

Préparation de l' eau thermique pour la vapeur industrielle .

Raisons pour lesquelles les eaux utilisées doivent être traitées et conditionnées .

Henry Lérat - Directeur Scientifique - Heinz Burkhalter S.A. Technique de l' eau - Worblaufenstrasse 155 - CH - 3048 Worblaufen -(Bern)

Préambule .

La production de vapeur met en œuvre trois éléments : de l' eau, des métaux et de la chaleur .

Il faut avoir présent à l' esprit que l' eau est un solvant universel auquel aucun élément solide, liquide, minéral (inerte ou radioactif) organique naturel ou de synthèse ne résiste, qu' elle est capable de contenir sous forme dissoute tous les gaz connus, et qu' elle est le siège du développement des règnes bactérien (et viral), végétal (et champignons), animal (et spongiaires) Cf *annexe 1* .

Tout ou partie de ces éléments sera dans les eaux destinées à la production de vapeur, et sans être spécialiste, il apparaît évident qu' il faudra les éliminer pour éviter des problèmes d' exploitation et de production .

Nous allons présenter le détail des problèmes posés par l' eau, les différentes vapeurs destinées à des applications industrielles, les principaux modèles de générateurs, et modèle par modèle , type de vapeur par type de vapeur nous indiquerons les traitements souhaitables. *Une description de ceux - ci figure dans l' annexe 2*

A ce propos nous développerons l' information concernant un tout nouveau mode simple et performant de déminéralisation extrêmement poussé de l' eau que nous utilisons en particulier pour l' eau thermique de générateurs de vapeur travaillant à une pression de 40 - 50 bar pour actionner des turbines d' alternateurs .

Ce procédé , très efficace , non polluant , ne nécessitant aucun réactif acide ou alcalin (donc sans rejets polluants) est capable de produire l' eau traitée dotée d' une conductivité pouvant atteindre 0,06 μ Siemens et disposant d' une pression dynamique pour des utilisations directes , il s' agit de l' " électro - désionisation " * .

1 -) Problèmes posés par l' eau lors de sa transformation en vapeur .

Vis - à - vis des métaux et des générateurs de vapeur et de la vapeur elle même elle peut occasionner divers phénomènes :

1 - 1 -) de corrosions électrochimiques, d' oxydation en particulier par l' oxygène dissous, et d' agressions par le gaz carbonique,

1 - 2 -) d' incrustations consécutives à la réduction à chaud du produit limite de solubilité de nombreux sels.

Ces incrustations gênent la transmission de la chaleur et peuvent occasionner des surchauffes localisées à l' origine de " coups de feu " destructeurs .

- A titre d' exemple si la conductibilité thermique moyenne de l' acier est de 15 kcal/m²h par degré Celcius , celle - ci ne sera plus que de 1 à 2 pour des dépôts de sulfate de calcium, de 0,5 à 1 pour ceux formés de carbonates de calcium, de 0,2 à 0,5 pour les tartres siliceux .

- Ces dépôts engendrent aussi des corrosions par aération différentielle (éléments d' aération différentielle ou éléments Evans)

1 - 3 -) de corrosions fissurantes occasionnées par des agents caustiques tels que la soude (NaOH) et la potasse (KOH) par suite de la décomposition des carbonates et de leur concentration à chaud, ou provoquées aussi par les chlorures pour les mêmes raisons

1 - 4 -) de corrosions vermiculaires occasionnées à chaud par les chlorures magnésiens

1 - 5 -) de corrosions biochimiques provoquées par l' action de bactéries ferrugineuses et de bactéries sulfato-réductrices en particulier dans les bâches de stockage et dans les conduits afférents .

1 - 6 -) de primage (entraînement de vésicules d' eau minéralisée de la chaudière avec la vapeur) dû à une trop importante minéralisation de l' eau en chaudière qui augmente sa viscosité , ainsi qu' à une tendance au " moussage " occasionnée par la présence de composés organiques et provoquant en aval des formations de dépôts cristallins sur les surchauffeurs et sur les turbines , avec en parallèle une baisse de rendement énergétique du générateur .

* Appareils d' électro-désionisation **E - Cell – H. Burkhalter** fabriqués sous licence par Heinz Burkhalter AG . CH – Worblaufen .

1 - 7 -) d' entraînement dans la vapeur de constituants minéraux inclus dans l' eau de la chaudière et tels que la silice sous

forme d'acide silicique pour des températures $>$ à 250°C . ou des chlorures au delà de 350°C (200 g. de NaCl / tonne de vapeur à 365°C).

De ce fait, si des précautions ne sont pas prises, il peut résulter de cette association eau - alliages métalliques - élévation de température des destructions d'appareils onéreux, des productions de vapeur polluée, des phénomènes de primage, des pertes de calories, des consommations anormales d'eau et d'énergie, des arrêts ou au minimum des perturbations de la production dans l'établissement concerné, pour ne citer que les principaux inconvénients .

2 -) Techniques générales utilisées pour la préparation de l'eau destinée à la production de divers types de vapeurs industrielles .

La préparation de l'eau pour la production de vapeur peut faire l'objet de l'application de deux techniques étroitement associées appelées respectivement : Traitement et Conditionnement .

2 - 1 -) Le **traitement** comporte tout un ensemble de procédés destinés à purifier l'eau aux plans : physique - microparticulaire - colloïdal - chimique - gazeux - organique - bactérien - viral - voir radioactif en ôtant les constituants responsables de la " pollution " naturelle ou artificielle de ce fluide . Cf. *annexe 2*

Remarque importante :

Si le traitement de l'eau doit prendre en compte les risques encourus par le générateur de vapeur compte tenu de son modèle, de la pression, de la qualité requise pour la vapeur, de la nature et de la quantité des impuretés recelées par l'eau, il est aussi établi en collaboration étroite avec les utilisateurs de la chaudière en prenant en considération la qualité de vapeur désirée, le mode d'exploitation souhaité pour le générateur, les coûts respectifs de l'eau et de l'énergie utilisées, etc .

2 - 2 -) Le **conditionnement** est un enrichissement de l'eau (ou de sa vapeur) à l'aide de produits minéraux, végétaux naturels, organiques de synthèse pour combattre les réactions chimiques, physiques, physico-chimiques, électrochimiques pouvant procéder de l'association précitée : Eau - Métal - Chaleur .

- L'évolution des techniques, en particulier en ce qui concerne les moyens de traitement, montre que de plus en plus des procédés dotés de membranes se substituent avec efficacité et succès aux moyens classiques utilisant les résines échangeuses d'ions et des réactifs dangereux et polluants .

- Pour le conditionnement il s'agit de l'utilisation accrue de complexes organiques performants de préférence à des solutions minérales ou à l'usage de réactifs traditionnels .

Note : Les vapeurs industrielles sont classées suivant leurs utilisations, et en fonction de celles - ci, la pression selon laquelle elles seront produites et leur qualité (et leur degré de pureté) ne seront pas les mêmes .

3 -) *Types de vapeurs .*

Il y a diverses grandes catégories de vapeurs utilisées par l'industrie :

3 - 1 -) Les vapeurs standard destinées au chauffage, au dégraissages des pièces, au nettoyage des sols ,etc,

3 - 2) Les vapeurs haute pression (parfois surchauffées) et très haute pression en particulier pour l'alimentation de turbines d'alternateurs .

3 - 3 -) Les vapeurs " blanches ou propres " pour la cuisson des aliments, la production d'eau chaude sanitaire, les buanderies, les conserveries, l'Industrie Agro-alimentaire

3 - 4 -) Les vapeurs " stériles ou pures " pour la production d'eau distillée par condensation, l'alimentation des autoclaves, la stérilisation des flacons, ampoules, cuves, circuits dans l'Industrie Pharmaceutique, la régulation hygrométrique des suites stériles

Mis à part les différences relatives au traitement qui sera plus ou moins élaboré selon le type de générateur de vapeur, son timbre et le mode interne de circulation de l'eau (circulation naturelle ou circulation forcée) celles concernant le conditionnement seront nettement marquées selon qu'il s'agira de vapeurs blanches et de vapeurs stériles par rapport aux autres types de vapeurs .

- Pour les vapeurs blanches, les produits colorés, odorants, les agents volatils souvent alcalins ou autres seront prohibés .

- Quant aux vapeurs stériles il n'y aura aucun conditionnement de l'eau .

-

4 -) *Remarques relatives aux techniques de traitement utilisables pour la production d'eaux traitées destinées à l'obtention de ces deux vapeurs .*

Il est connu que les résines échangeuses d'ions anioniques fortement basiques destinées (en aval d' un traitement de l' eau sur des échangeurs d' ions cationiques) à éliminer les chlorures, nitrates, sulfates, phosphates, etc, libèrent des amines dans l' eau déminéralisée qui procède de ce mode de traitement .

(En France leur usage est prohibé pour le traitement des eaux destinées à la consommation humaine ainsi que pour le rinçage de tous les types de récipients destinés à recevoir des aliments liquides ou solides) .

- La logique devrait imposer un traitement exempt de toute probabilité de libération de composés à risque pour les eaux destinées à l' alimentation des chaudières produisant des vapeurs blanches et des vapeurs stériles .

5 -) *Divers types de générateurs .*

5 - 1 --) Les appareils les plus simples sont *les petits générateurs de vapeur basse pression* à très faible volume d' eau avec *production instantanée par un serpent* .

- Ces appareils produisent une vapeur basse pression fortement saturée (primage de l' ordre de 2 à 3 %) - Les débits moyens de vapeur se situent entre 0,5 et 2 tonnes / heure .

5 - 2 -) Puis nous citerons pour mémoire (car certains de ces appareils sont encore en service) les chaudières à grand volume d' eau parfois appelées *chaudières à bouilleur* dotées d' un ballon supérieur de grand diamètre reposant sur un foyer doté de parois en briques et de deux petits ballons latéraux inférieurs (cuissardes) reliés au ballon principal et datant de la fin du siècle dernier Ces appareils très rustiques à pression réduite (5 - 8 bar) avec un faible rendement thermique acceptent des eaux brutes conditionnées de façon très simple .Les débits de vapeur sont en moyenne de 4 à 5 tonnes / heure
Le grand volume d' eau dont elles disposent leur permet d' assurer très facilement les débits de vapeur de pointe .

5 - 3 -) Un autre modèle antique est un *générateur à grand volume d' eau* avec le foyer situé à l' intérieur du corps cylindrique pour réduire l' encombrement .

L' échange calorifique y est meilleur que pour les modèles précédents mais la circulation de l' eau n' est pas bonne, et il peut y avoir des écarts importants entre les zones basses et l' eau située à la partie supérieure .

5 - 4 -) *Les chaudières à tubes de fumée* (où l' eau se trouve à la périphérie de ces tubes) .

Il s' agit de chaudières monobloc qui en dehors de celles implantées dans les usines équipent principalement les locomotives à vapeur et constituent l' essentiel des chaudières marines .

- Elles ont un taux de vaporisation élevé de l' ordre de 100 kg. / m² / heure .

- Le timbre de ces chaudière horizontales va jusqu' à 25 bar et les débits vont jusqu' à 15 tonnes / heure .

5 - 5 -) *Les chaudières à tubes d' eau horizontaux* . (La circulation de l' eau se fait naturellement) .

Les tubes sont inclinés d' environ 15 à 20 ° par rapport à l' horizontal et le collecteur de vapeur se situe à la partie supérieure de la chaudière .

- Dotés d' une grande surface de plan d' eau séparant la phase liquide de la phase vapeur ces générateurs sont peu sensibles au primage .

- Ce sont des appareils qui suivant les modèles peuvent produire de la vapeur jusqu' à 45 - 50 bar et dont les surfaces de chauffe varient entre 20 et 2.000 m² .

5 - 6 -) *Les chaudières à tubes d' eau verticaux* .

Ces modèles produisent des vapeurs à très haute pression : de 10 - 15 bar à plus 100 bar

- Leur encombrement au sol est plus réduit que pour les précédentes .

- Les tubes d' eau sont suspendus dans le foyer et reçoivent la chaleur rayonnante des flammes .Suivant les modèles, les taux moyens de vaporisation évoluent entre 15 et environ 50 kg. / m² / heure .

- Elles ont un plan d' eau réduit ce qui les rend sensibles au primage et nécessite une eau en chaudière de faible viscosité .

5 - 7 -) *Les centrales nucléaires* à eau pressurisée qui en fait comportent deux circuits distincts :

- le circuit primaire assurant l' extraction des calories et leur transport depuis le cœur du réacteur , circuit appelé " actif " .

- le circuit secondaire où se produira la vaporisation , et comprenant en particulier : la turbine, le condenseur, les réchauffeurs et la pompe alimentaire .

- Ce circuit est normalement considéré comme " inactif " (sauf en cas de fuite au niveau du générateur nucléaire) .

Le circuit primaire est en fait de l' eau surchauffée maintenue à environ 320 ° C. sous une pression de l' ordre de 150 bar .

- Certains des circuits secondaires ne comportent pas de ballon comme les chaudières classiques à très haute pression .

- Ils sont dépourvus de moyens d' extraction, ce qui implique une qualité très élaborée et constante de l' eau thermique .

5 - 8 -) *Les appareils de production de vapeur stérile*, entièrement en acier inoxydable de haute qualité avec des échangeurs de même alliage constitués de tubes étirés sans soudure .

Ils sont alimentés en calories par une vapeur industrielle considérée ici comme vapeur primaire, et pour des petits appareils, débit de vapeur stérile allant jusqu'à 150 kg. / heure, il peut être prévu des générateurs électriques indépendants de production de vapeur " primaire " .

- Ces générateurs de vapeur dépourvue d'éléments toxiques, et d'organismes pathogènes sont appelés P. S. G. (Pure Steam Generator) et ils fournissent une vapeur pratiquement sèche contenant au minimum suivant les systèmes 97 à 98 % de vapeur et 2 à 3 % maximum d'humidité au maximum .

Les débits de vapeur stérile vont suivant la taille des appareils de 50 kg. / heure à 8 tonnes / heure pour les plus importants, et les pressions dynamiques disponibles sur ces types de vapeur sont en général de 3 bar (130 - 132 ° C.) >.

Parfois la pression requise peut être plus élevée : maximum 7 bar (163 - 165 ° C.) sachant que cette pression est tributaire de la pression disponible sur la vapeur industrielle servant à l'apport de calories dans ces appareils, et que la pression disponible pour la vapeur stérile est en moyenne de 2 bar inférieure à celle de la vapeur " primaire " .

Ces vapeurs sont utilisées pour stériliser des circuits et appareils de distribution de l'eau distillée, les unités de stockage, les cuves, réacteurs, etc, servant à la production de produits stériles .

Elle est aussi employée pour stériliser par exemple les appareils de lyophilisation ou pour la régulation hygrométrique des suites stériles .

6 -) *Traitement et conditionnement appliqués aux diverses eaux thermiques à la fois en fonction du timbre de la chaudière et aussi de la vocation de la vapeur .*

Les modes de traitement et le conditionnement pourront alors être radicalement différents pour un même type de générateur .

6 - 1 -) *Petits générateurs de production instantanée de vapeur*

Le temps de transfert de l'eau dans le serpentin où se fera la vaporisation est très court . - La chaleur en surface est élevée .

Compte tenu de la non efficacité des réducteurs d'oxygène à cause d'un temps de contact bref avec l'eau, et du caractère irréaliste d'utiliser de l'eau thermiquement dégazée, il y aura inéluctablement une corrosion du serpentin .

- Celui - ci doit être considéré comme du " consommable " .

De ce fait, ce qui importe est que l'appareil puisse produire de la vapeur au meilleur débit et à la température optimum tant que le serpentin est exploitable .

6 - 1 - 1 -) *Traitement :*

Filtration : 10 - 15 micromètres + adoucissement complet .

6 - 1 - 2 -) *Conditionnement*

Dosage d'un agent alcalin à dissolution rapide (donc déjà bien dilué) conférant à l'eau conditionnée un pH voisin de 10 .

6 - 2 -) *Chaudières à grand volume d'eau et assez faible pression (Cf. 5 - 2 et 5 - 3) .*

Ces chaudières peuvent être alimentées en eau brute traitée et conditionnée de façon très rustique .

6 - 2 - 1 -) *Traitement*

Suivant les débits filtration sur graviers fin ou sur anthracite + gravier fin dans des appareils à lavage par contre courant avec de l'eau filtrée .

6 - 2 - 2 -) *Conditionnement: (à titre anecdotique) .*

Traitement Intégral Interne (Procédé Armand) pour des eaux ayant une dureté (titre hydrotimétrique) inférieure à 30 ° f TH.

- Il s'agit de quatre ou cinq produits mélangés dans une solution unique comprenant une charge alcalinisante neutralisant l'acidité carbonique et conférant à l'eau de chaudière un pH alcalin (carbonate de sodium), une charge séquestrante des ions alcalino-terreux avec une fonction dispersante et une action passivante des métaux ferreux

(parfois un peu de phosphates alcalins en complément + phosphates complexes) - un agent réducteur d'oxygène

: produit naturel organique (tannins ou pyrogallol < C₆ H₃ (OH)₃ >), un agent anti-mousse (anti-primage) :

(Ester - alcools ou amides macromoléculaires) .

Remarque : Si le titre hydrotimétrique dépasse la valeur de 30 ° f il sera nécessaire de procéder à un adoucissement partiel (Cf. annexe 2) pour amener l' eau utilisée à une dureté voisine de 20 ° f .

Nota : La composition de ce mélange doit tenir compte du titre hydrotimétrique permanent de l' eau , de sa teneur en sulfates et en silice , de l' alcalinité prescrite pour l' eau de chaudière par le constructeur et ce pour maintenir en chaudière les meilleurs valeurs de T.A. et de T.AC. ainsi que les rapports optima carbonates / sulfates (à la fois pour éviter la formation des tartres sulfatés mais aussi pour protéger les générateurs contre la fragilité caustique) - la teneur excédentaire en phosphates (f) de la teneur en sulfates et le rapport $\text{SiO}_2 / \text{T.A.C.}$ (f) de la pression

- Par exemple pour un générateur à grand volume d' eau produisant de la vapeur à 7 - 8 bar le pH de l' eau en chaudière sera de 10 à 11 pour combattre l' instabilité thermodynamique du fer et de ses alliages oxydables en milieu aqueux .
(formation d' une couche d' oxyde magnétique Fe_3O_4)

Attention : Si le pH dépasse 12, l' acier s' oxyde et se dissout sous forme d' anions FeO_3H^-

Le rapport carbonates / sulfates sera d' environ 0,07

L' excédent d' anhydride phosphorique (P_2O_5) devra être par exemple de 40 mg. / litre pour une teneur de l' eau de chaudière de 600 mg. / litres en SO_4Na_2 - de 60 mg. / litre pour une teneur de 900 mg. de sulfates

Le rapport silice mg. / l (en SiO_2) / bicarbonates ° f (T.A.C.) sera de 2,5 en valeur maximum (Source American boiler) .

- La salinité totale admissible dans l' eau du générateur est de 8.000 mg. / litre

- Alcalinité totale maximum 150 ° f de T.A.C. ou 1.830 mg. / litre .

6 - 3 -) *Générateurs à tubes de fumée* . Pressions de vapeur possibles de 5 à 25 bar .

Les salinités maxima admissibles pour les eaux de chaudière vont de 5.000 mg. / litre pour les pressions les plus basses à 3.000 mg. / litre pour les timbres à 25 bar .

Pour les teneurs en bicarbonates (T.A.C.) celles - ci vont évoluer pour de mêmes valeurs de pression de 120 à 80 ° f .

6 - 3 - 1 -) *Traitement* .

Mis à part le principe de la filtration qui sera similaire à celui défini en 6 - 2 - 1 -) la suite du traitement sera fonction de la composition chimique de l' eau brute en particulier il devra tenir compte de la teneur d' origine en bicarbonates .

Si celle - ci atteint ou dépasse 25 ° f , nous voyons que les possibilités de concentration seront limitées à environ 4 fois et que par conséquent il faudra réaliser des purges occasionnant des pertes en eau et en calories .

Donc dans ce cas il est conseillé de traiter l' eau préalablement adoucie et filtrée sur des membranes semi - perméables d' osmose inverse (Cf. annexe 2) , procédé moderne sans rejets polluants assurant en une opération une parfaite épuration vis - à - vis des micro - particules, des colloïdes, des composés organiques, du zoo et du phytoplancton avec une élimination de la minéralisation totale de l' eau voisine de 99 % .

- Un ancien procédé polluant aurait consisté à mettre en œuvre des résines carboxyliques (cationiques faibles) régénérées à l' acide chlorhydrique pour éliminer les bicarbonates, puis à ôter de cette eau les importantes quantités de gaz carbonique libéré sur un dégazeur atmosphérique avant d' éliminer par adoucissement le TH permanent .

Nota : Pour protéger les dispositifs de commande des appareils d' adoucissement il est recommandé de filtrer l' eau brute avec une finesse de l' ordre de 25 micromètres, et l' eau adoucie alimentant l' appareil d' osmose inverse devra être déchlorée et filtrée avec une finesse de l' ordre de 3 micromètres absolus avec des structures micro - filtrantes adaptées .

6 - 3 - 2 -) *Conditionnement* .

Celui - ci sera défini selon l' utilisation de la vapeur : vapeur courante non alimentaire ou vapeur blanche par exemple pour la cuisson des aliments, les conserveries, les buanderies, etc .

6 - 3 - 2 - 1 -) *Vapeurs non alimentaires* .

Il convient de mettre en œuvre un agent alcalinisant, des phosphates, un réducteur d' oxygène, un agent anti-primage .
Pour les chaudières ne dépassant pas 15 bar, avec donc un coefficient de dissociation des carbonates inférieur ou égal au maximum à 60 % il est possible pour prévenir la formation des tartres sulfatés (si l' eau n' a pas été épurée au plan de la minéralisation) avec un conditionnement à base carbonate de soude .

Au delà, étant donné qu'il faudrait un apport trop conséquent d'alcalinité qui entraînerait des risques de fragilité caustique, il sera préférable d'utiliser des phosphates.

Ces produits alcalins assureront aussi en parallèle la passivation des constituants en acier du générateur au contact de l'eau conditionnée.

En parallèle comme pour le cas précédent, il faudra maintenir le rapport silice / T.A.C. selon la valeur convenable.

Pour le réducteur d'oxygène, il y a le choix : les tannins (produit coloré mais dont l'excès nécessaire dans l'eau de la chaudière est facile à évaluer) qui possède en plus des fonctions dispersantes appréciables, le sulfite de sodium catalysé ou non, des dérivés de l'hydroxylamine, ou ceux de l'acide ascorbique.

Il peut aussi être prévu un conditionnement à base d'amine filmantes dotées d'un bon coefficient de partage qui avec la réalisation sur les éléments métalliques d'une barrière monomoléculaire isolent ceux-ci de l'eau et de la vapeur les protégeant des risques d'attaque.

Par sécurité un réducteur volatil peut être associé à ces amines.

Remarque : Dès que la pression atteint 15 - 17 bar une décarbonatation avec réduction en parallèle de la salinité à l'aide d'un traitement par osmose inverse et un dégazage thermique sont recommandés

Ceux-ci contribueront à réduire de façon considérable le conditionnement, les purges d'extraction, les consommations d'eau et les pertes de calories (économie de fuel ou de gaz).

6 - 3 - 2 - 2 -) *Pour les vapeurs alimentaires.*

Le conditionnement doit être impérativement réalisé avec des produits " blancs " : carbonates - phosphates - sulfites.

Remarque : Si il existe des risques de primage dus à des eaux d'origine trop minéralisées et non traitées sur ce plan (problème de viscosité en chaudière) ou contenant des traces de détergents, des matières organiques, des micro-particules solides pouvant créer des points de surchauffe en surface du plan d'eau de la chaudière, il est préférable de prévenir ce phénomène par un traitement adapté par osmose inverse en amont plutôt que de s'en remettre à l'action du seul agent anti-mousse.

Attention : certains types de chaudières ont des propensions " naturelles " au primage du fait de leur conception. (par exemple plan d'eau trop proche du point d'extraction de la vapeur).

Pour les vapeurs alimentaires devant demeurer exemptes de tout entraînement d'eau il sera préférable de choisir des appareils à tubes d'eau horizontaux : Cf. 5 - 5 -) .

Note : Ici aussi pour des pressions dépassant les 15 bar un dégazage thermique est recommandé.

6 - 3 - 2 - 3 -) *Titres à maintenir dans ces eaux de chaudière :*

a -) Pour des générateurs jusqu'à 10 bar

Salinité totale maximum : 5.000 mg. / litre - T.A.C. maximum : 120 ° f. pH : 10,5 - 11,8 - SiO₂ / T.A.C. < ou = à 2,5

b -) Pour des générateurs de 10 à 15 bar

Salinité totale maximum : 4.000 mg. / litre - T.A.C. maximum : 100 ° f - pH 10,5 - 11,8 - SiO₂ / T.A.C. < ou = à 2,5 .

c -) Pour les générateurs de 15 à 25 bar

Salinité totale maximum : 3.000 mg. / litre - T.A.C. maximum : 80 ° f - pH : 10,5 - 11,8 - SiO₂ / T.A.C. < ou = à 2,0

6 - 4 -) *Générateurs à tubes d'eau horizontaux.*

Ces appareils peuvent produire de la vapeur en général jusqu'à 45 - 50 bar.

Suivant les pressions la salinité maximum de l'eau de chaudière évoluera de 4.000 mg. / litre pour les pressions les plus basses

(jusqu' à 12 - 14 bar) à 1.500 mg. / litre pour des valeurs 45 - 50 bar .

6 - 4 - 1 -) *Traitement* .

Pour les pressions se répartissant dans les tranches jusqu' à 12 - 14 bar et 15 - 25 bar ceux - ci peuvent être similaires à ceux mentionnés en 6 - 3 - 1 -) .

Pour les pressions se répartissant entre 25 et 50 bar la déminéralisation associée à un dégazage thermique seront indispensables .

Pour les générateurs produisant une vapeur alimentant des turbines, il faudra en plus réduire considérablement les teneurs en silice, silice colloïdale, teneurs en métaux lourds pouvant passer avec la vapeur .

6 - 4 - 1 - 1 -) La déminéralisation moyenne portant sur une élimination de 98 % ou un peu plus de la salinité d' origine pour les vapeurs n' alimentant pas de turbines, sera réalisée avec un traitement par osmose inverse .

Ce procédé à la différence des traitements sur résines échangeuses d' ions ne génère pas de rejets très polluants dus aux effluents acides et alcalins, mais en plus il élimine la silice colloïdale, les micro-particules, les détergents, les bactéries qui posent de multiples problèmes : dépôt de silice sur les pales des turbines, phénomènes de primage provoqués par des organismes vivants, des traces de détergents, les microéléments solides, etc .

6 - 4 - 1 - 2 -) *Pour les eaux nécessitant une déminéralisation plus poussée, l' électro-désionisation alimentée en eau osmosée sera mise en œuvre .*

Ce procédé moderne que nous utilisons pour nos clients avec des appareils *E - Cell* * - *Heinz Burkhalter* (Cf. annexe 2) permet d' atteindre des taux de déminéralisation de l' eau similaires à ceux procédant d' un traitement sur résines échangeuses d' ions en lit mélangé et ce sans utiliser de réactifs acides et alcalins , donc sans stockage ni manipulations de produits dangereux et bien entendu sans rejets de régénération des résines échangeuses d' ions très polluants.

Mode de fonctionnement

Ce procédé consiste en l' utilisation combinée de membranes polarisées et de résines échangeuses d' ions incluses entre les parois constituées par ces membranes .

L' eau déjà traitée par osmose inverse migre au sein des résines lesquelles captent les ions contenus par ce fluide .

Un courant continu assure la migration des ions captés par les résines au centre vers les membranes polarisées situées de part et d' autre de ces échangeurs d' ions, puis parachève leur transfert depuis celles - ci dans un courant d' eau doté d' une forte concentration en anions et cations et dont une partie est évacuée de façon régulière vers l' égout .

Avantages du procédé d' électro - désionisation " E - Cell . - Heinz Burkhalter " (Cf. annexe 2) .

Mis à part son prix très compétitif vis - à - vis de techniques similaires, et la très grande facilité pour mettre en place une cellule, ce procédé permet de produire une eau ayant une résistivité de 17,0 - 17,5 mégohm (0,058 à 0,057 μ Siemens) à partir d' une eau osmosée ayant une conductivité moyenne de 6,0 μ Siemens (166.666 ohm) .

L' eau traitée dispose si nécessaire d' une pression dynamique permettant d' alimenter directement (sans cuve de stockage et sans dispositif de remise en pression) des appareils en aval .

C' est à notre connaissance le seul procédé d' électro - désionisation permettant de disposer d' eau purifiée dotée de sa propre pression dynamique .

Le système "*E - Cell - Heinz Burkhalter*" génère son propre flux de concentrat . C' est un grand avantage, car il n' est pas tributaire comme beaucoup d' autres procédés du même genre d' un apport d' eau adoucie soumise aux aléas de fonctionnement de l' adoucisseur, car en cas de fuite de dureté avec cet appareil il se produit d' importantes perturbations sur les membranes polarisées canalisant cette eau théoriquement adoucie .

Le rendement hydraulique d' un appareil d' électro - désionisation peut atteindre 98 % (2 % du débit production éliminés sous forme de rejets pouvant être récupérés par l' unité d' osmose inverse en amont) .

- *Dégazage thermique*

Le dégazage thermique assurant la meilleure élimination de l' oxygène sera réalisé à 104 - 105 ° C : températures où l' oxygène a le plus faible coefficient de solubilité dans l' eau . (environ 0,005 mg. / litre) .

Certains types de dégazeurs thermiques très performants (type bêche dégazante) permettent pour des débits allant jusqu' à 600 m³ / heure d' obtenir une eau dégazée avec une teneur en O₂ < à 10 µg / litre , des dégazeurs sous vide traitant les eaux à froid produisent des eaux contenant 15 à 20 µg. / litre d' oxygène (utilisés en particulier pour traiter les eaux de mer injectées dans les forages pétroliers ou pour les eaux froides utilisées dans les fabrications de constituants électroniques) ..

6 - 4 - 2 -) *Conditionnement* .

Pour les appareils produisant de la vapeur avec une pression maximum de 25 bar et admettant une salinité en chaudière de l' ordre de 3.000 mg. / litre, des conditionnements classiques avec des composés minéraux peuvent être utilisés .

Cependant au fur et à mesure que la pression d' exploitation s' élève il est bon de réduire progressivement la minéralisation de l' eau pour permettre l' obtention de taux de concentration en chaudière qui n' occasionnent pas d' importantes purges de déconcentration .

Pour les pressions supérieures à 25 bar, compte tenu de la nécessité d' une minéralisation beaucoup plus réduite en chaudière, il est préférable d' utiliser des produits organiques qui influent bien moins sur la salinité de l' eau

Par exemple des associations morpholine ou ammoniacale (alcalinisants) - copolymère acrylate maléique (dispersant) - dérivé de l' hydroxylamine (réducteur) ou mélange d' amines dont une amine en partie volatile + réducteur d' oxygène n' apportent que très peu de minéralisation dans les eaux de chaudière et autorisent d' excellents facteurs de concentration .

6 - 5 -) *Chaudières à tubes d' eau verticaux* .

Ces générateurs permettent des productions de vapeur jusqu' à 100 bar et plus .

Nous ne considérerons ici pour éviter les répétitions que les appareils dont les pressions de fonctionnement se situent entre 40 et 100 bar ou plus .

6 - 5 - 1 -) *Caractéristiques des eaux de chaudière (f) de la pression de marche* .

- Pour les générateurs de 40 à 60 bar .
- Teneur de l' eau thermique en Ca²⁺ = 0,05 ° f - Eau déminéralisée dégazée - pH = ou > à 8,0 - teneur en O₂ < 0,02 mg. / litre
- Teneur en matières huileuses : < 0,05 mg. / litre .
- Fer total : teneur maximum : < 0,05 mg. / litre
- Cuivre total : teneur maximum : < 0,03 mg. / litre
- Pour l' eau de chaudière :

Salinité totale maximum : < 500 mg. / litre - T.A.C. < ou = à 15 ° f. - T.A. = ou > à 0,5 T.A.C (Indispensable)
pH = 10 à 11 - Teneur en phosphates exprimée en PO₄³⁻ = 10 à 60 mg. / litre - SiO₂ / T.A.C. < 1

- Pour les générateurs de 60 à 75 bar .

Caractéristiques de l' eau thermique similaires aux précédentes sauf pour le cuivre : teneur < 0,02 mg. / litre + absence de composés organiques .

- Pour l' eau de chaudière :

Salinité totale maximum : < 300 mg. / litre - T.A.C. < ou = à 10 ° f - T.A. = ou > à 0,5 T.A.C. (Indispensable)
pH = 10 à 11 - Teneur en PO₄³⁻ = 10 à 40 mg. / litre - SiO₂ / T.A.C. < 1 .

- Pour les générateurs de 75 à 100 bar et plus .

Caractéristiques de l' eau thermique différentes des précédentes en particulier pour le cuivre : teneur < 0,01 mg. / litre + absence de matières organiques, de T.O.C. , de traces d' huiles et hydrocarbure ainsi que de matières en suspension .

- Pour l' eau de chaudière :

Salinité totale maximum : < 100 mg. / litre - T.A.C. < ou = à 5 ° f. T.A. = ou > à 0,5 T.A.C. (Indispensable)
pH = 9,5 à 10,5 - Teneur en PO_4^{3-} = 5 à 20 mg. / litre - SiO_2 / T.A.C. < 1 .

6 - 5 - 2 -) *Traitement* .

Le traitement est très poussé compte tenu des impératifs relatifs tant à la minéralisation, qu' aux caractéristiques physiques, microparticulaires , colloïdales et organiques .

Un traitement standard ne peut être défini, mais il mettra en œuvre au minimum une pré-épuration physique très poussée, suivie d' une déminéralisation totale non polluante : osmose inverse + électro - désionisation (avec parfois une finition sur résines échangeuses d' ions monosphère en lit mélangé) et un dégazage thermique performant .

Pour des installations nouvelles un traitement tel que celui défini en 6 - 6 - 2 -) peut être mis en œuvre avec beaucoup d' avantages et des éléments de pollution réduits au minimum .

6 - 5 - 3 -) *Conditionnement* .

L' eau étant très déminéralisée , bien dégazée , et avec un désiliciage élevé surtout pour les plus hautes pressions, les apports de produits de conditionnement organiques seront indispensables mais très faibles, avec en contre partie la nécessité de devoir être réalisés avec une grande précision .

Une attention toute particulière devra être portée sur le choix des pompes doseuses, leur mode d' asservissement , le titre des solutions, leur mode de préparation la qualité des eaux de dilution et leur protection vis - à - vis de risques d' apport de pollution externe .

Pour les produits, leur dosage, ce sont les fabricants de ces générateurs qui les précisent .

Il en sera de même pour les condensats récupérés, souvent pollués et qu' il convient de traiter et de reconditionner avant leur réutilisation .

L' utilisation d' amines volatiles réduira considérablement les risques d' acidification de ceux - ci et par conséquence l' attaque des conduits qui les véhiculent et donc leur pollution .

6 - 6 -) *Centrales nucléaires à eau pressurisée* .

Les renseignements fournis ici sont donnés à titre indicatif .

Par rapport aux générateurs classiques, les centrales à eau pressurisée sont dotées de deux circuits distincts :

- Le circuit primaire assure le captage et le transport des calories depuis le centre du réacteur nucléaire - ce circuit est dit aussi " actif " .
- Pour ce circuit, l' eau est maintenue en l' état liquide sous une pression moyenne de 150 - 160 bar avec une température de sortie du réacteur d' environ 320 - 330 ° C. et une température de retour voisine de 175 - 185 ° C. .
- Le circuit secondaire où se produit la vaporisation de l' eau et incluant aussi la turbine, le ou les condenseurs, (parfois aussi le traitement des condensats) les réchauffeurs et la pompe alimentaire .

A la différence du premier (sauf en cas de fuite au niveau du générateur) ce circuit est considéré comme " inactif " .

6 - 6 - 1 -) *Caractéristiques requises par les diverses eaux d' appoint* .

- Pour celles concernant le circuit primaire

Oxygène = < à 0,1 mg. / kg. - Conductivité = 0,25 μS cm^{-1} et une valeur limite < à 1 μS cm^{-1}

Teneur en chlorure et fluorures < 0,1 mg. / kg. - Teneur en Na < 0,015 mg. / kg. -

Teneur en Silice totale < 0,1 mg. / kg. .

- Pour celles concernant le circuit secondaire (eau vaporisée)
- Oxygène < 0,02 mg. / kg . - Conductivité cationique < 1 $\mu\text{S cm}^{-1}$
- pH < 9,2 - Teneur totale en matières en suspension (M.E.S.) < 50 $\mu\text{g. / kg}$.
- Silice totale < 50 $\mu\text{g. / kg}$. dont une teneur maximum en silice ionisée < 20 $\mu\text{g. / kg}$.

6 - 6 - 2 -) Traitements pouvant être mis en place .

Remarque : Compte tenu des caractéristiques des eaux d'appoint précitées, celui - ci doit porter sur les matières en suspension, les micro-particules solides, les traces d'huiles, d'hydrocarbures, la silice et les composés colloïdaux, tous les éléments de minéralisation, les composés organiques, les détergents, les zoo et phytoplanctons, les gaz dissous en particulier oxygène et gaz carbonique

Les traitements classiques polluants (Cf. annexe 2) mettent en oeuvre des procédés tels que :

Coagulation, floculation, décantation avec adjonction de produits tels que les polychlorures d'aluminium, l'hypochlorite de sodium, la chaux, filtration sur graviers, filtration sur diatomées, filtration sur charbons actifs, déminéralisation sur résines échangeuses d'ions en lits séparés associant résines carboxyliques, résines cationiques fortes, échangeurs d'ions anioniques faibles et échangeurs anioniques forts, finition sur lits mélangés en série et dégazage thermique .

Les traitements modernes comporteront plusieurs techniques séparatrices sur membranes avec en particulier :

- Ultrafiltration sur membranes spéciales conçues pour le traitement des eaux turbides, conditionnement " anti - scalent "
- osmose inverse avec des membranes à très haut taux de rejet de la minéralisation et faible pression d'exploitation (cette technique assurant en une opération l'élimination des micro-particules, de la silice colloïdale, de la minéralisation avec une efficacité de l'ordre de 99 % , l'élimination des composés organiques, détergents, phénols hydrocarbures, etc avec un pouvoir de coupure de 200 dalton, l'élimination complète du zoo et du phytoplancton, des bactéries et organismes mono - cellulaires) -
- électro - désionisation associant des membranes ionisées séparatrices et des résines échangeuses d'ions régénérées en permanence par le courant électrique et permettant d'obtenir une eau ayant une conductivité de l'ordre de 0,06 - 0,055 $\mu\text{S cm}^{-1}$
- finition sur lits mélangés en série dotés de résines " monosphère " à hautes performances ,
- dégazage thermique .

Important .

Le second mode de traitement permet de supprimer l'utilisation de tous les agents classiques de coagulation tels le sulfate d'alumine, le chlorure ferrique, la chaux, les polychlorures d'aluminium (organo métalliques) , l'hypochlorite de sodium, et les grandes consommations de matériaux filtrant (diatomées) d'acides et de soude pour la déminéralisation sur résines échangeuses d'ions en lits séparés .

- Les pollutions habituelles procédant des modes de traitement classiques sont alors réduites au minimum .

6 - 6 - 3 -) Conditionnement .

Pour le circuit primaire " actif " il comportera deux réactifs :

L'hydroxyde de lithium pour garder un pH alcalin voisin de 9,0 et prévenir les risques de corrosion .

L'acide borique H_3BO_3 qui avec l'apport des ions bore joue le rôle de modérateur des flux de neutrons et permet aussi de contrôler la puissance que fournira le réacteur .

Nota : de tels ions sont utilisés comme " ralentisseurs " dans les " piscines " des installations nucléaires .

Le circuit secondaire est conditionné avec de l'ammoniaque ou de la morpholine en tant qu'agent alcalinisant, et de l'hydrate d'hydrazine en tant que réducteur .

Remarque :

Pour les condensats récupérés, il va de soi que ceux - ci font l' objet d' un post traitement défini en fonction des risques de pollution qu' ils peuvent présenter .

La préfiltration peut être réalisée sur un filtre à précouche en utilisant par exemple des résines synthétiques non polaires dotées d' un bon pouvoir adsorbant vis - à - vis des colloïdes, ou des diatomées pour assurer en parallèle de l' élimination des substances colloïdales, et un excellent déshuilage .

La post - déminéralisation ayant pour but de fixer les traces de constituants métalliques libérées par la turbine, les conduits, les condenseurs (ions fer, nickel, silice) et d' arrêter les sels minéraux pouvant arriver suite à des fuites sur les condenseurs .

Ces déminéralisations s' effectuent à grande vitesse 70 - 120 m. / heure sur des résines échangeuses d' ions en général macroporeuses mécaniquement les plus résistantes .

Les résines sont séparées lavées et régénérées dans d' autres corps que ceux qui contiennent les lits mélangés pour assurer les régénérations et les rinçages optima (en particulier l' élimination du sodium de la soude) .

Une autre technique consiste à faire précéder le lit mélangé d' un échangeur de cations qui élimine les ions NH_4^+ procédant de la décomposition des produits tels que l' ammoniaque, la morpholine .

Ces ions étant prédominants dans des condensats pauvres en anions, l' eau résultant de la condensation est complètement déséquilibrée et le lit mélangé est alors mal exploité .

Cet échangeur cationique assure le rééquilibrage et aussi avec ses résines un complément de filtration des condensats et le lit mélangé en aval est consacré uniquement à la post déminéralisation .

Il assure aussi l' élimination des matières en suspension et des traces d' huile .

Donc parfois il peut remplacer avantageusement la filtration sur filtre à précouche mentionnée au début de ce paragraphe .

Les condensats post épurés seront conditionnés avec de l' ammoniaque ou de la morpholine .

6 - 7 -) *Générateurs de vapeur stérile* (Cf. 5 - 9 -) . Ces appareils ont deux vocations :

- Produire de l' eau distillée stérile (après condensation) conforme aux monographies Européennes et nationales en ce qui concerne l' Industrie Pharmaceutique, les Instituts de Recherche, les laboratoires, etc .
 - Produire de la vapeur stérile utilisée pour la stérilisation : des flacons et ampoules pour injectables, des cuves, tuyauteries, pompes, etc, destinées à stocker et distribuer l' eau distillée, des réacteurs, des appareillages de lyophilisation, etc .
- Cette vapeur est aussi employée pour la régulation hygrométrique des suites stériles, pour l' alimentation directe des autoclaves, etc .

6 - 7 - 1 -) *Traitement des eaux devant produire de la vapeur stérile* .

Ce traitement a pour but d' éviter toutes les formations d' incrustations au sein des générateurs avec une déminéralisation poussée (environ 99 % d' élimination des éléments ionisés), de débarrasser l' eau des micro - particules solides, des substances volatiles toxiques susceptibles de " passer " avec la vapeur ou de former des azéotropes, de purifier l' eau au plan bactérien et viral (certains de ces éléments étant thermo - résistants : par exemple les germes sporulés) des éléments colloïdaux, en particulier de la silice colloïdale et de certains silicates doubles responsables de la formation dans les distillateurs de tartres siliceux extrêmement durs .

De ce fait toute forme de traitement susceptible de libérer dans l' eau des composés volatils toxiques, des constituants organiques de matériaux plastiques non stables, est prohibée .

Il convient d' utiliser des constituants métalliques et " plastiques " stables vis - à - vis de l' eau et appartenant à la catégorie des matériaux sélectionnés par l' U.S. Food and Drug Administration ou par un organisme similaire faisant autorité . A titre d' exemple nous ne pourrions réaliser une déminéralisation sur résines échangeuses d' ions du type anionique fort (associées à des échangeurs cationiques) qui libèrent dans l' eau déminéralisée des amines volatiles

Le traitement idéal des eaux devant être transformées en vapeur stérile ou en eau distillée stérile comprendra : (Cf. annexe 2) .

- Une préfiltration sur membranes d' ultra - filtration pour assurer une parfaite pré-épuration micro - particulaire, colloïdale, bactérienne et virale,
- un adoucissement sur résines échangeuses d' ion sous forme sodium et agréées par les autorités sanitaires de multiples pays,

- une micro - filtration sur une structure stable 0,1 μm . absolu
- une exposition au rayonnement U.V. dans un émetteur avec le corps en acier inoxydable
- un traitement de déminéralisation par simple ou double osmose inverse < (f) de la minéralisation totale de l' eau à traiter >
- un dégazage sous vide au travers de membranes spéciales
- une électro - désionisation
- une micro-ozonation de l' eau purifiée pour parfaire sa désinfection très poussée
- une exposition au rayonnement ultra - violet pour éliminer les traces d' ozone résiduel avant utilisation .

Tous les constituants métalliques en aval de l' adoucisseur seront en acier inoxydable 316 L à bas taux de carbone, tant pour les corps des filtres, que pour les appareils d' osmose inverse, les pompes haute pression, les enveloppes de pression, toutes les tuyauteries, vannes, clapets, manomètres, corps des émetteurs de rayonnement U.V. , etc .

Les soudures doivent être réalisées selon des techniques de soudage orbital et ne comporter qu' un très bas taux de ferrite .

6 - 7 - 2 -) *Conditionnement* : Aucun .

7 -) *Exploitation*

Celle - ci porte sur la conduite du générateur, le contrôle des qualités de l' eau en chaudière, de la vapeur, des retours condensés .

Elle concerne aussi la surveillance et l' entretien des appareils de traitement d' eau , le contrôle régulier de leurs performances, et des caractéristiques de l' eau traitée

Si il y a un post traitement sur les condensats tels que filtration, traitement sur résines, etc, sa surveillance et son entretien seront inclus dans les tâches de l' exploitant

Le conditionnement de l' eau et un post conditionnement éventuel des retours condensés nécessiteront la surveillance des niveaux des solutions , des groupes de dosage, le renouvellement régulier des mélanges dilués, le contrôle de leur bonne concentration, l' entretien des pompes doseuses, le nettoyage régulier des bacs à solution , etc .

Elle comprendra aussi la gestion des consommations d' eau , d' énergie, de produits de conditionnement , de constituants de certains appareils tels que des résines échangeuses, d' ions, des membranes semi - perméables d' osmose inverse, d' éléments dit consommables tels que des cartouches filtrantes, du charbon actif, des diatomées, les réactifs chimiques utilisés pour le traitement de l' eau, etc .

Pour limiter les consommations d' eau et d' énergie qui sont très souvent les deux principales sources de dépense d' exploitation, il faut que l' eau traitée permette les concentrations maxima en chaudière limitant de ce fait les purges de déconcentration, les pertes de calories, et les consommations de produits de conditionnement .

En parallèle, le traitement de l' eau doit utiliser les procédés les plus simples et les plus fiables pour réduire le temps consacré à leur maintenance, et diminuer au maximum les interventions relatives à la conduite du générateur .

Ces procédés doivent travailler de façon automatique sans utiliser autant que possible de produits à doser, et les performances telles que débit, conductivité, etc, sont gérées par des appareils qui mesurent et permettent de centraliser les valeurs relevées .

Les techniques séparatrices sur membranes répondent à ces nécessités et se substituent de plus en plus aux moyens traditionnels qui utilisent de multiples réactifs polluants et obligent les exploitants à leur consacrer beaucoup de temps pour la surveillance des dosages, le renouvellement des solutions, l' approvisionnement des réactifs acides et alcalins, la neutralisation des rejets, etc .

Trois techniques pratiques, simples et performantes émergent :

- l' **ultra - filtration** pour l' épuration physique colloïdale et micro - organique des eaux en lieu et place des procédés de coagulation, floculation, décantation, filtration mettant en œuvre trois ou quatre produits chimiques différents
- l' **osmose inverse** dotée de membranes semi - perméables assurant une déminéralisation de l' eau très compétitive en qualité vis - à - vis de celle obtenue avec une déminéralisation classique sur résines échangeuses d' ions qui provoquent le stockage, la manipulation, le rejet ultérieur de produits dangereux, corrosifs, polluants, tels que l' acide chlorhydrique et la soude .

- l' **électro - désionisation** associant des membranes polarisées et des résines échangeuses d' ions régénérées électriquement de façon continue et capable de produire des eaux extrêmement déminéralisées (16 - 17 millions d' ohm) à la place de résines échangeuses d' ions en lit mélangé, elles aussi régénérées avec de l' acide et un produit alcalin .

Note importante à propos du mode d' exploitation des unités d' osmose inverse dans l' industrie .

Comme nous le savons, ce procédé utilise des membranes semi - perméables capables d' éliminer suivant la nature des sels minéraux dissous dans l' eau 98 à 99 % de ceux - ci .

L' eau à traiter arrive sous pression au contact des membranes, l' eau pure passe pratiquement seule la barrière présentée par celles - ci et toutes les micro - particules, les substances colloïdales, les sels minéraux se concentrent à l' extérieur des membranes, et seront évacués sous forme d' un rejet concentré .

Une tendance qui se manifeste depuis quelques années, consiste dans la réduction au maximum des débits d' eau de rejets concentrés des appareils d' osmose.

Le but , louable en lui même, est de diminuer de façon drastique les pertes en eau dans un soucis d' économie en augmentant le plus possible le rendement hydraulique des installations d' osmose inverse .

Celle - ci présente une contre partie non négligeable qui se traduit du fait de l' augmentation de la concentration des éléments gênants (en particulier des fuites de dureté dans l' eau prétraitée et des substances colloïdales) par d' importants dépôts sur les membranes.

Note :

Il en est de même pour des eaux qui ne seraient pas prétraitées par adoucissement mais avec des produits anti - précipitation, car la dureté totale de l' eau peut alors être accrue exagérément et l' efficacité des produits n' est plus suffisante pour prévenir les précipitations insolubles sur les membranes .

Il y a toujours un risque qu' il puisse à certains moments demeurer des traces de dureté dans l' eau adoucie qui en général alimente ces appareils, ou que des fuites de dureté apparaissent en fin de cycle d' échange des résines .

Avec un débit de rejet normal conduisant à un rendement hydraulique d' environ 70 - 75 % la concentration de l' eau sur les membranes et donc des impuretés qu' elle contient est de 3,33 fois à 4 fois ce qui est déjà important .

Si le rendement est poussé exagérément à 85 - 90 % la concentration peut atteindre 10 fois !!!

Les colloïdes et les traces de dureté forment un film plus ou moins perméable réduisant la surface active de la membrane, film dans lequel en plus les sels minéraux viennent s' accumuler au lieu de rester libres et de pouvoir être éliminés sous forme de rejet .

Cette diminution de surface active et l' augmentation de la salinité à proximité immédiate des membranes semi - perméables se traduisent dans un premier temps par la nécessité de relever la pression mécanique de l' eau alimentant les membranes et donc par une augmentation de la consommation de l' énergie électrique .

Dans un second temps, étant donné qu' il y a plus de minéralisation en amont des membranes, la probabilité de passage de sel avec l' eau traitée augmente, et il y aura une réduction de la qualité de l' eau osmosée se traduisant par une augmentation de sa conductivité .

L' eau étant plus chargée au plan minéral, le facteur de concentration en chaudière se réduira et les rejets, pertes en eau, pertes en calories augmenteront .

Dans un troisième temps, les membranes atteignant un degré important de colmatage, il faudra arrêter l' installation d' osmose pour changer les membranes par des neuves qu' il faudra acheter, pour permettre de nettoyer celles qui étaient en service sans arrêt notable de production d' eau traitée : Coût de main d' œuvre + perte de temps + manque d' eau pour alimenter la chaudière pendant ces heures d' entretien, ou opérations réalisées en dehors des périodes d' activité mais nécessitant des heures supplémentaires des intervenants, donc plus onéreuses .

Pour tout système de traitement sur membranes (et aussi pour beaucoup d' autres procédés) il existe un juste milieu dans lequel il faut le maintenir, à la fois pour bénéficier intégralement des avantages de ses performances, mais aussi pour le garder dans des conditions optima de fiabilité et de longévité .

Cela ne sert à rien de tenter de tirer la quintessence d' un appareil en lui infligeant des conditions d' exploitations trop rigoureuses, et ce sans se préoccuper des conséquences . A un moment donné l' excédent de concentration se manifeste par des altérations de débits, puis de qualité et enfin la production de vapeur est gravement perturbée .

Les gains en eau auront été illusoires et dangereux .

Henry Lérat - Heinz Burkhalter S.A.

Worblaufenstrasse 155 CH - 3048 Worblaufen

Tel. 031 921 29 11 - Fax. 031 921 56 49

*Pour A. S. I. T. - Symposium Chaud '98
Septembre 1998 .*

BIBLIOGRAPHIE

Aerobe en anaerobe corrosie in waterleiding buizen - C. A. H. Wolzogerkuhr en L. S. Vlugt

Amberlite ion exchange resins - Rohm & Haas

Anaerobic corrosion of iron in soil - R.L. Starkey , K. M. Wight

Aqua ad iniectabilia - Pharmacopée Européenne 1997

Aqua purificata - Pharmacopée Européenne 1997

B W 30 membranes FilmTec corp. Dow Chemical

Cavitation corrosions and its prevention in diesel engines - W. Fearon

Charbon actif - Ste. Norit

Conditionnement des circuits d' eau - R. Vincent

Conditionnement des eaux (f) des divers types de générateurs de vapeur - Mémento Technique de l' Eau - Ste. Degrémont

Corrosions et entartrages - J. Puyo

Corrosions biochimiques des circuits en métal ferreux - K. W. H. Leeflang

Eau - Métal - Chaleur - H. Lérat , J. Mayet

Electro - désionisation - E - Cell - Ste. Glegg

Introduction à la chimie descriptive - L. Pauling

L' eau - R. Rath .

Metal und wasser - Dr. Hömig

Monosphere ion exchange resins - Dow Chemical

Normes relatives à la composition des eaux de chaudière - U.S. American boiler

Prévention de la corrosion des circuits d' eau - L. Colas , J. Rouquet , J. Boutin .

Recommandations relatives au conditionnement des eaux des centrales nucléaires à eau pressurisées - Mémento Degrémont

- - - - -

Annexe 1

Généralités relatives à l' eau et sa vapeur

L' eau résulte de la combinaison de deux gaz : l' hydrogène et l' oxygène dans la proportion de deux volumes du premier avec un volume du second .

Cette synthèse peut se produire lentement de façon naturelle sous l' influence de la lumière solaire ou d' une légère température . Elle est aussi réalisée dans un appareil appelé eudiomètre où sous l' influence d' une étincelle électrique la synthèse est brutale avec une température ponctuelle atteignant 3.000 ° C .

Sa formule théorique est H_2O , sa masse molaire = 18 . - sa constante diélectrique à 20 ° C est de 80 ce qui signifie que des éléments de polarité différente essayant de s' associer auront des attractions 80 fois plus faible que dans l' atmosphère .

Sa constante diélectrique très élevée fait de l' eau un solvant très puissant (l' eau est considérée en tant que solvant universel) .

Mesure du caractère acide, alcalin, ou neutre d' une eau - Notion de pH .

A l' état naturel l' eau recèle des micro - quantités d' ions hydrogène H^+ acides (ou aussi OH_3^+) libres et de radicaux hydroxyles OH^- alcalins libres aussi .

La mesure du pH (potentiel hydrogène) permet de déterminer la prédominance d' ions acides pH de 7 à 0 en valeurs croissantes d' acidité , d' ions alcalins pH de 7 à 14 en valeurs croissantes d' alcalinité ou encore la neutralité : égales quantités de chaque .

Chaleur de vaporisation de l' eau .

Elle possède une chaleur de vaporisation très élevée : 539,6 cal. / gramme ou 9.710 cal. / mol .ce qui en fait un excellent liquide calo - porteur .

Au dessus de 374,5 ° C . appelée aussi température critique, la vapeur d' eau ne peut être liquéfiée même sous l' effet de pressions très élevées .

A la température critique de 374,5 ° C. correspond une pression critique de 221,9 bar .

L' eau sous forme de vapeur est stable jusqu' à 2.000 ° C. A partir de cette température elle commence à se dissocier en oxygène et hydrogène .

Minéralisation d' une eau

La minéralisation d' une eau résulte de la dilution des éléments naturels tels que sels, métaux, oxydes métalliques, etc, provenant de la terre, des roches, du gypse, du calcaire, etc .

En chimie il est démontré que les éléments solides se dissolvent dans l' eau puis subissent une autre transformation appelée ionisation .

Notion d' ionisation (séparation d' un composé en ses constituants)

L' ionisation est la séparation d' un composé chimique en ses constituants .

Par exemple le sel appelé aussi chlorure de sodium est constitué d' un élément appelé chlore s' écrivant Cl et d' un métal appelé sodium ou Na (natrium) comme symbole chimique .

Notions d' anion et de cation

Du sel versé dans l' eau devient invisible (dissolution) , puis il se sépare en ses constituants, ionisation .

Ce phénomène est mis en évidence en plaçant deux électrodes dans l' eau salée .

A l' anode (électrode positive) il y aura un dégagement de chlore .

L' anode étant positive, les constituants attirés par elle sont de signe contraire donc négatifs et ils seront appelés anions .

A la cathode (chargée négativement) il y aura un dépôt de métal brillant le sodium, celui - ci a une charge positive et est appelé cation .

Tous les sels ou substances solides sont constitués par l' assemblage de constituants positifs (cations) et de constituants négatifs (anions) .

La minéralisation de l' eau qui inclue tous les éléments minéraux dissous s' exprime de diverses façons

Soit en mg. / litre ce qui est le plus simple mais ne permet pas de savoir si la quantité d' éléments positifs ou cations équilibre bien celle des éléments négatifs appelés aussi anions .

Notion du degré dans les analyses d' eau .

Soit en ° Français qui tient compte de caractéristiques telles que la masse atomique de l'élément et du nombre de caractères positifs ou négatifs qu'il contient

Soit encore en milliéquivalent - litre ou meq dont la valeur est de 5 fois le ° f.
Il y a aussi le ° Allemand ou ° d - les millimol. / litre, etc.

A titre d'exemple pour quelques cations :

1 ° f de calcium = 4 mg. / litre - magnésium = 2,43 mg. / litre - Sodium = 4,6 mg. / litre - Potassium = 7,8 mg. / litre

pour les anions :

1 ° f. de chlorures = 7,1 mg. / litre - Sulfates = 9,6 mg. / litre - Bicarbonates = 12,2 mg. / litre -
Nitrates = 12,4 mg. / litre

Pour qu'une analyse d'eau soit valable et équilibrée, il faut à quelques pour cent près qu'il y ait autant de degrés de cations que de degrés d'anions.

Si l'analyse de l'eau est fournie en mg. / litre, il faut diviser les quantités de chaque élément par la valeur correspondante de son ° f et au bout du compte nous disposerons d'une analyse totalement exprimée en ° f où il sera facile de voir si elle est équilibrée.

Signification de certaines dénominations relatives à la composition d'une eau.

Dureté ou TH ou titre hydrotimétrique.

Cette notion est en relation directe avec la teneur plus ou moins importante d'une eau en calcium et magnésium, éléments qui à chaud ont la propriété de former sur les échangeurs, les parois chaudes, dans les conduits, etc, de dépôts solides appelés aussi tartre.

Ceci indique le caractère doux ou dur d'une eau. Toutes les eaux ayant de 1 à 5 ° f de TH sont très douces
De 5 à 10 ° f elles sont douces - de 10 à 15 ° f. elles sont moyennement dures, au delà elles sont dures, puis très dures.

T.A.C. ou titre alcalimétrie complet. (m Wert)

Cette dénomination est en relation avec la teneur en bicarbonates d'une eau naturelle ayant un pH inférieur à 8,3.

Les bicarbonates sont des ions solubles (anions) qui sous l'effet de la chaleur perdent leur solubilité car il existe dans l'eau une certaine quantité d'un gaz qui les accompagne appelé gaz carbonique équilibrant qui s'échappe de l'eau sous l'effet de la température et permet aux bicarbonates de précipiter sous forme insoluble si il s'agit de carbonates avec des cations comme le calcium et le magnésium

Si l'eau a été adoucie (remplacement du calcium et du magnésium par des ions sodium) ils se forme des carbonates beaucoup plus solubles.

Pour les eaux peu alcalines (pH inférieur à 8,3) le TAC exprimé en ° f. ou en ° d. représente la teneur de l'eau en bicarbonates de formule chimique HCO_3^- .

T.A. ou titre alcalimétrique. (p Wert)

Celui-ci apparaît dans les eaux plus alcalines (pH > 8,3) par exemple dans les eaux de chaudière, il peut exprimer la teneur de l'eau en éléments plus alcalins tels que des hydroxydes - (avec des radicaux OH^-), des carbonates.

Les teneurs en gaz dissous tels l'oxygène et le gaz carbonique sont en général exprimées en mg. / litre.

Leur solubilité dans l'eau décroît quand la température s'élève. Le dégazage thermique est un moyen efficace de dégazer une eau.

Les éléments minéraux gênants contenus dans l'eau sont < Cf. 1-2-) à 1-4) et 1-6-) + 1-7-) >

Le calcium, le magnésium, les métaux lourds, les sulfates, les chlorures, la silice, les minéralisations totales importantes, les fortes teneurs en bicarbonates, etc responsables dépôts incrustants - de corrosions diverses - de phénomènes de primage

Pour les gaz : le gaz carbonique : occasionne l'agressivité de la vapeur - l'oxygène provoque des corrosions diverses .

Notion d'échange d'ions

Comme nous l'avons vu plus haut dans cette annexe, il existe dans l'eau des éléments ionisés responsables de formations de dépôts incrustants, de corrosions, d'augmentation de la viscosité de l'eau et donc de primages suite à des minéralisations trop élevées dans les eaux de chaudière .

Il existe des procédés utilisant des très petites billes de matière plastique stable appelées aussi " résines " qui suivant leur nature ont la propriété de fixer à leur surface des ions assez mobiles tels que le sodium Na^+ , l'hydrogène H^+ , un radical alcalin (hydroxyle) OH^-

Les résines portant des cations mobiles sont appelées résines cationiques, les autres portant des radicaux OH^- alcalin sont appelées résines anioniques .

Si de l'eau percole sur ces résines, celles-ci abandonne dans l'eau leurs ions mobiles et en contre partie captent des ions correspondant de même signe contenu par cette eau .

Il y a donc un échange , et le phénomène est appelé échange d'ions, les résines étant alors dénommées " résines échangeuses d'ions " .

Notion d'adoucissement et de régénération des résines .

Nous avons vu que les cations calcium Ca^{2+} et Magnésium Mg^{2+} sont responsables de formations de dépôts incrustants appelés aussi tartres .

Si cette eau passe sur des résines chargées en ions sodium Na^+ , les résines capteront le calcium et le magnésium de l'eau et lui fourniront en échange des ions sodium qui forment des carbonates solubles non entartrant .

L'eau n'est donc plus dure, nous disons qu'elle a été adoucie, et le traitement qu'elle a subi s'appelle un « adoucissement » .

Nota : Quand les résines ont abandonné tous leurs ions sodium, il est dit qu'elles sont épuisées et elles recevront une nouvelle quantité de sodium en étant alimentées avec une solution très riche en sel (chlorure de sodium) - cette opération est appelée régénération des résines .

La très forte concentration de la solution de régénération en ions Na^+ permet de chasser les ions calcium et magnésium fixés sur les résines et de réinstaller à leur place des ions sodium .

Important : En aucun cas une eau adoucie n'est une eau déminéralisée .

Elle reçoit une charge minérale en forme sodium à la place de la charge minérale calcium et magnésium qu'elle abandonne sur les résines .

Notion de déminéralisation .

Comme cela a été précisé ci-dessus, la minéralisation d'une eau est constituée d'éléments ionisés à caractère positif appelés cations et d'autres à caractère négatif appelés anions .

Si nous utilisons successivement des résines cationiques chargées d'ions hydrogène mobiles H^+ (résines cationiques) puis sur l'eau au sortir de ces résines d'autres résines chargées d'ions mobiles OH^- (résines anioniques) tous les cations auront été remplacés dans l'eau par des ions H^+ et tous les anions par des ions OH^- .

Au sortir de ces deux charges de résines échangeuses d'ions exploitées en série il restera de l'eau + des ions H^+ et OH^- qui sont eux-mêmes des constituants de l'eau .

Il est dit que l'eau sera déminéralisée .

Pour régénérer ces résines quand elles ont perdu respectivement tous leurs ions mobiles H^+ et OH^- pour les autres et qu'elles sont en contre partie saturées en cations pour les unes et en anions pour les autres, elles devront être régénérées comme nous l'avons expliqué pour les résines d'adoucissement .

Pour les résines cationiques ce sera de l'acide (en général de l'acide chlorhydrique) pour les résines anionique un produit alcalin (en général de la soude) .

ces produits doivent être appliqués en excès sur les résines pour les régénérer .

Nous voyons qu'il s'agit pour la déminéralisation sur résines échangeuses d'ions d'une technique très polluante, utilisant des produits dangereux agressifs et corrosifs .

C'est pour ces raisons de danger, de pollution et d'agressivité que cette technique est de plus en plus abandonnée au profit de membranes semi - perméables équipant des appareils d'osmose inverse et qui sont capables sans acide et sans soude de réaliser des performances de déminéralisation comparables aux résines précitées .

Notion d'épuration sur membranes semi - perméables d'osmose inverse .

Il s'agit de membranes non poreuses, en matériaux plastiques stabilisés de qualité alimentaire, non attaquable par des eaux acides ou alcalines (non hydrolysables) et non attaquables par les bactéries et organismes vivants contenus par l'eau (non bio - dégradables)

Ces membranes sont extrêmement perméables à l'eau pure, très peu perméables aux éléments de minéralisation ionisés à peu près 1 % ou moins suivant les ions .

N'étant pas poreuses, elles seront une barrière infranchissable par les micro - particules, les colloïdes, la majorité des composés organiques, les bactéries, les virus, etc .

A l'inverse, les résines utilisées en déminéralisation sont souvent empoisonnées par les bactéries, et se saturent en colloïdes .

Quand cette saturation est atteinte, elles libèrent de grandes quantités de ces substances, et si il y a, comme c'est suivant le cas, de la silice colloïdale, c'est une véritable catastrophe pour le générateur de vapeur, surtout si il produit de la vapeur pour alimenter des turbines .

Mode de fonctionnement des membranes semi - perméables d'osmose inverse .

Avec les membranes semi - perméables, pour que l'eau pure franchisse la paroi compacte que constitue ces membranes, il faut appliquer l'eau à traiter avec une certaine pression mécanique, dont la valeur augmentera avec la salinité de l'eau à purifier.

Par exemple avec de l'eau de ville ayant une salinité moyenne de 500 mg. / litre la pression mécanique sera de l'ordre de 8 - 10 bar, avec de l'eau de mer dont la salinité est d'environ 36.000 mg. / litre il faudra une pression de l'ordre de 55 - 60 bar .

Les éléments de minéralisation, les colloïdes, les composés organiques, les bactéries, etc, demeurent à l'extérieur des membranes et seront évacués sous forme de rejet concentré .

Pour tenter une illustration, nous pourrions dire que les membranes semi - perméables d'osmose inverse se comportent comme un tamis moléculaire qui serait décolmaté en permanence

Note :

Ces différences de pression sont dues à une énergie interne que possède toute eau minéralisée appelée aussi pression osmotique de l'eau, qui est proportionnelle à la valeur de la salinité et qui s'oppose à la diffusion de l'eau pure au travers des membranes semi - perméables et qu'il faut donc vaincre avec une pression mécanique supérieure à cette pression osmotique .

Notions relatives à l'électro - désionisation .

L'électro - désionisation est un procédé associant des membranes polarisées et des résines échangeuses d'ions en lit mélangé placées entre les parois que constituent ces membranes .

Un courant électrique continu avec deux électrode est appliqué à cet ensemble assurant la migration des ions de puis l' eau vers les résines puis au travers de plaques polarisées pour les acheminer dans un courant externe d' eau concentrée d' où ils seront éliminés sous forme de rejet allant à l' égout .

Les résines lit mélangé de l' appareil d' électro - désionisation, à la différence de celles exploitées dans un appareil classique de polissage de déminéralisation, sont régénérées électriquement sans devoir utiliser de l' acide et de la soude

Un tel appareil est alimenté en eau prétraitée par osmose inverse pour préserver l' intégrité de ses performances, et il est capable de produire des eaux purifiées ayant des résistivité de 16 - 17.000.000 ohm avec quelques micro - grammes (millièmes de milligrammes) de silice .

Le courant d' eau concentrée assurant l' évacuation des ions ne doit en aucun cas être de l' eau adoucie, car si il y a une fuite de dureté dans celle - ci il y aura d' importantes perturbations sur les membranes polarisées et une dégradation certaine de la qualité de l' eau purifiée .

les meilleurs appareils d' électro - désionisation sont ceux qui génèrent eux - mêmes leur concentrat à partir de l' eau osmosée qui les alimente, ce qui met les membranes polarisées à l' abri de toute fuite de calcium ou de magnésium

D' autre part, en particulier pour toutes les activités industrielles, il est indispensable que l' appareil d' électro - désionisation puisse produire son eau purifiée sous pression afin de permettre son utilisation directe sans devoir faire appel à des réserves intermédiaires, des pompes de reprise, etc, qui peuvent en plus être accidentellement des sources de recontamination .

Annexe 2

Explications succinctes relatives aux divers modes de traitement de l' eau

a -) *Adoucissement sur résines échangeuses d' ions*

Procédé utilisant des résines échangeuses d' ions type cationique (Cf. annexe 1) régénérées sous forme sodium .

L' eau passant sur ces résines abandonne les ions calcium et magnésium responsables de la formation à chaud de dépôts incrustants .

b -) *Adoucissement par nano - filtration* .

Il s'agit de membranes semi perméables très performantes vis - à - vis d' ions tels le calcium, le magnésium, les sulfates, mais assez perméables vis - à - vis du sodium ; des bicarbonates, des nitrates, etc .

L' eau alimentant ces membranes doit être prétraitée pour prévenir les risques d' entartrage des membranes .

c -) Déminéralisation sur résines échangeuses d' ions (Cf. annexe 1) .

Cette technique polluante met en œuvre des résines cationiques et des résines anioniques devant être régénérées avec de l' acide pour les premières et de la soude pour les secondes .

Ces résines laissent passer intégralement les composés organiques, les détergents durs (non bio - dégradables) , les bactéries, etc .

Les colloïdes et les bactéries les empoisonnent et elles peuvent relarguer d' importantes quantités de substances colloïdales dont la silice quand leur pouvoir d' adsorption est saturé .

Les résines anioniques sous forme OH⁻ non alimentaires libèrent des amines en permanence ce qui les rend impropres au traitement des eaux destinées à produire des vapeurs de qualité alimentaire et des vapeurs stériles .

d -) Ultime déminéralisation sur résines en lit mélangé .

Cette technique est utilisée pour produire des eaux extrêmement purifiées au plan de la minéralisation (Résistivité supérieure à 16 - 17 M. ohm) .

Les résines cationiques et anioniques sont placées sous forme d' un mélange homogène dans un même appareil .

Les restes de minéralisation procédant d' eau déminéralisées de façon classique sur résines échangeuses d' ions en lits séparés (et ayant une conductivité variant en général entre 4 et 1 µSiemens) sont captés en totalité par ces alternances de zones cationiques et anioniques .

Très souvent ces résines sont ôtées de l' appareil qui les contient pour être régénérées dans des conditions optima et être rincées de même afin d' éviter tout apport accidentel de reste de régénérant acide ou alcalin dans le circuit d' eau de très haute résistivité .

e -) Déminéralisation par osmose inverse et par double osmose inverse (Cf. annexe 1) .

Ce procédé met en œuvre des membranes semi - perméables non poreuses, capables d' éliminer pratiquement 99 % de la minéralisation des eaux .

Ce système travaille sous pression alimenté en eau prétraitée pour prévenir les risques de formation de carbonates insolubles à la surface des membranes et pour éviter les dépôts de substances colloïdales .

La fraction concentrée en sels minéraux, bactéries, composés organiques, micro - particules qui demeure à l' extérieur des membranes est évacuée de façon permanente sous forme de rejet .

Pour des eaux ayant des salinités de 400 - 600 mg. / litre les pressions mécaniques avec lesquelles il faut appliquer l' eau sur les membranes sont de l' ordre de 10 - 12 bar et le rendement hydraulique moyen de telles installations est de 75 % .

A la différence des installations de déminéralisation sur résines qui doivent être arrêtées aux fins de régénération et qui doivent comporter deux ensembles, un tel procédé ne s' arrête pas et peut être exploité seul 24 heures / 24 .

Dans la grande majorité des cas, le prétraitement comprend entre autre , soit un adoucissement, soit un agent séquestrant de calcium et du magnésium, rendant les rejets de ce mode de déminéralisation très peu polluants .

Si il est requis une conductivité de l' ordre du micro Siemens (ce qui correspond à une minéralisation résiduelle de l' ordre de 0,5 - 0,6 mg. : litre de bicarbonate de sodium il faut pratiquer une double osmose inverse .

Avec ce procédé, les rejets de la seconde osmose sont intégralement récupérés pour alimenter la première partie d' épuration ou osmose 1^{er} étage .

Electro - désionisation (Cf. annexe 1) .

C' est une technique très récente capable de produire, à partir d' eau ayant été traitée par osmose inverse , des eaux très purifiées ayant une résistivité de l' ordre de 16 à 17.000.000 ohm (0,062 à 0,058 μ Siemens) .

Elle associe les membranes polarisées de l' électro - dialyse classique et des résines lit mélangé placées à l' intérieur des compartiments générés par les membranes polarisées .

Les résines qui captent la salinité résiduelle de l' eau osmosée sont régénérées électriquement par le courant électrique continu qui alimente deux électrodes placées de part et d' autre de ces ensembles .

A titre d' exemple, à partir d' une eau ayant pour caractéristiques :

Conductivité 6 μ Siemens - SiO_2 = 55 ppb - T.O.C. = 120 ppb - CO_2 = < 1,25 ppm

l' eau traitée par électro - désionisation aura pour caractéristiques :

Conductivité 0,056 μ Siemens - SiO_2 = 4,0 ppb - T.O.C. = < 5,0 ppb - CO_2 = traces à zéro .

Cette eau disponible sous pression produite par un appareil **E - Cell*** alimente directement la ligne d' utilisation .

* *Appareil d' électro - désionisation de la société E-Cell / Heinz Burkhalter .*