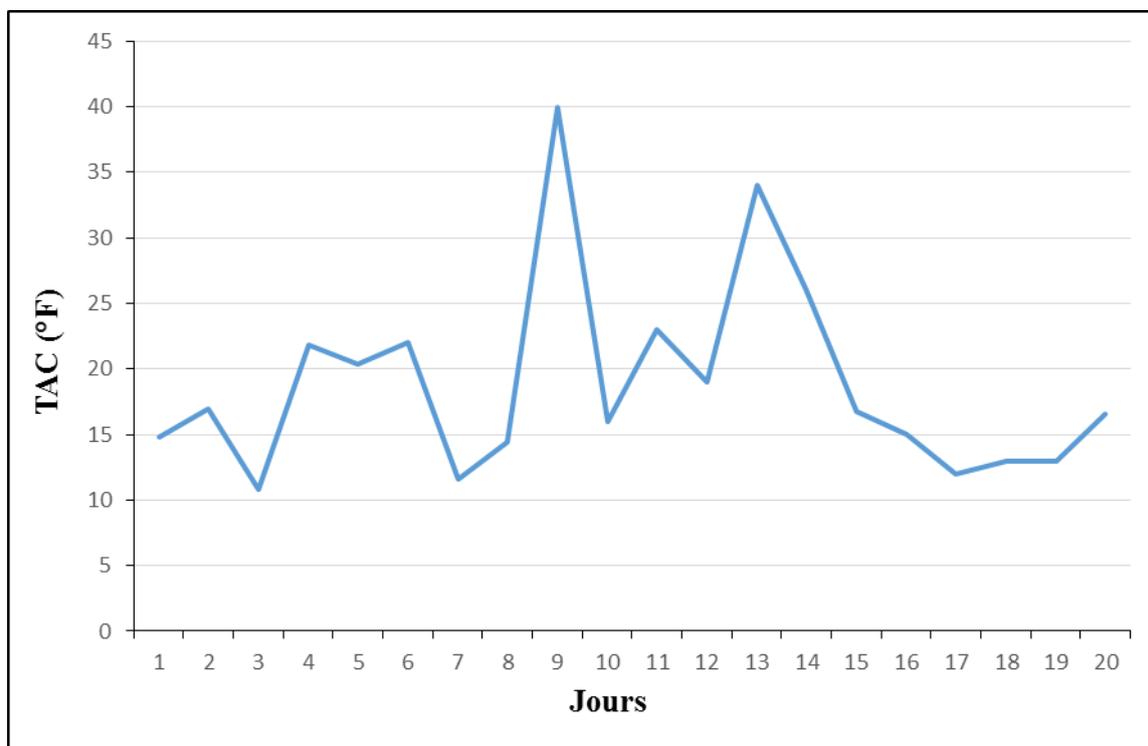


Figure IV – 18 : Variation du TAC de l'eau de chaudière en fonction du temps

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 $TA \geq 0.5 \text{ TAC}$ et dans notre cas majorité des analyses montre des $TA \geq 0.8 \text{ TAC}$ alors que les valeurs optimum selon les normes se trouve autour de $TA \approx 0.7 \text{ TAC}$ 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 TH :

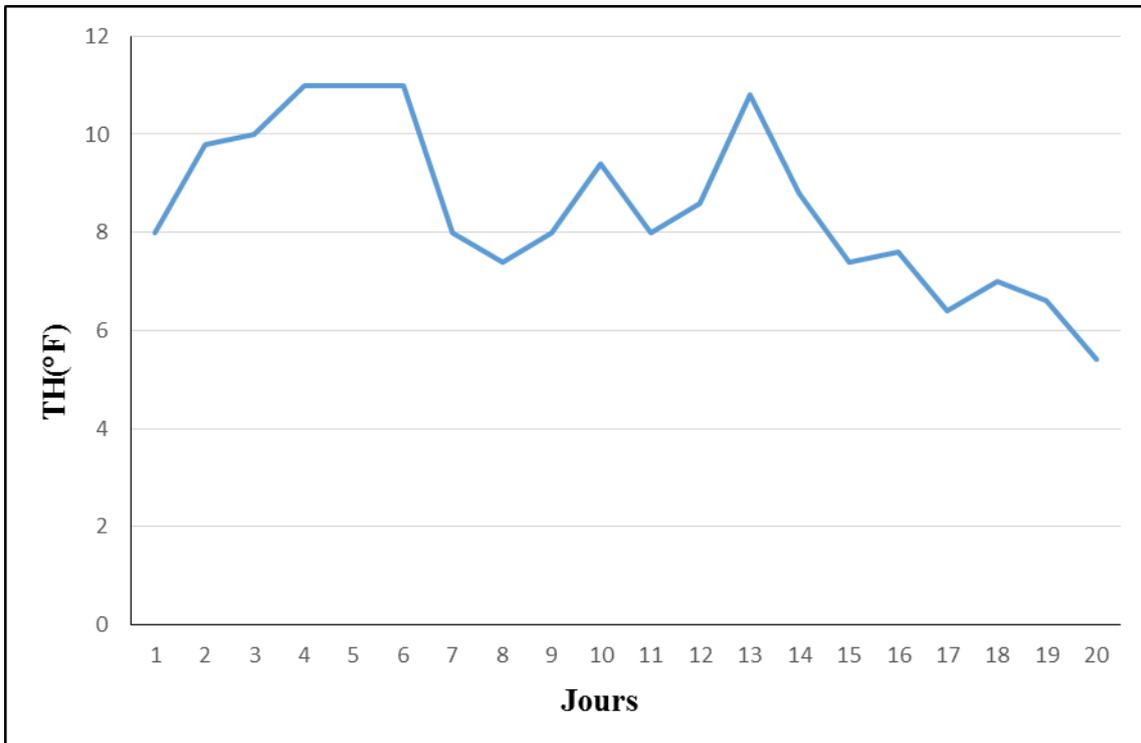


Figure IV – 19 : Variation du TH de l'eau de chaudière en fonction du temps

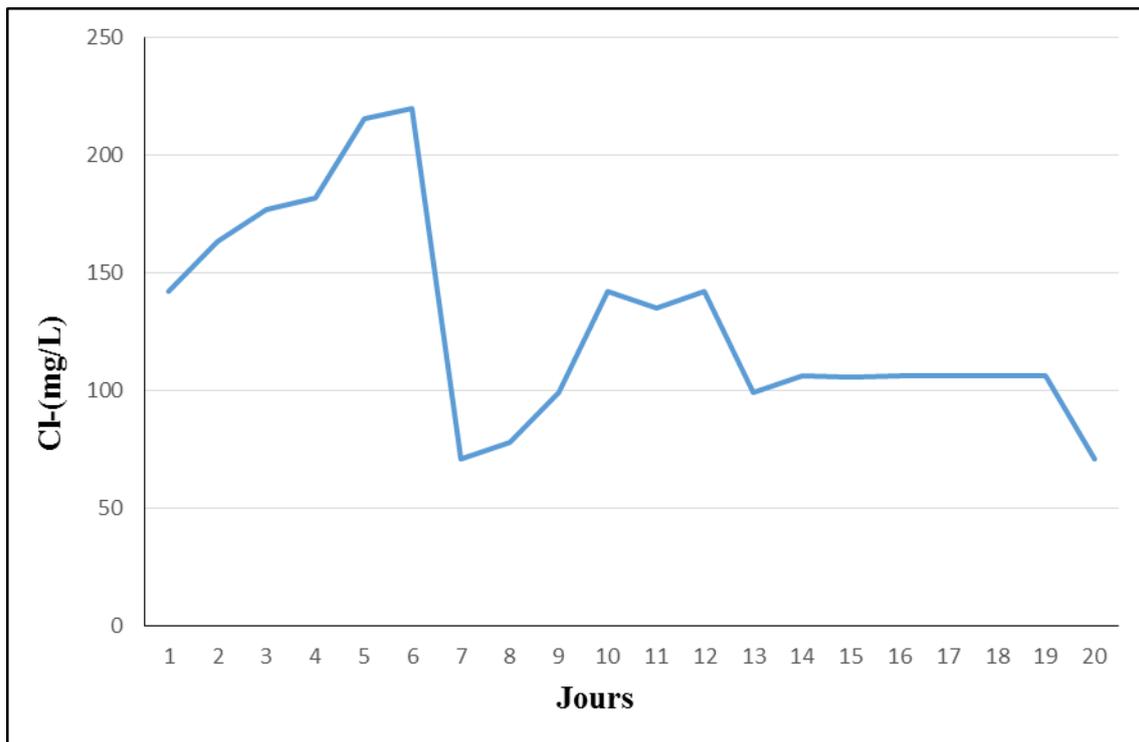
❖ Variation du Cl⁻ :

Figure IV – 20 : Variation du Cl⁻ de l'eau de chaudière en fonction du temps

Il est important de noter que les ions chlorures sont susceptibles de réagir avec l'eau en produisant de l'acide chlorhydrique. Par conséquent, il s'ensuit localement des zones à pH très faibles qui accélèrent la corrosion du métal. L'analyse de l'eau de chaudière a montré des valeurs acceptables inférieures à 200 mg/cl⁻.

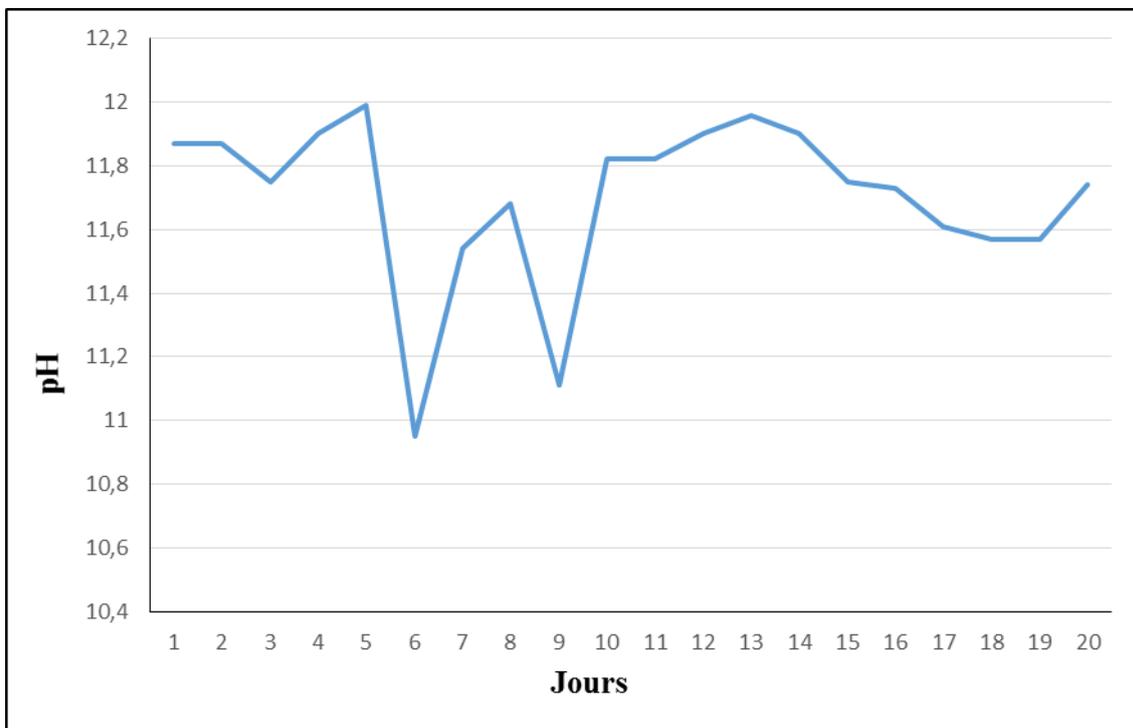
❖ **Variation du pH :**

Figure IV – 21 : 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.

IV.12.2 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

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 **SIDER EL HADJAR** 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.

REFERENCES 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.TAKABAÏT « 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.