

Chapitre II : Traitement des eaux de chaudières

II.2. Spécifications des eaux de chaudières (caractéristiques, propriétés)

II.2.1. Problèmes des eaux d'appoint

II.3. Traitement des eaux de chaudières

II.3.1. Adoucissement par échange d'ions

II.3.2. Déminéralisation

II.3.3. Dégazage

II.3.4. Inhibiteurs de corrosion

II.3.4. Conditionnement anti-primage

II.4. Filières de traitement.

II.1. Généralités sur les chaudières à vapeur

Les types de chaudières

Chaudière vapeur à tubes de fumées

Dans la **chaudière vapeur à tubes de fumées**, la flamme et les fumées qui résultent de la combustion de gaz ou de fioul, circulent du brûleur jusqu'à la cheminée dans un faisceau de **tubes immergés** dans une calandre formant le réservoir d'eau. La **vapeur** est ainsi produite en chauffant ce volume d'eau à l'aide des fumées produites dans les **tubes de fumées immergés**. C'est la technique la plus classique pour la production de **vapeur saturée**, d'eau ou de vapeur (vapeur surchauffée dans quelques installations spécifiques). Les chaudières à tubes de fumées sont installées dans des process où la pression ne dépasse pas 30 bars, comme dans l'industrie agro-alimentaire, pharmaceutique, laiterie ou les blanchisseries.



Figure : Chaudière vapeur à tubes de fumées.

Chaudière à tubes d'eau

Les chaudières vapeur à tubes d'eau se caractérisent par la présence de 1 ballon supérieur et 1 ballon inférieur. Ils sont reliés entre eux par des tubes dans lesquels circulent l'eau, du bas vers le haut par thermosiphon. Les chaudières à tubes d'eau sont réservées à des activités spécifiques comme les centrales thermiques ou les importantes co-génération.

Les chaudières à tubes d'eau ne présentent pas de limite de taille ni de pression mais sont plus chères que les chaudières à tubes de fumées. Elles sont tous combustibles (bois, gaz, fioul, etc..).



Le classement des générateurs se fait selon la forme et la pression

- Générateur à basse pression (BP) : $P < 20$ bars
- Générateur à moyenne pression (MP) : $20 < P < 45$ bars
- Générateur à haute pression (HP) : $P > 45$ bars

Eau d'appoint et eau de retour

L'appareil reçoit de l'eau d'alimentation qui est constituée par une proportion variable de condensat appelée aussi « eau de retour » et d'eau neuve, plus ou moins épurée, dite « eau d'appoint ».

La vapeur, qui s'échappe de la zone de vaporisation, contient fréquemment des vésicules liquides (primage), des gaz (en particulier le gaz carbonique). Aux pressions élevées, elle véhicule des sels volatilés par un véritable « entraînement à la vapeur », tels que de la silice et, aux très hautes températures, des chlorures.

L'eau restée sous forme liquide à la partie inférieure de la chaudière se charge de toutes les substances que contenait l'eau qui a été vaporisée (à l'exception de celles qui ont été entraînées dans la vapeur).

La déconcentration nécessaire est appelée « purge » ou « extraction » qui envoie à l'égout une fraction de cette eau.

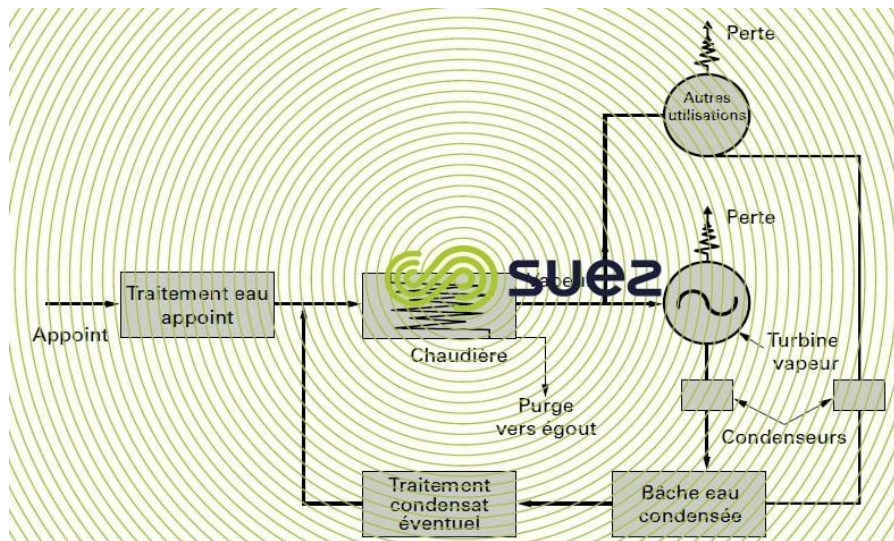


Figure : Eau d'appoint et eau de retour accompagné avec la chaudière

II.2. Problèmes des eaux d'appoint des chaudières

Les eaux d'appoint (ou eaux de remplissage) peuvent poser plusieurs problèmes si elles ne sont pas correctement traitées :

1. Dureté et entartrage

- Présence de calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) → formation de dépôts calcaires.
- Réduction de l'échange thermique → surchauffe et risque d'explosion.

Solution : Adoucissement par résines échangeuses d'ions ou osmose inverse.

2. Corrosion

- Due à l'oxygène dissous (O_2) et au dioxyde de carbone (CO_2).
- Formation de rouille et perforation des tubes.

Solution : Dégazage thermique ou chimique (ajout de sulfite de sodium Na_2SO_3).

3. Conductivité et dépôts - TDS

- Accumulation de sels dissous (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+) → risque de moussage et de corrosion.
- Solution :** Purges régulières et contrôle de la conductivité.

4. Présence de silice (SiO_2)

- Formation de dépôts très durs sur les surfaces d'échange thermique.

Solution : Déminéralisation ou traitement spécifique.

Traitements recommandés pour l'eau d'appoint

- Filtration : élimination des particules en suspension.
- Adoucissement : élimination de la dureté (Ca^{2+} , Mg^{2+}).
- Dégazage thermique ou chimique : élimination de l' O_2 et CO_2 .
- Déminéralisation (osmose inverse ou échange d'ions) : réduction des sels dissous.

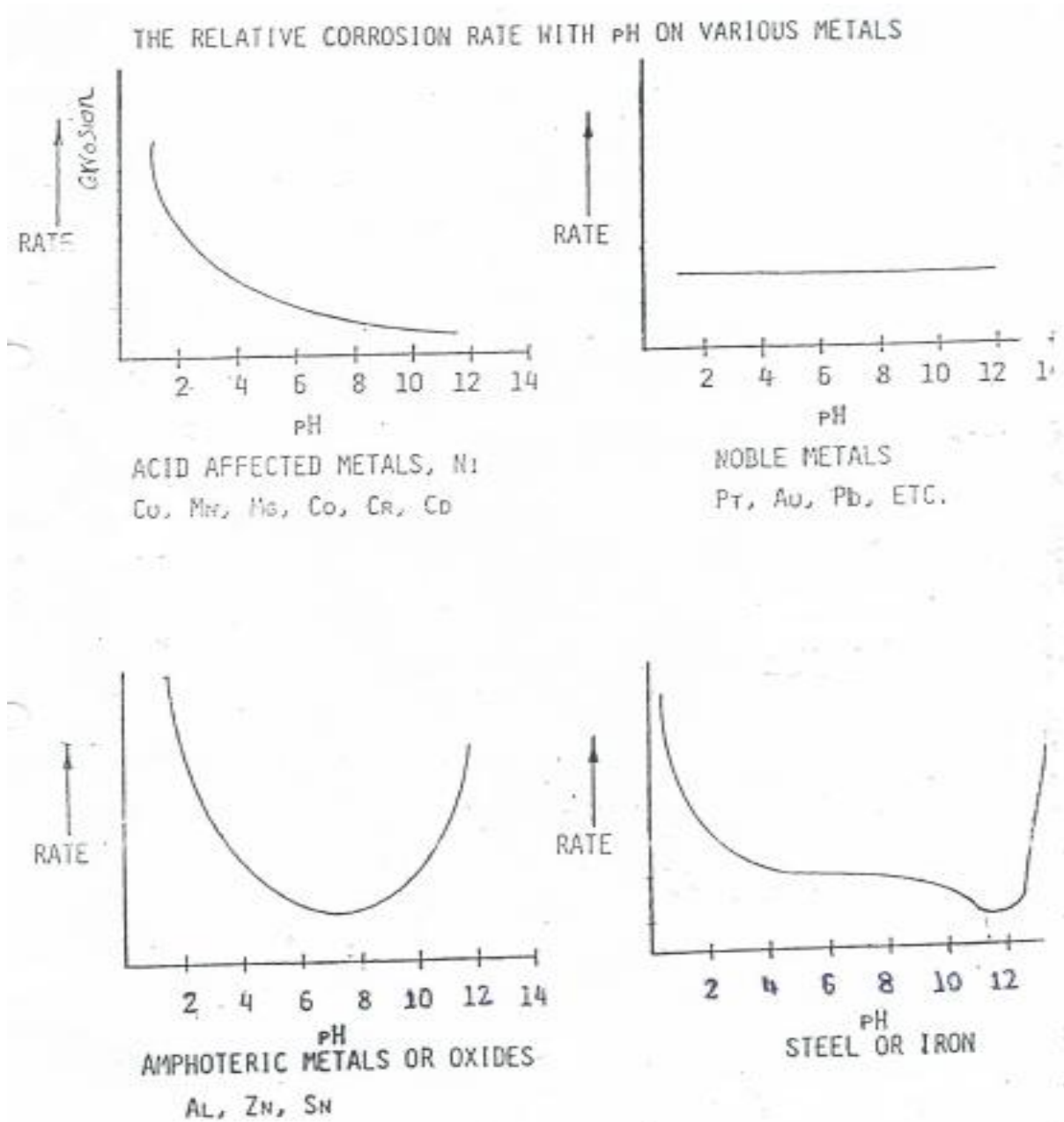


Figure : Taux de Corrosion (Corrosion Rate) selon matériau utilisé.

Filières de Traitement des Eaux de Chaudière

Le traitement des eaux de chaudière est essentiel pour prévenir les dépôts, la corrosion et l'entraînement de l'eau dans la vapeur (primage). Il comprend deux grands types de traitement :

1. Traitement externe (avant l'entrée dans la chaudière).

2. Traitement interne (dans la chaudière elle-même).

A. Traitement Externe

Objectif : Réduire les impuretés avant que l'eau n'entre dans la chaudière.

- Dégazage et Prétraitement Physique
 - Filtration : Élimination des particules solides en suspension.
 - Décantation / Clarification : Précipitation des matières en suspension.
 - Adoucissement (Échange d'ions Na^+ / Ca^{2+} , Mg^{2+}) :
Élimination de la dureté (Ca^{2+} et Mg^{2+}) pour prévenir l'entartrage.
- Osmose inverse (OI) :
 - Élimination des sels dissous et réduction des TDS.
- Dégazage thermique / chimique :
 - Élimination de l'oxygène dissous (O_2) et du CO_2 pour limiter la corrosion.

B. Traitement Interne (Dans la Chaudière)

Objectif : Protéger la chaudière contre l'entartrage, la corrosion et la pollution de la vapeur.

Problèmes des Eaux d'Appoint des Chaudières

L'eau d'appoint utilisée dans les chaudières doit être soigneusement traitée pour éviter divers problèmes pouvant affecter la performance et la durée de vie des équipements.

Postes de décarbonatation et d'adoucissement des chaudières basses et moyenne pression

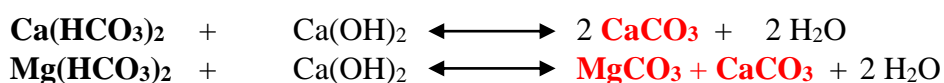
Le traitement minimum est généralement un traitement d'adoucissement, de façon à obtenir un TH aussi voisin que possible de zéro.

Décarbonatation

Aux basses pressions, on utilise l'adoucissement simple tandis qu'aux pressions intermédiaires, décarbonatation, désiliciage éventuel et adoucissement sont combinés selon différentes méthodes. Les principales sont :

Adoucissement à la chaux froide

L'adoucissement par précipitation réalisé à température ambiante est appelé adoucissement à la chaux froide. Lorsque de la chaux hydratée, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, est ajoutée à l'eau traitée, les réactions suivantes se produisent :



Adoucissement à la chaux tiède

Le procédé d'adoucissement à la chaux chaude fonctionne dans une plage de température de 49 à 60 °C (120 à 140 °F). Les solubilités du calcium, du magnésium et de la silice sont

réduites par l'augmentation de la température. Par conséquent, ils sont éliminés plus efficacement par l'adoucissement à la chaux chaude que par l'adoucissement à la chaux froide. Ce procédé est utilisé aux fins suivantes :

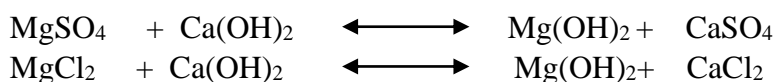
- *Récupérer la chaleur perdue comme mesure d'économie d'énergie.* L'eau à traiter est chauffée par un flux de déchets, tel que la purge de chaudière ou la vapeur d'échappement à basse pression, pour récupérer la chaleur contenue.
- *Pour préparer la charge d'un système de déminéralisation.* Les niveaux inférieurs de calcium, de magnésium et surtout de silice réduisent la charge ionique sur le déminéralisateur lorsque l'on utilise de l'eau adoucie à la chaux chaude plutôt que de l'eau adoucie à la chaux froide. Cela peut réduire à la fois les coûts d'investissement et d'exploitation du déminéralisateur. Cependant, la plupart des résines anioniques à base forte ont une limite de température de 140 °F (60 °C) ; par conséquent, des augmentations supplémentaires de température ne sont pas acceptables pour augmenter l'efficacité de la réduction des contaminants.
- *Pour réduire le débit de purge des systèmes de refroidissement.* La purge de la tour de refroidissement peut être traitée avec de la chaux et du carbonate de sodium ou de la soude caustique pour réduire les niveaux de calcium et de magnésium afin qu'une grande partie de la purge puisse être renvoyée dans le système de refroidissement. Les niveaux de silice dans l'eau de refroidissement en recirculation sont également contrôlés de cette manière.

Dans tout procédé à la chaux chaude ou à la chaux-soude chaude, le contrôle de la température est essentiel car des variations de température aussi faibles que 4°F/h (2°C/h) peuvent provoquer un transfert important des précipités d'adoucisseur.

Si l'on maintient un contrôle chimique approprié sur l'alimentation en chaux, la dureté calcique peut être réduite à 35-50 ppm. La réduction du magnésium est fonction de la quantité d'excès d'alcalinité hydroxyle (OH⁻) maintenue.

La dureté calcique non carbonatée ou permanente, si elle est présente, n'est pas modifiée par le traitement à la chaux seule. Si la dureté magnésienne non carbonatée est présente en quantité supérieure à 70 ppm et qu'un excès d'alcalinité hydroxyle d'environ 5 ppm est maintenu, le magnésium sera réduit à environ 70 ppm, mais le calcium augmentera proportionnellement à la réduction du magnésium.

Par exemple, dans le traitement à la chaux froide d'une eau contenant 110 ppm de calcium, 95 ppm de magnésium et au moins 110 ppm d'alcalinité (le tout exprimé en carbonate de calcium), le calcium pourrait théoriquement être réduit à 35 ppm et le magnésium à environ 70 ppm. Cependant, on s'attendrait à ce que l'eau traitée contienne 25 ppm de calcium supplémentaires en raison des réactions suivantes



Adoucissement de l'Eau : Élimination du Magnésium (Mg²⁺) et du Calcium (Ca²⁺)

Mécanisme de l'Adoucissement

- L'eau dure traverse une colonne remplie de résines cationiques en cycle sodique.

- Les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont capturés par la résine, qui libère à leur place des ions Na^+ .
- L'eau qui en ressort est adoucie et prête à l'emploi.
- Lorsque la résine est saturée en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , elle est régénérée par une solution de chlorure de sodium (NaCl).

Avantages

- Réduction significative du risque d'entartrage des chaudières.
- Augmentation de l'efficacité énergétique en limitant les dépôts.
- Prolongation de la durée de vie des installations.

Limitations

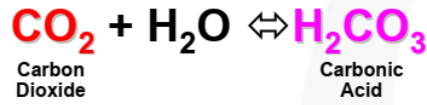
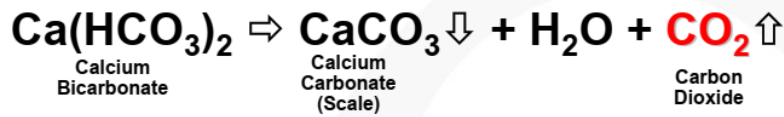
- Ne supprime pas les autres sels dissous (chlorures, sulfates, silices, etc.).
- Génère des rejets riches en sodium, pouvant poser des problèmes environnementaux.
- Peut nécessiter un post-traitement si une déminéralisation complète est requise.



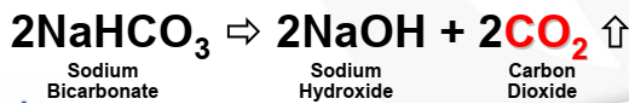
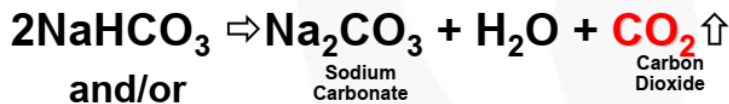
Figure : Système d'adoucissement : Deux adoucisseurs + Un réservoir de régénération de NaCl .

Generation of Carbon Dioxide

Hard makeup water



Softened makeup water



Échangeuses d'ions par des résines

Les groupes ionisables attachés à la bille de résine déterminent la capacité fonctionnelle de la résine. Les résines de traitement des eaux industrielles sont classées en quatre catégories de base :

- **Résines Cationiques d'acide Fort (CF)** éliminent les cations en transformant les sodiums en protons.
- **Résines Cationiques d'acide faible (Cf)** élimine les cations associés aux bicarbonates.
- **Résines Anioniques de base Forte (AF)** éliminent tous les anions. On les utilise pour éliminer les carbonates et les silicates.
- **Résines Anioniques de base faible (Af)** éliminent avec une grande efficacité les anions des acides forts (sulfates, nitrates et chlorures).

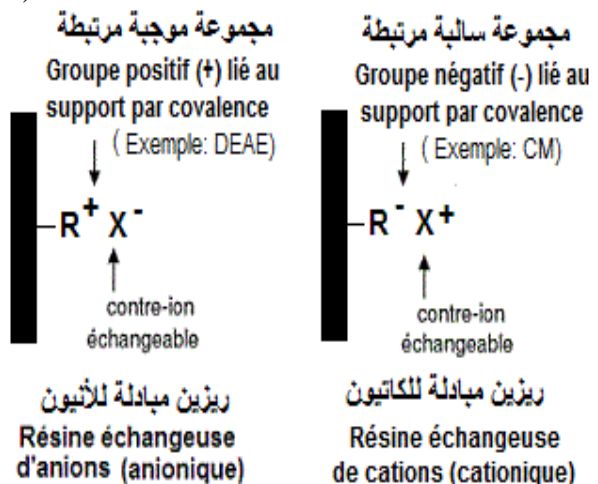


Figure : Les résines.

Les résines de cations fortement acides peuvent neutraliser les bases fortes et convertir les sels neutres en leurs acides correspondants. Les résines d'anions fortement basiques peuvent neutraliser les acides forts et convertir les sels neutres en leurs bases correspondantes. Ces résines d'anions fortement basiques sont des amines quaternaires. Leur squelette est soit polystyrénique, soit acrylique, à structure gel ou macroporeuse.

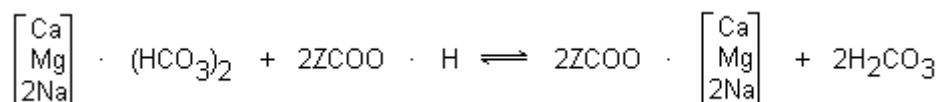
Les résines de cations fortement acides et d'anions fortement basiques sont capables de neutraliser respectivement les bases fortes et les acides. Ces résines sont utilisées pour la désalcalinisation (bicarbonates, carbonates et hydroxydes), la déminéralisation partielle ou (en combinaison avec des résines fortes) la déminéralisation complète.

Les résines de cations fortement acides tirent leur fonctionnalité des groupes d'acide sulfonique (HSO_3^-) $\text{R-S}_3\text{OH}$. Lorsqu'elles sont utilisées dans la déminéralisation, les résines cationiques fortement acides éliminent presque tous les cations de l'eau brute, les remplaçant par des ions hydrogène.

La réaction d'échange est réversible. Lorsque sa capacité est épuisée, la résine peut être régénérée avec un excès d'acide minéral.

Les échangeurs de cations fortement acides fonctionnent bien dans toutes les plages de pH. Ces résines ont trouvé une large gamme d'applications. Par exemple, elles sont utilisées dans le cycle du sodium (le sodium étant l'ion mobile R-Na) pour l'adoucissement et dans le cycle de l'hydrogène pour la décationisation (R-H).

Les résines échangeuses de cations faiblement acides tirent leur activité d'échange d'un groupe carboxylique (R-COOH). Ils présentent une faible acidité comme l'acide acétique, ayant la capacité d'échanger avec des bases telles que NaOH et des sels d'acides faibles tels que NaHCO_3 . Lorsqu'elles fonctionnent sous forme hydrogène, les résines de cations faiblement acides éliminent les cations associés à l'alcalinité, produisant de l'acide carbonique, comme illustré :



Ces réactions sont également réversibles et permettent de ramener la résine de cations faiblement acides épuisée à sa forme régénérée. Les résines de cations faiblement acides ne sont pas capables d'éliminer tous les cations présents dans la plupart des approvisionnements en eau. Leur principal atout est leur efficacité de régénération élevée par rapport aux résines de cations fortement acides. Cette efficacité élevée réduit la quantité d'acide nécessaire pour régénérer la résine, réduisant ainsi l'acide résiduaire et minimisant les problèmes d'élimination.

Les résines cationiques à faible acidité sont principalement utilisées pour l'adoucissement et la désalcalinisation des eaux très dures et très alcalines, souvent en association avec les systèmes de polissage à cycle de sodium cations fortement acides. Dans les systèmes de déminéralisation complète, l'utilisation combinée de résines de cations faiblement acides et Cation fortement acide permet d'obtenir l'économie de la résine de cations faiblement acide plus efficace ainsi que les capacités d'échange complètes de la résine de Cation fortement acide.

Les résines d'anion fortement basique tirent leur fonctionnalité des groupes fonctionnels ammonium quaternaire. Deux types de groupes ammonium quaternaire, appelés Type I et Type II, sont utilisés. Les sites de Type I ont trois groupes méthyle :

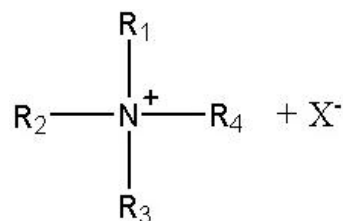
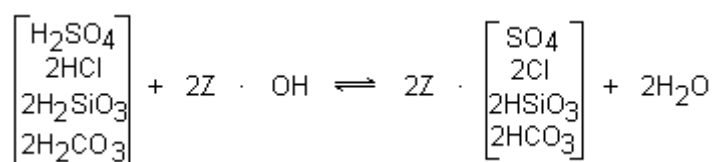


Figure : Résine d'anions fortement basiques (amine quaternaire).

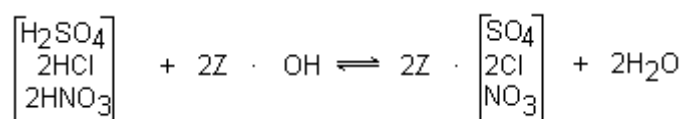
Dans une résine de type II, l'un des groupes méthyle est remplacé par un groupe éthanol. La résine de type I a une plus grande stabilité que la résine de type II et est capable d'éliminer davantage d'acides faiblement ionisés. Les résines de type II offrent une plus grande efficacité de régénération et une plus grande capacité pour la même quantité de produit chimique régénérant utilisé.

Sous forme d'hydroxyde, les résines d'anion fortement basiques éliminent tous les anions couramment rencontrés, comme indiqué ci-dessous :



Comme pour les résines cationiques, ces réactions sont réversibles, permettant la régénération de la résine avec un alcali fort, comme la soude caustique, pour ramener la résine à la forme hydroxyde.

La fonctionnalité des résines à base faible provient des groupes amines primaires (R-NH₂), secondaires (R-NHR') ou tertiaires (R-NR'₂). Les résines d'anion faiblement basiques éliminent facilement les acides sulfurique, nitrique et chlorhydrique, comme représenté par la réaction suivante :



Des exemples

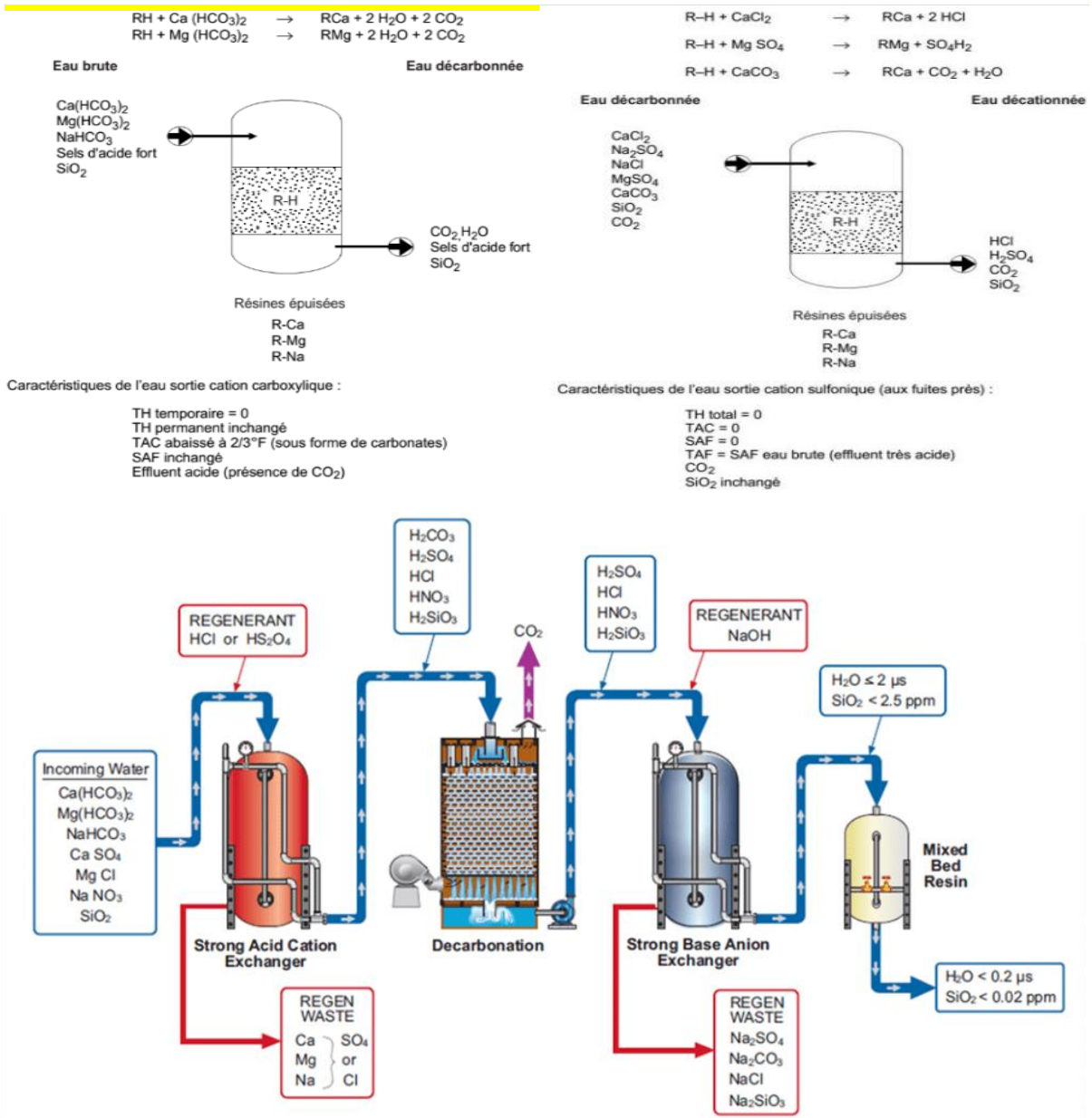


Tableau : Résultats à attendre des procédés de décarbonation et d'adoucissement.

		TA °F	TAC (moyen) °F	Salinité totale °F	pH	SiO_2 en $mg \cdot L^{-1}$
Épuration $FeCl_3$ + chaux à froid + adoucissement		0,5 à 2	2 à 4	ST-TAC + 3 à 6	8,5 à 10	inchangée
Épuration précédente + aluminat de sodium		id	id	id	8,5 à 10	2 à 5
Épuration chaux + magnésie à chaud + adoucissement		1 à 1,5	2 à 5	ST-TAC	8,5 à 10	1 à 2
Résine carboxylique + adoucissement avec élimination CO_2 intermédiaire	Sans correction pH		1 à 3	ST-TAC + 1 à 3	6 à 7	
	Avec correction pH	0	2 à 5	ST-TAC + 2 à 2,5	7,5 à 8,5	inchangée

Rappel : 1 °F = $10 mg \cdot L^{-1} CaCO_3 = 1/5 meq \cdot L^{-1}$
 ST : salinité de l'eau brute (exprimée en °F); TAC : TAC de l'eau brute (exprimée en °F).

Procédés membranaires

Les procédés membranaires courants comprennent l'ultrafiltration (UF), l'osmose inverse (RO), l'électrodialyse (ED) et l'électrodialyse inverse (EDR). Ces procédés (à l'exception de l'UF) réduisent la plupart des ions ; les systèmes RO et UF assurent également une réduction efficace des matières organiques et des particules non ionisées. La porosité de la membrane UF étant trop importante pour le rejet des ions, le procédé UF est utilisé pour réduire les contaminants, tels que l'huile et la graisse, et les solides en suspension.

Osmose inverse

L'osmose est le passage d'un solvant à travers une membrane semi-perméable, d'une solution diluée vers une solution concentrée. Ce passage résulte de la force motrice créée par la différence de pression entre les deux solutions. La pression osmotique est la pression qui doit être ajoutée du côté de la solution concentrée afin d'arrêter le passage du solvant à travers la membrane. L'osmose inverse est le processus d'inversion du flux, forçant l'eau à traverser une membrane d'une solution concentrée vers une solution diluée pour produire de l'eau filtrée. La figure 9-1 illustre les processus d'osmose et d'osmose inverse.

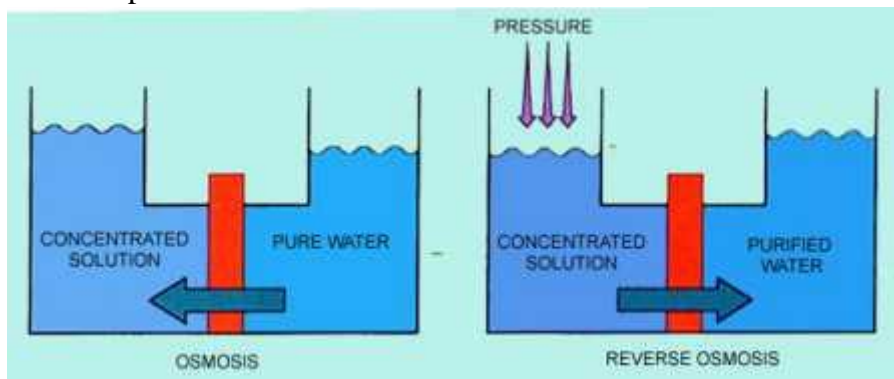
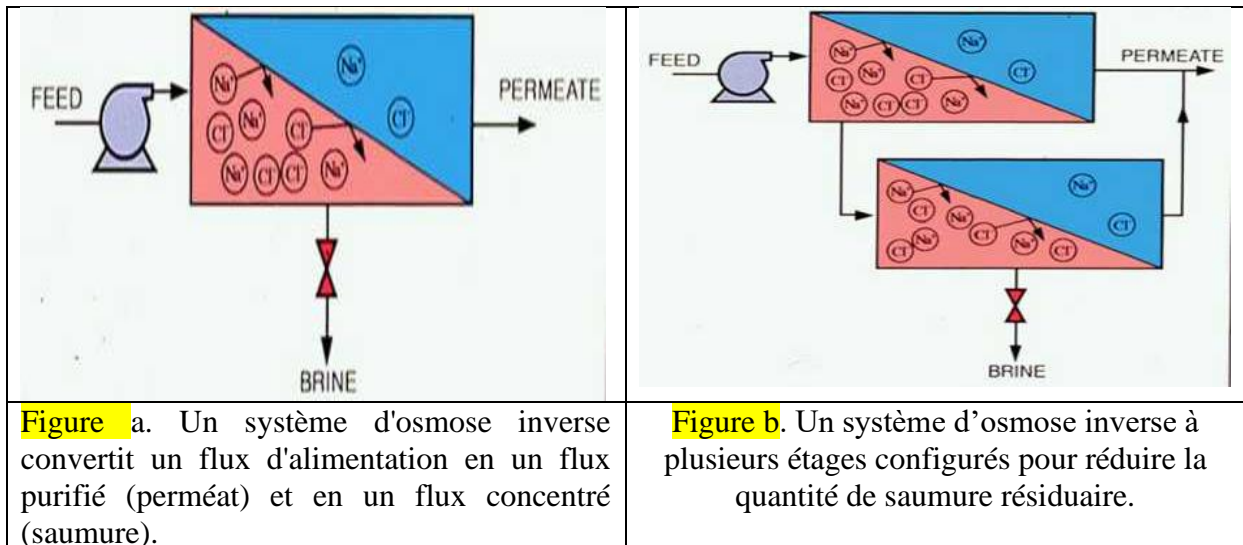


Figure 9-1. Dans le processus d'osmose, l'eau s'écoule à travers une membrane du côté de la solution diluée vers le côté de la solution plus concentrée. Dans l'osmose inverse, la pression appliquée provoque l'écoulement de l'eau de la solution concentrée vers la solution diluée.



Figure : Osmose Inverse (OI)

L'osmose inverse est créée lorsque la pression appliquée à la solution concentrée est suffisante pour surmonter la pression osmotique. Cette pression est fournie par des pompes d'alimentation en eau. Les contaminants concentrés (saumure) sont réduits du côté haute pression de la membrane OI, et l'eau filtrée (perméat) est réduite du côté basse pression. La figure 9-2 est un schéma simplifié d'un processus OI. Les modules de membrane peuvent être étagés dans diverses configurations de conception, produisant le perméat de la plus haute qualité avec la plus petite quantité de déchets. Un exemple de configuration RO à plusieurs étages est illustré à la **figure a et b.**



En règle générale, 95 % des sels dissous sont éliminés de la saumure. Toutes les particules sont éliminées. Cependant, en raison de leur porosité moléculaire, les membranes d'osmose inverse n'éliminent pas les gaz dissous, tels que Cl_2 , CO_2 et O_2 .

Membranes d'osmose inverse. Les deux membranes d'osmose inverse, les plus couramment utilisées dans le traitement des eaux industrielles sont l'acétate de cellulose et le composite polyamide (PA). Actuellement, la plupart des membranes sont enroulées en spirale; cependant, des configurations à fibres creuses sont disponibles. Dans la configuration enroulée en spirale, une membrane en feuille plate et des entretoises sont enroulées autour du tube de collecte du perméat pour produire des canaux d'écoulement pour le perméat et l'eau d'alimentation. Cette conception maximise le débit tout en minimisant la taille du module membranaire.

Les systèmes à fibres creuses sont constitués de minuscules tubes à membrane en forme de cheveux. Les ions sont rejetés lorsque l'eau d'alimentation pénètre dans les parois de ces tubes et le perméat est collecté par le centre creux des fibres. Une saumure concentrée est produite à l'extérieur des fibres contenues dans le boîtier du module.

Tableau 2. Performances des Installations de Déminéralisation pour les Chaudières

Paramètre	Unité	Eau d'Alimentation Avant Déminéralisation	Eau d'Alimentation Après Déminéralisation
pH	-	6.5 - 8.5	8.5 - 10.5
Dureté totale	ppm $CaCO_3$	50 - 500	< 0.1
Conductivité	$\mu S/cm$	500 - 2000	< 10

Teneur en solides dissous (TDS)	mg/L (ppm)	500-2000	< 5 - 20
Oxygène dissous (O ₂)	ppm	2-10	< 0.007
Teneur en silice (SiO ₂)	ppm	5-50	< 0.02
Alcalinité (M)	ppm	50 - 300	< 10
Sodium (Na ⁺)	ppm	20 - 200	< 1
Chlore (Cl ⁻)	ppm	10 - 250	< 0.5
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	ppm	20 - 300	< 1

Le dégazeur (deaerator) - Désaération de l'eau d'alimentation de la chaudière

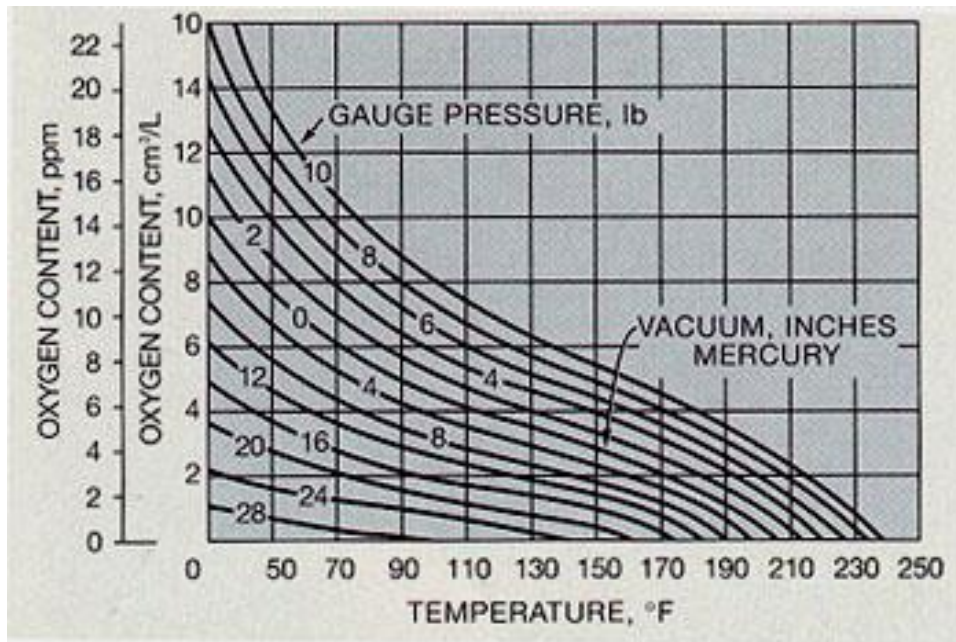
Les gaz dissous normalement présents dans l'eau provoquent de nombreux problèmes de corrosion. Par exemple, l'oxygène présent dans l'eau provoque des piqûres particulièrement graves en raison de leur nature localisée. La corrosion par le dioxyde de carbone est fréquente dans les systèmes de condensation et moins fréquemment dans les systèmes de distribution d'eau. L'eau contenant de l'ammoniac, en particulier en présence d'oxygène, attaque facilement le cuivre et les alliages contenant du cuivre. La corrosion qui en résulte entraîne des dépôts sur les surfaces de transfert de chaleur des chaudières et réduit l'efficacité et la fiabilité.

Les dégazeurs sont utilisés pour chauffer l'eau d'alimentation et réduire l'oxygène et d'autres gaz dissous à des niveaux acceptables. La fatigue due à la corrosion au niveau ou à proximité des soudures est un problème majeur dans les dégazeurs. La plupart des fissures dues à la fatigue due à la corrosion sont le résultat de facteurs mécaniques, tels que les procédures de fabrication, les soudures de mauvaise qualité et l'absence de soudures à détente de contrainte. Des problèmes opérationnels tels que les coups de bélier/coup de vapeur peuvent également être un facteur.

Un contrôle efficace de la corrosion nécessite les pratiques suivantes :

- Suivi régulier du fonctionnement
- Minimisation des contraintes au démarrage
- Maintien de niveaux de température et de pression stables
- Contrôle de l'oxygène dissous et du pH dans l'eau d'alimentation
- Inspection régulière hors service à l'aide de techniques non destructives établies

D'autres formes d'attaque corrosive dans les dégazeurs comprennent la fissuration par corrosion sous contrainte de la chambre du plateau en acier inoxydable, la fissuration du ressort de la soupape de pulvérisation d'admission, la corrosion des condenseurs d'aération due aux piqûres d'oxygène et l'érosion des déflecteurs d'impact près du raccord d'admission de vapeur.



Le but d'un dégazeur est de réduire les gaz dissous, en particulier l'oxygène, à un niveau bas et d'améliorer l'efficacité thermique d'une usine en augmentant la température de l'eau. De plus, les dégazeurs fournissent un stockage d'eau d'alimentation et des conditions d'aspiration appropriées pour les pompes d'eau d'alimentation de la chaudière.

Les dégazeurs sous pression, ou réchauffeurs de dégazage, peuvent être classés en deux grandes catégories : de type à plateau et de type à pulvérisation (voir la figure 10-3). Les dégazeurs de type à plateau sont également appelés de type « à plateau à pulvérisation », car l'eau est initialement introduite par des vannes ou des buses de pulvérisation. Le type à pulvérisation est également appelé de type « épurateur à pulvérisation », car une section d'épuration séparée est utilisée pour assurer un contact vapeur-eau supplémentaire après la pulvérisation.



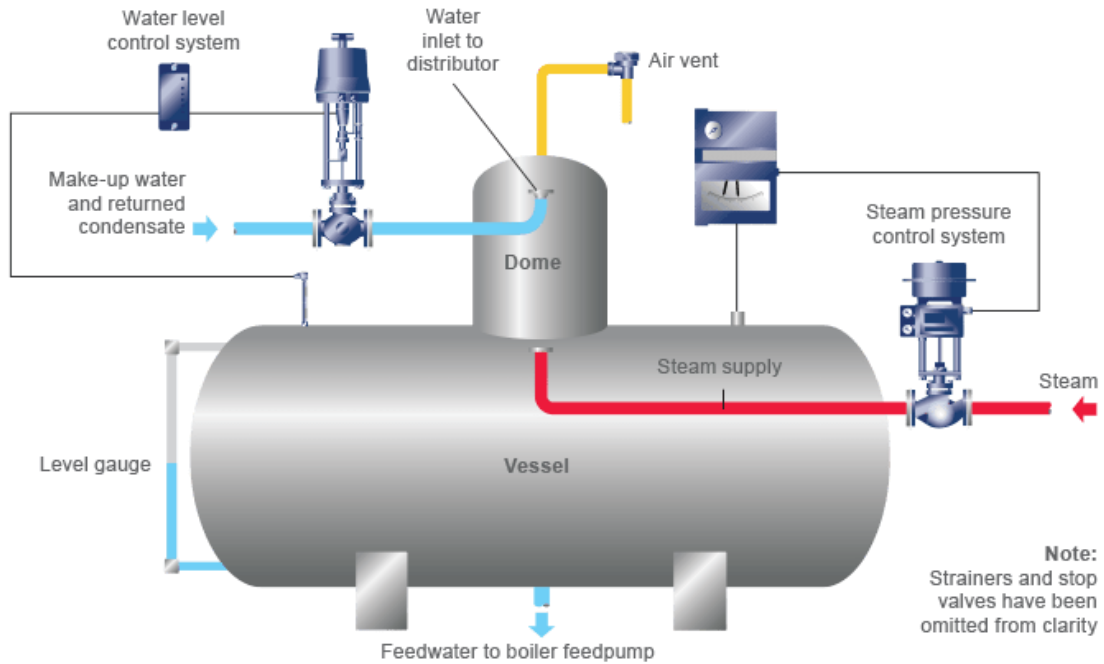


Figure : Réchauffeur de désaération de type à plateau pulvérisateur horizontal avec réservoir de stockage.

Caractéristiques de l'Eau

Caractéristiques de l'Eau d'alimentation des Chaudières selon leurs pressions

Pression (bars)	0 - 20.7	20.8 - 31.0	31.1 - 41.4	41.5 - 51.7	51.8 - 62.1	62.2 - 68.9	69.0 - 103.4	103.5 - 137.9
pH at 25	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	8.5 - 9.5	9.0 - 9.6	9.0 - 9.6
Oxygène dissous (mg/L)	0.04	0.04	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Dureté Totale (CaCO ₃)	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.05	non détectable	
TOC Non volatile (mg/L)	1	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2
Fer total (mg/L)	0.1	0.05	0.03	0.025	0.02	0.02	0.01	0.01
Cuivre Total (mg/L)	0.05	0.025	0.02	0.02	0.015	0.015	0.01	0.01

Caractéristiques de l'Eau de Chaudière : Basse pression et moyenne Pression

Paramètre	Unité	Plage recommandée	Effet d'un déséquilibre
pH	-	10,5 - 11,5	Un pH trop bas favorise la corrosion, un pH trop élevé peut entraîner des dépôts alcalins
TDS (Total Dissolved Solids)	ppm (mg/L)	< 3500 ppm	Une concentration excessive favorise l'entartrage et la formation de dépôts
Dureté Totale	ppm CaCO ₃	< 2 ppm	Provoque des dépôts de tartre et réduit l'efficacité thermique
Alcalinité (M et P)	ppm CaCO ₃	< 700 ppm	Une alcalinité excessive favorise la formation de mousse et l'entraînement d'eau

Conductivité	μS/cm	< 5000 μS/cm	Une conductivité élevée favorise la corrosion et l'entartrage
Oxygène Dissous (O ₂)	ppb (μg/L)	< 0,02 ppm	L'oxygène favorise la corrosion des tubes et surfaces métalliques
Silice (SiO ₂)	ppm	< 150 ppm	Risque de formation de dépôts sur les surfaces d'échange thermique
Phosphates	ppm PO ₄ ³⁻	10 - 30 ppm	Préviennent la formation de tartre en complexant les ions calcium
Chlorures (Cl ⁻)	ppm	< 300 ppm	Favorisent la corrosion sous contrainte
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	ppm	< 300 ppm	Peuvent provoquer la corrosion sous dépôt
Fer Total (Fe)	ppm	< 0,1 ppm	Indicateur de corrosion des tubes
Cuivre (Cu)	ppm	< 0,05 ppm	Peut favoriser la corrosion des alliages
Taux de Retour de Condensat	%	> 80%	Un faible taux augmente la consommation d'eau et d'énergie

Caractéristiques de l'Eau de Chaudière - Haute Pression

Les chaudières haute pression nécessitent une eau d'une grande pureté pour éviter la corrosion, l'entartrage et les dépôts sur les surfaces d'échange thermique.

Paramètre	Unité	Plage recommandée	Effet d'un déséquilibre
pH	-	9 - 10,5	Un pH trop bas favorise la corrosion, un pH trop élevé peut causer des dépôts alcalins
TDS (Total Dissolved Solids)	ppm (mg/L)	< 50 ppm	Une concentration excessive entraîne l'entartrage et la corrosion sous dépôt
Dureté Totale	ppm CaCO ₃	< 0,1 ppm	Provoque l'entartrage et réduit l'efficacité thermique
Alcalinité (M et P)	ppm CaCO ₃	< 10 ppm	Une alcalinité élevée favorise la formation de mousse et l'entraînement d'eau
Conductivité	μS/cm	< 25 μS/cm	Une conductivité élevée augmente le risque de corrosion et de dépôts
Oxygène Dissous (O ₂)	ppb (μg/L)	< 10 ppb	L'oxygène favorise la corrosion des tubes et surfaces métalliques
Silice (SiO ₂)	ppm	< 0,02 - 0,1 ppm	Risque de formation de dépôts sur les surfaces d'échange thermique
Phosphates	ppm PO ₄ ³⁻	5 - 15 ppm	Préviennent la formation de tartre en complexant les ions calcium
Chlorures (Cl ⁻)	ppm	< 0,02 ppm	Favorisent la corrosion sous contrainte
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	ppm	< 0,02 ppm	Peuvent provoquer la corrosion sous dépôt
Fer Total (Fe)	ppm	< 0,02 ppm	Indicateur de corrosion des tubes
Cuivre (Cu)	ppm	< 0,01 ppm	Peut favoriser la corrosion des alliages
Taux de Retour de Condensat	%	> 90%	Un faible taux augmente la consommation d'eau et d'énergie

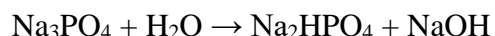
Caractéristiques de l'Eau de Chaudière – Retour de condensat

Paramètre	Unité	Valeur recommandée	Problèmes si hors limites
pH	-	8.5 - 9.0	Corrosion acide si pH < 7.0
Conductivité	μS/cm	< 25	Présence de contaminants (sels, impuretés)
Dureté totale	mg CaCO ₃ /L	< 0.3	Risque d'entartrage
Oxygène dissous (O ₂)	mg/L	< 0.02	Corrosion des tuyauteries
Fer	mg/L	< 0.1	Corrosion et dépôts

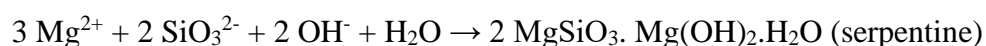
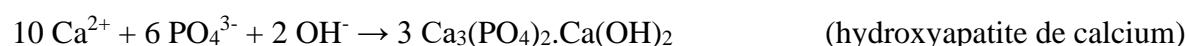
Cuivre	mg/L	< 0.05	Corrosion des équipements
Silice (SiO ₂)	mg/L	< 0.02 - 0.1	Encrassement des surfaces d'échange thermique

Traitement aux phosphates

Une technique maintenant ancienne pour assurer un pH alcalin dans l'eau de chaudière consiste en l'addition de phosphate trisodique (Na₃PO₄), éventuellement en mélange avec du phosphate disodique (Na₂HPO₄). Dans l'eau il est capable de libérer de la soude, provoquant l'augmentation du pH.



Le principal avantage du traitement aux phosphates est effet tampon qui augmente la tolérance aux intrusions d'impuretés pouvant affecter le pH de l'eau. Un autre avantage de ce traitement est la réaction avec les sels de calcium, de magnésium et la silice pour former des précipités non adhérents qui peuvent être aisément éliminés sous forme de boues avec les purges :



Différentes stratégies de traitement utilisant les phosphates de soude sont proposées ; elles visent à :

- maintenir un pH suffisant
- éviter une corrosion caustique due à un excès de soude localisé ou généralisé
- éviter la précipitation de phosphate sur les surfaces chaudes

Les paramètres à contrôler sont :

- teneur en phosphate
- pH
- ratio Na/PO₄
- bilan entrées/sorties de phosphate.

Inhibiteurs de Corrosion Utilisés dans les Chaudières

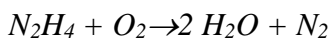
Dans les chaudières industrielles, la corrosion peut endommager les surfaces métalliques, réduisant ainsi leur durée de vie et leur efficacité. Pour prévenir ce phénomène, divers **inhibiteurs de corrosion** sont utilisés. Ils peuvent être classés en plusieurs catégories selon leur mode d'action.

Type d'Inhibiteur	Exemples	Mode d'Action	Avantages	Inconvénients
-------------------	----------	---------------	-----------	---------------

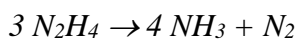
Inhibiteurs d'Oxygène	- Sulfite de sodium (Na ₂ SO ₃) - Hydrazine (N ₂ H ₄) -Érythorbate de sodium (C ₆ H ₇ NaO ₆)	Éliminent l'oxygène dissous pour éviter la corrosion par piqûre	- Protection efficace contre la corrosion due à l'oxygène - Facile à doser	- L'hydrazine est toxique - Nécessite un suivi régulier
Inhibiteurs de pH (Alcalinisants)	-Hydroxyde de sodium (NaOH) -Phosphates (Na ₃ PO ₄) -Ammoniac (NH ₃), Morpholine	Augmentent le pH pour limiter l'attaque acide des métaux	- Protègent les surfaces métalliques - Facilement disponibles	- Un excès peut favoriser la formation de dépôts
Inhibiteurs de Formation de Dépôts (Anti-incrustants)	-Polyphosphates -Polymères dispersants (acryliques) -EDTA (chélatant)	Préviennent les dépôts et le tartre qui accélèrent la corrosion sous dépôt	- Améliorent le transfert thermique - Réduisent les besoins en nettoyage	- Certains peuvent être toxiques ou non biodégradable
Inhibiteurs de Corrosion des Vapeurs (Circuit Condensat)	-Morpholine -Cyclohexylamine - Déthanolamine (DEA)	Protègent les conduites de retour de condensat en neutralisant les acides formés par le CO ₂	- Protègent les tuyauteries de retour - Volatils, donc efficaces dans tout le circuit	- Un dosage excessif peut perturber le pH du condensat

Exemple

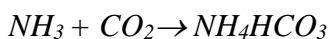
Le dégazage peut être assuré par voie chimique. Le réactif utilisé pour extraire l'oxygène est l'hydrazine (N₂H₄) :



L'excédent d'hydrazine se décompose quant à lui dans la chaudière en azote et en ammoniac :

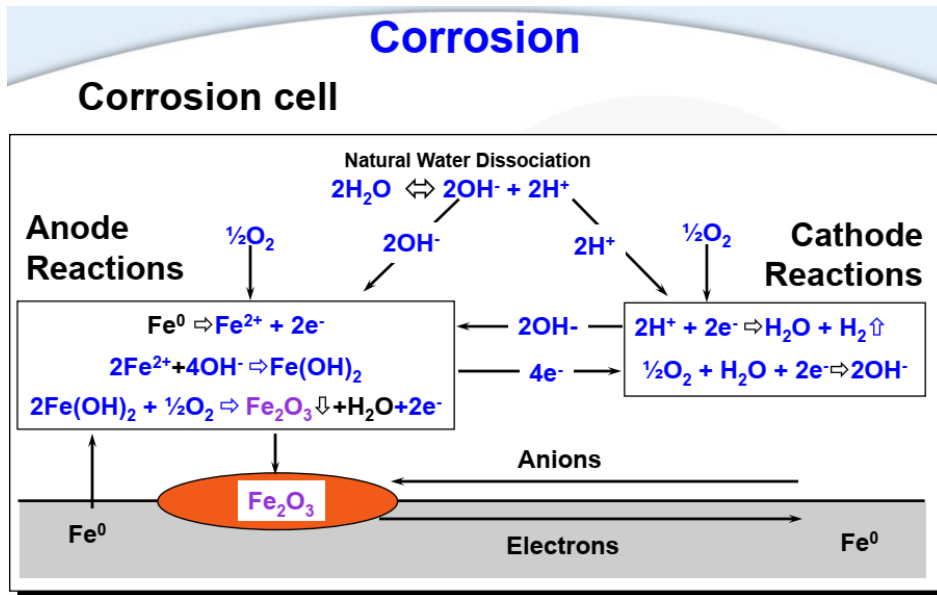


L'ammoniac emporté par la vapeur contribue à relever le pH des condensats, et se combine avec le gaz carbonique pour produire du bicarbonate d'ammoniac.



Conclusion :

- **Une combinaison d'inhibiteurs est souvent nécessaire** pour une protection optimale.
- **Un suivi rigoureux des paramètres chimiques** (pH, TDS, oxygène dissous) permet d'ajuster les dosages et d'éviter les effets secondaires.



La purge (Blowdown)

La purge de chaudière consiste à éliminer l'eau d'une chaudière. Son but est de contrôler les paramètres de l'eau de la chaudière dans des limites prescrites afin de minimiser le tartre, la corrosion, le transfert et d'autres problèmes spécifiques. La purge est également utilisée pour éliminer les solides en suspension présents dans le système. Ces solides sont causés par la contamination de l'eau d'alimentation, par des précipités de traitement chimique interne ou par le dépassement des limites de solubilité de sels autrement solubles.

Le pourcentage de purge peut varier de moins de 1 % lorsqu'une eau d'alimentation de très haute qualité est disponible à plus de 20 % dans un système critique avec une eau d'alimentation de mauvaise qualité. Dans les installations avec de l'eau d'appoint adoucie par zéolite de sodium, le pourcentage est généralement déterminé au moyen d'un test au chlorure. Dans les chaudières à haute pression, un matériau inerte soluble peut être ajouté à l'eau de la chaudière comme traceur pour déterminer le pourcentage de purge.

Purge manuelle

La purge manuelle intermittente est conçue pour éliminer les matières en suspension, y compris les boues formées dans l'eau de la chaudière. Le point de prélèvement de la purge manuelle est généralement situé au fond du ballon le plus bas de la chaudière, là où les boues formées ont tendance à se déposer.

Une purge manuelle intermittente correctement contrôlée élimine les matières en suspension, ce qui permet un fonctionnement satisfaisant de la chaudière. La plupart des systèmes de chaudières industrielles contiennent à la fois un système de purge intermittente manuelle et un système de purge continue. En pratique, les vannes de purge manuelle sont ouvertes périodiquement conformément à un programme de fonctionnement. Pour optimiser l'élimination des matières en suspension et l'économie de fonctionnement, des purges courtes et fréquentes sont préférées à des purges longues et peu fréquentes. Très peu de boues se forment dans les systèmes utilisant une eau d'alimentation de chaudière d'une qualité exceptionnelle. La purge manuelle peut être moins fréquente dans ces systèmes que dans ceux

utilisant une eau d'alimentation contaminée par la dureté ou le fer. Le consultant en traitement de l'eau peut recommander un programme de purge manuelle approprié.

Les vannes de purge des collecteurs à paroi d'eau d'une chaudière doivent être utilisées en stricte conformité avec les recommandations du fabricant. En général, en raison d'éventuels problèmes de circulation, les collecteurs à paroi d'eau ne sont pas purgés pendant que l'unité est en cours de production de vapeur. La purge a normalement lieu lorsque l'unité est mise hors service ou mise en réserve. Le niveau d'eau doit être surveillé de près pendant les périodes de purge manuelle.

Purge continue

La purge continue, comme son nom l'indique, consiste à éliminer en continu l'eau de la chaudière. Elle offre de nombreux avantages que n'offre pas la seule purge par le bas. Par exemple, l'eau peut être retirée de l'endroit où se trouvent les plus fortes concentrations de solides dissous dans l'eau de la chaudière. Par conséquent, la qualité de l'eau de la chaudière peut être maintenue à tout moment. De plus, un maximum de solides dissous peut être éliminé avec une perte minimale d'eau et de chaleur de la chaudière.

Un autre avantage majeur de la purge continue est la récupération d'une grande partie de sa teneur en chaleur grâce à l'utilisation de réservoirs de détente et d'échangeurs de chaleur. Les réglages des vannes de régulation doivent être ajustés régulièrement pour augmenter ou diminuer la purge en fonction des résultats des tests de contrôle et pour maintenir un contrôle étroit des concentrations d'eau de la chaudière à tout moment.

L'entraînement de l'eau de chaudière dans la vapeur (Carryover)

Le **carryover** est un terme général désignant tous les types d'entraînement d'eau de la chaudière vers la vapeur. Il peut être causé par la formation de mousse (**foaming**), l'entraînement de gouttelettes d'eau avec la vapeur (**priming**) ou une inefficacité des séparateurs mécaniques.

Les impuretés dans la vapeur peuvent également provenir de la **volatilisation des sels dissous** dans l'eau de la chaudière. Ce phénomène devient plus probable à mesure que **la pression de la chaudière augmente**.

Causes de carryover

Le transfert résulte d'une séparation incomplète de la vapeur du mélange vapeur-eau dans une chaudière. De nombreux facteurs, à la fois mécaniques et chimiques, contribuent à une séparation incomplète. Les facteurs mécaniques comprennent la conception de la chaudière, un équipement de séparation inadéquat ou présentant des fuites, des niveaux d'eau élevés, la méthode de mise à feu et les caractéristiques de charge.

Parmi les causes chimiques, on peut citer les concentrations élevées de solides totaux (solides dissous et/ou en suspension), l'alcalinité excessive et la présence de matières huileuses et d'autres contaminants organiques.

Entraînement d'eau (Priming)

Plusieurs facteurs mécaniques favorisant le carryover peuvent se renforcer mutuellement. Lorsque le niveau général de l'eau augmente, le volume de l'espace vapeur diminue, ce qui

augmente la vitesse de la vapeur à la surface de l'eau. Cela rapproche alors le nuage de gouttelettes d'eau et de mousse de la sortie de vapeur.

De plus, une augmentation soudaine et importante de la demande de vapeur entraîne une baisse temporaire de la pression, ce qui augmente le volume spécifique de la vapeur. Ce phénomène peut provoquer l'entrée brutale de paquets d'eau de chaudière dans la sortie de vapeur, ce qui est appelé priming.

Un fonctionnement de la chaudière à une pression inférieure à la pression de conception peut également provoquer un effet similaire.

Formation de Mousse (Foaming)

La mousse et l'entraînement sélectif de substances volatiles sont les deux principaux mécanismes du carryover chimique.

La mousse se forme par l'apparition de bulles stables dans l'eau de la chaudière. Étant donné que ces bulles ont une densité proche de celle de la vapeur, elles ne sont pas facilement éliminées par les dispositifs de purification de la vapeur. La formation de mousse peut entraîner plusieurs problèmes de carryover, notamment des lectures erronées du niveau d'eau, ce qui perturbe le débit d'alimentation en eau.

Facteurs favorisant la formation de mousse :

- Une alcalinité élevée de l'eau de la chaudière.
- Une teneur élevée en solides dissous.

Solutions pour réduire le carryover :

1. **Contrôle des paramètres de l'eau de chaudière** : Maintenir les solides dissous sous un seuil critique en régulant les purges (blowdown).
2. **Utilisation d'additifs anti-moussants** : Ajout de produits chimiques spécifiques pour limiter la formation de mousse.
3. **Optimisation du niveau d'eau** : Ajuster les réglages du régulateur de niveau d'eau.
4. **Amélioration du design du séparateur de vapeur** : Utilisation de séparateurs cycloniques, filtres ou déflecteurs pour éliminer les gouttelettes d'eau.

Indice de Saturation de Langelier (LSI)

Depuis 1936, avec l'introduction de l'Indice de Saturation de Langelier (LSI), les spécialistes du traitement de l'eau cherchent à prédire le potentiel de formation de dépôts en se basant sur la chimie de l'eau. Le LSI est une valeur calculée qui indique si l'eau est susceptible de précipiter ou de dissoudre le carbonate de calcium (CaCO_3). Cette information permet de déterminer les cycles de concentration nécessaires pour maintenir le contrôle des dépôts et prévenir l'entartrage.

Concepts clés :

- Indice de Saturation de Langelier (LSI) : Une mesure de la tendance de l'eau à former du tartre (LSI positif) ou à être corrosive (LSI négatif).

- Cycles de Concentration : Le rapport entre la concentration des solides dissous dans l'eau en circulation et celle de l'eau d'appoint, influençant la formation de dépôts et l'efficacité du traitement.
- Contrôle des Dépôts : Gestion du risque d'entartrage en ajustant les traitements chimiques, les cycles de concentration et les conditions de l'eau.

Indice de Stabilité de Ryznar (RSI)

L'Indice de Stabilité de Ryznar (RSI) est un indicateur empirique utilisé pour prédire la tendance de l'eau à être entartrante ou corrosive, en fonction de son équilibre avec le carbonate de calcium (CaCO_3). Il améliore l'Indice de Saturation de Langelier (LSI) en offrant une évaluation plus quantitative de la stabilité de l'eau.

Formule du RSI : $\text{RSI} = 2 \times \text{pH}_s - \text{pH}$

Où :

- pH_s : pH de saturation (pH auquel l'eau est en équilibre avec le CaCO_3)
- pH : pH mesuré (réel) de l'eau

Le pH_s est calculé en fonction de la dureté calcique, de l'alcalinité, de la température et des solides dissous totaux (TDS).

Interprétation des valeurs du RSI :

Valeur RSI	Tendance de l'eau
$\text{RSI} < 5.5$	Fortement entartrante (dépôt de CaCO_3)
$5.5 \leq \text{RSI} < 6.2$	Légèrement entartrante
$6.2 \leq \text{RSI} < 6.8$	Équilibrée (proche de la saturation)
$6.8 \leq \text{RSI} < 8.5$	Légèrement corrosive
$\text{RSI} \geq 8.5$	Fortement corrosive (dissolution du CaCO_3)

Comparaison RSI vs. LSI

- RSI fournit une évaluation quantitative du risque de dépôt ou de corrosion, tandis que LSI indique uniquement la tendance (précipitation ou dissolution du CaCO_3).
- RSI est considéré comme plus précis pour des systèmes complexes tels que les tours de refroidissement et les processus industriels.

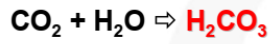
Application : Le RSI est largement utilisé dans le traitement des eaux industrielles pour contrôler l'entartrage et la corrosion, assurant ainsi l'efficacité des systèmes et la durabilité des équipements.

Condensate Corrosion

Causes of Condensate Corrosion

Carbon Dioxide

Reaction



Gouging Corrosion

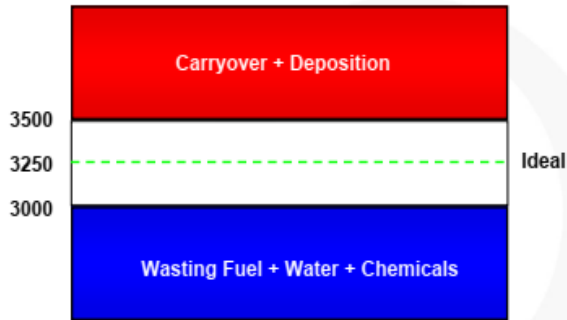


Oxygen

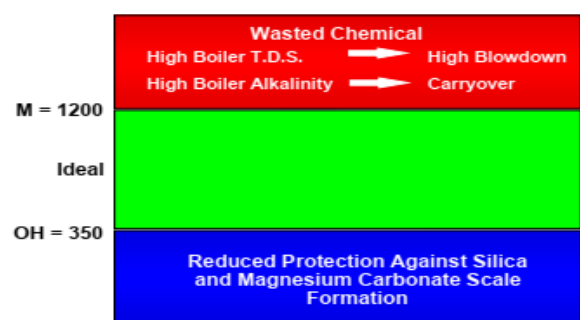
Pitting Corrosion



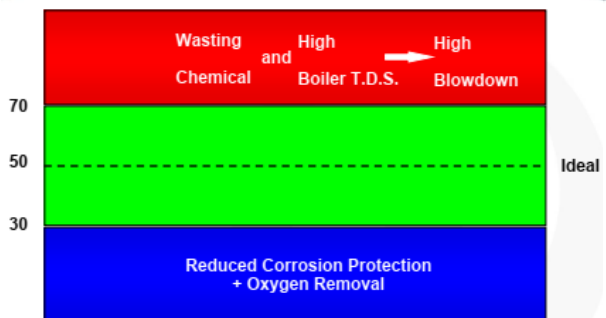
Typical Boiler T.D.S. Control Limits



Boiler Alkalinity



Sulphite Reserve



Phosphate Reserve

