

FR 760 2550

**CYCLES DE CONFÉRENCES SUR
LES SOURCES FROIDES DES CENTRALES ÉLECTRIQUES
ROYALMONT : 6 - 10 OCTOBRE 1975**

- LES PROBLÈMES PHYSICO CHIMIQUES LIÉS AU REFROIDISSEMENT DES CONDENSEURS, ENTARTAGE ET CORROSION DES CIRCUITS.
- ROPARS Jean
- E.D.F. - DIRECTION DE LA PRODUCTION ET DU TRANSPORT - Département des Laboratoires -

- RESUME -

La production thermique d'énergie électrique impose actuellement l'utilisation de turbines à vapeur et par suite nécessite une source froide (condenseur). Cette dernière est obtenue par circulation d'eau.

Les quantités d'eau à mettre en oeuvre sont considérables. Par exemple, dans le cas d'une tranche nucléaire PWR de 900 MW, elle est de 40 m³/s en admettant un déchauffement de 10°C. Ces besoins en eau limitent le choix des sites possibles pour l'implantation des centrales (bord de mer ou fleuve à débit important et régulier).

Les apports importants de chaleur que représente cette utilisation créent des problèmes d'environnement. Un moyen de limiter les quantités de chaleur rejetées est l'utilisation de réfrigérant atmosphérique. Mais l'exploitation de ces dispositifs ajoute aux problèmes habituels de corrosion et de salissure une contrainte supplémentaire liée à l'entartage. La modification des équilibres carboniques et la concentration dues au passage dans l'aéroréfrigérant sont cause de la formation de ces tartres.

L'évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'eau de refroidissement est décrite, ainsi que les risques en résultant pour le matériel.

Les moyens à mettre en oeuvre pour éviter l'entartage, la salissure et les corrosions sont présentés.

Les solutions retenues par E.D.F. pour exploiter les circuits de refroidissement sont indiquées. Les procédés mis en oeuvre doivent éviter toute pollution chimique des eaux rejetées.

- L

LES PROBLEMES PHYSICO-CHEMIQUES LIES AU REFROIDISSEMENT
DES CONDENSEURS, ENTARTRAGE ET CORROSION DES CIRCUITS

1 - INTRODUCTION

2 - COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX

2.1 - Eau de mer

2.2 - Eau de rivière

2.21 - Composition

2.22 - Equilibres carboniques d'une eau

2.3 - Evolution des eaux dans les circuits de réfrigération atmosphérique

2.31 - Concentration des eaux

2.32 - Autres facteurs d'évolution

3 - RISQUES DUS A L'EVOLUTION DES EAUX DANS LES CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT

3.1 - Entartrage dû aux carbonates

3.2 - Entartrage par le sulfate de calcium

3.3 - Salissure

3.4 - Corrosion

Corrosions généralisées

Corrosions localisées

4 - MOYENS UTILISABLES POUR EVITER L'ENTARTRAGE

4.1 - Décarbonatation à la chaux

4.2 - Vaccination à l'acide

4.3 - Séquestration du calcium

4.4 - Utilisation d'anti-tartres

5 - MOYENS DE PROTECTION CONTRE LA SALISSURE

5.1 - Maintien en suspension

5.2 - Filtration

5.3 - Chloration

6 - MOYENS DE PROTECTION CONTRE LA CORROSION

- 6.1 - Revêtements protecteurs
- 6.2 - Protection cathodique
- 6.3 - Matériaux résistants à la corrosion
- 6.4 - Protection par le sulfate ferreux
- 6.5 - Inhibiteurs de corrosion

7 - EXPLOITATION DES CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT

- 7.1 - Circuits ouverts refroidis en eau de mer
- 7.2 - Circuits ouverts refroidis en eau de rivière
- 7.3 - Circuits de réfrigération atmosphérique
 - 7.31 - Eaux peu calcaires
 - 7.32 - Eaux moyennement calcaires
 - 7.33 - Eaux très calcaires
 - 7.34 - Nettoyage chimique des circuits entarrés

LES PROBLEMES PHYSICO-CHEMIQUES LIES AU REFROIDISSEMENT
DES CONDENSEURS, ENTARTRAGE ET CORROSION DES CIRCUITS

1 - INTRODUCTION

Dans les Centrales thermiques productrices d'énergie électrique, la vapeur d'eau à haute pression nécessaire pour actionner la turbine doit, après avoir cédé une partie de son énergie, être condensée et l'eau obtenue est réinjectée au générateur de vapeur. La condensation est le plus généralement réalisée dans un échangeur tubulaire dont les tubes sont parcourus par l'eau. La quantité d'eau de refroidissement nécessaire pour condenser la vapeur est importante, car la chaleur de vaporisation de l'eau est élevée.

La taille des unités actuelles de production d'énergie électrique conduit à des débits d'eau de refroidissement considérables. Pour une tranche de 700 MW classique le débit est de 17 m³/s, pour une unité nucléaire de 900 MW il atteint 40 m³/s, ceci pour des échauffements d'eau de 12°C. Les rejets thermiques qui en résultent sont donc très importants : 220 Mcal/s pour 1 000 MW de puissance électrique pour des unités classiques ; 500 Mcal/s pour des unités nucléaires. Seuls des fleuves à débit important et régulier, et la mer, permettent d'évacuer directement de telles quantités de chaleur, sans élévation de la température de l'eau préjudiciable à l'écologie du milieu. La température de 30°C retenue comme valeur maximale, et la tendance actuelle à limiter l'élévation de température entre l'amont et l'aval des centrales imposent l'implantation des futures unités sur le littoral ou l'utilisation de tours de réfrigération atmosphérique fonctionnant en circuit fermé. Dans les deux cas le constructeur et l'exploitant ont à faire face à de nombreux problèmes posés par la tenue du matériel. Ces problèmes résultent, d'une part, de la composition chimique de l'eau et de son évolution dans les circuits et d'autre part, du fait que l'eau est un milieu vivant dont l'élévation de température favorise la prolifération de la flore et de la faune.

2 - COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX

2.1 - Eau de mer

La salinité de l'eau de mer est comprise entre 32 et 38 g/l. La composition chimique (voir tableau 1) a pour conséquences :

- a) une aggravation des risques de corrosion des matériaux constituant le circuit (forte teneur en chlorures)
- b) une pollution importante du circuit eau-vapeur lors d'arrêtancheteté, même minime, du condenseur par suite de la très forte salinité.

2.2 - Eau de rivière

2.21 - Composition

Une eau naturelle est une solution de bicarbonates, chlorures et sulfates, alcalino-terreux (Ca, Mg) et alcalins (Na, K), plus ou moins polluée par des produits de dégradation, d'origine végétale et animale, et parfois par des déversements industriels.

La composition d'une eau est habituellement définie par les caractéristiques suivantes :

- TH = titre hydrotimétrique (teneur en calcium et en magnésium)
- TCa = teneur en calcium
- TAC = titre alcalimétrique complet (teneur en bicarbonates, carbonates et hydroxydes libres)
- TAcl = teneur en ions d'acides forts (sulfates, chlorures, nitrates)
- Matières en suspension : poids d'argile, de sable, de colloïdes divers en suspension dans un litre d'eau
- D. C. O. : Demande chimique en oxygène exprimée en mg/l d'O₂ ou en mg de MnO₄/K/l qui correspond pour un mode opératoire normalisé à la quantité d'oxygène ou d'oxydant nécessaire pour détruire les matières organiques contenues dans l'eau.
- pH = potentiel hydrogène ; pour une eau naturelle il résulte de l'équilibre des divers ions carboniques. Il est en première approximation fonction de la quantité de gaz carbonique présente.

2.20 - Equilibres carboniques d'une eau

Ces équilibres complexes peuvent être schématisés par la réaction chimique d'équilibre suivante :



Dans cet équilibre la concentration en carbonate de calcium est limitée par sa solubilité qui est une fonction décroissante de la température.

Une eau naturelle contient toujours des bicarbonates, des carbonates de calcium et du gaz carbonique libre.

Une eau est dite à l'équilibre lorsqu'elle contient pour une teneur en bicarbonate donnée, la quantité de gaz carbonique libre juste nécessaire pour maintenir en solution la quantité de CaCO₃ correspondant à sa solubilité à la température considérée. Ce CO₂ libre est appelé CO₂ d'équilibre et le pH correspondant à cette teneur est le pH d'équilibre ou pH de saturation pH_s.

Si une eau de même concentration en bicarbonates, donc de même TAC, contient moins de CO₂ libre que la quantité nécessaire au maintien de l'équilibre, son pH est supérieur au pH_s. L'eau est dite incrustante. Elle va évoluer pour retourner à l'équilibre. Des molécules de bicarbonates se décomposent en CaCO₃ et CO₂. Un nouveau pH_s s'établit, correspondant à un TAC plus faible et, si la température est restée constante, à la même solubilité de CaCO₃. Du carbonate de calcium a donc précipité à partir du bicarbonate.

Si le pH de l'eau est inférieur au pH_s, la quantité de CO₂ libre est supérieure au CO₂ d'équilibre. La différence entre ces deux teneurs est le CO₂ agressif. Une telle eau en présence de dépôts de CaCO₃ va évoluer pour que l'équilibre soit à nouveau réalisé : le CO₂ agressif solubilise du CaCO₃ en formant de nouvelles molécules de bicarbonate de calcium. Le TAC croît, de même que le pH, alors que le CO₂ agressif disparaît, et que la solubilité du CaCO₃ reste constante si la température n'a pas changé. Le nouvel équilibre est caractérisé par un pH_s et un TAC. Si l'eau n'est pas en présence de dépôts de CaCO₃, elle restera en déséquilibre et conservera son agressivité vis-à-vis du carbonate de calcium : une telle eau est dite agressive.

Cette expression "eau agressive" prête souvent à confusion et est souvent interprétée à tort dans le sens d'agressivité vis-à-vis des matériaux constituant le circuit ; or la corrosion des métaux fait intervenir, outre le pH, le potentiel d'oxydo-réduction du métal et la composition ionique de l'eau.

Pour définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau des indices plus ou moins empiriques sont parfois utilisés :

- indice de Langelier = pH - pHS

Une valeur nulle indique que l'eau est à l'équilibre. Les eaux agressives vis-à-vis du CaCO_3 sont caractérisées par des indices négatifs alors que les eaux incrustantes ont des indices positifs.

- indice de Ryznar = 2 pHS - pH

2.3 - Evolution des eaux dans les circuits de réfrigération atmosphérique

2.31 - Concentration des eaux

Dans ces circuits (fig. 2) l'eau est échauffée dans le condenseur puis refroidie par vaporisation partielle dans la tour du réfrigérant atmosphérique avant d'être recyclée. Pour maintenir le volume d'eau du circuit, il est nécessaire d'effectuer un appoint en eau afin de compenser la vaporisation. Il en résulte une concentration de tous les sels et produits en suspension contenus dans l'eau d'appoint. Cette concentration doit être limitée par des purges pour éviter la précipitation des sels peu solubles, la salissure et la corrosion des surfaces où s'effectuent les transferts thermiques.

La concentration de l'eau du circuit est définie par le taux de concentration α , qui est le rapport entre la salinité de l'eau du circuit (C_1) et la salinité de l'eau d'appoint (C_0). Pour un circuit quelconque, ce taux α est donné par le rapport entre le débit d'appoint (A) et le débit total des purges (P)

$$\alpha = \frac{C_1}{C_0} = \frac{A}{P}$$

Le débit d'appoint étant la somme des débits vaporisés (v) et purgés (P) à l'état liquide, cette relation peut s'écrire

$$\alpha = \frac{v + P}{P} = 1 + \frac{v}{P}$$

Toutes les teneurs en sels et en matières en suspension de l'eau d'appoint vont être multipliées par le facteur de concentration α .

2.32 - Autres facteurs d'évolution de l'eau des circuits

- la teneur en CO_2 libre tend vers l'équilibre de la loi de Henry, qui existe, entre cette concentration et la pression partielle de gaz carbonique dans l'atmosphère, (courbes n° 3 et 4),
- la température plus élevée de l'eau dans l'ensemble de circuit et particulièrement à la sortie du condenseur diminue la solubilité du CaCO_3 dans l'eau,
- le lavage de l'air de refroidissement par ruissellement de l'eau dans la tour de réfrigération accroît la teneur en matières en suspension de l'eau du circuit,
- la température moyenne, élevée, de l'eau recirculée crée un milieu favorable à la prolifération de microorganismes et d'algues.

3 - RISQUES DUS A L'EVOLUTION DES EAUX DANS LES CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT

Tous les facteurs énumérés ci-dessus, qui modifient les caractéristiques des eaux, ont sur le circuit des conséquences gênantes : entartrage, salissure, corrosion,

3.1 - Entartrage dû aux carbonates

Dans les circuits ouverts de réfrigération il est rarement observé d'entartrage car les eaux naturelles sont généralement agressives. Mais certaines eaux riches en plancton peuvent, en période estivale, donner lieu à des dépôts de tartre dans la partie la plus chaude du condenseur. Cet entartrage est lié à la disparition du CO_2 libre par assimilation chlorophyllienne pendant le jour. (voir courbe n° 5).

Dans les circuits de réfrigération atmosphérique, les conditions des équilibres carboniques sont profondément modifiées par :

- les variations de la température donc de la solubilité de CaCO_3 : c'est la température la plus élevée du circuit qui doit être prise en compte pour l'étude des équilibres,
- la faible teneur en CO_2 libre résultant de l'équilibre de solubilité de ce gaz dans la tour de réfrigération,
- l'accroissement de la salinité de l'eau d'un facteur α .

Dans ces conditions les eaux ont toujours un caractère incrustant.

Toutefois l'expérience montre que l'entartrage des surfaces d'échange thermique ne se produit que pour des valeurs des indices de Langelier de $+ 0,75$, et de Ryznar d'environ 6,2. (courbe n° 6 : exemple de l'eau de la Loire à Saint-Laurent des Eaux).

Ces écarts entre la théorie et l'expérience sont dus :

- à l'existence de CaCO_3 en sursaturation à l'état métastable
- à la présence de matières organiques (D. C. O.) se comportant comme des sequestrants vis-à-vis du calcium
- au fait que le tartre de calcite ne se forme qu'à partir de germes de cristallisation formés sur les tubes. Or la précipitation de CaCO_3 , surtout dans les eaux polluées par des matières organiques, peut s'effectuer sous forme de boues amorphes.

Pour une eau d'appoint quelconque, il n'est pas possible de déterminer à partir de ses caractéristiques chimiques, à quel facteur de concentration, donc à quelle saturation du CaCO_3 il est possible de fonctionner. Seuls des essais sur poste pilote, avec l'eau d'appoint réelle, permettent de chiffrer ce "retard à la précipitation".

3.2 - Entartrage par le sulfate de calcium

La solubilité du sulfate de calcium est environ 100 fois plus grande que celle des carbonates. Il peut néanmoins précipiter si sa concentration dans l'eau du circuit devient excessive (teneur en sulfates de l'eau d'appoint élevée et facteur de concentration α trop élevé).

3.3 - Salissure

La salissure due aux matières en suspension, existant dans l'eau de circulation ou, dans le cas des réfrigérants atmosphériques, provenant de l'eau d'appoint et de l'air atmosphérique, a surtout pour conséquence de favoriser certains types de corrosion. Elle peut, si elle est très prononcée, provoquer des dépôts dans les tubes des échangeurs et favoriser alors la cristallisation du carbonate de calcium.

Les matières organiques, bactéries, algues peuvent proliférer sur les tubes des échangeurs de façon telle que le coefficient d'échange s'en trouve affecté.

La prolifération sur les surfaces en acier de bactéries sulfato-réductrices peut conduire à des piqûres localisées de l'acier pouvant aller jusqu'au percement des tuyauteries.

Sur les coques des réfrigérants atmosphériques, l'atmosphère saturée en vapeur d'eau favorise la prolifération d'algues qui se développent jusqu'à tapisser entièrement ces surfaces. Après un arrêt prolongé de la tranche, pour entretien annuel par exemple, ces algues se dessèchent et meurent. Les lambeaux desséchés tombent alors dans le bassin du réfrigérant et, à la remise en service viennent obturer les grilles de filtration avant les pompes de circulation.

Dans le cas d'une réfrigération par l'eau de mer, outre les développements d'algues et de bactéries, la présence de moules, de balanes, de serpules peut créer des conditions favorables aux corrosions localisées.

3.4 - Corrosion

Les aciers et alliages cuivreux se corrodent d'autant plus que la salinité des eaux est plus élevée. Deux types de corrosion sont à envisager :

a - corrosion généralisée

Ce type de corrosion entraîne des pertes de poids à peu près uniformes sur les surfaces exposées à l'eau.

La corrosion de l'acier est minimale lorsque le pH de l'eau est supérieur à 8,0. Ceci est généralement le cas dans les circuits de refroidissement atmosphérique où l'on observe des corrosions de 250 μm à 300 μm par an sur des éprouvettes blanchies. En fait, la présence éventuelle d'un dépôt calcaire limite encore cette corrosion.

Le cuivre et les alliages cuivreux, constituant les tubes des échangeurs, sont protégés par une couche de passivation, constituée par des oxydes peu solubles et sont peu affectés par la corrosion généralisée, sauf si l'eau du circuit est fortement polluée. L'ammoniaque, l'hydrogène sulfuré et les sulfures peuvent être les agents de cette corrosion. Ces polluants inhabituels ne peuvent provenir que de déversements industriels.

L'action abrasive des matières en suspension contenues dans l'eau peut conduire à une corrosion généralisée par érosion continue des métaux passivés ou non (érosion-corrosion).

Les bétons et fibrociments ne présentent de risques de corrosion généralisée que pour des teneurs en ions sulfate de plus de 1 g/l ou des pH inférieurs à 6,5.

b - corrosions localisées

Ce type de corrosion est le plus souvent lié à la salissure des circuits. Quand une surface métallique est recouverte partiellement par un dépôt, le métal à nu devient anodique et tend à être corrodé. Il peut en résulter des corrosions par piqûres très gênantes pour la tenue du matériel.

La présence de colonies de bactéries sulfato-réductrices sur les aciers crée localement des zones réductrices de très faible surface par rapport à l'ensemble où la corrosion par aération différentielle peut être importante.

Existence de contraintes résiduelles dues à l'usinage ou au montage, ou de contraintes alternées dues aux vibrations peut, en milieu corrosif, être à l'origine de fissurations. Ces phénomènes de corrosion sous tension ou de fatigue-corrosion peuvent entraîner la rupture des tubes.

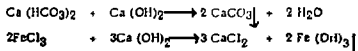
Les corps étrangers bloqués dans les tubes (débris de coquilles de moules, balanes) créent localement à l'aval, des zones de turbulence, où l'érosion-corrosion peut conduire à des percements.

4 - MOYENS UTILISABLES POUR EVITER L'ENTARTRAGE

Pour éviter l'entartrage, dans les circuits fermés de réfrigération il est possible d'agir sur les divers paramètres qui interviennent dans le phénomène : TCa, TAC, pH, sursaturation du carbonate de calcium. Les moyens mis en oeuvre, qui interviennent parfois simultanément sur plusieurs de ces paramètres sont les suivants :

4.1 - La décarbonatation à la chaux

Ce traitement vise à éliminer sous forme de boues de CaCO_3 la majeure partie des bicarbonates de calcium de l'eau d'appoint. La floculation du CaCO_3 entraîne des matières en suspension. L'addition de floculants tels que FeCl_3 ou $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ améliore cette élimination. Les réactions qui se produisent sont :



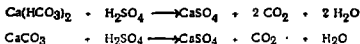
Ce traitement agit sur les équilibres carboniques :

- en abaissant le TAC de l'eau d'appoint à 4 ou 5° f,
- en diminuant le TCa d'une valeur égale à TAC - (4 à 5° f) plus la quantité de floculant ajouté (qui est toujours faible : quelques milligrammes par litre),
- en abaissant le CO_2 libre à des valeurs très basses correspondant aux pH élevés de l'eau décarbonatée (9,6 à 10,3),
- en augmentant le TACI du nombre de degrés correspondant aux additions de floculant.

L'eau décarbonatée doit être filtrée pour éliminer au maximum le CaCO_3 en suspension ; malgré cela elle reste toujours incrustante.

4.2 - Vaccination à l'acide

Ce traitement consiste à transformer en sels plus solubles une fraction des bicarbonates et carbonates de l'eau par addition d'acide :



Il agit sur les équilibres carboniques de l'eau d'appoint :

- en augmentant le CO_2 libre donc en abaissant le pH et en rendant l'eau agressive,
- en diminuant le TAC en proportion de la quantité d'acide ajoutée.

Il ne modifie pas le TCa mais augmente le TACI du nombre de degrés de TAC éliminés.

Dans les tours de réfrigération, le CO_2 introduit par l'eau d'appoint est éliminé et l'eau du circuit ne contient que des doses de CO_2 libre légèrement supérieures à celles correspondant à l'équilibre de la loi de Henry.

Ce type de traitement est souvent appliqué à l'eau décarbonatée afin de lui faire perdre son caractère incrustant.

4.3 - Séquestration du calcium

Cette séquestration est habituellement réalisée en utilisant des polyphosphates à faibles doses : 5 à 10 g par m^3 d'eau d'appoint.

Ces produits n'interviennent dans l'équilibre carbonique qu'en limitant la teneur en ions Ca^{++} libres.

Leur emploi est incompatible avec :

- les facteurs de concentration α élevés : α doit être limité à 1,3
- les températures de métal supérieures à 40°C par suite de la formation d'orthophosphates qui précipitent à l'état de phosphates de calcium
- la présence dans l'eau de quantités importantes de matières en suspension,

Ce type de traitement présente deux autres inconvénients importants :

- Il pollue l'eau restituée à la rivière par les purges,
- les phosphates favorisent les proliférations végétales et animales.

4.4 - Utilisation d'anti-tartres

Ces produits sont des polymères naturels ou synthétiques, de poids moléculaire élevé, solubles ou "dispensibles" dans l'eau. Ils agissent en retardant la cristallisation du CaCO_3 .

De nombreux produits existent sur le marché, mais leur efficacité est bien souvent fonction des conditions d'emploi. Des essais prolongés sont nécessaires avant de mettre en oeuvre de tels produits qui par ailleurs sont d'un coût élevé, et risquent de polluer les rejets. La connaissance de la biodégradabilité des anti-tartres, donc de leur composition, conditionne leur utilisation.

5 - MOYENS DE PROTECTION CONTRE LA SALISSURE

Les moyens à mettre en oeuvre pour éviter la salissure sont : le maintien en suspension de la salissure ou son élimination par filtration et la stérilisation de l'eau pour éviter les proliférations organiques.

5.1 - Maintien en suspension

Les vitesses de l'eau dans les différents points du circuit, 1,7 à 1,8 m/s dans les tubes des échangeurs thermiques, 2 m/s dans les tuyauteries, favorisent l'entraînement des matières en suspension. Les faibles vitesses dans le bassin de reprise sous les tours de réfrigération favorisent par contre leur décantation.

L'utilisation de dispersants chimiques, type polyélectrolyte est également possible. L'efficacité de ces produits doit être vérifiée par des essais et les doses bien précises car des teneurs trop élevées peuvent avoir un effet inverse et provoquer l'agglomération puis la précipitation des matières en suspension. De plus ces dispersants doivent être biodégradables pour limiter la pollution des rejets.

Le nettoyage continu du condenseur, système Taprogge, assure l'élimination des salissures sur les surfaces d'échange thermique.

5.2 - Filtration

Dans les circuits de réfrigération atmosphérique, la filtration continue d'une fraction du débit de l'eau de circulation (5 % environ) permet d'éliminer la majeure partie des matières en suspension. Cette solution est onéreuse car elle nécessite l'installation de filtres à sable de grande dimension.

5.3 - Javellisation

L'injection d'eau de Javel est indispensable quels que soient les autres procédés mis en oeuvre pour protéger les circuits. Il convient d'éviter les proliférations organiques, surtout en période estivale, et le rejet de quantités importantes de chlore dans l'environnement. La teneur en chlore libre dans les eaux rejetées doit être inférieure à 0,1 mg/l.

6 - MOYENS DE PROTECTION CONTRE LA CORROSION

Tous les moyens mis en oeuvre pour limiter la salissure facilitent la protection contre la corrosion. Cette protection, difficile à mettre en oeuvre et à maintenir dans le temps fait appel à divers procédés.

6.1 - Revêtements protecteurs

- peintures de diverses compositions (vinylique, néoprène, epoxy, brai-epoxy, etc...) déposées en plusieurs couches. Cette protection n'est pas toujours très efficace car elle dépend beaucoup des conditions d'application et du "savoir faire" de l'opérateur (absence d'humidité, séchage, etc...).
- habillage en néoprène ou en ébonite. Cette technique ne peut être appliquée qu'à des pièces de dimensions peu importantes car elle nécessite une vulcanisation à chaud dans un four. La réparation en service des parties détériorées est très difficile.

6.2 - Protection cathodique

La corrosion des métaux ferreux peut être limitée en modifiant la polarité du fer par mise en place d'anodes solubles en zinc ou en magnésium ou par polarisation de l'acier par rapport à des anodes inattaquables en titane ou en graphite. Ce procédé exige des densités de courant bien homogènes et doit être étudié lors de la construction du condenseur conjointement avec une protection par revêtement pour limiter les quantités de courant utilisées et éviter les zones non protégées par le champ électrique.

6.3 - Utilisation de matériaux résistants à la corrosion

Les alliages cuivreux utilisés pour la fabrication des tubes de condenseur, laiton amirauté (Cu 70, Zn 29, Sn 1), Naval Brass (Cu 60, Zn 39, Sn 1 à l'Arsenic), laiton à l'aluminium (Cu 76, Zn 22, Al 2 à l'Arsenic) se comportent de façon très satisfaisante en eau douce mais résistent assez mal à l'eau de mer surtout si elle est chargée en sable ou polluée. Le matériau le mieux adapté à cette érosion-corrosion est malgré son prix, le titane. Les cupro-nickel 70-30 ont également été employés mais se sont révélés sensibles à la corrosion résultant de la salissure par des dépôts de corps étrangers tels que les débris de coquilles de moules.

6.4 - Protection par le sulfate ferreux

Le maintien sur la surface d'échange des tubes du condenseur d'une couche d'oxydes de fer permet de combattre les phénomènes d'érosion-corrosion.

Le maintien de cette couche protectrice obtenue à partir de sulfate ferreux injecté à la dose de 1 p. p. m. de Fer est délicat. L'expérience locale permet seule de définir les fréquences d'injection nécessaires pour obtenir une couche protectrice homogène et continue sur les tubes sans conduire à un encrassement préjudiciable au rendement de l'installation.

6.5 - Inhibiteurs de corrosion

Certains composés chimiques, chromates, silicates, sels de zinc permettent de réduire fortement la corrosion généralisée de l'acier (Des taux de corrosion de 50 $\mu\text{m}/\text{an}$ peuvent être obtenus). La mise en oeuvre de ces produits ne peut être envisagée que dans le cas d'une réfrigération en circuit fermé. Le coût d'un tel traitement est prohibitif par suite des débits à traiter et la pollution des rivières par certains de ces produits comme le chromate n'est pas acceptable. Dans le cas de circuit fermé conditionné au chromate, les eaux de déconcentration doivent être traitées de façon à éliminer toutes traces de chrome hexavalent.

7 - EXPLOITATION DES CIRCUITS DE REFRIGERATION

7.1 - Circuits ouverts refroidis en eau de mer

En eau de mer les problèmes rencontrés sont dus à la corrosion et à la salissure. C'est au stade de la construction que les solutions doivent être prévues :

- choix des matériaux (Titane)
- optimisation des vitesses de circulation de l'eau dans les diverses parties de l'installation
- dispositions constructives permettant :
 - de minimiser les parties en acier, devant recevoir des applications de revêtement protecteur
 - de procéder à une protection cathodique efficace
 - de localiser d'éventuelles entrées d'eau de mer (condenseurs cloisonnés, et isolables en marche côté eau de circulation)
 - de pallier l'influence des inéchantés du duégonnage (double plaque de tête avec circulation d'eau distillée)
- filtre à moules à l'entrée du condenseur
- dispositif de nettoyage en continu des tubes de condenseur (type Taprogge ou M. A. N.)
- dispositif d'injection d'eau de Javel
- dispositif d'injection de sulfate ferreux,

En exploitation une surveillance attentive de tous ces dispositifs est impérative. Les doses de produits chimiques, eau de Javel, sulfate ferreux doivent être déterminées par l'expérience en recherchant la pollution minimale.

7.2 - Circuits ouverts refroidis en eau de rivière

Ces circuits ne posent habituellement pas d'autre problème que celui de la salissure par prolifération de microorganismes à la surface des tubes de condenseur. Une javellisation intermittente est souvent suffisante. Dans le cas d'eau très polluée, le nettoyage continu type Taprogge est parfois nécessaire.

7.3 - Circuits de réfrigération atmosphérique

Certaines dispositions de protection des circuits de réfrigération atmosphérique sont applicables dans tous les cas :

- vitesses optimales de circulation des eaux dans les diverses parties du circuit,
- nettoyage permanent du condenseur par le procédé Taprogge,
- chloration de l'eau du circuit,
- éloignement suffisant du point d'injection de l'eau d'appoint de la région où s'effectuent les purges pour éviter l'élimination directe de l'appoint.

Par contre, le choix du mode de conditionnement de l'eau dépend de la composition chimique de l'eau d'appoint, des quantités d'eau disponibles sur le site, des normes de pollutions thermiques et chimiques imposées pour l'eau en aval de la centrale, des coûts d'investissements et des dépenses d'exploitation.

Les eaux de surface peuvent être classées en 3 catégories suivant leur teneur en bicarbonate de calcium,

7.31 - Eaux peu calcaires

Dans ce cas (TH inférieur à 20, TAC inférieur à 15) un fonctionnement avec utilisation directe de l'eau de la rivière comme appoint est possible. Des essais sur poste pilote doivent permettre de déterminer le facteur de concentration maximal, qu'il est possible de maintenir dans le circuit fonctionnant dans les conditions d'exploitation les plus défavorables (température d'eau la plus élevée et eau d'appoint de plus forte salinité). Il convient toutefois de prévoir une éventuelle vaccination à l'acide sulfurique pour permettre d'augmenter la teneur en CO_2 libre à l'entrée du condenseur et d'éviter l'entartrage lorsque l'on fonctionne aux conditions limites.

Ce type de conditionnement, s'il n'apporte aucune pollution chimique appréciable des rejets, a par contre l'inconvénient d'augmenter notablement la température de l'eau de rivière en aval de la centrale pendant les périodes d'étiage.

7.32 - Eaux moyennement calcaires

Ces eaux dont le TH est compris entre 20 et 25 et le TAC entre 15 et 20 ne peuvent être utilisées en appoint direct que pour de très faibles facteurs de concentration (inférieurs à 1, 1) et une vaccination acide est indispensable. Si les essais sur poste pilote ne permettent pas d'envisager un tel mode d'exploitation, des facteurs de concentration de l'ordre de 4 doivent être choisis. L'utilisation de réactifs chimiques est d'autant plus onéreuse que le facteur α est faible et la pollution des rejets est également plus grande. La variation relative du débit d'appoint A en fonction du facteur de concentration α pour une vaporisation de 1 est donnée par l'expression

$$A = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \quad (\text{voir courbe n}^\circ 7)$$

Pour $\alpha = 4$ l'appoint est supérieur de 33 % à la vaporisation ; pour $\alpha = 8$ il n'est supérieur que de 11,4 %. L'intérêt des très forts facteurs de concentration pour limiter les consommations de réactifs est faible (consommation diminuée d'environ 14 % entre $\alpha = 4$ et 8). Par contre les inconvénients dus à la concentration des sels sont très importants.

L'application de $\alpha = 4$ conduit à une vaccination acide de l'eau d'appoint et à l'utilisation éventuelle de produits anti-tartre et de dispersants.

Des essais sur poste pilote, doivent permettre de déterminer sur le site, en fonction des variations des caractéristiques de l'eau d'appoint et des coûts des divers réactifs, le mode d'exploitation le mieux adapté (pourcentage du TAC de l'eau d'appoint qui doit être neutralisé, nature et dose d'anti-tartre et de dispersant minimaux).

7.33 - Eaux très calcaires

Ces eaux de forte salinité dont le TH est supérieur à 25 et le TAC supérieur à 20 ne peuvent être utilisées en appoint direct ; la vaccination acide ne peut non plus être envisagée par suite du risque d'entartrage par le sulfate de calcium. Dans ces conditions, malgré les coûts d'investissement élevés, la décarbonatation à la chaux doit être envisagée. Pour limiter les dépenses d'exploitation, des facteurs de concentration α de l'ordre de 4 doivent être retenus. La vaccination acide de l'eau épurée est également à prévoir et l'utilisation d'anti-tartres et de dispersants doit être envisagée. Les essais sur poste pilote doivent permettre de définir le mode d'exploitation le plus économique et le plus sûr.

7.34 - Nettoyage chimique des circuits entartés

L'entartrage éventuel résultant du dérèglement du conditionnement ou de modifications importantes des caractéristiques de l'eau d'appoint ne doit pas être écarté. Dans une telle éventualité, seul un nettoyage à l'acide inhibé permet de retrouver rapidement les coefficients d'échange thermique normaux des échangeurs de chaleur. Pour éviter l'utilisation de volumes trop importants de réactifs et n'intéresser à ces opérations que les échangeurs, il est souhaitable de prévoir des circuits de contournement courts pour ces appareils.

COMPOSITION DE L'EAU DE MER

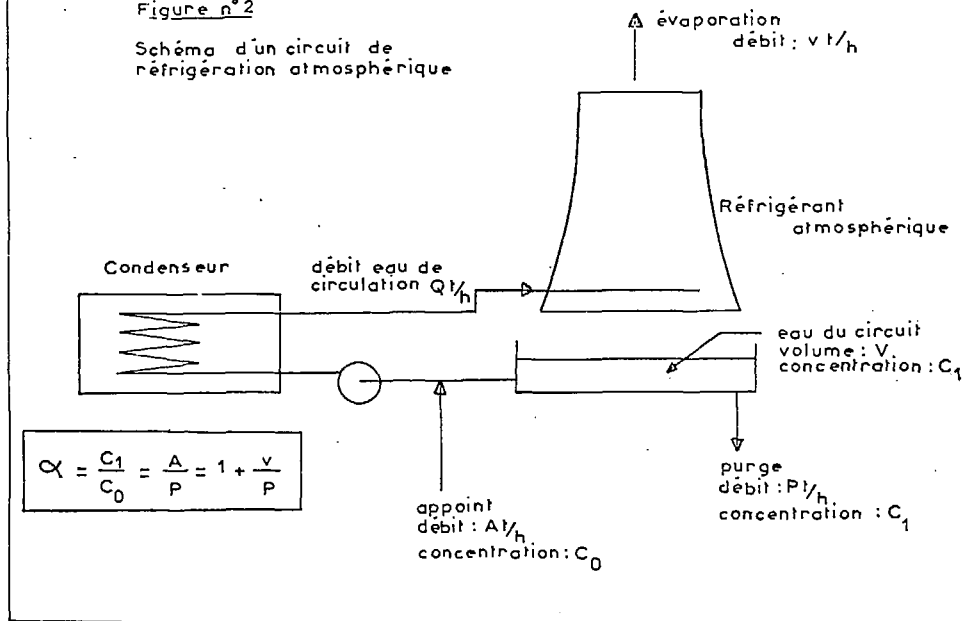
Tableau n°1

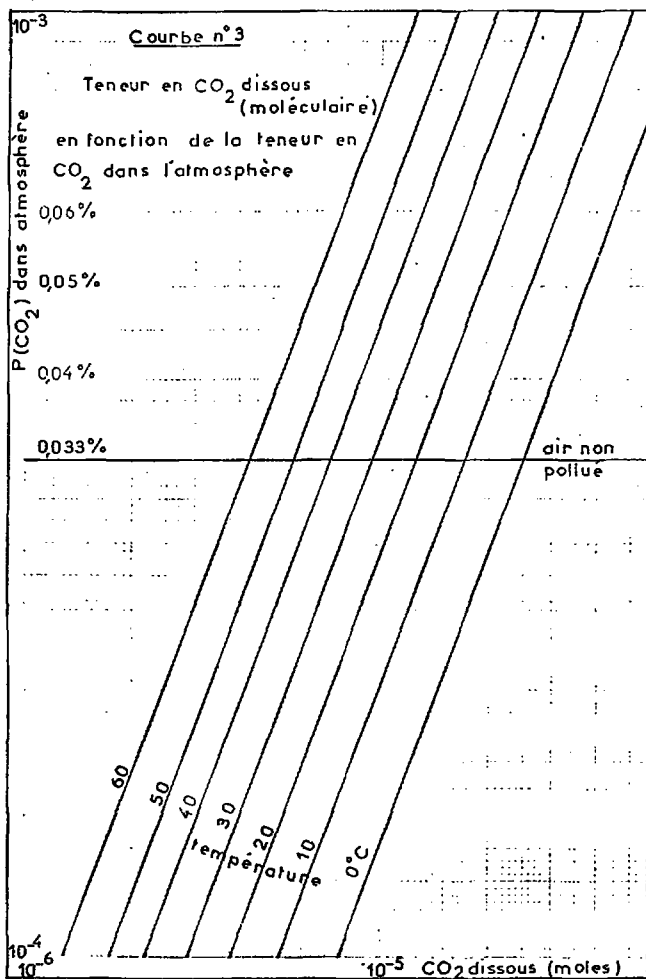
(Salinité 35 g/l)

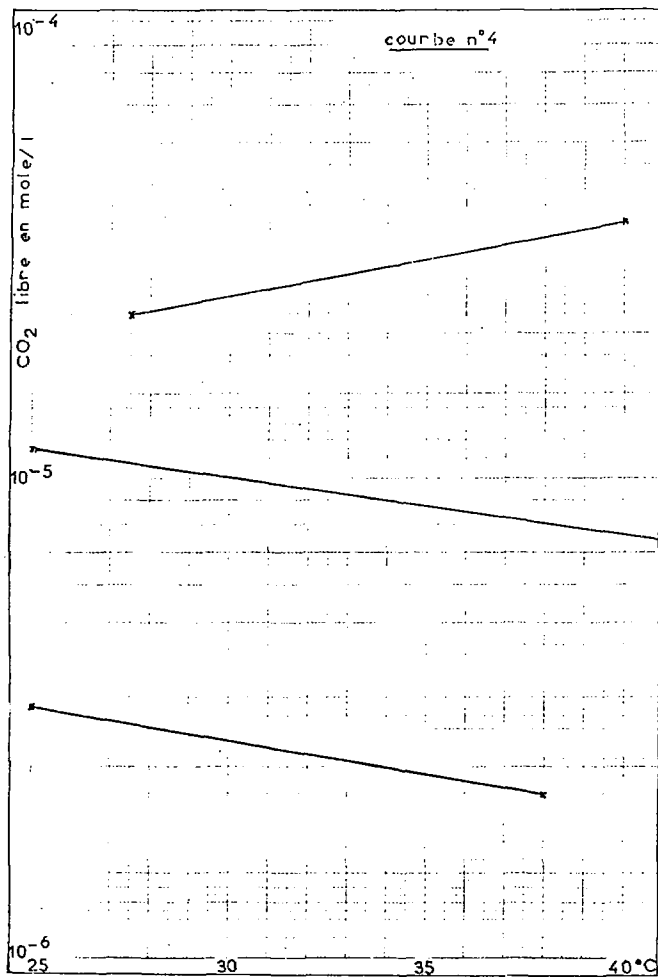
<u>CATIONS</u>			<u>ANIONS</u>		
	g/l	degrés f.		g/l	degrés f.
Na ⁺	10,7	2315	Cl ⁻	19,3	2700
Mg ⁺⁺	1,3	535	SO ₄ ⁻⁻⁻	2,7	285
Ca ⁺⁺	0,4	100	CO ₃ H ⁻	0,1	10
K ⁺	0,4	50	Br ⁻	0,06	5
		<hr/>			<hr/>
		3000			3000

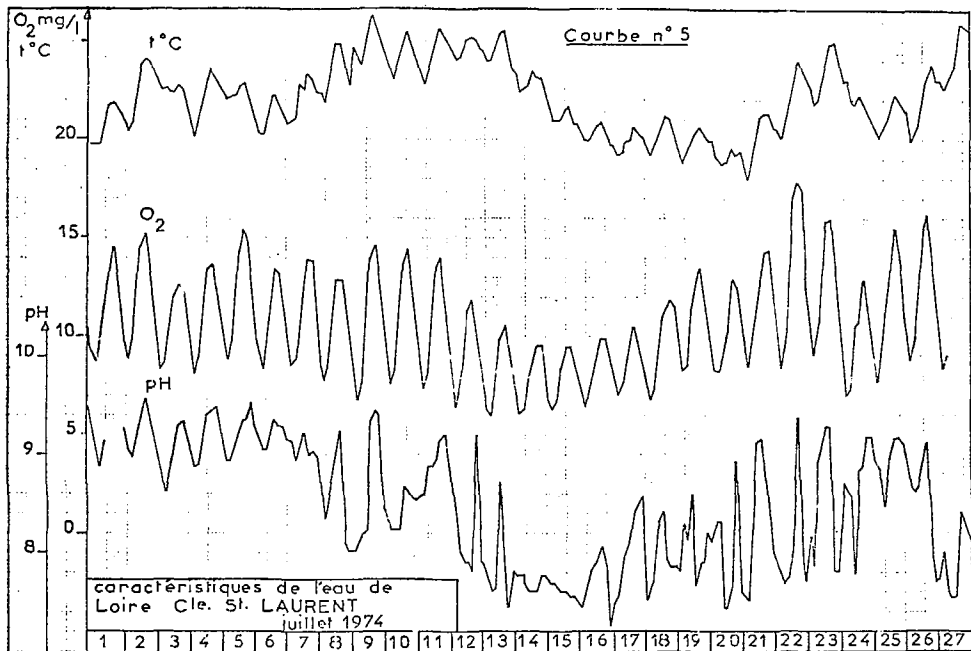
Figure n°2

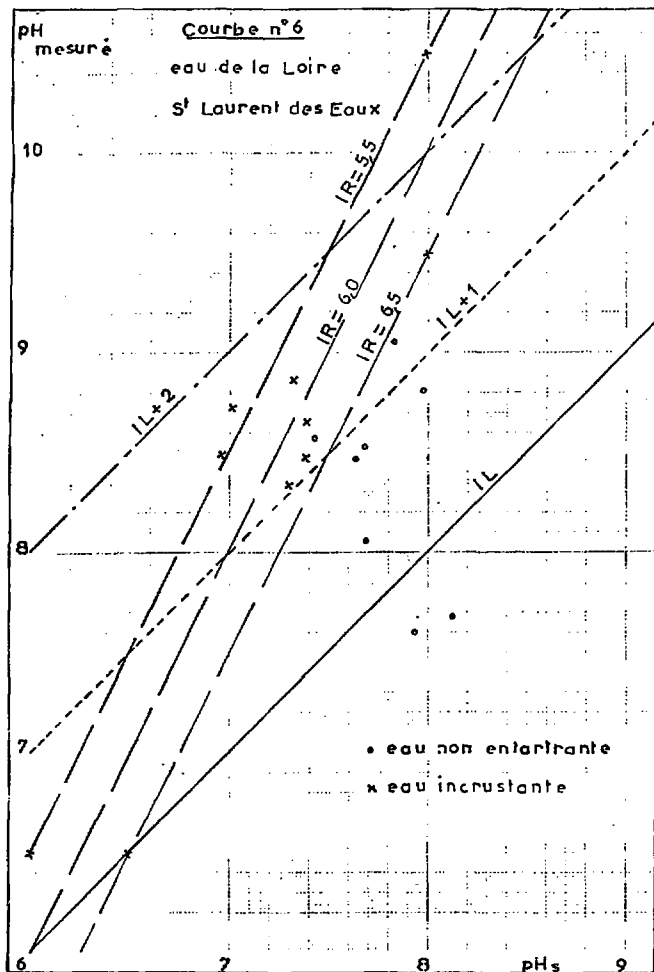
Schéma d'un circuit de
réfrigération atmosphérique









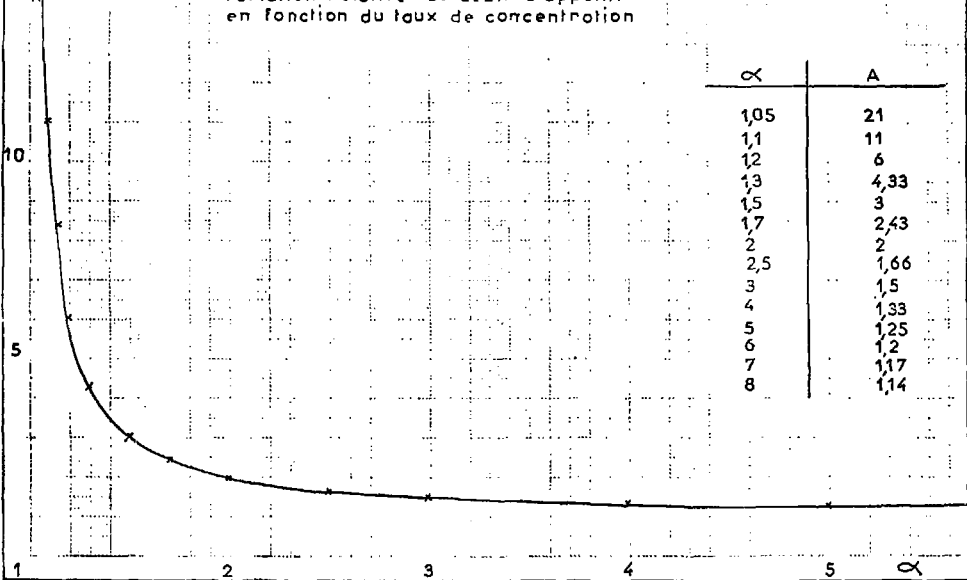


15
m³
h

Appoint
 $= \frac{Q_p}{Q_c - 1}$

Courbe n°7

Variation relative du débit d'appoint
en fonction du taux de concentration



α	A
1,05	21
1,1	11
1,2	6
1,3	4,33
1,5	3
1,7	2,43
2	2
2,5	1,66
3	1,5
4	1,33
5	1,25
6	1,2
7	1,17
8	1,14

9-21