

Les vésicules d'eau polluent la vapeur et la rendent érodante vis à vis des parois qu'elles peuvent rencontrer.

Les minéraux et les MES quant à eux, sont susceptibles de se déposer en aval lors d'une surchauffe de la vapeur ou d'être entraînés dans le flux de vapeur la rendant impropre à certaines utilisations (dans le cas du turbinage ces sels sont extrêmement dangereux car ils induisent un balourd du rotor pouvant aller jusqu'à sa rupture).

Le **primage** est le transfert de grandes quantités en gouttelettes d'eau dans la vapeur (mousse et brume), qui baisse le rendement énergétique de la vapeur et entraîne des dépôts de cristaux de sels sur les surchauffeurs et dans les turbines. Le primage peut être causé par une mauvaise construction de la chaudière, des régimes excessifs, ou des fluctuations soudaines en demande de vapeur. Le primage est parfois aggravé par les impuretés dans l'eau des chaudières.

Certains mécanismes d'entraînement de gouttes d'eau de chaudière dans la vapeur ont toujours lieu. Quand le transfert est trop excessif, les solides portés par la vapeur entraînent la formation de dépôts. Ces accumulations ont une composition similaire de celle des solides dissous dans l'eau de chaudière. Le primage est couramment causé par de hauts niveaux de transfert de l'eau. Ces conditions mènent souvent à une rupture des tuyaux des surchauffeurs.

Le primage peut avoir pour origine :

- la présence de produits tensioactifs qui en abaissant la tension superficielle augmente le moussage
- la présence de MES,
- une viscosité de l'eau trop élevée,

Chapitre III : Traitement des eaux de refroidissements

III.1. Les Circuits de refroidissement

Dans un processus industriel de refroidissement, on peut distinguer deux étapes :

- □ transfert de la chaleur à évacuer vers un fluide de refroidissement par contact direct ou plus généralement indirect grâce à des équipements d'échange thermique ;
- □ transfert des calories du fluide de refroidissement vers le milieu environnant.

Les principaux équipements à refroidir sont les :

- □ condenseurs et échangeurs thermiques ;
- □ réfrigérants d'huile, d'air, de gaz, de liquides ;
- □ moteurs, compresseurs ;
- □ hauts-fourneaux, fours, laminoirs, coulées continues, convertisseurs ;
- □ réacteurs chimiques ;

Le comportement de ces appareils dépend :

- de leur type de construction (tubulaire, à plaques...)
- du mode de circulation de l'eau (interne, externe, vitesse...)
- des métaux en contact avec l'eau (acier, inox, cuivre et alliages, aluminium...)
- des matériaux utilisés (béton, bois...) dans l'équipement du circuit.

Trois cas peuvent se présenter (figure III.1) ; l'eau chaude :

- est rejetée directement en mer, en rivière ou à l'égout : c'est le **circuit ouvert** ;
- est refroidie par contact avec un fluide secondaire (air ou eau) et retourne sans contact avec l'air aux appareils à refroidir : c'est le **circuit fermé** ;
- est refroidie par une évaporation partielle dans un réfrigérant atmosphérique, puis retourne aux appareils : c'est le circuit **semi-ouvert**.

Les circuits ouverts qui nécessitent de grandes quantités d'eau et génèrent une « pollution thermique » importante sont aujourd'hui souvent limités à des systèmes anciens ou à l'utilisation d'eau de mer.

Dans les circuits fermés, c'est-à-dire clos et sans évaporation, l'appoint d'eau est très faible (fuites) mais l'efficacité thermique est limitée. C'est pourquoi ils sont surtout utilisés pour de petits circuits ou des applications spéciales.

Les circuits semi-ouverts sont donc les plus utilisés car ils ont un impact environnemental moindre que les circuits ouverts et ils sont plus économiques que les circuits fermés.

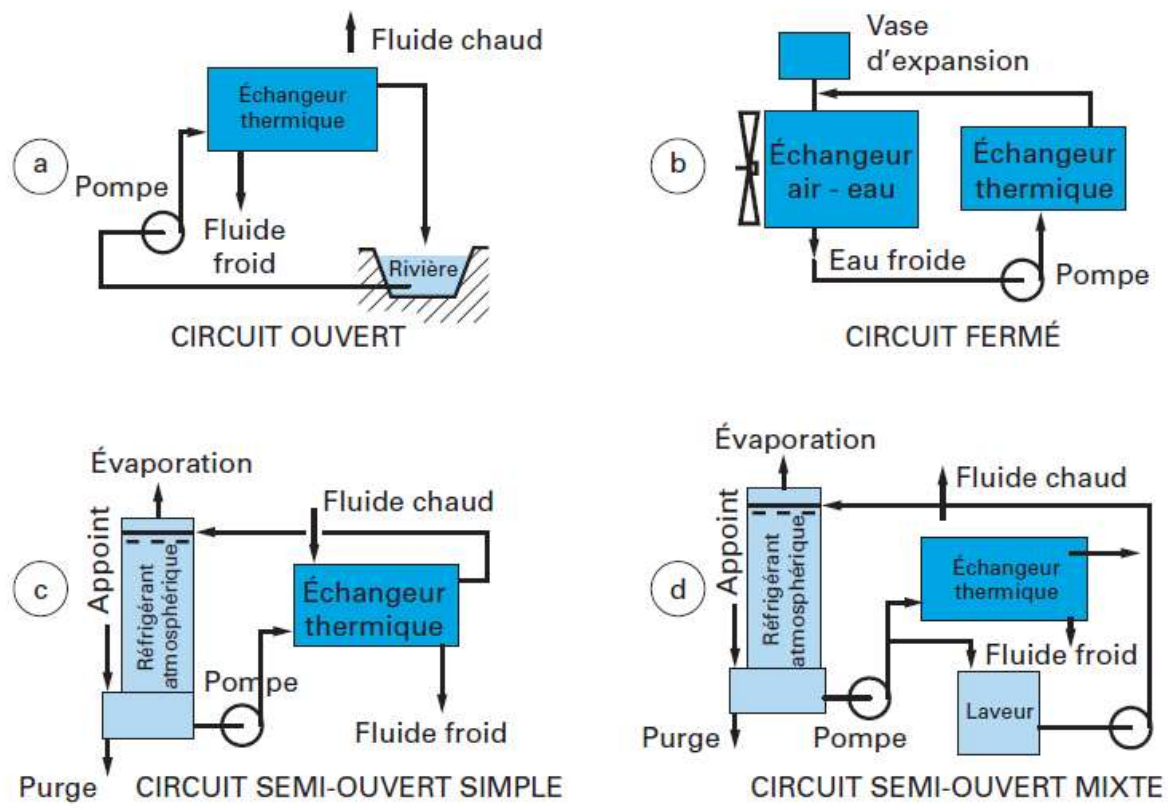
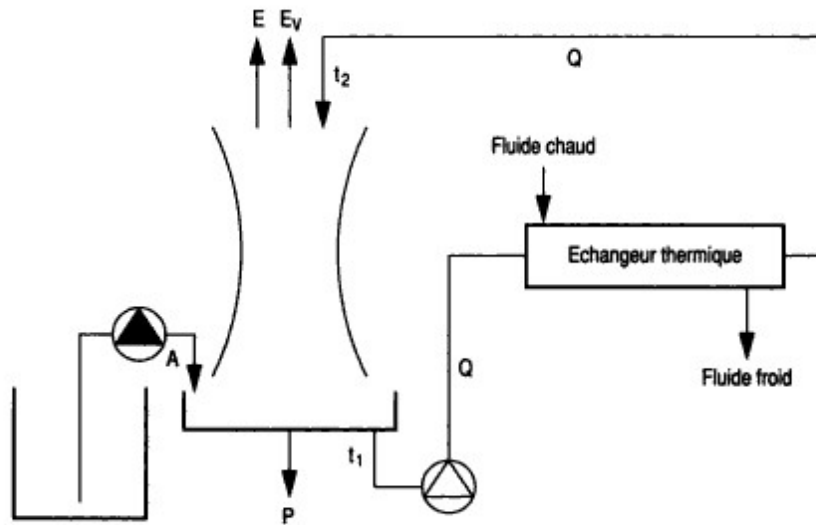


Figure. III.1. Les différents circuits de refroidissement



- | | |
|---|--|
| A = Appoint ($m^3 \cdot h^{-1}$) | t_1 = Température à la sortie du réfrigérant ($^{\circ}C$) |
| Q = Débit recyclé ($m^3 \cdot h^{-1}$) | t_2 = Température à l'entrée du réfrigérant ($^{\circ}C$) |
| E = Evaporation ($m^3 \cdot h^{-1}$) | D = Purges totales ($m^3 \cdot h^{-1}$) |
| E_v = Entraînement vésiculaire ($m^3 \cdot h^{-1}$) | C = Taux de concentration |
| P = Purge de déconcentration ($m^3 \cdot h^{-1}$) | |

Fig. 73 Circuit semi-ouvert avec réfrigérant atmosphérique.

- **Débit de circulation** : Q ($m^3.h^{-1}$).

- **Ecart de température** : $\Delta t = t_2 - t_1$

C'est la différence entre les températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de la tour de réfrigération.

- **Puissance du réfrigérant** : W ($kcal.h^{-1}$)

Elle s'exprime par le produit : $W = 1\ 000\ Q\ \Delta t$.

- **Température maxi** : ($^{\circ}C$)

Température du film d'eau («température de peau») au contact de la paroi la plus chaude du circuit.

- **Débit d'évaporation** : E ($m^3.h^{-1}$)

C'est le débit d'eau évaporée à la tour pour refroidir l'eau du circuit. Ce débit d'évaporation est constitué par de l'eau pure qui n'entraîne aucun sel dissous. Il est estimé par la formule approchée :

$$E = \frac{Q}{560} \Delta t$$

560 kcal.kg correspondant à la valeur de la chaleur latente de vaporisation de l'eau généralement admise (et souvent ramenée à 500 dans les estimations).

- **Débit d'entraînement vésiculaire** : E_v ($m^3.h^{-1}$)

C'est le débit d'eau entraînée dans l'atmosphère sous forme de gouttelettes finement divisées.

Cette eau, contrairement à l'eau évaporée, possède la même composition chimique que l'eau du circuit et est, de ce fait, prise en compte dans le calcul des purges.

E_v varie en fonction de la conception des tours de refroidissement.

Les constructeurs s'attachent à réduire de plus en plus les pertes d'eau par entraînement vésiculaire ; en moyenne on utilise la relation : $E_v = \frac{Q}{1\ 000}$ avec des valeurs pouvant atteindre 0,001 % de Q .

- **Débit de purge** : P ($m^3.h^{-1}$)

L'évaporation entraîne une augmentation de la concentration des sels dissous dans l'eau en circulation.

Pour éviter que cette concentration devienne trop importante, risquant ainsi de provoquer des dépôts divers, on doit extraire et rejeter à l'égout une partie de l'eau en circulation.

● **Déconcentration totale** : D ($m^3.h^{-1}$)

C'est la somme des débits dus à l'entraînement vésiculaire E_v , à la purge P y compris les différentes pertes en eau qui peuvent exister dans un circuit (fuites parasites ou incontrôlées, etc.) :

$$D = E_v + P$$

● **Débit d'appoint** : A ($m^3.h^{-1}$)

Il compense l'ensemble des pertes d'eau dans le circuit, à savoir évaporation + déconcentration totale :

$$A = E + D$$

● **Temps de résidence** : T

Il correspond au temps au bout duquel la concentration en produit injecté à l'instant initial T_0 aura diminué de moitié :

$$T = \frac{V}{D} \times \text{Log } 2 \approx 0,7 \frac{V}{D}$$

● **Taux de concentration** : C

C'est le rapport des teneurs en sels dissous entre l'eau du circuit et l'eau d'appoint :

$$C = \frac{\text{Salinité circuit}}{\text{Salinité appoint}}$$

Habituellement, ce taux de concentration est déterminé par la mesure des chlorures facilement dosables qui, du fait de leur solubilité, sont les plus stables dans le circuit (il faut bien sûr tenir compte de tout ajout extérieur de produits comportant des chlorures qui pourraient influencer ces mesures et leur interprétation : apports éventuels d'HCl, eau de Javel, etc.).

On peut établir un bilan matière :

- Salinité de l'eau d'appoint : S ($g.m^{-3}$)
- Salinité de l'eau du circuit : $C \times S$
- Quantité de sels dissous entrant : $S \times A$
- Quantité de sels dissous sortant : $C \times S \times D$.

Ces deux quantités doivent être égales :

$$S \times A = C \times S \times D$$

d'où :
$$C = \frac{A}{D}$$

et, puisque $A = E + D$:

$$D = \frac{E}{C - 1}$$

D'une manière générale les rejets des installations de refroidissements se font vers le milieu naturel (lacs, rivière, ...) ou vers une station d'épuration locale ou via un réseau d'égouts.

Tableau 6. Effet sur l'augmentation et la diminution du débit de purge

Effet sur	D'une augmentation du débit de purge	D'une diminution du débit de purge
Le rapport de concentration	→	↗
Le temps d'action donné aux produits	→	↗
Le temps d'adaptation donné aux bactéries	→	↗
Le temps de demi-séjour	→	↗
Les consommations d'eau	→	↘

Problèmes posés par circuits de refroidissements

L'entartrage et la corrosion provoquent une dégradation d'état de surface, et donc un accroissement du risque de formation de biofilm.

Cette protection combinée dépend évidemment des températures attendues par l'eau et de la chimie du circuit, mais aussi de tous les matériaux en contact avec l'eau (échangeur, pompes tuyauterie...).

Procédé dit « équilibre Natural »

Ce procédé consisté à régler le pH et TAC de l'eau en circulation, de façon à ce qu'elle soit à l'équilibre Tartre-Corrosion.

L'équilibre calco-carbonique : indice langelier (IL) voisin de zéro

$$IL = pH - pH_s$$

pH_s : à l'équilibre de CO₂ (sans réaction chimique)

IL > 0 Eau incrustante (entartrante)

IL < 0 Eau agressive

IL = 0 Eau saturée en CaCO₃

Ce procédé se fait par introduction de réactif, les acides ou alcalins et par limitation de taux de concertation.

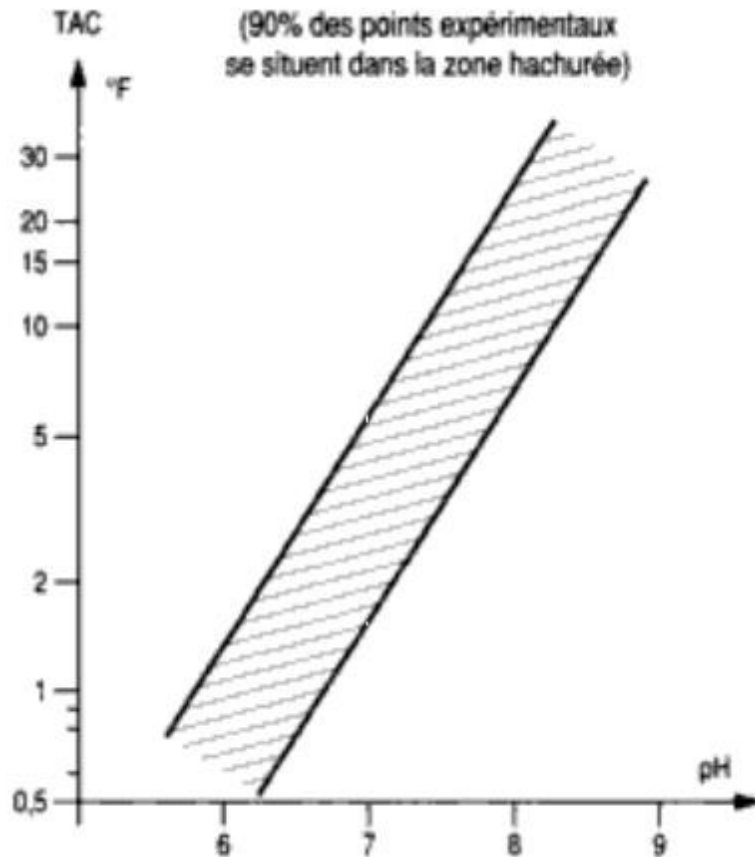


Figure : pH de l'eau de circulation dans circuit de refroidissement.

Ce procédé est réduisant par sa simplicité, mais il présente des limites importantes en particulier

- la diversité des températures en circuit fait que l'eau ne peut être à l'équilibre en tous points ;
- maintenir un taux de purge important pour limiter la concentration en sels dissous de l'eau en circulation ;
- la perte de CO_2 au niveau de la tour déstabilise l'équilibre de l'eau.

L'entartrage

L'entartrage est un phénomène qui correspond à la précipitation de sels minéraux en fonction de leur solubilité et de leur concentration.

L'entartrage entraîne :

- une dégradation d'état des surfaces ;
- des pertes d'échange thermique ;
- des risques de corrosion sous les dépôts formés ;
- une augmentation des besoins de la maintenance des installations.

L'entartrage intervient lors de :

- l'élévation de la température ;
- l'augmentation de la concentration en sels ;
- la variation du **pH** ;
- diminution de la teneur en CO₂.

Le phénomène est basé sur la formation de dépôts de sels insolubles à la surface des matériaux le plus souvent par modification de l'équilibre calco-carbonique :



Il peut s'agir également du dépassement du seuil de solubilité d'un sel : dès que l'on atteint dans l'eau une quantité suffisante d'ions, un précipité peut se former. Dans le cas du sulfate de calcium, par exemple, le produit de la concentration des ions est supérieur à la constante de solubilité, il y aura précipitation des sels excédentaires.



D'une manière générale les tartres rencontrés sont listés ci-dessous :

- carbonate de calcium : faible produit de solubilité / dépôts durs et adhérents ;
- sulfate de calcium : précipitation à température élevée / dépôts durs et adhérents ;
- tartres silicatés : en fonction du **pH** et de la température, on peut former des silicates de calcium ou magnésium qui vont donner des tartres difficilement éliminables ;
- phosphates de calcium : en présence de sels de dureté, les phosphates forment des boues relativement peu solubles ;
- hydroxyde de magnésium Mg(OH)₂ : dépôts non adhérents.



Inhibiteurs d'entartrage

- les chélatants
- les polyphosphates
- les polymères

- les phosphonates.

Procédés avec inhibiteur de corrosion à pH contrôlé

Principe :

Ils consistent :

- 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).
- à introduire simultanément dans le circuit un inhibiteur qui s'oppose à la corrosion par formation d'un film producteur adhérent, homogène, non poreux et ne perturbe pas l'échange thermique.
- à 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 (mixte), avec protection anodique et cathodique à des doses en circuit de quelques dizaines de mg/L.

Il existe trois familles de base

- les chromates – Zinc
- les polyphosphates – Zinc
- les organophosphates – Zinc