

Chapitre III : Traitement des eaux de process

III.1. Introduction

L'emploi de l'eau comme fluide thermique entraînent des problèmes d'entartrage, de corrosion et de primage

Le traitement et le conditionnement de l'eau doivent répondre aux trois objectifs prioritaires suivants :

1. Le maintien de l'échange thermique par prévention de l'entartrage et de la formation de dépôts sur les parois ;
2. La protection contre la corrosion ;
3. La qualité de la vapeur produite.(dans le cas des chaudières)

III.2.Principaux problèmes liés à l'emploi d'eau brute

Une classification très succincte des éléments rencontrés dans l'eau permet d'obtenir le tableau suivant

Tableau. III.1. Classification des éléments rencontrés dans l'eau.

<u>Etat ou forme des éléments dans l'eau</u>	<u>Nature des éléments</u>										
Matières en suspension	Sable, Argile, boues, Matières organiques, colloïdales										
Matières en solution, dont : Matières organiques	Tourbes, déchets végétaux, acides organiques										
Sels minéraux	<table style="width: 100%; border: none;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><u>Cations</u></th> <th style="text-align: left;"><u>Anions</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Calcium</td> <td>Bicarbonates</td> </tr> <tr> <td>Magnésium</td> <td>Carbonates</td> </tr> <tr> <td>Sodium, etc</td> <td>Chlorures</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Sulfates, etc</td> </tr> </tbody> </table>	<u>Cations</u>	<u>Anions</u>	Calcium	Bicarbonates	Magnésium	Carbonates	Sodium, etc	Chlorures		Sulfates, etc
<u>Cations</u>	<u>Anions</u>										
Calcium	Bicarbonates										
Magnésium	Carbonates										
Sodium, etc	Chlorures										
	Sulfates, etc										
Gaz	Oxygène, gaz carbonique, azote										
Organismes vivants	Algues, bactéries, champignons, etc										

III.2.1 L'entartrage

Les incrustations dues au dépôt de précipités cristallins sur les parois de la chaudière, qui provoquent des surchauffes locales et sont à l'origine des « coups de feu ».

Ces incrustations sont dues principalement à la présence dans l'eau de sels de calcium (carbonates ou sulfates) moins solubles à chaud qu'à froid, ou à une trop forte concentration en silice par rapport à l'alcalinité de l'eau dans la chaudière. L'entartrage, ou la précipitation des sels sous forme solide, formant des dépôts, intervient principalement lors de l'élévation de la température et lorsque la concentration en sel augmente. Le pH joue également un rôle important

- Le premier sel qui précipite est l'hydroxyde de magnésium. Il donne des boues non adhérentes.

- Immédiatement après, le carbonate de Calcium précipite. Il se forme par décomposition des bicarbonates selon la réaction :



Les dépôts de carbonate de calcium sont généralement durs et adhérents (marbre).

Enfin les sels de calcium précipitent sous forme très incrustante.

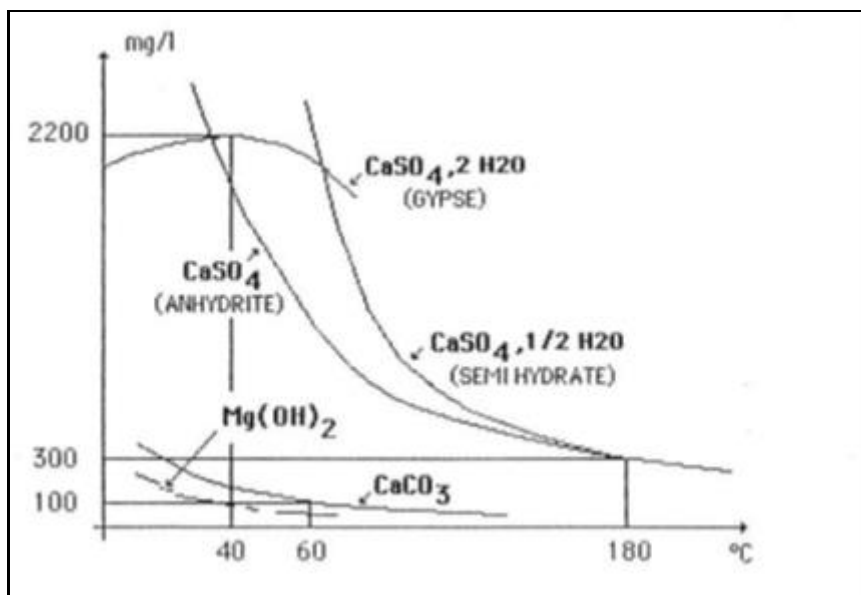


Figure III.1. Seuils de précipitation des sels de Calcium : courbes de solubilité []

III.2.2 Cas particulier de la silice

Le rapport des concentrations de la silice, contenue dans la vapeur et dans l'eau, est bien supérieur aux rapports correspondants en ce qui concerne les autres sels. Cet entrainement préférentiel s'accroît avec l'augmentation de la pression. Lorsque la pression de vapeur diminue (turbines) et atteint 30 bars, la silice se dépose et conduit à l'encrassement des aubages de turbine. Ce phénomène devient inappréciable lorsque la teneur en silice de la vapeur est inférieure à 0.02 ppm, cela correspond à la teneur maximale admissible en chaudière compte tenu de la pression. Notons aussi que l'alcalinité en chaudière joue un rôle important, d'une part sur l'entrainement de la silice et d'autre part sur sa solubilité au sein du générateur (rapport SiO_2/TAC). La silice peut précipiter, pour des teneurs de l'ordre de 300 mg/l, elle forme des dépôts très durs.

III.2.3 Les corrosions

Elles sont d'origine et de nature très variées dues, soit à l'action de l'oxygène dissous, soit à l'acidité du milieu due au gaz carbonique en particulier, soit encore à l'attaque directe du fer par l'eau.

Dans le cas de la corrosion généralisée, les anodes et les cathodes changent en permanence de place au fur et à mesure que la corrosion progresse.

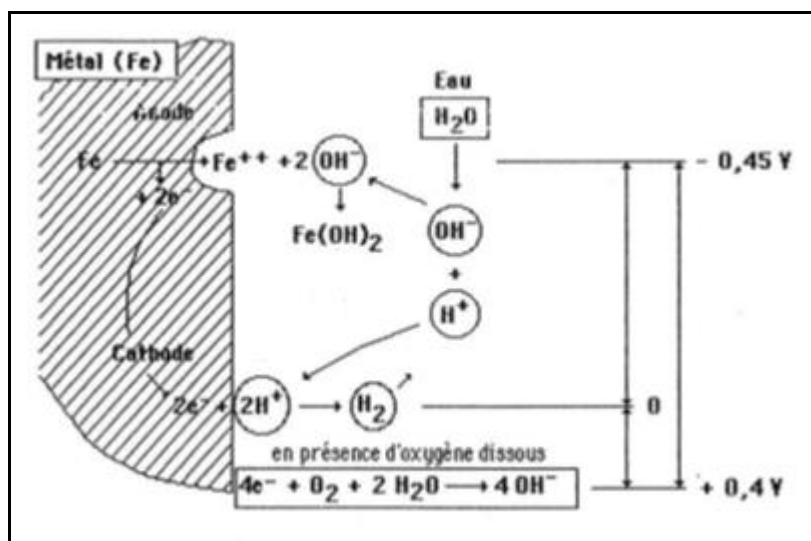


Figure. III.2. Principe de la corrosion électrochimique []

III.2.3 Le primage

Appelé aussi entraînement de vésicules liquides dans la vapeur (mousse et brouillard). Il est en relation avec la viscosité et la tension superficielle de l'eau. Celles-ci sont fonction de l'alcalinité, de la présence de certaines substances organiques et de la salinité totale. L'importance du primage dépend aussi des caractéristiques de la chaudière et de son régime de vaporisation; il est provoqué par les facteurs suivants :

- marche poussée des générateurs
- mauvaise conception du matériel
- demande brusque de vapeur
- alcalinité importante ou salinité exagérée de l'eau de chaudière
- présence de boues, matières organiques, huiles, etc....

Les inconvénients du primage sont :

- Incidents graves lorsque la vapeur est utilisée directement en fabrication
- Baisse de rendement thermique de l'installation
- Obstruction partielle ou complète des surchauffeurs par les sels entraînés
- Dépôt sur les ailettes des turbines et déséquilibre

On constate bien que plus le taux de purge est faible (et donc la salinité élevée en chaudière) plus les difficultés liées aux quatre problématiques ci-dessus discutées deviennent importantes.

III.3 Traitement et conditionnement des eaux de chaudières

Le conditionnement a pour but de donner à l'eau d'alimentation et à l'eau de chaudière les caractéristiques voulus en ajoutant les réactifs nécessaires, compte tenu des consignes d'exploitation déjà déterminées (purges et taux de concentration)

Les principes du conditionnement sont les suivants :

- Placer le pH de l'eau au favorable : emploi d'alcalinisant
- Eviter la précipitation des sels en prévenant une défaillance éventuelle du poste d'eau : emploi de dispersants-complexant
- Dégazer au milieu l'eau de la bêche alimentaire (dégazage thermique) et réduire l'oxygène dissous : emploi de réducteurs
- Neutraliser le CO₂ de l'eau alimentaire et celui produit en chaudière par décomposition des carbonates et bicarbonates : emploi des amines volatiles et filmogènes
- Passiver les surfaces et stabiliser la magnétite
- Eviter le primage

III.3.1 Alcalinisation et pH

Les produits utilisés pour corriger le pH sont souvent les alcalinisants : bases minérales et organiques.

- **Soude caustique: NaOH:**

La soude caustique est une base forte, utilisée pour remonter le pH des eaux d'appoints acides.

Elle doit être manipulée avec beaucoup de précaution, vu son caractère très corrosif pour la peau et

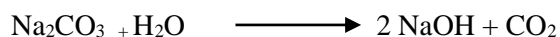
Les muqueuses. Par réaction avec le CO₂ dissous, elle forme des carbonates et bicarbonates.

Cependant ces carbonates et bicarbonates se décomposent en chaudières en produisant du CO₂, pour toutes ces raisons la soude est de moins en moins utilisée et on lui préfère les bases organiques.

La décomposition thermique des carbonates et bicarbonates de Sodium en solution aqueuse, selon la réaction suivante est partielle jusqu'à 100°C et totale au dessus.



De plus l'hydrolyse du Na₂CO₃ avec la température, selon la réaction complète le processus



La réaction est partielle jusqu'à 50 atm (275°C) et totale au-dessus (voir figure)

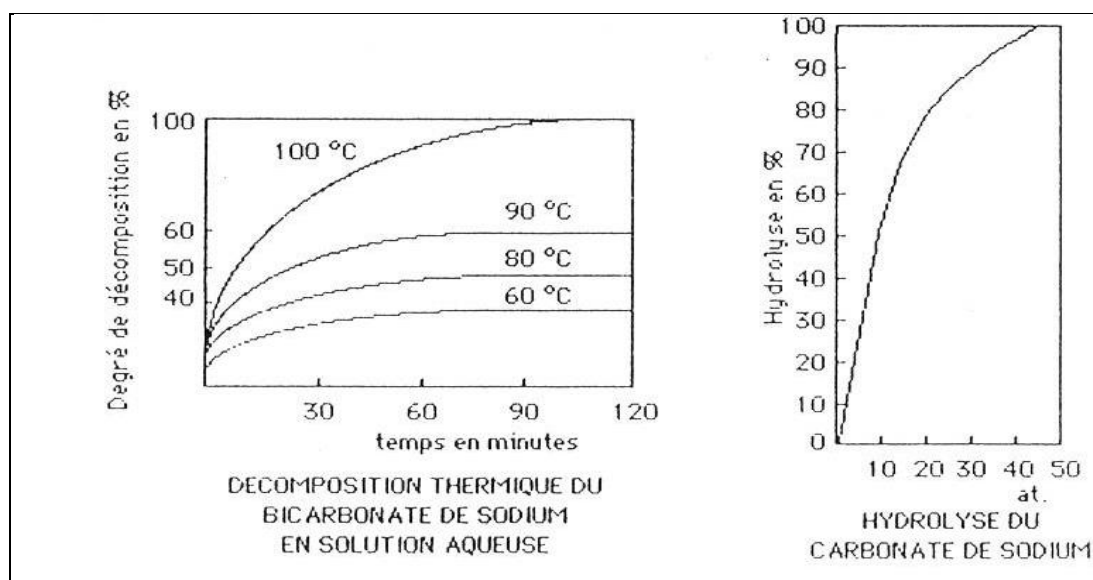


Figure III.3. Décomposition thermique et hydrolyse des sels de sodium

III.3.2 Le dégazage

Selon le schéma ci-dessous, l'eau à traiter est pulvérisée à la partie supérieure du dôme et rencontre la vapeur qui, après avoir barboté dans la bêche, pénètre dans le dôme. Au contact de l'eau la vapeur se condense et cédant sa chaleur latente de vaporisation à l'eau dont la température monte rapidement à 100°C. L'eau pulvérisée est recueillie à la base du dôme sur un plateau perforé qui provoque son écoulement en pluie dans la bêche. Cette eau est ainsi mise une seconde fois avec la vapeur.

A la sortie du dôme, l'eau est à la température de dégazage qui est alors effectué en presque totalité.

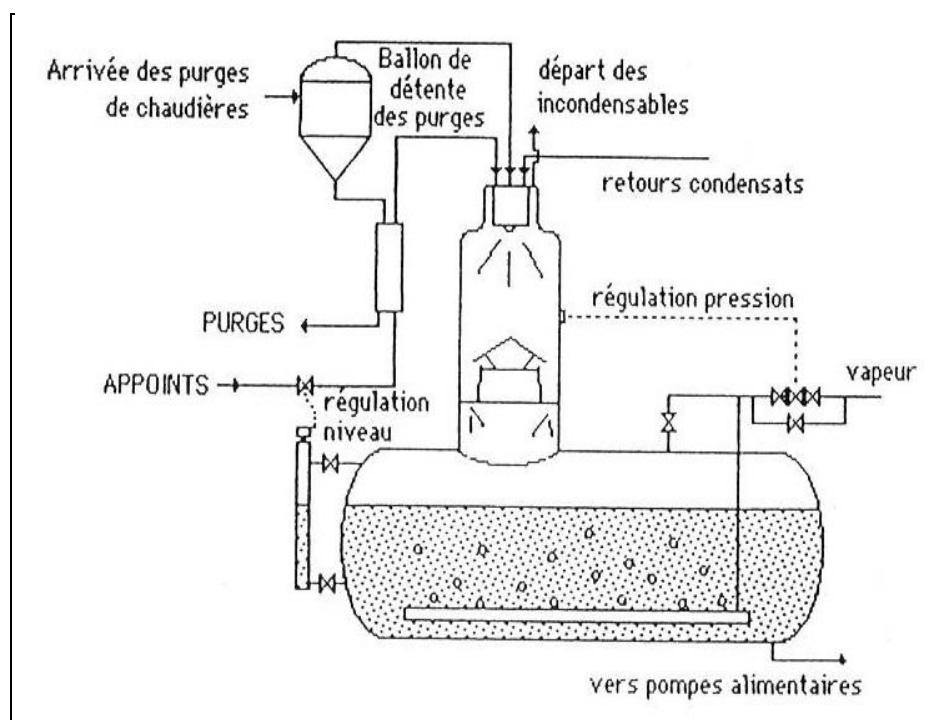


Figure III.4. Dégazage thermique dans une chaudière

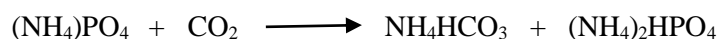
Le système représenté ci-dessus possède un dispositif de détente des purges continues de chaudières, permettant de récupérer de la vapeur et de réchauffer l'eau d'appoint par récupération de l'enthalpie des dites purges.

III.3.3. Emploi des phosphates

- Le phosphate tri sodique : en réalisant une alcalinité sans l'aide des OH⁻ (causticité nulle), on évite les dangers de corrosion caustique
- Les Phosphates d'ammoniums libèrent l'ammoniac qui neutralise le CO₂ formé par décomposition des bicarbonates et des carbonates, en même temps, ils produisent de l'acide phosphorique qui réduit le TAC en chaudière et forme des phosphates sodiques en réagissant avec la soude libre.

Soient les réactions suivantes :

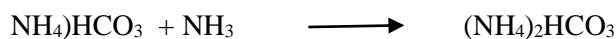
- Sur l'eau alimentaire : 2.6 g de phosphate triammonique neutralisent 1 g de CO₂.



- En Chaudière



- Dans les condensats



Les poly phosphates les plus utilisés sont les poly métaphosphates de structure $\text{Na}_{n+2}\text{P}_n\text{O}_{3n+1}$, jamais utilisé seul, en général utilisé avec le phosphate bi sodique.

Les phosphates forment des complexes solubles avec les alcalino-terreux et les ions ferriques. Ils évitent le dépôt de tartre dans les circuits d'eau alimentaire et dans les économiseurs. Ils ont une réaction acide et peuvent baisser le pH de l'eau alimentaire.

III.3.4. Les dispersants - complexants

De nombreux composés ayant des propriétés antitartres peuvent être utilisés en chaudières comme :

- Les acides et sels d'acides carboxyliques ou polycarboxyliques, EDTA, NTA, Polymères acryliques et méthacryliques.
- Sulfoniques, polymères sulfonés
- Phosphonates (ATMP, HEDP)
- Amine (polyacrylamides, polyamines grasses, amino-phosphonates).

Ces produits peuvent agir d'une ou plusieurs façons :

- Par complexation des ions calcium et magnésium, ce qui repousse leur seuil de précipitation
- Par adsorption sur les germes et modification des cristaux qui deviennent non adhérents : formation de boues

Par blocage de la croissance cristalline, il ya également formation de boues et par effet dispersantes matières en suspension.

III.3.5 Les inhibiteurs de corrosion

- **Les réducteurs:** plusieurs composés réducteurs sont utilisés pour le conditionnement des chaudières on cite :

- Le sulfite de sodium : Na_2SO_3 qui réagit avec l'oxygène pour se transformer en

Sulfate, selon la réaction suivante : $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$

La réduction de l'oxygène par le sulfite augmente la salinité totale de l'eau de chaudière. Il ne pourra pas être utilisé pour le traitement des chaudières à haute pression.

- L'hydrazine : N_2H_4 : la réduction de l'oxygène dissous par l'hydrazine se fait selon la réaction suivante : $\text{N}_2\text{H}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \text{N}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
- Les tannins : sont des composés phénoliques utilisés dans le traitement des eaux sont généralement les tannins hydrolysables du type pyrogalliques, dérivés de l'acide pyrogallique $\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_3$. Les tannins sont extraits des végétaux : chêne, châtaigner. Les propriétés réductrices et colloïdales en font des produits utilisés en traitement des eaux de chaudières.
- Les amines volatiles: se sont des bases organiques utilisés pour neutraliser le gaz carbonique dans les condensats de vapeur et pour alcaliniser l'eau alimentaire et l'eau de chaudière.

III.3.6 . Conditionnement anti primage

Consiste à utiliser des produits qui permettent de diminuer la formation de la mousse à la surface de l'eau du ballon de chaudière. Ils ont donc une incidence directe sur le primage, se sont pratiquement des produits organiques qui sont utilisés.

Les produits anti primage provoquent la coalescence des bulles de vapeur dans le liquide et facilitent la rupture des bulles de vapeur en surface.

Le conditionnement anti primage est actuellement assuré par deux classes de réactifs :

Les polyamides à longue chaîne et haut poids moléculaires et les polyéthylènes et propylène glycols.

III.3.7 Le contrôle des eaux de chaudières

Pour une meilleure compréhension et un bon suivi de l'évolution de l'eau dans une chaudière il est nécessaire d'effectuer les analyses sur :

- L'eau brute avant épuration
- L'eau épurée ou eau d'appoint
- L'eau alimentaire
- Les eaux de chaudières
- La vapeur condensée et les retours de condensats.

- Exemple d'analyse des eaux de chaudières

Le tableau ci-dessous renferme les paramètres à analyser dans les eaux destinés à la production de la vapeur

Tableau .III.2 Analyse des eaux de chaudières

		Eau brute	Eau appoint	Eau bâche	Eau chaudière	Vapeur condensée
pH		7,5	7,6	8,5	11,5	8,0
TH	°f	32	0	0	0	0
TA	°f	0	0	traces	0	traces
TAC	°f	20	20	10	120	1
Cl	°f	3	3	1,5	18	0
SiO ₂	mg/l	7	7	3,5	42	0
Fe	mg/l	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06
PO ₄	mg/l.	-	-	-	50	-
SO ₃	mg/l	-	-	-	30	-
C	µS/cm	450	460	230	5000	< 10

Chapitre III.4 Traitement des eaux de refroidissements

Le traitement des eaux de refroidissements dépend des caractéristiques de l'eau d'appoint disponible et du dimensionnement de l'installation.

Pour déterminer le taux de concentration admissible, il convient de considérer les limites soit acceptables des sels dissous permettant d'éviter, soit les problèmes d'entartrage (teneurs maximales en calcium, en carbonates et sulfates admissibles), soit des problèmes de corrosion. **III.4.1 Aspect thermodynamique et cinétique de l'entartrage**

La précipitation d'un sel met en œuvre plusieurs conditions qui sont :

La sursaturation (condition thermodynamique)

La germination ou nucléation

La croissance cristalline

- **Forme de dépôt**

L'aspect du dépôt et ses facultés d'adhérence sur les surfaces chaudes peuvent être prévus en examinant la courbe de solubilité $S = f(T)$.

- Si $dS/dT < 0$, il se forme généralement des incrustations dures qui adhèrent très fortement aux surfaces chaudes.
- Si $dS/dT > 0$, les dépôts ne seront généralement pas adhérents et les sels correspondants formeront des boues et des matières en suspension en précipitant.

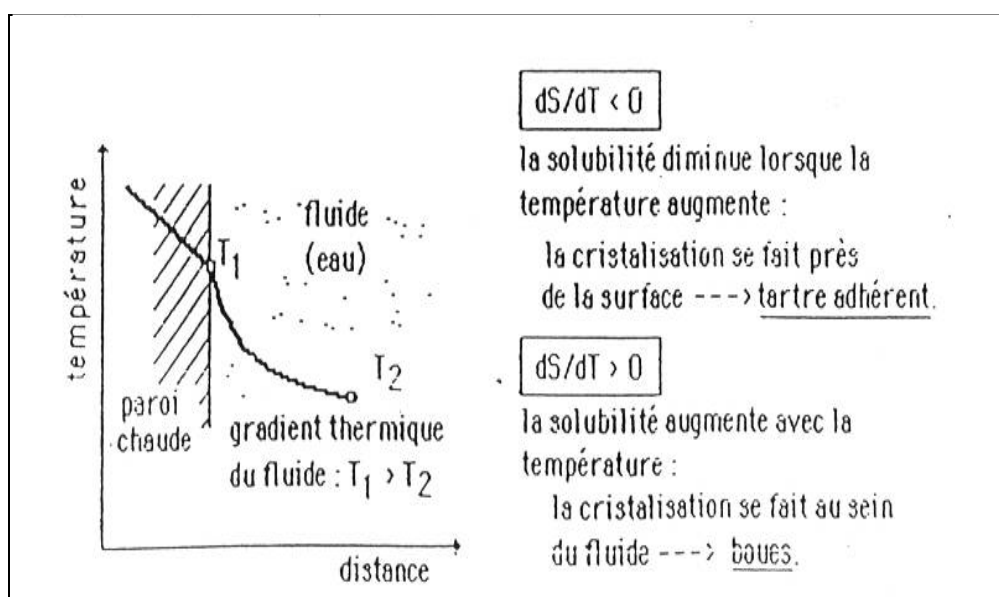


Figure III.5. Courbe de solubilité

- **Influence des dépôts**

La transmission de chaleur par conduction, à travers une paroi, est directement proportionnelle au coefficient de conductibilité total K.

$$\phi = K.S.\Delta T \quad (\text{III.9})$$

S : la surface et ΔT est l'écart de température

$1/K$ représente la résistance de passage du flux thermique, il dépend du matériau utilisé. En présence de dépôt les résistances s'ajoutent.

Pour un matériau de conductibilité thermique μ et d'épaisseur e , sa résistance thermique sera $R = \mu.e$

Tableau III.3.Exemple de coefficient μ en Kcal/hom°C

cuivre	335	CaCO ₃	2,3 à 2,4
aluminium	173	CaSO ₄	1 à 2
laiton	82	SiO ₂	0,2 à 0,5
fonte	48	CuO _x	2,8
acier	40	Fe ₃ O ₄	1,1

III.2.2 corrosion

Le processus de corrosion est toujours le même (voir chapitre II), dans le cas d'une corrosion généralisée, les anodes et les cathodes changent en permanence de place au fur et à mesure que la corrosion progresse.

Dans les circuits de refroidissement, on peut considérer que l'eau est toujours à saturation d'oxygène, du fait de l'aération violente au niveau de la tour. Il sera donc impératif de maintenir propres les surfaces métalliques pour éviter la corrosion par aération différentielle.

- **Inconvénients dus au tartre**

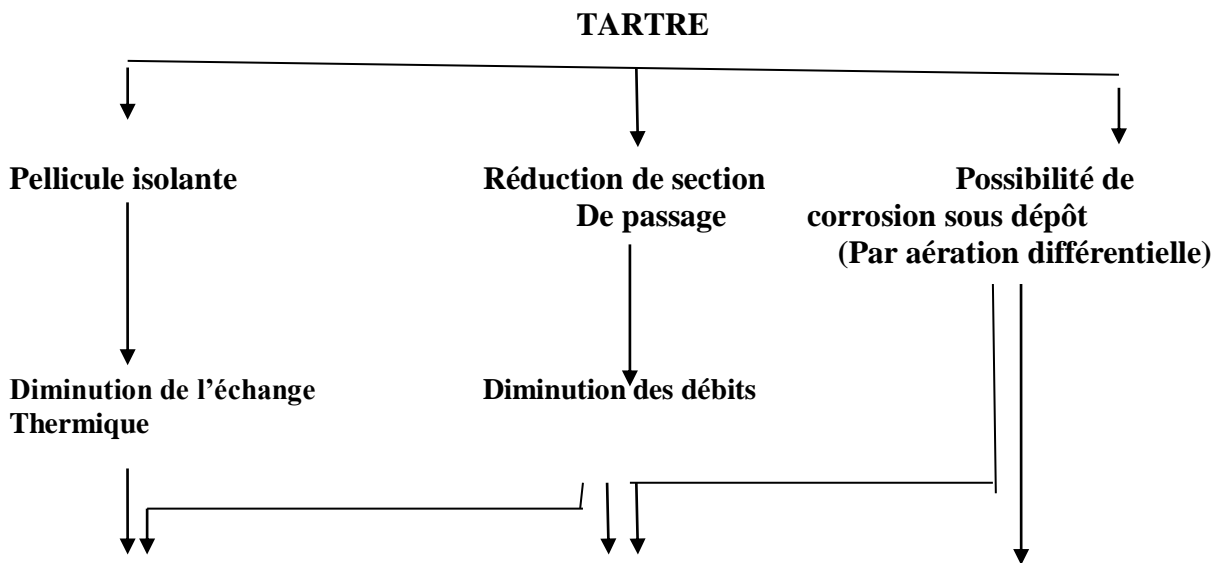


Figure III.6. Inconvénients dus au tartre

- Inconvénients dus à la corrosion : sont donnés dans le tableau ci-dessous

Tableau III.4 . Inconvénients dus au tartre

Amincissement	Dépôt d'oxydes	Dépôts et bouchage
		Nutriments pour bactéries du fer
Fuites		Echange thermique perturbé

Le circuit semi-ouvert est le couramment utilisé, mais l'évaporation dans le circuit provoque un phénomène de concentration de l'eau, concentrant ainsi la potentielle pollution de l'eau d'appoint (matières en suspension, colloïdales ou dissoutes, microorganismes, pollution atmosphérique) ainsi que les sels dissous qui présentent un risque d'entartrage.

III.2.3. Encrassement biologiques des circuits

On estime qu'au moins 1/3 de l'ensemble des phénomènes de corrosion peut être attribué au rôle destructif joué par les microorganismes.

Les organismes susceptibles de se développer dans les circuits de refroidissement sont principalement : les algues, les bactéries et les champignons.

Leur développement causé par l'apparition de conditions favorables, forme des dépôts et provoque l'encrassement. Ces dépôts favorisent la corrosion par aération différentielle et certains produits de leur métabolisme accélèrent la corrosion (pH, synthèse d'acides très corrosifs).

III.3. Traitement et Conditionnement des eaux de refroidissements

Les eaux d'appoint des circuits de refroidissement sont normalement traitées. Les traitements les plus courants sont :

- La clarification ou filtration
- La décarbonatation à la chaux
- La décarbonatation sous résins
- La décarbonatation acide
- L'adoucissement
- Et plus rarement la déminéralisation

C'est l'analyse de l'eau d'appoint traitée qui sera prise en considération pour déterminer le taux de concentration admissible et les consignes d'exploitation.

Quel que soit le traitement de l'eau d'appoint, l'addition de produits chimiques est souvent nécessaire dans l'eau des circuits de refroidissement. Les produits les plus couramment utilisés sont :

- Des antitartres et des dispersants
- Des inhibiteurs de corrosion
- Des biocides

III.3.1 Protection contre les risques d'entartrage et de corrosion

Cette protection combinée dépend évidemment des températures atteintes par l'eau et de la « chimie » de l'eau du circuit, mais aussi de tous les matériaux en contact avec l'eau (échangeurs, pompes, tuyauteries...). Trois grands types de procédé sont pratiqués.

III.3.2. Procédé dit d'« équilibre naturel »

Ce procédé consiste à régler **pH** et **TAC** de l'eau en circulation, de façon à ce qu'elle soit à l'équilibre calcocarbonique : indice de Langelier voisin de zéro. Ce réglage se fait par introduction de réactifs, acides ou alcalins, et par limitation du taux de concentration.

- il existe un équilibre de l'eau pour chaque température alors que, dans un circuit de refroidissement, la température de l'eau varie constamment ;
- la concentration en sels dissous de l'eau en circulation doit être limitée, ce qui entraîne des purges importantes et donc de fortes consommations d'eau d'appoint ;
- l'eau se trouve en état d'équilibre instable : le seul passage au réfrigérant atmosphérique peut abaisser sensiblement le **pH** (absorption excessive de CO₂...).

Par ailleurs il ne faut pas oublier que même à l'équilibre, une eau reste corrosive vis-à-vis de l'acier, ce qui limite l'application de ce procédé aux circuits conçus à l'origine avec des matériaux résistants : acier revêtu, laiton, cupro-nickel, bétons spéciaux.

III.3.3. Procédés avec inhibiteurs d'entartrage

Ils constituent une amélioration du procédé précédent et s'adressent à des eaux à tendance entartrante. Ils consistent à introduire dans le circuit des produits chimiques qui retardent la précipitation du carbonate de

calcium, notamment aux points chauds. On détermine alors les pH, TH et TAC de l'eau de telle sorte qu'elle soit à l'équilibre, voire légèrement entartrant, pour les températures froides.

Les retardateurs utilisés, la plupart du temps en combinaison, sont les polyphosphates, phosphonates et surtout les polymères organiques à pouvoir dispersant renforcé.

Ces inhibiteurs d'entartrage élargissent la « plage d'équilibre » et donc le domaine de température où l'eau peut être considérée à l'équilibre, en autorisant un fonctionnement avec des indices de Ryznar qui peuvent parfois descendre jusqu'à 3.

III.3.4. Avantages et limites des procédés retardateurs de précipitation

Les utilisations à « pH libre » limitent en réalité le TAC de l'eau en circulation entre 15 et 30 °F soit des pH de 8,5 à 9,3 avec des risques accrus de corrosion vers TAC 10 °F et d'entartrage vers TAC 30 °F. Le taux de concentration s'en trouve lui aussi limité.

Le recours à l'addition d'acide sulfurique ou chlorhydrique peut abaisser le TAC ; mais alors, le pH n'est plus libre et le SAF est accru.

Le pH de l'eau et la formation d'un film de carbonate de calcium limitent ces risques de corrosion, mais le rôle du SAF est prépondérant : chlorures et sulfates accélèrent la dépassement des films protecteurs (voir aussi corrosion des métaux et bétons).

D'une manière générale en régime entartrant contrôlé, on peut espérer des vitesses de corrosion sur l'acier :

- inférieures à 100 μm par an si SAF < 50 °F ;
- Inférieures à 150 μm par an si SAF < 75 °F.

III.3.5. Améliorations obtenues par l'apport d'inhibiteurs complémentaires

Pour réduire les vitesses de corrosion, des éléments complémentaires peuvent être incorporés dans les formulations antitartre :

- zinc: le Zn est un inhibiteur de corrosion cathodique. Aux doses usuelles d'antitartre et à des pH supérieurs à 8,5, la teneur en Zn du circuit reste inférieure à 1 mg · L⁻¹ ; la présence d'un dispersant a une incidence favorable sur la teneur en zinc. L'amélioration globale observée dans ces conditions est de 20 à 50 % sur la vitesse de corrosion, en particulier avec des eaux à SAF peu élevé. De plus, le zinc améliore aussi l'action de certains biocides ;
- inhibiteurs de corrosion du cuivre (dérivés azotés, leur usage s'impose en cas de dosage de biocides oxydants ou en présence de phosphonates car ces derniers accélèrent l'attaque des métaux cuivreux ;
- chromates : ils sont efficaces à des concentrations de quelques mg L⁻¹, mais leur inconvénient est la toxicité des Cr (VI) qu'il faut réduire en Cr (III) et éliminer de la purge avant son rejet.

III.3.6 Procédés avec inhibiteurs de corrosion

Le principe de ce procédé consiste à :

- supprimer les risques d'entartrage en abaissant le pH de l'eau au voisinage de 7 (pH contrôlé) ou en supprimant la dureté (adoucissement ou déminéralisation) ;
- Introduire simultanément dans le circuit un inhibiteur qui s'oppose à la corrosion par formation d'un film protecteur adhérent, homogène, non poreux, et ne perturbant pas l'échange thermique ;
- Travailler avec des inhibiteurs mixtes antitartre-anticorrosion pour les eaux présentant une faible dureté calcique ou un faible TAC, avec, éventuellement, une acidification partielle.

La plupart des inhibiteurs de corrosion en circuits semi-ouverts sont de type composite, avec protection anodique et cathodique à des doses en circuit de quelques dizaines de mg·L⁻¹.

III.3.7. Protection contre les salissures et les développements biologiques

L'action doit être préventive, ceci dans un triple but d'efficacité, d'écologie et de moindre coût.

Les matières colloïdales ont un rôle particulièrement nocif dans ce processus car elles coagulent sur les surfaces chaudes en créant un film isolant qui sert de support et de nutriment aux développements biologiques. Ces actions sont renforcées en présence de matière organique. Par ailleurs, elles provoquent des dépôts dans toutes les zones du circuit où la vitesse d'eau est faible

Tableau. III.5 Emploi des inhibiteurs : limites d'utilisation

Composition	pH	TAC	TH	Avantages	Inconvénients
Phosphates Polyphosphates zinc	5.8 – 7.5 (6.2 – 6.8) à 6.8 : 15 %↓ à 7.5 : 45 %↓	1 à 5 (0.5 – 1.5)	< 50 °f	Bon inhibiteur Bon contrôle Coût raisonnable	Hydrolyse Formation phosphate de calcium Risque dévelop- pements biologiques Régulation pH impérative
Chromates Zinc (éventuellement phosphates)	5.4 – 7 (6.4 – 6.8)	1 à 3 (0.5 – 1.5)	< 120 °f	Pas de risques d'encrassement biologique Excellent inhibiteur Contrôle aisé Coût acceptable	Régulation pH rigoureuse Interdit aux rejets
Phosphonates Zinc	7 – 8.6	20 à 40	< 120 °f	Stable à plus de 180°C Régulation pH non impérative	Traitement inhibiteur du cuivre indispensable Sensibles aux oxydants (Cl ₂ , O ₃) selon formulation
+ polyphosphates	Idem	Idem	Selon fournisseur	Améliore la protection	Prévoir un dispersant du phosphate de calcium
Polyacrylates (polymères) zinc	7 à 8.6	20 à 40	< 120 °f	Effet anti-tartre + dispersant Stabilisants Zn Stables aux oxydants	Contrôle analytique difficile Traitement biocide complémentaire