

Mémoire
Présenté par
Mr. YOUNSI Toufik
Pour l'obtention du
Diplôme de Magister en Génie Mécanique
Option
Matériaux et environnement

**Percement des tubes dans les échangeurs de
chaleur**

Soutenu le :23/02/2012

Devant le Jury

Président	HEBBAR Ahmed	Prof.	Université de Mostaganem
Examineur	ABOURA Ahmed	M.C.A.	Centre Universitaire de Relizane
Examineur	ZENASNI Ramdan	Prof.	Université de Mostaganem
Examineur	BELOUATEK Aissa	Prof.	Centre Universitaire de Relizane.
Encadreur	BELLOUL Mohamed	M.C.A	Université de Mostaganem

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2011 /2012

Thème : Percement des tubes dans les échangeurs de chaleur.

RESUME : La corrosion en milieu industriel est devenue un phénomène d'actualité auquel se trouvent confrontés les équipes de maintenance et de production des différentes unités du pôle industriel d'Arzew.

Cela se traduit par des arrêts plus ou moins prolongés des chaînes de production, des fuites parfois dangereuses pour la santé du personnel, des éclatements catastrophiques de pipes, contamination de l'environnement etc. ...

A titre d'exemple le percement des tubes dans les rebouilleurs s'avère un problème épineux pour les complexes de GNL.

La prévention des problèmes passe nécessairement par la connaissance de leur cause, de leur mécanisme et des effets qu'ils engendrent.

La corrosion et l'entartrage sont parmi les principaux événements à contrôler.

Corriger les paramètres en temps voulu, constitue déjà la solution d'un problème de maintenances.

Mots-clés : Corrosion, Entartrage, Environnement, percement des tubes, rebouilleurs.

Title : Piercing of tubes in heat exchangers.

ABSTRACT : Corrosion in industry is a phenomenon of current which are faced by maintenance crews and production of various units of the industrial pole of Arzew.

This results in more or less prolonged stoppages of production lines, leaks sometimes dangerous to the health of staff, catastrophic bursting of pipes, contamination of the environment etc.

For example the cutting of tubes in the reboiler is a thorny problem for the LNG complex.

Problem prevention necessarily requires Knowledge of their cause, their mechanism and the effects they produce.

Corrosion and scaling are among the main events to be monitored.

Correct the parameters in time, is already the solution to a problem of maintenance.

Key words : Corrosion, Scaling, Environment, drilling pipes, reboilers.

Table des matières

CHAPITRE I. Traitement des eaux de chaudière

Introduction générale.....	1
Généralité.....	3
I Eau d'alimentation des chaudières.....	3
I.1 Traitement d'eau de chaudière.....	7
I.1.1 Traitement externe.....	7
I.1.1.1 Adoucissement.....	8
I.1.1.2 Désaération.....	8
I.1.2 Traitement interne.....	9
I.2 Les caractéristiques de l'eau d'alimentation de chaudière.....	12
I.3 Tableau des vapeurs et pression.....	12
I.4 Corrosion des chaudières.....	14
I.4.1 Traitement des eaux de chaudière du point de vue de l'anti-corrosion.....	15
I.4.1.1 Supprimer l'oxygène dissous et le CO ₂	15
I.4.1.2 Addition d'alcali.....	16
I.4.1.3 Addition d'inhibiteurs.....	17
I.5 Mécanismes.....	18
I.5.1 Addition d'alcali.....	19
I.5.2 Les supprimeurs d'oxygène.....	20
I.5.3 Inhibiteurs. Proportion de sulfate.....	20

CHAPITRE II. Principe de la séparation

II. Généralité sur le gaz naturel	22
II.1 Procédé de la séparation.....	22
II.1.1 La distillation.....	22
II.1.2 Principe de la distillation.....	23
II.1.3 Description d'une installation de distillation.....	23
a. la colonne	23
b. le condenseur.....	24
c. le rebouilleur.....	24
II.2 Rôle de la séparation.....	24
II.3 Fractionnement	24

CHAPITRE III. Différents types d'échangeurs de chaleur

III. Les échangeurs	25
III.1 Quelques notions sur les échangeurs.....	26
III.2 Critère de classement des échangeurs.....	26
III.2.1 Classement technologique.....	26
III.2.2 Classement suivant le mode de transfert de chaleur.....	26
III.2.3 Classement suivant le procédé de transfert de chaleur.....	27
III.2.4 Classement fonctionnel	27
III.2.5 Classement suivant la compacité de l'échangeur.....	27
III.2.6 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange.....	27
III.2.7 Classement suivant la compacité de l'échangeur.....	27
III.3 Quel choix proposer ?.....	28
III.4 Principaux modes d'écoulement des deux fluides.....	28
III.4.1 Ecoulement des deux fluides parallèle et de même sens	28
III.4.2 Ecoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraires.....	29
III.4.3 Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage	30
III.5 Différents types d'échangeur de chaleur.....	30
III.5.1 Les échangeurs tubulaires.....	31
III.5.2 Les échangeurs à plaques.....	33
III.6 Autres types d'échangeurs.....	35
III.6.1 Evaporateurs tubulaires.....	36
III.6.1.1 Evaporateurs à l'intérieur de tubes.....	36
III.6.1.2 Evaporation à l'extérieur de tubes.....	39
III.6.2 Condenseurs tubulaires.....	41
III.6.2.1 Les condenseurs à fluides séparés sont les plus utilisés.....	
III.7 Rebouilleurs.....	44
III.7.1 Rebouilleurs noyés.....	44
III.7.2 Rebouilleurs à niveau liquide.....	45
III.7.3 Critère de choix des rebouilleurs.	45

CHAPITRE IV. Problèmes rencontrés dans les échangeurs de chaleur

Introduction.....	47
IV. Problème industriel.....	47
IV.1 Notion sur l'encrassement des échangeurs.....	48
IV.1.1 Aspect physique de l'encrassement.....	49
IV.1.2 Aspect économique et environnemental de l'encrassement.....	49
IV.2 Classification : différents types d'encrassement.....	50
IV.2.1 L'encrassement biologique.....	50
IV.2.2 L'encrassement par réaction chimique.....	50
IV.2.3 L'entartrage.....	51
IV.2.4 L'encrassement particulaire.	52
IV.3 Nature du dépôt.	52
IV.4 Les processus fondamentaux de l'encrassement.....	53
IV.4.1 L'initiation.....	53
IV.4.2 Transport.....	53
IV.4.3 Déposition.....	54
IV.4.4 Le réentraînement (enlèvement).....	54
IV.4.5 Le Vieillissement.....	54
IV.5 Méthode d'évaluation de l'encrassement.....	55
IV.5.1 Cinétique de l'encrassement.....	55
IV.5.2 Modèles d'évolution de l'encrassement.....	55
IV.6 Les modèles de déposition et de réentraînement.....	57
IV.7 Qui-ce que la corrosion ?.....	58
IV.7.1 Les facteurs de la corrosion.....	59
IV.7.2 Classification des processus de la corrosion.....	60
IV.7.2.1 Méthode d'estimation de la corrosion.....	62
IV7.3 Influence des facteurs mécaniques sur la corrosion.....	62
IV7.3.1 Corrosion uniforme.....	63
IV7.3.2 Corrosion par piqûres.	63
IV7.3.2.1 Généralité.....	63
IV.7.3.2.2 Temps d'amorçage.....	64
IV.7.3.2.3 Approche statistique : Amorçage + Propagation.....	65
IV.7.3.2.4 Mécanisme de la corrosion par piqûre.....	65
IV 7.3.2.5 Croissance des piqûres.....	67
IV.7.3.3 Corrosion – fatigue.	67
a- aspect phénoménologique.....	67
b- Mécanisme d'amorçage	68
IV.7.3.4 Corrosion sous contrainte.....	68
IV.7.3 .5 Propagation des fissures.....	69
IV.7.3.5.1 Milieu environnants.	70
IV.7.3.5.2 Gradients thermiques.	72
IV.7.3.6 Erosion – Corrosion.....	72
IV.7.3.7 Corrosion Galvanique.	73
III.8 Vibrations.....	74
IV.8.1 Caractéristiques vibratoire des tubes.....	74
IV.8.1.1 Fréquence de résonance.	74
IV.8.1.2 Vibration induites par le fluide et couplage fluide/tubes.....	76
IV.8.1.3 Vibration due aux sillages (vortex).....	76
IV.8.1.4 Vibration due a la turbulence (buffeting).....	77

IV.8.2 Vibration due acoustiques.....	77
IV.9 Problème de tenu mécanique.	78
IV.9.1 Type d’amorçage des fissures.	80
IV.9.2 Action combinée de corrosion et de facteurs mécaniques.....	81
IV.9.3 Fatigue thermique :(le cas que l’on peut rencontré dans notre recherche).	81
IV.9.4 Corrosion sous contraintes.	82

CHAPITRE V. Historique et analyse du problème.

V. Historique.....	85
V.1 Description du problème.....	85
V.2 Fonctionnement des rebouilleurs.....	85
V.2.1 Avant la rénovation.....	85
V.2.1.1 le désurchauffeur.....	85
V.2.1.1.1 Principe de fonctionnement.....	85
V.2.1.1.2 Installation de désurchauffeur.....	87
V.2.2 après la rénovation.....	88
V.2.2.1 Rénovation a l’entrée du rebouilleur.....	88
V.2.2.2 Rénovation sur le désurchauffeur.....	89
V.3 Remarque.....	91
V.3.1 Influence de la température de la vapeur de réchauffage.....	92
V.3.2 Influence de la pression de vapeur de réchauffage.....	93
V.3.3 Variation de la surface d’échange en fonction de la pression.....	95
V.3.4 Variation du débit vapeur en fonction de la température.....	96
V.4 Remarque.....	97
V.4.1 La température.....	97
V.4.2 La pression.....	97
V.5 Tableau des défaillances durant les cinq dernières années dans le complexe.....	98

Conclusion générale 103

Bibliographie

Annexes

Liste des figures

(I.1) Le circuit d'eau d'une chaudière	3
(I.2) Représentation d'une chaudière	4
(III.3) La compacité de l'échangeur.....	28
(III.4) Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co- Courants	29
(III.5) Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire o plaque à contre – courants.	29
(III.6) Exemple d'échangeurs à courant croisés.....	30
(III.7) Différents types d'échangeurs tubulaires.....	32
(III.8) Ailettes transversale.....	32
(III.9) Tube avec différents types d'ailettes longitudinales	32
(II.10) Echangeurs à plaque et joints (à surface primaire).....	35
(III.12) Evaporateurs à tube verticaux schéma de principe	39
(III.13) Evaporateurs noyés ou à tubes arrosés.....	40
(III.14) Condensateurs à tubes verticaux (schéma e principe).....	43
(III.15) Rebouilleurs de type Kettle.....	45
(IV.16) L'encrassement dans un échangeur tubulaire.....	49
(IV.17) Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps	56
(IV.18) Représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide.....	57
(IV.19) Bilan des différentes formes de corrosion.....	63
(IV.20) Pile galvanique de corrosion : + Cathode, - Anode.....	64
(IV.21) Schéma du mécanisme d'amorçage par pénétration	66
(IV.22) Schéma du mécanisme d'amorçage par rupture du film	66
(III.23) Représentation des différentes étapes d'endommagement en fatigue- Corrosion.	68
(IV.24) Exemple de Corrosion galvanique, cas d'une pile constituée du couple zinc cuivre.....	73
(IV.25) Détermination du coefficient C_u en fonction de la distance des supports à la Partie coudée (HEDH).....	75
(IV.26) Courbe de résistance mécanique à la traction.	80
(V.27) Détail du désurchauffeur SP-167	86
(V.28) Boucle de régulation type avec désurchauffeur PS-167.....	87
(V.29) schéma de contrôle de la température du débutaniseur par FV422.....	87
(V.30) Schéma de contrôle de la température du débutaniseur par LV412.....	88
(V.31) Détail de désurchauffeur DM-167.....	89
(V.32) Installation type d'un désurchauffeur DM-167.....	90
(V.33) Schéma de contrôle de la température de la vapeur de réchauffage.....	91
(V.34) Variation de la température de la vapeur de réchauffage durant la période.....	92
(V.35) Variation de la pression de la vapeur de réchauffage durant la période de.....	93
(V.37) variation de la pression de vapeur utilisée pour le réchauffage en fonction de la température de la vapeur du train 600.....	94
(V.38) variation de la surface d'échange du rebouilleur X56C en fonction de la pression de vapeur.....	95

(V.39) variation du débit de vapeur en fonction de sa température à 100 % de charge et pression de 4,5 bars.....	96
(V.40) variation du débit de vapeur en fonction de sa température à 115% de charge de 4,5 bars.....	96

Liste des tableaux

(I.1)	Les contaminants de l'eau d'alimentation des chaudières, leurs effets et les traitements possibles	3
(I.2)	Les paramètres d'évaluation de l'agressivité et la corrosivité de l'eau	10
(I.3)	Vapeurs et pressions.....	11
(II.4)	Nature des échangeurs.....	18
(II.5)	Principe de construction des échangeurs	18
(II.6)	Résultat expérimentale.....	32
(II.7)	La relation entre le diamètre de la calandre D_c et la longueur des tubes l	35
(II.8)	Critère de choix des rebouilleurs.....	36
(III.9)	Facteurs de corrosion.....	47
(III.10)	Milieux environnants qui peuvent causer la corrosion fissurant des métaux alliages.....	56
(III.11)	Fréquence de résonance.....	59
(III.12)	Le faisceaux de tubes cylindriques, en fonction du pas adimensionné (p/D).	60
(III.13)	Module d'Young E , et coefficient d'expansion thermique linéaire (α) pour quelques métaux et oxydes	65
(III.14)	récapitulatif des divers modes d'endommagement.....	66
(V.15)	Tableaux des défaillances durant les cinq dernières années dans le complexe. ...	98

Nomenclature

M	masse linéique du tube.	(Kg/m)
EI	Raideur.	(N.m ²)
F _s	Fréquence des tourbillons.	(Hz)
C	Vitesse du son dans le gaz.	(m/s)
F _n	Vibration acoustique.	(Hz)
E	Module de Young.	(N/m ²)
D _c	Diamètre de la calandre.	(mm)
ft	feet.	(m)=33cm
R _d	Résistance d'encrassement.	(m ² K/W).
md	Masse déposée par unité de surface.	(Kg/m ²).
ed	Épaisseur de la masse déposée.	(mm)
ta	temps d'amorçage des piqûres.	(s)
X _a	La profondeur à partir de laquelle les piqûres continuant à croître	(mm)
I	Inertie du tube.	(m ⁴)
L(m)	Longueur entre deux fixations.	(mm)
S	Surface.	(m ²)
Q	Vitesse de la corrosion (indice de masse).	(g/m ² .h)
P	Indice de profondeur.	(mm/an)
P	Masse volumique.	(Kg/m ³)
σ _e	Contrainte élastique.	(da N)
D	densité du métal.	(g/cm ³)
Δθ	Variation de la température.	(C°)
σ _θ	Contrainte thermique.	(Da N)
λ _d	Conductivité thermique.	(w/m/k)
ρ _d	Masse volumique.	(kg/m ³)
Δm	Perte de masse d'une unité de surface S pendant une unité de temps	(Kg/s)
σ ₀	La limite de la ductilité après la corrosion.	(da N)
σ ₁	La limite de la ductilité après la corrosion.	(da N)

Introduction générale :

Depuis de nombreuses années, dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie et donc, par voie de conséquence, de protection de l'environnement. Une grande part de l'énergie thermique (90%).[24] Utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. Ils sont utilisés principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agro-alimentaire, production d'énergie, etc.),

Les rapports techniques [54] fournis par la compagnie américaine « Pullman Kellogg » révèlent que la plupart des échangeurs à plaques (des rebouilleurs) des colonnes de fractionnement du complexe GL2/Z ont subi des fuites internes (*percements*) ces fuites altèrent les performances du système de réchauffage par la vapeur.

Le problème de percement des tubes dans les échangeurs de chaleurs et en grande partie les rebouilleurs de type X-56C exposé à la vapeur d'eau de réchauffage est un problème fréquent pour cette raison on a cherché de connaître comment se problème pose-il et quelle sont les causes qui conduisent à ce problème et de quelle manière on peut les résoudre.

Les principaux problèmes rencontrés par les utilisateurs d'échangeurs thermiques ont relation avec le phénomène de corrosion, d'encrassement, de vibration et de tenue mécanique d'après plusieurs publications (Bott.1995, Goyhenetche.1991). [52], [53].

Ces études montrent aussi que l'encrassement reste au premier rang des préoccupations des industriels du secteur des équipements de transferts thermique.

L'organisation de ce travail se présente comme suit :

Au premier chapitre, nous présentons les procédures de traitements des eaux de chaudières qui à une très grande importance en ce qui concerne la prévention contre l'entartrage et la corrosion avant de focaliser sur le traitement des eaux de point de vue de l'anti-corrosion.

Au deuxième chapitre on a présenté le principe de la séparation du gaz naturel et les moyens nécessaires pour la réalisation de ce procédé.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents types d'échangeurs de chaleurs et leurs modes de fonctionnement.

Au quatrième chapitre on a essayé de donner une idée générale sur les problèmes rencontrés dans les échangeurs de chaleur, ce chapitre est divisé en quatre parties. La première s'intéresse

au problème d'entartrage et la deuxième au problème de corrosion, la troisième au problème de vibration et enfin la tenue mécanique.

Le cinquième chapitre présente une analyse du problème industrielle et scientifique en ce qui concerne les rebouilleurs de type X-56C en vue de connaître les vrais problèmes qui provoquent le percement des tubes ainsi les résultats trouvés et des tableaux de recommandation.

Une conclusion générale de notre étude et lui ouvrira de nouvelles perspectives.

Chapitre I

Traitement des eaux des chaudières

Généralités :

Les principaux problèmes rencontrés dans les installations véhiculant ou stockant de l'eau sont de trois sortes : l'entartrage, l'embouage et la corrosion. Cependant seule la corrosion est possible dans tous les types d'eau, même dans les eaux que l'on peut qualifier de non corrosives. Les autres phénomènes, eux, demandent des conditions particulières en suspension pour l'embouage. [1]

Pour cette raison et particulièrement dans notre cas un traitement des eaux de chaudière est indispensable pour assurer un bon fonctionnement des échangeurs de chaleurs.

I.1 Eau d'alimentation des chaudières :

Le circuit d'eau d'une chaudière peut être résumé par le schéma suivant :

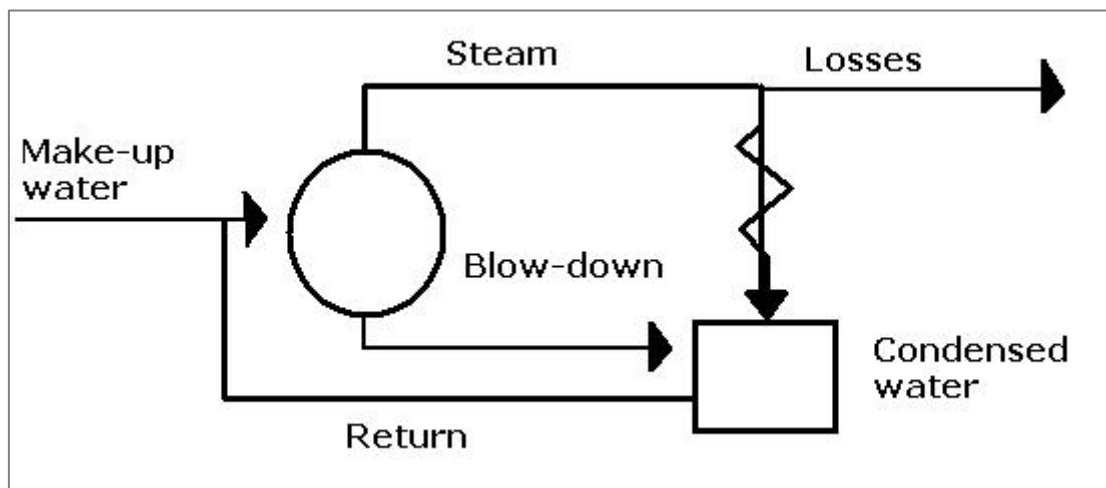


Fig. (I.1) : Le circuit d'eau d'une chaudière

Une chaudière est une unité pour générer de la vapeur, qui est composée de deux parties : le four, qui fournit de la chaleur, habituellement en brûlant des combustibles, et la chaudière, une unité dans lequel la chaleur transforme l'eau en vapeur. La vapeur ou le fluide chaud sont alors recyclés hors de la chaudière pour l'usage dans divers procédés dans les applications de chauffage. Fig (I.2). [2]

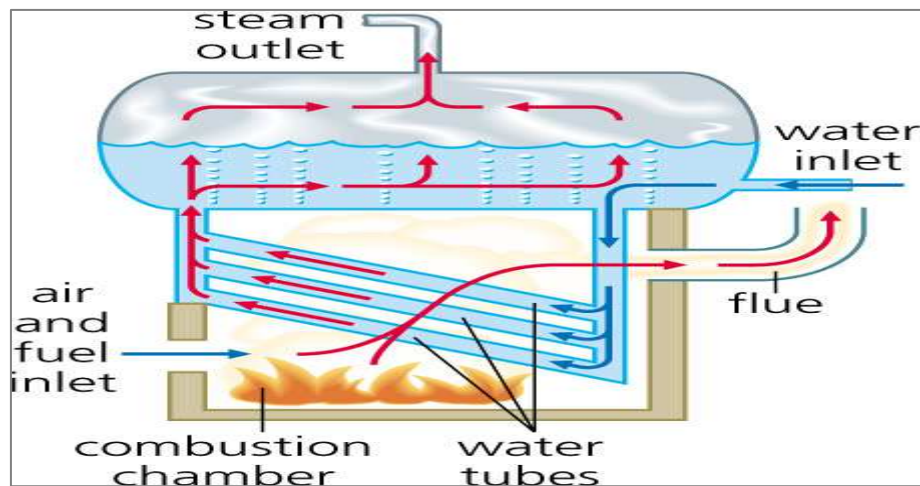


Fig. (I.2) : représentation d'une chaudière

La chaudière reçoit l'eau d'alimentation, qui se compose de diverses proportions d'eau condensée récupérée (eau de retour = return) et l'eau douce, qui a été purifiée à degrés variables (eau d'appoint = make-up water). L'eau d'appoint est généralement de l'eau naturelle à l'état brut, ou traitée par certains procédés, la composition de l'eau d'alimentation de chaudière dépend ainsi de la qualité de condensât qui retourne dans la chaudière, contient fréquemment des gouttelettes liquides et des gaz. L'eau restante sous forme liquide au bas de la chaudière ramasse toutes les matières organiques étrangères. Provenant de l'eau convertie en vapeur, les impuretés doivent être purgées par des rejets d'une partie de l'eau par les drains. Le pourcentage permis de vidange pour une usine est limité par les coûts de fonctionnement et les investissements initiaux, la tendance est de réduire ce pourcentage.

Le traitement approprié de l'eau d'alimentation de chaudière est une partie importante de l'opération et du maintien du système. Comme de la vapeur est produite, la concentration en solide dissous devient plus grande et forme des dépôts à l'intérieur de la chaudière. Ceci conduit à des faibles transferts de chaleur et réduit l'efficacité de la chaudière, les gaz dissous tel que l'*oxygène* et le dioxyde de *Carbone* réagiront avec les métaux dans les systèmes de chaudières et entraîneront une corrosion. Afin de protéger la chaudière de ces contaminants, ils doivent être contrôlés ou éliminés, grâce à des traitements **internes** ou **externes**.

Dans le tableau suivant, vous pouvez trouver une liste de contaminant de l'eau d'alimentation des chaudières leurs effets et les traitements possibles.

Tableau. (I.1) représente les contaminant de l'eau d'alimentation des chaudières leurs effets et les traitements possibles.

IMPURETE	RESULTAT	S'ELIMINE PAR	COMMENTAIRE
Gaz soluble			
Acide Sulfydrique (H ₂ S)	Odeurs de l'eau nausée abonde : mauvais goût, et corrosif pour la plupart des métaux.	Aération, filtration, et chloration.	Se trouve principalement dans les eaux souterraines et les cours d'eau pollués.
Dioxyde de Carbone (CO ₂)	Corrosif, forme l'acide carbonique en condensât	Désaération, neutralisation par alcalinisation.	Les amines neutralisantes sont utilisées pour empêcher la corrosion dans les circuits de condensât.
Oxygène (O ₂)	Corrosion (notamment par piqûre) des tubes de la chaudière	Désaération & traitement chimique (sulfite de sodium ou Hydrazine)	Piquage de la tuyauterie, rupture dans les circuits de vapeur, etc.
Solide en suspension			
Sédiments & turbidité	Boue et primage calcaire	Décantation et filtration	Tolérance approximative de 5ppm max. pour la plupart de s applications, 10 ppm pour l'eau potable
Matières organiques	Primage, moussage, les dépôts peuvent colmater les canalisations causer par la corrosion.	Décantation, filtration, et traitement chimique	Se trouve principalement dans l'eau de surface, causé par, notamment, la décomposition de la végétation. Les matières organiques. le résultat est un pH d'eau d'alimentation faible, qui provoque l'attaque des conduites des chaudières, il inclut des diatomes, les moisissures, les films biologiques, les bactéries manganiques/ Ferriques, les particules suspendues se rassemblent à la surface de l'eau de la chaudière et rendent difficile la libération des bulles de vapeur rencontrant à la surface, le moussage peut aussi être attribué à l'eau contenant des carbonates en solution dans laquelle un léger précipité flocculeux sera formé à la surface de l'eau.

Solides colloïdaux dissous			
Huile & Graisse	Moussage, dépôts dans la chaudière	Coagulation & Filtration	Entre dans la chaudière avec le condensât
Dureté, calcium (Ca), et Magnésium (Mg)	Dépôt calcaire dans la chaudière, empêche le transfert thermique et l'efficacité thermique. Dans les cas graves peut mener à la brûlure ou à la rupture des tuyaux de la chaudière.	Adoucissement, plus traitement interne dans la chaudière.	Les formes sont, dans l'ordre, des bicarbonates, des sulfates, des chlorures et de nitrates, certains sels de calcium sont réversiblement solubles, le (Mg) avec les carbonates pour former des composés à faible solubilité.
Sodium, alcalinité, NaOH, Na ₂ HCO ₃ , N ₂ CO ₃	Moussage, carbonates forment l'acide carbonates dans la vapeur, causent notamment la corrosion du séparateur d'eau de condensation, peuvent causer une fragilisation.	Désaération de l'eau d'appoint et de condensât de retour, Echangeurs d'ions ; dés ionisation, traitement acide de l'eau d'appoint.	Les sels de sodiums sont trouvés dans la plupart des eaux, ils sont très solubles, et ne peuvent être éliminés par précipitation chimique.
Sulfates (SO ₄ ⁻)	Entartrage important s'il y a présence de calcium	Désionisation	Les limites de tolérances sont environ 100-300ppm CaCO ₃
Chlorure (Cl) ⁻	Primage, entrainement par la vapeur d'eau et de sels dissouts, peut provoquer des dépôts de sels dans les surchauffeurs et les turbines, Moussage si présent en grande quantité.	Désionisation	Le primage est causé par la concentration en carbonates de sodium, sulfate de sodium ou chlorures de sodium en solution. Le sulfate de sodium est trouvé dans beaucoup d'eaux (aux USA), et dans les eaux où le calcium ou le magnésium est précipité avec le carbonate de sodium.
Fer (Fe) et Manganèse (Mn)	Dépôts dans la chaudière, en grande quantité peut inhiber le transfert de chaleur.	Aération, Filtration, ion Exchange	La forme la plus courante est le bicarbonate de fer.
Silice (Si)	Entartrage Important dans les chaudières et les systèmes de refroidissement.	Désionisation, procédé chaux-soude, traitement par zéolite.	La silice se combine avec de nombreux éléments pour former la silicates, les silicates forment des dépôts très tenaces dans la chaudière, très difficile à enlever, souvent seulement par acide fluorhydrique.

[2]

I.1 Traitement d'eau de chaudière :

Le traitement et le conditionnement de l'eau d'alimentation de chaudière doivent satisfaire trois objets principaux :

- L'échange continu de chaleur ;
- La protection à la corrosion ;
- La production de hautes quantités de vapeur.

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 chaudière en question. Il y a différents types de traitement externe (adoucissement, évaporation, désaération, contacteurs à membranes etc....). Qui peuvent être utilisés pour l'eau d'approvisionnement.

Le traitement interne est le traitement des impuretés à l'intérieur du système de chaudière. Les réactions se produisent dans les lignes d'alimentation ou dans la chaudière. Le traitement interne peut être utilisé seul ou avec un traitement externe, son but est de réagir correctement avec 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. [3]

I.1.1 Traitement externe :

Les équipements de traitement de l'eau purifient et désaèrent l'eau d'appoint ou l'eau d'alimentation, l'eau est parfois prétraitée par évaporation pour produire une vapeur relativement pure, qui est alors se condensée et utilisée pour l'alimentation des chaudières . Les évaporateurs sont de différents types, le plus simple étant un réservoir par lequel les serpentins à vapeurs sont posés pour chauffer l'eau jusqu'au point d'ébullition.

Parfois pour augmenter le rendement la vapeur du premier réservoir passe par des bobines dans un second réservoir d'eau pour produire un chauffage additionnel et une évaporation. Les évaporateurs conviennent ou la vapeur en tant que source de chaleur, et aisément disponible. Ils ont des avantages particuliers pour la déminération, par exemple lorsque les solides dissous de l'eau brute sont très élevés.

Certains matériaux naturels ou synthétiques ont la capacité d'éliminer les ions minéraux de l'eau en les échangeant par d'autre. Par exemple, en passant l'eau à travers un simple adoucisseur échangeur de cations tous les ions calcium et magnésium sont éliminés et remplacés par des ions sodium.

Puisqu'un simple échange de cation ne réduit pas la totalité des solides de l'eau d'alimentation il est parfois utilisé conjointement avec d'autres traitements de type décarbonations, un des traitements les plus courants et plus efficaces est le procédé par

zéolites à chaud. Ceci comporte un prétraitement de l'eau avec de la chaux pour réduire la dureté, l'alcalinité et dans certains cas la silice, et le traitement subséquent avec un adoucisseur à échange de cation ce système de traitement accomplit plusieurs fonctions ; Adoucissement, réduction de l'alcalinité et de la silice, réduction d'oxygène, et l'élimination de matière suspendue et de la turbidité.

Le traitement chimique à l'intérieur de la chaudière est généralement essentiel et complète le traitement externe en faisant attention à ce qu'aucune impureté n'entre dans la chaudière avec l'eau (dureté, oxygène, silice). Dans de nombreux cas, le traitement externe de l'eau d'approvisionnement n'est pas nécessaire et l'eau peut être traitée seulement par des méthodes internes. [3]

I.1.1.1 Adoucissement

1-Adoucissement ; Adoucisseur : Dispositif permettant d'éliminer par échange ionique la dureté d'une eau (teneur en calcium et en magnésium), de façon à éviter les risques d'entartrage d'un producteur de chaleur.

L'adoucissement a lieu en faisant diffuser l'eau à travers une colonne de résine dite cationique, permettant la fixation du calcium et du magnésium par la résine, qui libère en échange du sodium.

Lorsque la résine a libéré tous ses sodiums, la résine est dite épuisée ; l'adoucisseur n'est plus capable à ce moment de continuer à fixer du calcium, il est alors nécessaire de le faire régénérer.

La régénération permet aux résines de se recharger en sodium, après avoir libérées dans l'eau allant à l'égout le calcium et le magnésium qu'elles avaient retenus. Cette régénération est effectuée par l'aspiration d'une solution saturée de chlorure de sodium ou saumure, préparée dans le bac à sel. [4]

Les différentes phases de la régénération sont par ordre :

a- Détassage : Soulevement à contre courant du lit de résine.

b- Aspiration de saumure.

c- Rinçage lent : Percolation à vitesse lente de la saumure à travers le lit de résine.

d- Rinçage rapide : Rinçage permettant d'éliminer vers l'égout le restant de saumure, et l'eau chargée en calcium, magnésium et chlorures.

I.1.1.2 Désaération :

I.1.1.2.1 Dégazage

Il consiste à éliminer par l'emploi de produits chimiques, les effets corrosifs des gaz dissous, c'est-à-dire surtout de l'oxygène et du gaz carbonique.

I.1.1.2.2 Réduction de l'oxygène

Trois produits principaux peuvent être utilisés :

- le sulfite de sodium, catalysé ou non
- l'hydrazine

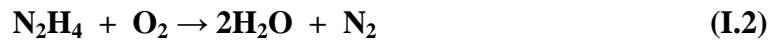
Pour chacun d'eau, la vitesse de réaction augmente avec la température et le pH.

a- Sulfite de sodium

Il agit selon la réaction :
$$\text{Na}_2\text{SO}_3 + \frac{1}{2} \text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 \quad (\text{I.1})$$

b- L'hydrazine

Elle réduit l'oxygène selon la réaction :

**I.1.1.2.3 Neutralisation de l'acide carbonique**

Le carbonate et le bicarbonate de sodium contenu dans l'eau d'alimentation se décomposent en chaudière en produisant :

- dans l'eau de chaudière, un mélange de soude caustique et de carbonate de soude, dans des proportions données par le taux d'hydrolyse du carbonate de soude à la pression de vaporisation.
- Dans la vapeur, un gaz carbonique ; en phase vapeur saturée ou surchauffée, le CO_2 se dissout dans l'eau condensée, lui conférant un caractère corrosif.

Il y a donc un vif intérêt à protéger les canalisations de condensats et de retour contre ce type de corrosion. Ceci s'obtient, en général, par l'emploi d'amines volatiles introduites dans l'eau de chaudières et entraînées dans la vapeur.

Elles sont de deux types :

a- Amines neutralisantes :

Ammoniaque, cyclohexylamine, éthanolamines.

b- Amines filmantes :

Ce sont des amines grasses à longue chaîne. Une extrémité de la molécule est hydrophile, l'autre est hydrophobe.

Leur dose d'emploi se situe autour de 2 g/m³ mais leur mise en œuvre exige quelques précautions. [4]

I.1.2 Traitement interne :

Traitement interne peut constituer l'unique traitement lorsque les chaudières opèrent à pression faible ou modérée, lorsqu'une large quantité de vapeur condensée est utilisée de l'eau d'alimentation, ou lorsque la quantité de l'eau brute est bonne, le but d'un traitement interne est de :

- 1/ réagir avec la dureté de l'eau d'alimentation et l'empêcher de précipiter avec le métal de chaudière (tartre) ;
- 2/ conditionner n'importe quelles matières en suspension telles les boues de dureté ou l'oxyde de fer dans les chaudières et de les rendre non adhérentes au métal de chaudière ;
- 3/ assurer une protection anti-moussage pour permettre une concentration raisonnable en solides dissous et en suspension dans la chaudière sans risque de primage ;

4/ éliminer l'oxygène de l'eau et d'assurer une alcalinité suffisante pour empêcher la corrosion.

De plus, en tant que mesure et en plus, un traitement interne devrait empêcher la *corrosion* et l'*entartrage* dans les systèmes d'alimentations d'eau et protéger le système de condensât de vapeur contre la corrosion pendant le procédé de traitement, qui est un complément essentiel au programme de traitement à l'eau, des doses spécifiques de produits de traitement sont ajoutés à l'eau, les produits couramment utilisés incluent :

- **Dispersants phosphates, dispersants polyphosphates (produits chimiques d'adoucissement) :** Réagissant avec l'alcalinité de l'eau de chaudière, ces produits forment le phosphate tricalcique, et les composants insolubles qui peuvent être déposés et purgés de façon continue ou périodique par le bas de la chaudière.
- **Dispersants nature et synthétiques (Agents antitartre) :** Augmentation des propriétés dispersives des produits de traitements, ils peuvent être :
 - des polymères naturels : lignosulfonates de calcium, tannin.
 - des polymères synthétiques : polyacrylates, copolymère, acrylique maléique, copolymère styrène maléique, polystyrène sulfonates etc.
- **Séquestrant :** tels que les phosphates inorganiques comme les inhibiteurs.
- **Réducteur d'oxygène :** suffit de sodium, tannin, hydrazine, dérivés d'hydroxylamine, dérivés d'acide ascorbique, etc., ces réducteurs, catalysés ou non, réduisent les oxydes et l'oxygène dissous.

Passive aussi les surfaces des métaux, le choix du produit et la dose requise dépendront de la manière dont le dégazer thermique est utilisé.
- **Agents anti-moussage et anti-primage :**

Mélange d'agents tension - actifs qui modifient la tension de surface d'un liquide, élimine le moussage et empêche le primage des particules fines de l'eau dans la vapeur.

Les produits chimiques d'adoucissement utilisés incluent les cendres de soude, les caustiques et divers types de phosphates de sodium, ces produits chimiques réagissent avec les composés de calcium et de magnésium dans l'eau d'alimentation, le silicate et le magnésium dans l'eau d'alimentation, le silicate et le sodium est utilisé pour réagir sélectivement avec la dureté en magnésium.

Le bicarbonate de calcium entrant avec l'eau d'alimentation est décomposé avec la température de la chaudière ou réagit avec les cendres caustiques pour former le carbonate de calcium est relativement insoluble, il tend à sortir de la solution. Le carbonate de sodium est particulièrement décomposé à températures élevées en hydroxyde de sodium (caustique) et en dioxyde de carbone, les températures élevées de l'eau de chaudière réduisent la solubilité du sulfate de calcium et tend à le faire précipiter directement sur le métal de la chaudière en tant

que tartre, En conséquent, le sulfate de calcium doit être traité chimiquement pour former un précipité dans l'eau ou il sera conditionné et éliminé par vidange. Le sulfate de calcium réagit avec le carbonate de sodium, le phosphate de sodium ou le silicate de calcium insoluble. Le sulfate de magnésium réagit avec la soude caustique pour former un précipité d'hydroxyde de magnésium. Certains magnésiums peuvent réagir avec la silice pour former le silicate de magnésium, le sulfate de sodium est très soluble et reste en solution à moins que l'eau soit évaporée presque à se.

Il y a deux approches générales pour le traitement des boues à l'intérieure d'une chaudière : par coagulation ou par dispersion. Lorsque la quantité totale de boue est élevée (comme résultat de dureté élevée d'eau d'alimentation), il est préférable de coaguler les boues pour formé des particules flocculeuses.

Celle-ci peut être éliminée par vidange, la coagulation peut être obtenue par l'ajustement soigneux des quantités de boue n'est pas trop élevée (faible dureté pourcentage de phosphates dans le traitement. Les phosphates forment des particules séparées de boue, un haut pourcentage en dispersants de boue organique est utilisé dans le traitement pour garder les particules de boue dispersées dans toute l'eau de chaudière.

Les matières employées pour conditionner les boues incluent divers matériaux organiques de tennis, de lignine ou d'alginate. Il est important que ces produits organiques soient décelés et traités, ainsi, ils sont à la fois efficaces et stable à la pression de travail des chaudières, certains matériaux organiques synthétiques sont utilisé en tant qu'agents anti-mousses. Les produits chimiques utilisés pour réduire l'oxygène incluent le sulfite de sodium et l'hydrazine. Diverses combinaisons de poly-phosphates et de produit organiques sont utilisées pour empêcher le dépôt de tartre dans les systèmes d'alimentation d'eau.

Les méthodes courantes internes d'alimentation en produits chimiques incluent l'utilisation proportionnée de réservoirs de solutions chimiques et décarbonations (phosphates, les cendres de soude, les caustiques, etc....)

Sont ajoutés directement à l'eau d'alimentation à un point près de l'entrée de la chaudière, ils peuvent être aussi ajoutés par une vois dérivés les déchargeant dans la chaudière afin que les réactions se produisent dans l'eau avant d'arriver dans le secteur de génération peuvent être ajoutés continuellement ou par intermittence. Suivant, entre autre, la dureté de l'eau, les produits chimiques chimique ajoutés pour réagir avec l'oxygène dissous (sulfate, hydrazine, etc.). Et les produits chimiques utilisés pour empêcher l'entartrage et la corrosion devrait alimenter le système d'alimentation le plus continuellement possible. Les produits chimiques utilisés pour empêcher la corrosion des systèmes de condensât peuvent être ajouter directement à la vapeur ou dans le système d'alimentation d'eau, une alimentation continue est préférable mais, dans certains cas, des applications par intermittence suffiront. [3]

I.2 Les caractéristiques de l'eau d'alimentation de chaudière :

L'eau absorbe plus de chaleur pour une augmentation de température donnée que toutes les autres substances inorganiques courantes. Elle augmente 1600 fois en s'évaporant pour former de la vapeur à pression atmosphérique. La vapeur est capable de transporter une grande quantité de chaleur, ces propriétés uniques de l'eau la rendent idéale pour les procédés de chauffage et de génération de puissance.

Toutes les eaux naturelles contiennent des quantités variées de matière dissoute et suspendue et de gaz dissous, la quantité en minéraux dissous dans l'eau varie entre 0 et 30 mg/l dans les eaux douces d'approvisionnement. Depuis que les impuretés de l'eau causent les problèmes dans les chaudières, une grande attention doit être portée sur la qualité de l'eau utilisée pour générer la vapeur.

La composition de l'eau d'alimentation des chaudières doit être telle que les impuretés qu'elle contient, puissent être concentrées un nombre réel peuvent être obtenu par le fabricant de chaudière, qui se basera sur les caractéristiques de la chaudière en question.

Les tableaux suivant sont extraits des niveaux de recommandation de L'APAVE (Association de propriétaires d'unité électrique et vapeur,

Le tableau suivant a pour objectif de montrer l'intérêt de connaître quels sont les paramètres particuliers nécessaires pour évaluer soit l'agressivité de l'eau soit sa corrosivité dans des cas bien connus.

Tableau. (I.2) : les paramètres d'évaluation de l'agressivité et la corrosivité de l'eau

Paramètres à prendre en considération	But, justification, remarques
Origine de l'eau	Suivant l'origine de l'eau, il peut y avoir une contamination micro- biologique. Il est peut être utile de compléter l'analyse par une recherche par exemple de bactéries (Ferro- bactéries, sulfato- bactéries,...) → corrosion
Température de l'eau (prélèvement) °C	Afin de déterminer l'agressivité ou la corrosivité de l'eau à la température de travail
Couleur	Présence de matière organiques dissoutes ou colloïdales
Turbidité	En relation avec les matières en suspension, donne une idée sur la teneur en matières colloïdales minérales ou organiques, permet d'avoir une idée sur les risques de dépôts corrosions
Odeur, saveur	Liées à la pollution, à la présence de micro-organismes (H ₂ S, phénols,...) corrosions
Résistivité, conductivité	Dépendent de la concentration en sels dissous conducteurs corrosions
Résidu sec (105°C)	Permet la vérification du bilan ionique → corrosion
Résidu sec (105°C)	Permet une évaluation des matières organiques
pH lors du prélèvement et au laboratoire	→ corrosion, entartrage
Bilan ionique complet, pH, Θ°C	Permet de déterminer par un calcul complet l'indice de langelier (IL) → entartrage
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , NO ³⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , et /ou Θ°C, HCO ₃ ⁻ , pH	Permet de tracer les courbes de legrand –poirier → entartrage
°C, TH, TAC, extrait sec, Ph	Permet de déterminer le pH de saturation (pHs), et ensuite : <ul style="list-style-type: none"> • l'indice de langelier (IL) : IL = pH – pHs • l'indice empirique de Rynar (IR) : IR + 2 pHs-Ph → entartrage → corrosion vis-à-vis du fer et des aciers.
Na ⁺ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Ph, o*oxygène dissous.	Permet de déterminer l'indice empirique de Lucy (PPR) qui indique la tendance à la corrosion par piqûres de type 1 du cuivre dans les eaux froides. → corrosion vis-à-vis du cuivre.
SO ₄ ²⁻ /HCO ₃ ⁻	Suivant que ce rapport est >ou<1, il y a risque ou non de la corrosion par piqûres de types 2 pour le cuivre en eau chaude. → corrosion vis-à-vis du cuivre.
Fe ⁺³	→ corrosion vis-à-vis du cuivre.

[5]

I. 4 Corrosion des chaudières.

Bien que les chaudières à vapeur soient de différents types, elles sont essentiellement formées d'un réservoir d'eau en acier à bas carbone ou faiblement allié qui est chauffé par des gaz chauds. La vapeur peut ensuite passer dans une seconde chaudière construite en acier fortement allié, travaillant à des températures plus hautes que celles de la première chaudière. Pour un transfert de chaleur maximal, une série de tubes de chaudière est généralement incorporée, les gaz chauds passant soit autour des surfaces ouvertes ou, ce qui est moins

fréquent, autour des surfaces fermées des tubes. La vapeur, après avoir effectué son travail ou permis certains autres genres de service, atteint éventuellement un condenseur constitué en général de tubes en alliages de cuivre. La vapeur est refroidie d'un côté des tubes par le passage d'eau provenant du côté opposé. Ces eaux de refroidissement sont de différentes qualités qui vont de l'eau potable à l'eau polluée ou à l'eau saumâtre ou à l'eau de mer. La vapeur condensée retourne alors à la chaudière et le cycle recommence. Certains du côté opposé. Ces eaux de refroidissement sont de différentes qualités qui vont de l'eau potable à l'eau polluée à l'eau saumâtre ou à l'eau de mer la vapeur condensée retourne alors à la chaudière et le cycle recommence. [7]

La corrosion de la chaudière et des tubes de super chaudière pose quelquefois un problème du côté de la combustion du gaz, en particulier si des carburants contenant du vanadium sont utilisés comme fuel. Du côté vapeur, puisque dans les chaudières modernes on assure l'enlèvement de l'oxygène dissous de l'eau d'alimentation, une réaction se produit entre l'eau et le fer qui donne lieu à la formation d'un film protecteur de magnétite Fe_3O_4 selon la réaction suivante :



Le mécanisme de cette réaction, pour autant qu'il soit compris, indique que Fe_3O_4 ne se forme qu'en dessous de 570°C et, qu'au-dessus de cette température FeO se forme. Ce dernier alors se décompose au refroidissement en un mélange de magnétite et de fer suivant la réaction :



Les mesures de l'accumulation d'hydrogène dans les chaudières en fonction du temps aussi bien que la détermination des vitesses de corrosion obtenues en laboratoire, indiquent que le grossissement de l'oxyde obéit à une équation parabolique.

A plus basse température, par exemple à température ambiante ou à environ 100°C et probablement à des températures plus élevées avant que ne se développe un film de surface relativement épais, des expériences montrent que $\text{Fe}(\text{OH})_2$ est le produit de réaction initial. L'hydroxyde ferreux se décompose éventuellement, à une vitesse qui est fonction de la température, en magnétite et en hydrogène selon la première réaction proposée par Schikorr [8]



La réaction est inhibée par OH^- et accélérée par Ni^{++} , Pt^{+4} , le platine colloïdal et la poudre de nickel mais non par Mn^{++} .

Certains facteurs qui perturbent la couche de magnétite protectrice soit chimiquement, soit mécaniquement, provoquent une plus grande vitesse de réaction, généralement dans des régions localisées, produisant de la corrosion par piqûres ou parfois même la formation de trous dans les tubes de chaudière.

I.4.1 Traitement des eaux de chaudière du point de vue de l'anti-corrosion

Les eaux d'alimentation des chaudières sont traitées chimiquement à la fois pour réduire la corrosion de dépôts inorganiques dans les tubes de chaudières qui diminuent le transfert de chaleur. Dans le cas où la vapeur est employée pour la production de puissance. Les concentrations de silice et de silicates dans les eaux d'alimentation doivent aussi être réduites afin de diminuer la volatilisation de SiO_2 avec la vapeur qui cause la formation de dépôts dangereux à la surface des lames de turbine. Le contrôle de la formation des dépôts nécessite généralement la suppression de tous les sels de calcium et de magnésium par différents moyens qui incluent l'emploi de résine échangeuses d'ions ou l'addition de substances à l'eau qui favorisent la précipitation de boues plutôt que de dépôts continus adhérents le surface du métal.

Pour le problème de l'anti-corrosion, le traitement de base consiste à :

I.4.1.1 Suppression d'oxygène dissous et le CO_2 .

Pour les chaudières à haute pression, de l'oxygène dissous restant dans l'eau d'alimentation se combine quantitativement avec le métal de chaudière en causant généralement des piqûres sur les tubes et parfois des attaques généralisées par ailleurs. L'enlèvement de l'oxygène est obtenu par désaération de la vapeur suivi d'additions de produits tels que le sulfite de sodium ou l'hydrazine. La concentration finale en oxygène est généralement maintenue en dessous des valeurs ($< 0,005 \times 10^{-6} \text{ O}_2$ analysables par les méthodes chimiques d'analyse, par exemple par la méthode de Winkler.

La désaération s'accompagne d'une certaine réduction de CO_2 , en particulier si l'eau est acidifiée avant le processus de désaération afin qu'elle libère l'acide carbonique provenant des carbonates dissous. L'acide carbonique est corrosif vis-à-vis de l'acier en absence d'oxygène dissous et plus encore en sa présence mais l'addition d'alcali aux eaux de chaudière limite un peu la corrosion causée par CO_2 en convertissant CO_2 dissous en carbonates.

A la température de la chaudière, cependant, les carbonates se dissocient suivant la réaction :



Apportant de l'acide carbonique chaud au contact du condenseur et du système de retour. L'acier du système de retour de condensation souffre donc d'une corrosion sérieuse si la quantité de CO_2 contenue dans l'eau de chaudière est élevée. FeCO_3 soluble se forme qui retourne avec le condensât à la chaudière ou il se décompose en $\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2$, le CO_2 étant encore utilisable pour une corrosion ultérieure. Les systèmes de condenseurs en alliages de cuivre souffrent aussi de corrosion si l'oxygène dissous présent avec CO_2 mais l'attaque des alliages à base de cuivre est très faible en absence d'oxygène.

Puisque CO_2 n'est pas utilisé dans le processus de corrosion, il s'accumule de façon constante dans la chaudière avec chaque addition d'eau d'alimentation à moins que des vidanges périodiques ne soient effectuées.

I.4.1.2 Addition d'alcali.

L'addition de NaOH à l'eau réduit la vitesse de la réaction (3) à 310°C , selon les mesures de Berl et Van Taack [9] et à 100°C (essais de 100 à 150 H) selon les mesures de Thiel et Luckmann[10]. Berl et Van Taack ont utilisé de l'acier ordinaire en poudre (0,11%C) placé dans une bombe du même métal et effectué des essais de courte durée. Quelques doutes ont été exprimés au sujet de l'application des résultats aux conditions existantes dans les chaudières. Néanmoins, l'addition d'alcali aux eaux de chaudières constitue une pratique courante pour la plupart des chaudières à haute pression fonctionnant actuellement aux Etats-Unis et ailleurs.

Les chaudières à haute pression sont généralement alimentées en eaux traitées à un pH d'environ 10,5 à 11,0 (mesuré à température ambiante).

Dans les chaudières à basse pression ($< 17,5$ bars) cette valeur atteint généralement 11 à 11,5. Dans quelques chaudières à haute pression, en particulier en Allemagne, NH_3 utilisé de préférence à NaOH et les valeurs de pH sont plus basses.

Les valeurs des additions d'alcalis non volatils, pour certaines conditions d'ébullition, sont tirées d'une analyse statistique relative au fonctionnement de chaudières par potter. Sur un total de 513 chaudières fonctionnant en Angleterre sans addition d'alcali, 29 % ont montré des signes de corrosion des tubes, tandis que sur 211 chaudières utilisant de l'eau additionnée d'alcali, seulement 5 % étaient corrodées

L'excès d'alcali peut être une cause d'endommagement, la vitesse de corrosion augmente très rapidement lorsque le pH augmente au-dessus de 13. Le danger n'est pas tant que le pH initial de l'eau soit trop élevé mais que la concentration en alcali de l'eau, dans les zones de fissures telles que celles due aux rivets, à la fissuration de calamine, ou à un point chaud de la

surface d'un tube, puisse atteindre des valeurs supérieures au domaines de sécurité. Pour cette raison, on a pensé à ajouter des ions tamponnant tels que PO_4^{-3} (Na_3PO_4) qui limite l'augmentation du pH même si une concentration élevée se produit sans raison apparente.

De tels ions sont aussi utilisés pour éviter de semblable augmentation de la concentration en ions OH^- qui conduisent à la corrosion sous tension de certaines parties de chaudières qui présentent de fortes contraintes résiduelles ou des efforts appliqués. Le minimum de PO_4^{-3} recommandé dans ce but varie de 30 p. p. m. à pH 11. [11].

I.4.1.3 Addition d'inhibiteurs.

Il est actuellement possible d'ajouter des inhibiteurs pour contrôlé deux types de corrosion des chaudières, la corrosion sous tension et la corrosion à la ligne d'eau. Le premier type de corrosion peut être diminué par additions de phosphate comme nous venons de l'indiquer.

Des essais utilisant des détecteurs de fragilisation ont montré que les tannins sont des inhibiteurs efficaces dans ce but. L'extrait de quebracho, provenant de l'écorce d'un arbre de l'Afrique du sud qui porte le même nom, est l'un de ces tannins qui est quelquefois ajouté aux eaux de chaudière pour prévenir la formation des calamines. Des essais identiques, utilisant un détecteur de fragilisation, ont aussi montré que les nitrates sont efficaces quand ils sont additionnés sous la forme de NaNO_3 en quantité égale à 20 à 30% de l'alcalinité en NaOH de l'eau [11].

Ce traitement a été utilisé avec succès pour l'alimentation en eau des locomotives ; son emploi élimine pratiquement les phénomènes de corrosion sous tension.

La corrosion causée par le CO_2 dissous dans la vapeur condensée est ralentie par l'addition d'amine volatile à l'eau de chaudière. Il y a deux catégories d'amines volatiles utilisées à cette fin : 1) *les amines neutralisantes* et 2) *les amines filmogènes*. Le premier groupe inclut la cyclohexylamine, la benzylamine et la morphine.

Quand l'une de celles-ci est additionnée à l'eau de chaudière en quantité suffisante, elle neutralise l'acide carbonique et augmente le pH de la vapeur condensée vers une valeur alcaline pendant rendant le condensât moins agressif. Opérant à partir d'un principe différent, l'octacylamine volatile, l'hexadécylamine et la dioctadécylamine sont des inhibiteurs typiquement filmogènes. Ils protègent contre la corrosion en formant un film protecteur organique sur la surface du condenseur. Les amines filmogènes sont plus proches de la définition des inhibiteurs tandis que les autres amines sont généralement pour la plupart :

I.5 Mécanismes.

Les mécanismes de la corrosion des chaudières, ou l'inhibition de telles ou telle corrosions est encore mal connue et de nombreuses questions restent sans réponse. La question fondamentale est peut-être de savoir si des aditions chimiques sont nécessaires et si des

chaudières à haute pression ne fonctionnent pas plus efficacement, et ne présentent pas moins d'attaque par corrosion en employant de l'eau pure désaérée et rien d'autre. Un certain nombre de chaudières fonctionnent actuellement suivant ce principe.

La suppression de l' O_2 dissous est généralement considérée comme une étape nécessaire du traitement des eaux de chaudières. Cependant, il est peu probable que l'oxygène résiduel affecte la corrosion uniforme du fer qui donne Fe_3O_4 , parce que la réaction $Fe-H_2O$. Par contre, l'oxygène cause des dommages en initiant des piqûres, probablement à partir d'un phénomène d'aération différentielle. [12]

Les économiseurs, dans lesquels l'eau est chauffée avant d'entrer dans la chaudière, sont particulièrement susceptibles à la corrosion par piqûres si l'eau contient de l'oxyde dissous.

On ne sait pas exactement si les dernières traces d' O_2 , aux concentrations pour lesquelles les piles d'aération différentielle ne fonctionnent plus, doivent être totalement enlevées. Les traces d' O_2 , même si elles n'endommagent pas l'acier de chaudière directement, sont néanmoins dangereuses car elles causent l'attaque des condenseurs, particulièrement si CO_2 ou NH_3 est aussi présent dans le condensât. Une telle corrosion est suffisante pour contaminer la chaudière par de petites quantités de sels de cuivre. Bien que les condenseurs puissent être endommagés par ce type de corrosion, on ne sait pas exactement si la corrosion par piqûres des chaudières et initiée par le cuivre provenant de la contamination de l'eau. Cette contamination n'aurait pu, d'autre part, se produire si l'eau n'avait contenu des traces d' O_2 . On ne pense pas cependant, que les dépôts de cuivre à l'intérieur des chaudières produisent des piqûres ni que le cuivre modifie la qualité des films de Fe_3O_4 dans lesquels il peut être retrouvé. Il est possible, suivant l'opinion de certains chercheurs que le cuivre ait une incidence sur l'action galvanique et que les ions Cu^{++} se déposent sur les aires cathodiques au lieu de H^+ . Cette hypothèse peut se vérifier par le fait que de nombreuses chaudières contenant des sels ou des dépôts de cuivre ne sont pas corrodées.

En pratique, l'oxygène n'est pas toujours éliminé des eaux d'alimentations, en particulier dans de nombreuses chaudières de locomotives ou de navires ; mais pour les chaudières fonctionnant sous des pressions supérieures à 25 kg/cm^2 , la désaération de l'eau est un procédé courant. Dans le cas des chaudières de puissance fonctionnant en Angleterre sous les plus hautes pressions, Potter [13] a montré que les eaux de chaudières contenant moins de $0,043 \text{ p. p. m. d'oxygène}$ produisaient 2 fois moins de corrosion que les eaux plus chargées en O_2 .

Il a précisé toutefois que sur 86 chaudières de puissance fonctionnant avec de l'eau contenant moins de $0,043 \times 10^{-6} \text{ d}'O_2$, 27 présentaient néanmoins des corrosions de tubes de chaudière. Il a conclu à la nécessité de réduire la teneur en O_2 à une valeur inférieure à $0,05 \times 10^{-6}$, mais il reste à savoir si une désaération plus poussée serait susceptible de diminuer encore les risques de corrosion.

Ainsi, lorsqu'une chaudière est endommagée avec une eau traitée donnée, il n'est pas évident que le traitement, en général, soit bon ou mauvais. Une analyse statistique ou une recherche fondamentale des mécanismes de corrosion est nécessaire pour fournir une réponse finale (*traité au chapitre 3*) il y a probablement de nombreux facteurs tels que : composition de l'eau, conception de la chaudière, conditions de fonctionnement qui déterminent si la contamination par O₂ et Cu est endommageant. Jusqu'à ce jour, la nature de ces facteurs n'a pas été formellement établie.

I.5.1 Additions d'alcali.

Le mécanisme par lequel les additions d'alcali retardent la réaction Fe-H₂O n'est pas non plus très bien établi. Evans[14] a proposé que les alcalis en présence d'O₂ réduisaient la solubilité des hydroxydes et oxydes de fer en favorisant la précipitation de films de magnétite protectrice à la surface du métal, plutôt qu'au sein de la solution ou tout oxyde formé est non protecteur. Cependant un tel mécanisme doit conduire à une corrosion aux défauts de l'oxyde, car l'oxydation du fer à haute température est contrôlée par la diffusion à travers un oxyde anhydre plutôt que par libération d'ions métalliques hydratés qui plus tard réagissent pour contribuer à la formation du film de produits de corrosion.

Un excès d'alcali, d'une autre côté, peut lentement dissoudre le film de magnétite suivant la réaction :



En formant de l'hypoferrite de sodium ou ferrate Na₂FeO₂ + H₂.

Ce genre de réaction joue un rôle important dans le phénomène de corrosion par piqûre et la formation de trous dans les tubes de chaudière, et contribue à créer les vitesses excessives de corrosion du fer aux valeurs élevées du pH. Potter et Mann [15] trouvèrent qu'à 340°C, par exemple, l'épaisseur de la couche finale de magnétite formée dans un temps donné augmentait en même temps que la concentration de NaOH passait de 5 à 20 %, et que la vitesse suivait apparemment une loi parabolique. Les valeurs suggèrent que ces fortes concentrations en ions OH⁻ favorisent la formation de NaFeO₂ soluble et Na₂FeO₂ qui s'hydrolyse au refroidissement en Fe₃O₄ + NaOH mais dans ce cas une loi parabolique ne doit pas pouvoir s'appliquer.

I.5.1 Les suppresseurs d'oxygène.

L'emploi de sulfite de sodium comme suppresseur d'O₂ dans les chaudières à haute pression est déconseillé par certains spécialistes à cause de la décomposition des sulfites en sulfure ou SO₂ à haute température.

Cet emploi est satisfaisant en dessous de 46 bars (260°C) de pression de vapeur, mais à 64 bars (280°C), par exemple, la rupture de tubes de surchaudière est attribuée aux produits de décomposition acide de Na₂SO₃.

On a supposé que l'une des réactions possibles de la décomposition pouvait être :



L'emploi d'oxygène n'est pas sujet à des telles objections, mais la réaction lente avec O₂ et sa décomposition partielle en NH₃ doivent être prise en considération pour son dosage. De plus, la présence d'NH₃ est une cause possible de corrosion sous tension d'alliages à base de cuivre dans les installations de condenseurs, si O₂ contamine accidentellement le condensât. La corrosion sous tension des alliages à base de cuivre et l'attaque uniforme des condenseurs contenant NH₄OH ne se produisent pas en absence d'O₂ ou d'autres dépolarisants.

I.5.3 Inhibiteurs. Proportion de sulfate.

Les raisons pour lesquelles les tanins inhibent la corrosion sous tensions ne sont probablement pas à inclure avec l'adsorption préférentielle de OH⁻ dans les chaudières à température élevée la faible liaison caractéristique des molécules organiques avec les tanins agissaient comme suppresseurs d'O₂ dissous mais une telle fonction ne devrait pas nécessairement affecter la corrosion sous tension car on n'a jamais signalé de tels dégâts dans les solutions de soude exemple d'O₂. On peut supposer que les composés du sodium sont formés entre les tanins et la soude et qu'ils agissent comme des ions tamponnants de la même façon que PO₄⁻³, mais ceci n'a pas été prouvé. Ils peuvent agir aussi en bouchant les fissures, en particulier près des joints soudés ou l'eau de chaudière se concentre.

L'action inhibitrice des nitrates est aussi difficile à expliquer. Tel mécanisme, par exemple, qui explique leur effet bénéfique sur les chaudières doit aussi expliquer leur influence accélératrice sur la corrosion sous tension de l'acier dans les solutions bouillantes de NaOH à la pression atmosphérique.

Certains rapports entre la quantité de sulfate et d'hydroxyde ont été conseillés pour inhiber la corrosion sous tension. De tels rapports cependant, ne peuvent éviter les fissures dans le test employant un détecteur de fragilisation, et l'emploi de sulfate dans ce but a été totalement abandonné. Cette recommandation provient apparemment des observations faites en Illinois (sur l'influence des eaux locales riche en NaHCO₃ et pauvres en sulfates vis-à-vis de la corrosion sous tension des chaudières. L'influence endommageant pouvait être

supprimée par le traitement des eaux avec l'acide sulfurique .de plus, des essais de laboratoire ont montré que la corrosion sous tension de l'acier, bien qu'elle ne soit pas totalement éliminée, se produit pour des temps beaucoup plus long quand le rapport Na_2SO_4 à NaOH de l'eau augmente. L'hypothèse avancée, indiquait que le sulfate agissait comme inhibiteur, tandis que la cause la plus probable doit être recherchée dans le traitement par l'acide sulfurique qui élimine les carbonates dans les chaudières qui autrement s'hydrolyseraient en NaOH. [15].

Chapitre II

Principe de la séparation

II. Généralités sur le gaz naturel

- Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbure légers comprenant du méthane (CH_4) en grande proportion, ainsi que d'autres hydrocarbures gazeux tels que : l'éthane, propane, butane, pentane en proportion décroissante. Sa composition révèle en outre suivant les cas, la présence d'hélium, d'azote, de gaz carbonique d'hydrogène sulfuré et de vapeur d'eau.

- le gaz naturel est une source d'énergie souple et non polluante, ainsi qu'une matière première importante.

Pour ces raisons, le commerce international du gaz naturel et en plein développement et l'Algérie y joue un rôle actif.

Les distances parfois très importantes, séparant les puits de production des centres de consommation de GN nécessitent la mise en place de réseau de transport de gaz. Lorsque le transport met en œuvre un réseau terrestre de moyenne distance, la solution par gazoduc est la plus adoptée et la plus économique et ne pose pas de difficulté technique majeure. Par contre la traversée d'une mer pose un problème plus difficile. En effet, le GN est une source d'énergie très peu dense, ce qui exclut son simple transport par bateau, même sous pression. Ainsi des solutions techniques ont été retenues jusqu'à présent : la conduite sous-marine et la liquéfaction.

II.1 Procédé de séparation

Le procédé de séparation est un procédé qui transforme un mélange de substances en deux ou plusieurs produits distincts.

Ce procédé est couramment utilisé dans l'industrie de raffinage et de pétrochimie à savoir la distillation.[6]

II.1.1 La distillation

L'opération consiste à fractionner un mélange en une série de fractions élémentaires.

a. Définition

la distillation est un procédé de séparation consistant à chauffer un liquide jusqu'à ce que ses constituants les plus volatiles – ceux qui ont le point d'ébullition le plus bas – passent en phase vapeur, cette dernière étant ensuite condensée pour récupérer les constituants devenus liquides.

II.1.2 Principe de la distillation

La vaporisation d'un mélange permet d'obtenir deux phases.

- Une phase vapeur riche en légère mais contenant encore des traces de lourds.
- Une phase liquide riche en lourds mais contenant encore des légers.

En continuant à vaporiser le mélange, la phase vapeur va augmenter jusqu'à la séparation ; la concentration des constituant du mélange initial se trouvera entièrement sous forme de vapeur à partir de ce mélange.

Si on condense la vapeur obtenue avant sa vaporisation complète, on obtient un liquide de même composition que celle de la phase vapeur avant sa condensation ; c'est-à-dire un liquide riche en produit légers.

Si on maintient cette phase liquide en ébullition, elle va émettre des vapeurs encore plus riches en produits légères, qui, après condensation et vaporisation donneront un produit de plus en plus riche en légers au fur et à mesure que l'opération sera répétée pour arriver à une séparation, il faudrait donc procéder à des condensations et des vaporisations successives : c'est la distillation fractionnée. A chaque étape l'énergie sera nécessaire.

Ces distillations successives se font dans des colonnes munies de plateaux.

Le courant de vapeur est ascendant tandis que le liquide provenant de la condensation partielle des vapeurs, rétrograde des plateaux supérieurs vers les plateaux inférieurs par gravité.

Des échanges de chaleur sont réalisés par les fluides eux mêmes (vapeur et condensât). La phase vapeur émise au plateau inférieur étant plus chaude que la phase liquide du plateau suivant (apport de calories par la phase vapeur à la phase liquide, condensation partielle de la phase vapeur et vaporisation partielle de la phase liquide etc....).

II.1.3 Description d'une installation de distillation

L'équipement de base nécessaire à toute distillation sont :

- La colonne
- Le condenseur
- Le rebouilleur (c'est l'échangeur le plus touché par le problème de percement des tubes au niveaux du complexe).

a. La colonne :

La colonne est constituée par une succession de plateaux aux niveaux desquels existe un équilibre liquide- vapeur qui lui est propre.

On constate ainsi que pour une pression et une alimentation de composition données, le paramètre déterminant est la température ; qu'il s'agit de maintenir à une valeur fixée pour chacun des plateaux.

b. Le condenseur :

C'est un échangeur chargé de condenser les vapeurs de tête au moyen d'un fluide réfrigérant.

c. Le rebouilleur :

C'est un échangeur qui permet de fournir les calories nécessaires à la vaporisation des produits de fond. Les rebouilleurs du fractionnement sont des appareils fonctionnant sur le principe des thermosiphons.

La circulation du fluide se fera uniquement par augmentation de la température par transfert de chaleur et diminution de la densité du liquide.

Il est alimenté par une partie du liquide de fond de la colonne ayant un niveau constant. Son fonctionnement ne peut se faire qu'avec un niveau suffisant de liquide dans la zone de rebouillage. L'autre partie de fond cloisonnée sert au soutirage des produits de fond (niveau variable).

(voire annexe –colonne de distillation-).

II.2 Rôle de la séparation

- Débarrasser le GN des hydrocarbures lourds (C_5 et +) pour éviter qu'ils ne gèlent pendant la liquéfaction.
- Récupérer au fractionnement le C_2 , le C_3 , le C_4 et le C_5+ réinjections, appoint vers MCR, appoint vers la boucle propane, commercialisation ou stockage.

II.3 Fractionnement

Le système de fractionnement sépare les hydrocarbures les plus lourds éliminés dans la tour de lavage et prépare les constituants nécessaires à l'alimentation interne des diverses sections de l'usine qui sont :

- L'éthane d'appoint pour le réfrigérant mixte MCR et le gaz naturel liquéfié.
- Propane d'appoint pour le système propane, le MCR et le gaz naturel liquéfié.
- Butane d'appoint du GN d'alimentation de l'échangeur principale
- Gazoline comme combustible des chaudières et éventuellement comme produit commercialisable
- Eventuellement butane et propane destinés à la commercialisation (GPL)
- Gaz combustible de procédé des chaudières.

Chapitre III

Différents types d'échangeurs de chaleur

III. Les échangeurs :

C'est un dispositif établi pour l'efficacité du transfert thermique d'un milieu à l'autre, si les médias sont séparés par un mur plein de sorte qu'il ne se mélangent jamais, ou les médias sont en contact direct, ils sont employés couramment dans le chauffage d'espace, la réfrigération, le climatisation, les centrales électriques, les usines pétrochimiques, les raffineries de pétrole, et le traitement du gaz naturel. Un exemple commun d'un échangeur de chaleur est les radiateurs dans une voiture, en commun laquelle un fluide de moteur refroidissement chaud, antigel, la chaleur de transfert à l'air traversant le radiateur. [16]

Les échangeurs les plus utilisés peuvent être classés, de manière simple, en fonction de leur nature (condenseur ou évaporateur) et de leur type de construction (tubulaires, à plaques ou à ailettes). Les tableaux ci-après présentent les principaux échangeurs utilisés.

Tableau. (II.4) : Nature des échangeurs

Echangeur	Nature d'échange	Milieu	Conception
Condenseurs	A chaleur sensible	A air	Circulation naturelle, tubes lisses ou à ailettes Circulation forcée, tubes à ailettes
		A eau	Immersion Double tube et contre courant Tube et calendre
	A chaleur latente	Atmosphérique	Multitubulaire vertical A ruissellement
		A évaporation et circulation forcée	Condenseurs « évaporatifs »
Evaporateurs	A chaleur sensible	A eau A frigoporteur	Tube en tube (coaxial) Tube et calendre, évaporation intra tubulaire Tube et calendre, évaporation extra tubulaire
	A chaleur sensible/latente	A air	Tube Tube et ailettes

Tableau. (III.5) : Principe de construction des échangeurs [5]

Type d'échangeur	Conception	Matériau
tubulaire	Tube en tube (coaxial)	Cuivre /cuivre
	Tube et calendre	Cuivre/acier
	spirale	
A plaques	A joints Spirale Brasé/ soudé	Inox/cuivre
A ailettes	Tubes et ailettes	Cuivre/ aluminium
	Plaques et ailettes	Alu / Alu Cuivre/cuivre

III.1 Quelques notions sur les échangeurs

L'échangeur de chaleur est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid sans contact direct entre les deux fluides. Le même fluide peut conserver son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases : c'est le cas des condenseurs, évaporateurs, bouilleurs, ou des tours de refroidissement.

En principe, pour les échangeurs les plus courants dans l'industrie, les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison à faible inertie thermique au travers de laquelle les échanges se font par conduction. En effet, la chaleur que l'un des fluides cède à la paroi par convection le long de la surface de contact est transférée par conduction et, est cédée à l'autre fluide par convection le long de l'autre face. Le rayonnement n'intervient de manière significative que s'il existe des différences de température très importantes entre un fluide semi-transparent et la paroi.

De par leurs différentes applications, les caractéristiques des échangeurs se situent dans une gamme très étendue en encombrement, en puissance échangée, en pression et en température. Les exigences de fonctionnement, les différentes normes imposées par le législateur pour la conception de tels appareils, les technologies ainsi que les matériaux utilisés sont inévitablement variés et difficilement comparables.

Il devient donc difficile d'établir une classification rigoureuse sans faire le choix incontestablement restrictif d'un critère. Le plus souvent, les échangeurs de chaleur sont classifiés selon la configuration d'écoulement des fluides considérés et selon leur type de construction. [17]

III.2 Critère de classement des échangeurs

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Enumérons les principaux :

III.2.1 Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- à tubes : monotubes, coaxiaux ou multi tubulaires ;
- à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;
- autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

III.2.2 Classement suivant le mode de transfert de chaleur

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.) ; il

Il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient.

III.2.3 Classement suivant le procédé de transfert de chaleur

Suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement en récupérateur ou en régénérateur de chaleur :

- *transfert sans stockage*, donc en récupérateur, avec 2 ou n passages et un écoulement en général continu ;
- *transfert avec stockage*, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique.

III.2.4 Classement fonctionnel

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivants :

- les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- un seul fluide a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;
- les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapo condenseurs.

III.2.5 Classement suivant la compacité de l'échangeur

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K. Shah propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à $700\text{m}^2/\text{m}^3$; cette valeur est susceptible de varier de 500 à $800\text{m}^2/\text{m}^3$.

III.2.6 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de parois :

- les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

III.2.7 Classement suivant la compacité de l'échangeur

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K. Shah propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa

compacité est supérieure à $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$; cette valeur est susceptible de varier de 500 à $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Une classification en fonction de la compacité peut être donnée :

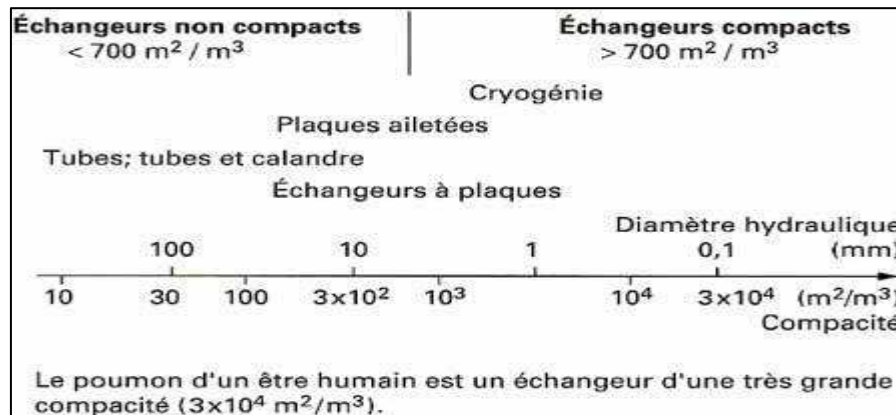


Fig. (III.3) : La compacité de l'échangeur.

III.3 Quel choix proposer ?

Ces différents groupes peuvent se recouper ; aussi choisirons-nous pour décrire les échangeurs :

Tout d'abord, les échangeurs tubulaires et à plaque pour des raisons technologiques ;

Puis, les évaporateurs et condenseurs pour leurs applications ;

Et, enfin quelques autres types d'échangeurs en fonction de la nature de la paroi.

Le choix d'un échangeur de chaleur pour une application donnée dépend de nombreux paramètres : les propriétés physiques des fluides, leur agressivité, les températures ainsi que les pressions de service. Les contraintes d'encombrement et de maintenance doivent aussi être prises en compte, ainsi que les considérations économiques. [18]

III.4 Principaux modes d'écoulement des deux fluides

On peut distinguer 3 modes d'écoulement différents.

III.4.1 Écoulement des deux fluides parallèles et de même sens

Il s'agit d'échangeurs dits à co-courants ou la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Les températures des fluides évoluent pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase, auquel cas sa température reste constante.

La Figure 4 donne l'évolution qualitative de ces températures le long d'un échangeur tubulaire à co-courants très simple. La longueur de l'échangeur a été portée en abscisse [20]. Les températures sont repérées à l'aide d'indices e signifiant *entrée* et s signifiant *sortie*, 1 désignant les fluides chauds et 2 le fluide *froid*.

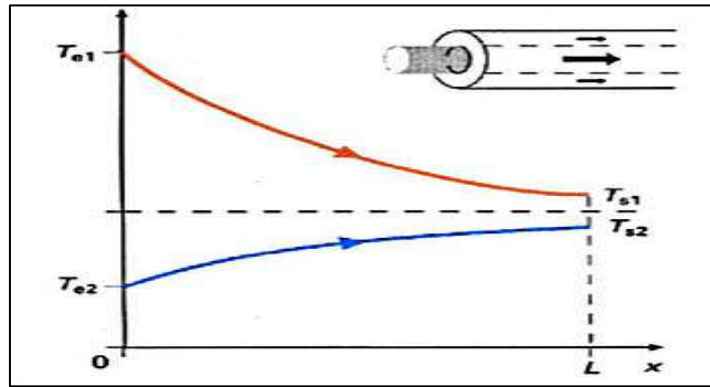


Fig. (III.4) : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courant

III.4.2 Ecoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraires

Il s'agit d'échangeurs à contre-courant ou la température de sortie du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange thermique. De la même façon que précédemment, la longueur de l'échangeur considéré a été portée en abscisse Fig. (III.5). Les températures sont repérées à l'aide d'indices e signifiant entrée et s sortie. [19]

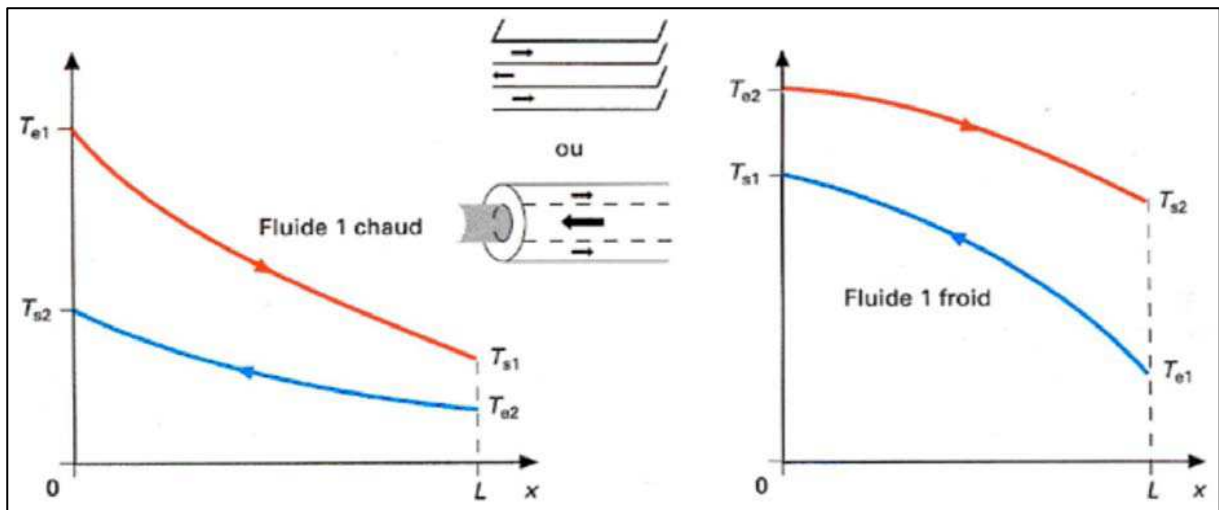


Fig. (III.5) : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre-courants

L'avantage de l'échangeur à contre-courant sur l'échangeur à co-courants est de nécessiter, pour un même flux de chaleur, des surfaces d'échanges plus faibles.

III.4.3 Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre (Fig.III.6). Le fluide non brassé est canalisé : c'est celui dont la veine est divisée entre plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section. L'autre fluide circule librement entre les veines et peut être considéré comme partiellement brassé du fait des tourbillons générés par les tubes. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures variant non seulement avec la direction de l'écoulement, mais aussi dans la section de veine. Une représentation schématique d'échangeur à courants croisés est donnée Fig. (III.6).

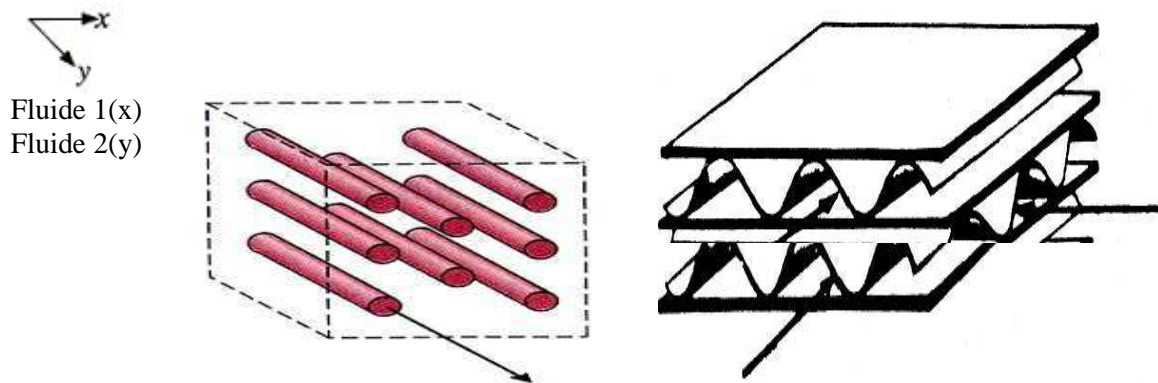


Fig. (III.6) : Exemple d'échangeurs à courant croisés

Les trois écoulements précédemment décrits, à co-courants, à contre-courants, à courant croisés sont rarement utilisés dans toute leur simplicité. En effet, un échangeur se réduit rarement à un tube unique ou deux plaques ; néanmoins, l'étude de ces cas élémentaires, dans le cadre d'une première approche, est nécessaire : l'échangeur industriel étant en général constitué par un grand nombre de tubes ou plaques créant ainsi des problèmes supplémentaires.

Par ailleurs, la conception des échangeurs de chaleur introduit le choix entre deux géométries élémentaires principales :

- les tubes qui fixent l'espace dévolu seulement à l'un des deux fluides.
- Les plaques, planes ou corruguées, choisies pour un fluide qui impose la même géométrie pour l'autre.

Souvent, le choix des combinaisons entre différents types d'échangeurs dans les installations industrielles résulte de contingences technologiques et économiques.

III.5 Différents types d'échangeur de chaleur

Les principaux types d'échangeurs de chaleur rencontrés sont les suivants :

- les échangeurs tubulaires ;
- les échangeurs à plaques ;

Compte- tenu des diverses applications dans lesquelles interviennent les échangeurs de chaleur et de leurs développements actuels, nous n'avons pas ici, la prétention de fournir une liste exhaustive des différentes configurations existantes.

III.5.1 Les échangeurs tubulaires

Les échangeurs tubulaires représentent encore près de la moitié des échangeurs thermiques vendus en Europe [20]. Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier ils sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisés à des pressions élevées et à de fortes températures. Leur robustesse et leur fiabilité contrebalancent leur encombrement. On distingue, le plus souvent, trois catégories :

les échangeurs monotubes pour lesquels le tube est placé dans un réservoir (Fig.(III.7a).

- les échangeurs coaxiaux pour lesquels les tubes sont le plus souvent cintrés ; Fig. (III.7b)
- les échangeurs multitubulaires qui existent sous 4 formes :
 - a) **les échangeurs à tubes séparés** : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises. Fig. (III.7c)
 - b) **Les échangeurs à tubes rapprochés** : les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire de rubans enroulés en spécial autour de certains d'entre eux. Fig. (III.7d)
 - c) **Les échangeurs à tubes ailetés** : qui permettent d'améliorer le coefficient d'échange : lorsque l'un des fluides transitant dans l'échangeur s'avère moins bon caloporteur que l'autre, l'utilisation d'ailettes autour des tubes ou dans les tubes s'impose pour que la résistance thermique globale ne soit pas entièrement due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange thermique. Fig. (III.7e)

Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons :

- **les ailettes transversales** divisées en deux groupes : les ailettes continues qui sont traversées par plusieurs tubes et qui sont généralement de forme rectangulaire planes ou ondulées, et les ailettes indépendantes qui sont traversées par un seul tube et qui peuvent être annulaires ou hélicoïdales, pleines ou segmentées. Elles peuvent être aussi à fil préformé, poinçonnées ou en brosse Fi. (III.8).
- **les ailettes longitudinales** qui sont disposées selon l'axe des tubes et qui peuvent être localement torsadées. Fig. (III.9)

- d) **les échangeurs à tubes et calandre** : ou la calandre est une enveloppe métallique cylindrique entourant un faisceau de tubes : ils possèdent une boîte de distribution c'est-à-dire un dispositif qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités des tubes. Ils peuvent être à boîte fixe, à boîte flottante, ou à tubes en U avec une boîte à chaque extrémité de l'échangeur. Les tubes peuvent être supportés par des chicanes afin

d'augmenter la vitesse du fluide dans la calandre dans le but d'améliorer le coefficient d'échange. Pour cela, un compromis doit être trouvé pour avoir simultanément un coefficient d'échange global et des pertes de charge acceptables. Fig. (III.7f)

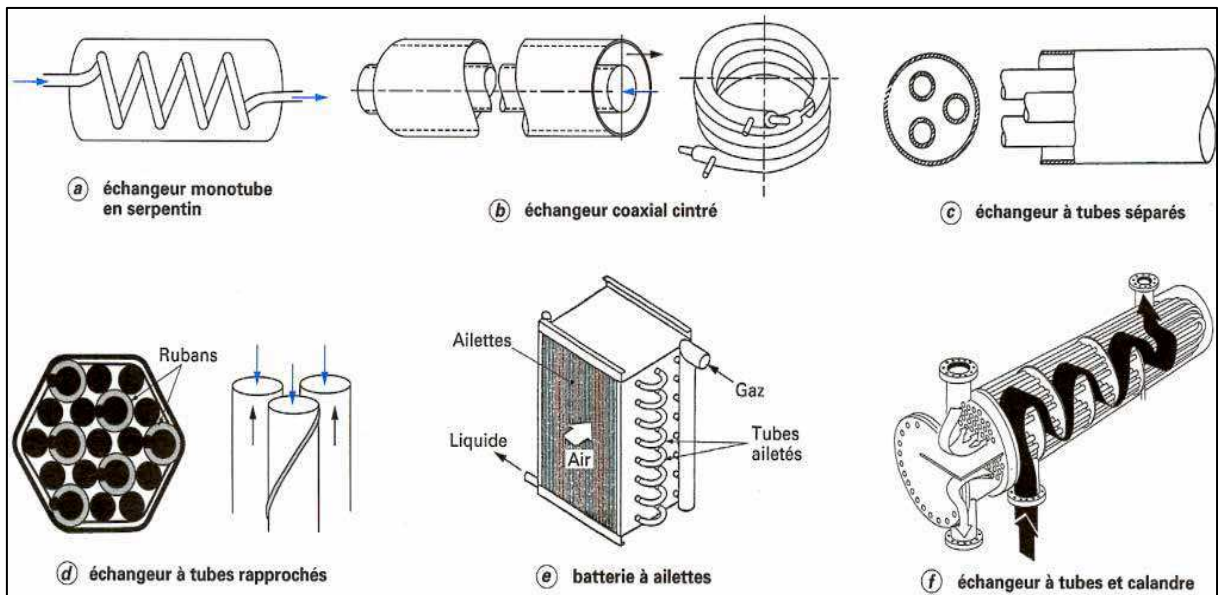


Fig. (III.7) : Différents types d'échangeurs tubulaires.

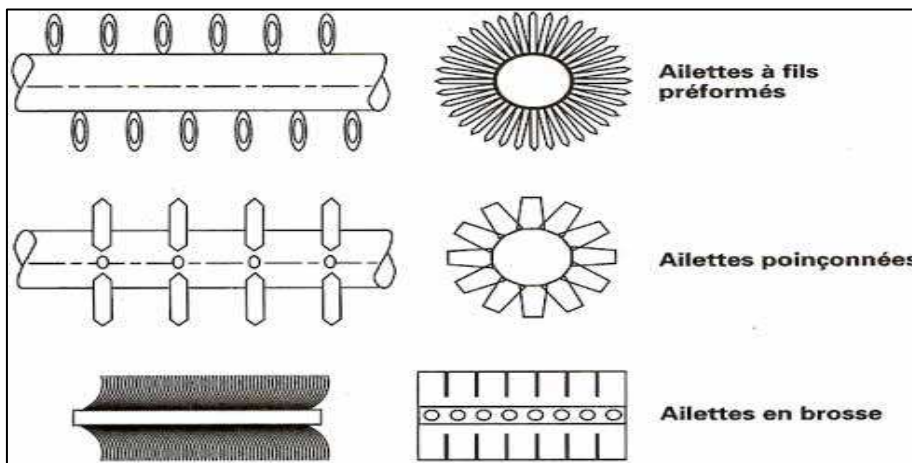


Fig. (III.8) : Ailettes transversales.

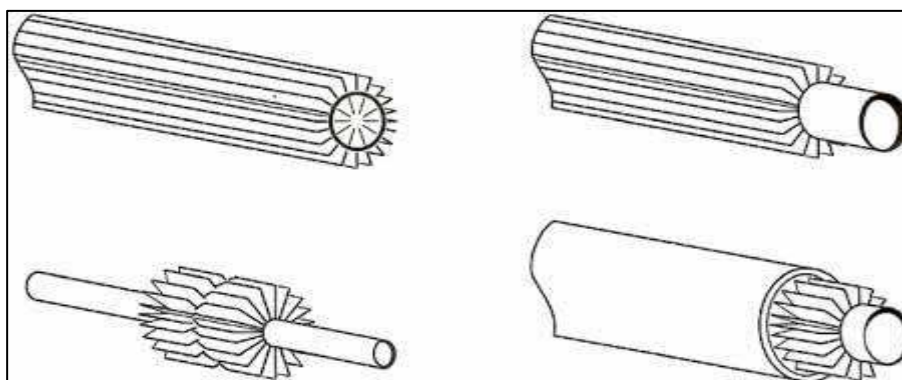


Fig. (III.9) : Tube avec différents types d'ailettes longitudinales.

III.5.2 Les échangeurs à plaques

De création plus récente que les échangeurs tubulaires, les échangeurs à plaques ont subi depuis leur création, il y a environ 60 ans, des améliorations substantielles. Ils sont formés par l'empilement d'un ensemble de plaques métalliques embouties, au travers desquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides. S'ils ne peuvent pas toujours être utilisés pour les températures élevées et les fortes pressions, les échangeurs à plaques bénéficient d'avantages tenant notamment à leur meilleur rendement et à leur compacité. Plusieurs technologies sont en concurrence. La principale, et la plus ancienne, est celle des échangeurs à plaques avec joints. Un joint par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques. Ces échangeurs ne peuvent être utilisés que pour des pressions maximales de 30 bars et des températures maximales de 200 degrés Celsius.

D'autres technologies plus récentes permettent de remédier aux inconvénients de l'existence de joints, comme les échangeurs à plaques soudées. Les échangeurs à plaques soudées sont adaptés à l'utilisation de fluides encrassant corrosifs, chauds, sous pression, présentant des débits très différents de part et d'autre de la surface d'échange.

Il existe d'autres échangeurs à plaques dont la diffusion est moins importante tels que les échangeurs à spirales et les échangeurs à plaques brassées. Les échangeurs à plaques brassées sont formés de plaques embouties, mais sans joint, qui forment ainsi un appareil compact et résistant à hautes pressions. Les échangeurs à spirales sont constitués de deux rubans de tôle gaufrée, enroulés et maintenus parallèles et où la circulation du fluide est de type monocanal à courant parallèles ou croisés. Reste encore les échangeurs à plaques serties qui sont constitués d'un assemblage de tôles planes parallèles entre lesquelles sont disposées des ailettes.

On distingue suivant la géométrie de canal utilisée les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire.

Parmi les échangeurs à surface primaire, le type le plus commun est l'échangeur à plaque et joints, dont les applications sont limitées par la pression maximale de service et par la pression différentielle entre les deux fluides. On peut réaliser industriellement aujourd'hui des échangeurs fonctionnant à des pressions de l'ordre de 15 à 20 bar ; la température maximale de service est limitée par la nature des joints. On admet, comme limite supérieure d'utilisation des joints standards, une valeur de l'ordre de 150°C et de 230°C pour les joints spéciaux.

Les échangeurs avec plaques soudées ou brasées permettent d'utiliser ces surfaces d'échanges primaires à des niveaux de températures et de pression plus élevés que les échangeurs à plaques et joints. Tous les fluides peuvent être véhiculés dans ces échangeurs, mais les fluides encrassant sont à utiliser avec précaution. Fig. (III.11).

a/ Echangeurs à plaques et joints

La surface d'échange est alors composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de titrant entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile.

b/ Echangeurs à plaques soudées ou brasées

Ils sont utilisés en récupération de chaleur, dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agro-alimentaire, etc.

c/ Les échangeurs à surface secondaire utilisent des ailettes plissées ou ondulées qui sont insérées entre les plaques. Pour des applications sur l'air atmosphérique, ces échangeurs sont fabriqués en tôlerie légère alors que, pour des applications cryogéniques ou aéronautiques, les matériaux utilisés sont l'aluminium ou l'acier inoxydable, l'assemblage de l'échangeur se faisant au moyen d'une technique de brassage sous vide.

d/ Echangeurs à plaques serties

Ces échangeurs sont constitués de tôles planes parallèle entre lesquelles sont disposées des ailettes ; ils sont en générale fabriqués en tôlerie légère (acier galvanisé, acier inoxydable, aluminium, etc.). Les fluides empruntent un canal sur deux et la circulation est soit à contre-courant, soit à courants croisés. Les ailettes sont de types très variés. Ces échangeurs sont en général utilisés en récupération sur l'air.

e/ Echangeurs à plaques brasées

Ces échangeurs sont en aluminium brasé. Les fluides circulent dans des passages définis par deux tôles planes consécutives et fermés latéralement par des barres.

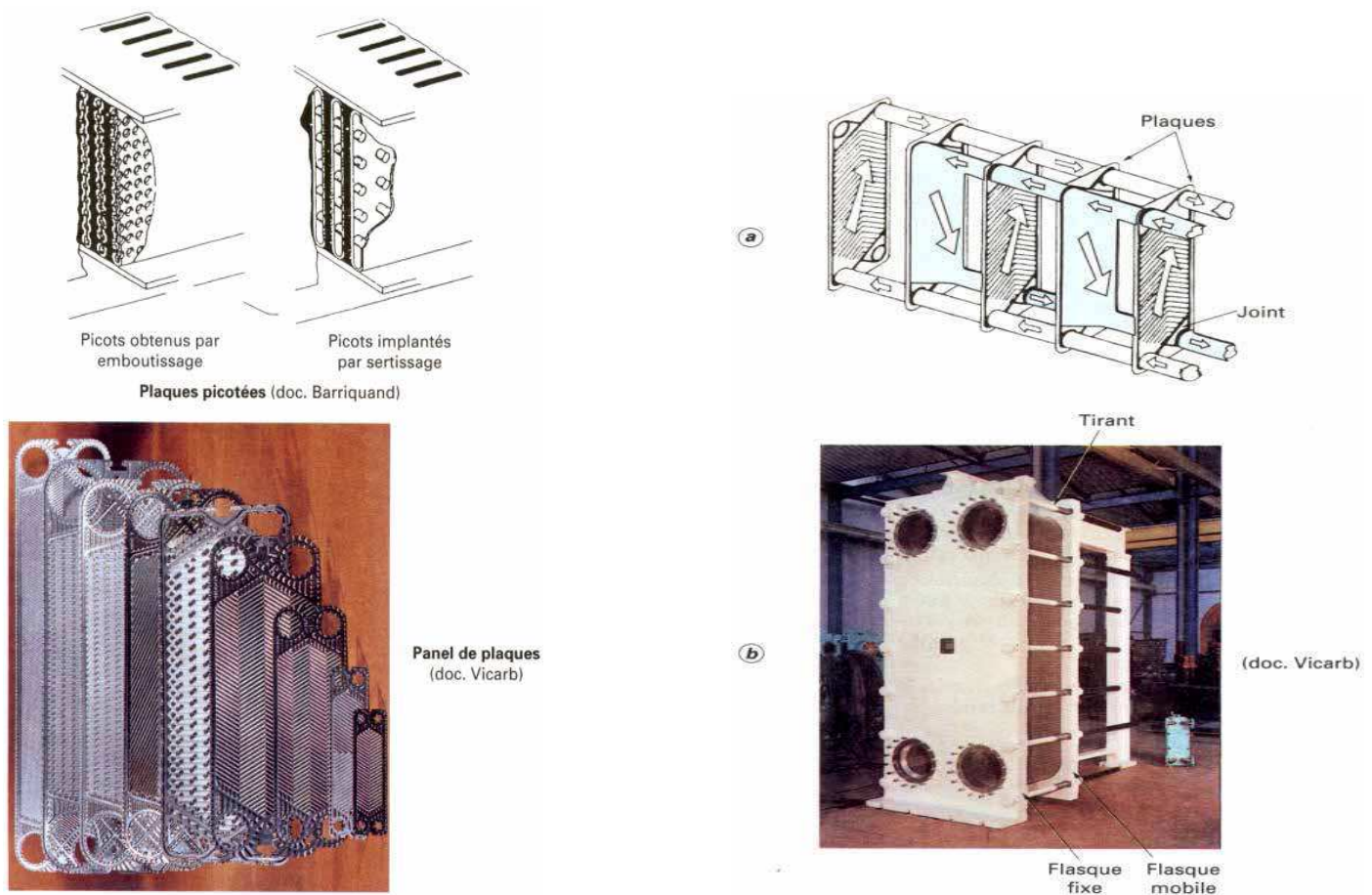


Fig.(III.10) : Différentes géométries de plaques d'échangeurs

Fig(III.11) : Echangeurs à plaque et joints (à surface primaire).

III.6 Autres types d'échangeurs

Parmi les échangeurs thermiques, il convient également de citer les échangeurs où l'un des deux fluides change de phase. Il s'agit du cas particulier des évaporateurs tubulaires ou à plaques – où le fluide froid chaud passe de l'état gazeux à l'état liquide. Ils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide ou produire de la vapeur.

Pour résoudre ses problèmes d'échanges thermiques, l'utilisateur se trouve devant une grande variété de produits, dont les principales catégories sont, rappelons le, les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques. Toutefois, la technologie de ces types d'échangeurs porte surtout sur l'utilisation de nouveau matériau ainsi que sur les conditions d'amenée des fluides. Les matériaux les plus utilisés dans les échangeurs sont les aciers inoxydables et le titane, mais d'autres matériaux sont également employés, notamment pour limiter l'effet des phénomènes de corrosion, comme le graphite, la céramique, le verre et les plastiques.

L'objectif est d'améliorer la résistance des échangeurs afin de les rendre plus fiable lorsqu'ils sont utilisés dans des cycles thermiques.

Une autre technologie vise à diminuer l'encombrement des échangeurs par le développement d'échangeurs compacts ou même de micro échangeurs [21].

Sont encore des échangeurs, mais un peu moins courants, les appareils suivant :

- les échangeurs à lit fluidisé
- les échangeurs à contact direct
- les échangeurs à fluide complexe

III.6.1 Evaporateurs tubulaires

Ces appareils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide, ou produire de la vapeur. Le fluide chauffant peut être une phase liquide qui transmet sa chaleur sensible ou de la vapeur cédant sa chaleur latente de condensation sur la paroi.

Il existe deux types d'évaporateurs, ceux où l'évaporation se produit à l'intérieur des tubes et ceux où elle se produit à l'extérieur des tubes. [22]

II.6.1.1 Evaporateur à l'intérieur de tubes

On distingue les évaporateurs à tubes verticaux et ceux à tubes horizontaux.

III.6.1.1.1 Evaporation à tubes verticaux

Ces appareils sont utilisés pour concentrer une solution, fournir de la vapeur nécessaire au réchauffement d'un fluide à distiller (*rebouilleurs à colonnes*) ou comme évaporateurs cristalliseurs. Les tubes sont généralement chauffés extérieurement par de la vapeur qui se condense.

a. Evaporateurs à tubes courts fig. (III.12a) : la longueur des tubes ne dépasse pas 3 m et leur diamètre est compris entre 20 et 60mm. Le fluide circule du centre du faisceau vers les tubes périphériques généralement en circulation forcée ; les tubes sont alimentés de bas en haut. On dispose un séparateur de gouttelettes à la sortie de la vapeur et on choisit une surface de dégagement importante pour limiter l'entraînement des gouttelettes. Le séparateur peut être intégré au corps de l'évaporateur. Si ces appareils sont utilisés comme cristalliseurs, il faut éviter d'atteindre le point d'ébullition avant que le liquide ne quitte les tubes (dépôts encrassant) ; on peut récupérer les cristaux au bas de l'évaporateur.

b. Evaporateurs à panier fig. (III.12b) : ce sont des évaporateurs à tubes courts mais à circulation naturelle. Le liquide chauffé par la vapeur monte dans les tubes, puis redescend

par l'espace annulaire compris entre le faisceau et la calandre (espace de section supérieure à celle des tubes). En utilisation en cristalliseurs, les géométries et vitesses doivent être choisies de manière à recycler les petits cristaux et à décanter les plus gros. Le faisceau peut être facilement retiré pour des opérations d'entretien.

L'entraînement des gouttelettes est limité par l'utilisation d'un séparateur et d'une surface de dégagement convenablement choisie.

c. Evaporateurs à long tubes verticaux fig. (III.12c) : la longueur des tubes est de 6m ou plus, pour un diamètre inférieur à ceux des évaporateurs à tubes courts. A surface d'échange égale, le nombre de tubes est inférieur à celui des évaporateurs précédents. Le recyclage du liquide est externe et presque toujours à circulation forcée.

Le recyclage du liquide est externe et presque toujours à circulation forcée. Les coefficients d'échanges thermique sont relativement élevés mais la charge hydrostatique de liquide dans les tubes réduit l'écart de température utile (très pénalisant pour une ébullition sous vide) et peut induire une surchauffe du bas des tubes.

d. Evaporateurs à grimpage (fig.III.12d) :

Ce sont des évaporateurs à longs tubes verticaux à circulation naturelle : cette conception favorise la montée du liquide dans les tubes sous l'effet de la poussée des bulles de vapeur. La charge hydrostatique dans les tubes est faible, ce qui permet une ébullition au bas des tubes, d'où un coefficient d'échange thermique global élevé. Le recyclage est externe et, dans certains cas, il n'est pas nécessaire, sauf pour éliminer tout risque de dépôt encrassant. Le débit par unité de périmètre adopté pour assurer un bon mouillage des tubes est de l'ordre de $0,6\text{m}^3/(\text{h.m})$.

Evaporateurs à film tombant fig. (III.12e) : le liquide pénètre dans les tubes par le haut et ruisselle sur la paroi intérieure jusqu'au bas. La vapeur produite circule, dans la plupart des cas, à co-courant avec le liquide pour des questions d'équilibre des phases et d'entraînement. Un bon mouillage des tubes est nécessaire pour assurer un bon fonctionnement. Le débit pour y parvenir est plus important que celui du grimpage [1 à $3\text{m}^3/(\text{h.m})$]. La récupération du liquide sur la plaque tubulaire puis sur la périphérie interne du tube est primordiale pour obtenir ce bon mouillage jusqu'en bas. Les tubes doivent être parfaitement verticaux pour éviter la rupture du film. La vapeur produite circule à contre-courant du liquide, il faut veiller à ne pas atteindre la vitesse d'engorgement. Le débit d'évaporation sera choisi afin de limiter l'entraînement des gouttelettes.

III.6.1.1.2 Evaporateurs à tubes horizontaux

Ces appareils sont généralement utilisés comme refroidisseurs de liquide (eau, saumure, eau glycolée, etc.). Le liquide à évaporer qui circule dans les tubes est un fluide frigorigène (R22, R134A, NH_3 , etc.), alors que le fluide à refroidir circule à l'extérieur des tubes.

a. Evaporateurs multi passes a tubes et calandre : contrairement à ceux à tubes verticaux, ils présentent généralement plusieurs passes sur le fluide frigorigène. Ces passes (2 à 6 suivant la conception retenue) présentent souvent des tailles inégales. Ainsi les passes admettent souvent un nombre croissant de tubes au fur et à mesure que le titre de vapeur augmente.

Pour le fluide externe, on retrouve une conception classique des échangeurs à tubes et calandre (2.3). Pour éviter les hétérogénéités de distribution de l'écoulement diphasique du fluide frigorigène entre tubes, les évaporateurs sont équipés de dispositifs distributeurs dans la boîte d'entrée et parfois dans les boîtes intermédiaires. Pour obtenir une conception plus compacte des échangeurs, on les équipe de tubes spéciaux qui améliorent le coefficient d'échange coté fluide frigorigène et éventuellement coté externe (tubes corrugués, par exemple).

b. Evaporateurs mono passes à tubes et calandre : de conception récente, ils possèdent une passe unique coté fluide frigorigène. Les tubes sont de faible diamètre et généralement équipé d'inserts pour conserver une longueur raisonnable. Ils sont utilisés dans les domaines de puissance thermique plus faible (<100 kW) que les échangeurs multi passes.

c. Evaporateurs coaxiaux : ils se composent d'une enveloppe extérieur et d'un ou plusieurs tubes intérieurs (2.1) ; l'ensemble a une forme hélicoïdale. Leur domaine d'application est comparable à celui des évaporateurs précédents ; ils peuvent être équipés de tubes spéciaux qui améliorent le coefficient d'échange thermique.

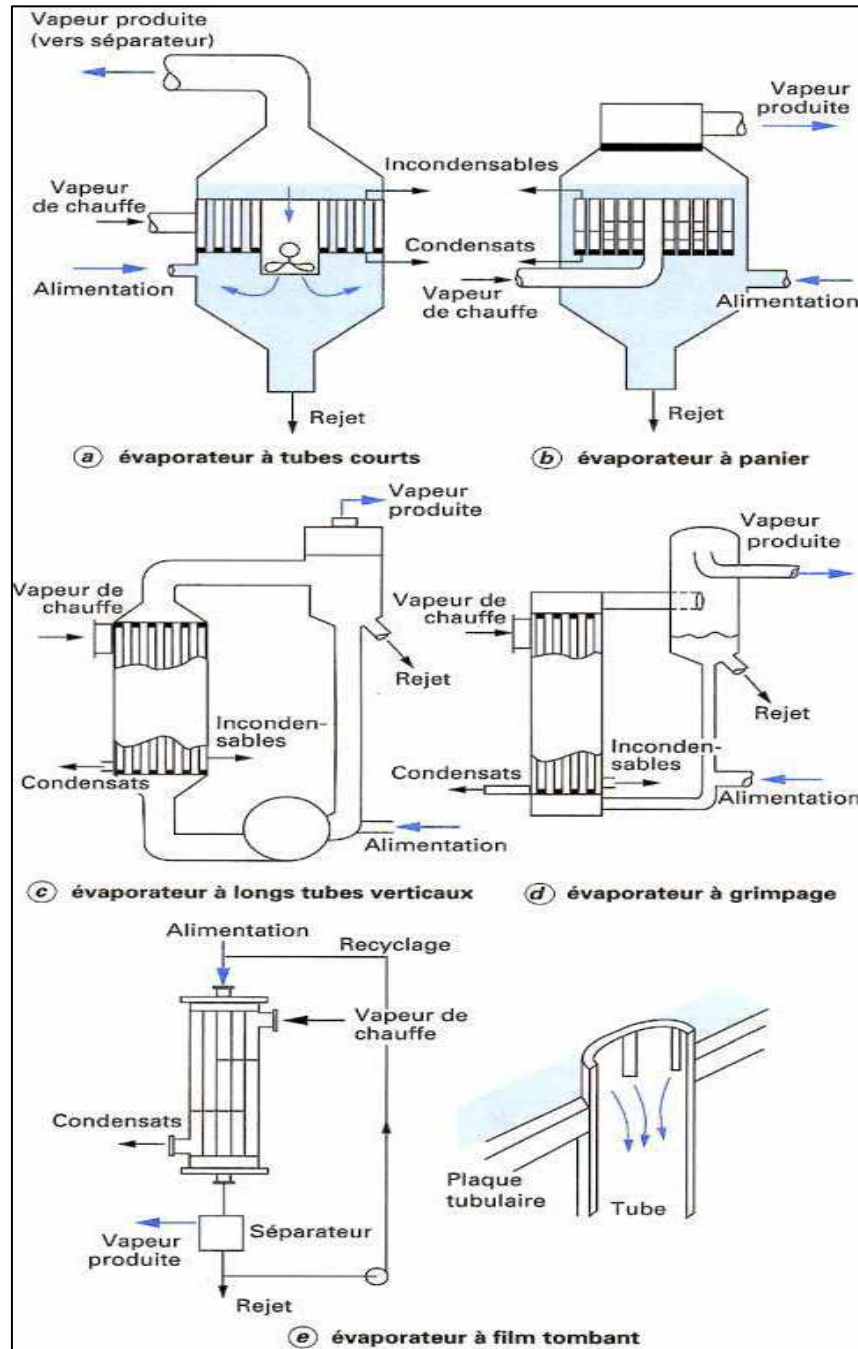


Fig. (III.12) : Evaporateurs à tubes verticaux : schéma de principe

III.6.1.2 Evaporation à l'extérieur de tubes

Ces évaporateurs utilisent généralement des tubes horizontaux. On distingue deux types : les évaporateurs noyés (ou submergés) et les évaporateurs arrosés (ou aspergés).

a. Evaporateurs noyés fig. (III.3a)

Ce sont des évaporateurs de type K dans la dénomination TEMA, également connus sous le nom de kettle reboiler. Ils sont également constitués d'un faisceau de tubes en U de grande longueur (4 à 10m) placé dans le fond d'une calandre. Le niveau du liquide est maintenu grâce à un baffle vertical muni d'un déversoir.

b. Evaporateur à tubes arrosés fig. (III.3b)

Ces évaporateurs sont utilisés pour concentrer des solutions chimiques ou agroalimentaires, des rejets industriels pollués ainsi que pour le dessalement de l'eau de mer. La solution à concentrer s'évapore à l'extérieur d'un faisceau tubulaire horizontal, tandis que le fluide chauffant circule à l'intérieur des tubes. Le ruissellement de la solution sur les tubes est réalisé à l'aide des plateaux d'arrosage ou de buses de pulvérisation qui répartissent au-dessus du faisceau tubulaire la solution qui ruisselle autour des tubes.

Cette technique est intéressante lorsque l'on recherche une surface d'échange réduite (bon coefficient d'échange amélioré par le ruissellement) et une absence de primage (faible vitesse de la vapeur qui réduit le risque d'entraînement du liquide).

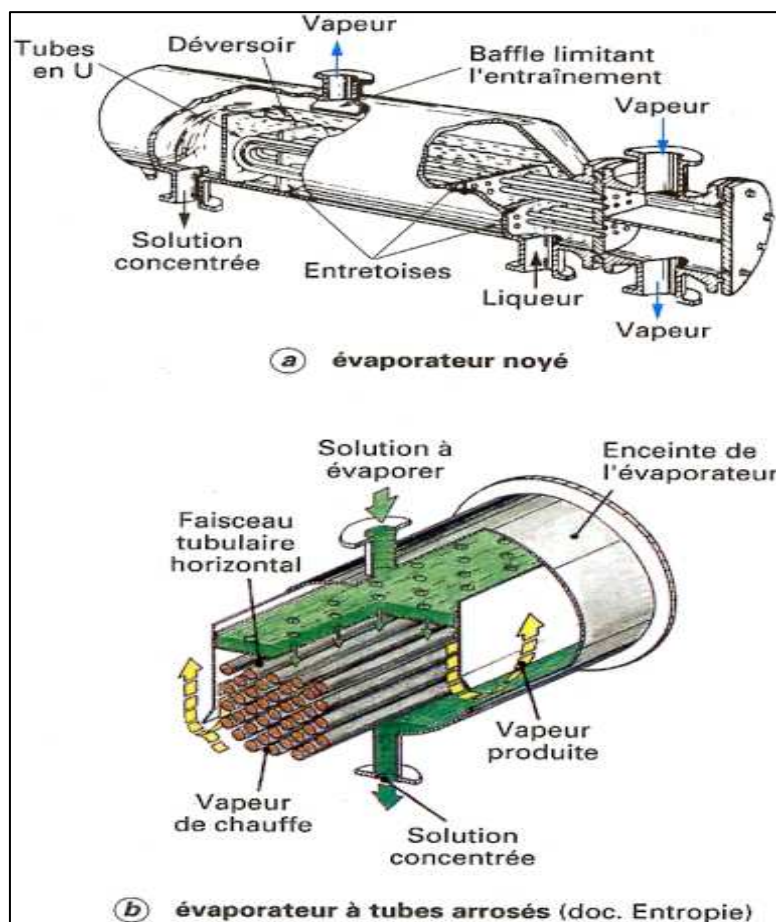


Fig. (III.13) : Evaporateurs noyés ou à tubes arrosés : schéma de principe.

Utilisés depuis plus d'un siècle dans l'industrie agroalimentaire, les échangeurs thermiques ont maintenant de nombreuses applications, majoritairement dans l'industrie, mais également dans l'habitat ou dans les transports. Il existe une grande variété de produits, de tailles, et de performances différentes qui se différencient principalement par leurs fonctions, leurs conditions d'utilisation, les technologies ou les matériaux employés, ainsi que par leur prix. Avant tout choses et puisque nous allons y faire souvent référence, il paraît nécessaire de définir les différents coefficients de transfert de chaleur.

III.6.2 Condenseurs tubulaires

Le but de ces échangeurs est de condenser une vapeur à l'aide d'un fluide réfrigérant. Ils concernent des secteurs d'activité très variés comme la production d'énergie (centrale thermique), les industries chimiques (colonnes à distillation), les industries du génie climatique, de l'agro-alimentaire, du séchage, etc.

Le fluide à condenser est rarement un corps pur, mais le plus souvent une vapeur en présence d'autres gaz incondensables. La condensation de la vapeur saturée est obtenue par échange thermique avec un fluide froid appelé réfrigérant. Un condenseur nécessite un liquide de refroidissement abondant et bon marché et, pour cela, on utilise principalement l'eau et parfois l'air.

On distingue deux types de condenseurs : les condenseurs à fluides séparés et les condenseurs à contact direct. Seuls les premiers seront décrits ici, les seconds étant déjà traités dans l'article Condenseurs par surface dans les centrales thermiques [B 1540] de ce traité (Technique d'ingénieur 2003).

III.6.2.1 Les condenseurs à fluides séparés sont les plus utilisés.

Une surface d'échange sépare la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant.

Une goutte de liquide déposée sur une surface peut s'étaler sous forme d'un film ou conserver sa forme de goutte. Lorsque l'angle de contact moyen entre la surface et la goutte est supérieur à 50°, on dit que la surface est *hydrophobe*. Pour obtenir un tel résultat il faut soit effectuer un traitement de surface (tableau suivant), soit ajouter au liquide un promoteur de condensation en gouttes. Pour une condensation sur des surfaces en cuivre, on utilise des composés soufrés. Pour une condensation sur des surfaces en acier, on utilise du silane fluoré $[\text{CF}_3(\text{CF}_2)_n\text{Si}(\text{OEt})_3]$.

Tableau (III.6) :

Surface de contact	Angle moyen (pour l'eau)
Acier inoxydable 18/8	0°
Cu-Ni (70/30)	0°
Nickel	5°
Au sur Cu-Ni (70/30)	60 à 62°
Ag sur Cu-Ni (70/30)	68 à 74°
Téflon	85°

Ainsi, la condensation de la vapeur peut se développer sur la paroi de séparation suivant deux modes : en film ou en gouttes.

Dans la condensation en film, le coefficient d'échange sur la paroi dépend de l'épaisseur du film de condensât. Ce film peut être modifié par les contraintes de cisaillement provoquées par la vitesse de la vapeur à la surface libre. La présence de gaz incondensables mélangés avec la vapeur crée une résistance thermique qui s'ajoute à celle du film de condensât. Les techniques de base les plus répandues pour augmenter les performances en condensation consistent soit à diminuer l'épaisseur du film de condensât, soit à s'efforcer à perturber la sous-couche laminaire (pour ces deux améliorations, on utilise des tubes cannelés ou corrugués), soit, enfin, à rendre la paroi hydrophobe pour obtenir une condensation en gouttes.

Un fluide en condensation est prévu à l'intérieur des tubes s'il est sous haute pression, chargé (zone plus facile à nettoyer) ou corrosif pour éviter une dépense de calandre en matériau noble.

Un fluide en condensation est prévu coté calandre (extérieur des tubes) si la perte de pression coté tubes est prohibitif ou pour un condensât pouvant se solidifier, afin de pouvoir diminuer les risques de bouchage.

III.6.2.1.1 Condensation extérieure aux tubes

a. Tubes horizontaux : ce sont des échangeurs de tubes et calandre avec une faible perte de pression du coté de la vapeur. La condensation s'effectue coté calandre. L'écartement des chicanes peut être resserré entre l'entrée de la vapeur et la sortie du condensât, pour maintenir une vitesse de circulation correcte. Le faisceau est protégé à l'entrée de la vapeur par une plaque évitant l'érosion et la mise en vibration des tubes. Il faut s'assurer que la section de passage autour de la plaque soit au moins égale à celle de la tuyauterie, afin de minimiser la perte de pression. On trouve souvent une diminution du nombre de tubes : dans la partie haute du faisceau pour diminuer la perte de pression ou dans la partie basse pour faciliter l'écoulement du condensât. Il est nécessaire de ménager dans la partie supérieure de la calandre un évent pour l'extraction des incondensables.

b. Tubes verticaux (figure III-14a) : ces condenseurs sont souvent appelés condenseurs à film tombant. Les coefficients d'échanges sont bons, car le film de condensât peut être de faible épaisseur. Il est important d'assurer une bonne distribution de l'eau à l'intérieur de tous les tubes, par un réservoir collectif ou une alimentation individuelle des tubes. Il faut également prévoir une purge de la calandre et un trop-plein au réservoir des tubes.

III.6.2.1.2 Condensation intérieure aux tubes

Les échangeurs utilisés sont de type tubes et calandre en position vertical. On distingue deux catégories, ceux à film descendant et ceux à film montant. L'eau de refroidissement circule

dans la calandre et peut créer des difficultés d'encrassement (d'où la nécessité de pouvoir démonter le faisceau pour nettoyage) et d'accumulation d'incondensables (d'où la nécessité de prévoir un évent de plaque tubulaire).

a. Film descendant fig. (III.4b) : la vapeur et le film de condensât ont un écoulement de type co-courant. La vapeur est introduite en tête et va se condenser à l'intérieur des tubes. Le condensât est donc toujours en contact avec la vapeur ainsi que la paroi froide, ce qui permet la condensation de mélanges ayant un très grand intervalle de température de condensation.

b. Film montant fig. (III.4b) : la vapeur et le film de condensât ont un écoulement de type contre-courant. Le condensât est chauffé par la vapeur, ce qui permet de le renvoyer en reflux dans une colonne de rectification. La base des tubes est biseautée à 60° , de façon à permettre l'égouttage du condensât et à retarder l'apparition de l'engorgement qui constitue le principal inconvénient de ce type de condenseur.

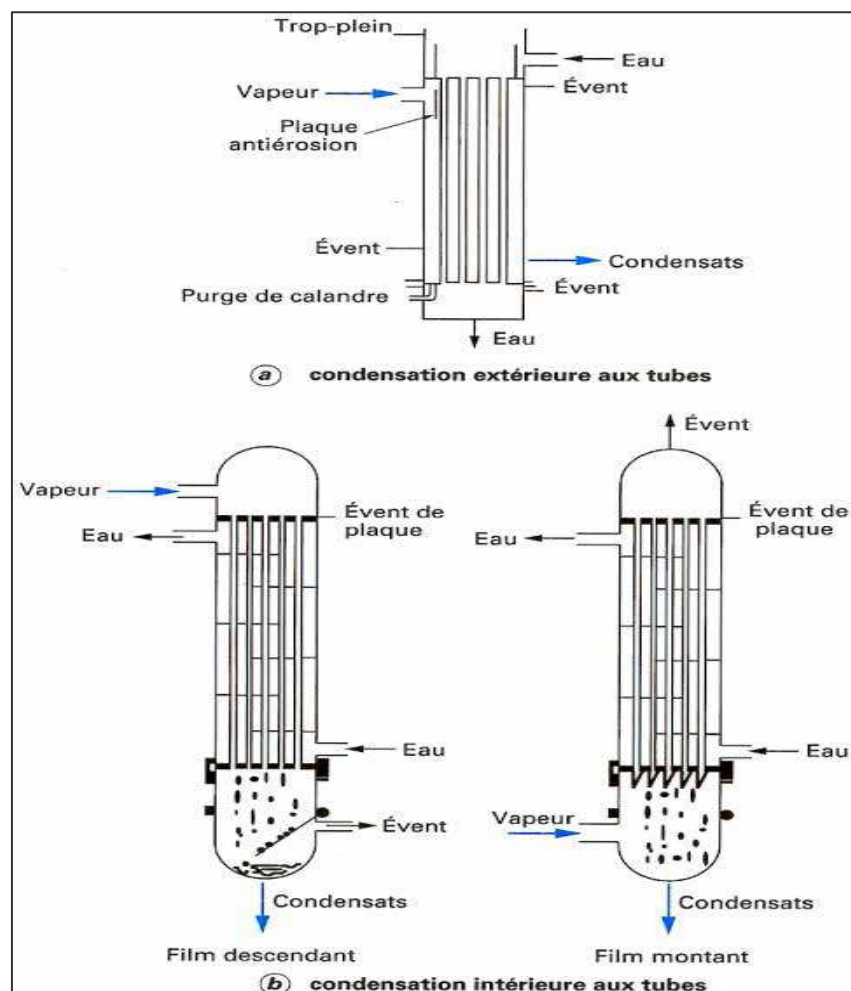


Fig. (III.14). Condensateurs à tubes verticaux : schémas de principe

III.7 Rebouilleurs :

Les rebouilleurs sont des appareils tubulaires dont le but est d'effectuer une vaporisation partielle des fonds de colonne de distillation afin d'engendrer la phase vapeur qui assurera le fractionnement dans la section d'épuisement.

Ces appareils sont construits selon le même principe que les échangeurs à faisceaux et calandre, mais avec des variantes imposées par le système de séparation liquide- vapeur adopté. [23]

III.7.1 Rebouilleurs noyés : il se divise en deux :

III.7.1.1 Rebouilleurs à une passe à circulation naturelle, à deux entrées'thermosiphons'

Le rebouilleur est alimenté directement par le liquide qui descend du dernier plateau et ne peut ainsi traverser qu'une seule fois le rebouilleur.

La circulation est naturelle, c'est-à-dire qu'elle s'effectue uniquement sous l'effet de la différence de pression hydrostatique entre le point de soutirage et le point de réintroduction.

III.7.1.2 Rebouilleurs à recirculation par une pompe à une entrée :

Le rebouilleur est alimenté par le liquide accumulé dans le fond de tour (colonne) et recirculé plusieurs fois dans l'appareil.

NB :

- Dans le deuxième dispositif on peut régler facilement le taux de vaporisation on joue sur le débit de la pompe, pour cette raison le deuxième dispositif est meilleur que le premier.
- Afin d'obtenir des pertes de charge très faible en circulation naturelle, on supprime les chicane et il est d'usage de respecter certaines proportions entre le diamètre de la calandre D_c et la longueur des tubes l .

Tableau. (III7) : La relation entre le diamètre de la calandre D_c et la longueur des tubes l .

D_c	l
12 à 17 ¼ % in	8 ft
19 ¼ à 29	12ft
$D_c > 31$	16ft

De plus, pour un appareil à une seule entrée centrale, on considère que l doit inférieure à cinq fois le diamètre D_c .

III.7.2 Rebouilleur à niveau liquide (Kettle Reboiler)

C'est un rebouilleur idéal puisqu'il permet de réaliser jusqu'à 80% de vaporisation sur le résidu de fond de colonne, sans nécessiter un taux de recirculation important du liquide, comme c'est le cas pour les thermosiphons.

En plus de sa fonction de vaporisation l'appareil assure la séparation des deux phases. Il est conçu avec un déversoir dont la hauteur correspond au diamètre du faisceau afin que celui-ci soit constamment submergé. La calandre est d'un diamètre nettement supérieur à celui du faisceau afin de ménager au dessus du niveau liquide une zone de désengagement de la vapeur et éviter les entraînements de liquide.

Le faisceau est construit d'une manière classique avec deux plaques tubulaires lorsque le fluide chauffant est un produit pétrolière ; si l'en utilise la vapeur d'eau on fait souvent l'économie de la plaque tubulaire mobile, en employant des tubes en U. Dans ces appareils, la circulation est le plus souvent naturelle. Ces rebouilleurs sont appelés « Kettle Reboiler ».

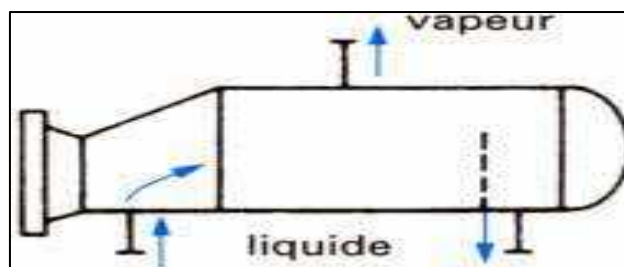


Fig. (III.15) : rebouilleurs de type Kettle.

III.7.2.1 Utilisation :

Il est fréquemment utilisé dans les fonctions de rebouillage en distillation de régénération d'amine, de réfrigération par évaporation de fluide frigorigène.

III.7.3 Critères de choix des rebouilleurs :

Pour choisir un rebouilleur on doit prendre en considération quelques critères selon le tableau suivant :

Tableau. (III.8) : Critères de choix des rebouilleurs

	Type des rebouilleurs					
	A	A'	B	B'	C	D
Echange thermique	élevé	élevé	Assez élevé	Assez élevé	Faible	Assez élevé
Contrôle de l'appareil	Facile	Facile	Facile	Facile	Non difficile	Non difficile
Temps de séjours	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	élevé	Grand
Résistance à l'encrassement	Bon	Excellent	Bon	Excellent	Mauvais	Bon
Temps de contact du produit	Faible	Faible	Faible	Faible	Grand	Faible
Dégazage du liquide	*	*	*	*	Bon	*
Coût d'appareillage	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	élevé	Moyen

A : Rebouilleur vertical à recirculation naturelle ;

A' : Rebouilleur vertical à recirculation forcée ;

B : Rebouilleur horizontal à recirculation naturelle ;

B' : Rebouilleur type Kettle ;

C : Rebouilleur vertical sans recirculation ;

D : Rebouilleur vertical sans recirculation ;

* : dégazage s'effectue dans la colonne ;

Les appareils à circulation forcée comportent, par rapport aux appareils à circulation naturelle, les avantages d'utilisation dans le cas de produits visqueux ou chargés et de réduction de surface d'échange mais, par contre les inconvénients du coût de la pompe et de l'énergie dépensé ainsi que des risques supplémentaires de fuites.

Chapitre IV

Problèmes rencontrés dans les échangeurs de chaleur

Introduction

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie et donc, par voie de conséquence, de protection de l'environnement. Une grande part de l'énergie thermique (90%) utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. Ils sont utilisés principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agro-alimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Ils constituent donc un des dispositifs clé du thermicien, et sont un composant quasi inévitable dans la maîtrise de l'énergie. Compte-tenu de leurs multiples utilisations, les difficultés rencontrées par les utilisateurs d'échangeurs de chaleur sont diverses et variées. Toutefois, un des principaux problèmes de fonctionnement auxquels ils se heurtent a trait aux phénomènes d'encrassement. En effet, l'encrassement reste encore, de nos jours, l'un des phénomènes le moins compris et le moins prédictible de l'industrie. [24]

IV. Problème industriel

Les principaux problèmes rencontrés par les utilisateurs d'échangeurs thermiques ont une relation avec les phénomènes d'encrassement, de corrosion, de vibrations et de tenue mécanique. Malgré tout, un certain nombre d'études publiées, montre que l'encrassement reste au premier rang des préoccupations des industriels du secteur des équipements de transferts thermiques. Le couplage encrassement - dégradation des échanges thermiques a de fortes répercussions sur la rentabilité de l'opération. Les coûts liés à l'encrassement des échangeurs avoisinent les 700 millions d'euros par an. Ces coûts intègrent les dépenses liées, d'une part, au dimensionnement (surdimensionnement de la surface d'échange à mettre en œuvre, incorporation d'équipements de nettoyage) à hauteur de 20% et, d'autre part, au fonctionnement (perte de production, diminution du transfert, frais de maintenance et nettoyage) à hauteur de 80%. Malgré les efforts considérables déployés depuis les premiers travaux des 1959, l'encrassement demeure encore un phénomène bien mal compris ou l'empirisme reste le moyen le plus couramment utilisé. En effet, la large gamme d'écoulements et la panoplie des conditions industrielles existantes contribuent grandement à la méconnaissance du phénomène.

Les recherches sont actuellement menées sur deux fronts, totalement différentes mais néanmoins complémentaires. Le premier concerne la détection de l'encrassement, et la seconde, auquel nous souhaitons nous rallier concerne les produits et appareillages permettant le nettoyage de tels dépôts. [25]

L'encrassement et la corrosion restent les phénomènes les moins compris de l'industrie ; ils se traduisent par :

- un surdimensionnement des appareils dans les bureaux d'études ;
- une dépense d'énergie supplémentaire ;
- le remplacement des appareils corrodés ;
- des coûts d'arrêt des installations pour démontage et nettoyage.

Le lecteur trouvera une description générale des divers phénomènes rencontrés et pourra se reporter pour plus de détails à une littérature spécialisée (pour en savoir plus [Doc. B 2 345]). Technique de l'ingénieur traité de Génie Mécanique.

Les **phénomènes vibratoires** doivent également être pris en compte dans le dimensionnement des échangeurs au même titre que les transferts de chaleur ou les pertes de charge.

Enfin, les **problèmes de tenue mécanique** sont, pour les géométries les plus classiques, traités dans divers textes réglementaires et même qu'une normalisation Européenne en matière d'essais qui sont en train d'émerger.

Les principaux problèmes de fonctionnement rencontrés par les utilisateurs d'échangeurs de chaleur ont trait aux phénomènes d'encrassement, de corrosion, de vibrations et de tenue mécanique. [26]

IV.1 Notions sur l'encrassement des échangeurs

L'encrassement, qui sous sa forme la plus générale peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface qui affecte une grande variété d'opérations industrielles. Dans le cas des échangeurs, la présence d'un fort gradient thermique près de la surface peut perturber les mécanismes d'encrassement isotherme rencontrés, par exemple lors de l'utilisation de membrane ou de filtre.

L'encrassement se produit quand un fluide passe par l'échangeur de chaleur, et les impuretés dans le précipité liquide sur la surface des tubes. La précipitation de ces derniers impuretés peut être causé par :

- Fréquence d'utilisation de l'échangeur de chaleur.
- No nettoyage de l'échangeur de chaleur régulièrement.
- La réduction de la vitesse des fluides se déplaçant par l'échangeur de chaleur.
- Au dessus classement par taille de l'échangeur de chaleur.

Les effets de l'encrassement sont plus abondants dans les tubes froids de l'échangeur de chaleur, que dans les tubes chauds. C'est parce que des impuretés augmentent à mesure que la température augmente.

L'encrassement réduit la section pour que la chaleur soit transférée et cause une augmentation de la résistance au transfert thermique à travers l'échangeur de chaleur. C'est parce que la conductivité thermique de la couche d'encrassement est basse. Ceci réduit la combinaison entre le coefficient de transfert thermique et l'efficacité de l'échangeur de chaleur. Ceci alternativement, peut mener à une augmentation en coût de pompage et d'entretien. [28].

IV.1.1 Aspect physique de l'encrassement

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables ou de substances non désirées sur une interface, affecte un grand nombre d'opérations industrielles Fi.(IV.16).

Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments.



Fig. (IV.16) : L'encrassement dans un échangeur tubulaire.

Il est très important de considérer ce phénomène d'encrassement pour être en mesure de choisir un échangeur thermique qui ait les dimensions appropriées, car l'encrassement peut réduire considérablement la capacité de transmission de chaleur et d'augmenter la chute de pression. Un nettoyage et un entretien périodiques sont requis. Comme l'encrassement et les difficultés de maintenance augmentent avec le temps, les nettoyages doivent être fréquents. Il est souvent important de prévoir certains types de cloisons qui filtrent les impuretés de fluides caloporteurs avant son admission dans l'échangeur afin de réduire les risques d'encrassement. Il a été démontré au cours des longues années passées dans la recherche de moyens de lutte contre l'encrassement, que ce dernier était lié aux conditions opératoires, aux propriétés physico-chimiques des fluides mis en jeu, à la géométrie du système ainsi qu'à la nature des surfaces. La connaissance de l'origine du phénomène est un facteur déterminant pour répondre aux variations de ces paramètres. [28]

IV.1.2 Aspect économique et environnemental de l'encrassement

Des efforts considérables sont fournis pour analyser le phénomène d'encrassement. Durant le fonctionnement, l'échangeur de chaleur devient encrassé avec l'accumulation des dépôts d'une ou plusieurs espèces sur les surfaces de transfert de l'échangeur. En conséquence, la résistance thermique augmente, ceci fait baisser les performances de l'échangeur. La couche d'encrassement bloque le passage du fluide et augmente la surface rugueuse, est ainsi réduit le taux de transfert de chaleur.

L'ampleur de l'encrassement sur la surface d'échange thermique par un fluide donné, dépend du type de transfert de chaleur (ébullition, condensation), le type de fluide (liquide, gaz) ou la nature de la surface et le type du matériau utilisé.

Les inconvénients économiques de l'encrassement sont attribués à :

- de grosses pertes d'énergie provoquées par l'inefficacité thermique.
- Le coût élevé de maintenance pendant la période de nettoyage des échangeurs.
- De grosses pertes de production durant la période d'arrêt pour le nettoyage.

Aux Etats-Unis d'Amérique, une étude effectuée sur le coût annuel de l'encrassement et de la corrosion dans l'industrie pétrolière annonce le chiffre de 10 million de dollars par an pour une raffinerie, ce qui extrapolé à l'ensemble du monde occidental, atteint la somme de 4.500 million de dollars.[29]

Les dépenses relatives à toutes les causes d'encrassement, se traduisent par :

- Un surdimensionnement des appareils, en bureau d'études,
- Une dépense d'énergie supplémentaire,
- Le remplacement du matériel corrodé,
- Des coûts d'arrêt d'installation (nettoyage, démontage...)

IV.1.2 Classification : différents types d'encrassement :

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt, selon les conditions d'utilisation de l'échangeur ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt. Nous adopterons, comme la plupart des auteurs Epstein, cette dernière méthode de classification. Six types différents peuvent alors être définis :

- Encrassement particulaire ;
- Entartrage ;
- Encrassement biologique ;
- Encrassement par réaction chimique ;
- Encrassement par solidification.

IV.2.1 l'encrassement biologique

L'encrassement biologique est du au développement de micro-organismes qui créent un film encrassant au contact de la surface d'échange. Il peut être causé par trois grands types de micro-organismes :

- les bactéries dont le développement est du à un apport nutritif de type hydrocarbures ;
- les algues dont le développement est du à la présence d'énergie solaire avec photosynthèse ;
- les champignons dont le développement est du aux changements de conditions ambiantes telles que l'humidité, la température ou le PH. [30]

IV.2.2 l'encrassement par réaction chimique

L'encrassement par réaction chimique est du à la présence d'une réaction chimique au voisinage d'une surface d'échange. Les produits solides ainsi formés s'y déposent. Il s'agit le plus souvent d'une réaction de polymérisation qui implique la formation d'un dépôt de haut poids moléculaire. Les vitesses de telles réactions chimiques d'éléments catalyseurs. Toutefois,

la vitesse globale du mécanisme de dépôt dépend aussi de la dynamique des phénomènes de surface et de transfert. Il est rencontré dans les industries alimentaires, nucléaires et dans les procédés de raffinage du pétrole. [31]

IV.2.3 L'entartrage

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques.

Il est produit principalement par la dissipation des sels inorganiques dans le processus d'écoulement présente une super saturation durant l'échauffement ou le refroidissement pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être remplies.

- la limite de solubilité du sel contenu dans l'eau doit être dépassée ;
- la vitesse de dépôt doit être suffisamment rapide.

Ce type d'encrassement est conditionné par une grande vitesse de déposition et un excès de concentration par rapport à la limite de solubilité.

L'entartrage est un dépôt de sels minéraux qui a tendance à se former sur les surfaces d'échanges. Compte tenu des ions présents dans les eaux salines (calcium, magnésium, bicarbonate de calcium (CaHCO_3), de l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et du sulfate de calcium (CaSO_4). [32]

IV.2.3.1 Généralités sur la théorie de l'entartrage

Pour qu'il y ait dépôt de tartre sur une surface d'échange, deux conditions principales doivent être réunies :

- il faut que la limite de solubilité soit dépassée, c'est-à-dire qu'il y ait sursaturation : c'est l'aspect thermodynamique ;
- il faut ensuite que la vitesse de déposition soit suffisamment rapide, c'est l'aspect cinétique.

a- Aspect thermodynamique : la sursaturation

La formation d'une nouvelle phase à partir d'une solution n'a lieu qu'à partir du moment où l'on dépasse la courbe de solubilité de cette phase. Pour la plupart des sels, la solubilité augmente avec la température. Pour d'autres comme le carbonate de calcium et le sulfate de calcium (à partir de 40 °C), la solubilité diminue avec la température et la sursaturation peut être atteinte de deux manières.

- soit par concentration de la solution à température constante (MA) ;
- soit par une augmentation de la température à concentration constante (MB) ou par une combinaison des deux : MM'.

b- Aspect cinétique : nucléation et croissance cristalline

➤ la nucléation

Le phénomène de nucléation est la création des premiers germes solides appelés « nucléi » dans une solution sursaturée ; c'est la première étape de la formation d'une nouvelle phase cristallisée.

➤ Nucléation homogène et nucléation hétérogène

On distingue deux sortes de nucléation : la nucléation homogène et la nucléation hétérogène.

- nucléation homogène : la nucléation est dite homogène lorsqu'il y a formation de nucléi exclusivement entre ions libres en solution.
- Nucléation hétérogène : la nucléation est dite hétérogène lorsqu'il y a formation de nucléi au contact d'une interface : parois, cristaux déjà formés, poussières...

L'interface peut participer aux échanges énergétiques, ce qui a généralement pour effet de diminuer l'enthalpie libre de formation d'un germe. [33]

IV.2.4 L'encrassement particulaire

Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation, sur les surfaces d'échange, de particules transportées par l'écoulement de fluides industriels tels que :

- l'eau des chaudières contenant des produits de corrosion ;
- l'eau des tours de refroidissement ;
- les écoulements gazeux chargés de particules tels les résidus solides de combustion, ou les poussières résultant de l'incinération de déchets ménagers.

IV.3 Nature du dépôt

IV.3.1 Problèmes de colmatage ou *fouling* :

Les dépôts qui sont à l'origine de l'encrassement ou *fouling* des surfaces d'échanges peuvent être classés en trois catégories :

- **les dépôts minéraux** qui correspond au phénomène d'entartrage ou *scaling* constitués principalement par CaCO_3 , CaSO_4 , $x\text{H}_2\text{O}$... ;
- **les dépôts organiques** constitués principalement par :
 - les matières en suspension, les acides humiques ou fulvique...
 - les micro-organismes ainsi que les produits excrétés par les micro-organismes (polysaccharides) : on parle alors de *biofouling* ;
- **les dépôts colloïdaux** : silice, soufre, hydroxydes de fer, de manganèse d'aluminium...

En fait, un dépôt est en général constitué par un mélange de ces différents types auxquels il faut rajouter les produits de corrosion, ainsi que les précipités résultants des réactifs ajoutés (antitartres, flocculants)...

IV.4 Les processus fondamentaux de l'encrassement

Phénoménologie, l'encrassement est un problème transitoire de chaleur et de masse qui nécessite l'action simultanée de plusieurs processus complexes. [34]

En décomposé les mécanismes d'encrassement selon 5 événements séquentiels :

IV.4.1 L'initiation

L'initiation comme étant le temps nécessaire avant la formation du dépôt sur une surface propre. Il faut signaler que, dans la grande majorité des études expérimentales traitant de l'encrassement particulaire sur des tubes d'échangeurs, la phase d'initiation du processus d'encrassement n'est pas détectée.

Pendant l'initiation, la surface est conditionnée par l'encrassement qui aura lieu plus tard. La température de surface, le matériau et la rugosité influencent le retard initial (l'induction) ou la période d'incubation. Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur la surface d'échange.

Beaucoup de travaux de recherche donnent de plus en plus l'importance à cette phase initiale avant la formation du noyau cristallin encrassant. Actuellement, l'un des principaux objectifs des chercheurs est de donner un modèle capable de décrire la phase d'initiation de l'encrassement. Parmi leurs objectifs : augmenter du temps d'induction (le plus long possible). L'utilisation de nouveaux matériaux de surface, tel que le DLC (Diamond-Like Carbone), permet de prolonger la phase d'induction [34].

La surface rugueuse tend à diminuer le délai de la période. Elle fournit une situation favorable pour la cristallisation pendant que les rainures fournissent des régions pour le dépôt des particules.

IV.4.2 Transport

Pendant cette phase, les substances d'encrassement du volume de fluide sont transportées à la surface de transfert. Le transport est gouverné par un nombre de phénomènes y compris la diffusion, la sédimentation et la thermophorèse (thermophoresis). Une grande quantité d'information disponible pour chacun de ces phénomènes est appliquée pour étudier les mécanismes de transports pour les différentes catégories d'encrassement.

La thermophorèse est le mouvement de petites particules dans l'écoulement de fluide quand le gradient de température est présent. Les murs froids attirent les particules colloïdales pendant

que les murs chauds repoussent ces particules. La thermophorèse est importante pour des particules autour de $5\mu\text{m}$ de diamètre et devient dominante autour de $0.1\mu\text{m}$.

Un autre type de ces processus est électrophorèse (electrophoresis). L'impact inertiel et les tourbillons de turbulence peuvent être présentés. Le modèle théorique qui expose ce processus est disponible dans la littérature [35].

IV.4.3 Déposition

Une partie de la matière encrassant transportée est attachée à la surface. Les forces agissantes des particules proches de la surface sont importantes à déterminer l'attachement. En plus, les propriétés du matériel tel que la densité, la viscosité et les conditions de surface sont importantes. L'adhésion des particules sous l'effet des forces de Van der Waals, des forces électrostatiques ou capillaires.

Les forces de London-Van der Waals sont dues aux interactions entre les moments dipolaires générés par le mouvement des électrons autour des noyaux d'atomes neutres voisins. Dans des fluides de phases uniques, les forces résultant entre particules et entre les particules et la paroi sont toujours attractives. Pour $d_p \leq 100\mu\text{m}$, les forces de Van Der Waals l'emportent sur les forces de gravitation. [36]

IV.4.4 Le réentraînement (Enlèvement)

Le réentraînement des particules déposées du aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt, à l'érosion ou à l'écaillage. Une certaine proportion de la matière est enlevée de la surface immédiatement après leur dépôt et une autre enlevé plus tard. En général, les forces de cisaillement à l'interface entre le fluide et la couche de dépôt encrassant sont responsables de cet enlèvement. Les forces de cisaillement dépendant du gradient de la vitesse à la surface, de la viscosité du fluide et de la rugosité de la surface.

IV.4.5 Le Vieillissement

Le vieillissement du dépôt caractérisé par un changement de texture et une usure dudit dépôt. Une fois le dépôt est posé sur la surface, le vieillissement commence. Les propriétés mécaniques de ce dépôt seront modifiées durant cette phase, à cause du changement de cristal ou de la structure chimique, par exemple, l'empoisonnement lent du micro-organisme causé par la corrosion à la surface affaiblira et appauvrira la couche du bio- encrassement. La réaction chimique attire la surface du dépôt pour modifier la composition chimique du dépôt, et de cette façon changer les propriétés mécaniques.

IV.5 Méthode d'évaluation de l'encrassement

Pourquoi et comment apprécier l'encrassement ?

Le but est de prévoir, sans ouvrir un échangeur, la date à laquelle il sera nécessaire de le nettoyer, donc de l'arrêter.

Il est extrêmement difficile de prédire le comportement spécifique de l'encrassement dans plusieurs situations à cause du nombre élevé de variables qui peuvent essentiellement modifier le type d'encrassement et le taux de formation. Dans la littérature, les sources décrivant la résistance d'encrassement sont plutôt limitées, car il y a peu de travaux récents sur l'encrassement. Les tables standard sont établies par l'association de fabrication des échangeurs tubulaires (TEMA). Ces tables donnant le facteur d'encrassement pour différents types de fluides sont souvent les sources les plus utilisées comme référence dans le design des échangeurs de chaleur.

L'effet de l'encrassement est quantifié par la mesure de sa résistance au transfert de chaleur, définie comme étant la différence entre les inverses des coefficients globaux de transfert thermique entre l'état propre et sale (encrassé) de l'échangeur. [37]

IV.5.1 Cinétique de l'encrassement

L'étude de l'évolution de l'encrassement en fonction du temps peut être contrôlée par trois paramètres différents. Soit par la mesure de l'épaisseur du formé sur la plaque, soit par la masse du dépôt par unité de surface, soit par l'évolution de la température de la paroi. Ces paramètres font intervenir la résistance d'encrassement désigné par R_d .

On désigne par m_d la masse déposée par unité de surface, d'épaisseur e_d , de conductivité thermique λ_d , de masse volumique ρ_d .

L'épaisseur de la couche encrassant est calculée comme étant la masse totale déposée par unité de surface divisée par la densité de la couche encrassante .

Après que l'épaisseur totale a été déterminée et en supposant que la conductivité thermique est constante. La résistance d'encrassement peut être alors calculée comme suit :

$$R_d = \frac{m_d}{\rho_d \lambda_d} = \frac{e_d}{\lambda_d} \quad \text{(IV.9)}$$

IV.5.2 Modèles d'évolution de l'encrassement

L'évolution du dépôt encrassant est représenté par sa résistance. La résistance d'encrassement en fonction du temps présente différents types d'évolutions comme le montre la fig.(IV.17) [38].

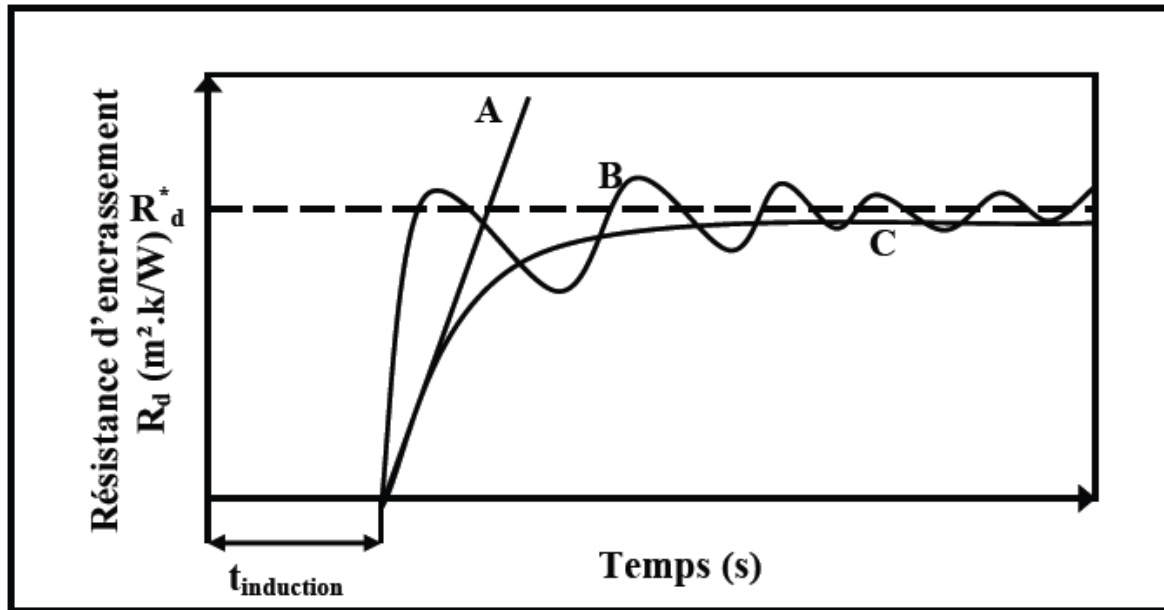


Fig. (IV.17) : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps

Evolution de la courbe A :

C'est le cas d'un encrassement linéaire, ou le dépôt encrassant évolue instantanément au cours du temps.

Ou « A » représente le taux d'accroissement de la résistance d'encrassement R_d .

Cette relation est généralement caractéristique des dépôts durs et adhérents et indique que la vitesse de dépôt est constante et qu'il n'y a pas de réentraînement.

Evolution de la courbe B :

La courbe « B » illustre mieux le cas réel, le réentraînement d'une partie du dépôt modifie de manière très sensible l'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps.

Dans la pratique, le réentraînement d'une partie du dépôt par « paquets » modifie de manière très sensible l'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps. On obtient alors une évolution en « dents de scie » (courbe B de la Fig. (IV.17)).

L'apparition de ce mode sous des conditions stables d'écoulement, de température et de concentration, implique un détachement répétitif correspondant à un affaiblissement périodique du dépôt au-dessous d'une certaine valeur critique du flux net de déposition. Un tel affaiblissement peut être dû à un changement de structure cristalline, une dégradation chimique, un développement de contraintes thermiques ou un empoisonnement progressif des microorganismes dans un biofilm.

Le fait qu'une couche inférieure se conserve, pendant que les couches supérieures de dépôt se détachent sous les forces de vitesse, revient peut-être à la coexistence de deux types

d'encrassement avec deux différents dépôts. C'est le cas de la formation, l'affaiblissement puis le détachement de biofilms au dessus d'une couche de dépôt de corrosion [39]

L'enlèvement périodique peut être aussi causé par une perturbation accidentelle de particules partiellement déposées sur la paroi. C'est, par exemple, le cas de la corrosion en fissures, ou la corrosion cesse une fois que la paroi est uniformément encrassée, plutôt qu'un enlèvement continu.

Evolution de la courbe C :

La courbe d'encrassement « C » est de type asymptotique. Elle est obtenue si le taux de déposition est constant et que le taux d'enlèvement soit proportionnel à l'épaisseur de la couche d'encrassement. Il est suggéré que les forces de cisaillements de la couche diminuent ou bien d'autres mécanismes prennent place pour détériorer la stabilité de la couche.

De la même façon, la situation généralement se produit si le dépôt est mou. L'encrassement dans ce cas prend des valeurs asymptotiques.

III.6 Les modèles de déposition et de réentraînement

De nombreux modèles de dépôt ont été proposés dans la littérature et il est bien difficile de tous les citer car ils se rattachent chacun à des types différents d'encrassement. [40]

Les phénomènes de dépôt et de réentraînement dans le cas d'un liquide peuvent être représentés selon le schéma de la Fig. (IV.18).

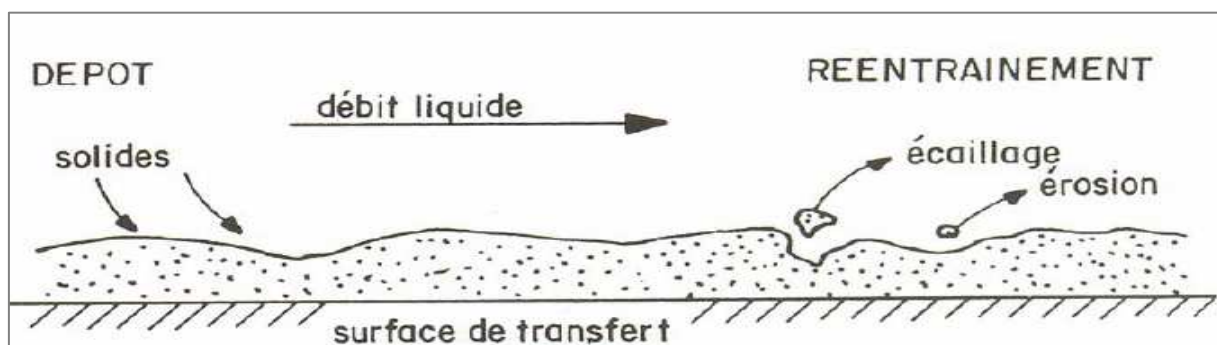


Fig. (IV.18) : Représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide

IV.7 Qu'est-ce que la corrosion ?

La norme DIN EN ISO 8044 définit la corrosion comme « une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique dont ils font partie.

D'après Alain Rey, dictionnaire historique de la langue Française, dictionnaire le Robert, Paris, 1994

Corrosion : n.f. mot emprunté (v. 1300) au bas latin *corrosio* – action de ronger, morsure-formé sur le supin de *corrodere*.

Corroder : v. tr. Est emprunté (1314) au latin *corrodere*, composé d'aspect déterminé en *cum* (→ *co*), de *roder* (→ ronger).

Corrodant, ante : le participe présent *corrodant, ante*, était anciennement employé comme substratif pour désigner une substance au pouvoir rongeur, mais son emploi adjectif est limité par l'existence d'un adjectif de sens plus actif : *corrosif, ive* (XIII^e s) dérivée savant du radical de *corrosum*, supin de *corrodere*. *Corrosif* est employé dès l'origine en médecine ou il est substantivé à propos d'une substance qui corrode (1314).

Selon la norme ISO 8044 **la corrosion** est définie comme suit : Interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs. Note – Cette interaction est généralement de nature électrochimique.

Cette même norme regroupe l'ensemble des définitions concernant les mécanismes de la corrosion en fonction des milieux, du type de corrosion, des protections contre la corrosion,...

La corrosion dans son sens actuel est donc restreinte à l'action d'un environnement agressif sur un substrat métallique.

Selon de nombreux auteurs la corrosion est considérée comme un retour des métaux et des alliages à leur état naturel d'éléments « oxydés ». C'est le processus inverse de la métallurgie extractive qui consiste à extraire le métal à partir de minerais plus ou moins complexes (oxydes, sulfures, carbonates,...).

La corrosion apparaît depuis toujours comme un mal mystérieux, associant un milieu (ou l'un de ses composants), un métal, et diverses formes, dans leurs aspects et dans leurs importances, de dommages et dégradations.

Un même métal ou alliage, dans des conditions de service qui sont toutes aussi bien décrites comme très différentes ou très proches, peut montrer des formes de corrosion différentes.

Il ne faut donc pas se fier aux apparences lorsque l'on absorbe un problème de corrosion.

Pour toute personne non-spécialiste qui subit la corrosion, celle-ci se décrit a priori de trois manières :

- par le faciès,
- par la cause,
- par le dommage.

Ce dernier en particulier peut se traduire concrètement par une perte progressive d'épaisseur (En mm/an) ou son inverse la durée de vie (perçement en une nuit, 1 mois ou 5 ans). Il peut aussi se traduire par des dommages localisés (piqûres, fissures), à progression lente...ou foudroyante ! Cette apparente simplicité recouvre en fait des situations extrêmement différentes.

Le phénomène de corrosion touche la majorité des matériaux métalliques. Il peut être défini comme étant une dégradation de la structure de matériau ou de ses propriétés par réaction électrochimique avec l'environnement [41].

IV.7.1 Les facteurs de la corrosion :

Ils sont très nombreux et on peut les grouper arbitrairement en facteurs dépendant du métal et ceux dépendant du milieu.

Parmi les facteurs dépendant du métal, citons :

- les facteurs métallurgiques (la composition, les traitements thermiques et/ou mécaniques, les traitements de surface, la présence ou non de revêtements,...),
- les facteurs liés aux conditions d'emploi (forme de pièces, procédés d'assemblage, sollicitations mécaniques, état de surface,...).

Quand aux facteurs dépendant du milieu ils sont aussi multiples : nature du milieu, concentration, pH, teneur en oxygène, température, pression, impuretés, présence d'inhibiteurs,...

Cette classification n'est pas exhaustive, elle ne constitue qu'un cadre à prendre en considération chaque fois que se posera un problème de corrosion et qu'il sera nécessaire de mener la véritable enquête policière pour rassembler les faits aussi précis que possible.[43]

Le tableau suivant présente les facteurs de la corrosion liée au matériau, à la surface, au milieu

Tableau. (IV.9) : Facteurs de corrosion [42]

Liés au matériau	Liés à la surface	Liés au milieu
<ul style="list-style-type: none"> - Composition - Structure cristallographique - Taille des grains -Texture - Etat de déformation - Contraintes résiduelles - Gradient thermique -Appauvrissement ou enrichissement (précipités) aux joints de grains et/ou dans les zones voisines 	<ul style="list-style-type: none"> - Orientation des grains - Film superficiel - Composition de la surface - Précipités et inclusion émergeant en surface - Rugosité - Ségrégation inter granulaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Composition - Teneur en oxygène - Différence d'aération - pH - Température - Cyclage thermique - Gradient thermique - Agitation et écoulement - Contraintes appliquées (statiques et dynamiques) - Bactéries - Complexant - Irradiation

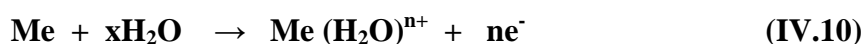
IV.7.2 Classification des processus de la corrosion

Suivant le mécanisme, la corrosion peut être divisée en deux types : corrosion chimique et corrosion électrochimique.

A/ - **La corrosion chimique** est la réaction chimique hétérogène entre la surface du métal et le milieu ambiant, c'est à dire, la réaction de transformation du métal en ions, l'interaction du métal avec le milieu liquide non conducteur électriquement ou avec les gaz secs est l'exemple typique de la corrosion chimique, l'oxydation du métal par l'oxygène ou l'interaction de métal avec d'autre gaz actifs (SO₂, H₂S, halogénures, vapeur d'eau, CO₂...) à température élevée sont les formes particulières, mais très importantes de la corrosion chimique.

B/- **La corrosion électrochimique**-le type le plus répandu- est l'interaction électrochimique de la surface du métal avec le milieu ambiant, celle-ci obéit aux règles de la cinétique électrochimique, c'est à dire, que la corrosion électrochimique est la réaction d'oxydoréduction homogène se déroulant en solution, la corrosion électrochimique est la réaction d'oxydoréduction hétérogène qui se fait à plusieurs étapes et à plusieurs endroit différents de la surface du métal, la corrosion électrochimique se fait à deux processus simultanés suivants :

- 1- le processus anodique, ayant lieu aux compartiments anodiques de la surface du métal est celui de transformation directe du métal en ions hydratés en solution :



- 2- le processus cathodique, ayant lieu aux compartiments cathodiques de la surface du métal est l'assimilation des électrons excédentaires du processus anodique par certains accepteurs des électrons dits dipolarisateurs.

Au processus anodique se fait l'oxydation du métal, tandis qu'au processus cathodique-la réduction du déposant. L'existence du milieu extérieur conducteur électriquement est la condition primordiale du déroulement de la corrosion électrochimique, autrement dit, la corrosion électrochimique se fait aux solutions électrolytiques, la cause de séparation du processus total de la corrosion électrochimique en deux processus simultanés est d'exister dans le réseau cristallin des électrons libres et de séparer facilement au point de vue énergétique des ions métalliques du réseau cristallin par les processus d'hydratations, de solvatation, de la formation des complexes par des composants de la solution. Cela amène à la localisation des processus cathodiques et anodiques aux endroits différents de la surface du métal. La rouille des constructions et des appareils métalliques placés au plein d'air, des corps des vaisseaux et des constructions métalliques dans l'eau fluviale et marine, la corrosion des appareils de l'usine chimique etc....sont les exemples de la corrosion électrochimique.

Il est à noter que la recherche en détail des mécanismes de la corrosion chimique et électrochimique montre qu'il n'y a pas de différence nette entre eux.

Dans de nombreux cas, la transformation lente du mécanisme chimique en électrochimique peut se produire et, par contre, la corrosion aux solutions électrolytiques peut se faire suivant le mécanisme tant électrochimique que chimique.

A la dépendance de la condition du déroulement du processus de la corrosion on différencie les types les plus répandus de la corrosion suivants :

- 1- Corrosion atmosphérique c'est la corrosion des métaux dans l'atmosphère de l'air ou d'autres gaz humides.
- 2- Corrosion dans les électrolytes (acides, bases, solutions salines, eau marine...)
- 3- Electro- corrosion est provoqué sous l'action de la source électrique extérieure ou par les courants vagabonds.
- 4- Corrosion sous tension est provoquée par l'action simultanée du milieu agressif et de la tension mécanique sur le métal.
- 5- Corrosion biologique c'est la corrosion causée par les micro-organismes ou par des produits de leur métabolisme.

Suivant la destruction de la surface du métal on distingue deux types de corrosion : **corrosion totale** et **corrosion locale**. La corrosion totale occupe toute la surface du métal, elle peut être régulière ou irrégulière. La corrosion locale est concentrée aux endroits séparés de la surface.

IV.7.2.1 Méthodes d'estimation de la corrosion.

D'abord on estime qualitativement la corrosion au moyen de la vue pour déterminer la régularité de la surface, le caractère des produits de corrosion, la durabilité de l'adhérence des produits de corrosion avec la surface du métal, le type de corrosion...

Pour la corrosion totale régulière, la vitesse de corrosion Q (indice de la masse) peut être exprimée par la perte de masse (Δm) d'une unité de la surface S pendant une unité de temps (t) :

$$Q = \frac{\Delta m}{S_t} \quad (\text{IV.11})$$

Q est exprimée en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$ ou mg/cm^2 , journée,
Le défaut de l'indice de la masse est l'incapacité de l'utiliser pour comparer la corrosion des métaux de densité différente. En réalité, à une même vitesse de corrosion Q de fer et de l'aluminium, la profondeur de l'attaque sur l'aluminium est trois fois plus élevée que sur le fer. A telles conditions il est plus commode à utiliser l'indice de profondeur P de la corrosion :

$$P = \frac{Q}{d} \quad (\text{IV.12})$$

Où Q - vitesse de corrosion, $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$; d - densité du métal, g/cm^3 .

La dimension de l'indice de profondeur :

$$P = \frac{\text{g} / \text{m}^2 \cdot \text{h}}{\text{g} / \text{cm}^3} = \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{g}} = \frac{1000 \text{mm}^3}{10^6 \text{mm}^2 \cdot 1 / 8760 \text{an}} = 8,76 \text{mm} / \text{an}.$$

C'est pourquoi, l'indice de profondeur P devient :

$$P = 8,76 \cdot Q/d \quad \text{mm/an}$$

Pour la corrosion locale, la vitesse de corrosion ne peut être caractérisée précisément par les indices de masse ou de profondeur, la vitesse de corrosion est caractérisée quantitativement de l'indice mécanique, par exemple, suivant la perte de la ductilité :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0 \cdot 100\%} \quad (\text{IV.13})$$

Où σ_0 étant limite de la ductilité avant la corrosion ;

σ_1 étant limite de la ductilité après la corrosion.

IV.7.3 Influence des facteurs mécaniques sur la corrosion

La plupart des métaux sont exploités à la condition de l'action simultanée du milieu corrosif et des contraintes mécaniques. Les détails des appareils de l'industrie chimique, les constructions des avions, les colonnes et les tubes de canalisation dans l'industrie gazo- pétrolière, les rails ferroviaires, les appareils à pression élevée dans l'énergie thermique subissent l'action mécano-corrosion. Le danger de cette forme consiste à la *destruction catastrophique des constructions*. Par exemple, la destruction du pont suspendu sur le fleuve Ohio (USA) en 1967 faisant 46 morts était due à l'action simultanée des composants agressifs de l'air et des tensions mécaniques.

On distingue cinq cas de corrosion fissurant sous tension différents l'un de l'autre par le caractère de l'action des contraintes mécaniques :

Corrosion uniforme; corrosion par piqûre ; fissure, corrosion fatigue ; érosion corrosion.

IV.7.3.1 Corrosion uniforme.

C'est une forme de corrosion dans laquelle la perte de métal est à peu près uniformément répartie sur l'ensemble de la surface exposée au milieu. Elle peut se produire sur une surface nue et l'on parle alors de surface active ou de métal actif, la dégradation peut alors être rapide.

Elle se produit souvent sur une surface protégée par une couche superficielle d'oxydes (film passif). La vitesse de dégradation du matériau est alors faible mais non nulle.

La corrosion uniforme est relativement facile à qualifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur et sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôles périodiques.

IV.7.3.2 Corrosion par piqûre.

IV.7.3.2.1 Généralités :

La corrosion par piqûres est la forme de corrosion localisée la plus souvent rencontrée. De l'industrie maritime et pétrolière (navire, pipeline,...) en passant par la construction et le transport (câbles de suspension, canalisations, citernes,...), elle peut toucher tous les secteurs et s'avérer très coûteuse. La fig. (IV.19) montre la répartition des différentes formes de corrosion pour les aciers inoxydables.

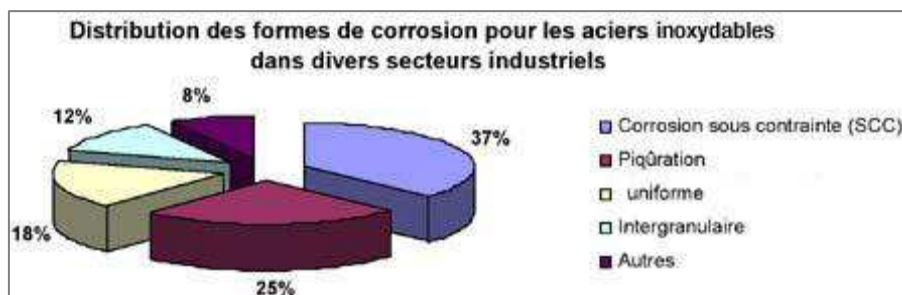


Fig. (IV.19) : Bilan des différentes formes de corrosion.

Vis-à-vis de son milieu corrosif, un matériau métallique peut se trouver dans des trois états possibles : l'immunité, la passivité et l'activité.

1. **L'immunité** : Dans cet état, la corrosion du matériau est impossible. Cela implique que le couple matériau/milieu se trouve dans un état de stabilité, et cette absence de corrosion n'est pas due à l'existence physique d'une « couche protectrice » entre le matériau et le milieu mais à l'absence de réaction électrochimique. Cette situation est

rencontrée dans le cas des matériaux nobles comme l'or, le platine dans les milieux aqueux de pH neutre.

2. **la passivité** : le matériau est protégé naturellement par une « couche protectrice » appelée film passif d'une épaisseur de l'ordre du nanomètre. En jouant le rôle de barrière entre le matériau et son milieu, ce film passif protège le matériau contre la corrosion. Ce comportement électrochimique est celui des matériaux comme l'aluminium, le titane, l'acier inoxydable dans les milieux aqueux de pH neutre.
3. **l'activité** : le matériau réagit directement avec son milieu et se corrode généralement de manière uniforme sur toute la surface. C'est le cas par exemple du fer en milieu acide.

Contrairement à la corrosion généralisée, où toute la surface est attaquée suite à la répartition spatio-temporelle aléatoire des sites anodiques et cathodique, la corrosion par piqûre se développe localement en formant une pile galvanique de corrosion entre la surface extérieure, passive et cathodique, et l'intérieur de la piqûre, actif et anodique voir fig. (IV.20) entraînant une cavité qui peut rapidement devenir profonde bien qu'une petite quantité de métal se dissolvent globalement.

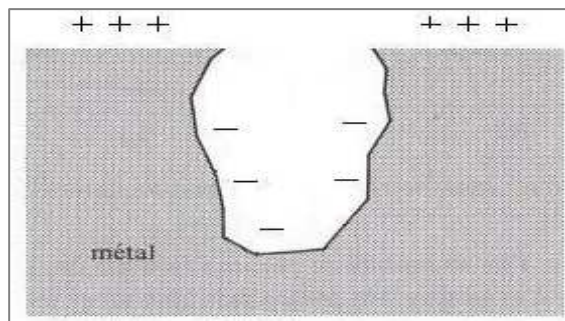


Fig. (IV.20) : Pile galvanique de corrosion : + Cathode, - Anode modifiée [40]

IV.7.3.2.2 Temps d'amorçage

Certains auteurs étudiant la sensibilité à la corrosion par piqûres en mesurant leur temps d'amorçage. Il existe différentes interprétations pour définir ce temps d'amorçage. Il peut être avancé comme étant :

- le temps nécessaire à la piqûre pour atteindre une taille pour laquelle le courant de piquuration est supérieur au courant de passivité sur le reste de la surface.
- Le temps nécessaire pour que les réactions locales causent une décroissance du pH jusqu'à une valeur permettant un maintien de la dissolution du métal entraînant la propagation des piqûres.
- Le temps nécessaire aux ions agressifs pour pénétrer dans le film passif.

Face à ces différentes interprétations, le mécanisme d'amorçage reste très complexe bien que plusieurs expériences ont mis en évidence des relations reliant le temps d'attaque et

l'épaisseur du film passif. Par conséquent des modèles probabilistes ont été élaborés pour caractériser ce temps et tenir compte des aléas du phénomène.

IV.7.3.2.3 Approche statistique : Amorçage + Propagation

1. Amorçage :

La dispersion du potentiel de piqûration lors des essais potentiodynamiques a principalement été reliée au caractère stochastique de l'amorçage des piqûres. Ainsi, le traitement de cette phase doit se faire via des approches probabilistes et des méthodes statistiques. Le modèle proposé. Le modèle proposé par Shibata et Takeyama suppose que le processus d'amorçage des piqûres est un processus Markovien. Cela signifie que la probabilité d'amorçage d'une piqûre à l'instant t ne dépend pas du nombre de piqûres amorcées auparavant. Autrement dit, il y a indépendance des amorçages des piqûres sur la surface d'échantillons. [43]

2. Propagation :

En plus des approches la cinétique des piqûres, l'aspect propagation peut aussi caractériser basées sur le potentiel et la sensibilité à la corrosion par piqûres. Dans cette approche, on s'intéresse à la distribution statistique des profondeurs des piqûres. L'évolution dans le temps de la moyenne des profondeurs x est souvent donnée par la loi empirique :

$$x - x_a = k(t - t_a)^n \quad (\text{IV.14})$$

- x_a la profondeur à partir de laquelle les piqûres continuent à croître.
- t_a le temps d'amorçage des piqûres.
- k et n des coefficients déterminés expérimentalement.

IV.7.3.2.4 Mécanisme de la corrosion par piqûres

Comme indiqué précédemment, le processus de corrosion par piqûres est complexe et nécessite un traitement prudent pour mieux interpréter les caractéristiques du phénomène. En général, on distingue les trois étapes : la rupture de passivité en condition métastable, la croissance de piqûres stables et la repassivation.

1. Rupture de la passivité

Les films passifs ne sont pas inertes. Ils sont en permanence le siège de différentes réactions qui déterminent leur aptitude à protéger contre la corrosion par piqûres. En général, la plupart des auteurs distinguent trois mécanismes de rupture de la passivité à savoir les mécanismes de pénétration, de rupture de film et d'adsorption.

2. Mécanisme par pénétration :

Ce mécanisme met en jeu le transfert d'anions agressifs à travers le film passif jusqu'à la surface du métal où débute leur mise en réaction. Ce transfert peut être expliqué par la présence d'un champ électrique élevé et une concentration importante de défauts dans la couche d'oxyde. En milieu chloruré, cela suppose que la piqûre se produit lorsque les ions clé

arrivent à l'interface métal-film. La fig. (IV.21) montre un schéma de ce type de mécanisme. [44]

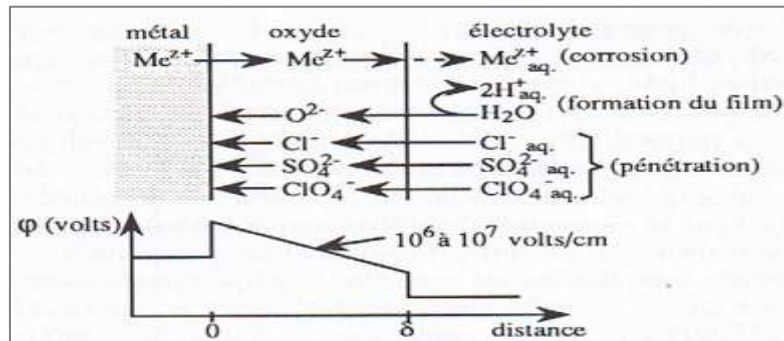


Fig. (IV.21) : schéma du mécanisme d'amorçage par pénétration [44]

3. Mécanisme par rupture de film : Vetter et Strehblow ont proposé un mécanisme qui nécessite des ruptures dans le film permettant l'accès direct des anions à la surface métallique non protégée. La fig. (IV.22). Montre un schéma de ce type de mécanisme.

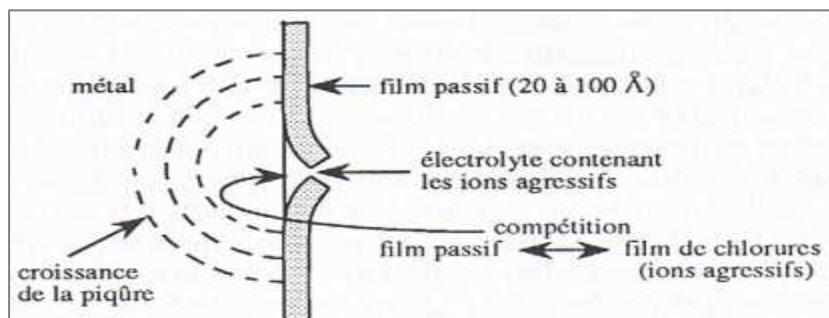


Fig. (IV.22) : Schéma du mécanisme d'amorçage par rupture du film [44]

4. Mécanisme par adsorption :

Il commence avec la formation en surface de complexes qui peuvent mettre en jeu des anions agressifs et causer l'amincissement local du film passif et sa destruction en formant des piqûres.

Ces mécanismes ne se produisent pas forcément de manière exclusive les uns par rapport aux autres. Un mécanisme d'adsorption peut par exemple précéder la pénétration d'ions agressifs. Cependant ils ont tous effet accélérateur de la différence de potentiel métal/milieu et de la concentration des ions agressifs en solution.

III.7.3.2.5 Croissance des piqûres

Une fois les piqûres amorcées, la condition générale pour assurer leur croissance est d'avoir une instabilité du film passif. Cela peut se produire si les concentrations locales et les teneurs en espèces agressives sont suffisants pour empêcher toute passivation. Du point de vue expérimental, le suivi de la propagation des piqûres est principalement effectué par l'étude des densités de courant déduites des mesures de courant de dissolution et de la géométrie des piqûres.

1. Repassivation

Comme indiqué ci-dessus, le comportement des piqûres est assez complexe. Après son amorçage, la piqûre peut continuer à croître, mais ce processus peut s'arrêter pour différentes raisons. C'est la repassivation. Parmi les facteurs qui peuvent arrêter la croissance des piqûres on peut citer la chute ohmique. Par contre elle ne concerne que les piqûres qui sont dans un stade avancé avec un rayon de quelque mm [44], et ne peut servir d'explication pour les piqûres de petites dimensions (de l'ordre du μm).

III.7.3.3 Corrosion – fatigue

a- Aspect phénoménologique

Pour rendre compte du comportement vis-à-vis de l'amorçage en fatigue des matériaux métalliques, on a recours le plus souvent à des essais selon Wohler qui consistent à soumettre une éprouvette de petites dimensions à une contrainte cyclique de flexion ou de traction σ et à mesurer la nombre de cycles à rupture N_r . Les résultats sont reportés sur un diagramme $\sigma = f(N_r)$ (diagramme de Wohler). Bien que l'essai soit conduit jusqu'à la rupture, on considère généralement que pour les grandes durées de vie la part de la durée de vie consacrée à la propagation est faible vis-à-vis de la durée de vie pendant la phase d'amorçage, compte tenu de la faible dimension des éprouvettes. Dans ce qui suit, les résultats d'essais sous fatigue-corrosion sont généralement comparés à ceux obtenus à l'air à de fortes fréquence f de cycles (> 10 Hz). [45]

b- Mécanisme d'amorçage

Les processus d'endommagement en fatigue-corrosion sont nombreux. La plupart ont été schématiquement représentés par Schneider qui répartit ceux-ci en fonction de l'état initial de la surface du matériau, considérée soit à l'état actif, soit à l'état passif (Fig.IV.23).

Dans le domaine de la résistance à la fatigue-corrosion, à grand nombre de cycles ($N_r > 10^6$ cycles), les mécanismes généralement proposés pour rendre compte de ces processus se classent en trois catégories : adsorption, dissolution et fragilisation par l'hydrogène.

Consulté aussi Technique de l'ingénieur Traité Matériaux métalliques 2003.














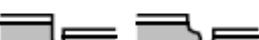





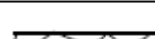
État initial	actif 	passif 	passif 	passif 
Germination des fissures	attaque corrosive 	glissement 	piqûration 	corrosion intergranulaire 
État intermédiaire				piqûres 
Initiation des fissures				
Propagation des fissures				

Fig. (IV.23) : Représentation des différentes étapes d'endommagement en fatigue- corrosion.

III.7.3.4 corrosion sous contrainte

Ce type de corrosion se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif.

Ce sont les contraintes de tension, d'où le nom donné parfois à ce mode de corrosion (CST). Qui sont dangereuses ; les contraintes de compression exerçant au contraire une action protectrice.

La corrosion sous contraintes (CSC) se produit la plupart du temps dans des milieux peu ou non agressifs à l'égard du métal ou de l'alliage en l'absence de toute contrainte (par exemple eau et vapeur à haute température pour les aciers inoxydables austénitiques).

Les pertes en poids sont généralement très faibles et sans commune mesure avec l'ampleur des dégâts. Cette forme de corrosion est d'une grande importance du point de vue pratique : elle constitue un risque permanent dans de nombreuses installations industrielles, tant sur le plan des incidences économiques que sur les aspects sécuritaires (personnel, fiabilité des équipements, respect de l'environnement). On ne connaît pas de classe de métaux ou alliages commerciaux qui y soit rigoureusement insensible.

Des matériaux comme le verre, les matières plastiques, le caoutchouc sont aussi sujets, dans certaines conditions, à cette forme d'attaque. Les moyens pour réduire cette corrosion sont l'élimination des contraintes résiduelles par traitements thermiques de détente, l'épuration du

milieu, l'action sur le matériau ou l'état de surface ou l'application des moyens de protection extérieurs : protection cathodique, inhibiteurs ou revêtements.

IV.7.3.5 Propagation des fissures

Beaucoup de théories sont proposées pour expliquer la propagation ou progression des fissures. La théorie la plus largement admise fait état de l'action simultanée de la corrosion et de tensions pour la propagation des fissures. En d'autres termes, la corrosion joue continuellement un rôle pendant la propagation des fissures et pas seulement au cours de la naissance de la fissuration. La base ou point d'amorce de la fissure est anodique et la surface environnante est cathodique. Cette surface peut englober les parois de la fissure. L'explication ci-dessus qui comporte l'action combinée de la corrosion et des tensions s'appelle la théorie électrochimique- mécanique de la propagation des fissures.

Théories relatives à la présence d'une zone anodique à la racine de la fissure.

On est généralement d'accord pour admettre l'action de la corrosion dans l'amorce de la fissuration et la nécessité d'action combinée de la corrosion et des tensions pour la propagation des fissures. Nombreuses sont les explications du caractère anodique présenté par la racine des fissures. Nous les exposons ci-après :

Théorie électrochimique.

La théorie électrochimique fait appel à la susceptibilité à une corrosion sélective suivant des chemins plus ou moins continus et à de fortes tensions tendant à disloquer le métal le long de ces chemins. Ces chemins continus peuvent suivre les joints des grains ou une phase anodique est déjà précipitée. Des sillons ou des piqûres en découlant, provoquant l'augmentation de tension ou des entailles dans lesquelles les fissures s'amorcent et ensuite se propagent en raison des tensions et de la corrosion à la racine des fissures. Des différences de potentiel entre les grains et les zones de limite des grains ont été observées. Cette théorie rend compte des corrosions inter-granulaires observées dans quelques cas.

Théorie de la décomposition par accroissement de tension.

Selon cette théorie la phase anodique se forme sous l'effet des tensions. Autrement dit, un endroit qui n'est pas susceptible d'attaque le devient par suite de formation ou décomposition d'une phase sous l'action des tensions.

Théorie du changement anodique.

Cette théorie explique la propagation de la fissuration en affirmant que lorsqu'une certaine concentration de tension est surajoutée à l'attaque par corrosion (piqûres ou sillons) une déformation en quelque sorte plastique s'établit et le potentiel d'électrode du métal est déplacé dans le sens anodique à la racine de la fissure en raison de l'énergie latente produite par la déformation. La région anodique ainsi créée est attaquée et la fissure produite à nouveau une concentration de tension suffisante pour le maintien de la déformation plastique. Ce processus peut être considéré comme un déplacement continu du potentiel et un enlèvement simultané de métal.

Théorie du film.

Cette théorie est une autre forme de la théorie électrochimique de la corrosion sous tension, mais fait intervenir comme facteur déterminant des conditions autres que des différences de composition. La corrosion sous tension étant amorcée par attaque électrochimique classique, la concentration des tensions à la base de la fissure naissante est suffisante pour arracher ou rompre toute couche ou tout film qui peut se former. Il s'est souvent vérifié qu'il existe des différences de potentiel entre les surfaces de métal non recouvertes d'un film et celles recouvertes. Dans un de ces cas, le potentiel à la base de l'entaille dans un alliage sujet à l'allongement sous tension a été trouvé anodique de 0,7 V. par rapport au reste de l'échantillon. L'attaque dans ces zones faibles devient d'une façon permanente plus rapide que sur les surfaces protégées par un film et la corrosion s'y produit de préférence.[45]

IV.7.3.5.1 Milieux environnants

Il a été établi que tous les métaux et alliages peuvent être fissurés sous certaines conditions de tension et de corrosion. Heureusement la plupart des environnements ne provoquent pas une corrosion sous tension. Les ruptures sont souvent inattendues et le plus souvent graves

Le tableau 3.7 indique pour une liste de métaux et alliages les milieux environnants dans lesquels peut se produire leur corrosion sous tension. Cela ne signifie pas que la rupture interviendra toujours dans ces combinaisons mais on est informé des possibilités de dégradation.

Par exemple le nickel est largement utilisé en milieu caustique et la rupture est difficile à obtenir à moins d'employer un métal travaillé à froid. D'autre part, le laiton se fissure très facilement dans l'ammoniaque et l'acier soudable sera avarié dans la soude caustique concentrée à haute température, comme l'indique la précédente figure 3-17.

Tableau (IV.10) : Milieux environnants qui peuvent causer la corrosion fissurant des métaux et alliages.

Matériau	Environnement
Alliages d'aluminium	NaCl-H ₂ O ₂ en solution Eau de mer NaCl en solution Air, vapeur d'eau
Alliages de cuivre	Vapeurs et solution d'ammoniac Amines Eau, vapeur d'eau
Alliages d'or	F ₂ Cl ₃ en solutions Solution d'acétates
Inconel	Solution de soude caustique
Plomb	Solution d'acétate de plomb
Alliages de magnésium	NaCl-K ₂ C _r O ₄ en solutions Atmosphère rurale et littorale Eau distillée
Monel	Soude caustique fondue Acide fluorhydrique Acide fluosilicique
Nickel	Soude caustique fondue
Acier ordinaire	NaOH-Na ₂ S _i O ₂ en solutions Solution de nitrates de calcium, ammonium et sodium Mélanges acides (H ₂ SO ₄ -HNO ₃) Solutions d'HCN Solutions acides d'H ₂ S Eau de mer Alliages fondus Na-Pb
Acier inoxydable	Chlorures acides en solutions tels que MgCl ₂ et BaCl ₂ NaCl-H ₂ O ₂ en solutions Vapeurs condensées d'eaux salées
Titane	Acide nitrique fumant

Les fissures peuvent être trans -granulaires (à travers les grains) et se présenter plus ou moins en lignes droites. Elles peuvent aussi être inter granulaire (entre les grains) et présenter un parcours ramifié.

Les coquilles et tubes en acier inoxydable d'échangeurs de chaleur ou de condenseurs, placés en position verticale et contenant de l'eau salée dans les coquilles présentent souvent des corrosions sous tensions.

Les ruptures sont le plus souvent situées dans les tubes près du sommet de la nappe de tubes.

Les ruptures se localisent dans cette zone en raison de la concentration des ions chlore des chlorures dans la poche d'air qui se forme par suite d'une purge d'air incomplète. Dans ces zones, des dépôts se forment et les effets de piles de concentration se manifestent. D'autres localisations courantes de fissures sont les crevasses formées entre le tube et l'alvéole de la plaque tubulaire.

L'espace mort représenté correspond à la poche d'air signalée au paragraphe précédent. La quantité de chlorures peut être faible dans l'eau mais la fissuration est susceptible de se

produire si une concentration peut se réaliser dans les crevasses ou sous les dépôts. La plupart des fissurations de matériel nécessitent des températures de tube de 75°C et davantage. *Plus la température est élevée plus la fissuration risque de se produire.*

IV.7.3.5.2 Gradients thermiques

Un important gradient thermique est une cause de tension peut souvent être prise en considération. Si un coté d'une paroi métallique est très chaud et si l'autre coter est à une température très inférieure, il peut se développer des tensions de 2 800 kg/cm², et plus. Ceci parce que le coté chaud tend à se dilater mais est retenu par le coté froid. En augmentant la température du coté du refroidissement, pour réduire le gradient de température (et les tensions) on résoudre souvent ce problème.

Un problème intéressant de tensions concerne les canalisations haute pression en acier inoxydable renfermant des gaz inflammables à 200°C et refroidis par ruissellement d'eau sur leur surface extérieure. L'acier ordinaire ne résistait que deux ans à cause de la corrosion généralisée par l'eau. L'acier inoxydable fut utilisé en remplacement en raison des dangers encourus. Ces tubes d'acier inoxydable furent fissurés en moins de six mois. Le gradient thermique créait une force de 3 500 Kg/cm². Des attaques localisées survinrent sous les matières solides déposées à partir de l'eau utilisée. Ce problème fut résolu en utilisant un acier à 5% de chrome. Celui-ci avait une meilleure résistance à la corrosion que l'acier ordinaire, mais il se corrodait uniformément avec une faible vitesse et les attaques localisées ne se produisaient pas. [46]

IV.7.3.6 Erosion - Corrosion.

L'érosion - corrosion est la destruction de la surface du métal due à l'action abrasive de l'autre objet solide sous l'action simultanée du milieu corrosif ou bien à l'action abrasive directe même du milieu corrosif. Dans le premier cas le phénomène est dit érosion -corrosion. Dans ce cas ne se produit pas la destruction métal, mais des films d'oxydes superficiels ou bien des substances absorbées formées sur la surface du métal sous l'action du milieu ambiant.

La destruction, dans ces conditions, est provoquée par deux processus : a) destruction mécanique du film de protection ; b) l'interaction chimique ou électrochimique du métal avec le milieu agressif.

La vitesse totale du processus de l'érosion- corrosion est conditionnée non seulement par les propriétés mécaniques et les propriétés d'antifricition des films d'oxyde ou des produits de corrosion et par la vitesse du processus chimique ou électrochimique de la corrosion du métal dans les conditions données, la séparation mécanique constante des films superficiels adsorbés ou d'oxyde de protection fait augmenter beaucoup la vitesse de corrosion .les produits d'oxydations formés augmentent l'érosion dont l'action provoque le changement de la

structure de la couche superficielle du métal : la dislocation du réseau, la fragmentation des grains etc..

Un parmi des formes de l'érosion -corrosion par choc s'observe dans les condensateurs tubulaires marins ou dans les appareils d'échange thermique.

Cette forme de corrosion devient plus intensive dans l'eau marine sale en présence des sables et d'autres particules solides. Les aciers peu alliés dans l'eau marine ont la stabilité plus élevée que l'acier non allié ou les fontes grises. Les alliages possédant les films de protection stables, tels que les aciers chrome nickel austénitiques et les fontes sont encore plus stables. Si le film d'oxyde sur la surface du frottement métal- métal ne se forme pas, l'érosion du métal se produit sans perte de la masse .la composition du milieu ambiant influe sur l'érosion. L'érosion la plus faible s'observe dans l'eau distillée et l'érosion la plus forte s'observe dans la solution de NaOH 1%. [47]

La protection contre l'érosion- corrosion peut être efficace par :

- la diminution du coefficient de frottement à l'aide de l'application des revêtements différents (phosphatation, chromation, sulfitation, selenisation...)
- la mise en œuvre d'un film du matériel plastique (par exemple, résine) ou des plastiques stables chimiquement dans les milieux agressifs (tels que le plastique fluoré)
- le traitement thermochimique de la surface du frottement (tels que l'azotisation)

IV.7.3.7 La corrosion Galvanique

Elle est due à un contact entre des matériaux de nature différente exposés au même milieu conducteur appelé électrolyte. Cette situation est appelée couplage galvanique. La corrosion galvanique fonctionne comme une pile qui est constituée de deux électrodes plongeant dans une solution électrolyte qui est en général une solution diluée d'acide.

Les deux électrodes sont reliées extérieurement par un circuit électrique qui assure la circulation des électrons.

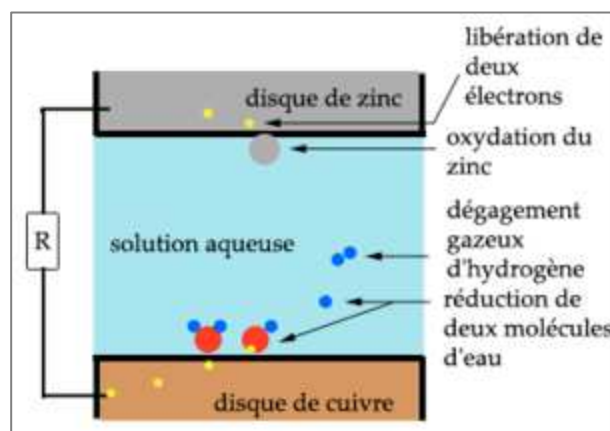


Fig. (IV.24) Exemple de Corrosion galvanique, cas d'une pile constituée du couple zinc cuivre.

IV.8 Vibrations

Les vibrations constituent un paramètre essentiel à prendre en compte dans la conception d'un échangeur, au même titre que les transferts de chaleurs ou les pertes de charge. Outre les aspects classiques (chocs, spectre de vibration) issus du milieu extérieur, les échangeurs induisent leurs propres vibrations sous l'effet du fluide qui les parcourt. Ce paragraphe à trait essentiellement aux efforts dynamiques dus au fluide et à leur répercussion sur les tubes dans un échangeur de type tubes et calandre ; cet aspect vibratoire est peu ou pas rencontré dans les autres échangeurs.

Suivant la vitesse d'écoulement du fluide coté calandre, les tubes qui vibrent à leurs fréquences propres peuvent se déplacer suffisamment pour entrer en collision. Il s'ensuit un phénomène de fatigue pouvant aller jusqu'à la fuite ou la rupture.

L'essentiel du travail consiste à évaluer les paramètres intrinsèques aux tubes (fréquences propres, amortissement), les caractéristiques hydrauliques du fluide coté calandre, et à analyser le couplage fluide/tubes. [48]

IV.8.1 Caractéristiques vibratoires des tubes

IV.8.1.1 Fréquence de résonance

Les principales configurations de tubes rencontrées sont : les tubes droits et les tubes coudés en U. Ces tubes sont considérés comme encastres à chacune de leurs extrémités au niveau des plaques ; ils peuvent s'appuyer sur des chicanes.

- **Dans le cas d'un tube droit** supporté ou encastres aux extrémités, les fréquences de résonances sont bien connues

$$F_n = \frac{X_N}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{M}} \quad (\text{IV.15})$$

Avec

- E(N/m²) module de Young du matériau du tube,
- F_n (Hz) n^{ième} fréquence,
- I (m⁴) inertie du tube,
- L (m) longueur entre deux fixations,
- M (Kg/m) masse linéique du tube,
- X_n nombre dépendant du type de liaison aux extrémités.

Les calculs effectués dans [Lalanne, Berthier et *coll.*] donnent :

Tableau. (IV.11) : Fréquence de résonance

Type de liaison aux deux extrémités	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
Encastré – libre	3,516	22,03	61,69	120,9	199,8
Appuyé – appuyé	9,869	39,47	88,82	157,9	246,7
Encastré à chaque extrémité libre -libre	22,370	61,67	120,90	199,8	298,5
Encastré – appuyé Libre - appuyé	15,410	49,96	104,20	178,2	272,0

En condition réelle, les tubes sont supportés par les chicanes.

Le calcul fait intervenir leur espacement et leur nombre. Des solutions sont proposées par les standards de dimensionnement [TEMA].

Pour un espacement non régulier des supports, la méthode est approchée. Sa précision est estimée à 30% par valeur inférieure.

- **Dans le cas d'un tube en U**, la fréquence la plus basse peut être associée à un mode de vibration hors du plan du U. La méthode de calcul n'est plus aussi simple.

Le standard TEMA donne toutefois la fréquence minimale de résonance :

$$F_1 = 0,0403 \frac{C_U}{R^2} \sqrt{\frac{EI}{M}} \quad (\text{IV.16})$$

Avec C_u coefficient dépendant de la distance des supports à la partie coudée (IV.24).

Les particularités à prendre en compte pour le calcul de la masse linéique du tube (M) et de sa raideur (EI) sont détaillées ci-après.

Les méthodes approximatives de prédiction des fréquences de résonance peuvent actuellement être avantageusement remplacées par des calculs exacts, de type éléments finis par exemple, à la portée des micro-ordinateurs.

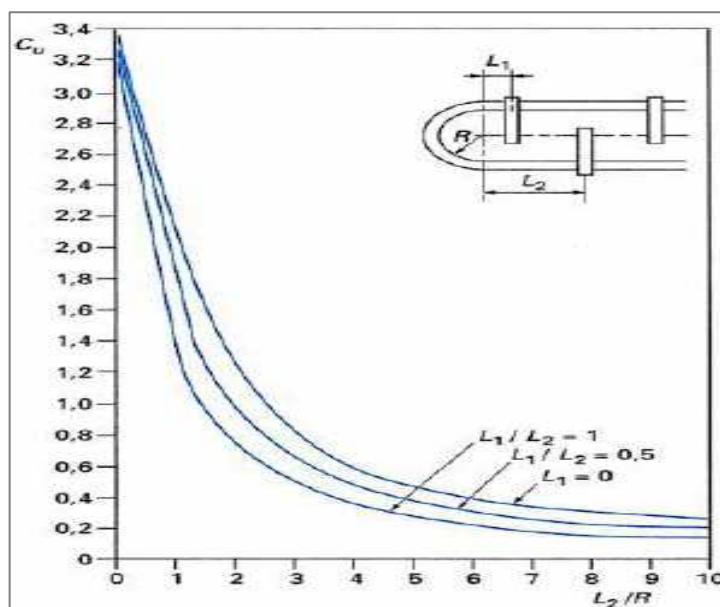


Fig. (IV.25) : Détermination du coefficient C_u en fonction de la distance des supports à la partie coudée (HEDH)

Avec ρ masse volumique du fluide coté calandre,

S surface du tube ($\pi D_e^2/4$) ;

Plus généralement, pour d'autres sections de tubes isolés ou non, la masse ajoutée s'écrit :

$$M = X\rho s \quad (\text{IV.17})$$

Avec, dans le cas de faisceaux de tubes cylindriques, en fonction du pas adimensionné p/D :

Tableau (III.12) : le faisceau de tubes cylindriques, en fonction du pas adimensionné p/D

p/D	X
1,25	2,95
1,5	2

- **Correction de raideur due à l'effort axial**

La raideur de flexion du tube peut être modifiée par les efforts axiaux de traction ou de compression. Ces efforts peuvent être due à la dilatation thermique des tubes ou à la pression sur la plaque support dans le cas d'une tête flottante. L'influence sur la fréquence de résonance est donnée par la formule suivante :

$$F_{nc} = F_n \sqrt{\left(1 + \frac{Pl^2}{\pi^2 EI}\right)} \quad (\text{IV.18})$$

Avec P effort axial sur un tube en valeur algébrique (+en traction, - en compression).

On peut noter qu'en compression la fréquence devient nulle pour la charge de flambage du tube. Cependant, en pratique, dans la prise en compte du flambage possible du tube, on limite la baisse de fréquence envisageable (30 % par exemple pour un coefficient de sécurité de 2 sur la charge maximale de flambage).

La différence de pression entre tubes et calandre peut jouer le même rôle que les efforts axiaux. Ce cas est plus rarement rencontré.

IV.8.1.2 Vibrations induites par le fluide et couplage fluide/tubes

IV.8.1.3 Vibration dues au sillage (vortex)

Ce type de régime se caractérise par une instationnarité de l'écoulement qui produit à l'aval du tube des tourbillons alternés.

Leur fréquence augmente avec la vitesse du fluide. Le paramètre caractéristique est le **nombre de Strophante** :

$$S = \frac{F_s D_h}{U} \quad (\text{IV.19})$$

Avec D_h diamètre hydraulique,

F_s fréquence des tourbillons,

U vitesse du fluide coté calandre.

S peut être considéré comme constant dans une large gamme de valeurs du nombre de Reynolds :

$$S = 0,2 \quad \text{pour} \quad 200 < \text{Re} < 100\,000$$

On peut donc aisément calculer la fréquence F_S . La coïncidence entre les fréquences des tourbillons du fluide et de vibration des tubes amène un phénomène de résonance, les efforts ainsi produits pouvant occasionner des dommages.

La présentation ci-avant suppose une totale indépendance entre les phénomènes fluides et tubes. Dans la réalité, les tubes étant assez souples, ils peuvent influencer sur la fréquence des tourbillons. Le mouvement des tubes amène la fréquence normale des tourbillons à coïncider avec celle des tubes ; on parle alors d'accrochage. Pour éviter ce problème, il est conseillé de respecter un écart relatif de 20 % minimum entre les fréquences du fluide et les fréquences des tubes. [49]

IV.8.1.4 Vibration dues à la turbulence (buffeting)

Les fluctuations de pression dues à un écoulement ne sont pas, en général, déterministes. On parlera donc en termes probabilistes.

L'environnement aléatoire peut être spécifié par une densité spectrale de puissance, c'est-à-dire par une énergie fluctuante moyenne pour une fréquence donnée. Les tubes répondent de manière préférentielle à leur fréquence de résonance en amplifiant la sollicitation ; ils filtrent les autres fréquences.

Les efforts induits sur les tubes peuvent être estimés pour un spectre connu. Celui-ci est difficile à mesurer expérimentalement. Il est en général à large bande et de type passe-bas. Si les efforts induits sont inévitables, on peut les diminuer en :

- augmentant la fréquence des tubes ;
- augmentant l'amortissement ;
- diminuant la vitesse du fluide.

IV.8.2 Vibration acoustiques

Ce problème n'apparaît qu'en présence de gaz dans la calandre.

En effet, ce milieu étant de nature compressible, il présente des fréquences de résonance. Leur valeur se détermine simplement par :

$$F_N = \frac{c}{2L} \quad \text{(IV.20)}$$

Avec c vitesse du son dans le gaz, L dimension caractéristiques de la calandre perpendiculairement aux tubes et à l'écoulement (diamètre de la calandre).

Les fréquences acoustiques peuvent être excitées par la turbulence, ce qui génère du bruit. Si un élément de l'échangeur (les tubes par exemple) présente une fréquence propre coïncidant, alors le bruit généré peut s'avérer destructeur.

On évitera donc la coïncidence par un écart de 20% entre ces fréquences.

IV.9 Problème de tenu mécanique :

Le choix du matériau doit répondre à la fois à des exigences de résistance mécanique et de tenue à la corrosion correspondant aux conditions de fonctionnement. Pour les alliages utilisés dans la construction, la résistance mécanique statique n'est pas le seul critère de choix. Il est conditionné à la fois par la résistance à la traction, la résistance à la fatigue et également la résistance à la CSC.

Des spécifications précises doivent être établies au niveau de la composition et des traitements thermiques afin de limiter la présence d'inclusion et de maîtriser l'état microstructural y compris dans les zones soudées. Dans le cas où des phénomènes de sensibilisation suite aux traitements thermiques sont à craindre le choix de matériaux « stabilisés » s'impose. Dans le cas des aciers inoxydables, l'utilisation de nuance bas carbone ou stabilisées au titane ou au niobium (plus avide de carbone que le chrome), permet de limiter les risques de déchromisation et donc les risques de sensibilisation à la fissuration inter-granulaire.

On constate qu'il y a plusieurs types d'aciers :

a/ Les aciers alliés :

Les aciers « inoxydables » sont des alliages de fer (et de carbone) contenant du chrome (12 % minimum) ou des additions simultanées de chrome et de nickel et souvent un certain nombre d'éléments (Mo, Ti, Si, Nb, Ta...) en quantités moindres.

On conçoit alors la grande variété des nuances commerciales d'aciers fortement alliés, variété basée sur des compositions différentes, des états de surface différents, mais aussi sur des traitements thermiques et mécaniques pouvant se traduire par des *structures métallurgiques* différentes. Or, c'est souvent cette structure qui conditionne le comportement des aciers inoxydables vis-à-vis de la corrosion.

b/ Les aciers martensitiques au chrome

Ils contiennent de 12 à 20 % de chrome et de 0,1 à 0,5% de *carbone* (jusqu'à 1% dans certains cas).

Les aciers inoxydables martensitiques sont souvent choisis pour leurs propriétés mécaniques élevées et non pour leur résistance à la corrosion, puisque dans les grandes familles d'aciers

alliés, ils sont les moins riches en chrome. On les utilise dans des milieux peu ou moyennement agressifs (clapets, soupapes, arbres et ailettes de pompe au contact de l'eau liquide ou vapeur, d'hydrocarbures, de gaz liquéfiés, de boissons alimentaires...).

De tels aciers peuvent alors être employés dans des atmosphères salines (pièces d'accastillage, turbines hydrauliques, domaine aéronautique...).

c/ Les aciers ferritiques

Ces aciers ferritiques ne contenant pas de nickel et assez peu d'autres éléments d'alliage que le chrome, sont parmi les moins coûteux des aciers alliés. Ils ont des caractéristiques mécaniques souvent faibles, surtout à chaud. Les nuances riches en chrome peuvent subir cependant un phénomène de durcissement structural à 475 °C : les propriétés mécaniques sont modifiées, l'alliage est plus fragile et peut devenir sensible à la corrosion inter-granulaire.

Pour éviter ce type de corrosion suite à une opération de soudage par exemple, les nuances à 17% de chrome sont généralement stabilisées par addition d'éléments tels que le titane ou le niobium.

Se prêtant assez bien à l'emboutissage et à la conformation à froid, ces aciers inoxydables sont largement utilisés en architecture et décoration (panneaux de façade, toitures...), en construction automobile, en électroménager (machines à laver, couverts, plats, éviers,...).

La famille des super-ferritiques se caractérise par une exceptionnelle résistance à la corrosion localisée (piqûres et crevasses) en milieu marin, ce qui en fait un matériau de choix pour les échangeurs de chaleur utilisant l'eau de mer.

d/ Les aciers austénitiques

Ces aciers contiennent du chrome (17-25) et du nickel (7-25%), ainsi que des éléments d'additions en plus faibles quantités, tels que le carbone, l'azote et le bore (effet durcissant), le titane (élément stabilisant), le silicium, le molybdène, le tungstène, le vanadium et le cuivre qui ont aussi un effet durcissant.

Les nuances les plus intéressantes pour les constructions chaudronnées sont donc soit les nuances à faible teneur en carbone, soit les nuances stabilisées par addition de Ti ou Nb. Les autres nuances doivent subir un traitement final d'hypertrempe après mise en forme et soudage.

Une propriété très intéressante des aciers austénitiques est leur absence de fragilité à basse température. Ils constituent donc un matériau de choix pour toutes les applications cryogéniques.

Le choix optimal d'une nuance suppose une bonne connaissance des paramètres métallurgiques contrôlant la microstructure du métal de base et de la soudure. Les propriétés mécaniques, l'aptitude à la mise en forme et la résistance à la corrosion.

Les aciers alliés contrairement à ce que l'on imagine trop souvent, sont susceptibles de se corroder même dans des milieux peu agressifs (eau, air, ...) sous formes de corrosions localisées : crevasse, piqûres, inter-granulaire, sous contraintes, Il faut donc être très prudent dans leur utilisation.

Notons en particulier, qu'ils sont très sensibles à la corrosion sous dépôts (acidification sous le dépôt et dépassivation de l'acier « inoxydable »). [5]

IV.9.1 Types d'amorçage des fissures :

L'amorçage peut se produire de différentes manières :

A partir d'une attaque du matériau au niveau de l'émergence des plans de glissement. Ce scénario est observé sur les matériaux passivables. Sous l'effet d'une déformation plastique du substrat, la couche passive est localement rompue permettant à une corrosion localisée de s'installer. L'apparition de la fissuration dépendra alors de la compétition entre la cinétique d'émergence des plans de glissement qui entretient l'apparition de surface actives et la cinétique de repassivation (une cinétique trop rapide empêche les effets de la corrosion, une cinétique trop lente localise le phénomène). Ceci peut expliquer pourquoi des matériaux choisis pour leur bonne tenue à la corrosion en absence de sollicitation mécanique peuvent présenter des défaillances dues à une fissuration par corrosion sous contrainte, il n'en demeure pas moins que ces matériaux peuvent être très sensibles à la corrosion sous contrainte induite par des ruptures locales de la couche protectrice sous l'effet de la sollicitation mécanique. Il en est de même pour les alliages d'aluminium utilisés pour les structures légères. [50]

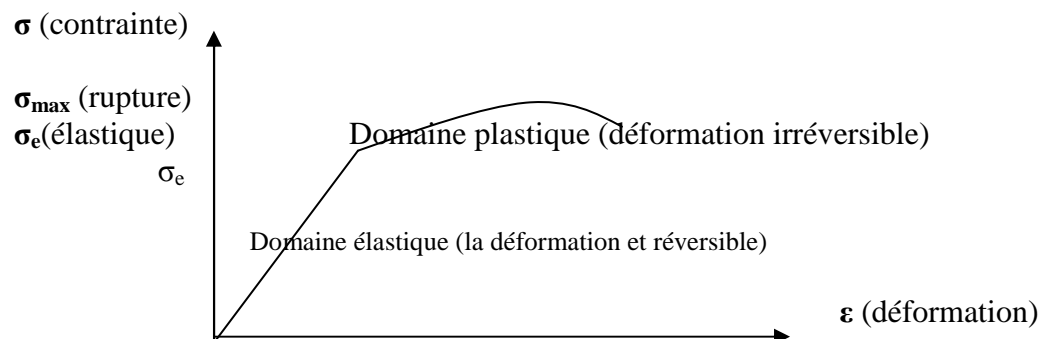


Fig. (IV.26) : courbe de résistance mécanique à la traction.

IV.9.2 Action combinée de corrosion et de facteurs mécaniques :

L'attaque localisée, la fissuration ou la rupture, est due à l'action synergique de contraintes mécaniques et de corrosion. Les contraintes peuvent être résiduelles ou appliquées et, dans ce cas, statiques ou dynamiques. La corrosion est généralement négligeable dans les zones non sollicitées mécaniquement. [51]

Deux formes entrent dans cette catégorie :

- Fatigue – corrosion.
- Corrosion sous contraintes.

IV.9.3 Fatigue Thermique :

Origine des contraintes thermiques :

On doit rappeler que les matériaux peuvent se dilater ou se contracter sous l'influence des variations de température $\Delta\theta$ et ces variations de dimensions sont à l'origine de contrainte thermiques. (Presse poly) Qui conduit à l'endommagement par fatigue, qui désigne la modification des propriétés du matériau suite à l'application répétée d'un chargement cyclique, qui conduit progressivement à la rupture des matériaux.

Le processus d'endommagement se développe, notamment, autour des zones critiques du matériau, près d'entailles qui font partie de la conception (trous, rainure, épaulement,...), ou d'imperfections créées lors du procédé de fabrication (pores de moulage, inclusions, précipités,...). Une déformation plastique localisée se développe alors autour de ces zones, et avec l'application continue du chargement cyclique, la rupture du matériau peut se produire à n'importe quel moment.

La capacité de résistance d'un matériau à la fatigue dépend principalement de sa nature, du niveau de contrainte ou de déformation imposée et de l'agressivité de l'environnement dans lequel est sollicité le matériau. Cette capacité est exprimée en nombre de cycles avant rupture, ou en termes de vitesse de propagation d'une fissure de fatigue.

La variation de dimension s'écrit :

$$C = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta \theta \quad (\text{IV.21})$$

Avec α = coefficient de dilatation linéique du matériau et l_0 = longueur initiale.

Quelques valeurs du coefficient d'expansion thermique linéaire (α) sont fournies dans le tableau 15 pour divers métaux et oxydes.

On peut noter que selon le système considéré, en particulier entre les métaux ou alliages et les oxydes, les différences peuvent être conséquentes, donc les variations dimensionnelles qui en résultent.

D'après la loi de Hook, la contrainte thermique est telle que :

$$\sigma_{\theta} = \frac{E \varepsilon_{th}}{1 - \nu} \quad (\text{IV.22})$$

Où $\varepsilon_{th} = \Delta \alpha \Delta \theta$ et ν est le coefficient de poisson, E le module d'Young, ou encore :

$$\sigma_{\theta} = \frac{E \alpha \Delta \theta}{1 - \nu} \quad (\text{IV.23})$$

La relation plus générale peut être vérifiée :

$$\sigma_{\theta} = \frac{E \alpha \Delta \theta}{f(\nu)} \quad (\text{IV.24})$$

Où $f(\nu)$ est une fonction du coefficient de poisson, fonction dont la valeur dépend de la géométrie de la pièce.

Notons que cette dernière relation n'est valable que lorsque les variations de température sont très rapides.

Tableau. (IV.13) : Module d'Young, E, et coefficient d'expansion thermique linéaire (α) pour quelques métaux et oxydes. [42]

Caractéristiques physiques, Mécaniques Matériaux	Module d'élasticité, E (GPa)	Coefficient de dilatation, α (10^{-6} K^{-1})
Aluminium	70	24
Fer	210	12,3
Nickel	210	13
Zirconium	96,6	5,8
SiO_2	70	0,5
Al_2O_3	390	8,8
MgO	210	13,5
ZrO_2	200	8
Diamant	1000	1,2

IV.9.4 Corrosion sous contraintes :

La corrosion sous contraintes provoque des ruptures sans attaque notable du métal. Des fissures souvent très fines progressent dans une pièce pour laquelle les contraintes appliquées peuvent se situer à des valeurs nettement inférieures à la résistance mécanique. Les risques dépendent à la fois du métal et du milieu corrosif. Les aciers inoxydables austénitiques, par exemple, y sont sensibles en milieu chlorure, et insensibles en milieu ammoniacal. Par

contre, les laitons sont sensibles à la corrosion sous contrainte en milieu ammoniacé et peu sensibles en milieu chloruré.

Les facteurs déterminants sont les suivants :

- Nature du métal (composition et structure),
- Composition du milieu corrosif,
- Température,
- Niveau de contraintes.

Les fissures sont initiées par des défauts de surface (souvent des piqûres) ; elles peuvent être inter -granulaires ou trans -granulaires, simples ou branchées suivant l'environnement et la structure du métal. Leur propagation est perpendiculaire à la direction de la contrainte.

D'une façon générale, les risques ne sont sensibles qu'à partir d'un seuil de contraintes déterminé dont la valeur est fonction du métal et du milieu. Des cas de corrosion sous contraintes ont été relevés avec des métaux ne travaillant qu'à 10 % de leur limite élastique. Dans d'autres cas, les risques ne deviennent notables qu'à partir de 70 %.

La vitesse de propagation de la fissure est à peu près constante au début, mais sa pénétration diminue la section utile du métal et augmente le niveau de contrainte. La fissure progresse ainsi de plus en plus rapidement jusqu'à ce que la charge de rupture du métal soit atteinte, et la rupture est du type mécanique.

Les ambiances corrosives susceptibles de provoquer de la corrosion sous contraintes sont très variables suivant les métaux et alliages considérés. [51]

La corrosion sous contrainte est influencée par certains facteurs métallurgiques.

- Composition du métal,
- Orientation des grains,
- Composition et répartition des précipités,
- Dislocation, traitements thermiques,...

Les alliages sont plus exposés que les métaux purs, mais cette règle n'est pas absolue (le cuivre pur peut subir de la corrosion sous contrainte en milieu ammoniacé par exemple).

Tableau. (IV.14) : récapitulatif de divers modes d'endommagement.

Rupture	Endommagement volumique	Endommagement surfacique	Endommagement mixte
Brutale	Cavitation Clivage (trans. ou inter granulaire)	Fragilisation par les métaux liquides (Hg, Cd,...)	
	Fragilisation par impuretés Fragilisation par l'hydrogène	Oxydation Corrosion Corrosion sous contrainte	
		Fatigue corrosion	
différée	Fluage à haute température	fatigue	fatigue fluage
	Fluage du béton		
	Fragilisation par irradiation		



Formation de fissures macroscopiques

Chapitre V

Historique et analyse du problème

V. Historique

Les rapports techniques [54] fournis par la compagnie américaine « Pullman Kellogg » révèlent que la plupart des échangeurs à plaques (des rebouilleurs) des colonnes de fractionnement du complexe GL2/Z ont subi des fuites internes (*percements*) ces fuites altèrent les performances du système de réchauffage par la vapeur.

V.1 Description du problème

Le problème de percement des tubes des rebouilleurs X56C est un problème fréquent. Il s'agit du percement des tubes de la 1^{er} et la 2^{ème} rangée exposée à la vapeur d'eau de réchauffage.

- Pourquoi le problème de percement se pose-t-il sur ces rebouilleurs ?
- Quelles sont les causes qui conduisent à ce problème ?
- De quelle manière peut-on résoudre ce problème ?

V.2 Fonctionnement des rebouilleurs

Le rebouilleur X56C est un échangeur de type BEM. La vapeur d'eau 4,5 bars passe dans le côté calandre et l'hydrocarbure du fond de la colonne du débutaniseur passe dans le côté tubes. La circulation du produit de fond de la colonne se fait du bas vers le haut du rebouilleur par effet de thermosiphon. Le niveau de condensât étant assuré dans un pot de condensât lié au rebouilleur et au collecteur de condensât du train.

V.2.1 Avant la rénovation

Le réchauffage du rebouilleur X56-C est assuré par la vapeur d'eau 4,5 bars. La TIC 405 règle la température au niveau du 14^{ème} plateau du débutaniseur. Le signal de régulation émise par TIC 403 règle le point de consigne de la vanne de régulation FIC 422 qui à son tour règle le débit de vapeur vers le rebouilleur. Le débit de vapeur est indiqué par FI-422.

L'évacuation de condensât du rebouilleur X56-C vers le collecteur de condensât est assurée par LV-412. Cette vapeur de réchauffage propulsé par une pression de 4,5. Elle est désurchauffée par un désurchauffeur SP-167 qui va diminuer la température de 230°C à 165°C par la pulvérisation de l'eau dans la vapeur.

V.2.1.1 Le désurchauffeur

V.2.1.1.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du désurchauffeur SP-167 est relativement simple. Le débit d'eau pulvérisée est régulé par une vanne qui répond au signal généré par la boucle de régulation de température. L'eau pulvérisée entre dans le tube d'eau du désurchauffeur puis continue dans la chambre de répartition Fig (V.27). Dès que la chambre se remplit, l'eau est pulvérisée par

les orifices d'injection. Mesure que la zone d'écoulement se réduit, l'eau pulvérisée est accélérée vers le point d'injection. Le débit accéléré se transforme en pulvérisation fine pour assurer une vaporisation rapide et efficace, au même moment, l'écoulement de vapeur pénètre le désurchauffeur. La zone d'écoulement continue à diminuer jusqu'au point d'injection d'eau. Il en résulte un écoulement turbulent plus rapide de la vapeur, améliorant ainsi le mélange d'eau pulvérisée avec la vapeur.

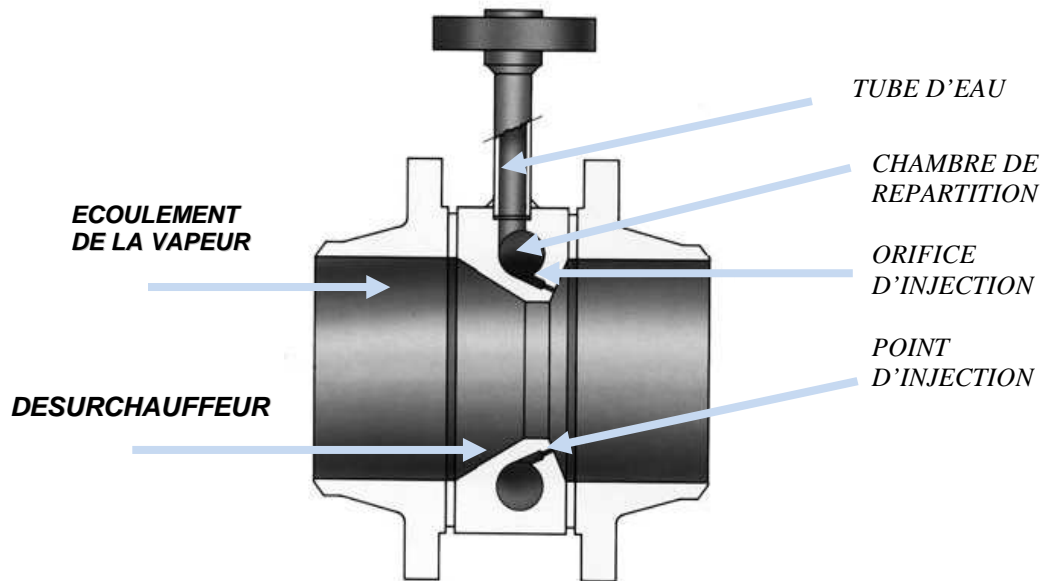


Fig. (V.27) Détail du désurchauffeur SP-167

V.2.1.1.2 Installation de désurchauffeur

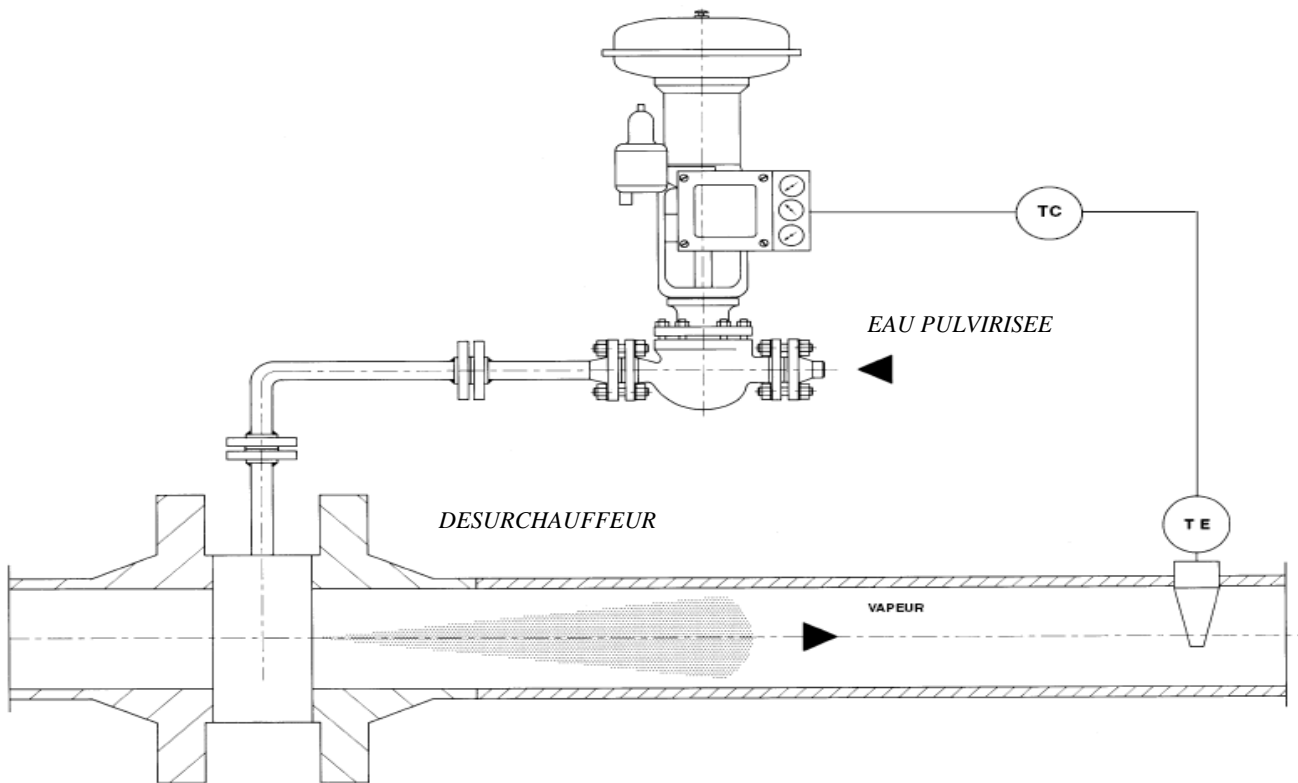


Fig.(V.28) Boucle de régulation type avec désurchauffeur PS-167

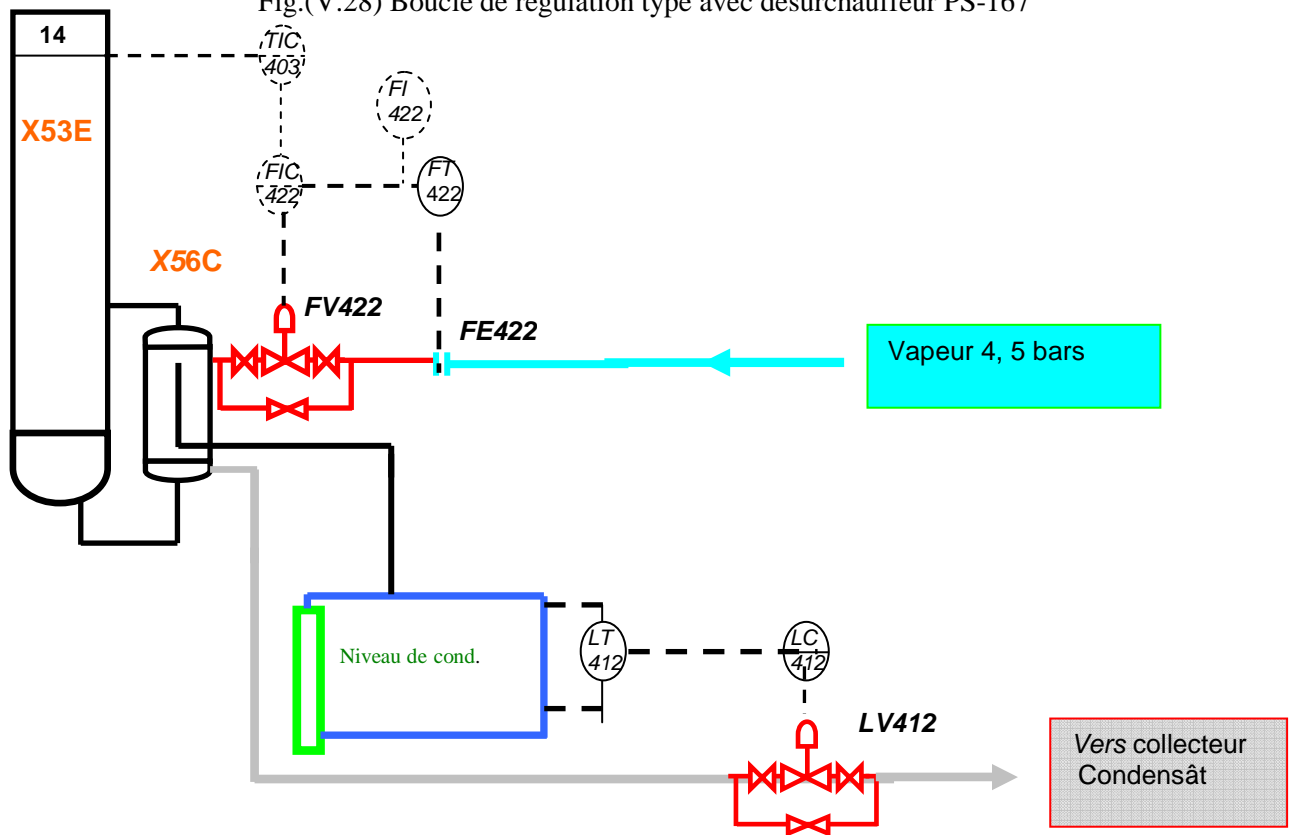


Fig. (V.29) schéma de contrôle de la température du débutaniseur par FV422

V.2.2 Après la rénovation

La rénovation se fait en deux endroits dans l'installation de la vapeur :

V.2.2.1 Rénovation à l'entrée du rebouilleur :

La vanne FV-422 a été supprimée et remplacée par un tronçon de tube.

Cet agencement permet de contrôler la surface de condensation disponible dans le rebouilleur et la pression de la vapeur, ce qui assure un fonctionnement stable et l'évacuation du condensât du rebouilleur dans toutes les conditions de fonctionnement. La vapeur 4,5 bars chassera directement le condensât du rebouilleur sans provoquer de pompage dans le système. Donc, la régulation s'effectue actuellement par un contrôleur de température du 14^{ème} plateau du débutaniseur TIC-403 (maître) avec LIC-412 (esclave). Un signal prioritaire fermera la vanne (LV-412) en cas de niveau bas pour maintenir à tout moment une capacité minimale dans le pot de condensât, évitant ainsi le passage de la vapeur. L'action sur la vanne de condensât LV-412 permet l'ouverture et la fermeture du débit de vapeur à condenser, donc sur la chaleur échangée et sur la qualité vaporisée au fond de la colonne.

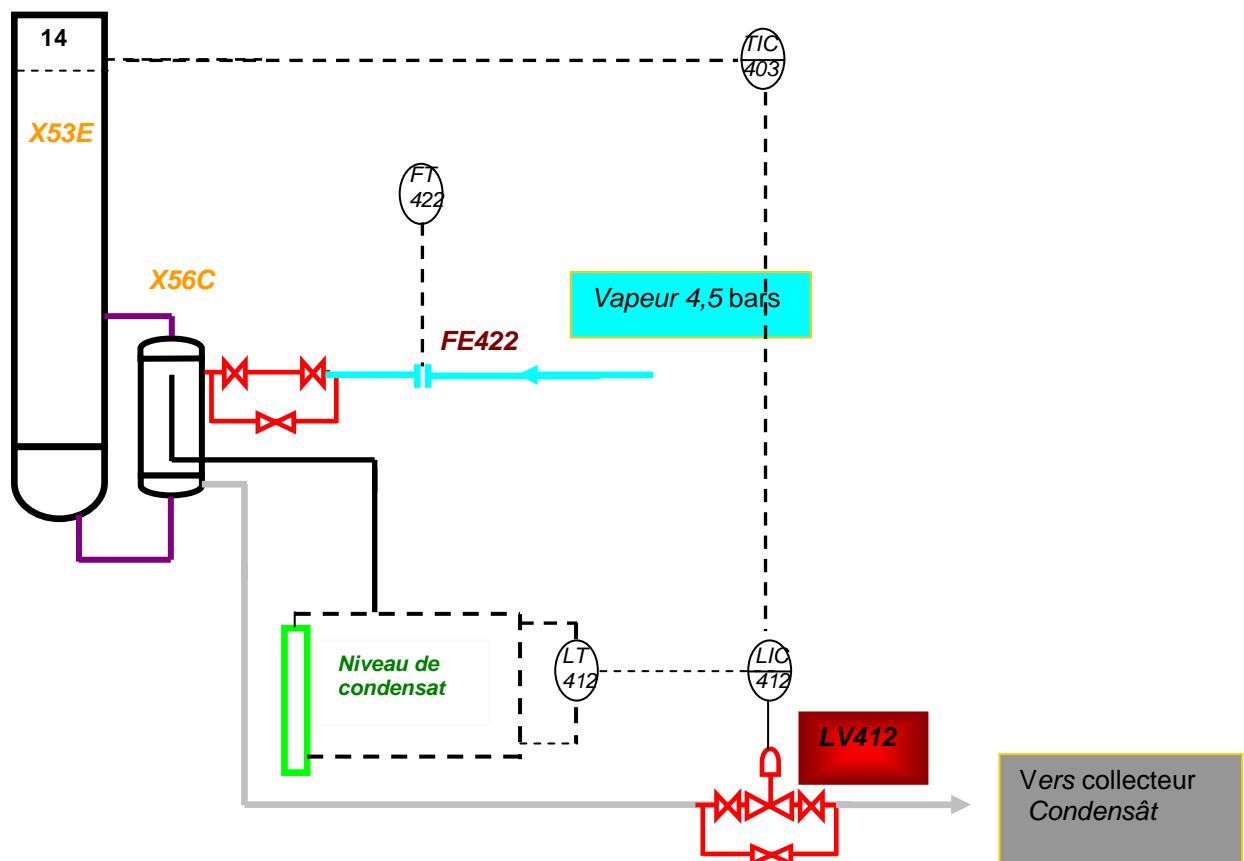


Fig. (V.30) Schéma de contrôle de la température du débutaniseur par LV412

Le rebouilleur X56-C du débutaniseur fonctionne en chaleur latente de condensation. C'est la phase de transfert de calories la plus intéressante (pour une masse de 1 Kg d'eau, la chaleur latente de condensation fournie de 540 kcal alors que la chaleur sensible cédée par le refroidissement de la vapeur ne fournit que quelques-unes).

V.2.2.2 Rénovation sur le désurchauffeur :

La deuxième modification c'est faite au niveau du désurchauffeur.

Le changement se fait sur le désurchauffeur PS-167 par un autre désurchauffeur DM-167.

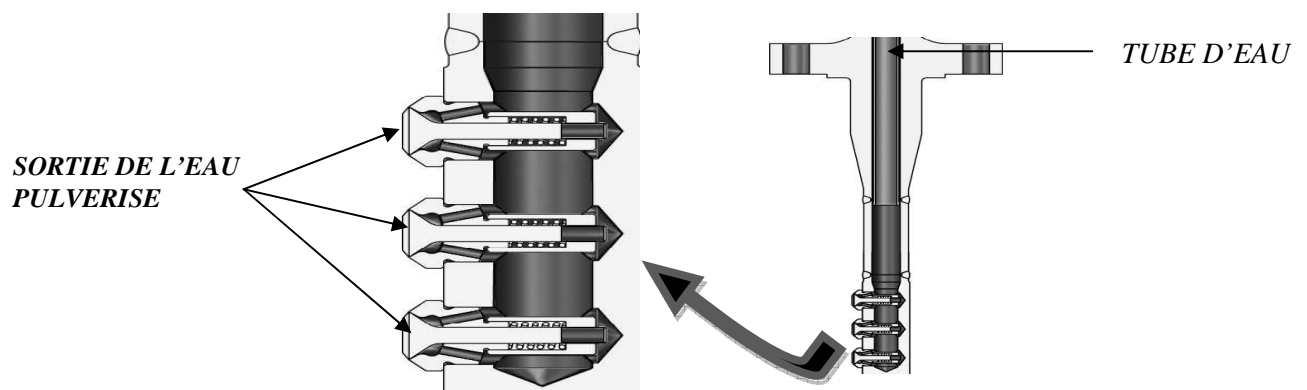


Fig. (V.31) Détail de désurchauffeur DM-167

Le désurchauffeur DM-167 permet de réduire la température de la vapeur grâce à l'injection d'eau dans la conduite. En réglant la quantité d'eau introduite, le degré de refroidissement peut être contrôlé et la température finale maintenue.

Le taux de vaporisation, et/ou de refroidissement, est fonction de la taille des gouttelettes, de leur répartition, du débit massique et de la température.

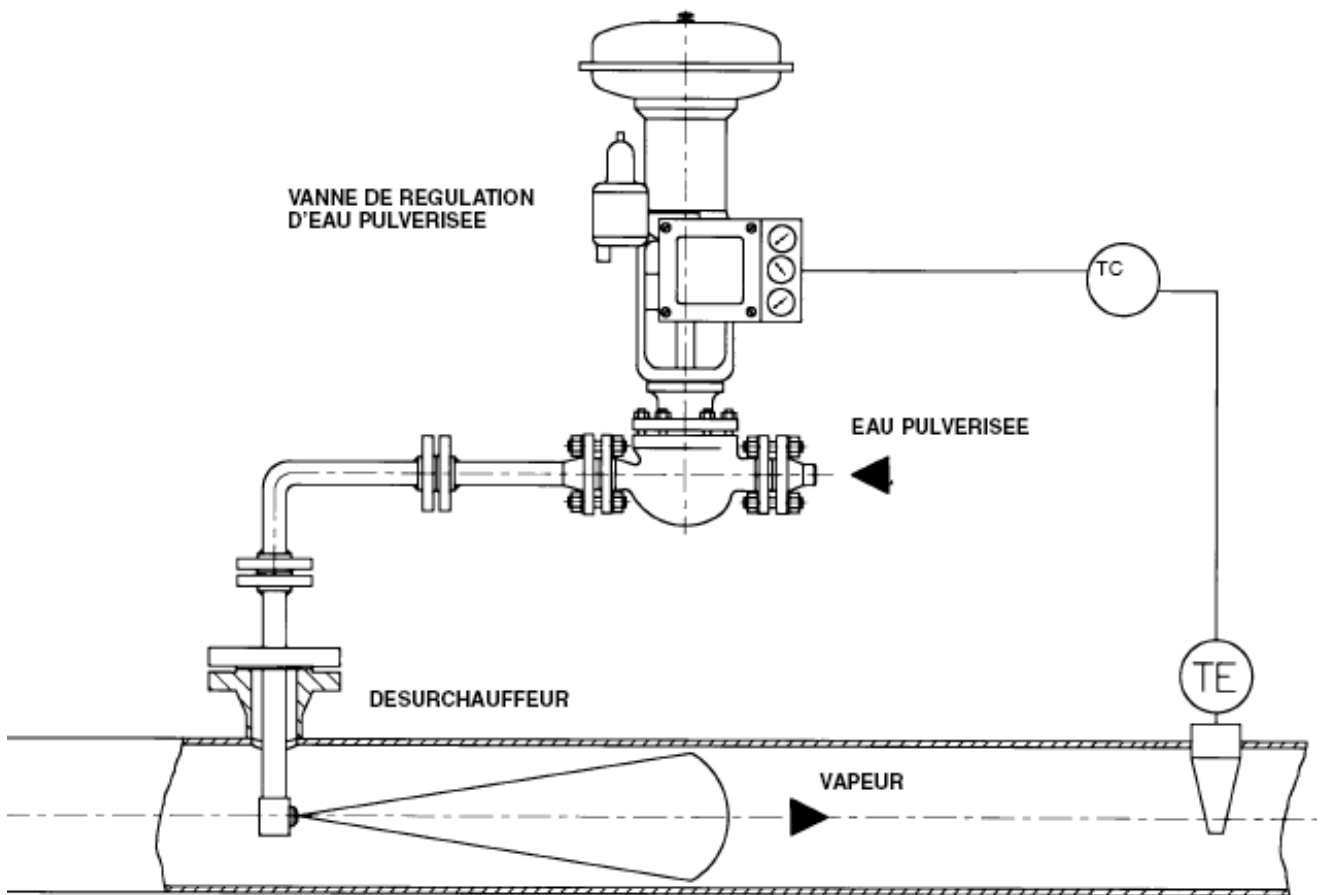


Fig. (V.32) Installation d'un désurchauffeur de type DM-167

La quantité d'eau pulvérisée est contrôlée par une vanne séparée qui répond aux signaux transmis par le système de contrôle de la température. L'eau passe par le tube principal du désurchauffeur vers la buse de pulvérisation et se décharge dans la conduite de vapeur sous forme d'eau finement pulvérisée Fig. (V.32).

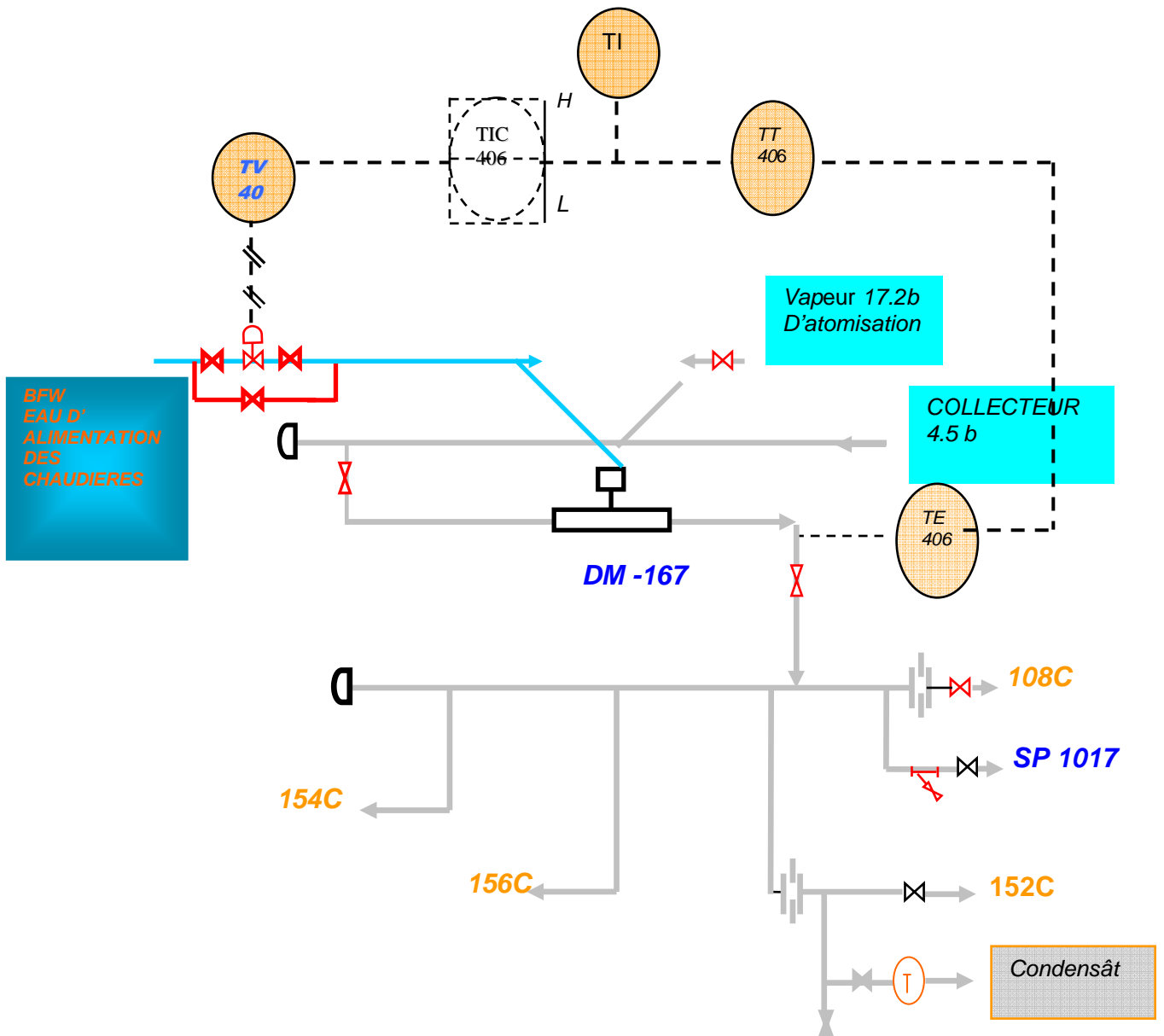


Fig. (V.33) Schéma de contrôle de la température de la vapeur de réchauffage

V.3 Remarque

Les rebouilleurs X56-C fonctionnent dans des conditions d'exploitation déterminées au préalable tels que le débit de vapeur, la température de la vapeur et la pression de cette vapeur.

- Est-ce que ces paramètres de marche ont une influence sur le percement des tubes de ces rebouilleurs ?

Pour répondre à cette question, on va faire un suivi des paramètres. D'après les suivis de températures et de pression de service nous avons tracé les graphes suivants :

V.3.1 Influence de la température de la vapeur de réchauffage

Les paramètres exposés dans ce chapitre sont les paramètres de marche du train 600.

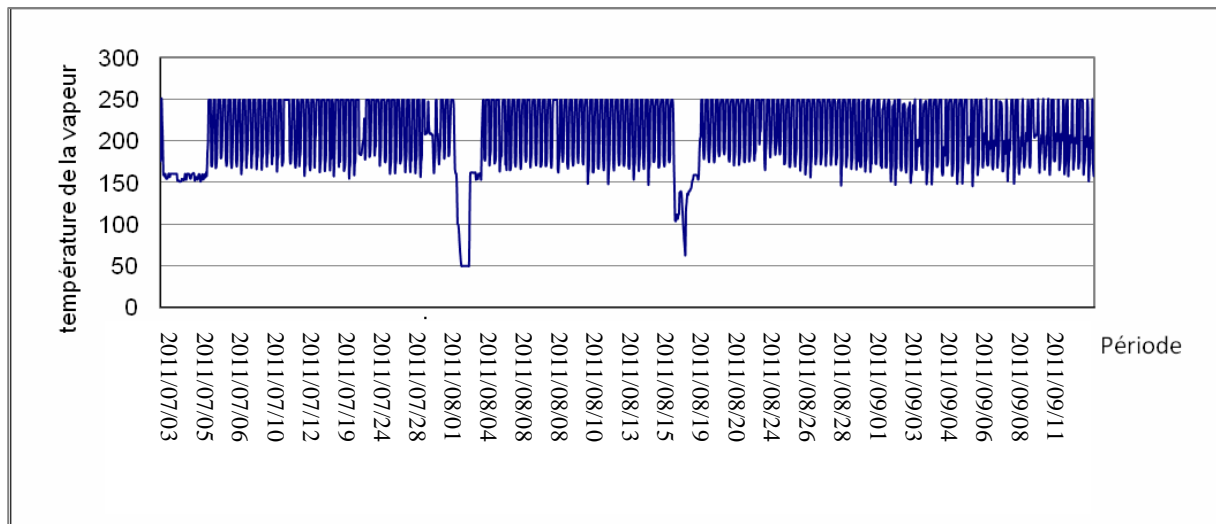


Fig. (V.34) : Variation de la température de la vapeur de réchauffage durant la période de 03/07/2011 au 11/09/2011.

La figure (V.34), qui représente la variation de la température de la vapeur de réchauffage durant la période de 03/07/2011 au 11/09/2011 montre que cette température n'est pas stable. Cette variation importante de la température est causée par le mauvais fonctionnement du système de désurchauffe (le désurchauffeur, boucle de régulation TIC406) et dépasse la valeur du design. Cette condition d'exploitation n'est pas recommandée par le constructeur elle favorise donc la dilatation de la calandre des rebouilleurs et par conséquent, on à la déformation des tubes du rebouilleur.

V.3.2 Influence de la pression de vapeur de réchauffage

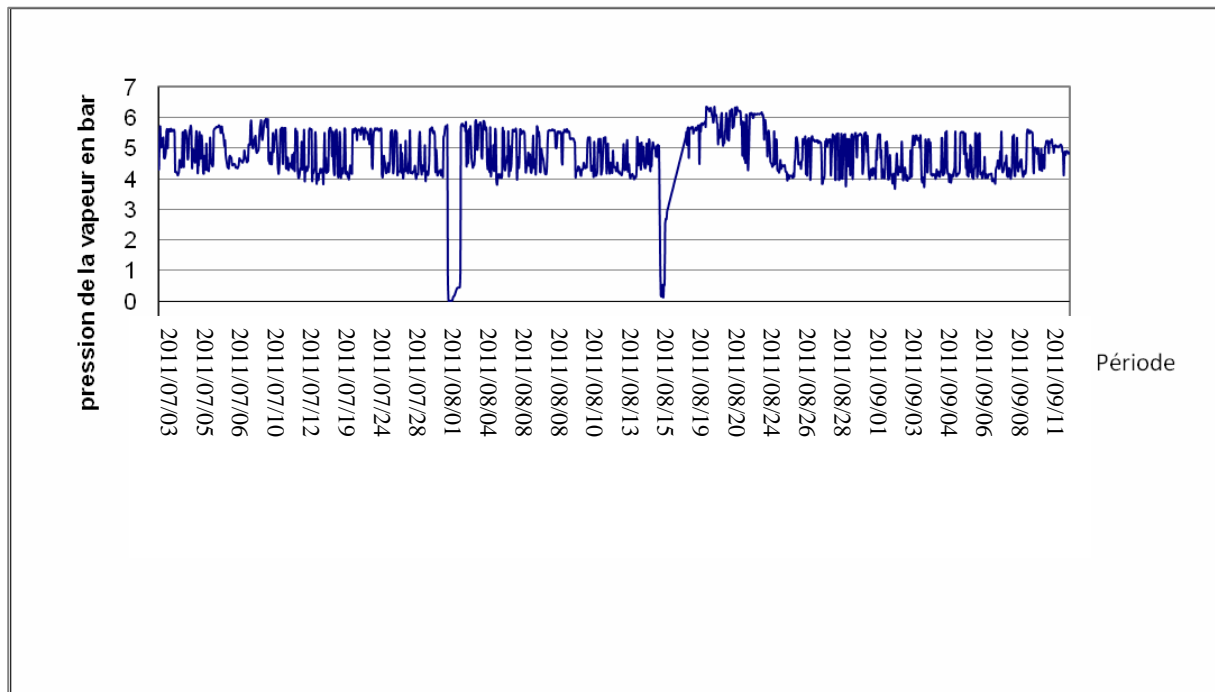


Fig. (V.35) : Variation de la pression de la vapeur de réchauffage durant la période de 03/07/2011 au 11/09/2011.

La figure. (V.35) : représente la variation de la pression de la vapeur de réchauffage durant la période de 03/07/2011 au 11/09/2011. il montre que la pression de la vapeur de réchauffage n'est pas stable.

Rappelons que les rebouilleurs X56-C fonctionnent en chaleur latente de condensation de la vapeur. Cette vapeur cède la plus grande quantité lors de son changement d'état de la phase vapeur vers la phase liquide sur les tubes du rebouilleur X56-C. La vapeur utilisée devient saturée.

Vu les conditions de service du rebouilleur X56-C (160°C, 4,5 bars) et d'après le diagramme de Moolier de l'eau, la vapeur de réchauffage utilisée se trouve au voisinage de la courbe de saturation de la vapeur. La vapeur donc est une vapeur saturée sèche. Suite à un mauvais fonctionnement du régulateur de pression et de la température, la vapeur peut devenir humide, l'existence des fines gouttelettes d'eau dans la vapeur diminue la quantité de chaleur fournie par cette vapeur. Le débit de vapeur de réchauffage devient plus important.

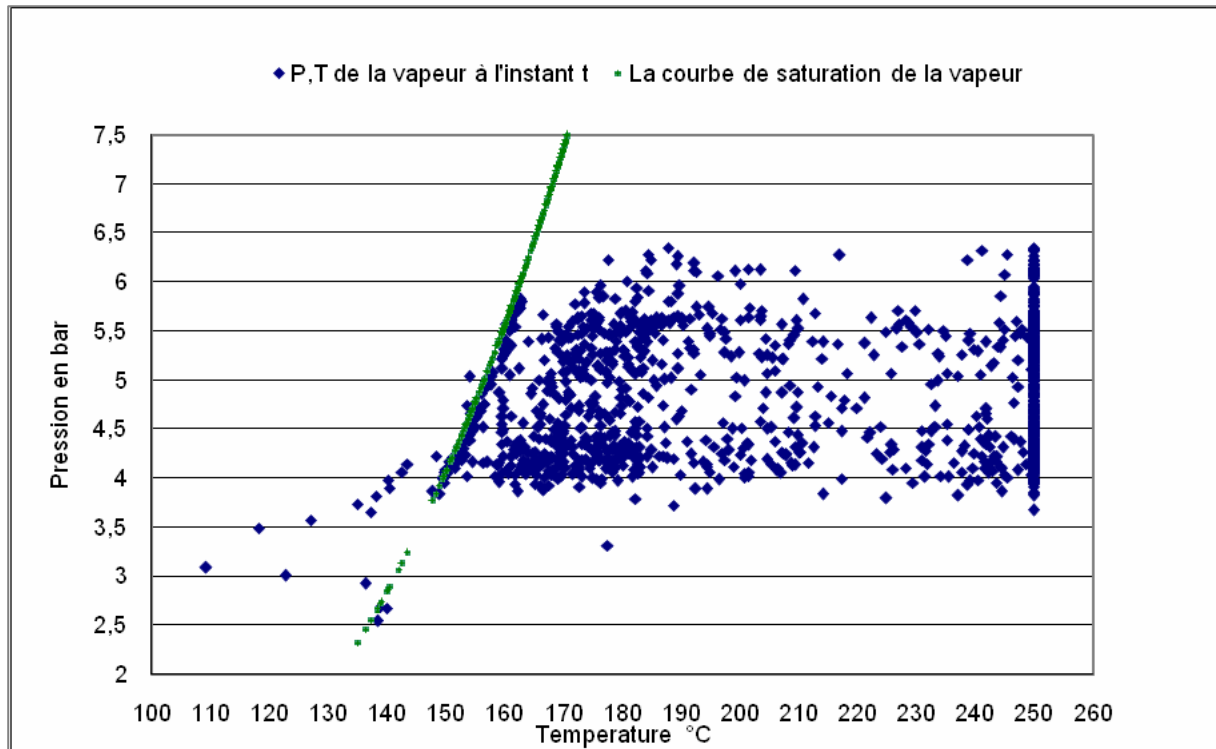


Fig. (V.36) : variation de la pression de vapeur utilisée pour le réchauffage en fonction de la température de la vapeur du train 600.

La figure.(V.36) représente la variation de la pression de vapeur utilisée pour le réchauffage en fonction de la température de la vapeur du train 600, ce graphe montre que la vapeur utilisée pour le réchauffage du rebouilleur est juste voisine à la courbe de saturation de la vapeur, elle peut contenir des fines gouttelettes suite une variation de vapeur 4,5 bars ou au mauvais fonctionnement du système de désurchauffe ou la TIC406.

V.3.3 Variation de la surface d'échange en fonction de la pression

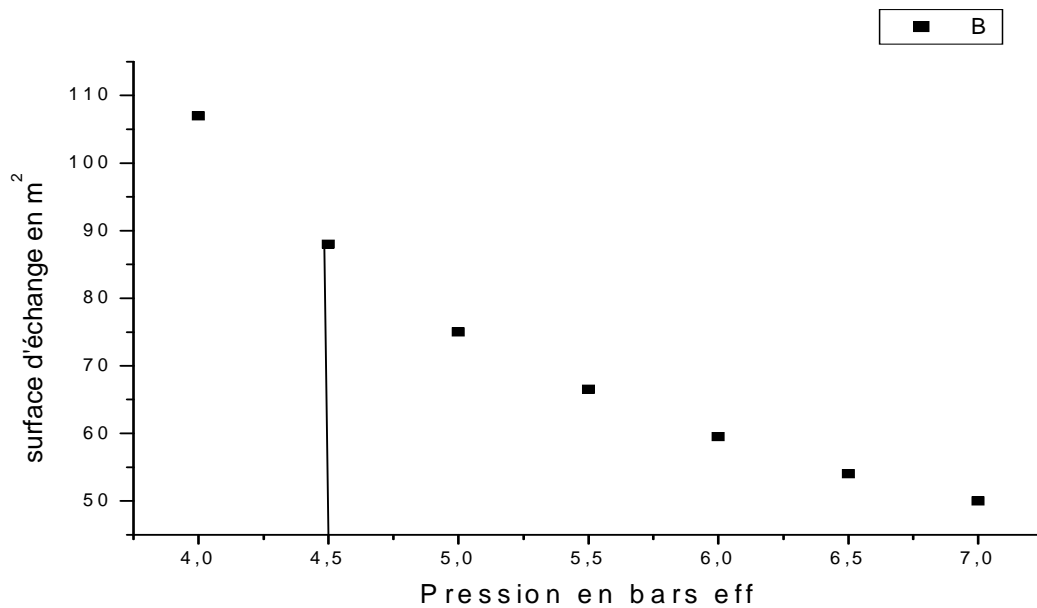


Fig. (V.37) : variation de la surface d'échange du rebouilleur X56C en fonction de la pression de vapeur.

La figure (V.37) qui représente la variation de la surface d'échange du rebouilleur X56-C en fonction de la pression de vapeur. Montre que si la pression est égale à 4,5 bars la surface utile est de 66,5m², alors que si la pression diminue la surface utile augmente.

V.3.4 Variation du débit de vapeur en fonction de la température

Les deux graphes représentent la variation du débit de vapeur nécessaire pour le réchauffage en fonction du taux de charge afin d’obtenir un produit de qualité. La variation du débit de vapeur en fonction de sa température à pression constante.

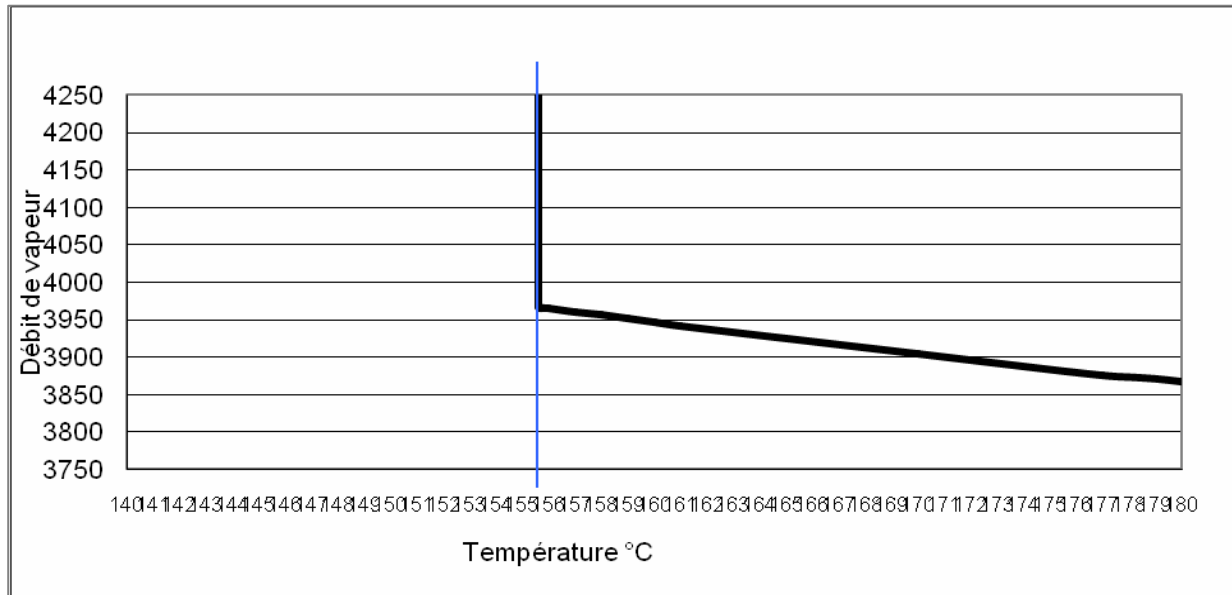


Fig. (V.38) : variation du débit de vapeur en fonction de sa température à 100 % de charge et pression de 4,5 bars.

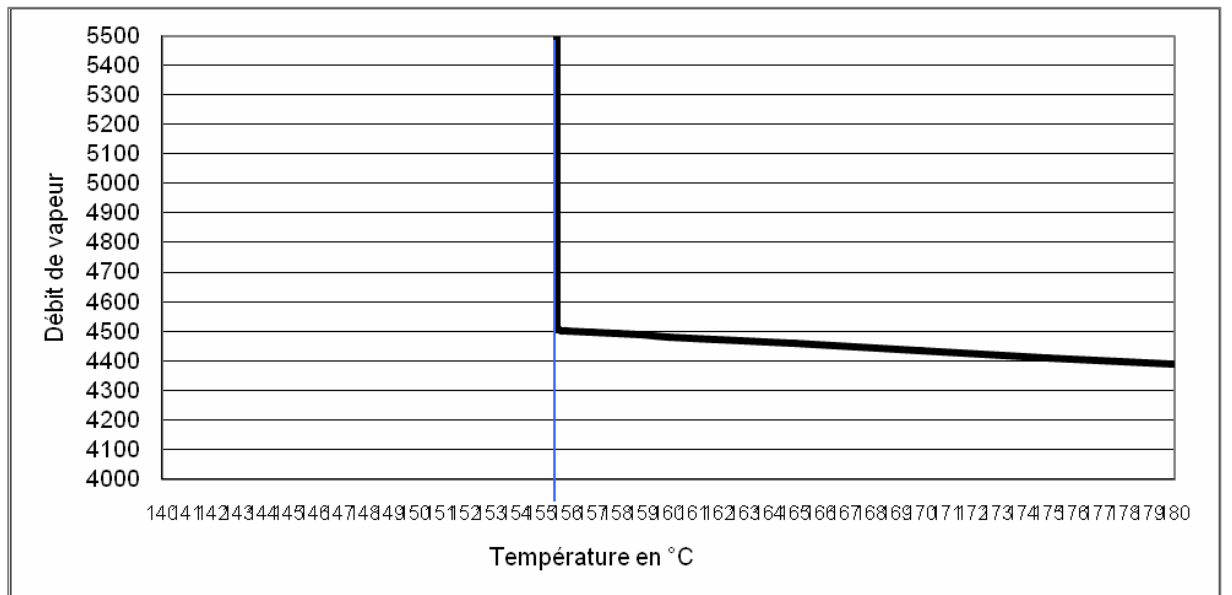


Fig. (V.39) : variation du débit de vapeur en fonction de sa température à 115% de charge de 4,5 bars.

Les figures (V.38) et (V.39) qui représentent le débit de vapeur nécessaire pour le réchauffage de la colonne du débutaniseur à 100 % et à 115% de charge en fonction de la température de la vapeur, montrent que le débit de vapeur nécessaire au réchauffage ne peut être contrôlé si la vapeur utilisée est une vapeur humide.

V.4 Remarque

Après analyse des données nous sommes arrivés aux constatations suivantes :

V.4.1 La température :

La température varie entre 150°C et 250°C ce qui prouve que le transmetteur de régulation de température et le pulvériseur d'eau dans la vapeur sont défectueux.

V.4.2 La pression :

La pression varie entre 4 bars et 6,5 bars ce qui montre l'augmentation de la pression au niveau du rebouilleur.

Ce problème survient quand le désurchauffeur pulvérise des gouttelettes qui devraient refroidir la vapeur de réchauffage. La défaillance se trouve au niveau du désurchauffeur qui pulvérise des gouttelettes qui devraient refroidir la vapeur de réchauffage. La défaillance se trouve au niveau du désurchauffeur qui pulvérise des gouttelettes de diamètre assez important provoquent une chute de température brusque, allant de 150°C jusqu'à 250°C.

La vapeur propulse les gouttelettes et augmente sa vitesse. La vapeur qui devrait chauffer le produit, provoque des érosions et des fissures au niveau de la première et deuxième rangée des tubes du rebouilleur.

Les tableaux ci-dessous confirment les constatations faites à propos de la défaillance du désurchauffeur.

V.5 Tableaux des défaillances durant les cinq dernières années dans le complexe.

Tableau (V.14).

	Eq	N° Di	Date Di	De	Motif inspection	Commentaire rapport
1	656C	000001290	11-OCT-2003	p	Ligne vapeur 4.5bars en-amont de la ex pv 422 corrodée	Présence de corrosion sur tout le tronçon de la ligne 03 de vapeur 4.5 bars situés entre le T de la vanne du by-pass et la 2 ^{ème} vanne d'isolement de l'ex FV422. RECOMMANDATION : - Procéder au remplacement de la ligne en question ainsi que son calorifuge. Destinataires : P-G-T
2	656C	000001252	11-DEC-2003	P	Fuite au niveau .coude amont van-isolt adm 556C (répétitives au niveaux de tous les trains)	Importante fuite de vapeur sur la ligne LS-420 04 au niveau du joint de soudure du coude, cette perforation du pipe est due à une corrosion de la ligne. Recommandations Enlever le calorifuge pour inspection et recommandations. Destinataires :P-G-T
3	656C	000001451	24-FEV-2004	P	Inspection ligne vapeur LS 420 nouvelle ligne installe suivant R/MRO 770/7	- un test étanchéité a été réalisé après fin de travaux en disposant le circuit vapeur. - résultat du test Recommandations : - procéder au calorifugeage de la ligne. Destinataires :P-G-T
4	656C	000001215	03-MAR-2004	P	Inspection de la ligne vapeur 4.5 bars alimentation fractionnement LS55 10 et LS55 4.	Les lignes de vapeur en question, n'ont pu être inspectées avec la calorifugeage en place Recommandations : - procéder au calorifugeage des dites lignes pour une éventuelle inspection. Destinataires :P-G-T
5	656C	000001294	11-JUN-2004	P	Ligne de drain du rebouilleur 656C bouchée.	
6	656C	000001296	19-JUL-2004	p	Inspecter ligne vapeur 4.5 LS 420	

	Eq	N° Di	Date Di	De	Motif inspection	Comment rapport
7	656C	0000011423	27-JUL-2004	p	Ligne vapeur 4.5bars perforée en deux endroits	Fuite de vapeur très importante localisée au niveau du coude du linge LS 420-4'' La fuite est due à une perforation du coude. RECOMMANDATION : Arrêter pour intervention et réparation. Prévoir remplacement de l'ensemble du tronçon de ligne allant du piquage a la vanne admission par un autre ayant les mêmes caractéristiques. Le tronçon a remplace est compose de deux longueurs de diamètre 4'' et 6'' Soudure homologue Contrôle (radiographie et ressuage) Contacter TI pour toutes informations complémentaires. Destinataires : P-G-T
8	456C	0000011223	29-JUL-2004	P	Inspecter ligne 4.5 B SL 420- 4 ''	COUDE : Pour une épaisseur saine mesurée de 7.9 sur le coude certains endroits ont les mesures suivantes : 4.5 & 3.2 mm. Pour le pipe certains endroits présentent de légères diminutions d'épaisseur. Recommandations - changer le coude ainsi que le pipe a partir de la selle de renfort jusqu'à longrine située a l'ouest. NB : spécification ISI pipe A 53B/STD CC : P/G/T/TI
9	656C	0000015653	22-NOV-2004	P	Fuite vap. au niv . du coude alimentation 4.5B vers 56C	Importante fuite de vapeur sur le coude linge LS 420 4'' Au niveau de piquage sur le collecteur LS 630 10'' Recommandations : - lors de l'arrêt du train changer le coude fissuré métal Acier au carbone soudure par E6010 et E7018 - contrôle des soudures par radiographie. Destinataires :P-G-T
10	556C	0000022827	12-AVR-2005	P	Fuite au niv . du coude ligne vap en aval de l'ex FV 422 vers 556C	Fuite de vapeur au niveau de coude au niveau du rebouilleur. Recommandations : - changer le coude (matière A.C). Soudage avec E6010 et E7018 Destinataires :P-G-T

	Eq	N° Di	Date Di	De	Motif inspection	Comment rapport
11	256C	0000025671	07-JUN-2005	p	Rebouilleur 256c. Suspecté percé.	- sur information de la production, le rebouilleur est suspecté percé. RECOMMANDATION : - programmer l'arrêt de l'équipement pour un éventuel test hydraulique. Destinataires : P-G-T
12	256C	0000026729	22-JUN-2005	P	Fuite vapeur sous calorifuge ligne vapeur LS 420-04	Ligne de vapeur LS-420 04 représente une fuite de vapeur sous calorifuge située au dessous du piquage de la ligne LS 57 10 Recommandations - dé-calorifuger la ligne en question pour inspection et déterminer la nature de la fuite. Destinataires : P-G-T
13	656C	0000031737	11-SEP-2005	P	Fuite au niv . de l'alimentation vap du collec vers le 656C (colmate provis)	- perforation de la ligne par corrosion- érosion et réparer provisoirement par une plaque. Recommandations : - changer le tronçon corrodé (acier carbone) Soudage avec électrodes 6010 et 7018 Prévoir un contrôle par radiographie Destinataires :P-G-T
14	656C	0000031737	11-SEP-2005	P	Fuite vap au niv . du coude	Les lignes de vapeur en question, n'ont pu être inspectées avec la calorifugeage des dites lignes pour une éventuelle inspection. Destinataires :P-G-T
15	656C	0000031736	12-OCT-2006	P	Coude admission vapeur au rebouilleur corrodée et perforé.	Ligne admission vapeur LS 420-6 au rebouilleur, présente une fuite sous calorifuge au niveau du T. Recommandations : - lors de l'arrêt programmé du train, prévoir le dé-calorifugeage de la ligne en question pour une inspection avec des mesures d'épaisseur. Destinataires :P-G-T

	Eq	N° Di	Date Di	De	Motif inspection	Comment rapport
16	656C	0000035958	20-NOV-2006	p	Fuite vapeur sous calorifuge coude ligne admission amont EX FV 422. LS 420 04''	perforation de la ligne vapeur LS 420-04, au niveau du coude calorifugé située en amont de l'EX FV22 RECOMMANDATION : - lors du prochain arrêt du train, prévoir le dé-calorifugeage du tronçon de la ligne et le remplacement du coude endommagé. - une radiographie sera faite, après la réalisation des travaux Destinataires : P-G-T
17	656C	0000036681	04-DEC-2006	P	Fuite au niveau du coude en aval de l'EX FV 422	- perforation du coude de la ligne calorifugée de vapeur. LS 420-04'' située en aval de l'EX FV 422. Recommandations - lors du prochain arrêt du train, prévoir le dé-calorifugeage du tronçon de la ligne et le remplacement du coude endommagé. - une radiographie sera faite, après la réalisation des travaux Destinataires : P-G-T
18	556C	0000039282	22-JAN-2007	P	Fuite vap au niv . deu piquage vers le 556C + en aval du coude EX FV 422	
19	656C	0000039281	27- JAN-2007	P	Fuite vapeur au niv . du coude en aval de l'EX FV 422	
20	256C	00000141601	16 -FRV-2007	P	Ligne condensat SC 430-01'' est corrodée. (prises impulsion du LT 412).	- Ligne de condensât corrodée sur toute sa longueur (03 mètres) entre SC 421-18'' et la bride sur 256 C - prise d'impulsion du LT 412 filetage endommagé. - vanne d'isolement de la ligne corrodée et manœuvrable. Recommandations : - découper la ligne en question, a partir du SC 431-18'' d'une extrémité et l'autre à partir de la bride sur 256C, puis remplacer celle-ci par une nouvelle ligne ayant les mêmes caractéristiques. -installer une nouvelle prise d'impulsion du LT 412. - calorifuger l'ensemble de la ligne. Destinataires :P-G-T

	Eq	N° Di	Date Di	De	Motif inspection	Comment rapport
21	656C	0000043101	18-MAR-2008	p	Probabilité de fuite interne a inspecté	Fuite interne de l'équipement, suspectée par le production. RECOMMANDATION : - programmer l'arrêt de l'équipement pour une éventuelle inspection et investigation. - contacter TI Destinataires : P-G-TI.
22	656C	0000058661	18-DEC-2008	P	Fuite vapeur 4.5bars sous calorifuge ligne LS 420-04'' tout le long du coude.	Fuite de vapeur sur la ligne LS 420-04'' à une pression de 4.5 bars au niveau de piquage sur la ligne LS 620-10. Recommandations - lors de l'arrêt du train prévoir changement du tronçon coude jusqu'au piquage. - contrôle par radio Destinataires : P-G-TI
23	656C	0000058681	15-JUN-2008	P	Fuite vapeur 4.5 bars sous calorifuge ligne LS 420-04'' tout le long du coude.	Fuite de vapeur sur la ligne LS 420-04'' au niveau du coude vers la ligne LS 620-10. Recommandations Ré-calorifuger ce tronçon Prévoir changement du coude Soudage par une soudure homologuée contrôle par radiographie Destinataires : P-G-TI
24	656C	0000063884	14-MAR-2009	P	Coude alimentation vapeur rebouilleur perce	Perforation au niveau du coude de la ligne acier au carbone LS 420-04'' Recommandations : Prévoir le changement du coude Enlever le calorifuge sur la partie inferieur pour inspection. Destinataires :P-G-TI
25	656C	0000068205	08-MAI-2009	P	Tubes percés	- sur information de la production, des tubes sont percés dans le rebouilleur. Recommandations : - programmer l'arrêt du train - contacter TI pour inspection et investigation. Destinataires :P-G-TI
26	656C	0000084772	08-JAN-2010	P	Clapet alimentation vapeur rebouilleur 656C percé.	Perforation du clapet par corrosion-érosion Recommandations Lors de l'arrêt du train changer le clapet. Destinataires :P-G-TI
27	156C	0000087737	09-AVR-2011	p	Fuite vapeur coude ligne départ vers 156C LS 420-04''	Constatations : - Fuite de vapeur à proximité du coude. Recommandations : - dé-calorifugeage de la ligne en vue d'une inspection.

Conclusion

Après analyse des résultats de suivi obtenus durant la période de traitement de notre sujet concernant le problème de percement des tubes dans les échangeurs de chaleur et en particulier les rebouilleurs X56-C et après vérification et interprétation, on peut conclure ce qui suit :

La vapeur utilisée pour le réchauffage des rebouilleurs peut être une des causes probables de percement des tubes de ces rebouilleurs si cette vapeur est devenue une vapeur saturée humide.

La vapeur provoque l'apparition de la corrosion et par la présence des efforts telle que la pression qui peut augmenter dans les tubes, subit des couches d'entartrage, conduit à l'apparition des micro-fissures et commence à propager dans cet environnement jusqu'au percement des tubes.

Cette vapeur peuvent se produire, dans le cas où les conditions d'exploitation de pression et de température sont réunies, suite à un défaut de fonctionnement d'un équipement ou un autre (le désurchauffeur, l'indicateur, le transmetteur, la vanne de régulation...).

La vapeur saturée humide est moins intéressante du point de vue énergétique. Son enthalpie est inférieure à celle d'une vapeur saturée sèche.

Cette vapeur transporte et cède moins de chaleur qu'une vapeur saturée sèche.

La régulation de la température de la colonne du débutaniseur par la vapeur saturée humide ne peut être stable. Le débit de vapeur de réchauffage indique une valeur maximale. Ce débit important a un impact certain sur ces rebouilleurs.

Afin d'éviter l'apparition de ce problème nous recommandons de :

- Procéder à une inspection du désurchauffeur de tous les trains de liquéfaction.
- Procéder à la vérification du système de régulation de la TIC 406.
- Procéder à la vérification du système de régulation de la TIC 702.
- Procéder à la vérification du système de régulation de la PIC 703 et si le problème de floculation de la pression 4,5 bars persiste, installer une vanne de régulation de pression à 4,5 bars sur la ligne de vapeur avant le désurchauffeur.
- Procéder à la réparation de tous les appareils de mesure défaillants afin de bien suivre la marche des trains.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 'prévention et lutte contre la corrosion', 2004. Edition DUNOD.
- [2] 'Water Treatment Handbook' Vol, 1-2, Degrémont, 1991.
- [3] 'Industrial Water Conditioning', Beltsdearborn, 1991
- [4] American Soc. Testing Materials Standard D 807-52, A. S. T. M., Book of Standards,(1958).
- [5] 'La corrosion dans les matériels frigorifiques' Centre Technique Des Industries Mecaniques (CETIM), 2006.
- [6] A. Rojey Le gaz naturel et traitement, Edition technique, Debutaniseur .2001.
- [7] American Soc. Testing Materials Standard D 807-52, A. S. T. M., Book of standards, (1958).
- [8] G. Schikorr, Z. Electronen. Soc. (1929) ; Z. anorg. Allgem. Chem. (1933).
- [9] E. Berl , F. Van Taack, Forchungsarbeiten aus dem Gebiete des Ingenieur-wesens, Berlin, Helt 330 (1930).
- [10] A. Thiel et H. Luckmann, Korr. U. Metallschutz 4, 469 (1928).
- [11] E. Ulrich dans Passivierende Film, U. Deckschichten, Anlansfschichten, édité par H. Fischer, K. Hauffe et W. Wiederholt, p.308, Springer, Berlin, 1956.
- [12] 'Intercrystalline cracking of Boiler Steel an dits prévention', W. Schroeder et A. Berk, Bureau of Mines Bulletin 443 (1941).
- [13] E. Potter, J. Inst. Fuel. 32,218 (1959)
- [14] The Corrosion and Oxydation of metals, U. Evans, p. 438, Ed. Arnold, Ltd., London, 1960.
- [15] U. Evans et J.Wanklyn, Nature 162,27 (1984).
- [16] Kal, S., Hongtan, L., Echangeurs de chaleur, 'croix, estimation et conception thermique, 22 eme édition (2002), pression de CRC.
- [17] J. Sacadura, 'Initiation aux transferts thermiques', Edition Lavoisier, France, 1993.
- [18] A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier J. Huetz , C. Marvillet, P. Mercier, 'Technique de l'Ingénieur' traité de Génie énergétique. 2003
- [19] V. Afgan, E. Schlunder, 'Heat Exchangers' Design and Theory, Source book, Edition Mac Graw-Hill, 1974.
- [20] F. Finkbeiner, T. Gonard. Et B. Fliol, 'Echangeurs Thermiques : Enjeux, Marchés, Technologie et Politique d'innovation', Editions Européennes Thermique et Industrie (EETI), France, 1993.
- [21] J. Hesselgreaves, 'Compact Heat Exchangers Sélection' design and opération' Edition Pergamon, 2001.
- [22] E. Sauders, 'Echanges Thermiques : Choix, Conception et Construction'. New York : Longmen scientifique et technique.

- [23] W.L. McCabe, J. Smith, McGraw Hill 'Unit Operations of Chemical engineering' inc . 1976.
- [24] A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Mercier, R. Vidil, 'Technique de l'Ingénieur, Traité Mécanique et Chaleur', 1993.
- [25] A. Sheikh, K. Zubair, S.M., Younas, M. Budair, M.O., A 'Risk Based Heat Exchanger Analysis Subject to Fouling : Economics of Heat Exchangers cleaning, Energy 25, Elsevier.p.445-461, 2000.
- [26] A. Bontemps, A. GARRIGUE, C. Charles Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier, Echangeurs de chaleurs problèmes de fonctionnement, 'Techniques de l'ingénieur' traité Génie énergétique 2003.
- [27] Perry, H., Robert, v., W, Don., 'Le manuel des ingénieurs du produit chimique de Perry', 6 eme édition'. 1984.
- [28] G.A. Mansoori, 'Physico-Chemical Basis of Arterial Blockage, Fouling Prediction and Prevention', 2001.
- [29] W.L. Van Nostrand., 'Economic penalties associated with the fouling of Rafiney heat transfert Equipement'. Hemisphere Publishing Corporation.)
- [30] C. Duffau., J.M Grillot, R. Vidil, 'L'encrassement dans les échangeurs : Description, prévention, remèdes'. GRETH Technique et Documentation, Diffusion Lavoisier, 1991.
- [31] D. Land., C. Sandhu 'Chemical reaction fouling due to foodstuffs, Editions Summerscales, Hemisphere Washington DC, p 437, 1981.
- [32] J. Rodier., 'L'analyse Chimique et Physicochimique de l'Eau', Edition DUNOD, 1971.
- [33] A. Maurel., 'Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce', 2em édition, LAVOISIER, 2006.
- [34] N. Epstein, 'Thinking About Heat Transfert Fouling : a 5x5 matrix, Heat Transfer Engineering, 4(1), p 43-56, 1983.)
- [35] G. Nishio, S. Kitani, Et K. Tadahashi, 'Thermophoretic Deposition of Aerosol Particles in a Heat-exchanger pipe'. Ind. Eng. Chem. Proc. Design Dev., Vol.13, 408-415.
- [36] R.S. Rodliffe, F.A. Means, 'Factors Governing Particulate Corrosio Product Adhesion to Surfaces in Water Reactor Cooling Circuits', CEGB Berkeley Nuclear Laboratories, UK, 1979.
- [37] 'Standards of the Tubular Exchange Manufacturers Association', 7 em édition TEMA, Tarrytown, New York.)
- [38] N. Epstein, 'General Thermal fouling Models', In Fouling Science and Technologie, Melo et al Ed.pp. 15-30, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [39] J. Rodier, 'L'analyse Chimique et Physicochimique de l'eau', Edition Dunod, 1971.

- [40] N. Epstein 'Fouling in Heat Exchangers'1981. Fouling of heat transfert Equipement J.G. Knudsen, EFC SOMERSCALES Hemisphere Wash. DC 1981, p.31.
- [41] D. Landolt. 'Corrosion et Chimie de Surfaces des Métaux'. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2003.
- [42] 'Prévention et lutte contre la corrosion ' les Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 2004, Lausanne.
- [43] T. Shibata and T. Takeyama, 'Pitting corrosion as stochastic process. Nature, 260, 1976.
- [44] F. Dabosi, G. Beranger, and B. Baroux. Corrosion localisée. Les éditions de physique, 1994.
- [45] H. uhlig, Corrosion et Protection, Dunod, Paris 1970
- [46] Joseph, F. BOSICH 1970. By Barnes and Noble, Inc, New York Edition 1977.
- [47] N.D. Tomashov, G.P. Tchernova, 'Corrosion et les alliages d'anticorrosion' Métallurgies, Moscou, 1973, p.124.
- [48] M. Lalanne, P. Berthier, et J. Der-Hagopian.
- [49] R. Mukherjee, 'Use Double Segmental Eaffles in Shell and Tube Heat Exchangers' Chemical Eng. Progress, nov. 1992.
- [50] Corrosion Sous Contrainte : Phénoménologie et Mécanismes, Editeurs scientifiques D. Desjardins., R. Oltra., les Editions de Physiques, 1992.
- [51] Corrosion et Anticorrosion 'Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), 1998.
- [52] Bott, T.R., Fouling og Heat Exchangers, Editions Elsevier, Amsterdam-Lausanne-New-York-Oxford-Shannon-Tokyo, 1995
- [53] Goyhenetche, M., Diagnostic Technique et Economique de l'Encrassement des Equipements de Transfert Thermique dans l'Industrie Français, Michel Goyhenetch Consultants, France, 1991.
- [54] A. Navaro., L'Encrassement dans les Echangeurs. Description-Prévention.
- [55] Logiciel Chemcad. «Chemcad 5.1.X. » La simulation.