

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

Gm. 001

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

TITRE ANALYSE THER-
MOMECHANIQUE DES
CONDENSEURS

DE LA CENTRALE CAP des BICHES

DATE : Juin 86

AUTEUR : D. KONDE
DIRECTEUR : M. DUVAL
CO-DIRECTEUR : A. CERNEA

DEDICACE :

A ma mère, pour son soutien permanent et la grande confiance qu'elle a toujours placée en moi,

A mes défunts grand-parents, Bakel et Sountou, pour avoir eu à supporter tous mes caprices de jeune enfant et pour avoir guidé mes premiers pas vers l'école,

A tous ceux qui ont participé d'une manière ou d'une autre à ma formation d'homme et d'ingénieur,

A tous mes anciens maîtres et professeurs,

Je dédie cette présente étude, fruit de leurs efforts de tous les instants.

REMERCIEMENTS

La corrosion étant une science presque exclusivement tournée vers la pratique, il serait hasardeux, voire même suicidaire intellectuellement parlant, pour nous élève-ingénieurs encore en formation, de nous lancer dans un tel domaine d'études sans être très bien épaulés.

Et c'est à cette noble et digne tâche de guide et de conseiller que les Docteur Ingénieurs Maurice DUVAL et Adrian CERNEA se sont attelés durant toute cette étude, avec un brio et une disponibilité exceptionnels.

Par ailleurs, j'ai aussi à dire que cette étude ne serait sans doute pas ce qu'elle est actuellement n'eût été la grande et entière collaboration des techniciens des laboratoires de l'EPT.

Et c'est pourquoi, c'est avec un réel plaisir que je souhaite que tous ces personnes trouvent à travers ces lignes, l'expression de mes remerciements les plus sincères et de ma profonde gratitude.

Enfin, je ne saurais tourner cette page sans dire un grand merci à l'ingénieur Polytechnicien Chérif. O. SOU pour l'esprit de collaboration et la grande disponibilité qu'il n'a cessé de manifester tout au long de cette étude.

SOMMAIRE

Ce présent projet de fin d'Études retrace les différentes péripéties de l'étude thermo-mécanique que nous avons effectué sur les condensateurs de la centrale électrique du Cap des Biches.

Et c'est ainsi qu'il se compose de deux grandes parties:

- la partie thermodynamique qui concerne les chapitres 1 et 2 dans lesquels sont traités les calculs de vérification du design et ceux des pertes exergetiques.
- la partie mécanique, constituée des chapitres 3, 4, 5 et 6 parle quant à elle des phénomènes liés à la corrosion des tubes des condensateurs.

AVANT PROPOS

Les centrales électriques sont de nos jours d'une importance telle qu'on ne saurait actuellement imaginer la vie sans elles. Elles constituent nos principales sources d'approvisionnement en courant électrique nécessaire pour le fonctionnement de toute activité industrielle moderne. Pour cette raison fondamentale, elles doivent être l'objet de beaucoup d'attention. Elles doivent être bien entretenues, doivent disposer d'un rendement acceptable et surtout d'une fiabilité sans faille. Tout ceci pour dire que le maintien de leur actuel rendement ou même l'amélioration de ce rendement doivent être des occupations de tous les jours.

Et c'est un peu dans ce cadre que se situe le présent projet de fin d'Études. En effet c'est à la demande de la Centrale électrique du Cap des Biches de la SENELEC, en raison des multiples problèmes rencontrés dans l'exploitation, plus particulièrement les problèmes de corrosion, qu'il a été soumis aux compétences de l'École Polytechnique de THIES. Ainsi donc, toutes proportions gardées, on peut affirmer que ce projet revêt une importance qui n'est pas à démontrer, surtout si on considère le rôle que joue la SENELEC dans notre pays.

Toutes fois, ce projet de fin d'Études, aussi élaboré soit-il, ne saurait être sans reproches et ne prétend pas détenir toute la vérité sur les problèmes rencontrés. Encore moins, je dirai que les solutions que nous proposons ont leurs limites et leurs insuffisances et peuvent sans nul doute être améliorées; la corrosion étant un domaine complexe et souvent mal cerné, mais étant surtout une Science qui marche.

Ainsi donc, l'on me comprendra aisément quand je dis que ce rapport doit avoir pour but principal, d'aider le personnel chargé de l'exploitation de la Centrale face aux problèmes de corrosion actuels, ceci de par les recommandations qu'il propose et de par les connaissances aussi bien théoriques que pratiques que ce personnel pourra en tirer.

Et pour terminer ce préambule, je dirai - sans exagération aucune - que tout un chacun y trouvera la rigueur technique et la logique caractéristiques des ingénieurs de conception que nous sommes.

TABLE DES MATIERES

	Page
Page titre	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Sommaire	iv
Avant-propos	v
<u>INTRODUCTION</u>	1

CHAPITRE PREMIER

● CALCUL DE VERIFICATION

1.1 Principe de fonctionnement	2
1.2 Caractéristiques des condensateurs	4
1.3 Calcul de vérification	5

CHAPITRE 2

● CALCUL DES PERTES EXERGETIQUES

2.1 Notions fondamentales sur l'exergie	9
2.2 Pertes d'exergie	11

CHAPITRE 3

● GENERALITES SUR LA CORROSION

3.1 Introduction	15
3.2 Principes de base	17
3.3 Les réactions de corrosion	18
3.4 Potentiel d'électrode	20

3.5	Serie des f.e.m	20
3.6	Polarisation	21
3.7	Passivité	23
3.8	Types de corrosion	24

CHAPITRE 4

● ETUDE THEORIQUE

4.1	Historique	26
4.2	Corrosion des tubes de condenseur	27
4.3	Problème	29
4.4	Etude théorique des facteurs	30
× 4.5	Notes sur la corrosion par piqûres	34

CHAPITRE 5

● ETUDE EXPERIMENTALE

5.1	Indicateurs de corrosion	38
5.2	Etude expérimentale des facteurs	43
5.3	Processus de la corrosion	48
× 5.4	Notes sur la corrosion bactériologique	51
5.5	Conclusion de l'étude	52

CHAPITRE 6

● SOLUTIONS PROPOSEES

6.1	Introduction	53
6.2	Remèdes majeurs	54
6.3	Remèdes mineurs	57

CHAPITRE 7

● CONCLUSION - RECOMMANDATIONS

7.1 Discussions - Recommendations 68

7.2 Conclusion 71

● ANNEXES

Dimensionnement du condenseur
à tube au titane

73

● BIBLIOGRAPHIE

76

INTRODUCTION

Face aux multiples problèmes rencontrés dans le fonctionnement d'une centrale, l'exploitant n'a pas toujours le temps matériel requis pour réfléchir de manière froide sur certains de ces problèmes là, jugés de second ordre. Et c'est ainsi qu'il arrive quelquefois, que ces derniers apparemment sans danger se éveillent dans la réalité d'une importance souvent insoupçonnée.

Les problèmes de corrosion inhérents à l'exploitation des condenseurs et auxquels nous nous intéresserons tout au long de ce rapport font partie de cette catégorie.

Donc dans ce présent rapport, nous allons essayer de répondre aux interrogations légitimes qui sont les suivantes :

- Est-ce que le dimensionnement des condenseurs est conforme au dimensionnement des condenseurs de même type étudiés en théorie (pour des raisons académiques) ?
- Est-ce que les pertes, d'un point de vue énergétique, liées à l'exploitation de ces installations sont dans les limites de l'acceptable ?
- Enfin, à quoi sont dus les multiples problèmes de corrosion rencontrés depuis le début de la mise en service de la Centrale ?

Voilà donc l'éventail de questions ou d'interrogations dignes de ce nom et auxquelles nous essayerons de répondre, de manière lucide et ordonnée, tout au long de ce rapport.

Le condenseur, étant la seule installation de la Centrale directement impliquée dans ce projet de fin d'études, nous avons jugé qu'il était très logique, dans un premier temps, de présenter cette entité afin de permettre à tout un chacun de faire connaissance - ne serait-ce que dans les grandes lignes - avec.

1.1 Principe de fonctionnement des condenseurs

Quand une vapeur en état de saturation entre en contact avec une surface "froide" comme un tube à l'intérieur duquel circule un fluide à basse température, il se condense et on assiste à une formation de gouttes sur la surface extérieure des tubes. C'est sur ce principe, assez simple du reste que repose le fonctionnement des condenseurs dont la fonction essentielle est donc de condenser de la vapeur provenant d'une autre installation, principe basé sur les notions de transfert de chaleur par convection. D'abord, il y a convection entre la vapeur et la surface extérieure du tube et ensuite convection entre la surface intérieure du tube et le fluide "froid".

Dans les centrales thermiques de production d'électricité, utilisant le cycle de Rankine (comme au Cap des Biches), le condenseur est rattaché à la sortie basse pression de la turbine à vapeur (Voir figure 1). Dans ce cas là, outre la fonction citée un peu plus haut qu'il remplit, il a aussi pour buts:

- de produire une dépression permettant la circulation de la vapeur à l'intérieur de la turbine à vapeur
- de désaérer le condensat.

PREMIERE PARTIE

ETUDE THERMODYNAMIQUE

CHAPITRE 1 :

CALCUL DE VERIFICATION

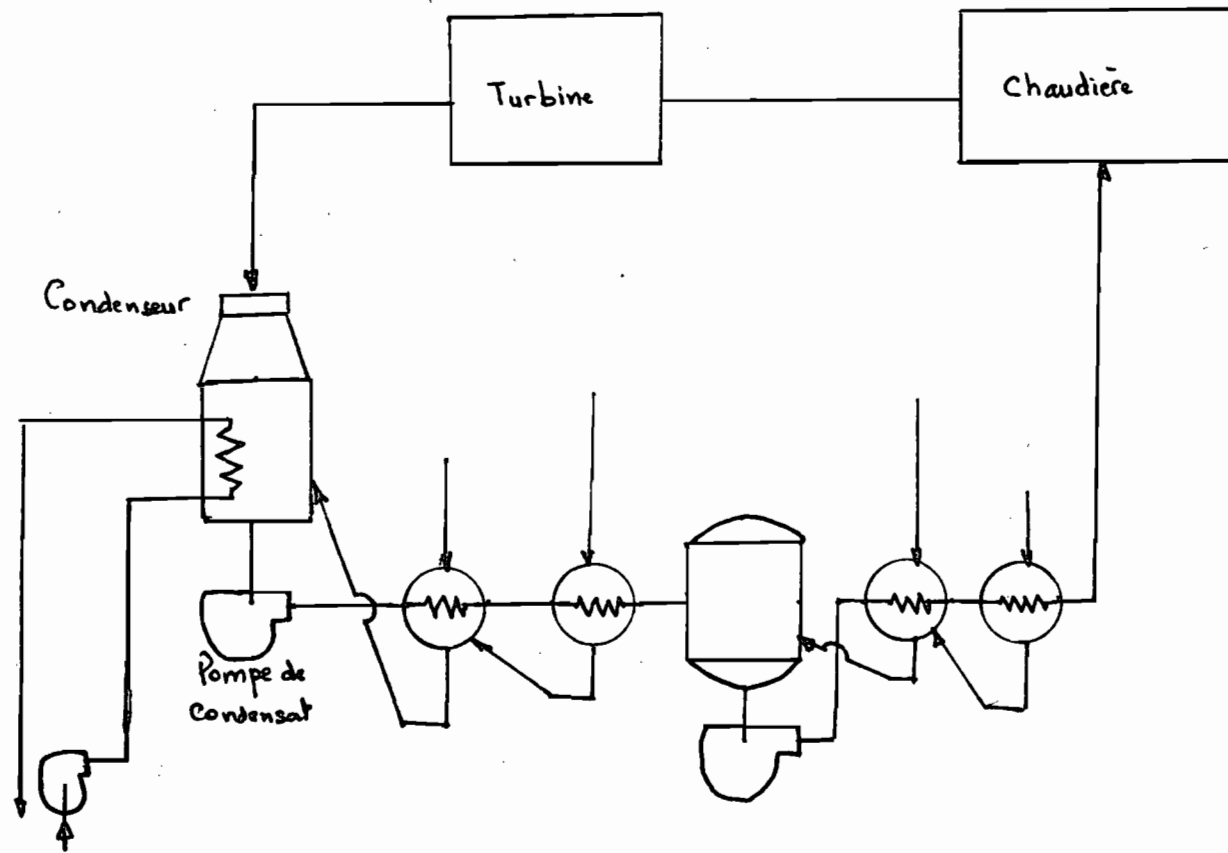


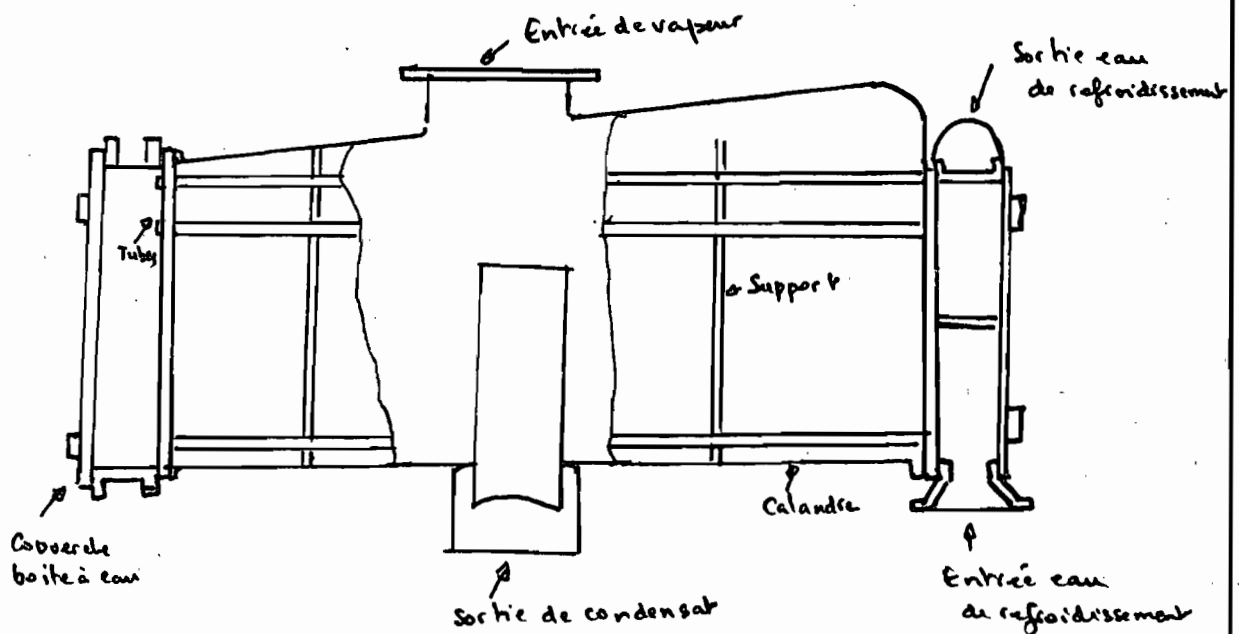
figure 1 Schema des équipements d'une centrale (15)

1.2 Caractéristiques des Condenseurs de la Centrale du Cap des Biches

Les condenseurs installés à la Centrale du Cap des Biches sont des condenseurs horizontaux à surface, couramment utilisés pour la condensation de la vapeur d'eau. Grâce à leur position horizontale, ils permettent une distribution facile de la vapeur et un transport naturel du condensat par gravité.

Les parties principales de ce condenseur sont mis à part la calandre et les boîtes à eau, une large ouverture pour l'entrée de la vapeur, un faisceau principal de tubes, et un faisceau de tubes appelé refroidisseur et protégé du circuit de la vapeur par des tubes judicieusement placés dans le condenseur et permettant l'extraction des gaz incondensables et enfin une sortie de condensat.

Figure 2 Schéma du condenseur (longitudinal)



Ce schéma est un schéma détaillé et ne fait pas ressortir les détails de l'installation.

1.3 Calcul de vérification

Ce présent calcul vise à vérifier si certains paramètres physiques des condenseurs installés ont été bien choisis. Il s'agit plus exactement de voir, à partir des données de base actuelles, si la surface totale d'échange, le nombre et la longueur des tubes sont réellement ce qu'elles devraient être. En un mot, ce calcul devra permettre de faire la comparaison entre les dimensions actuelles et celles obtenues par notre méthode de calcul.

Il est important de noter que nous ne vérifierons pas si le design tient compte réellement des exigences telles que l'évaluation des conditions spécifiques de travail ou les limites potentielles physiques, thermiques ou économiques. Nous nous limiterons uniquement à la vérification de la taille.

Nous noterons, aussi, par ailleurs que les données de base utilisées dans ce calcul ont été tirées du projet de fin d'Etudes de M. N'Dianga Fall, pour la plupart et pour le reste, nous nous sommes contentés des données provenant des fiches de relevés journaliers. Ces données sont les suivantes :

Type : Condenseur à surface

Nombre de passes : 1 passe par calandre

Nombre de calandres : 1 calandre

Fluide de refroidissement : Eau de mer

Pression d'opération de la vapeur à condenser : 77 mbar abs = 7,7 kPa

Débit de vapeur : $W_{st} = 89,80$ tonnes/h = 24,946 kg/s.

Enthalpie de la vapeur : à $t_s = 40,8^\circ\text{C}$ et $P_s = 77$ mbar $h = 2404,78$

Température de saturation : $40,8^\circ\text{C}$

Enthalpie du condensat : $h_{cond} = 170,9$ kJ/kg

Pour la vapeur à $40,8^\circ\text{C}$ et $7,7\text{kPa}$; $h_f = 170,91\text{ kJ/kg}$
 $h_{fg} = 2404,78\text{ kJ/kg}$
 $h_g = 2575,724\text{ kJ/kg}$

$$\rightarrow x = 0,867$$

Différence d'enthalpie Δh : 2232 kJ/kg

W_c : Débit du condensat RBP1 \rightarrow Condenseur (Cascading) : $11843\text{ kg/h} = 3,29\text{ kg/s}$

h_{cc} : Enthalpie du cascading : $213,11\text{ kJ/kg}$

Tubes de Condenseur :

Diamètres intérieur et extérieur : $17\text{ mm} / 19\text{ mm}$

Métal : Laiton Aluminium 76/22/2

Longueur des tubes : $8,05\text{ m}$

C_1 : Facteur de correction : 1 (voir tableau annexe)

Eau de refroidissement

t_1 : Température d'entrée = 28°C ou $82,4^\circ\text{F}$
 t_2 : Température de sortie = 36°C ou $96,8^\circ\text{F}$ } Relevés de la journée du 9 Août 1983

Vitesse de l'eau dans les tubes $1,8\text{ m/s}$ ou $5,92\text{ ft/s}$

Facteur de correction pour la température d'entrée : $C_2 = 1,05$ (Tableau annexe)

Facteur de correction pour le diamètre : $C_3 = 267$ (Tableau annexe)

Facteur de propriété : $0,75$ pour l'eau de mer : C_d

m_1 : Débit nominal : $6000\text{ m}^3 = 1667\text{ kg/s}$

Procédure de calcul:

$$\Delta T_{\text{eau de refroidissement}} = 36^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C} = 8^\circ\text{C} = 14,4^\circ\text{F}$$

Coefficient de transfert de chaleur initial : $U_i = C_3 \sqrt{V}$

$$U_i = 267 \sqrt{5,92\text{ ft/s}} = 649,6 \frac{\text{BTU}}{\text{hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

Coefficient d'échange de chaleur moyen $U = c_1 c_2 c_d U_i$

$$U = 1 \times 1,05 \times 0,85 \times 257 \sqrt{V}$$

$$U = 210,3 \sqrt{V}$$

LMTD Logarithmic mean Temperature difference ou $(\Delta T)_{\text{moy}}$

$$\text{LMTD} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \left[\frac{T_s - t_1}{T_s - t_2} \right]} \quad t_s = 40,8^\circ\text{C} = 109,4^\circ\text{F}$$

$$\text{LMTD} = \frac{96,8^\circ\text{F} - 82,4^\circ\text{F}}{\ln \left[\frac{109,4^\circ\text{F} - 82,4^\circ\text{F}}{109,4^\circ\text{F} - 96,8^\circ\text{F}} \right]} = 18,9^\circ\text{F}$$

Charge de refroidissement initial : H_L

$$H_L = W_{st} \times \Delta h = 24,946 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 2232 \text{ kJ/kg}$$

$$H_L = 55,7 \text{ MW}$$

Charge de refroidissement due à l'apport du "Casading"

$$h = W_c (h_{cc} - h_{cond}) = 3,29 (213,11 \text{ kJ/kg} - 170,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

$$h = 138,8 \text{ kW} = 0,14 \text{ MW}$$

Charge totale de refroidissement (Condenser Duty)

$$H = 55,7 \text{ MW} + 0,14 \text{ MW} = 55,84 \text{ MW}$$

Section totale

$$A = \frac{m_1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \times v' \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]}{v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} \quad v' : \text{volume massique de l'eau de mer}$$

$$v' = 0,001003 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ à } 30^\circ\text{C}$$

$$A = \frac{1667 \times 0,001003}{1,8} \text{ m}^2 = 0,9289 \text{ m}^2$$

Nombre de tubes requis

$$n_T = \frac{A}{\pi d_i^2 / 4} = \frac{0,9289 \text{ m}^2 \times 4}{\pi (0,017)^2} = 4092$$

$$\underline{n_T = 4092 \text{ tubes}}$$

Surface totale de condensation

$$S_c = \frac{Duty}{U \times LMTD} = \frac{55,84 \cdot 10^3 \times 3,412 \cdot 10^3}{210,3 \sqrt{5,92} \times 18,9} = 19704,5 \text{ ft}^2$$

$$\underline{S_c = 1831,3 \text{ m}^2}$$

Longueur requise pour les tubes :

$$L = \frac{S_c}{\eta \pi d_{ext}} = \frac{1831,3 \text{ m}^2}{4092 \pi (0,019)}$$

$$\underline{L = 7,5 \text{ m}}$$

En conclusion de ce calcul, nous pouvons dire que, comparativement aux résultats donnés par notre calcul, les condenseurs ont été bien dimensionnés et qu'on a même tenu compte d'un facteur de sécurité de l'ordre de 10%.

CHAPITRE 2 :

CALCUL DES PERTES EXERGETIQUES

Dans le but de donner une méthode de calculs des pertes réelles qui surviennent dans le procédé d'échange de chaleur à travers les condenseurs de la centrale, ceci en vue d'une économie d'énergie ou tout simplement d'une connaissance parfaite des vraies performances de ces condenseurs, nous faisons ici un calcul de bilan exergetique. Ce bilan pourra aussi permettre d'établir les vraies implications d'une quelconque modification qui serait envisagée sur cette installation.

2.1 Notions fondamentales sur l'exergie

La première et la deuxième loi de la thermodynamique sont incomplètes ou présentent des ambiguïtés quant à leurs applications pratiques si elles sont prises individuellement. Et c'est justement pour palier à ces insuffisances, qu'a été introduite la notion d'exergie qui peut être comprise comme une réunion de ces deux premiers principes.

En effet, ces deux premières lois, nous disent en gros, que la transformation de la chaleur en travail est partielle (le travail produit est la différence entre la chaleur initiale avant le travail effectué et la chaleur restante ou chaleur inutilisée). Ils nous disent aussi que la quantité de chaleur transformée en travail (pour une source froide donnée) varie dans le même sens que la température sous laquelle cette quantité de chaleur considérée est disponible. Et c'est cette deuxième affirmation qui entraîne des difficultés, notamment avec l'entropie, vraie casse-tête pour les ingénieurs et tech-

niciens.

Ainsi il apparaît que les notions de rendement et bilan thermiques se référant au premier principe ont le défaut de ne pas tenir compte de la qualité, mais tiennent compte surtout de la quantité de chaleur reçue par le système. L'exergie quant à elle ne commet pas cette omission, en adjoignant le second principe au premier et ainsi tient compte aussi bien de la qualité que de la quantité. Et c'est pour cette raison que le bilan exergetique, beaucoup plus complet a été substitué au bilan thermique.

On définit ainsi l'exergie comme le travail maximum qu'on peut tirer d'une quantité donnée de chaleur. Elle représente une forme latente, un potentiel de travail. Il prend en considération la dégradation d'énergie ou plutôt d'exergie - due à l'accroissement qui accompagne toutes les transformations réelles donc irréversibles.

A la lumière de tout ceci, il devient clair que le bilan exergetique permet de mettre en évidence les pertes réelles dues aux irréversibilités qui ne figurent pas dans le bilan thermique. Par exemple les pertes d'exergies qui résident dans les pertes de charge accompagnant l'écoulement d'un fluide, pertes de charge qui peuvent avoir lieu dans les échangeurs de chaleur, tout comme dans les autres accessoires des circuits de ce fluide.

C'est ainsi qu'on peut dire que seule la comptabilité exergetique permet d'évaluer quantitativement ce qu'on appelle qualitativement la dégradation de l'énergie. Elle permet de chiffrer correctement toutes les pertes thermiques. Et c'est pourquoi on utilise le concept d'exergie

pour décrire le comportement réel des systèmes complexes.

2.2 Pertes d'exergie

La perte d'exergie ou exergie dissipée peut se définir comme la quantité d'exergie "détruite" par les irréversibilités. C'est à dire que c'est la quantité de travail utile qui aurait pu être fournie si le procédé avait été réversible. Les différents procédés réels rencontrés étant tous irréversibles (selon la 2^{ème} loi), ils seront toujours caractérisés par une perte d'exergie, par conséquent, perte de capacité de produire un travail.

Les échangeurs de chaleur, (condenseurs ou autres) étant des équipements à travers lesquels se produit un échange de chaleur par différences finies de températures, (procédés irréversibles), sont des sources de pertes d'exergie. Et si on fait la supposition qu'il n'y a pas de chaleur échangée avec l'entourage, on peut faire la considération suivante: l'échangeur de chaleur est un système adiabatique caractérisé par un transfert de chaleur entre deux fluides. Il y a donc pertes d'exergie et par là, pertes de puissance.

Et, c'est en regard à toutes ces considérations que nous avons jugé utile de faire un calcul des pertes d'exergie d'un condenseur de la Centrale.

Calcul de la perte d'exergie

Il s'agit surtout de calculer la diminution de l'exergie de la vapeur et l'augmentation de l'exergie de l'eau d'alimentation avant de faire la comparaison entre ces deux valeurs.

• L'exergie spécifique (par unité de masse) de la vapeur à l'entrée est:

$$e_1 = h_1 - h_0 - T_0 (s_1 - s_0) = h_1 + x_1 r_1 - T_0 \left(s_1 + \frac{x_1 r_1}{T_1} \right) - (h_0 - T_0 s_0)$$

tandis qu'à la sortie nous avons la valeur e_2

$$e_2 = h_1 - h_0 - T_0 (s_1' - s_0)$$

Par conséquent, la diminution d'exergie de la vapeur par unité de

masse s'écrit: $e_2 - e_1 = -x_1 r_1 + T_0 \frac{x_1 r_1}{T_1} = -x_1 r_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right)$

où h_1 : enthalpie de la vapeur humide à l'entrée du condenseur

h_1' : enthalpie de la vapeur saturée à l'entrée

r_1 : chaleur latente de vaporisation (h_{fg})

x_1 : titre de la vapeur à l'entrée

s_1 : Entropie de la vapeur humide

s_1' : Entropie de la vapeur saturée à T_1 et P_1

Ainsi donc, la perte totale d'exergie de la vapeur est de

$$\Delta \dot{E}_{ST} = \dot{m}_{ST} (e_2 - e_1)$$

• L'augmentation de l'exergie de l'eau de refroidissement est donnée

par la formule $\dot{E}_{CW} = \dot{m}_{CW} [h_{CW} - h_0 - T_0 (s_{CW} - s_0)]$

ou bien $\dot{E}_{CW} = \dot{m}_{CW} \left[c_{p,CW} (t_o - t_i) - T_0 c_{p,CW} \ln \frac{T_{CW,o}}{T_0} \right]$

où \dot{m}_{CW} est le débit d'eau de refroidissement

t_i, t_o températures d'entrée et de sortie de l'eau

h_i, h_o enthalpies à l'entrée et à la sortie de l'eau

$c_{p,CW} = 4,185 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ chaleur spécifique de l'eau de refroidissement

La perte totale d'exergie du condenseur est la différence des valeurs absolues de ces deux variations d'exergie, diminution pour la vapeur, augmentation pour l'eau.

Application numérique

Paramètres de la vapeur.

$$T_1 = t_s + 273 \cdot K$$

à la pression d'entrée de 77 mbar (7,7 kPa)

la température de saturation t_s est de 40,8°C

$$T_1 = 323,8 \cdot K$$

Calcul du titre à l'entrée

$$x_1 = \frac{h_1 - h_f}{h_{fg}} = \frac{h_1 - 170,91}{2404,78} = 0,8976$$

$$h_1 \text{ à } 40,8^\circ\text{C et } 7,7 \text{ kPa} = h_g = 170,91 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 \text{ à } 40,8^\circ\text{C et } 7,7 \text{ kPa} = s_f = 0,5831 \text{ kJ}$$

h_s : enthalpie de la vapeur saturée à l'entrée = 2329,4

$$e_2 - e_1 = -0,8976 \times r_1 \times \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad T_0 = 27^\circ\text{C} = t_i \quad t_o = 34,74^\circ\text{C}$$

$$r_1 = h_{fg} = 2404,78 \text{ kJ/kg}$$

$$\rightarrow e_2 - e_1 = -103,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Diminution totale d'énergie de la vapeur

$$\Delta \dot{E}_{ST} = \dot{m}_{ST} (e_2 - e_1) \quad \dot{m}_{ST} = \text{débit de vapeur} = 89805 \text{ tonnes/h}$$

$$\Delta \dot{E}_{ST} = \frac{89805}{3600} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \times -103,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Delta \dot{E}_{ST} = -2586,9 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Augmentation d'énergie de l'eau.

Débit d'eau : 6000 m³/h

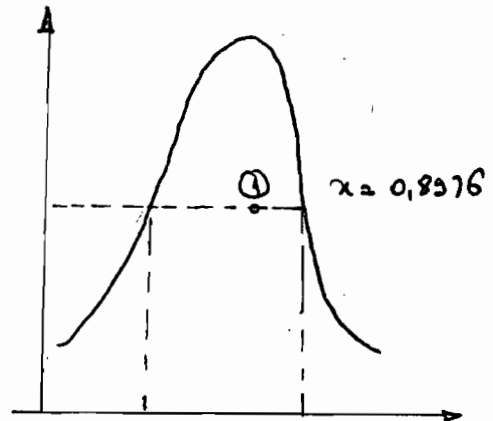
$$\dot{E}_{cw} = \dot{m}_{cw} \left[c_{pw} (t_o - t_i) - T_0 c_{pw} \ln \frac{T_{cw,o}}{T_0} \right]$$

$$c_{pw} = 4,185 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$t_o - t_i = 34,74^\circ\text{C} - 27 = 7,74^\circ\text{C}$$

$$T_{cw,o} = 273 + 34,74 = 307,74^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 300^\circ\text{K}$$



$$\dot{E}_{cw} = 1667 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \times \left[4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \left[(34,74 - 27) \text{K} - 300 \ln \frac{307,74}{300} \right] \right]$$

$$\dot{E}_{cw} = 684,8 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Pertes d'EXERGIE du Condenseur

$$\dot{B}_{\text{cond}} = |\Delta \dot{E}_{\text{ST}}| - \dot{E}_{cw} = 2586,9 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 684,8 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{B}_{\text{cond}} = 1902,1 \text{ kW}$$

Donc les pertes totales d'exergie du condenseur s'élèvent à 2 MW ce qui est très raisonnable pour une installation de ce type. Ce qui ne veut pas dire qu'on ne peut améliorer le rendement exergetique.

3.1 Introduction

Les métaux industriels, utilisés couramment dans tous les domaines de la construction se trouvent presque tous, à l'exception des métaux nobles, enfouis depuis des millénaires dans le sol sous forme de minerais (oxydes, carbonates, etc...). Ces minerais subissent généralement une suite d'opérations laborieuses pour devenir finalement des métaux que nous utilisons.

Il est donc dès lors très normal de penser que si l'on abandonne ces métaux à eux-mêmes, où s'ils sont exposés dans certains milieux, ils tendent très naturellement à revenir à leur état premier, c'est à dire un état primitif et stable. Et c'est en cela justement que réside le phénomène de la corrosion. Cette corrosion qui de nos jours, prend de plus en plus un intérêt grandissant, surtout en raison des dépenses en tout genre qu'elle occasionne.

En effet, pour donner un exemple, nous ferons remarquer que le coût annuel de la corrosion en termes de pertes induites, et de la protection contre ce phénomène est estimé à 8.000 milliards \$⁽⁶⁾. Ce coût assez faramineux n'est pas pour autant surprenant si on considère que tous les métaux sont altérables, même si c'est à des degrés divers. La seule corrosion dans les systèmes de fuel dans les automobiles coûte près de 100 millions \$ par an, tandis que celle au niveau des radiateurs a un coût de 52 millions \$. D'autre part, on approxime à 3 millions, le nombre de chauffe-eau qui sont remplacés chaque année.

Tout ceci pour donner une idée de ce que peut occasionner

CHAPITRE 3:

GENERALITES SUR LA CORROSION

DEUXIEME PARTIE

ETUDE MECANIQUE

un tel phénomène. Et en fait l'économie en général serait radicalement modifiée - dans le bon sens évidemment - s'il n'y avait pas de corrosion, parce que la corrosion touche tout, à l'intérieur, comme à l'extérieur des habitations, des routes, sur les océans et même dans les véhicules spatiaux. Par conséquent, devant l'ampleur d'un tel phénomène qui touche beaucoup de secteurs, l'industrie de production d'énergie ne saurait être épargnée.

Presque toutes les installations existant dans les centrales électriques connaissent des problèmes de corrosion, partant des chaudières jusqu'aux canalisations les plus invulnérables.

Mais si la corrosion est inévitable, son coût peut néanmoins être considérablement réduit surtout par une bonne sélection des matériaux et un bon design des installations.

De tout ce qui précède, nous voyons donc que ce phénomène est on ne peut plus important et qu'il mérite que les techniciens s'y attardent. Et c'est ainsi que s'est développée dans les pays industrialisés, une nouvelle science appelée "Genie de la corrosion" ou "Corrosion Engineering" qui a pour but d'empêcher ou de contrôler de manière économique et sûre, les dommages causés par la corrosion des métaux.

Mais en fait, quelles sont les causes profondes de cette corrosion? Quelles sont ses manifestations? Quels remèdes doit-on utiliser pour y faire face? Voilà autant d'interrogations auxquelles nous essayerons de répondre avant d'aborder à proprement parler les raisons de l'étude qui nous est proposée.

Avant d'entrer dans le vif du sujet et pour mieux cerner les démarches que nous avons suivies, les résultats auxquels nous sommes aboutis, il est quand même bon de faire un rappel des notions élémentaires de la corrosion. Nous tenons également à faire la remarque suivante : nous avons voulu présenter les choses en termes courants pour qu'un individu peu familiarisé avec le langage technique puisse les comprendre.

3.2 Principes de base

La corrosion électrochimique - par opposition à la corrosion physique ou la corrosion chimique - dont il sera question tout au long de l'étude repose sur un principe très simple. A la base, deux conditions sont requises : il faut et il suffit la présence d'anodes et de cathodes pour former une pile et il faut qu'un courant circule à travers cette pile. Les anodes et cathodes peuvent être reliées (piles locales) ou séparées. Le courant peut être produit par la pile elle-même ou peut être appliqué au système par une source externe. L'anode est la surface où la corrosion se produit et où le courant abandonne le métal et pénètre dans la solution. La cathode est la surface où il ne se produit pas de corrosion et où le courant pénètre dans le métal à partir de la solution. (Voir figure 3)

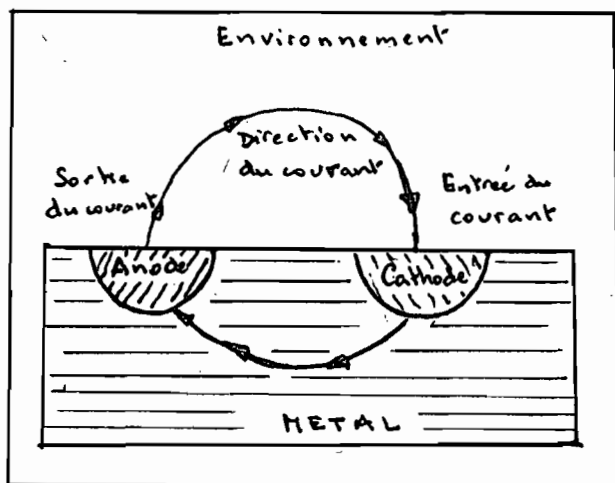


Diagramme de base montrant les conditions requises pour la corrosion des métaux. (1)

figure 3

Après cette brève présentation du principe de base, il est intéressant de savoir justement comment ces anodes et ces cathodes se forment ?

Les anodes et cathodes se créent sur une pièce métallique en raison des hétérogénéités, dites électrochimiques, hétérogénéités au niveau du métal ou au niveau de l'électrolyte. Et c'est en fonction de ces hétérogénéités que l'on peut parler de l'existence de trois types de piles, caractéristiques de la corrosion électrochimique. Il s'agit :

- des piles à électrodes dissemblables (dissymétries de structure ou de compositions du métal telles les hétérogénéités mécaniques - comme les cavités, les fissures, un état de surface defectueux, etc...)
- des piles de concentration qui sont de deux types : la concentration saline où deux électrodes d'un même métal baignent dans des solutions de leurs sels de concentration différente et l'aération différentielle où deux électrodes l'une étant dans une solution aérée et l'autre dans une solution désaérée sont en présence
- des piles de température différentielle quand on a deux électrodes d'un même métal, travaillant à des températures différentes, immergées dans un électrolyte de même composition initiale (Ex : chaudières, échangeurs de chaleur); l'électrode chaude est anodique par rapport au métal froid de même composition.

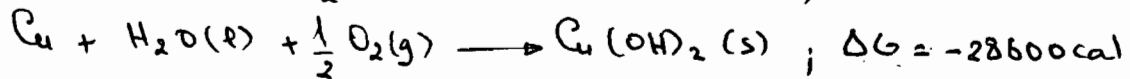
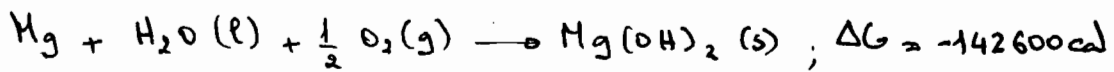
En pratique, les piles responsables de la corrosion peuvent être des combinaisons de ces trois types.

3.3 Les réactions de corrosion

La tendance d'une réaction chimique à se produire, impliquant la réaction d'un métal avec son milieu est mesurée par l'éner.

gie libre de Gibbs, ΔG . Plus la valeur de ΔG est négative, plus la tendance de la réaction à se produire est grande.

Par ex. Considérons les trois réactions suivantes:



Comme on peut le constater donc, le magnésium a plus tendance à réagir avec l' H_2O et l' O_2 que le cuivre et que l'énergie libre de la réaction de l'or étant positive, ce dernier ne se corrode pas en milieu aqueux pour former $\text{Au}(\text{OH})_3$.

En corrosion électrochimique, la tendance d'un métal à se corroder peut s'exprimer en fonction de la force électromotrice (f.e.m) des piles de corrosion qui sont une composante essentielle dans le processus de corrosion. C'est ainsi qu'on a défini une relation entre ΔG et la f.e.m E qui est la suivante:

$$\Delta G = -E n F \quad \text{où } n: \text{ nombre d'électrons (ou d'équivalents chimiques) prenant part à la réaction)}$$

et F : constante de Faraday

On peut alors constater que plus la valeur de E est grande, plus grande est la tendance à la réaction de ce métal et ceci est valable pour toutes les piles considérées. Comme on le voit donc, cette f.e.m joue un rôle fondamental dans le processus en ce sens qu'il permet le débit de courant et est le voltage qui existe entre l'anode et la cathode. Elle varie dans le même sens que le courant débite et c'est justement cette quantité de courant qui traverse la pile et qui est proportionnelle

à la quantité de métal qui se corrode.

3.4 Potentiel d'électrode simple ou demi-potentiel

Pour bien comprendre le phénomène de polarisation qui est très important quand il y a corrosion, il faut nécessairement appréhender de manière claire ce concept de demi-potentiel.

Quand un métal est plongé dans une solution ou un milieu environnant corrosif, un potentiel s'établit entre le métal et la solution. C'est ce potentiel qui est le potentiel d'électrode simple qu'il est souhaitable de connaître car il est en relation directe avec la résistance à la corrosion de ce métal par son environnement. Toutefois, il faut deux électrodes pour avoir une pile et un circuit fermé et par conséquent un voltage. En termes plus clairs, le potentiel d'électrode ne peut être mesuré par lui-même car il n'y a pas de pile avec une seule électrode. Il est donc évident qu'il faut une autre électrode pour mesurer le potentiel d'un métal, et cette électrode aura aussi un potentiel entre elle-même et la solution et on parlera alors de $\frac{1}{2}$ potentiel et le voltage mesuré entre ces deux électrodes est le résultat net de ces deux potentiels d'électrodes.

En général, on choisit une électrode de référence pour pouvoir évaluer en fonction de celle-ci tous les autres potentiels d'électrode. Cette électrode de référence doit posséder un potentiel constant et reproductible.

3.5 Série de forces électromotrices.

Si nous considérons l'électrode de H_2 (d'Hydrogène) comme électrode de référence, on dresse généralement une série de f.e.m des mé

- Taux à 25°C

Elément	Réaction d'électrode	Potentiel V par rapport à l'électrode STANDARD
(Extrémité active)		
Sodium	$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + e$	- 2,712
Aluminium	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{+++} + 3e$	- 1,670
Zinc	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{++} + 2e$	- 0,762
Fer	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2e$	- 0,44
Nickel	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{++} + 2e$	- 0,250
Hydrogène	$\text{H} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e$	0,000 (réf.)
Cuivre	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{++} + 2e$	+ 0,345
Platine	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{++} + 2e$	+ 1,200
Or	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{+++} + 3e$	+ 1,420
Extrémité noble		

Tableau 1 : Série des forces électromotrices (1)

Ce tableau nous fournit beaucoup d'informations entre autres, celles-ci :

- les métaux situés en tête de liste sont les moins résistants à la corrosion.
- Un métal plus haut dans la série agira comme anode et celui plus bas comme cathode lorsque ces deux métaux sont couplés

3.6 Polarisation

Un électrode n'est jamais longtemps à l'état d'équilibre quand un courant s'écoule en pénétrant ou en sortant de sa surface.

Le potentiel mesuré d'une telle électrode s'écarte du potentiel d'équilibre d'une certaine valeur qui dépend de la grandeur du courant extérieur et de son sens. L'évolution du potentiel est toujours celle s'oppose à l'écoulement du courant, quelque soit l'origine de celui-ci. Par exemple,

quand le courant traverse une cellule galvanique, l'anode devient plus cathodique et la cathode plus anodique; la différence de potentiel entre les deux électrodes décroît. La valeur de la variation de potentiel causée par un courant qui entre ou qui sort d'une électrode est appelée polarisation.

La figure suivante met en évidence la variation de ce potentiel

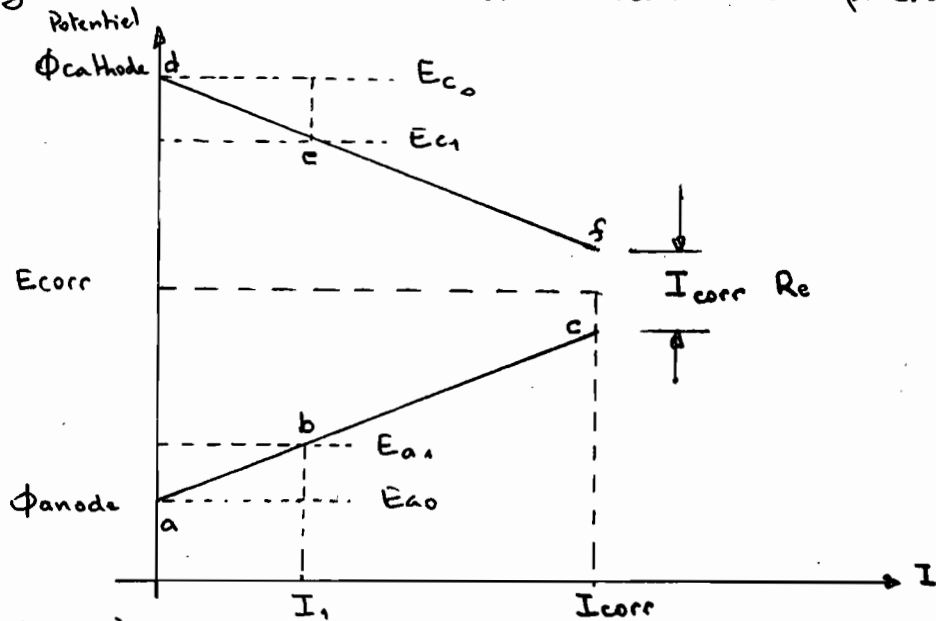


Figure 4 (3)

Les potentiels E_{c0} et E_{a0} sont les potentiels à circuit ouvert (aucun courant ne traverse la cellule). L'anode se polarise le long de la courbe $a b c$ et la cathode le long de $d e f$. Pour une valeur de courant égale à I_1 , la polarisation de l'anode est donnée par la différence $E_{a1} - E_{a0}$. De même, la polarisation de la cathode est $E_{c0} - E_{c1}$. La tension de cellule est $E_{c1} - E_{a1}$ et est donnée par le produit de I_1 et de la résistance totale (résistance métallique extérieure et résistance électrolytique interne R_e en série) : $E_{c1} - E_{a1} = I_1 (R_e + R_m)$

En court-circuit, le courant devient maximal I_{corr} . R_m est alors négligé et la d.d.p (différence de potentiel) entre les deux électrodes décroît à un minimum égal à $I_{corr} R_e$

Quand on veut réduire la polarisation des deux électrodes, on

cherche un moyen de réduire les pentes des droites abc et def. Ceci a pour effet de porter la rencontre de ces courbes à une valeur plus grande que I_{corr} .

D'autre part, on remarquera que tout facteur tendant à augmenter la polarisation diminue le courant à travers la cellule et diminue par conséquent la vitesse de corrosion.

Les cellules électrolytiques qui interviennent durant la corrosion des métaux sont analogues aux cellules en court-circuit décrites précédemment. Le potentiel mesuré d'un métal qui se corrode est un compromis, à la fois, des cathodes et des anodes polarisées appelé potentiel de corrosion, E_{corr} . La valeur maximale est appelé courant de corrosion (I_{corr}).

Les causes de la polarisation sont multiples et peuvent être classées en différentes catégories : polarisation de concentration, polarisation d'activation et polarisation de résistance.

3.7 Passivité

Le phénomène de passivité est un peu une forme d'exception aux informations fournies par la série des f.e.m. La passivité d'un métal se rapporte à un état de relative inactivité dans lequel le métal manifeste une tenue plus noble que ne le prévoyaient les considérations thermodynamiques. On peut définir un métal passif comme un métal qui est actif dans la classification des potentiels, mais qui se corrode néanmoins à une vitesse très faible.

La passivité est la propriété fondamentale de la résistance naturelle à la corrosion d'un certain nombre de métaux de construction.

tels que l'Aluminium, le Chrome, les aciers inoxydables etc.... Par ailleurs, certains métaux et alliages peuvent être rendus passifs par exposition à des milieux de passivation.

D'autre part, il est intéressant de noter que ce concept de passivité est soutenu par deux théories. La première appelée théorie du film d'oxyde précise que le film passif est soit un oxyde, soit un autre composé et constitue une barrière de diffusion ralentissant la vitesse de corrosion. La deuxième théorie ou théorie de la passivité par adsorption, stipule elle, que les métaux passifs sont couverts d'un film chimisorbé, par exemple de l'oxygène ou des ions passivants; un tel film déplace les molécules d' H_2O adsorbées et ralentit la vitesse de dissolution anodique en entraînant l'hydratation des ions métalliques.

3.8 Types de corrosion

Avant de clore ce chapitre sur les notions fondamentales de la corrosion, nous allons parler, assez sommairement du reste, des types de corrosions existantes.

Plusieurs classifications ont été données en ce qui concerne la corrosion des métaux, dépendamment du caractère des critères considérés. C'est ainsi donc qu'on a fait la distinction entre la corrosion à basse température et la corrosion à haute température, la corrosion sèche et la corrosion humide ou plus succinctement encore on fait la différence entre la corrosion chimique (oxydation ou combinaison directe), la corrosion physique (sous contrainte, corrosion par fatigue, corrosion érosion etc...) et la corrosion électrochimique.

Mais d'un point de vue pratique, on a classifié les différents types

de corrosion suivant leur aspect extérieur, tenant compte du fait que toutes les formes connues de phénomène peuvent être identifiées par simple observation visuelle. Les formes - dont quelques unes sont uniques - sont au nombre de huit et sont toutes plus ou moins interreliées. Il s'agit de :

- la corrosion uniforme
- la corrosion galvanique (corrosion de deux métaux)
- la corrosion caverneuse (par fentes ou fissures)
- la corrosion par piqûres (pitting)
- la corrosion intergranulaire
- la corrosion sélective ou par décollement
- la corrosion par érosion
- la corrosion sous tension.

CHAPITRE 4:

ETUDE THEORIQUE

Le chapitre intitulé "Etude Théorique" que nous proposons présentement est un préliminaire à l'étude de la corrosion en tant que telle. Il donne un avant-goût de ce que sera cette étude et porte plus particulièrement sur le comportement théorique des facteurs de corrosion.

Ainsi, dans un premier temps, nous essayerons de poser le problème après avoir au préalable fait un petit historique sur la corrosion des installations dans les centrales et parlé de la corrosion au niveau des condenseurs. Après cela, nous ferons un développement sur les principaux facteurs de corrosion en présence dans le cas qui nous intéresse. Pour terminer, nous nous intéresserons de plus près à la corrosion par piqûres, ses causes et ses manifestations.

4.1 Historique

Comme dans pratiquement toutes les centrales thermiques, l'un des problèmes majeurs de la Centrale du Cap des Biches est le problème de corrosion existant au niveau des installations d'exploitation, que ce soit au niveau des chaudières, comme des condenseurs et autres échangeurs de chaleur.

Ces problèmes ont commencé à être mis à nu dès le début de l'exploitation de la Centrale, leur intensité dépendant surtout des installations considérées ou des tranches. En effet, on note que aussi bien la nature, que l'évolution de la corrosion, n'est pas la même suivant que l'on parle des condenseurs, des réchauffeurs ou des chaudières. Ces différences s'expliquent par le fait que les milieux considérés ainsi que les métaux impliqués ne sont pas pareils...

4.2 Corrosion des tubes de condenseur

La corrosion au niveau des condenseurs est en fait un problème particulier, mais de portée générale, eu égard aux nombreux cas d'altérations similaires constatés sur les faisceaux des réchauffeurs, surchauffeurs et autres types d'appareils semblables. Elle est souvent le résultat, du choix d'un alliage inadéquat, d'une mauvaise qualité de l'eau (oxygène ou solides dissous, particules etc...), d'une mauvaise maintenance ou d'une négligence des actions protectrices. Et il arrive des fois qu'elle soit la conséquence, non pas d'une seule de ces causes, mais celle de la combinaison de deux, voire même de trois de ces facteurs.

Cela dit, on notera que pratiquement, toutes les formes de corrosion connues allant de la corrosion uniforme à la corrosion par fatigue se retrouvent dans les condenseurs (comme dans les autres échangeurs de chaleur). Elles dépendent surtout de la partie de l'appareil considérée et des métaux impliqués.

Le tableau ci-après est un récapitulatif des cas les plus probables constatés. Il donne pour chaque partie considérée, le type de corrosion généralement observé, le métal impliqué, ainsi que les causes sommaires, du phénomène. (Voir tableau 2)

Il apparaît assez clairement d'après ce tableau que le lieu privilégié de la corrosion dans un condenseur est l'intérieur des tubes véhiculant le fluide de refroidissement et que la corrosion prend surtout la forme de piqûres, de corrosion uniforme ou caverneuse.

Cette remarque nous sera d'une grande importance pour l'étude de la corrosion des tubes, des condenseurs de la Centrale du Cap des

Types de dommage et Alliages sensibles	Emplacement	Causes
Corrosion sous tension Cu, Laitons, Aciers inox	Sur la plaque de tête	Contraintes résiduelles importantes de laminage Putréfaction d'ammoniaque
Corrosion par fatigue tous les alliages	Sur les tubes	vibrations des tubes
Corrosion par érosion Alliages de Cuivre	A l'entrée des tubes	Grande turbulence; teneur élevée en particules solides; distribution non uniforme de l'écoulement
Corrosion par piqûres Alliages de Cu, Aciers inox	A l'intérieur des tubes	défaute sur la couche protectrice, non uniformité des dépôts, crevasses, salinité élevée du milieu
Corrosion uniforme Cu et ses Alliages	A l'intérieur des tubes	
Corrosion cavernueuse	A l'intérieur des tubes	dépôts; périodes d'arrêt
Corrosion galvanique Métaux les moins nobles	Dans les boîtes à eau	Combinaison d'alliages assez éloignés dans la série de fem
Dezincification laitons	A l'intérieur des tubes	

Tableau 2 (22)

Biches, en ce sens qu'il nous fournit des informations quant à la voie à suivre.

4.3 Problème

Il s'agit dans cette partie de définir de manière assez claire comment les choses se présentent.

Comme nous l'avons mentionné un peu plus haut, ce phénomène d'altération est un problème intimement lié à l'exploitation des Centrales. Et c'est ainsi que Cap des Biches n'a pas fait exception à la règle et que les problèmes de corrosion sont devenus une des préoccupations quotidiennes.

4.3.1 Présentation des faits :

Depuis le début de la mise en service de la Centrale en 1966, il est constaté assez fréquemment qu'au niveau des condenseurs (qui im-
porte la tranche considérée), les tubes en alliage de cuivre (laiton Aluminium 76.22.2 ou Cupro Nickel 70.30) véhiculant l'eau de mer, de refroidissement permettant la condensation de la vapeur provenant de la turbine, connaissent de sérieux problèmes de corrosion. Des problèmes qui évoluent - dans le mauvais sens s'entend - jusqu'au passage de ces dits tubes. Ce qui n'est pas sans causer de réels dommages à l'ex-
-ploitation.

Beaucoup d'essais, suites à des études entreprises par des entreprises étrangères ont été initiées pour palier à ces dommages ; mais les solutions proposées n'ont pas toujours été appliquées et même celles qui ont été entreprises, ont été très vite abandonnées, faute de résultats probants.

Devant tous ces faits, nous devons, par l'étude que nous entreprenons, résoudre ce problème une bonne fois pour toutes en proposant des solutions sûres et surtout réalisables.

4.4 Etude théorique des facteurs de corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs qui interviennent généralement, non pas individuellement, mais en relation plus ou moins complexes les uns avec les autres.

On peut les classer en quatre grandes familles :

- facteurs définissant le milieu d'attaque. Il s'agit dans le cas de la corrosion électrochimique essentiellement des caractéristiques des réactifs se trouvant dans la solution; on peut citer entre autres la concentration du réactif, la teneur en O_2 , le pH, la température, la vitesse, la présence de particules solides ou d'impuretés etc...
- facteurs définissant la nature du métal. Ce sont principalement les propriétés mécaniques et métallurgiques du métal. Il s'agit de sa composition, de son potentiel d'électrode, de la présence d'impuretés, des divers traitements thermiques effectués sur le métal, de l'érouissage effectué, etc...
- facteurs définissant les conditions d'emploi. On peut citer dans le désordre l'état de surface, les moyens de protection, les sollicitations mécaniques, la forme des pièces, l'emploi ou non d'inhibiteurs, des effets biologiques etc...
- facteurs liés à l'influence du temps. Ce sont les paramètres qui fluctuent assez fréquemment dans le temps. On peut parler du vieillissement, des alternances éventuelles de tensions mécaniques, des variations brusques de températures etc...

Parmi tous ces facteurs, nous en retiendrons deux (le milieu d'attaque (l'eau de mer dans notre cas) et la nature du métal (Alliages de Cuivre)), que nous avons jugé plus dignes d'intérêt que

les autres et que nous présentons ci-après.

4.4.1 L'eau de mer et la corrosion

La nature du milieu d'attaque est l'un des facteurs les plus importants à considérer pour un ingénieur d'Anticorrosion ou pour un quelconque scientifique intéressé, mis en face d'un problème de corrosion. C'est pourquoi donc, nous essaierons de parler du comportement de l'eau de mer face à des milieux métalliques.

L'eau de mer contient environ 3 à 4 % de sel et est légèrement alcaline. C'est un bon électrolyte et peut causer de la corrosion galvanique de la corrosion cavernueuse, ou de la corrosion par piqûres. La corrosion dans tous ces cas est fonction de la teneur en Oxygène, de la vitesse et de la température, ainsi que de la présence d'impuretés ou d'organismes biologiques, du pH etc...

Pour donner un exemple, nous publions le tableau ci-dessous, tableau qui fait ressortir la variation du taux de corrosion avec la vitesse de circulation

Tableau 3 (6)

Métal	Taux de corrosion en mdd		
	0,3 m/s	1,2 m/s	8,1 m/s
Laiton Ammirante'	2	20	170
Laiton Aluminium	2	—	105
70.30 Cupro Nickel	5	—	99
Titanium	0	—	0

Par ailleurs que les impuretés ou les microorganismes présents dans l'eau de mer (appelés aussi salissures quand ils se fixent) sont une cause importante de corrosion sous dépôt. Ils ont pour origine : le mucus organique de bactéries et d'algues, l'incrustation de colonies d'organismes durs tels que les crustacés etc...

442 Les alliages de Cuivre et la corrosion

Les alliages de cuivre utilisés pour les tubes de Condenseurs à la Centrale sont le laiton Aluminium (70% Cuivre, 22% Zinc et 2% Aluminium) et le cupro-nickel 70.30 (70% de cuivre, 30% Nickel)

Les laitons dans leur généralité présentent de bonnes aptitudes face à l'attaque par cavitation et c'est en définitive pour cette raison qu'on les utilise dans les condenseurs. Les fissures de corrosion du laiton surviennent généralement par dézincification, par corrosion par piqûres ou par corrosion sous tensions. Dans toutes ces situations, le laiton a tendance à se corroder en fonction de la teneur en Zinc sauf pour l'attaque par piqûres.

Les cupro-Nickel, quant à eux, sont surtout utilisés pour les eaux polluées en raison de leur assez bonne résistance à l'attaque par piqûres. Cependant par rapport à la corrosion sous tension, ils présentent des comportements différents. Par exemple, face à ce phénomène, on note une augmentation de la résistance quand la teneur en cuivre augmente. On notera aussi qu'ils sont particulièrement résistants à l'eau de mer fortement agitée quand ils contiennent de faibles quantités de fer ou de manganèse.

Comme on peut le constater donc, ces deux types d'alliages de cuivre le plus couramment utilisés présentent à peu près les mêmes qualités, mais cependant, il a été prouvé par des chercheurs assez avertis que les laitons présentent de meilleures garanties que le Cupro-Nickel en présence de mer.

D'autre part, il est important de noter que la vitesse de circulation

dans les tubes en alliage de Cuivre est déterminante pour leur bonne tenue. L'autre chose non moins importante que'il convient de faire ressortir est que tous ces alliages de Cuivre obéissent à la loi différentielle de Evans sur laquelle nous reviendrons.

Pour terminer, nous livrons des réflexions de Uhlig, après une étude sur les alliages de Cuivre: " Ces alliages résistent bien à l'eau de mer, aux eaux douces, chaudes ou froides, aux acides dilués chauds ou froids et à l'exposition atmosphérique, mais cependant, ils ne résistent pas aux acides oxydants type (HNO_3), aux eaux aérées de fort débit, aux sels oxydants et à H_2S ".

44.3 Les alliages de Cuivre et la loi d'aération différentielle.

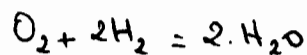
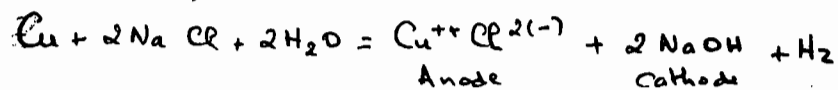
Comme nous venons de le mentionner un peu plus haut, les alliages de Cuivre sont très sensibles au phénomène d'aération différentielle. Mais en fait, qu'est-ce que l'aération différentielle, quelles sont ces causes?

Si la surface immergée d'un métal est homogène (polie par exemple), il est assez peu probable que la répartition de l'oxygène soit très variable d'un point à l'autre. Mais, si la possibilité existe de l'existence d'une fente quelconque, d'une infractuosité si minime soit-elle, on conçoit que l'oxygène aura quelque peine à atteindre le fond de ces crevasses et ces parties éloignées deviendront automatiquement anodiques.

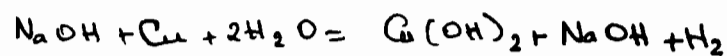
D'autre part, si un corps étranger adhérent à une surface métallique ou reposant sur elle, crée une discontinuité et fait ainsi obstacle à la diffusion régulière de l'oxygène; on est en présence d'une aération différentielle. Et même si le corps est chimiquement neutre, il suffit seulement que l'"ombre portée" par le corps indésirable constitue une

ligne inaccessible à l'oxygène ou une gêne pour son accès. Cette partie "ombragée" en manque d'oxygène devient automatiquement anodique par rapport aux surfaces environnantes riches en oxygène qui deviennent par conséquent cathodiques.

Pour le cuivre et ses alliages, la chaîne de réactions, faisant suite à une aération différentielle est la suivante :

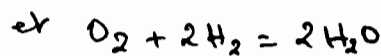
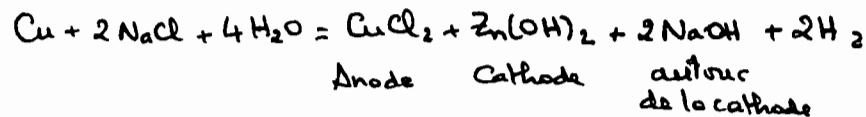


On aura aussi à la cathode :



Finalement l'expression générale correspondant au schéma classique d'Evans

est :



qui est l'expression de la dépoliarisation cathodique

4.5 Notes sur la corrosion par piqûres

Pour terminer cette première partie "étude théorique" nous allons parler de la corrosion par piqûres ou "pitting", type de corrosion que nous avons constaté à l'intérieur des tubes, après un premier examen visuel.

Les piqûres sont responsables de grand nombre d'avaries souvent imprévues dans les installations industrielles. Elles sont particulièrement dangereuses et constituent une forme d'attaque extrêmement localisée et intense qui aboutit au percement du métal, souvent de manière soudaine.

Elles représentent ainsi une des formes de corrosion les plus insidieuses et les plus destructrices. Elles provoquent la détérioration des équipes -

ments par perforation avec seulement un faible pourcentage de pertes de poids. Un des gros problèmes qui se posent quand il s'agit de piqûres est qu'il est souvent difficile de les déceler en raison de leurs faibles dimensions et surtout parce que les piqûres sont souvent recouvertes par les produits de corrosion. Il est aussi difficile d'apprécier quantitativement l'étendue des piqûres à cause des profondeurs variées et du nombre de piqûres survenant dans des conditions supposées semblables.

Il est aussi très difficile de prévoir les phénomènes de piqûres par des essais de laboratoires à cause surtout des temps mis par les piqûres pour se manifester (quelques fois plusieurs mois).

En fin, nous livrons l'explication que l'on peut donner à cette forme d'attaque : quand l'anode ou la zone anodique, se limite en un seul point, la corrosion s'installe à cet endroit et il en résulte une pénétration profonde de la corrosion. Le diamètre de ces trous est variable mais dans la plupart des cas, il est relativement faible.

4.5.1 Amorce et propagation des piqûres.

On distingue deux étapes dans la formation des piqûres :

- l'amorce (ou le début de la formation de piqûres)
- la propagation (comment les piqûres se développent)

Comme nous l'avons dit un peu plus haut, une pile locale ou la formation d'une anode est nécessaire pour toute corrosion par des électrolytes. Ces piles se forment en raison de hétérogénéités dans les milieux (métallurgiques, mécaniques etc...)

Une rupture locale de la couche de passivation (protectrice) sur le métal conduit à l'apparition de petites zones anodiques. La surface environ-

nanté passivée se comporte se comporte comme une cathode et avec un rapport défavorable de surface. Une pile se constitue donc bien qu'on soit en présence d'un seul métal ou alliage. Il en résulte comme le voit donc de graves phénomènes de piqûres.

Une autre explication du phénomène de piqûres peut se faire à partir de la loi différentielle de Evans. Quand il ya présence de corps étrangers (sable, bois, coquilles, algues) en certains endroits, on a des parties isolées par ces particules, de l'oxygène, et ces petites parties deviennent de petites anodes, entourées par de larges cathodes et quand un produit de corrosion est formé et accumulé, il peut causer la continuité de l'attaque même si la particule originale est balayée. On parle alors de processus de corrosion à dé-polarisation par O_2 . Il va sans dire que dans ce cas là, la vitesse de l'eau est assez faible pour permettre la stagnation de la particule en question.

Il existe aussi un troisième cas de corrosion par piqûres quand la vitesse du milieu d'attaque est très grande. On assiste alors à un choc entre les bulles d'air à basse pression dues à la turbulence de l'écoulement, et la paroi intérieure des tubes. Aux points où de larges bulles cognent la paroi, une corrosion par piqûres se produit.

Voilà assez rapidement brossées les quelques notions importantes à connaître sur le phénomène de corrosion par piqûres.

4.5.2 Aspect technique de la corrosion par piqûres

Une piqûre est un type de réaction anodique. Le processus de la corrosion à l'intérieur d'une piqûre, favorise les conditions nécessaires, à la continuation de l'activité (figure 5). Ici un métal M

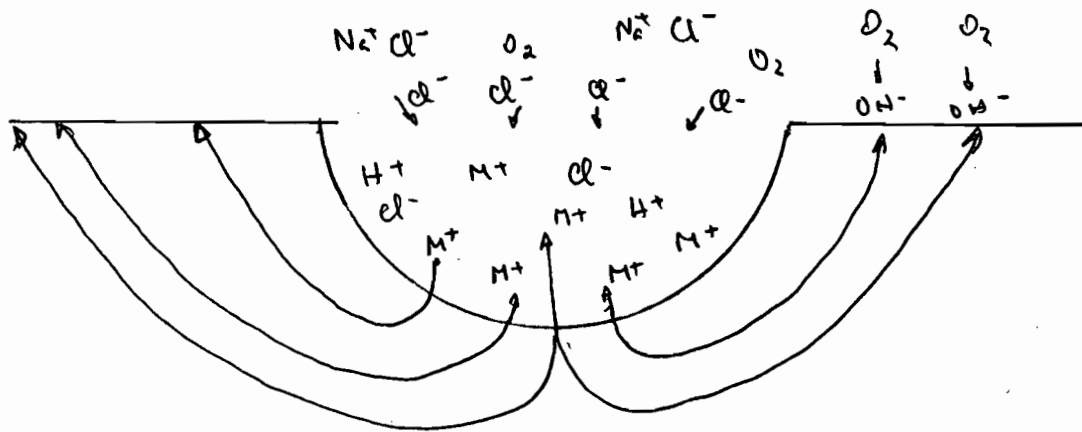


Figure 5 (6)

est attaqué par piqûres par une solution aérée de chlorure de sodium. Une rapide dissolution se passe à l'intérieur de la piqûre, tandis qu'une réduction de l'oxygène prend place sur les surfaces adjacentes. La propagation de ce processus est autonome. La rapide dissolution du métal à l'intérieur des piqûres tend à produire un excès de charges positives dans cette région, résultant de la migration des ions Cl^- pour maintenir l'électroneutralité. Ainsi à l'intérieur des trous, on a une grande concentration de MCl et comme résultat de l'hydrolyse, une grande concentration d'ions H^+ . Toute l'hydrogène et tous les ions Cl^- stimulent la dissolution de plusieurs métaux et alliages et le processus entier accélère avec le temps.

CHAPITRE 5:

ETUDE EXPERIMENTALE

Cette partie que nous qualifions d' "Etude à proprement parler" ou plus simplement d' "Etude expérimentale" est en fait la partie la plus essentielle de ce présent rapport et c'est elle qui devra - avec toute la scientificité requise - nous permettre d'avoir des idées fixes et claires quant aux divers phénomènes rencontrés. Elle porte surtout sur une étude assez approfondie des facteurs de corrosion, facteurs qui comme nous venons de voir dans le chapitre précédent sont d'une importance considérable dans les processus de corrosion.

C'est ainsi que dans un premier temps, nous ferons ressortir toutes les caractéristiques de la corrosion observée sur les échantillons (bouts de tubes en Cupro-Nickel et Laiton Aluminium) mis à notre disposition. Après cela, nous nous évertuerons donc à étudier dans les moindres détails, les différents facteurs qui ont été, à notre sens, les plus déterminants dans le cas de corrosion qui est le nôtre.

Nous terminerons notre étude par une description, un schéma du processus de corrosion tel que nous l'avons compris ou plus exactement tel qu'il ressort de nos différentes analyses, suivie d'une conclusion relative à cette partie.

5.1 Indicateurs de corrosion :

Il s'agit ici de mettre en exergue ce que nous pourrions appeler "les symptômes de la maladie" - analogie étant faite avec le secteur de la médecine - en utilisant des méthodes d'évaluation et d'expression qui qualitatives, qui quantitatives, de la corrosion avec les diverses observations et les quelques mesures effectuées.

Nous tenons aussi à préciser, une fois de plus, que nous avons travaillé avec des échantillons prélevés sur des tubes du condenseur. Certains de ces échantillons provenaient de tubes endommagés alors que d'autres non.

5.1.1 Observation visuelle

Elle est la méthode la plus simple, mais aussi la moins précise d'évaluation, comparativement aux autres. Néanmoins, elle nous a permis de tirer quelques conclusions qualitatives de grande valeur et de faire des estimations quantitatives grossières. Elle a été utilisée parce que nous avons constaté la présence ou plutôt l'accumulation (en partie ou en totalité) des produits de corrosion sur la surface des échantillons et elle est justement recommandée pour ces genres de situation.

Les résultats de cette observation sont les suivantes :

- Tout d'abord, il ne fait aucun doute sur la nature de la corrosion. Des piqûres (petits trous) de diamètres différents apparaissent visiblement sur la surface du métal quand on enlève les produits de corrosion après brossage et lavage. En certains endroits, on les aperçoit dénudées de toute autre formation.
- En ce qui concerne l'aspect extérieur des échantillons, on note un ternissement d'un grand pourcentage de la surface totale avec l'existence de plusieurs taches. Sur les échantillons de cupro-Nickel, fuyards comme non fuyards, on remarque l'apparition d'une couleur verdâtre sur une partie très importante de la paroi. Il s'agit sans doute de l'accumulation des produits de corrosion (oxydes de cuivre tels $CuCl_2$) dont la répartition n'est pas uniforme (certaines parties sont plus recouvertes

que d'autres). Aussi, les formes des régions attaquées présentent une grande diversité.

- D'autre part, on remarque que la couche de produits de corrosion est presque compacte et très adhérente (on ne peut pas les enlever avec le doigt) mais que sa densité est très variable. (Voir figure 6)



Echantillon observé:
les parties les plus foncées sont les parties attaquées (x 2,5)

figure 6

Examen macroscopique

5.12 Examen macroscopique

C'est un examen que nous avons réalisé avec le microscope optique et avec des grossissements de 50 à 200.

Il nous a donné des renseignements encore plus précis sur l'étude des échantillons corrodés. C'est ainsi qu'après avoir enlevé avec un chiffon imbibé d'eau une partie des produits de corrosion, on observe la véritable structure des régions corrodées (Voir figure 7). On distingue nettement la piqûre (région la plus foncée de la photo) qui comme nous l'avons dit précédemment a une forme plus ou moins quelconque. On a aussi remarqué que la profondeur des piqûres variait d'un point à l'autre.



Figure 7
Cavité de corrosion
sur un tube en
Cupro Nickel
(X 200)

Par ailleurs, ces observations nous montrent qu'il n'y a pas de régions préférentielles pour la corrosion. La répartition se fait sur presque toute la surface.

D'autre part, la photo suivante montre nettement la structure grossière de la couche protectrice. La bande centrale est une région dénudée de sa couche protectrice et sur laquelle, on peut observer un début d'attaque (points noirs)



Figure 8
mettant en évidence
le décollement de la
couche protectrice.

513E Etude microscopique

a) Etude des échantillons corrodés

La première étude microscopique s'est faite sur les échantillons

corrodés avec un agrandissement de 500. Elle nous a permis de faire une étude détaillée du mode de destruction et surtout du processus de corrosion. On a remarqué qu'il n'existait pas d'amorces cristallines et que la progression de l'attaque se faisait en profondeur.

b) Etude des échantillons "sains"

Pour ce cas bien précis, nous dirons que la qualité du polissage effectué suivi de l'attaque n'a pas donné les résultats escomptés. Le polissage chimique effectué (électrolyse avec anode constituée avec l'échantillon de Cupro-Nickel et cathode en titanium) n'a pas décelé la vraie microstructure du métal. Les formes irrégulières observées ne nous permettent pas de tirer une conclusion hâtive. Mais cependant on peut être sûr d'un fait : on ne peut accuser la qualité du métal à partir de là parce que son état de surface comme sa composition nous paraissent normales.

5.1.3 Courbes d'évolution de la corrosion

Pour toujours évaluer la corrosion, nous avons tracé la courbe Nombre de tubes percés par Nombre de jours (figure 9)

Nous voyons que le faisceau de Cu-Ni résiste pendant un mois de fonctionnement puis la corrosion se manifeste et son importance croît de manière exponentielle jusqu'au 100^e jour ; stagne un certain temps, puis recommence à croître de la même manière que précédemment.

Le premier accroissement est probablement dû au fait que pendant le début de fonctionnement, les couches protectrices n'étaient pas encore formées et le métal était plus ou moins exposé.

52 Etude expérimentale des facteurs de corrosion

Comme nous l'avons vu précédemment, l'étude des facteurs de corrosion pour un cas donné est d'une importance primordiale. Ainsi tout à nos nous essayons de passer en revue tous les facteurs susceptibles d'influencer la corrosion pour notre cas présent et surtout de voir jusqu'à quel point ces facteurs ont été plus ou moins impliqués dans le processus. Pour cela, nous avons divisé les facteurs de corrosion en deux catégories :

- la première catégorie concerne les facteurs définissant le milieu d'attaque et les conditions d'emploi
- la deuxième catégorie, elle parle plutôt des facteurs définissant la nature du métal

52.1 Facteurs définissant le milieu et les conditions d'emploi

Dans le cas pratique qui nous intéresse, il s'agit surtout de déterminer les qualités et les caractéristiques de l'eau de recirculation.

Pour cela, nous avons procédé à deux séries d'analyse en vue de déterminer d'une part les propriétés alcalimétrique et d'autre part la présence de impuretés (tout ce qui est élément extérieur).

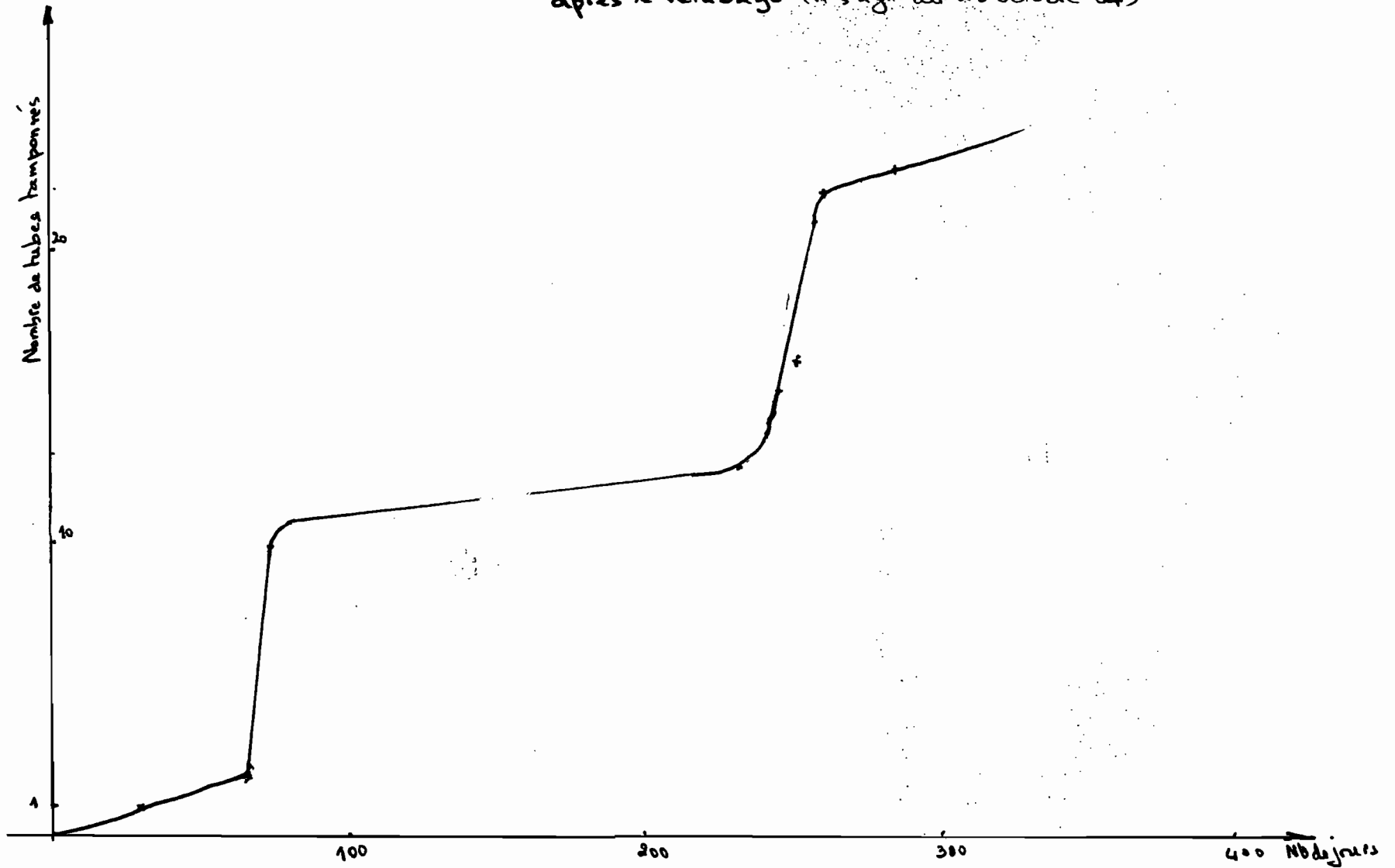
① Analyse des propriétés alcalimétriques de l'eau

• Agressivité - Pouvoir incrustant

Pour déterminer la caractéristique de l'eau, nous avons utilisé le test au marbre et trouvé un pH de 7,8 pour l'eau et un pH d'équilibre de 7,2, ce qui donne une différence de +0,6. Et même, par la méthode de l'indice de Langelier (Voir diagramme), on retrouve la même valeur entre le pH et le pHs de saturation. Et ceci montre très

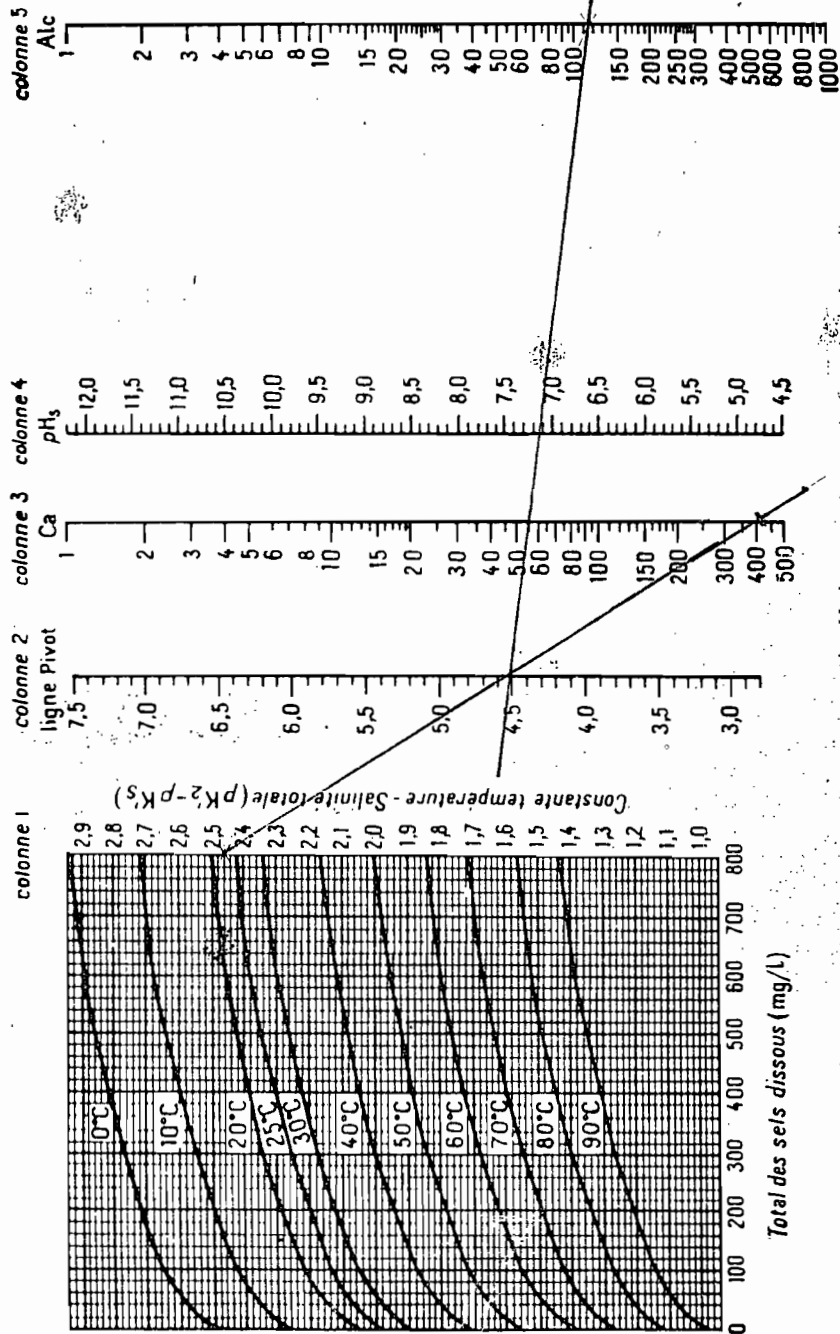
Figure 9

le 0 correspond à la date de mise en service du condenseur de la tranche 302
après le retubage (il s'agit du 28 octobre 84)



Ca⁺⁺ = 415 mg/l
 Alcalinité = 117 mg/l

$$7,8 - 7,1 = 0,7 \text{ (incrus)}$$



Graphique et nomogramme pour la détermination du pH de saturation par la formule de Langelier

nettement que nous sommes en présence d'une eau incrustante, par conséquent pouvant causer de la corrosion par aération différentielle par exemple, bactéries ou état de surface.

- Alcalinité Par la méthode des titrages, nous avons trouvé pour l'eau analysée une valeur de 117 mg/l CaCO_3 , ce qui est dans les limites de l'acceptable

- teneur en matières en suspension (algues et matières inorganiques)

Par la méthode de filtration par cécuset-filtre "SELAS" (retention nominale de 12 μm et rétention absolue de 25 μm), nous avons trouvé avec l'essai du 4^e Juin 1986 une teneur en matières en suspension de 58 mg/l (ce qui est considérable comparée à celle d'autres cours d'eau) dont 47 mg de matières inorganiques. Ce qui constitue une sérieuse alerte du point de vue de la corrosion sous dépôt.

- Teneur en matières solides. L'essai du 19 Mars 1986 nous a donné une teneur en matières solides totale (ou résidu après évaporation de 43,00 mg/l dont 34,5 mg/l de solides non volatiles constitués de matières organiques en très grande partie.

Voilà en gros, les résultats des analyses de l'eau et ils sont pertinents et pour cause, ils montrent qu'il est évident qu'il faut absolument chercher de ce côté là.

② Examen microscopique de l'eau

L'examen microscopique des échantillons d'eau ramenés de la Centa. le avec des agrandissements de 50 et 100 nous ont prouvé que la densité en matières organiques (surtout en algues de tout genre) est très élevée et qu'elle dépasse de loin les limites permises.

Ce qui constitue, une fois encore, une donnée permanente. Les figures suivantes sont des photos, réalisées avec les agrandissements pré-cités de deux variétés d'algues très répandues dans l'eau analysée



(x 50)

Figure 10 :



Figure 11 :

(x 50)

Algue filamenteuse

Voilà donc présenté grosso modo ce que nous avons tiré de l'analyse de l'eau, c'est à dire de l'analyse des facteurs définissant le milieu d'attaque et les conditions d'emploi; analyse qui comme on le voit laisse présager des risques importants de corrosion sous dépôt.

522 Facteurs définissant la nature du métal.

Pour l'étude de ces facteurs, nous avons fait des examens micrographiques avec le microscope optique suivies de prises de photo.

Comme résultats de cet examen nous pouvons dire que le métal sain n'est pas poreux (c'est nickel comme l'aitan Aluminium) et n'a presque pas d'inclusions ou de rayures sur sa surface. Il n'y a pour ainsi dire pas beaucoup d'inégalités de surface sur les échantillons observés.

Ces constatations faites nous disent à peu près ceci : la plus ou moins bonne qualité de celle-ci ne nous permet pas de dire que sa nature peut être considéré comme un facteur déterminant

5.3 Processus de la corrosion

Après toutes ces analyses effectuées, il se dégage à notre avis, un certain nombre de points dignes d'intérêt et qui sont les suivants :

- On ne peut accuser une mauvaise élaboration du métal des tubes autopsiés (Cuipro-Nickel, comme l'aiton Aluminium) après l'étude métallographique. Sa composition est normale et son état de surface ne présente pas de discontinuités, de micro-porosités ou d'inclusions.
- L'eau de mer utilisée pour le refroidissement n'est pas agressive et elle est même un peu incrustante (en tout cas pas plus incrustante que l'eau du robinet de l'EPT). Et ainsi en principe elle ne devrait pas causer de la corrosion, mais plutôt de l'entartrage. Cependant la teneur importante en matières organiques nous donne à réfléchir sur la présence élevée en micro-organismes (particules, algues, bactéries et autres)

Donc, ces deux conditions (métal sain, eau plus ou moins de bonne qualité si on se réfère aux propriétés alcalimétriques) nécessaires, mais pas suffisantes - pour ne pas avoir de corrosion étant remplies, il nous faut aller chercher ailleurs les causes du phénomène notamment dans les conditions d'utilisation ou conjonctures auxquelles ont été soumis l'eau et le métal. Et c'est pourquoi, nous avons essayé d'expliquer ce phénomène à partir de cette conjoncture là, qui dans notre cas concerne surtout la présence élevée des micro-organismes. Et ceci nous a conduit tout naturellement à retenir le scénario qui est présenté à la suite.

D'après tout ce qui précède, nous pouvons croire qu'il s'agit d'une attaque sous dépôt (cas le plus fréquent de corrosion des tubes de condenseur), caractérisant une faible vitesse de circulation de l'eau et "pitting" du cuivre par aération différentielle. Ceci faisant suite à la combinaison ou l'interdépendance de relations physico-chimiques et biologiques qui sont entrées en jeu et qui ont conduit à l'altération.

On distingue dans ce cas, deux étapes dans le processus.

1^{ère} étape : Il s'agit de l'attaque bactérienne ou biologique de la couche protectrice par les micro-organismes présents dans l'eau de mer en grande quantité, plus particulièrement des bactéries naissant du pourrissement ou de la fermentation faisant suite à la décomposition pendant certaines périodes (périodes de chaleur plus particulièrement des algues aux voisinages des prises d'eau, ces bactéries se développent et foisonnent grâce aux conditions favorables rencontrées, (pH compris entre 7 et 7,8, température idéale comprise entre 20 et 30°C). Le pourrissement agit donc sur la couche d'oxyde de cuivre, protectrice des alliages par l'intermédiaire des substances agressives secrétées, substances contenant du sulfure d'hydrogène (H_2S) ou cystine $S-CH_2-CH(NH_2)COOH$ $\begin{matrix} | \\ S-CH_2-CH(NH_2)COOH \end{matrix}$, puissant réducteur qui agit soit directement sur ce film protecteur ou soit comme dépolarisant. Dans le second cas, il consomme l'hydrogène de polarisation au fur et à mesure de son apparition (phénomène que seule la biologie est capable d'expliquer).

2^{ème} étape : Il s'agit du phénomène électrochimique en tant que tel. A près donc l'attaque et l'altération du film protecteur, le métal est directement exposé au milieu refroidissant. Et comme ce milieu abonde de matières solides, il est très vraisemblable que ce sont ces matières (dépôts d'algues, coquillages, coquilles adultes qui aiment se fixer quand la vitesse de circulation n'est pas très élevée) chimiquement neutres qui ont occasionné une aération différentielle en venant adhérer sur la paroi intérieure des tubes, phénomène auquel sont très sensibles les alliages de Cuivre.

Il ya eu par la suite formation de micro-anodes (zones "ombragées") et de macro-cathodes et circulation d'un courant entre ces deux électrodes. Par conséquent toutes les conditions étaient réunies pour la corrosion par piqûres ou "pitting" se manifester. Ainsi la corrosion s'est amorcée et s'est propagé en profondeur jusqu'à la perforation des tubes.

Le phénomène électrochimique comme on l'a vu antérieurement s'est produite sûrement à cause de la basse vitesse de circulation ou probablement aussi pendant les périodes d'arrêt (même un arrêt de 24 heures peut présenter des dangers réels pour les tubes).

En conclusion, nous dirons que nous retiendrons l'hypothèse de la corrosion microbiologique par les bactéries réductrices en regard à toutes les considérations qui ont été tenues en compte dans l'étude. Ceci constitue en fait une pièce à conviction pour les spécialistes en corrosion qui n'ont jamais relegués au second plan les mécanismes biologiques et qui ont toujours cru

que ces mécanismes sont plus qu'un événement secondaire ou surajouté, et sont à l'origine de beaucoup des cas de corrosion constatés.

Nous terminerons cette description du processus en donnant quelques notions fondamentales sur la corrosion biologique.

5.4. Notes sur la corrosion bactériologique

Cette notion de corrosion biologique est fortement contrevenue quand il s'agit de surfaces métalliques. Mais c'est une notion qu'on ne saurait passer sous silence dans la mesure qu'on s'est rendu compte qu'il y avait des phénomènes de corrosion qui ne pouvaient s'expliquer avec les théories classiques (physique, chimique et électrochimique)

Et c'est ainsi que les micro-organismes qui jouent un grand rôle dans les maladies infectieuses des hommes, des animaux et des plantes sont aussi responsables de beaucoup d'avaries dans les installations industrielles. Et comme on le voit donc, cette interaction entre le monde de la technique et le monde microbien, entre le matériau et le microbe revêt donc un certain nombre d'aspects qui posent problème.

Deux modes d'action sont à retenir pour les bactéries :

- a) la production de substances corrosives (H_2S notamment)
- b) Dépolarisation cathodique.

Sur la surface anodique, le métal est mis en solution tandis qu'un film d' H_2 se forme au niveau de la cathode. Le processus devrait en principe tendre vers un équilibre. Pour que l'électrolyse se poursuive, il faut que la pile soit dépolarisée, c'est à dire que l' H_2 soit consommé au fur et à mesure de son apparition. Et c'est à niveau là qu'interviennent les bactéries.

5.5 Conclusion de l'étude:

Avant d'avoir à proposer des solutions, il nous semble important de parler des causes réelles et profondes de la corrosion des tubes de condenseurs, d'aller plus loin dans les investigations pour voir la source de tous ces maux car comme on a coutume de dire " Pour combattre un mal, il faut s'attaquer à la racine "

Causes

À notre avis, il ya deux catégories de causes, les unes étant intimement liées aux autres.

Il ya d'abord ce qu'on pourrait appeler les causes directes: on peut citer entre autres la faible vitesse de l'eau de refroidissement la présence très élevée de micro-organismes dans cette même eau, etc..

Mais en fait ces causes directes sont en général les conséquences d'autres causes plus ou moins indirectes telles que le mauvais design des grilles devant servir de filtres (grilles de 10mm x 10mm!), grilles justement mal adaptées pour cette région où prolifèrent des algues de tout genre, la négligence des actions protectrices, ou encore le manque de suivi de l'exploitation des condenseurs.

Et c'est face à cette situation préoccupante que nous essaierons de faire front en proposant des solutions, qui nous le souhaitons seront examinées avec toute l'attention requise.

6.1 : Introduction

Comme pour l'étude, quand il s'agit de proposer des remèdes ou mesures de protection, c'est du côté des facteurs déterminants qu'il faut aller chercher.

Ainsi, en regard de cela, on peut dire que la protection contre la corrosion peut s'effectuer de plusieurs façons ; soit en agissant sur le milieu en le rendant non agressif (pas au sens de l'alcalimétrie) à l'encontre des matériaux, soit en agissant sur le métal et en le rendant passif pour le milieu considéré, soit en préconisant une action protectrice par revêtement inerte ou soit enfin, en provoquant des conditions biochimiques telles que le processus de la corrosion soit anéanti.

En général, les solutions proposées par les ingénieurs d'Anticorrosion sont les suivantes :

- Action sur le matériau : choix d'un métal adéquat, divers traitements thermiques ou mécaniques
- Action sur le milieu : variation du pH, de la température, de la vitesse ; emploi d'inhibiteurs de corrosion, etc...
- Action protectrice au moyen de revêtements : Revêtements métalliques, peintures ou plastique
- Action sur le processus : Protections cathodiques ou anodiques

Les solutions que nous proposerons, pour notre part, seront sur cette lignée. Mais on fera aussi la distinction entre les remèdes que nous qualifions de majeurs et qui impliquent des modifications assez considérables soit sur le milieu, soit sur le matériau, et des modifications mineurs ne nécessitant pas de grands

bouleversements dans les installations.

6.2 Remèdes majeurs

Comme nous venons de le dire, ce sont des méthodes qui vont engendrer des modifications importantes ou des changements radicaux et par conséquent des coûts assez exorbitants, mais aussi des méthodes donnant une grande fiabilité et des garanties réelles. Ce sont des méthodes que l'on peut qualifier de préventives dans la mesure où elles empêchent les phénomènes de s'amorcer.

Il s'agit, dans le cas qui nous interpelle de changer complètement la nature du métal ou le milieu refroidissant

6.2.1 Changement du métal - Retubage au titanium.

C'est une mesure radicale qui consiste à changer tous les tubes des condenseurs et en les remplaçant avec des tubes en titane.

Le titane est le métal qui est le plus utilisé à l'heure actuelle pour les tubes des condenseurs des centrales électriques en bordure de mer (comme les Centrales du Cap des Biches). Il a la particularité de se recouvrir à l'immersion ou dans les milieux aqueux aérés, d'une couche ou pellicule d'oxyde stable et de formation rapide. Et c'est pour cette raison que'il présente une exceptionnelle résistance à la corrosion par piqûres, notamment en milieu marin. Pour donner un exemple; il ne se produit qu'une très faible perte de poids uniforme du reste, au cours de périodes d'exposition de l'ordre de plusieurs années ($< 0,0025 \text{ mm/an}$)

La grande stabilité de cette pellicule lui permet de résister fortement aux milieux oxydants, aux alcalis etc... Il n'est attaqué que par

par conséquent ayant une température assez élevée. En conséquence, il est bien évident que si cette solution offre beaucoup d'avantages, elle a aussi l'inconvénient d'induire un investissement assez coûteux en raison de l'achat de cet aéro-réfrigérateur.

6.3 Remèdes mineurs

Ils sont nombreux et ne génèrent pas des coûts exorbitants. On parlera d'abord des remèdes avec action sur les micro-organismes, ensuite de méthodes plus ou moins générales telles le nettoyage, la protection cathodique.

6.3.1 Action sur les micro-organismes

Il n'est pratiquement pas possible de dresser un inventaire complet de tous les micro-organismes susceptibles d'être trouvés dans les eaux industrielles, car leur diversité est très grande. Et c'est en cela que réside la complexité du problème et la difficulté de lutter contre ces espèces, parce que même si ces micro-organismes sont des êtres réputés fragiles, ils savent opposer cette extrême diversité et surtout une grande capacité de reconstitution (Par exemple tuer 999 micro-organismes dans un milieu propice, c'est gagner quelques jours uniquement).

Et c'est aussi pourquoi les techniques à utiliser doivent être aussi variées que les processus de détérioration. Il résulte de cela que les moyens de lutte, pour être efficaces, doivent être d'abord des mesures de prévention, d'hygiène et de prophylaxie; mesures tendant à supprimer ou à limiter au maximum tous les facteurs ou éléments permettant ou favorisant le développement

les acides forts, les substances produites par les bactéries ne l'altèrent pas, ce qui constitue pour le cas présent un argument de poids qui plaide en faveur de leur utilisation.

Outre ces avantages que nous venons de citer, l'emploi du titane permet de réduire considérablement le volume et le poids des condenseurs.

Pendant, il présente l'inconvénient de mal tenir face à la corrosion par érosion (grandes vitesses de circulation avec ou sans particules solides), comme face à la corrosion par fissuration intergranulaire.

N.B. Un calcul de paramètres physiques du condenseur retubé au titane, à partir des données de base, sera donné en annexe.

6.2.2 Changement du milieu - Utilisation d'un circuit fermé.

Comme changement majeur du milieu, nous entendons, ici, l'utilisation d'une eau présentant une meilleure qualité, différente en tout cas de l'eau venant de la mer. Cette exigence est satisfaite avec l'utilisation d'un circuit fermé pour le refroidissement avec installation d'un aéro-réfrigérateur.

Cette solution de recirculation offre l'avantage d'un contrôle permanent sur l'eau de refroidissement et la possibilité d'agir sur cette eau en vue de rectifier certains de ses paramètres déterminants. Elle permet ainsi de résoudre la majorité des problèmes rencontrés. Autres avantages offerts par cette solution : possibilité de filtration par bypass, flocculation, addition d'inhibiteurs de corrosion, etc...

L'aéro-réfrigérateur servira à refroidir l'eau sortant du condenseur et ayant ainsi déjà servi à condenser de la vapeur, et

des micro organismes.

En dehors de la solution du "circuit fermé" proposé un peu plus haut et qui offrirait la possibilité de lutter directement contre ces espèces avec l'emploi de biocides et de désinfectants, nous proposons ici un moyen de lutte efficace à notre avis et qui mérite d'être tenté.

632 C'est la solution de l'intervention multiple et à plusieurs niveaux

Il s'agit de la combinaison de plusieurs actions visant à assurer la présence minimum de micro organismes dans l'eau et l'impossibilité pour eux de se développer.

• Au niveau de la conception d'abord. On doit songer à installer tout à fait à l'amont des installations (en se référant au sens de l'eau dans l'usine) aussitôt après les grilles de vrais préfiltres (qui ne laissent pas passer de petits poissons comme c'est le cas actuellement avec les grilles) pouvant garantir une préfiltration acceptable.

En aval de ces préfiltres, devront être installés des micro-tamis qui ne sont pas de véritables filtres au sens habituel du terme mais dont les mailles sont plus fines que celles des tamis utilisés couramment et ont des dimensions de l'ordre de quelques centièmes de mm. Les préfiltres ont pour rôle principal de retenir une bonne partie des micro organismes et des matières en suspension grossière dans l'eau brute, ce qui, entre autres avantages permet de diminuer les possibilités d'aération différentielle.

L'autre avantage qu'il convient de noter est que ce système de micro tamisage est moins onéreux que les méthodes qui consistent à nettoyer fréquemment les grilles et filtres.

- Après donc ce stade de la conception et malgré tous les moyens utilisés (moyens que nous pouvons qualifier de physiques), il est presque sûr qu'il existe encore des micro organismes qui ont réussi à passer, notamment les bactéries et algues ayant des formes filamenteuses (grande longueur et petit diamètre). Et à ce niveau là il est préférable d'utiliser des méthodes dites "chimiques" et qui consistent à des injections de produits visant à éliminer les micro organismes, ou au moins à créer des conditions telles qu'ils ne peuvent être nuisibles.

Parmi toutes les solutions possibles, nous avons retenu une, qui est un moyen classique d'inhibition des larves de mollusques et des cellules d'algues: il s'agit de la chloration, considérée comme un procédé de stérilisation et qui consiste à une injection de doses de chlore.

La quantité de chlore à injecter en amont du condenseur est déterminée par la quantité qui n'a pas été utilisée pour la destruction de micro organismes et qu'on appelle "chlore résiduel". Il importe seulement que ce chlore libre résiduel ne dépasse pas une certaine concentration au dessus de laquelle le procédé de chloration serait dangereux parce qu'ayant favorisé un excès de chlore libre, nocif pour les tubes (en effet, certains chercheurs considéraient le chlore en excès comme un agent de la corrosion). En outre, il a été démontré que ce chlore résiduel s'il n'est pas en excès, ne constitue pas un danger pour les poissons, les algues et animaux qui gisent au voisinage de la sortie de la galerie de rejet des eaux de circulation.

Dès lors la question qu'il est légitime de se poser est celle-ci: quel-

le est la concentration en chlore libre admissible dans le condenseur et les eaux rejetées? Des chercheurs français ont trouvé une réponse à cette interrogation après des études sérieuses et ils affirment qu'on peut tolérer 2 mg de chlore libre par litre et que par conséquent, il importera d'injecter en amont une quantité de chlore telle que le rejet ne contienne plus que cette concentration désirée de 2 mg/l; la différence entre ce qui a été injecté et ce qui est recueilli représentant la quantité de chlore utilisée pour tuer toutes les cellules présentes.

Voilà en gros une description assez sommaire du principe de chloration qui a été expérimenté dans plusieurs centrales et dont les résultats ont toujours été à la hauteur des espérances. C'est cette étape qui constitue la fin de l'intervention multiple.

Toujours au chapitre des remèdes mineurs, nous proposons toujours une méthode de prévention consistant au nettoyage périodique et automatique de l'intérieur des tubes.

6.3.3 Nettoyage automatique par balles de caoutchouc

Un nombre important de méthodes de nettoyage est utilisé pour diminuer l'encrassement ou la présence de dépôts à l'intérieur des tubes de condenseur, pour parer à d'éventuels problèmes de corrosion qui ne manqueraient pas de voir le jour (par aération différentielle surtout) et par la même occasion accroître l'efficacité du condenseur. Elles vont du lavage à l'acide aux méthodes manuelles en passant par toutes les autres formes de nettoyage connues.

Parmi toutes ces méthodes, c'est le nettoyage automatique qui offre le plus grand nombre d'avantages. En effet, les méthodes chimiques

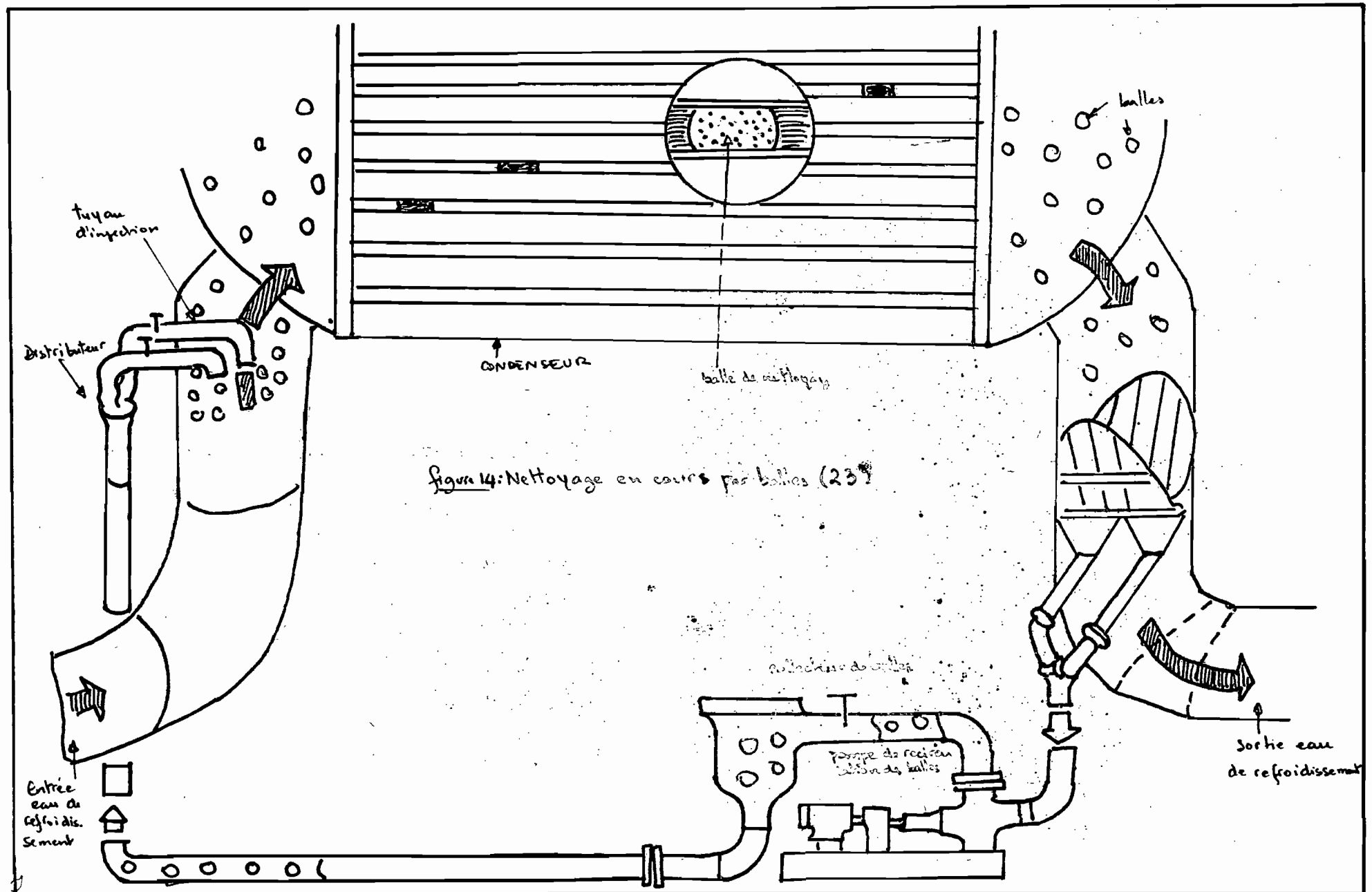


Figure 14: Nettoyage en cours par boules (23)

(lavages à l'acide ou au chlorino), même si elles réduisent l'encrassement et rendent les tubes propres, elles peuvent causer parallèlement de graves dommages (principalement de la corrosion) et ne sont pas avantageuses du point de vue coût.

Quant aux nettoyages manuels périodiques avec brosses à nylon, pastilles de caoutchouc, grattoirs métalliques etc..., ils sont simples et efficaces mais peuvent être difficilement utilisables, en regard à la taille importante des condenseurs - à la Centrale Cap des Biches.

C'est donc pour toutes ces raisons que nous proposons cette méthode. Elle consiste en un nettoyage automatique de l'intérieur des tubes par ballons de caoutchouc mou ou "sponge rubber balls" en anglais. Elle est surtout économique dans les régions où les agents polluants et corrosifs sont présents. Ces "petits ballons" dont la distribution est hasardeuse et autonome passent à travers un tube avec un rythme moyen de un toutes les cinq minutes. Ils sont ensuite récupérés à la sortie du condenseur par un dispositif prévu à cet effet et éjectés par la suite (Voir figure 4).

Ils sont légèrement plus gros que le diamètre des tubes et ainsi gardent la surface intérieure propre et exempte d'encrassement et de dépôts.

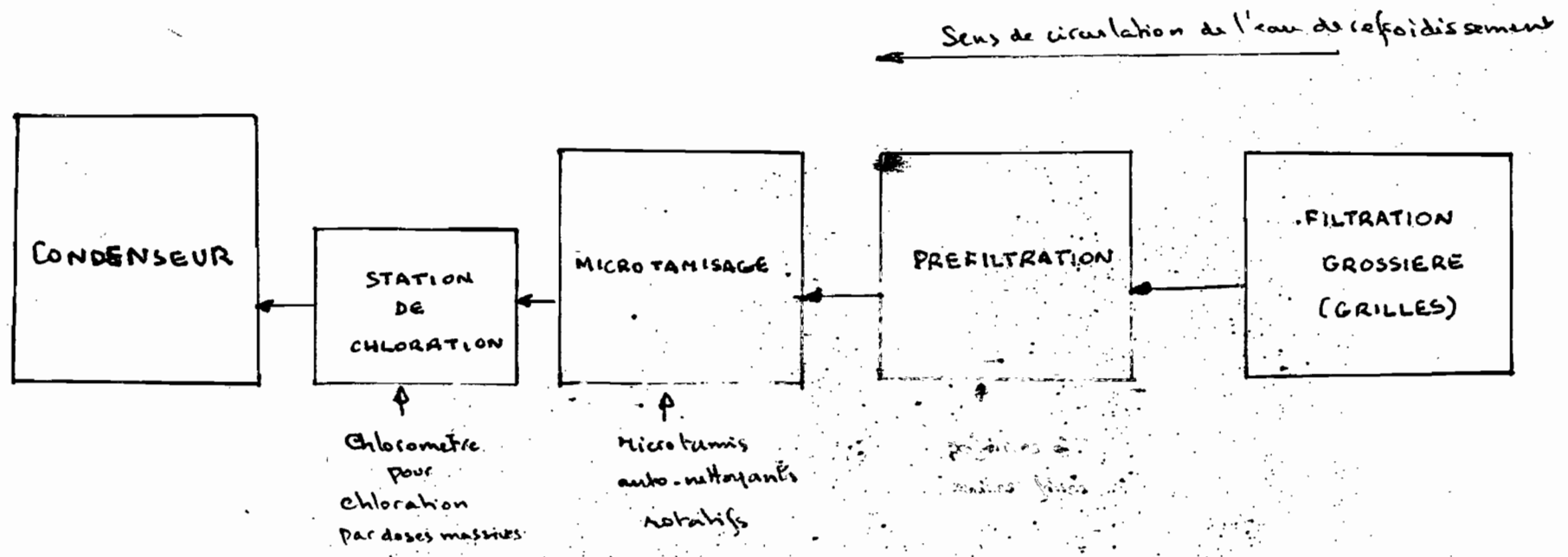
Il est aussi à noter que ce nettoyage peut être associé à d'autres méthodes de lutte anti-corrosion pour plus de garantie et de fiabilité.

Enfin, et toujours dans la série des remèdes mineurs que nous proposons, nous allons parler d'une technique de protection des tubes de condenseur par inhibition appelée procédé Ferpro

6.3.4 Procédé Ferpro

Ce procédé concerne la protection des tubes de condenseurs et

Figure Présentant la solution multiple.



NB : La chloration pour être efficace doit nécessairement être précédé de micro tamisage.

d'échangeurs de chaleur exposés à la corrosion. Il a été expérimenté à plusieurs reprises dans des centrales présentant des caractéristiques semblables à ceux du Cap des Biches, notamment les centrales électriques de l'Afrique du Nord (Bône et Oran) et les résultats ont constitué une véritable première dans la lutte anti-corrosion. Dans presque la majorité des cas, la corrosion ne s'est plus manifestée avec l'utilisation de ce procédé.

Principe du procédé. "Ferpro" forme à la surface du métal une couche protectrice provenant non pas du métal lui-même, mais d'une réduction d'oxydes métalliques incorporés à l'électrolyte. Et partant du fait que le cuivre et ses alliages sont très susceptibles à la corrosion avant qu'une couche double ou une couche limite ne soit formée à la surface du métal, le procédé comporte deux étapes :

1°) Formation, dès la mise en service, ou mieux, avant la mise en service des tubes, d'une couche inhibitrice à l'intérieur des tubes. Cette couche (MnO_2) n'a qu'une existence limitée et par conséquent, de disposer du temps nécessaire pour mettre en service l'inhibition définitive.

2°) L'inhibition définitive est obtenue, en service, autant par adsorption que par sédimentation, une couche d'oxyde fer sur le métal des tubes. Cette couche, probablement Fe_2O_3 arrête la vie des bactéries et sert en quelque sorte d'anode sacrificielle, de même surface que celle du tube. Un dispositif spécial permet de renouveler l'oxyde de fer, au fur et à mesure de son usage.

- Inhibition préalable par MnO_2 - C'est la première phase du procédé et elle consiste à former sur la surface des tubes en alliage de cuivre un film très mince de MnO_2 en faisant circuler à l'intérieur de ces tubes une solution

de MnO_4 durant plusieurs dizaines d'heures. Le mécanisme réactionnel est le suivant: $2 MnO_4K \rightarrow MnO_2 + MnO_4K_2 + O_2$.

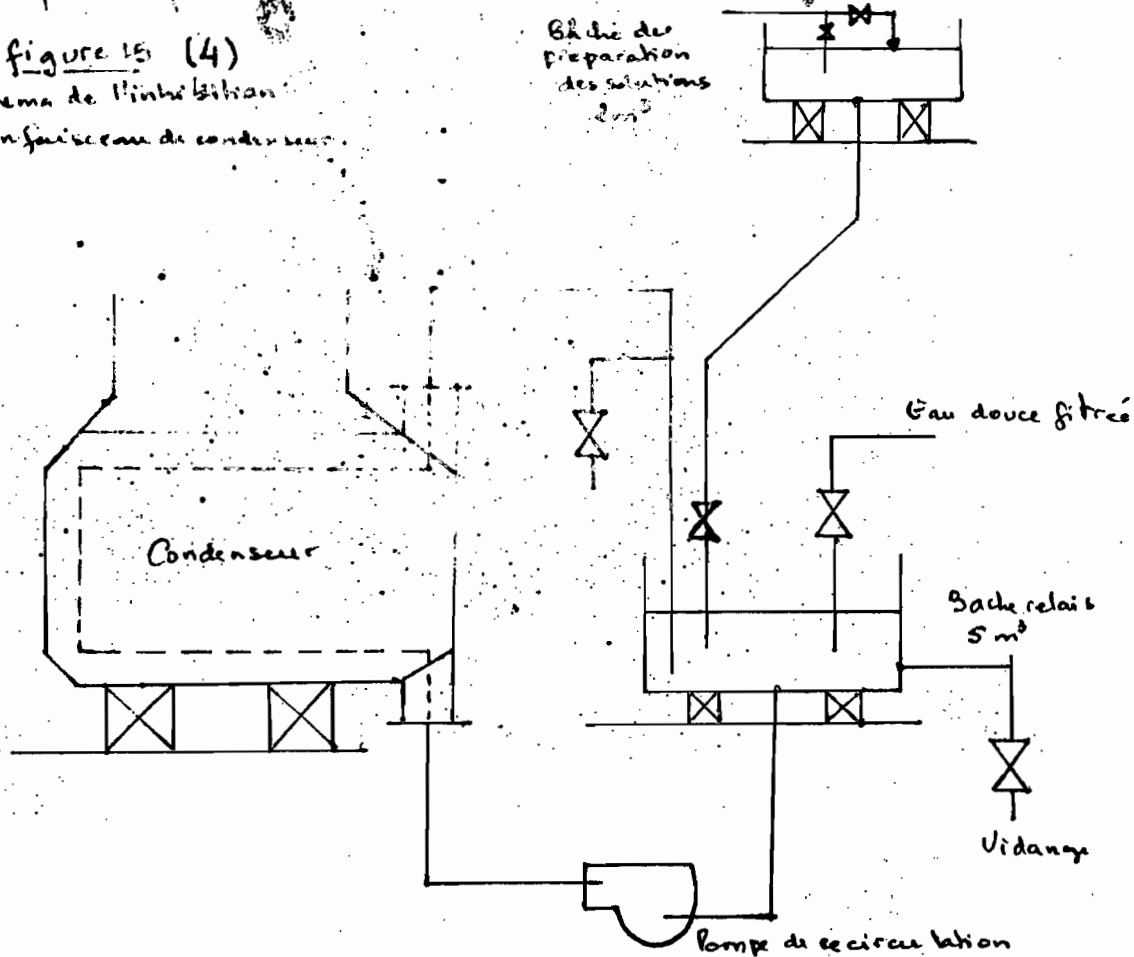
Dès que disparaît la couche de MnO_2 , le cuivre atteint un état de passivité (seuil de passivité)

La réalisation pratique de cette première phase fait succéder les opérations suivantes:

- 1) Dégraissage des tubes
- 2) Brossage des tubes
- 3) Décapage éventuel des tubes
- 4) Neutralisation, si le décapage a lieu
- 5) Inhibition avec la solution de MnO_4K

La figure suivante montre le dispositif adopté pour les opérations d'inhibition tel qu'il est prévu pour traiter un condenseur

figure 15 (4)
Schéma de l'inhibition
d'un faisceau de condenseur.



Inhibition continue. L'inhibition préalable se pratique en général sur des tubes vierges, au début de la mise en service et elle est exceptionnelle sur des tubes ayant déjà assuré un service. L'inhibition continue est utilisable dans tous les cas et représente donc la partie qui est de portée générale, du procédé et elle peut entrer en jeu à un moment quelconque de la vie d'un condenseur, on l'utilise, selon la conjoncture, à titre préventif ou à titre curatif.

Elle consiste en une inhibition ferrugineuse sur un alliage de cuivre, obtenue grâce à la formation (de manière durable) sur le métal, avec renouvellement continu du film protecteur, d'une couche protectrice de Fe_2O_3 (hématite brune) ou de $Fe(OH)_2$ selon la conjoncture Redox de l'eau. Cette couche protectrice joue donc le rôle d'écran sacrificiel présentant la même surface que le tube. L'écran s'use et se renouvelle au fur et à mesure de sa disparition.

En résumé, le procédé FERPRO, substitue aux dépôts habituels imperméables à l'oxygène et généralement de corrosion par concentration différentiel, le des dépôts de cuivre, une couche perméable à l'oxygène et permettant la dépoliarisation continue des surfaces métalliques oxydés ou hydroxydés de fer qui joue aux dépens de l'oxyde ou des hydroxydes de fer. Le cuivre ou l'alliage de cuivre demeure protégé "électrochimiquement" pourrait-on dire.

De plus, on remarque que les tubes traités par FERPRO ne s'encrassent pas ou du moins s'encrassent moins qu'en l'absence du procédé.

D'autre part, il est important de noter que le fer est libéré en amont du condenseur par une cellule électrolytique sans diaphragme, ce qui a pour conséquence première la destruction de certaines bactéries par les hypochlorites, diminuant ainsi les risques de corrosion bactériologique. Les figures suivantes nous donnent une idée de la pratique du procédé.

Figure 16 (5)

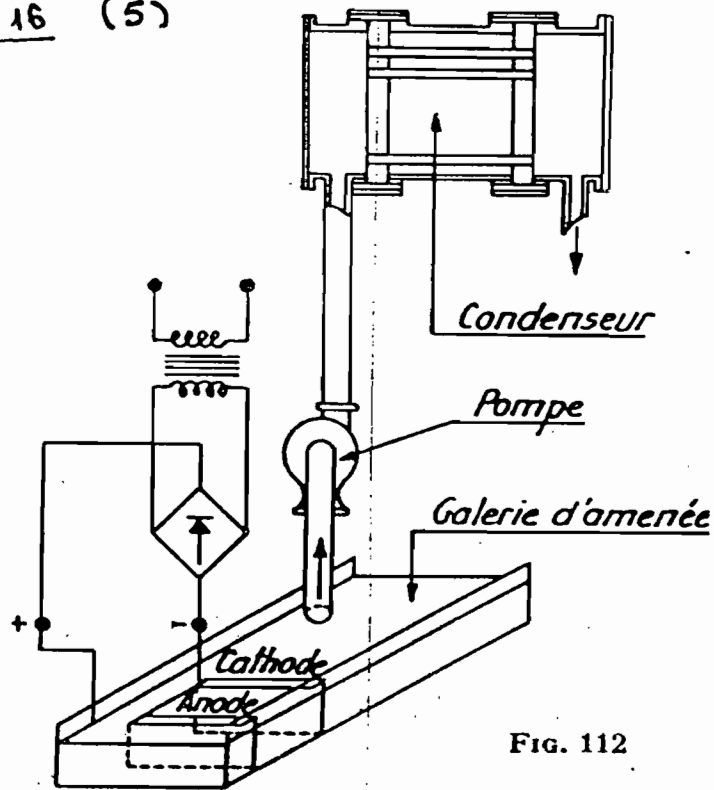
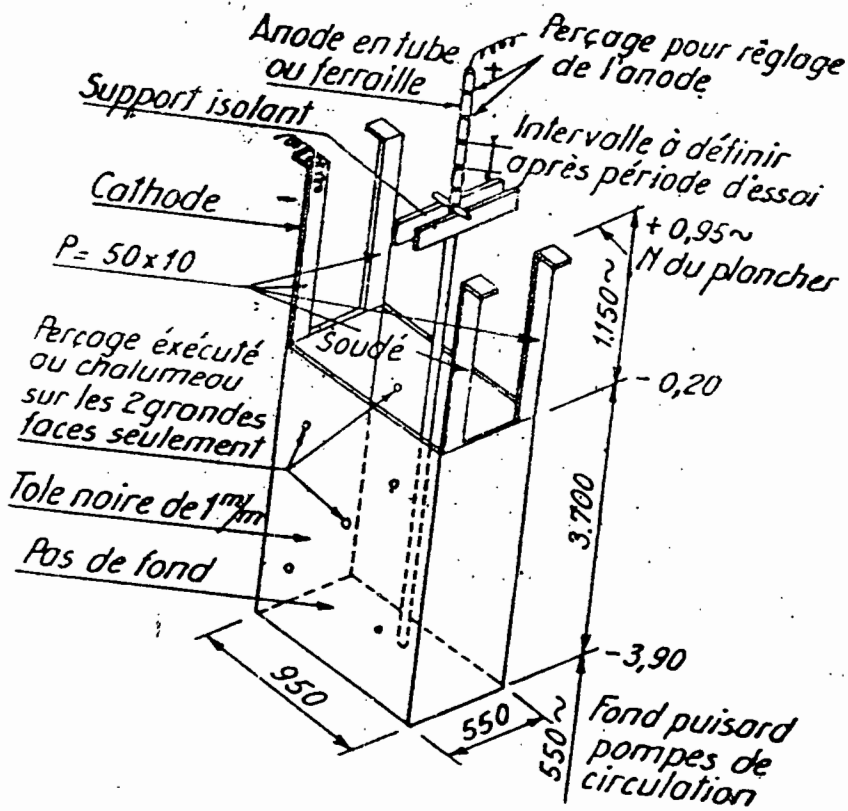


FIG. 112



lisez à

À côté de toutes ces méthodes que nous avons proposées, il en existe d'autres plus ou moins réalisables mais que, pour des contraintes de temps, nous avons jugées facultatives. On pourrait citer entre autres les méthodes de stérilisation par Ultra violet ou bioxydes de soufre, en lieu et place de la chloration, l'utilisation des dispositifs anti-mollusques ou l'ozonation qui sont autant de moyens de lutte pouvant être très efficaces, mais qui ont aussi leurs insuffisances sans nul doute.

Ceci met fin à ce chapitre d'Etudes à proprement parler" que nous avons voulu succinct, complet et concis. Et c'est pour cette raison qu'on a tenu compte de l'essentiel, mais vraiment de l'essentiel pour le mener à bon port; car comme disait M. Neveu; "Un cas de corrosion est toujours un cas complexe et les facteurs de corrosion généralement nombreux, qu'il est impossible de les identifier tous, il faut simplement de voir surtout les plus déterminants"

CHAPITRE 7:

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Discussions - Recommandations

Avant de mettre un terme à cette étude si combien intéressante et instructive, il nous semble très positif de parler d'un certain nombre de problèmes, de difficultés qui ont jalonné du début à la fin, cette étude. Il nous semble aussi très constructif d'émettre des suggestions, des propositions sans lesquelles cette étude ne saurait être complète.

D'abord, nous insisterons sur le problème principal qui a presque toujours surgi tout au long de ce projet, je veux parler du manque de données ayant trait à la corrosion des Condenseurs de la Centrale Cap des Biches. Cela a été notamment caractérisé par le manque d'informations de valeur sur les périodes les plus propices aux attaques par exemple, sur les divers traitements thermiques effectués sur les métaux utilisés pour les tubes de condenseur ou encore sur la position préférentielle des perforations au niveau de ces tubes, etc... Autant de données pertinentes et quasi-indispensables pour une étude vraiment complète et vraiment irréprochable d'un cas pratique de corrosion.

Cela dit, nous évoquerons aussi, non sans regrets, le manque de matériel digne de ce nom qui ne nous a pas facilité la tâche, bien au contraire. À bien des égards, on pourra parler du manque d'installation adéquate de polissage pouvant permettre un examen rigoureux de la microstructure des métaux, du manque d'équipements de mesure de la corrosion tels un spectromètre ou une loupe à échelle incorporée, qui ont constitué

des facteurs limitatifs pour nos investigations dans certains domaines.

Toujours dans le même ordre d'idée, nous parlerons en le déplorant de l'étroitesse du temps alloué pour une telle étude vaste et pratique, qui nécessite une grande disponibilité et une grande liberté d'action.

Et ce sont ces contraintes de temps, ces limitations de tout genre, tous ces aléas inhérents à ce genre de travail, qui ont fait que nous n'ayons pas pu poursuivre l'étude sur d'autres aspects bien importants. Et c'est aussi pourquoi nous tenons à faire un certain nombre de recommandations, qui en fait, pourraient constituer ce qu'on pourrait appeler la continuation de ce projet de fin d'études.

Il s'agit pour nous, d'insister tout d'abord sur un fait qui semble indispensable : c'est la ^{utilité} probable pour la SENELEC de faire une étude comparative des solutions que nous avons proposées et ceci au moment de faire un choix parmi celles-ci. Cette étude comparative devra se faire sur la base de la qualité de la fiabilité, la sécurité, la praticabilité et du prix. En outre la solution retenue devra être suivie minutieusement avec des statistiques, des mesures et surtout par un entretien régulier, parce que en matière de corrosion - et c'est connu - la prévention est toujours très aléatoire et les méthodes réputées irréprochables peuvent se révéler avec le temps, inadaptées ou inefficaces.

Par ailleurs, nous croyons assez sérieusement que les in-

genieurs comme les techniciens de la Centrale devraient s'intéresser de plus près à la corrosion en tant que science et qui devient une préoccupation de premier ordre, surtout dans le milieu des centrales électriques.

En dernier lieu, nous suggérerons à la SENELEC l'ouverture d'un laboratoire de recherche à l'instar des grandes compagnies nationales des Pays développés.

7.2 Conclusion

Nonobstant toutes les difficultés rencontrées tout au long de cette et dont nous avons fait mention au chapitre précédent, nous pouvons dire que les buts que nous nous étions fixés ont été atteints et de manière satisfaisante.

Le calcul de vérification tout comme le bilan énergétique ont montré d'une part que le dimensionnement des condensateurs a été bien fait - comparaison étant faite avec le résultat du calcul effectué - , et que d'autre part les pertes induites dans le fonctionnement de ces installations sont normales.

Par ailleurs et s'agissant du but principal de ce projet, nous croyons très sincèrement avoir fait la lumière sur les circonstances, les aspects, les causes et les facteurs de corrosion et en conséquence nous avons proposé un certain nombre de solutions à ce problème.

Tout ceci pour dire que nous espérons que ce rapport s'avèrera utile pour le personnel d'exploitation de la Centrale du Cap des Biches en ce sens qu'il constitue un aide à la SENELEC dans la lutte entreprise contre la corrosion de ses installations.

Pour terminer, nous disons que nous ne saurions oublier le fait important qui est celui-ci : ce projet nous a permis de beaucoup apprendre sur le domaine de la corrosion qui est un domaine trop peu étudié dans nos pays en voie de déve-

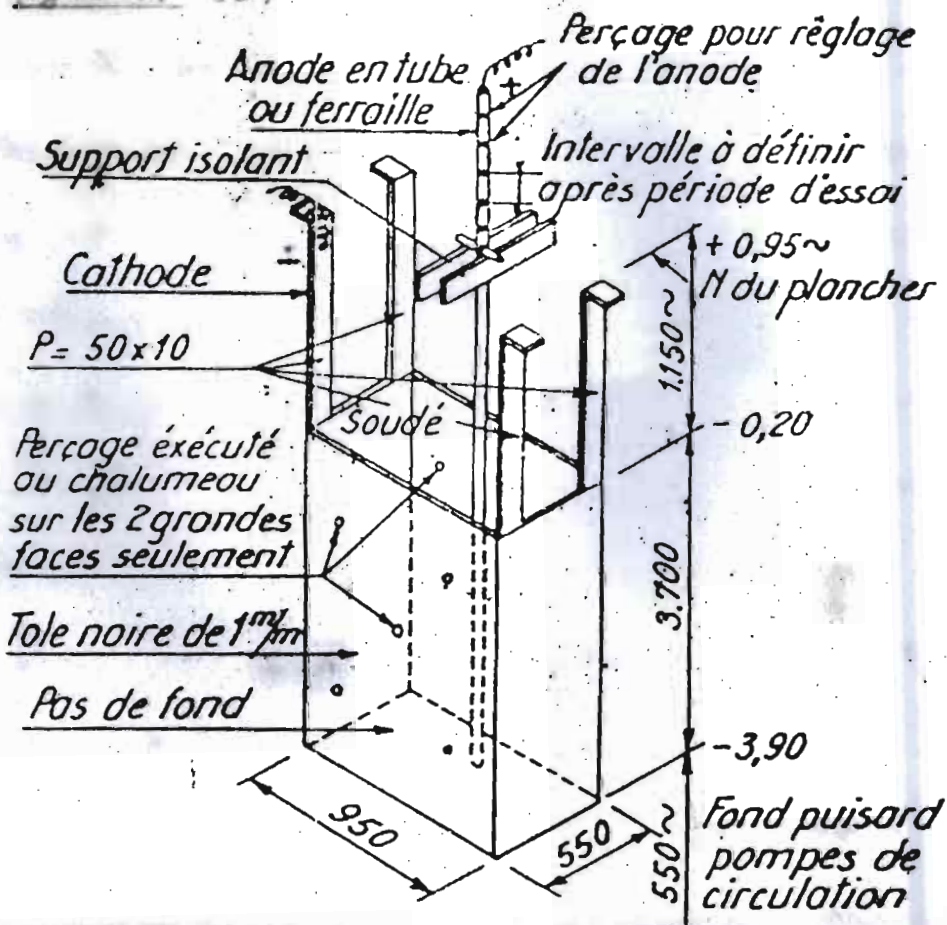
loppement, mais qui est un domaine important à plus d'un titre.

Nous disons aussi un grand merci à la SENELEC de nous avoir fait confiance p en nous confiant cette étude. Nous leur en savons gré.

C'est notre mot de la fin et notre fin mot.

ANNEXES

Figure 67 (5)

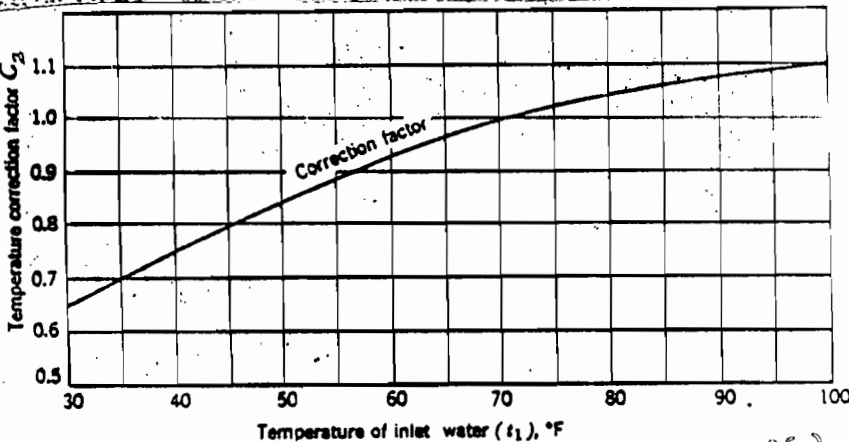
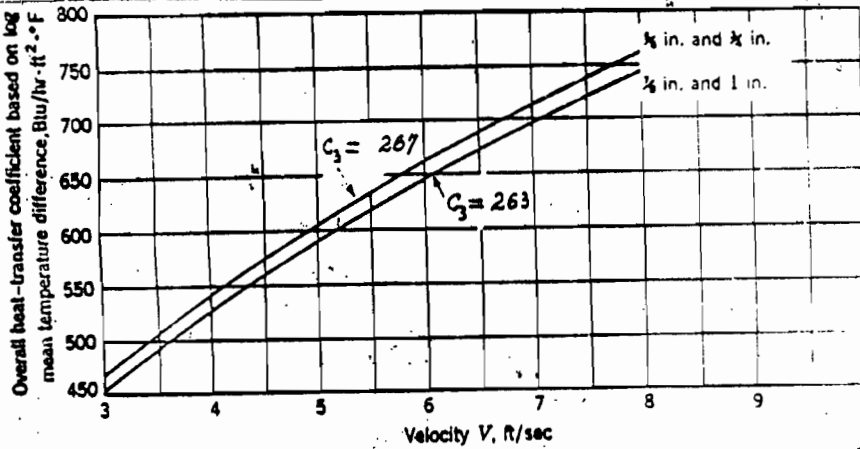


Coefficient C_1

TABLE 7.1 (25)

Tube Materials	Tube Wall Gauge - BWG			
	24	22	20	18
Admiralty Metal	1.06	1.04	1.02	1.00
Aluminum Brass	1.03	1.02	1.00	0.97
Cold Rolled Low Carbon Steel	1.00	0.98	0.95	0.91
Stainless Steels Type 304/316	0.83	0.79	0.75	0.69
Titanium	0.85	0.81	0.77	0.71

Tableau des coefficients C_1 , C_2 et C_3 utilisés dans le dimensionnement et la vérification



BIBLIOGRAPHIE :

● OUVRAGES CITES

- 1: BOSICH, Joseph F. Prévention de la corrosion, Paris, Entreprise maternelle d'édition, 1972
- 2: AKIMOV, G.V. Théorie et méthodes d'essai de la corrosion des métaux, Editions de l'Académie des Sciences de Moscou Leningrad, 1957
- 3: WHLIG, H. Corrosion et Protection, Paris, Dunod, 1970
- 4: MAURIN, A.J. Manuel d'Anticorrosion, Paris, Eyrolles 1964
- 5: MAURIN, A.J. Manuel d'Anticorrosion, Paris, Eyrolles, 1962
- 6: FONTANA & GRENFEL. Corrosion Engineering, Mac Graw Hill, 1967
- 7: Association des Chimistes de la Corrosion. Dégradation microbienne des métaux, Paris, Edition technip, 1974
- 8: WILKINSON, J. Corrosion in Metallurgy, Edition ASM, 1968.
- 9: KEAN, David G. Process Heat Transfer, New York, Mc Graw. 1960, 1960

● OUVRAGES CONSULTÉS

- 10: DEGREMONT, Gilbert. Mémento technique de l'eau, Paris 1972

12 : BENSIMON, Raymond. Protection contre la corrosion Tom 2,
Collection Presses universitaires de France,
1976

13: Heat transfer Engineering Volume 5 N° 3.4, 1984

14: FALL, N'Diouga, Projet de Fin d'Etudes, Thies 1985

15: SPENCER, Joseph R. surface condensers

16: PALISSY: Editions de l'ecole Polytechnique de Montréal

● OUVRAGES CONSEILLES

17: MAURIN, A.J. Manuels d'anticorrosion

18: AKIMOV, G.V. Théorie et méthodes d'essai de la corrosion des
métaux

● DOCUMENTS UTILISES

1: CERNEA, A.K. Exposé sur l'ENERGIE, Juillet 85, EPT

2: Rapport de la Commission des Enquêtes sur la corrosion
des tubes échangeurs de la Centrale Csp des Etches

3: Revue POWER, Juin 1984

4: Heat transfer Engineering, Volume 5

5: KERN, William. Continuous tube Cleaning, 1975

6: Travaux Pratiques Traitement des Eaux

7: Notes de Cours. Surface condenser sizing.

8: Puckorius, Paul. Publication, Controlling Corrosive micro-
organisms in cooling-water systems.