



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar El oued



Faculté de Technologie
Département : Génie chimique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master
Specialité: Génie chimique

THEME

**Etude d'impact de la qualité des eaux
destinées à l'alimentation d'une chaudière
de production de vapeur à l'échelle
industrielle**

Présenté par :

- Zine Radhouane
- ELHachemi Dou

Dirigé par :

BELGHIT MOHAMED YAZID.

Dr.BEN AMOUR MOHAMMED LARBI	Université Echahid Hamma Lakhdar El oued	Président
Dr.GEUMARI FATHI	Université Echahid Hamma Lakhdar El oued	Examineur
Dr. BELGHIT MOHAMED YAZID	Université Echahid Hamma Lakhdar El oued	Encadreur

2024/2025

DEDICACE

Je dédie humblement ce travail à toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont soutenu tout au long de mon parcours :

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières et leur soutien moral permanent.

À ma famille, source de force, de réconfort et de motivation dans les moments difficiles.

À mes enseignants, pour leur transmission de savoir et leur accompagnement tout au long de mon cursus.

À mes collègues et camarades de promotion, avec qui j'ai partagé des efforts, des idées, et des souvenirs inoubliables.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Merci du fond du cœur à chacun d'entre vous.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur

Yazid Mohammed B.

pour ses efforts remarquables, sa disponibilité et son accompagnement constant

tout au long de ce travail de recherche.

Ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et son soutien bienveillant ont

grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Résumé :

Ce mémoire traite du traitement de l'eau des chaudières industrielles, en prenant comme cas d'étude une unité industrielle représentative. L'objectif principal de cette étude est de comprendre l'impact de la qualité de l'eau sur la performance des chaudières, notamment à travers l'analyse des phénomènes d'entartrage, de corrosion, et des pertes d'efficacité thermique.

Nous avons abordé dans la partie théorique les notions générales sur l'eau, les caractéristiques de l'eau d'alimentation des chaudières, ainsi que les types de chaudières et leurs composants essentiels. Dans la partie pratique, nous avons analysé les méthodes de traitement appliquées dans une installation industrielle, telles que la filtration sur sable, l'osmose inverse et l'adoucissement. L'étude montre que la dureté élevée de l'eau constitue la cause principale de l'entartrage, entraînant une baisse significative de la pression de vapeur. Une solution simple et économique, telle que l'installation d'un adoucisseur, a été proposée pour y remédier.

Mots-clés : traitement de l'eau, chaudières industrielles, osmose inverse, adoucisseur, entartrage, efficacité thermique.

الملخص:

تناولنا معالجة مياه تغذية الغلايات الصناعية، في الوسط الصناعي. ويكمن الهدف الأساسي من هذه الدراسة في فهم تأثير جودة المياه على أداء الغلايات، خصوصاً من خلال تحليل ظواهر مثل التكلّس، التآكل، وفقدان الكفاءة الحرارية.

في الجانب النظري، تطرقنا إلى المفاهيم العامة حول المياه، وخصائص مياه تغذية الغلايات، بالإضافة إلى أنواع الغلايات ومكوناتها الأساسية. أما في الجانب التطبيقي، فقد قمنا بتحليل طرق المعالجة المطبقة في إحدى الوحدات الصناعية، مثل الترشيح الرملي، التناضح العكسي، والتليين. وقد أظهرت الدراسة أن ارتفاع القساوة الكلية للمياه (TH) يُعتبر السبب الرئيسي لتكوّن التكلّس، مما يؤدي إلى انخفاض ضغط البخار. وللتغلب على هذه المشكلة، تم اقتراح حل بسيط وذو تكلفة منخفضة يتمثل في تركيب جهاز تليين المياه.

الكلمات المفتاحية: معالجة المياه، الغلايات الصناعية، التناضح العكسي، جهاز التليين، التكلّس،

الكفاءة الحرارية.

SOMMAIRE

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENTS	II
SOMMAIRE	IV
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
INTRODUCTION.....	10
I.CHAPITRE I GENERALITES SUR L'EAU ET L'EAU DES CHAUDIERES.....	12
I-1-INTRODUCTION	13
I-2- DEFINITION ET CARACTERISTIQUES DE L'EAU D'ALIMENTATION DES CHAUDIERES	13
I-2-1-Définition de l'eau	13
1-2-2- Définition de l'eau d'alimentation de chaudière	13
1-2-3- Les principales caractéristiques requises	14
1-2-4- EXIGENCES ADDITIONNELLES SELON LA PRESSION	14
I-3- QUALITE DE L'EAU DES CHAUDIERES	14
I-3-1- Sources de l'eau des chaudières	14
I-3-2- Directives de traitement de l'eau des chaudières	18
I-3-3-Traitement externe et interne de l'eau.....	20
I-3-CONCLUSION	22
CHAPITRE II DESCRIPTION DES CHAUDIERES	24
II.1. INTRODUCTION.....	25
II.2. DEFINITION DES CHAUDIERES.....	25
II.4. TYPES DE CHAUDIERES.....	25
II.4.1. Les chaudières à tubes d'eau	26
II.4.2. Les chaudières à tubes de fumées	28
II.5. PRINCIPAUX ELEMENTS D'UNE CHAUDIERE	29
II.5.1. Chambre de combustion (Foyer).....	29
II.5.2. Bruleurs	29
II.5.3. Faisceau de convection.....	30
II.5.4. Economiseur.....	31
II.5.5. Vaporisateurs.....	31
II.5.6. Surchauffeurs.....	31

II.5.7. Resurchauffeurs.....	32
II.5.8. Désurchauffeurs.....	32
II.5.9. Evaporateur.....	32
II.5.10. Ventilateur de soufflage.....	33
II.5.11. Ballons de purge.....	33
II.5.12. Appareils de sécurité.....	33
II.5.13. Autres échangeurs associés à la chaudière.....	34
II.7. REGULATION DANS LES CHAUDIERES.....	34
II.7.1. Contrôle de la pression de la vapeur surchauffée.....	34
II.7.2. Contrôle de la température de la vapeur surchauffée.....	35
II.7.3. Contrôle du niveau d'eau dans le ballon supérieur.....	35
II.8. SECURITE DES CHAUDIERES.....	36
II.8.1. Importance de la sécurité.....	36
II.8.2. Sécurité des brûleurs.....	36
II.8.3. Comportement sécuritaire du personnel.....	37
CHAPITRE III TRAITEMENT DE L'EAU DES CHAUDIERES	39
III.1 INTRODUCTION.....	40
III.2. TRAITEMENT DE L'EAU DE CHAUDIERE.....	40
III.2.1. Filtration sur sable.....	40
III.2.2 Membrane d'osmose inverse.....	41
III.3. PRINCIPES DE L'OSMOSE INVERSE.....	41
III.4. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES D'UNE UNITE D'OSMOSE INVERSE.....	42
III.4.1. Pression osmotique.....	42
III.4.2. Taux de conversion.....	42
III.4.3. Sélectivité.....	43
III.4.4. Mécanisme de transfert.....	43
III.5. ENTARTAGE DANS LES CHAUDIERES.....	43
III.5.1. Définition de l'adoucisseur.....	44
III.5.2. Principe de l'adoucisseur.....	45
III.6. CONCLUSION.....	48
CONCLUSION.....	49
REFERENCES.....	51

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Sources de l'eau des chaudières	15
Figure II.1 : Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur.	26
Figure II.2 : Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur.	28
Figure II.3 : Schéma d'une chaudière à tubes de fumées.	29
Figure II.4 : Le bruleur.	30
Figure II.5 : Les ballons, supérieur et inférieur.	30
Figure II.6 : Schéma des surchauffeurs.	32
Figure II.7 : Schéma d'un évaporateur.	32
Figure II.8 : Contrôle de la pression de la vapeur surchauffée.	35
Figure II.9 : Contrôle de la température de la vapeur surchauffée.	35
Figure II.10 : Contrôle du niveau d'eau dans le ballon supérieur.	36
Figure III.1 : Filtre à sable utilisé dans une unité industrielle typique.	41
Figure III.2 : Pression osmotique	42
Figure III.3 : Adoucisseur utilisé dans le cadre du traitement des eaux en milieu industriel.	45
Figure III.4 : Principe de fonctionnement d'un adoucisseur	46
Figure III.5 : Comment fonctionne la Résine	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Exigences additionnelles selon la pression de la chaudière (pH, O ₂ , dureté totale)	14
Tableau I.2 : Directives ASME pour la qualité de l'eau dans les chaudières à tubes d'eau industrielles modernes.....	18
Tableau I.3 : Concentrations standards de l'eau des chaudières selon l'ABMA pour minimiser le "carryover.....	18
Tableau I.4 : Caractéristiques de l'eau d'alimentation selon la norme IS:10392-1982	19
Tableau I.5 : Caractéristiques de l'eau de chaudière selon la norme IS:10392-1982	19

INTRODUCTION

Dans le contexte industriel moderne, la production de vapeur occupe une place stratégique dans de nombreux procédés de transformation, notamment dans les secteurs chimique, énergétique, agroalimentaire ou minier. Les chaudières industrielles, en tant que générateurs de vapeur, nécessitent une alimentation en eau dont la qualité doit être rigoureusement contrôlée afin d'éviter divers phénomènes indésirables tels que l'entartrage, la corrosion ou les pertes d'efficacité énergétique. Une eau mal traitée peut compromettre non seulement la performance et la sécurité des installations, mais également leur durabilité, entraînant des coûts économiques et environnementaux considérables.

Dans cette perspective, le traitement de l'eau destinée aux chaudières constitue un enjeu majeur. Il implique la mise en œuvre de techniques variées telles que la filtration sur sable, l'osmose inverse ou encore l'adoucissement, chacune répondant à des exigences spécifiques de pureté et de stabilité chimique. Comprendre les mécanismes physico-chimiques en jeu ainsi que les conséquences d'un traitement inadéquat est essentiel pour garantir le bon fonctionnement des équipements thermiques.

Le présent travail s'inscrit dans cette problématique et a pour objectif d'étudier l'impact de la qualité des eaux d'alimentation sur les performances des chaudières industrielles. À travers une approche théorique et expérimentale, il met en lumière les procédés de traitement employés, leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs effets sur la prévention des dégradations internes des chaudières.

Pour ce faire, ce mémoire est structuré autour des parties suivantes :

Chapitre I : Généralités sur l'eau et l'eau des chaudières

- Définition et caractéristiques de l'eau d'alimentation des chaudières
- Qualité requise de l'eau selon les normes industrielles
- Principales problématiques liées à la qualité de l'eau (entartrage, corrosion, etc.)

Chapitre II : Description des chaudières industrielles

- Types et fonctionnement des chaudières
- Principaux composants et systèmes de régulation

Chapitre III : Traitement de l'eau des chaudières

- Procédés de filtration (filtration sur sable)
- Traitement par osmose inverse : principes et applications industrielles
- Rôle de l'adoucisseur et mécanisme d'échange d'ions
- Analyse des effets d'une mauvaise qualité d'eau sur la performance des chaudières

Enfin, une conclusion viendra récapituler les résultats obtenus et proposer des recommandations pratiques pour l'optimisation du traitement de l'eau dans les installations industrielles.

CHAPITRE I

Généralités sur l'eau et l'eau des chaudières

I-1-introduction

L'eau est un élément essentiel de la vie et joue un rôle fondamental dans divers processus naturels et industriels. Dans le cadre des systèmes thermiques, notamment les chaudières, l'eau est utilisée comme fluide caloporteur pour produire de la vapeur ou pour le chauffage. Cependant, pour assurer un fonctionnement efficace et sûr des chaudières, il est crucial de comprendre ses propriétés physiques et chimiques, ainsi que son cycle naturel et ses différentes formes.

Dans cette section, nous aborderons:

- La définition de l'eau et ses caractéristiques fondamentales.
- Le cycle de l'eau, en distinguant le grand cycle naturel et le petit cycle domestique.
- Les différents états de l'eau (solide, liquide et gazeux) et les transformations qu'elle subit sous l'effet des conditions environnementales.
- L'importance de l'eau dans les activités humaines, qu'il s'agisse de son rôle dans la nature, l'industrie, l'agriculture, ou encore la production d'énergie.

I-2- Définition et caractéristiques de l'eau d'alimentation des chaudières

I-2-1-Définition de l'eau

L'eau est un corps liquide à température et pression ordinaires, incolore, inodore et insipide, dont les molécules sont composées d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène. Elle contient en solution ou en suspension diverses substances telles que des sels, des gaz et des micro-organismes, et est largement répandue à la surface terrestre sous différentes formes : eau de pluie, eau de mer, eau du robinet, etc. On la retrouve également dans des milieux naturels comme la mer, les rivières et les lacs, où l'on peut se promener au bord de l'eau. De plus, l'eau est présente dans l'organisme sous forme de liquide organique ou de sérosité, et peut également désigner un bouillon de caisson [1]

1-2-2- Définition de l'eau d'alimentation de chaudière

L'eau d'alimentation d'une chaudière est une eau spécialement traitée pour répondre aux exigences thermodynamiques des systèmes de production de vapeur. Elle est utilisée pour générer de la vapeur ou de l'eau chaude à haute pression dans des installations industrielles et énergétiques. Cette eau doit être pure, stable chimiquement et thermiquement pour éviter la corrosion, les dépôts et l'entartrage dans les composants internes de la chaudière. [2]

1-2-3- Les principales caractéristiques requises

1-2-3-1- Faible dureté (Hardness)

La présence de sels de calcium et de magnésium dans l'eau provoque la formation de tartre (entartrage). Il est donc crucial de réduire la dureté totale en dessous de 0,1 °F dans les applications haute pression. [3]

1-2-3-2- Faible teneur en oxygène dissous (O₂)

L'oxygène est un agent corrosif majeur. Une désoxygénation mécanique (dégazeur thermique) ou chimique (hydrazine, sulfite) est nécessaire pour prévenir la corrosion.

1-2-3-3- Alcalinité contrôlée (pH)

Le pH de l'eau doit être compris entre 8,5 et 10,5 pour protéger les surfaces métalliques et éviter la corrosion acide ou basique.

1-2-3-4- Faible conductivité

Une faible conductivité indique une faible concentration en sels dissous (TDS). Cela limite le risque de dépôts et améliore la qualité de la vapeur.

1-2-4- Exigences additionnelles selon la pression

Tableau I.1 : Exigences additionnelles selon la pression de la chaudière (pH, O₂, dureté totale)

Pression de la chaudière	pH recommandé	O ₂ max (ppb)	Dureté totale
Basse pression (<20 bars)	8,5 – 9,2	< 100	< 0,3 °F
Haute pression (>60 bars)	9,0 – 10,5	< 20	< 0,1 °F

I-3- Qualité de l'eau des chaudières

I-3-1- Sources de l'eau des chaudières

La méthode spécifique de traitement chimique utilisée varie en fonction du type de chaudière et des propriétés spécifiques de l'eau à partir de laquelle l'eau d'appoint est dérivée. Cela dépend fortement du site, mais nous avons la capacité de tester pour couvrir tous vos besoins. [4]

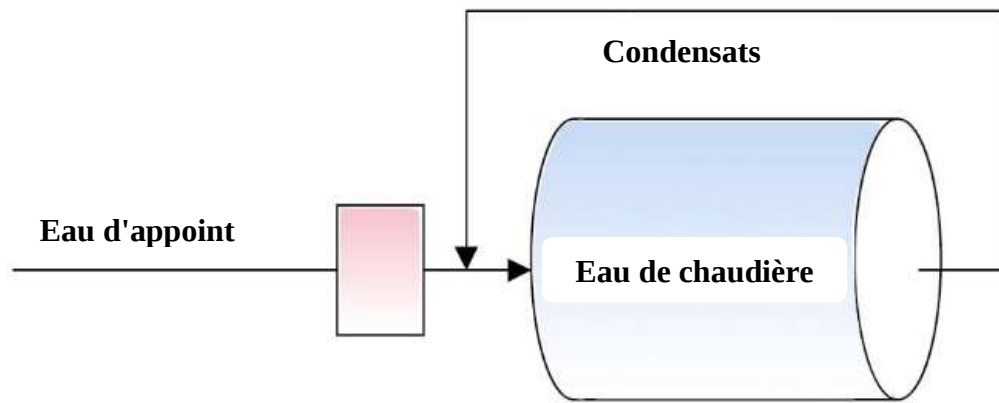


Figure I.1 : Sources de l'eau des chaudières

Une chaudière nécessite des tests sur trois types d'eau différents, comme indiqué ci-dessous :

I-3-1-1- Eau d'appoint [3]

Toutes les eaux d'appoint ne sont pas égales en qualité. L'eau d'appoint des chaudières provient de sources diverses. Certaines proviennent de forages industriels et d'usines de traitement, tandis que d'autres proviennent directement des réseaux municipaux. Cependant, toutes les eaux d'appoint doivent être analysées afin de déterminer correctement les doses de produits chimiques de traitement.

La qualité de l'eau peut changer lorsqu'elle traverse un système de distribution ou de répartition. Il est donc essentiel de vérifier divers paramètres à l'endroit où elle est utilisée, c'est-à-dire lorsqu'elle entre dans la chaudière ou le système de prétraitement.

L'eau d'appoint d'une chaudière est généralement une combinaison de condensats retournés et d'eau de remplacement prétraitée provenant d'un adoucisseur, d'un système d'osmose inverse ou d'un autre système de purification.

Les tests typiques utilisés pour l'eau d'appoint des chaudières incluent :

- Chlorure ou salinité
- Conductivité
- Oxygène dissous
- Dureté
- Fer et manganèse
- pH
- Silice
- Sulfite
- Solides en suspension
- Solides dissous totaux

- Turbidité

Toutes les sources d'eau n'exigeront pas tous ces tests, et si la qualité de l'eau est constante, les tests ne devront pas être répétés fréquemment.

I-3-1-2- Eau de chaudière

L'eau de la chaudière doit être correctement dosée pour que la chaudière fonctionne efficacement et en toute sécurité. Un déséquilibre chimique peut entraîner de la corrosion et endommager le système, pouvant conduire à des défaillances graves de la chaudière et à des risques de blessures.

Les analyses de l'eau de chaudière visent essentiellement à maintenir les paramètres dans les limites établies. [3]

- **Alcalinité**

L'alcalinité est une mesure standard qui peut être déterminée et exprimée de trois manières, identifiant essentiellement les composants hydroxydes, carbonates et alcalins totaux. Nous rapportons l'alcalinité selon la norme britannique BS 1427:1993 comme suit :

- Alcalinité P2 (Hydroxyde)
- Alcalinité P1 (Phénolphthaléine)
- Alcalinité totale

- **pH**

Le pH doit être maintenu dans un état alcalin afin de réduire la corrosion due à l'acidité.

- **Solides dissous totaux (TDS)**

Les solides dissous totaux sont contrôlés par purge (blowdown). Si la concentration en TDS est trop élevée, la chaudière devient inefficace et coûteuse à exploiter.

- **Sulfite**

Le sulfite est ajouté pour éliminer l'oxygène de l'eau de la chaudière. Même à faibles concentrations, l'oxygène peut être extrêmement corrosif dans une chaudière fonctionnant à haute pression/température.

Nous pouvons rapporter le sulfite de trois manières :

- Sulfite
- Métabisulfite
- Sulfite sous forme de Na_2SO_3

- **Silice**

La silice provoque des dépôts de tartre très durs et difficiles à éliminer. Nous utilisons les techniques ICP-OES pour analyser ce paramètre.

- **Phosphate**

Les additifs tels que le phosphate doivent être surveillés régulièrement pour garantir des niveaux adéquats. Bien que des kits de colorimétrie simples soient disponibles, nous utilisons des techniques instrumentales accréditées IANZ pour assurer une précision maximale.

- **Nitrate**

Les nitrates apparaissent dans l'eau d'appoint des chaudières en raison de l'oxydation des ions ammonium résultant de la contamination bactérienne et organique des canalisations. Nous utilisons des techniques accréditées IANZ pour assurer la précision.

- **Fer**

Des niveaux élevés de fer peuvent indiquer une corrosion au sein de la chaudière, ce qui en fait un paramètre clé à surveiller.

I-3-1-3- Condensats [4]

Un bon condensat est la meilleure qualité d'eau disponible et la moins coûteuse pour la plupart des systèmes. Il est donc essentiel de ne pas le perdre ou de le contaminer inutilement.

Les analyses des condensats de vapeur doivent inclure :

- Ammoniac
- Conductivité
- Cuivre
- Fer
- pH
- Silice
- Sodium
- Autres métaux corrosifs comme le chrome, le plomb, etc.

L'analyse des condensats peut révéler plusieurs problèmes potentiels. Des niveaux élevés de fer et de cuivre indiquent de la corrosion, et leur concentration permet d'estimer son taux. Si plus de quelques parties par milliard de métaux sont trouvées dans un échantillon, cela peut indiquer que la corrosion se produit dans la chaudière.

L'ammoniac, en particulier en présence d'oxygène, peut entraîner une corrosion extrême du cuivre.

I-3-2- Directives de traitement de l'eau des chaudières

- **Limites de l'eau des chaudières :**

Les limites suivantes sont spécifiées pour les chaudières à haute pression par différentes organisations :

I-3-2-1-Directives ASME pour la qualité de l'eau dans les chaudières à tubes d'eau industrielles modernes pour un fonctionnement continu fiable :

Tableau I.2 : Directives ASME pour la qualité de l'eau dans les chaudières à tubes d'eau industrielles modernes

Pression du tambour (psi)	Fer (ppm Fe)	Cuivre (ppm Cu)	Dureté totale (ppm CaCO ₃)	Silice (ppm SiO ₂)	Alcalinité totale (ppm CaCO ₃)	Conductivité spécifique (micromhos/cm)
0-300	0.100	0.050	0.300	150	700	7000
301-450	0.050	0.025	0.300	90	600	6000
451-600	0.030	0.020	0.200	40	500	5000
601-750	0.025	0.020	0.200	30	400	4000
751-900	0.020	0.015	0.100	20	300	3000
901-1000	0.020	0.015	0.050	8	200	2000
1001-1500	0.010	0.010	0.000	2	0	150
1501-2000	0.010	0.010	0.000	1	0	100

Concentrations standard de l'eau des chaudières selon l'ABMA pour minimiser le carryover :

Tableau I.3 : Concentrations standards de l'eau des chaudières selon l'ABMA pour minimiser le "carryover"

Pression du tambour (psig)	Silice totale (ppm SiO ₂)	Alcalinité spécifique (ppm CaCO ₃)	Conductivité (micromhos/cm)
0-300	150	700	7000
301-450	90	600	6000
451-600	40	500	5000
601-750	30	400	4000
751-900	20	300	3000
901-1000	8	200	2000

Pression du tambour (psig)	Silice totale (ppm SiO ₂)	Alcalinité spécifique (ppm CaCO ₃)	Conductivité (micromhos/cm)
1001-1500	2	0	150
1501-2000	1	0	100

Cette valeur limite la teneur en silice de la vapeur à 0,25 ppm en fonction de la sélectivité.

Caractéristiques de l'eau d'alimentation et de l'eau des chaudières selon la norme

IS:10392-1982

I-3-2-2- Eau d'alimentation

Tableau I.4 : Caractéristiques de l'eau d'alimentation selon la norme IS:10392-1982

Paramètres	Jusqu'à 20 Kg/cm ²	21 Kg/cm ² à 39 Kg/cm ²	40 Kg/cm ² à 59 Kg/cm ²	Unité
Dureté totale	<10	<1.0	<0.5	ppm CaCO ₃
Valeur du pH	8.5-9.5	8.5-9.5	8.5-9.5	--
Oxygène dissous	0.1	0.02	0.01	ppm
Silice	5	0.5	--	ppm SiO ₂

I-3-2-3- Eau de chaudière

Tableau I.5 : Caractéristiques de l'eau de chaudière selon la norme IS:10392-1982

Paramètres	Jusqu'à 20 Kg/cm ²	21 Kg/cm ² à 39 Kg/cm ²	40 Kg/cm ² à 59 Kg/cm ²	Unité
Dureté totale	Indétectable	Indétectable	Indétectable	--
Alcalinité totale	700	500	300	ppm CaCO ₃
Alcalinité caustique	350	200	60	ppm CaCO ₃
Valeur du pH	11.0-12.0	11-12	10.5-11.0	--
Sulfite de sodium résiduel	30-50	20-30	--	ppm Na ₂ SO ₃
Hydrazine résiduelle	0.1-1.0	0.1-0.5	0.05-0.3	ppm N ₂ H ₄
Rapport	>2.5	>2.5	>2.5	--

Paramètres	Jusqu'à 20 Kg/cm ²	21 Kg/cm ² à 39 Kg/cm ²	40 Kg/cm ² à 59 Kg/cm ²	Unité
Na₂SO₄/Alcalinité caustique				
Phosphate	20-40	15-30	5-20	ppm PO ₄
Solides dissous totaux	3500	2500	1500	ppm
Silice	<0.4 de l'alcalinité caustique	<0.4 de l'alcalinité caustique	15	ppm SiO ₂

Sources : Normes IS, ABMA, ASME.

I-3-3-Traitement externe et interne de l'eau

Un traitement approprié de l'eau d'appoint et/ou de l'eau d'alimentation est nécessaire pour prévenir la corrosion, l'entartrage et d'autres dépôts dans les systèmes de pré-chaudière, de chaudière, de vapeur et de condensat, et pour assurer la pureté requise de la vapeur. L'absence de traitement externe et interne adéquat peut entraîner des perturbations opérationnelles ou des arrêts imprévus. Un traitement inadéquat peut également être déconseillé du point de vue de la sécurité, de l'économie et de la fiabilité.

La réduction ou l'élimination des constituants indésirables par prétraitement externe à la chaudière est toujours préférable et plus fiable que la gestion de ces constituants à l'intérieur de la chaudière par traitement chimique interne. [5]

I-3-3-1-Corrosion par l'oxygène

L'oxygène en présence d'eau plus froide que 212°F peut provoquer une activité destructrice grave appelée **corrosion par l'oxygène**. La quantité d'oxygène absorbée dans l'eau est proportionnelle à la température et à la pression. Voir les exemples ci-dessous :

- Eau à 70°F et 0 psig contient environ 8,6 ppm
- Eau à 150°F et 0 psig contient environ 4,3 ppm
- Eau à 212°F et 0 psig contient environ 0,0 ppm

L'oxygène dissous peut être éliminé dans un système de chaudière en utilisant un réservoir de désaération, une eau d'alimentation chauffée, ou en traitant l'eau d'alimentation dans le réservoir de condensat. L'ajout d'un capteur d'oxygène dans le système d'eau d'alimentation contribuera également à éliminer tout oxygène dissous.

Lors d'une inspection interne, l'inspecteur doit rechercher des projections croustillantes et **rouillées** (tubercules) dispersées dans la chaudière et les tuyaux. Ces tubercules sont des sous-produits de la corrosion et la recouvrent généralement. La taille du tubercule ne reflète pas

nécessairement la profondeur des dommages ; un petit tubercule peut cacher un trou profond, et un grand tubercule peut couvrir une cavité superficielle. Si les tubercules ne sont pas enlevés, la corrosion par l'oxygène se poursuivra jusqu'à perforation de la paroi du récipient.

La corrosion par l'oxygène est souvent trouvée dans les chaudières stockées à l'humide et les réservoirs d'eau d'alimentation exposés à des températures froides prolongées. [5]

I-3-3-2-Corrosion acide

L'eau brute, provenant des réseaux municipaux ou des puits, contient du dioxyde de carbone (CO_2). Lorsque le condensat refroidit, le CO_2 dissous forme de l'acide carbonique, qui abaisse le pH de 6,9 à 4,4.

Cette condition acide se produit dans les tuyaux de condensat vapeur. Si les tuyaux sont en acier au carbone, ils risquent d'être endommagés par corrosion généralisée, piqûres localisées ou fissuration sous contrainte.

Les températures élevées accélèrent la réaction. Sans correction, des piqûres profondes peuvent se former, entraînant des fuites potentielles.

L'eau rouillée dans la jauge de niveau de la chaudière est une preuve claire de corrosion acide dans le système d'alimentation ou de condensat de la chaudière.

L'eau d'appoint est la principale source de CO_2 . Réduire son utilisation diminue la quantité de dioxyde de carbone dans le système.

Le prétraitement externe de l'eau avant qu'elle n'entre dans la chaudière permet d'éliminer les alcalins, réduisant ainsi la formation de CO_2 .

Un traitement chimique interne peut être utilisé pour neutraliser les acides restants. [5]

I-3-3-3-Dépôts de tartre

Toutes les eaux brutes contiennent des sels dissous. Une eau avec un niveau élevé de sels dissous est appelée eau dure, contenant principalement des silicates de calcium et des composés de magnésium. Sous l'effet de la chaleur, ces sels précipitent et forment du tartre.

Le tartre agit comme un isolant thermique, réduisant l'efficacité du transfert de chaleur, ce qui peut entraîner une surchauffe et des défaillances.

Le tartre peut être difficile ou mou :

- **Tartre dur** : se forme sur les tubes des chaudières à tubes de fumée et sur la surface interne des chaudières à tubes d'eau.
- **Tartre mou** : apparaît sous forme de boues épaisses noires ou brunes, affectant les chaudières à eau chaude.

Le tartre peut être éliminé mécaniquement ou chimiquement selon les recommandations du

fabricant. [5]

I-3-3-4-Solides

Les solides causent divers problèmes dans le système de chaudière. Le prétraitement externe inclut la filtration, l'adoucissement et la désalcalinisation.

Deux éléments doivent être contrôlés :

- Le pH de l'eau de la chaudière doit être maintenu à 11.
- Un conditionneur de boues peut être ajouté pour précipiter les solides, qui sont ensuite évacués par purge.

Les solides dissous (TDS) sont mesurés en micro-Siemens/cm ($\mu\text{S/cm}$). Voici quelques exemples de TDS :

- Eau de lac : ~180 ppm
- Eau de puits : jusqu'à 1 250 ppm

Les solides en suspension (TSS) sont des particules solides flottant dans l'eau de la chaudière. [5]

I-3-3-5- Purge et vidange

- La purge vise à contrôler la concentration des solides dissous et en suspension.
- Une eau d'alimentation dure contenant 200 ppm de solides dissous peut être concentrée 5 fois dans la chaudière.
- Une eau douce contenant 25 ppm de solides dissous peut être concentrée 40 fois.
- Minimiser la purge est essentiel, car elle entraîne la perte d'eau de chaudière et de produits chimiques de traitement. . [5]

I-3-Conclusion

L'eau est un élément fondamental pour la vie et joue un rôle essentiel dans de nombreux domaines, allant de l'environnement naturel aux processus industriels. Son cycle perpétuel garantit un renouvellement constant, permettant la préservation des ressources hydriques.

Dans le contexte des chaudières, la qualité de l'eau est un facteur déterminant pour assurer un fonctionnement efficace et sécurisé. Une eau mal traitée peut entraîner des problèmes majeurs tels que l'entartrage, la corrosion et la contamination des systèmes, compromettant ainsi la durabilité et la performance des installations.

Ainsi, la maîtrise des paramètres physico-chimiques de l'eau, associée à des traitements adaptés, permet de prévenir les risques et d'optimiser l'utilisation de cette ressource précieuse. La gestion durable de l'eau reste un enjeu majeur, tant pour la préservation de l'environnement que pour le bon fonctionnement des infrastructures industrielles et domestiques.

Chapitre II

Description des chaudières

II.1. Introduction

Dans le domaine industriel, la vapeur est largement employée comme source d'énergie essentielle à la conduite de nombreux procédés variés. Elle constitue un fluide caloporteur abondant, facile à acheminer et dépourvu de toxicité. Sa production nécessite toutefois la mise en œuvre d'une chaudière ainsi que la combustion d'un combustible adapté..[6]

II.2. Définition des chaudières

- Une chaudière est un dispositif conçu pour transmettre de façon continue de l'énergie thermique à un fluide caloporteur, généralement l'eau.
- Elle a pour fonction de convertir l'eau liquide en vapeur, en fonction des conditions de température et de pression exigées par les besoins du processus, grâce à l'apport de chaleur produit le plus souvent par la combustion d'un combustible dans son foyer, ou parfois par des gaz chauds provenant d'autres procédés industriels.
- La finalité essentielle des chaudières est de générer de la vapeur en utilisant l'énergie thermique de manière optimale, ce qui les rend incontournables au sein des installations industrielles pour garantir le fonctionnement efficace et sûr des unités de production.
- Elles remplissent plusieurs missions :
 - D'apporter l'énergie nécessaire (vapeur de réchauffage, entraînement de turbine) ;
 - D'intervenir dans les procédés (réaction chimique, vapeur de dilution, de stripping) ;
 - De constituer un élément de sécurité (vapeur d'étouffement).

II.4. Types de chaudières

- On peut répartir les chaudières industrielles en deux grandes familles :
- **Les chaudières classiques**, où la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau provient de la combustion de combustibles liquides ou gazeux. Selon que l'eau ou les gaz de combustion circulent à l'intérieur des tubes, on distingue les chaudières à tubes d'eau et celles à tubes de fumées.
- **Les chaudières de récupération**, qui valorisent la chaleur résiduelle présente dans des fluides de procédé à haute température ou dans les fumées issues de fours ou de turbines à gaz. Leur conception peut s'apparenter à celle des chaudières classiques, intégrer seulement certains de leurs éléments, ou bien reposer sur une technologie spécifique, adaptée aux conditions et à la nature des fluides récupérés.
- À noter que les chaudières à tubes d'eau contribuent à environ 82 % de la production globale de vapeur, avec une capacité moyenne d'environ 35 tonnes par heure pour chaque unité. Le choix du type de chaudière dépend notamment des limites de pression,

des besoins de production horaire et du type de fluide chauffé, qu'il s'agisse d'eau chaude, de vapeur saturée ou surchauffée. [7]

II.4.1. Les chaudières à tubes d'eau

Les parois d'une chaudière à tubes d'eau sont formées de panneaux constitués de tubes équipés d'ailettes longitudinales disposées en sens opposé. Cette disposition facilite leur soudage mutuel, assurant ainsi l'étanchéité de l'ensemble.

Ces parois définissent l'espace intérieur où circulent les gaz de combustion le long des surfaces d'échange thermique. Les figures suivantes présentent à la fois une vue frontale et une coupe horizontale illustrant cette configuration.

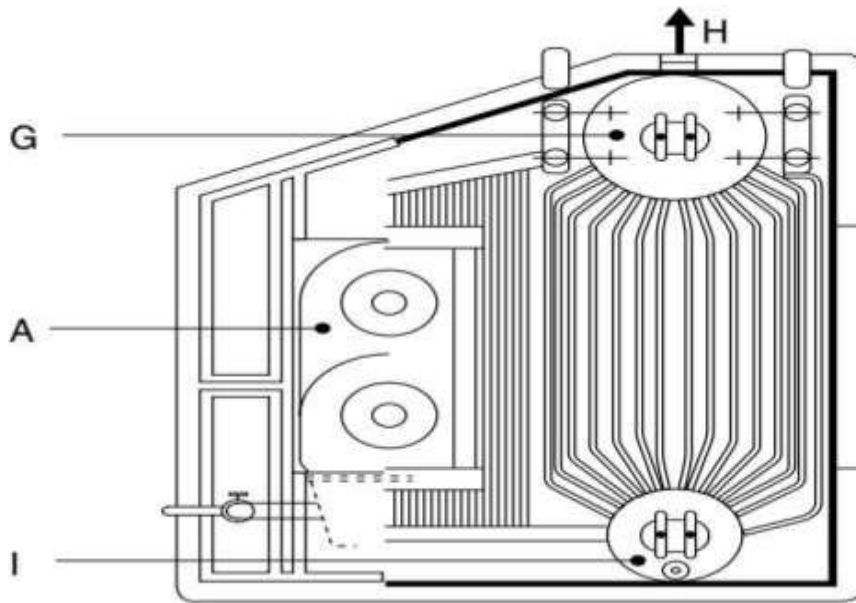


Figure II.1 : Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur.

Dans une chaudière à tubes d'eau dépourvue de surchauffeur (voir figure II.2), on peut identifier plusieurs éléments : la chambre de combustion (B), où se forment les flammes générées par les brûleurs (A). Les tubes accolés, constituant les parois de cette chambre, sont exposés au rayonnement thermique des flammes. À l'extrémité de la chambre de combustion, certains tubes sont cintrés et agencés de manière alternée, ce qui permet aux gaz de combustion d'accéder à la zone de convection. [8]

Le circuit de convection destiné au transfert de chaleur comprend deux passages réservés à la circulation des fumées

Dans le premier passage (C), on trouve éventuellement les surchauffeurs E et F. Le second passage (D) permet de récupérer la chaleur résiduelle des fumées.

- Les tubes qui constituent les parois de la chaudière, ainsi que les zones d'échange C et D, débouchent tous deux sur deux ballons. Le ballon supérieur G réalise la séparation des deux phases liquides et vapeur.
- La vapeur saturée sort par H avant d'alimenter les surchauffeurs.
- Le ballon inférieur (I) alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur (J).

Afin d'optimiser le rendement énergétique, des économiseurs, généralement constitués de faisceaux tubulaires, peuvent être installés à la sortie des fumées pour préchauffer l'eau d'alimentation des chaudières. Une fois préchauffée dans l'économiseur, l'eau est acheminée par la pompe d'alimentation vers le ballon supérieur.

Dans les chaudières industrielles fonctionnant à une pression inférieure à 190 bars, la circulation de l'eau dans la zone de vaporisation se fait en général de manière naturelle. Au-delà de cette pression, une pompe est nécessaire pour imposer le débit de circulation.

Dans un circuit à circulation naturelle, le ballon supérieur sert de point de départ : l'eau liquide y est dirigée vers le ballon inférieur par des canalisations non chauffées (colonnes extérieures) ou par les parties les moins exposées à la chaleur (tubes de descente situés à l'extrémité du parcours des fumées). Depuis le ballon inférieur, l'eau est distribuée dans différents faisceaux de vaporisation, ce qui lui permet de remonter progressivement vers le ballon supérieur.

Sous l'effet de la chaleur, une partie de l'eau se transforme en vapeur au sein des faisceaux, générant une émulsion eau-vapeur dont la teneur en vapeur augmente au fur et à mesure de l'absorption thermique. La différence de densité entre l'eau liquide et cette émulsion crée une force motrice le long de la hauteur de la chaudière, assurant la circulation naturelle du fluide. Cette force motrice est néanmoins partiellement consommée par les pertes de charge liées à l'écoulement de l'eau. [9]

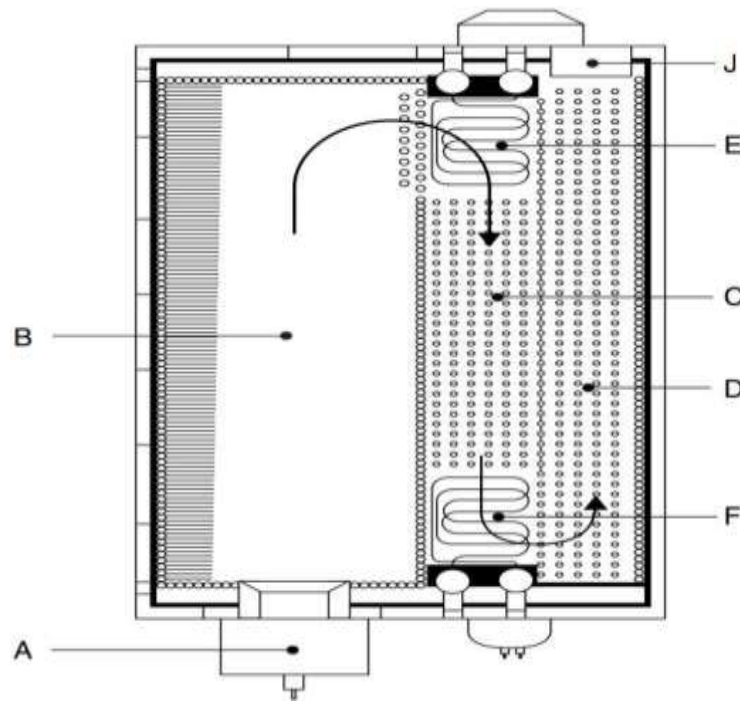


Figure II.2 : Chaudière à tubes d'eau sans surchauffeur.

II.4.2. Les chaudières à tubes de fumées

Les chaudières à tubes de fumées sont, dans la majorité des cas, de petite capacité, avec une production de vapeur généralement inférieure à 25 tonnes par heure et fonctionnant à une pression qui ne dépasse pas une vingtaine de bars.

La figure II.3 ci-dessous illustre un exemple de chaudière à tubes de fumées, où l'on peut identifier plusieurs composants distincts.[10]

- Le brûleur avec son ventilateur d'air,
- Le tube-foyer en tôle d'acier ondulée dans lequel se développe la flamme,
- La boîte arrière de fumée permettant de distribuer celle-ci dans le faisceau tubulaire,
- Une boîte de fumée avant (côté brûleur) permet aux fumées de traverser en deux passes le faisceau avant leur rejet à une cheminée.
- La sortie de la vapeur saturée est équipée d'un déflecteur situé au-dessus du plan d'eau pour limiter l'entraînement des gouttelettes de liquide.

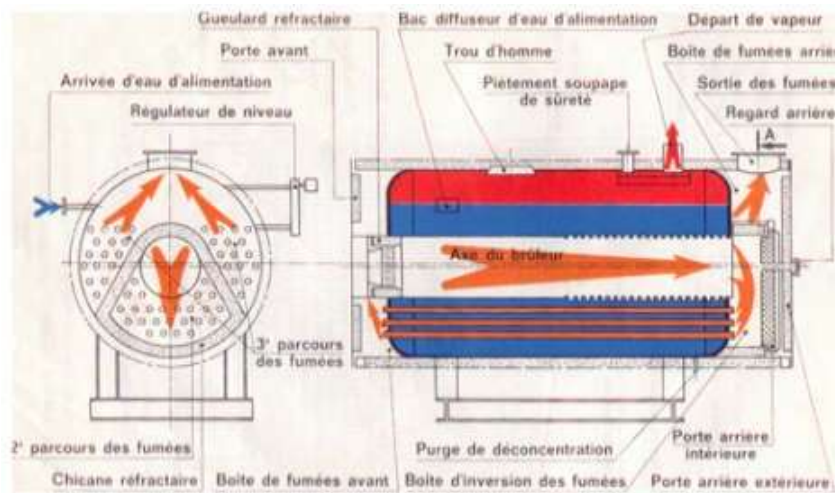


Figure II.3 : Schéma d'une chaudière à tubes de fumées.

II.5. Principaux éléments d'une chaudière

D'un point de vue très schématique, une chaudière à combustible peut se ramener à :

II.5.1. Chambre de combustion (Foyer)

- Il s'agit de l'espace où s'effectue la combustion, pouvant utiliser des combustibles solides, liquides ou gazeux. Cette chambre est revêtue de tubes à eau constituant les surfaces de chauffe exposées au rayonnement des flammes.
- Les brûleurs, quant à eux, sont intégrés dans les parois, entre des tubes courbés, et peuvent être positionnés soit au centre des panneaux (chauffage frontal), soit dans les angles (chauffage tangentiel) afin de créer une forte turbulence des flammes au cœur de la chambre de combustion.
- L'air nécessaire à la combustion est acheminé par un ventilateur et réparti vers les brûleurs grâce à un vaste caisson conçu pour garantir une distribution homogène.

II.5.2. Brûleurs

Le brûleur constitue l'organe mécanique chargé de produire la chaleur, en assurant le mélange précis d'un combustible avec l'air (comburant) nécessaire à la combustion. Il joue un rôle essentiel dans la qualité de la combustion et influence directement la quantité de polluants ou de résidus imbrûlés présents dans les fumées.

De manière générale, le brûleur remplit deux fonctions principales :

- Garantir un mélange adéquat entre le carburant et le comburant, en respectant les proportions définies, que ce soit selon un ratio air-gaz précis ou avec un léger excès d'air
- Assurer la combustion efficace de ce mélange, en veillant à l'allumage, à la stabilité de la flamme et à une combustion complète.

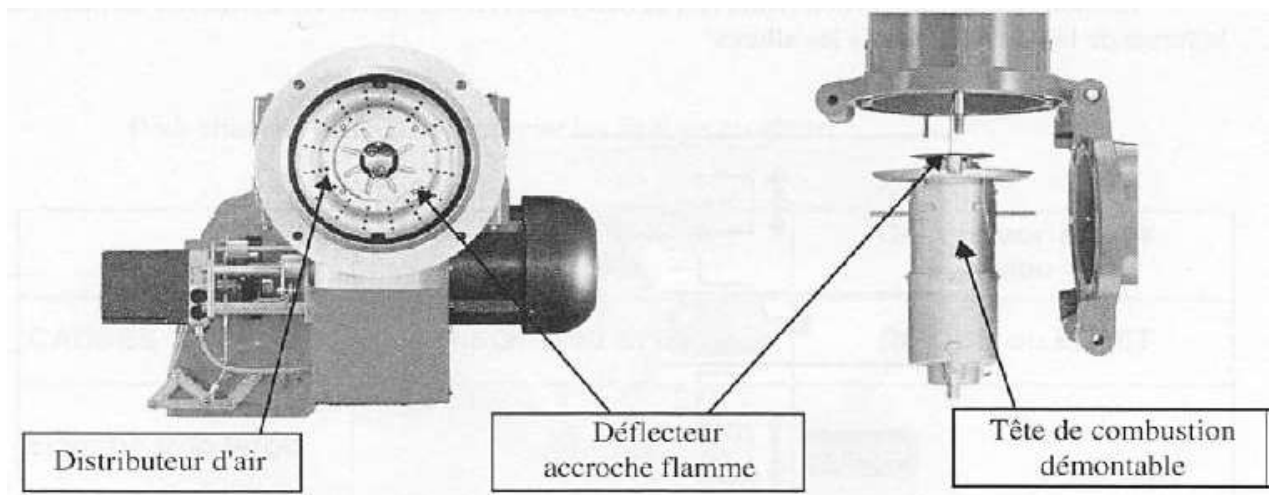


Figure II.4 : Le brûleur.

II.5.3. Faisceau de convection

Ce faisceau est composé de tubes verticaux non revêtus, reliés à leurs extrémités aux ballons inférieur et supérieur. Des chicanes disposées à l'intérieur du faisceau ont pour rôle d'empêcher les fumées de suivre des trajets préférentiels.

Selon la pression d'exploitation, la part du faisceau vaporisateur dans la surface totale d'échange dédiée à la vaporisation de l'eau varie. En effet, plus la pression est élevée, plus la chaleur latente de vaporisation de l'eau diminue, réduisant ainsi la surface d'échange nécessaire. Au-delà de 80 à 100 bars, la seule surface des parois de la chambre de combustion suffit généralement à assurer la vaporisation, comme c'est le cas dans les chaudières radiantes.

Le circuit de circulation des fumées comprend deux sections :

- **Le ballon supérieur**, qui assure la séparation des phases liquide et vapeur. La vapeur saturée s'en échappe par la sortie (H) pour alimenter ensuite les surchauffeurs.
- **Le ballon inférieur**, qui distribue l'eau liquide vers l'ensemble des tubes où celle-ci, sous l'effet de la chaleur, se vaporise partiellement avant de revenir vers le ballon supérieur.

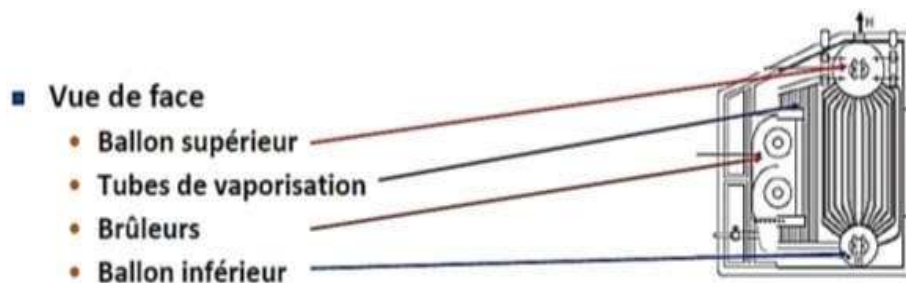


Figure II.5 : Les ballons, supérieur et inférieur.

II.5.4. Economiseur

L'économiseur récupère la chaleur excédentaire contenue dans les gaz d'échappement de la chaudière, une énergie que la chaudière ne peut plus absorber directement. Il se compose le plus souvent de tubes à ailettes ou de tubes lisses. On le trouve généralement installé sur le trajet des fumées, entre le dernier surchauffeur ou resurchauffeur et le réchauffeur d'air. [10]

II.5.5. Vaporisateurs

Les vaporisateurs interviennent dans la phase finale du chauffage de l'eau et assurent sa transformation en vapeur. Ils sont généralement constitués des écrans soudés intégrés à la chaudière, bien que des faisceaux supplémentaires puissent parfois être nécessaires.

L'eau circule naturellement à travers ces tubes, en parallèle avec la génération de vapeur. Ce mouvement s'explique par la différence de densité entre l'eau liquide dans les tubes de descente et le mélange eau-vapeur, plus léger, qui s'élève dans les colonnes montantes.

II.5.6. Surchauffeurs

Le surchauffeur est constitué d'étages primaires et secondaires. Le surchauffeur secondaire est constituée de tronçons verticaux et horizontaux. Le tronçon vertical est situé en face de l'écran tubulaire du four alors que le tronçon horizontal dont l'écoulement de vapeur est parallèle à celui du gaz de carneau est situé en aval de la cavité de passe de retour derrière l'écran tubulaire.. [11]

Le surchauffeur primaire est situé en aval du surchauffeur secondaire : la direction d'écoulement de vapeur s'oppose à celui de gaz de carneau.

Les surchauffeurs primaire et secondaire sont reliées par une tuyauterie équipée d'un désurchauffeur à arrosage d'eau de condensation.

L'eau de désurchauffe est fournie à travers le condenseur du désurchauffeur dans lequel se condense la vapeur saturée provenant du ballon de vapeur.

La conception du surchauffeur tient compte d'une perte de charge de vapeur minimisant la grandeur de déséquilibre de température de vapeur, la température de calcul étant déterminée en tenant compte de la variation de débit /température de gaz.

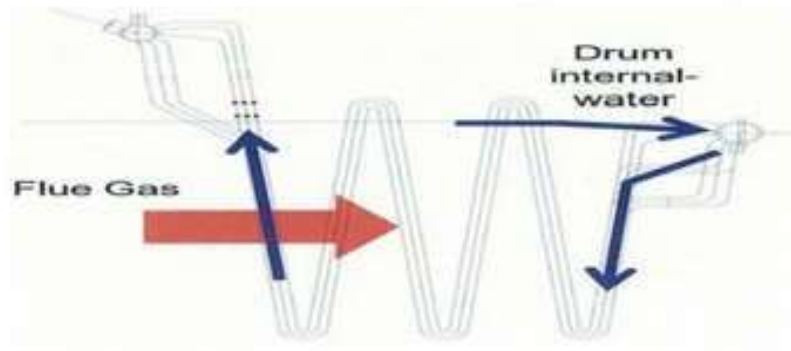


Figure II.6 : Schéma des surchauffeurs.

II.5.7. Resurchauffeurs

Ils ont un rôle identique à celui des surchauffeurs, à savoir élever la température de la vapeur resurchauffée provenant de la turbine.

II.5.8. Désurchauffeurs

Ils sont destinés à refroidir et à moduler la température de la vapeur surchauffée ou resurchauffée, ils sont rarement tubulaires mais généralement assimilables à des échangeurs par mélange puisqu'ils procèdent par injection d'eau dans la vapeur.

II.5.9. Evaporateur

L'évaporateur a pour fonction de chauffer l'eau contenue à l'intérieur du ballon. Il fonctionne selon un principe de circulation naturelle et se situe en aval du surchauffeur primaire, dans la zone de passage de retour.

Pour garantir une circulation stable et efficace de l'eau, quel que soit le régime de production de vapeur, le système intègre des tuyaux de descente non chauffés, des tubes inclinés en boucles ainsi que des conduites montantes.[12]

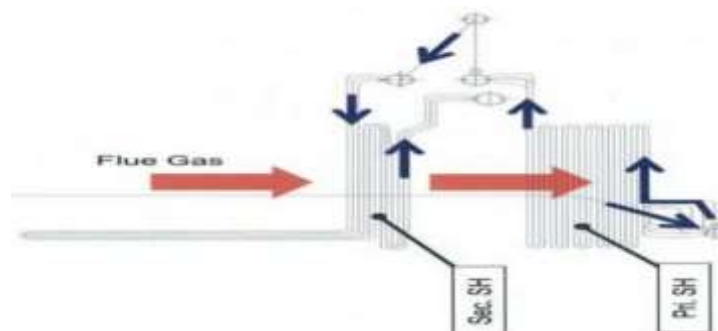


Figure II.7 : Schéma d'un évaporateur.

II.5.10. Ventilateur de soufflage

La chaudière fonctionne sous pression positive, alimentée en air de combustion par un ventilateur à tirage forcé. Ce ventilateur assure également l'alimentation de la soufflante, qui fournit l'air nécessaire à l'allumage. L'ensemble est entraîné par un moteur électrique, lequel peut être alimenté par une source électrique de secours.

Le débit d'air introduit dans le ventilateur est contrôlé de manière à maintenir un ratio optimal entre l'air et le combustible au niveau du brûleur. Si l'excès d'air est inférieur à 10 % pour les combustibles gazeux ou à 15 % pour l'essence, la combustion risque d'être incomplète. Des hydrocarbures non brûlés peuvent alors s'enflammer dans la cheminée ou provoquer une explosion, ce qui pourrait causer d'importants dommages à la chaudière.

II.5.11. Ballons de purge

La chaudière est équipée :

- D'un ballon de purge continue (CBD) : l'eau de chaudière est extraite en continue à partir du ballon. Supérieur selon un débit de 2% par rapport au débit d'appoint d'eau de la chaudière. Cette extraction a pour but de maintenir la conductivité de l'eau à l'intérieur de la chaudière entre 200 à 500 ppm. Le débit d'extraction est ajusté en fonction des résultats d'analyses pour maintenir la conductivité dans cette fourchette.
- D'un ballon de purge intermittente : une à deux fois par semaine une extraction d'eau de chaudière doit être effectuée à partir du ballon inférieur de la chaudière, et ce, pour extraire les boues de sels déposées au fond de ce ballon. Durant cette opération le niveau d'eau dans la chaudière doit être surveillé avec attention. [12]

II.5.12. Appareils de sécurité

- Les principaux facteurs susceptibles de provoquer l'explosion d'une chaudière sont une augmentation excessive de la pression interne et une baisse trop importante du niveau d'eau. Pour prévenir ces dangers, plusieurs dispositifs de sécurité sont mis en place :
- Au moins deux soupapes de sûreté, réglées pour s'ouvrir automatiquement lorsque la pression atteint la limite maximale de la chaudière, ainsi qu'un manomètre indiquant clairement la pression de calcul afin que l'opérateur puisse s'assurer que la pression réelle de fonctionnement reste en dessous de cette valeur.
- Un système de sécurité permettant l'arrêt complet de l'alimentation en combustible. Ce mécanisme se déclenche si le niveau d'eau dans le ballon descend trop bas, afin d'éviter la

déformation ou la rupture des tubes, conséquences d'une élévation brutale de la température.[13]

II.5.13. Autres échangeurs associés à la chaudière

Non directement en liaison avec l'eau ou la vapeur du cycle, ils n'en sont pas moins indispensables au bon fonctionnement de l'installation.

II.5.13.1. Le réchauffeur d'air

C'est un échangeur d'air de combustion /gaz de combustion. . [13] L'avantage technique du réchauffage de l'air réside dans le fait qu'il amoindrit la perte par la cheminée et qu'il élève en outre la valeur de la température des gaz de combustion ou du foyer.

II.5.13.2. Le préchauffeur d'air

Dans le but principal de protéger le réchauffeur d'air et les gaines de fumées placées en aval des risques de corrosion par condensation d'acide, il est nécessaire de préchauffer de quelques dizaines de degrés l'air entrant dans le réchauffeur d'air.¹⁷ Cette fonction est assurée généralement par un échangeur à tubes ailettes où l'air est réchauffé par de la vapeur ou de l'eau.

II.7. Régulation dans les chaudières

Les principaux paramètres à surveiller pendant le fonctionnement d'une chaudière sont la pression et la température de la vapeur dans le collecteur principal et le niveau d'eau dans le réservoir supérieur.¹³

II.7.1. Contrôle de la pression de la vapeur surchauffée

Il est essentiel de maintenir constante la pression de la vapeur surchauffée dans le collecteur principal afin de répondre aux besoins de l'utilisateur tout en garantissant la sécurité de la chaudière.

Un générateur de vapeur constitue un système complexe, influencé par plusieurs variables telles que les débits d'eau, de vapeur, de gaz combustible et d'air, qui agissent directement sur la pression de la vapeur. Pour assurer une régulation stable, le débit de combustible est conçu pour pouvoir être ajusté. Lorsque plusieurs chaudières sont exploitées en parallèle, il devient nécessaire de centraliser le contrôle de la pression de la vapeur à travers un unique régulateur de pression, associé à un répartiteur de charges. Ce dernier ajuste de façon dynamique la répartition des charges entre les différentes chaudières et règle le débit de combustible en fonction des instructions transmises par le régulateur principal à chaque unité.

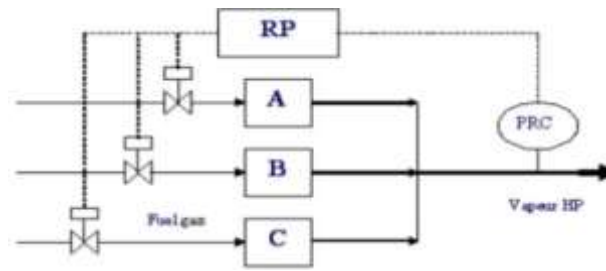


Figure II.8 : Contrôle de la pression de la vapeur surchauffée.

Les méthodes de répartition de la variation de charge sont :

- la variation de charge est répartie équitablement sur toutes les chaudières ;
- la variation de charge est répartie proportionnellement sur toutes les chaudières ;
- une seule chaudière supporte la variation de charge.

Les trois méthodes peuvent être utilisées lorsque les chaudières sont de même type et de même capacité. Les méthodes a et b peuvent être utilisées lorsque les capacités sont différentes.

II.7.2. Contrôle de la température de la vapeur surchauffée

La température de la vapeur surchauffée dans le collecteur principal est maintenue constante par injection d'une faible quantité d'eau traitée dans le désurchauffeur. C'est ainsi que la température de la vapeur est maintenue à une valeur légèrement inférieure à celle admise dans la turbine (résistance thermique des matériaux).

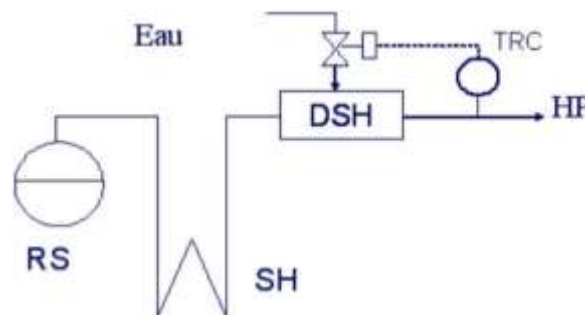


Figure II.9 : Contrôle de la température de la vapeur surchauffée.

II.7.3. Contrôle du niveau d'eau dans le ballon supérieur

La figure II.14, représente un schéma simplifié de la régulation du niveau d'eau dans le réservoir supérieur de la chaudière. [13]

II.7.3.1. Niveau haut

Bien qu'un séparateur soit installé dans le réservoir, la séparation de la vapeur et du liquide devient incomplète si le niveau d'eau est trop haut. La présence d'eau dans la vapeur à la sortie du ballon entraîne des sels dissous et provoque le phénomène de primage dans les

conséquences sont fort préjudiciables sur les ailettes de la turbines (érosion).

II.7.3.2. Niveau bas

Si le niveau est bas, il y a risque de crevaisson des tubes sous l'effet de la chaleur.

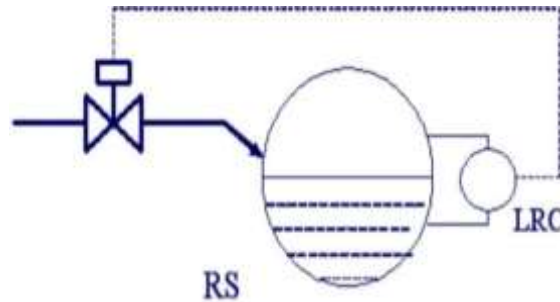


Figure II.10 : Contrôle du niveau d'eau dans le ballon supérieur.

II.8. Sécurité des chaudières

II.8.1. Importance de la sécurité

La sécurité d'une chaudière vise avant tout à éliminer les risques potentiels et à limiter au maximum les dangers, afin de préserver l'intégrité des équipements et d'éviter tout dommage humain.

Elle repose sur divers dispositifs capables de déclencher des alarmes ou d'intervenir directement sur le fonctionnement du foyer ou de la chaudière.

Les principales fonctions de sécurité d'un four ou d'une chaudière comprennent notamment :

- l'arrêt des brûleurs en cas de chute de la pression du combustible ;
- la surveillance de la flamme grâce à des pilotes ou des cellules de détection ;
- la limitation des surpressions par des soupapes de sécurité et des portes d'explosion ;
- le verrouillage qui conditionne l'alimentation en air de combustion et en combustible ;
- l'ouverture automatique des registres en cas de défaillance de la commande ;
- l'injection de vapeur d'étouffement ;
- l'alimentation en vapeur de protection au sein des tubes ;
- la purge de la vapeur dans les cannes, commandée par un système de verrouillage.

II.8.2. Sécurité des brûleurs

L'analyse des dispositifs de sécurité révèle que le principal risque se situe au niveau des brûleurs.

C'est pourquoi une attention particulière doit être portée aux équipements de chauffe. En effet, dans les systèmes de chauffage, qu'ils soient automatiques, semi-automatiques ou manuels, de fortes variations de débit rendent indispensable la mise en place de dispositifs de sécurité contre les risques d'extinction. Ce n'est pas tant l'extinction du brûleur elle-même qui est problématique, mais plutôt ses conséquences.

Si un brûleur s'éteint alors que l'alimentation en combustible se poursuit, un mélange inflammable peut s'accumuler dans la chambre des fumées. Ce mélange risque de s'enflammer au contact d'une source chaude — comme un dépôt de suie incandescent, une torche d'allumage ou un brûleur de soutien encore en fonctionnement. Une telle inflammation soudaine provoque une surpression brutale, susceptible d'occasionner des dégâts matériels considérables.

II.8.3. Comportement sécuritaire du personnel

L'amélioration de la sécurité des personnes ainsi que celle des installations industrielles passe nécessairement par la formation, qui vise à modifier les comportements individuels et collectifs en matière de sécurité. Cette démarche permet de mieux prévenir les accidents en agissant de manière proactive. [14]

Dans ce cadre, un responsable du Service Hygiène (SH) a annoncé, le 29 octobre 2006, le lancement d'un vaste programme de formation intitulé « Safe Behaviour Programme » (SBP).

Conçu par le partenaire norvégien Statoil, actionnaire de l'ancienne société IAP Spa (à hauteur de 10 %), ce programme a été mis en œuvre par cette même société.

La sécurité, qu'elle soit générale ou spécifique au domaine industriel, repose sur l'application de diverses barrières, à la fois mentales et techniques, mises en place par les travailleurs afin de prévenir les accidents liés à des événements imprévus.

Parmi ces barrières mentales figurent :

- la priorité donnée à la sécurité avant toute autre considération ;
- le respect rigoureux des procédures établies ;
- l'instauration d'un dialogue ouvert sur les questions de sécurité ;

- l'évaluation permanente des risques ;
- le refus de l'indifférence face aux situations à risque.

II.8.3.1. Priorité première

Donner la priorité à la sécurité même s'il s'agit d'arrêter le travail.

II.8.3.2. Conformité

Respecter les procédures et les règles existant dans les documents officiels de l'entreprise.

II.8.3.3. Dialogue ouvert

Développer le dialogue et la communication sur les questions relatives à la sécurité avec tous les travailleurs quelle que soit leur position hiérarchique.

II.8.3.4. Evaluation continue des risques

Avant d'entamer un travail, même si l'intervenant a de l'expérience, il faut être toujours attentif pour évaluer les risques d'une façon continue car des imprévus peuvent arriver. [14]

II.8.3.2.Non à l'indifférence

- Veiller les uns sur les autres ;
- Intervenir pour corriger un collègue lorsque celui-ci adopte un comportement dangereux ou ne respecte pas les consignes de sécurité ;
- Anticiper et signaler les situations à risque ;
- Ne jamais ignorer une situation où une personne se trouve exposée à un danger.

Le respect strict de ces cinq principes est essentiel pour tendre vers l'objectif zéro accident. En effet, tout accident est d'abord une défaillance matérielle derrière laquelle se cache presque toujours une erreur humaine, puisque tout équipement nécessite entretien et maintenance. Ainsi, l'origine et la cause des incidents sont fondamentalement liées à des facteurs humains.

Chapitre III

Traitement de l'eau des chaudières

III.1 Introduction

L'eau utilisée pour l'alimentation des chaudières industrielles doit satisfaire à des normes de qualité particulièrement rigoureuses afin de protéger les installations contre les risques d'entartrage, de corrosion ou de défaillances thermiques. Dans ce contexte, un traitement préalable de l'eau s'avère indispensable pour assurer la durabilité et le rendement optimal des chaudières.

Cette étude se penche sur les différentes étapes de traitement appliquées en milieu industriel, en s'intéressant notamment à des procédés tels que la filtration sur sable, l'osmose inverse et les techniques d'adoucissement visant à réduire la dureté de l'eau. L'objectif est d'analyser les principes physico-chimiques impliqués, d'évaluer leur impact sur la qualité de l'eau, ainsi que d'examiner les conséquences potentielles d'un traitement insuffisant, en particulier la formation de dépôts de tartre au sein des chaudières.

III.2. Traitement de l'eau de chaudière

Avant d'être acheminée vers la chaudière, l'eau doit subir un traitement préalable afin de préserver cette dernière des effets néfastes liés à la qualité de l'eau et aux températures élevées, tels que l'entartrage, le primarge ou encore la corrosion.

Dans le cadre industriel, le traitement et le conditionnement de l'eau sont assurés au sein d'une station spécifique, conçue pour fournir à la chaudière une eau répondant aux critères techniques requis.

Cette installation intègre généralement une station d'épuration qui comprend les éléments suivants :

III.2.1. Filtration sur sable

Le filtre à sable monobloc automatique FAS, est utilisé pour les eaux chargées en sable, boue, et autres matières en suspension, et dont l'indice de colmatage est très élevé. Le filtre est fabriqué en polyéthylène renforcé de fibre de verre avec double couche de filtration de silice de granulométries différentes et équipé d'une vanne automatique préprogrammée de type Fleck.



Figure VI.1 : Filtre à sable utilisé dans une unité industrielle typique.

III.2.2 Membrane d'osmose inverse

Une membrane semi-sélective est un matériau qui autorise le passage de certaines substances entre deux milieux distincts tout en bloquant d'autres, ou en favorisant certains transferts au détriment d'autres.

L'osmose inverse constitue une méthode de séparation en milieu liquide, reposant sur le passage contrôlé des fluides à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'une différence de pression. Dans ce procédé, le flux s'écoule de manière continue et tangentielle à la surface de la membrane.

III.3. Principes de l'osmose inverse

Le principe de l'osmose repose sur la recherche d'un équilibre des concentrations en soluté entre deux solutions séparées par une membrane semi-perméable.

Si l'on considère un système constitué de deux compartiments contenant des solutions de concentrations différentes et séparés par une membrane perm-sélective, l'osmose entraîne un déplacement de l'eau de la solution la moins concentrée vers celle plus concentrée. À mesure que l'eau migre, la quantité transférée diminue progressivement.

Il existe un point où la pression appliquée devient suffisante pour stopper ce flux d'eau : cette pression correspond à la pression osmotique, notamment si l'on considère la solution diluée comme de l'eau pure pour simplifier l'explication.

Si la pression appliquée dépasse la pression osmotique, l'eau circule alors dans le sens inverse, passant de la solution concentrée vers la solution diluée. C'est ce phénomène que l'on appelle l'osmose inverse.[15].

III.4. Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse

III.4.1. Pression osmotique

La pression osmotique (π) est d'autant plus importante que la concentration est élevée que la masse molaire est faible. La pression osmotique peut être calculée par la loi de Van't Hoff qui exprime que

$$\pi = i \times C \times R \times T$$

Avec :

π : Pression osmotique (bar).

i : Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte.

C : Concentration molaire (mol.L^{-1}).

R : Constante des gaz parfaits ($0,082 \text{ L}\cdot\text{bar}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

T : Température absolue (K).

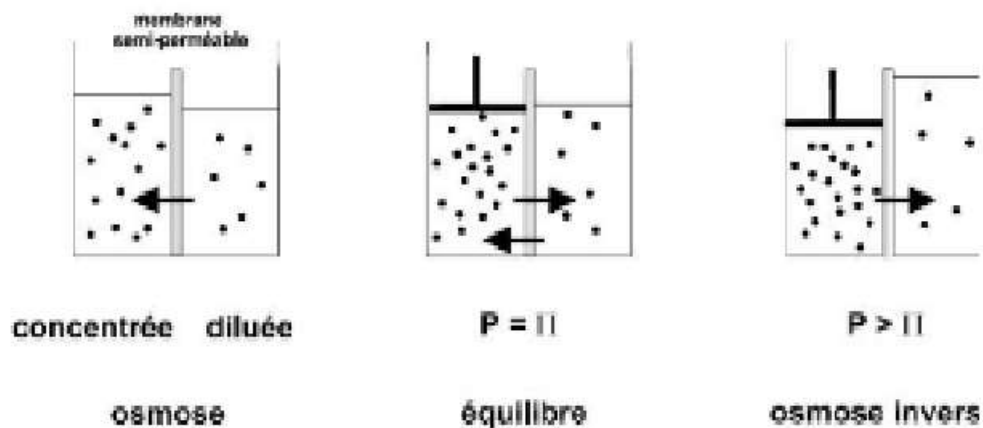


Figure VI.2 : Pression osmotique

III.4.2. Taux de conversion

La solution à traiter (l'eau micro filtrée) à débit Q_0 se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentration différentes :

- Une partie qui passe à travers la membrane appelée perméat à débit (Q_p).
- Une partie qui ne passe pas à travers la membrane qui contient les molécules ou les particules retenues par les membranes et elle est appelée concentrât.

Le taux de conversion est défini comme la fraction de débit du liquide qui traverse la membrane [20].

$$Y = Q_p / Q$$

III.4.3. Sélectivité

La sélectivité d'une membrane est une propriété de surface qui correspond à sa capacité à laisser traverser ou à retenir certains solutés selon leur masse moléculaire. En général, elle se mesure à travers le taux de rétention ou de rejet de l'espèce que la membrane est censée filtrer.

$$Tr = ((C_0 - C_p) * 100) / C_0 = ((1 - C_p) / C_0) = (Q_p / Q_0)$$

Avec :

C_p : concentration finale (perméable).

C_0 : concentration initiale.

Il y a deux valeurs particulières du Tr :

- $Tr = 0 \%$ signifie que le soluté n'est pas du tout retenu par la membrane.
- $Tr = 100 \%$ signifie que le soluté est entièrement retenu par la membrane.

III.4.4. Mécanisme de transfert

Dans le procédé d'osmose inverse, le passage des solvants et des solutés à travers une membrane semi-perméable s'effectue par des mécanismes de solubilisation et de diffusion. En effet, les molécules, qu'il s'agisse de soluté ou de solvant, se dissolvent dans la membrane puis y diffusent, de manière similaire à un mouvement au sein d'un solide ou d'un liquide, sous l'effet conjugué d'un gradient de concentration et de pression.[21].

III.5. Entartrage dans les chaudières

Dans de nombreux environnements industriels, la chaudière à vapeur occupe une place essentielle au sein du processus de production, en particulier lorsque la vapeur intervient dans des opérations clés telles que la cristallisation ou le séchage. Le bon état de marche de la chaudière est donc primordial, car toute défaillance à ce niveau a un impact immédiat sur l'ensemble de la chaîne de fabrication.

Un problème fréquemment rencontré dans ce type d'installation est la formation de dépôts à l'intérieur de la chaudière, provoquant une diminution de la pression de vapeur disponible. Ce phénomène résulte généralement de l'accumulation de tartre entre les tubes, entravant la circulation optimale de l'eau et perturbant ainsi le processus normal d'évaporation.

L'étude des causes de ces dysfonctionnements met souvent en évidence une dureté totale (TH) élevée de l'eau d'alimentation de la chaudière. Or, pour garantir un fonctionnement performant, il est nécessaire que la chaudière soit alimentée avec une eau dont la TH est nulle (0 °F). Dans certaines situations industrielles, les mesures indiquent des valeurs de TH comprises entre 18 et 25 °F, ce qui favorise fortement la formation de tartre.

Ce déséquilibre dans la qualité de l'eau est donc à l'origine des dépôts incrustants, entraînant une baisse de pression et une perte de rendement. Une solution simple, efficace et économique consiste à installer un adoucisseur d'eau, permettant de fournir une alimentation conforme aux spécifications de la chaudière et de prolonger la durée de vie des équipements.

III.5.1. Définition de l'adoucisseur

Un adoucisseur d'eau est un dispositif visant à réduire la dureté de l'eau, c'est-à-dire sa teneur en sels de calcium et de magnésium. Cet appareil favorise l'interaction des ions calcium et des ions magnésium avec les ions sodium. [16]

Ce dernier fait de l'eau d'alimentation de la chaudière **TH = 0°F**.

$$TH = \frac{V_{dep} \cdot N(EDTA) \cdot 1000 \cdot 5}{V_{aliq}}$$

Avec :

- V_{dep} : volume dépensé d'EDTA (ml)
- $N(EDTA)$: normalité
- V_{aliq} : volume prélevé d'eau (ml)



Figure VI.3 : Adoucisseur utilisé dans le cadre du traitement des eaux en milieu industriel.

III.5.2. Principe de l'adoucisseur

Un adoucisseur se compose principalement d'un bloc renfermant une résine échangeuse d'ions, d'un bac contenant du sel régénérant et d'une tête avec des vannes servant à distribuer l'eau en fonction des étapes de fonctionnement. Selon les attentes du consommateur, une vanne de mitigeage permet de laisser un résiduel de dureté.

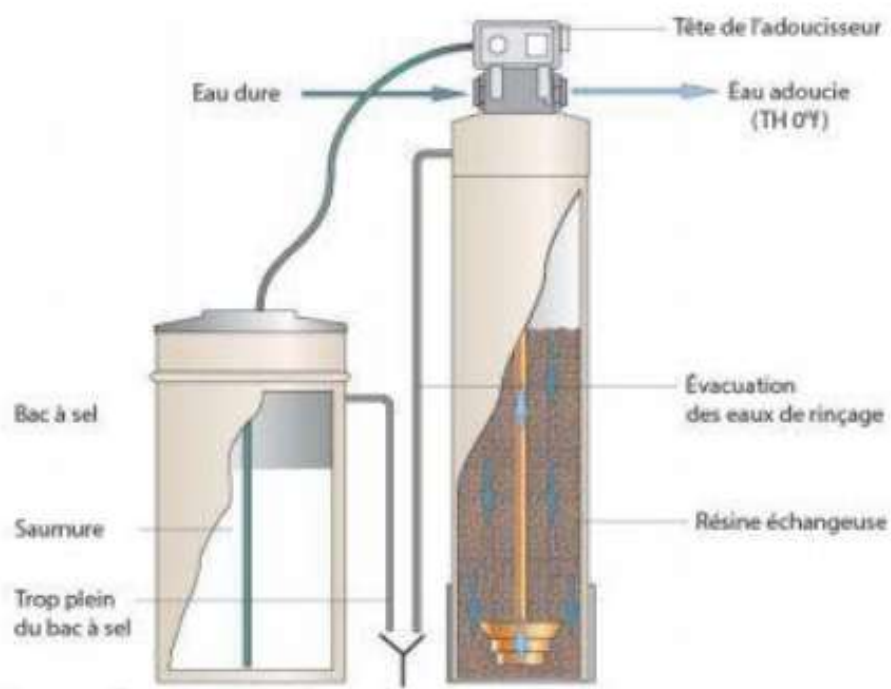


Figure VI.4 : Principe de fonctionnement d'un adoucisseur

Le principe de fonctionnement d'un adoucisseur d'eau repose sur l'échange ionique. Les ions calcium et magnésium présents dans l'eau dure traversent une résine dite « échangeuse d'ions », initialement saturée en ions sodium. Au cours de ce passage, les ions calcium et magnésium se fixent sur la résine, qui libère simultanément ses ions sodium dans l'eau. Ce processus élimine le calcaire, produisant ainsi une eau dite adoucie, lors de la phase d'adoucissement.

La quantité de calcium et de magnésium qu'une résine peut retenir définit sa capacité d'échange. Une fois cette capacité atteinte, il devient nécessaire de réinjecter des ions sodium dans la résine au cours de la phase de régénération.

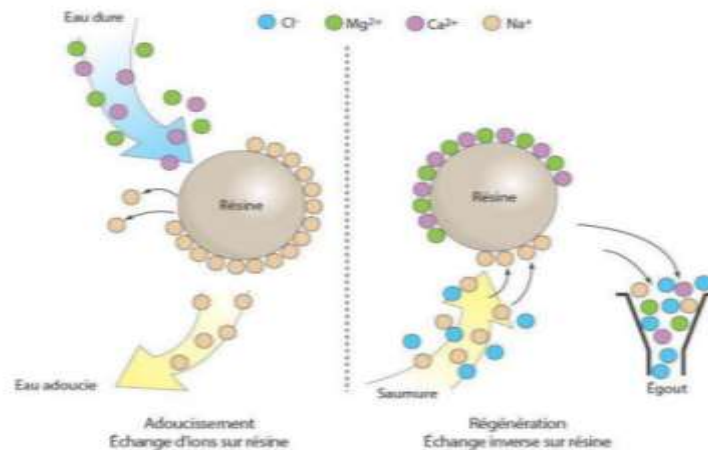


Figure VI.5 : Comment fonctionne la Résine

Les dépôts de calcaire et de tartre dans les tubes des chaudières

Les dépôts de calcaire (calcium) et de tartre (sels de magnésium) dans les tubes des chaudières sont un phénomène courant causé par l'utilisation d'une eau dure non traitée. Ces dépôts minéraux se forment sous l'effet de la chaleur et adhèrent aux parois internes des conduites, entraînant plusieurs conséquences négatives :

- ☐ Effets négatifs de l'entartrage :
- ☐ Réduction de l'efficacité du transfert thermique : les couches de tartre agissent comme des isolants thermiques, réduisant le rendement énergétique.
- ☐ Augmentation de la consommation de carburant : pour compenser la perte de rendement, la chaudière consomme plus d'énergie.
- ☐ Augmentation de la pression de fonctionnement : les dépôts entravent l'écoulement normal de l'eau et de la vapeur.
- ☐ Risque de corrosion interne et de rupture : le tartre peut provoquer des points chauds et

endommager les tubes à long terme.

□ Solutions proposées pour prévenir l'entartrage :

Utilisation d'un adoucisseur d'eau (adoucisseur à résine échangeuse d'ions)

➤ Il permet de retirer les ions calcium et magnésium, responsables de la dureté.

Installation d'un système d'osmose inverse

➤ Pour obtenir une eau purifiée avant son introduction dans la chaudière.

Entretien régulier

➤ Nettoyage chimique périodique pour éliminer les dépôts formés.

Utilisation d'agents antitartre chimiques

➤ Additifs ajoutés à l'eau pour empêcher la précipitation des sels.

III.6. Conclusion

À travers cette étude, nous avons pu constater l'importance cruciale du traitement de l'eau dans les systèmes de production de vapeur. L'osmose inverse, l'adoucissement et la filtration sont autant de procédés complémentaires visant à garantir une eau d'alimentation conforme aux exigences techniques des chaudières. La présence de tartre, résultant d'une dureté excessive, engendre des dysfonctionnements majeurs, affectant la pression de vapeur et la performance globale de l'usine. L'adoption de solutions simples comme l'installation d'un adoucisseur permet non seulement de prévenir ces problèmes, mais aussi d'optimiser la rentabilité et la sécurité du processus industriel. Ainsi, la gestion rigoureuse de la qualité de l'eau s'impose comme une priorité incontournable dans tout environnement industriel utilisant la vapeur.

CONCLUSION

Au terme de cette analyse approfondie, il est évident que la qualité de l'eau destinée à l'alimentation des chaudières industrielles représente un facteur déterminant dans la maîtrise des performances opérationnelles. Les observations réalisées dans le cadre d'une unité industrielle ont clairement révélé que des anomalies telles que l'entartrage ou la perte de pression de vapeur résultent, dans la plupart des cas, d'une dureté excessive de l'eau ou d'un traitement insuffisant. Ces dysfonctionnements peuvent engendrer non seulement des coûts de maintenance élevés, mais également des interruptions de production pénalisantes pour l'entreprise.

L'introduction de procédés tels que l'osmose inverse et l'utilisation d'un adoucisseur d'eau apparaît comme une solution efficace, économique et durable. Ces dispositifs permettent de garantir une alimentation en eau déminéralisée ou adoucie, réduisant ainsi de manière significative les risques d'encrassement des circuits thermiques. Par ailleurs, la compréhension des mécanismes de transfert, de pression osmotique et de sélectivité membranaire constitue un levier scientifique essentiel pour l'optimisation continue du traitement de l'eau.

En conclusion, cette étude montre que le traitement de l'eau ne constitue pas une simple étape technique secondaire, mais bien un pilier stratégique pour toute industrie utilisant la vapeur comme vecteur énergétique. Une gestion proactive, fondée sur des connaissances théoriques solides et des choix technologiques adaptés, s'impose comme indispensable pour garantir la sécurité, la rentabilité et la durabilité des installations industrielles modernes.

REFERENCES

-
- [1] <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/eau/27209> Consulter le 23/03/2025
- [2] M. GARNIER, "Le traitement des eaux industrielles", Éditions Dunod, 2010, p. 112.
- [3] A. BERNARD, "Techniques de traitement des eaux", Ellipses, 2015, p. 89.
- [4] Eurofins Scientific. *Boiler Water Analysis*. Eurofins New Zealand, Septembre 2021.
Disponible sur : www.eurofins.co.nz. P 5-6
- [5] The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors. *Boiler/Feedwater Guidelines*. NB-410, Révision 3, Septembre 2015, Columbus, Ohio, USA.
- [6] Goncalves, A. Mémoire d'ingénieur. « Développement d'un système de combustion pour les résidus forestiers », université du Québec, 2010.
- [7] Bounab. W. Houtia M. Mémoire de master en génie des procédés. « Etude préventive sur la corrosion et dysfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar » Université d'Adrar, 2020.
- [8] Mehdi, A. Mémoire de master. « Influence du milieu et la qualité d'eau sur le comportement électrochimique de deux nuances d'acier au carbone » Université de Skikda, 2018.
- [9] Ecole Nationale Supérieure de Pétrole et des Moteurs, formation industrie IFP training « Risques et précautions liés aux matériels, matériels thermique et description des chaudières », 2005.
- [10] Formation industrie Sonatrach, « chaudières industrielles » Institut National de pétrole école de Skikda, 2012.
- [11] Mehdi, A. Mémoire de master. « Influence du milieu et la qualité d'eau sur le comportement électrochimique de deux nuances d'acier au carbone » Université de Skikda, 2018.
- [12] Bounab. W. Houtia M. Mémoire de master en génie des procédés. « Etude préventive sur la corrosion et dysfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar » Université d'Adrar, 2020.
- [13] Benahmed, A. Touiker, M. « *Fours et chaudières dans l'industrie pétrolière* » Séminaire, IAP école de Skikda, 2013.
- [14] N. Bessa. (2003). *Monographie de la vallée de Oued R'Hir*. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud.
- [15] H. Roques. (1990). *Fondements théoriques du traitement chimique des eaux*, Technique et Documentation, Paris.
- [16] A. Laïd. (2019). *Etude de l'inhibiteur des teneurs en Ca^{2+} et Mg^{2+} lors des traitement du pissement du sel (station EL-MEGHAIER)*. Génie des procédés et d'environnement. Université Mohamed Khider de Biskra.