

Perturbations causées dans les installations par l'eau et sa vapeur: remèdes apportés par le conditionnement

Autor(en): **Robert, E. / Lerat, H. / Mayet, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **97 (1971)**

Heft 9

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-71198>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Perturbations causées dans les installations par l'eau et sa vapeur¹ (suite et fin)

Remèdes apportés par le conditionnement

par Dr E. ROBERT, ingénieur EPF-SIA, H. LERAT et J. MAYET, Société Permo

Troisième partie

Les eaux de chauffage Les eaux surchauffées

5. Principe général d'un système de chauffage central

Ce principe réside dans la production de calories en un lieu déterminé du bâtiment et en leur distribution dans les locaux à chauffer.

Le principe général de cette distribution consiste à accumuler la chaleur dans un corps quelconque et à transporter ensuite ce corps dans l'endroit où il devra disperser ses calories en se refroidissant.

Pour des raisons de commodité dans les réseaux de distribution l'agent de transport est un fluide : air, eau ou vapeur. D'autres fluides peuvent être utilisés : liquides à haute température d'évaporation, huiles, etc.

Cependant il est à remarquer, que les deux principaux fluides utilisés sont l'air et l'eau employée soit sous forme d'eau chaude et circulant en circuit fermé, soit sous sa forme vapeur. Dans ce cas, l'eau employée, se vaporisant en chaudière, absorbe les calories correspondant à sa chaleur latente de vaporisation, et en se condensant dans des radiateurs placés dans les locaux, restitue ces calories.

5.1 Conditionnement des eaux de chauffage

Comme nous l'avons expliqué dans la première partie, deux phénomènes interviennent pour perturber la marche d'une installation de chauffage à l'eau chaude lorsqu'il s'agit pour cette dernière d'eau dure : l'entartrage et la corrosion. Si l'eau est adoucie le premier inconvénient est supprimé par le traitement, le second le sera par le conditionnement.

Toutefois il est possible dans le cas des eaux de chauffage, de prévenir sans traitement par adoucissement l'entartrage et la corrosion.

Ce processus particulier de conditionnement dérive directement du traitement interne intégral « Armand » appliqué depuis de très nombreuses années.

Nous rappelons ici brièvement que les corrosions des circuits de chauffage à l'eau chaude sont dues, si cette dernière n'est pas conditionnée, à l'instabilité thermodynamique du fer au contact de l'eau.

En ce qui concerne l'entartrage, les dépôts qui recouvrent les points chauds du circuit ou qui obstruent les canalisations proviennent de la précipitation sous forme insoluble des ions alcalino-terreux contenus par les eaux dures.

La protection contre l'entartrage ne peut donc provenir que de l'élimination par adoucissement des éléments générateurs de tartre avant utilisation de l'eau, ou de la mise en œuvre du processus de conditionnement à base d'agents dispersants stables et d'agents alcalins.

¹ Voir *Bulletin technique de la Suisse romande*, n° 8 du 17 avril 1971.

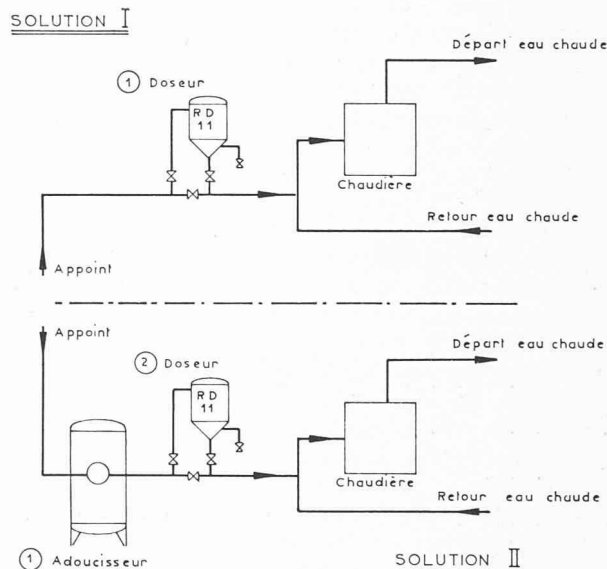


Fig. 9. — Circuit de chauffage eau chaude BP, à 100°C.

5.2 Principaux produits utilisés dans le traitement interne intégral « Armand » (TIA)

Principe du TIA

Ce mode particulier de conditionnement des eaux fut appliqué par M. Louis Armand lorsqu'il était directeur de la S.N.C.F.

Il avait pour but de protéger les chaudières et les circuits de distribution des locomotives à vapeur contre l'entartrage, la corrosion et le primage.

Le principe de ce conditionnement consiste à ajouter à l'eau alimentaire brute des chaudières, des produits dont la composition est étudiée en fonction des caractéristiques moyennes des eaux utilisées, et à vérifier les résultats obtenus à l'aide d'un contrôle simple et efficace.

Les raisons d'un tel conditionnement furent d'une part, la très grande diversité rencontrée dans la qualité des eaux des postes d'approvisionnement ; et d'autre part, la dureté de ces mêmes eaux, qui pouvait varier de quelques degrés à plus de 40°TH.

Résultats

Le traitement interne ARMAND eut pour effet de permettre de très importantes économies d'exploitation portant notamment :

- sur l'espacement entre les grandes réparations qui devaient auparavant être effectuées assez fréquemment sur les chaudières ;
- sur les travaux de chaudronnerie qui furent réduits dans la proportion de 10 à 1 ;
- sur l'espacement des travaux de lavage qui furent désormais portés de 8000 km maximum avant conditionnement à 20 000 km ;

— sur le combustible, avec des réductions de consommation supérieur à 5 % et dues à l'amélioration de la valeur moyenne des échanges thermiques.

Des chaudières mobiles aux chaudières fixes, le pas fut rapidement franchi et il existe en France des milliers de générateurs dont les eaux brutes sont conditionnées suivant le principe TIA

5.3 Composition et mode d'action

Composition : ces complexes contiennent essentiellement

- des tannins — des lignosulfonates — des amidons — des alginates pour les produits organiques ;
- des carbonates — des phosphates complexes pour les composants minéraux ;
- et des adjuvants tels que retardateur de précipitation tensio — actifs — antimousse.

Mode d'action

Les conditions physico-chimiques réalisées avec ces complexes de conditionnement permettent

- d'empêcher la précipitation des sels incrustants dans le circuit alimentaire et dans les appareils d'alimentation ;
- de transformer les alcalino-terreux en boues fines, légères et non adhérentes, de telle sorte qu'elles puissent être aisément éliminées par des purges ;
- d'apporter une alcalinité convenable à l'eau de la chaudière ;
- de réduire l'oxygène et de favoriser la formation de magnétite sur les parois en acier ;
- de ne provoquer aucune corrosion de la robinetterie en bronze, ou en alliage cuivreux ;
- de réduire le primage pour les générateurs de vapeur et d'obtenir un fluide propre ;
- de neutraliser l'acidité produite par la décomposition des carbonates en chaudière, et ce à l'aide d'amines appropriées admises conjointement aux complexes TIA

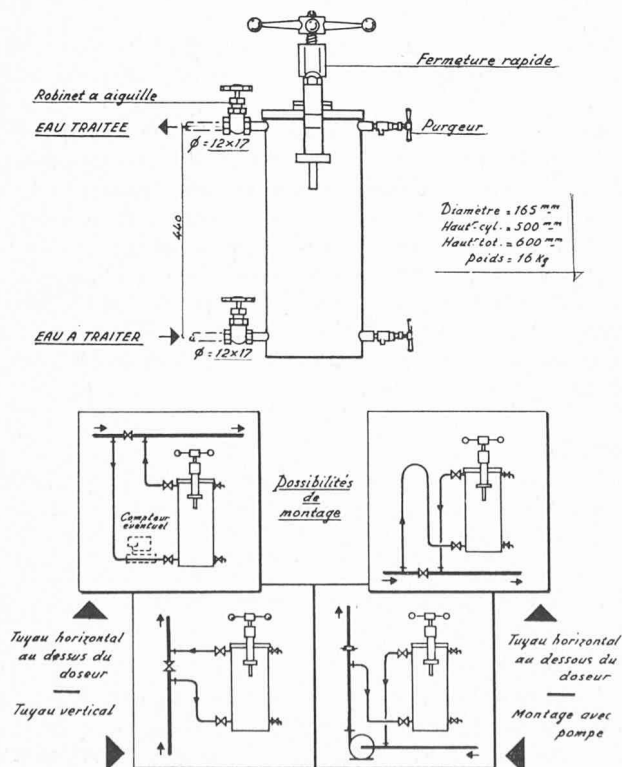


Fig. 10. — Doseur.

5.4 Principaux procédés de traitement interne

Conditionnement carbonate-tannate

Un tel processus doit tenir compte pour les quantités à mettre en œuvre de la dureté permanente de l'eau, de la teneur en silice, de l'alcalinité nécessaire et prescrite par le constructeur de la chaudière.

Ce mode de conditionnement apporte :

- les éléments dispersants et réducteurs d'oxygène : tannates, qui sont utilisés proportionnellement à la teneur en oxygène de l'eau alimentaire et à sa dureté.

L'alcalinité nécessaire, par le carbonate de sodium proportionnellement à la dureté permanente de l'eau brute. La protection des pompes et des appareils d'alimentation, ainsi que de la chaudière contre les incrustations dues à l'eau dure, est assurée en complément par des phosphates complexes.

Conditionnement tannate-phosphates

Ce conditionnement ne diffère du précédent que par le remplacement intégral des carbonates par des phosphates monosodiques, disodiques ou trisodiques comme éléments alcalinisants.

Il est appliqué préférentiellement au précédent pour les eaux de très faible densité.

5.5 Contrôle du traitement interne

Les travaux de contrôle du conditionnement suivant le principe Armand consistent en la vérification périodique de la composition de l'eau de la chaudière.

Ces vérifications portent sur le respect des normes du constructeur et sont les suivantes :

- titre alcalimétrique : TA,
- titre alcalimétrique complet TAC,
- salinité totale,
- présence d'agent réducteur de l'oxygène.

5.6 Avantages et inconvénients du conditionnement interne

Avantages

Ce mode de conditionnement ne nécessite pas de gros frais d'investissement dans l'appareillage de dosage.

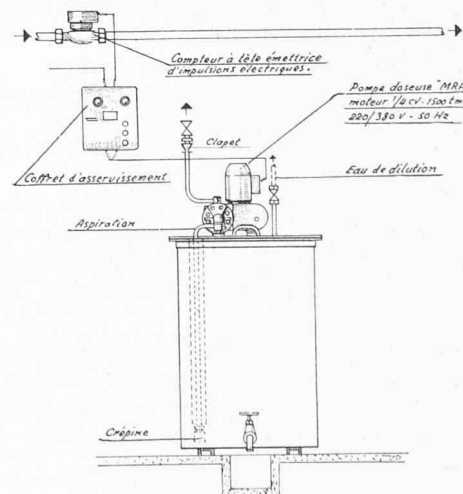


Fig. 11. — Dosage proportionnel d'un réactif en solution.

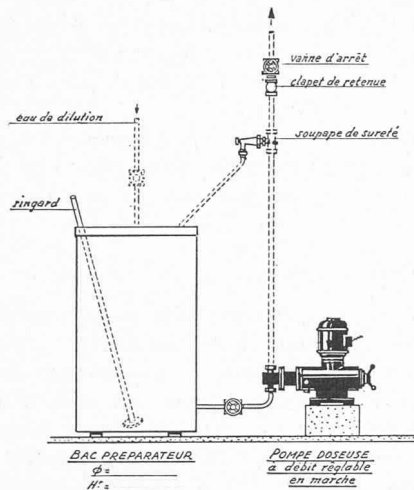


Fig. 12. — Poste de conditionnement d'eau.

Mise en œuvre

Les complexes de conditionnement peuvent être mis en œuvre soit :

par un doseur à déplacement

installé sur la canalisation d'eau d'appoint du circuit si les apports d'eau complémentaire sont assez faibles, réguliers et s'il est possible de les mesurer grâce à un compteur placé sur l'alimentation.

par un groupe de dosage comprenant :

Une électropompe doseuse.

Un bac contenant la solution liquide de produits de conditionnement.

Un électroagitateur.

La pompe doseuse est accouplée à la pompe alimentaire du circuit ou commandée par un ensemble de proportionnalité comprenant :

- un compteur à tête émettrice d'impulsions montée sur la canalisation d'eau d'appoint et provoquant par contact électrique, survenant pour des volumes réguliers d'eau, la mise en route de l'électropompe doseuse ;
- une armoire de proportionnalité permettant de temporiser le fonctionnement du groupe doseur.

Le conditionnement interne est recommandé pour les chaudières eau chaude de chauffage (chauffage central, circuit primaire, etc.) qui sont alimentées en eau dure, lorsque, pour des raisons pratiques ou financières, le traitement préalable ne pouvait être réalisé.

Il est appliqué avec succès sur des eaux ayant un titre hydrotimétrique (degré de dureté) inférieur à 30°.

Sous sa phase eau chaude, le fluide ne subit que de très faibles concentrations et la teneur totale en sels reste assez peu importante.

Ce processus de conditionnement permet à peu de frais d'obtenir une bonne protection contre les corrosions aussi bien en bache alimentaire que dans le circuit et dans la chaudière. Il ne nécessite que des frais très réduits de main-d'œuvre pour le contrôle des eaux et l'entretien des appareils.

Inconvénients

Le conditionnement interne met en œuvre des agents réducteurs et dispersants d'un prix moyen mais qui peuvent faire apparaître des frais d'exploitation élevés s'il y a des pertes en eau dans le circuit et s'il faut de nombreux appoints.

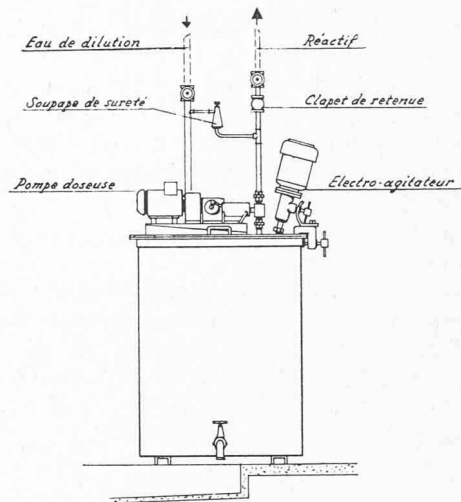


Fig. 13. — Poste de conditionnement d'eau.

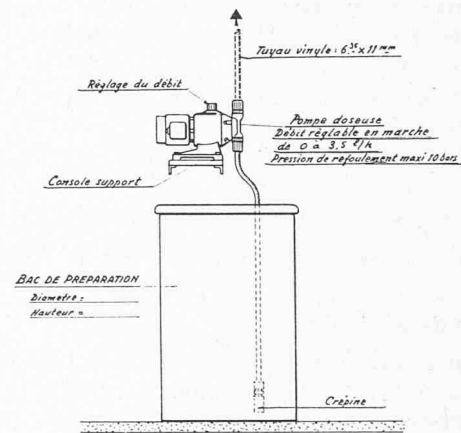


Fig. 14. — Poste de dosage de réactifs.

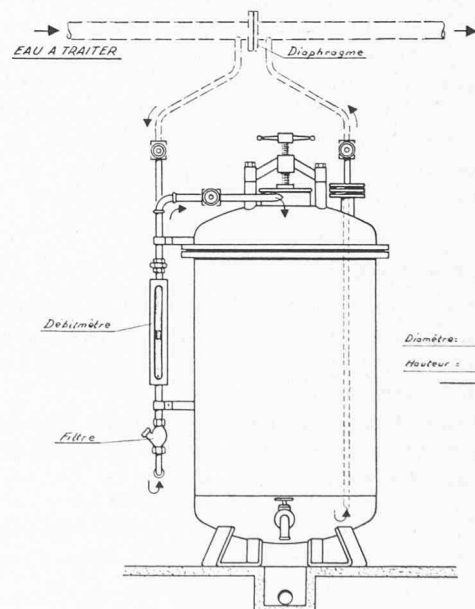


Fig. 15. — Doseur proportionnel.

Le dosage moyen des complexes pour le conditionnement interne est de l'ordre de 500 g/m³, contre des quantités pouvant être inférieures à 20 ou 30 g pour les produits de conditionnement avec une eau adoucie.

- Formation de boues fluides qui augmentent sensiblement la viscosité.
- Ces produits ne peuvent être appliqués que pour des chaudières eau chaude ou vapeur très basse pression à tubes de fumée ou à tubes d'eau, si les coefficients de transfert de chaleur ne sont pas trop importants.

La dureté moyenne de l'eau doit être voisine de 15°TH pour éviter les purges.

Au-delà de cette dureté, le conditionnement peut être mené avec succès mais il faut alors procéder à des extractions régulières des boues, extractions qui par l'apport d'eau de complément et de produits de conditionnement qu'elles entraînent, augmentent le coût d'exploitation de l'installation.

5.7 Conditionnement des eaux de chauffage adoucies

Les risques de formation de tartres calciques et de colmatages des conduits de l'installation ayant été éliminés par le traitement adoucissant subi par l'eau alimentaire du circuit, il reste :

- à régler l'alcalinité de l'eau pour obtenir un pH voisin de 9,5-10,0 ;
- à réduire l'oxygène dissous pour éviter les corrosions par oxydation ;
- à maintenir un léger excès d'agent anti-tartre pour prévenir les apports accidentels en eau dure.

Réglage du pH de l'eau

Certains phosphates en solution dans l'eau à raison de 20 à 30 g/m³ lui confèrent une alcalinité suffisante pour combattre l'instabilité thermodynamique du fer en milieu aqueux (pH voisin de 10,0).

Si l'eau a été adoucie par décarbonatation (l'opération consistant à débarrasser l'eau de sa dureté carbonatée par contact dans un appareil approprié avec un lait de chaux) elle possède une dureté résiduelle de 4 à 5, un titre alcalimétrique voisin de 3 et un pH égal à 8,5-8,6.

Les quantités d'agent alcalin à mettre en œuvre pour obtenir l'alcalinité requise dans le circuit s'en trouveront encore réduites, il faudra à l'inverse augmenter la teneur en phosphates complexes pour combattre la dureté résiduelle.

Réduction de l'oxygène

En fonction de sa température, une eau peut contenir plus ou moins d'oxygène qui se dégagera du milieu où il est dissous, si la température du fluide s'élève, et provoquera des corrosions.

Nous rappelons ici les teneurs moyennes d'une eau en oxygène en fonction de sa température (pour une pression de 760 mm Hg ou 1 bar).

Temp. °C	Oxyg. en mg/l	Temp. °C	Oxyg. mg/l	Temp. °C	Oxyg. mg/l
0	14,56	35	6,91	70	3,81
5	12,73	40	6,41	75	3,32
10	11,25	45	5,94	80	2,81
15	10,06	50	5,50	85	2,24
20	9,09	55	5,10	90	1,59
25	8,26	60	4,69	95	0,86
30	7,49	65	4,26	100	0,005

Il est donc bien évident que si la température de l'eau d'appoint est élevée avant son introduction dans le circuit, il faudra d'autant moins de réducteurs pour réduire l'oxygène résiduel.

Une telle alimentation peut être obtenue avec une bache alimentaire fermée dans laquelle passe un échangeur parcouru par le fluide chaud fourni par la chaudière.

Les réducteurs d'oxygène

sont relativement nombreux, nous avons retenu ceux utilisés pour le conditionnement des eaux.

Suivant leur origine, minérale ou organique, ils pourront être utilisés indifféremment pour des eaux de chauffage pour des productions de vapeur industrielle. Mais s'il s'agit de produire des vapeurs « blanche » de qualité « alimentaire », tous les réducteurs ne seront pas utilisables, soit à cause d'une certaine volatilité et du caractère toxique qu'ils confèrent à la vapeur.

D'autre part, suivant les quantités d'oxygène résiduel à réduire, ou suivant la minéralisation supplémentaire qu'il sera possible ou non d'apporter à une eau de chaudière, il faudra effectuer en plus de ce choix celui relatif au meilleur coût de la réduction.

Ce sujet fera l'objet d'une étude particulière à la rubrique « Vapeurs industrielles et vapeurs alimentaires ou blanches ».

Dès à présent, et pour fixer les idées nous vous donnons le tableau des principaux réducteurs d'oxygène et des quantités qu'il faut mettre en œuvre pour réduire 1 g de ce gaz.

Produit	Poids de produit pour réduire 1 g d'oxygène
Gaz sulfureux SO ₂	4 g/g oxygène
Sulfite de soude cristallisé SO ₃ Na ₂ , 7H ₂ O	16 g/g oxygène
Sulfite de soude anhydre SO ₃ Na ₂	7,8 g/g oxygène
Hydrazine N ₂ N ₄	1 g/g oxygène
Tannate	2 g/g oxygène
Lignosulfonate	16 à 18 g/g oxygène

5.8 Conditionnement par borate de sodium — inhibiteurs organiques

Ce processus de conditionnement très particulier est destiné à assurer la protection contre la corrosion des métaux terreux et des alliages ferreux et non ferreux généralement rencontrés dans les circuits de chauffage à eau chaude basse pression.

Effet synergique action filmante

L'association des inhibiteurs organiques avec l'agent tampon développe un phénomène de synergie qui permet aux composants d'assurer un maximum d'efficacité dans leurs actions protectrices du métal vis-à-vis du fluide.

Cette protection se traduit par la formation d'un film sur toutes les surfaces métalliques exposées au contact de l'eau, et ce, indépendamment de leur origine.

L'efficacité d'un tel complexe est valable pour des températures comprises entre 20 et 200°C.

Pouvoir séquestrant

Les particules métalliques de cuivre résultant des travaux effectués sur ce métal généralement employé pour de telles installations provoquent des couples galvaniques (cf. 1^{re} partie 3.3) en se déposant sur l'acier.

Les corrosions peuvent être évitées avec le conditionnement borate de sodium-inhibiteurs organiques qui complexe les particules de cuivre sous forme de sels stables et non précipitables.

Pouvoir réducteur

L'action réductrice vis-à-vis de l'oxygène dissous dans l'eau permet par neutralisation chimique de l'agent oxydant abondant dans les eaux froides d'alimentation ou d'appoint de prévenir les risques de corrosion par l'oxygène.

5.9 Association antigel-complexes inhibiteurs de corrosion

Beaucoup de produits sont fréquemment incompatibles avec les antigels classiques à base d'alcool ou de glycol. Les incompatibilités se traduisent par des formations de gels ou de boues qui risquent de perturber la circulation de l'eau dans l'installation. Les difficultés n'apparaissent pas avec le produit de conditionnement précité.

Mise en œuvre du complexe borax-inhibiteur organique

Le complexe est mis en solution dans l'eau froide et injecté dans l'eau du circuit par l'intermédiaire d'un doseur par déplacement monté en by-pass sur la canalisation d'eau à conditionner (cf. 2^e partie — Eau chaude sanitaire).

Ce système de dosage ne donne qu'une précision approximative, la concentration de la solution pouvant varier selon la quantité de produit de conditionnement qui subsiste dans le doseur.

Toutefois cette précision demeure suffisante pour le conditionnement d'un réseau eau chaude basse pression. Après contrôle, si un sous-dosage apparaît, il suffit d'augmenter le by-passage, si à l'inverse un surdosage est constaté, une vidange partielle avec un appoint en eau non conditionnée permettra de ramener le taux de concentration à une valeur normale.

Contrôle du conditionnement borax-inhibiteur organique

Celui-ci s'effectue par colorimétrie au moyen d'une méthode très simple, et il peut être réalisé tant sur des eaux de circuit dépourvues d'antigel que sur celles contenant de l'alcool ou des glycols.

6. Les circuits d'eau surchauffée

Eau surchauffée de 110 à 220°C

6.1 Définition

On appelle eau surchauffée toute eau maintenue liquide par un moyen physique au-delà de 100°C (température normale à partir de laquelle l'eau se transforme en vapeur).

Pour maintenir une eau liquide au-delà de 100°C, il faut exercer sur cette eau une pression qui augmente avec la température à laquelle on désire l'élever sous cette forme.

Nous donnons ici le tableau des correspondances entre la température des eaux « surchauffées » et les pressions auxquelles elles sont soumises.

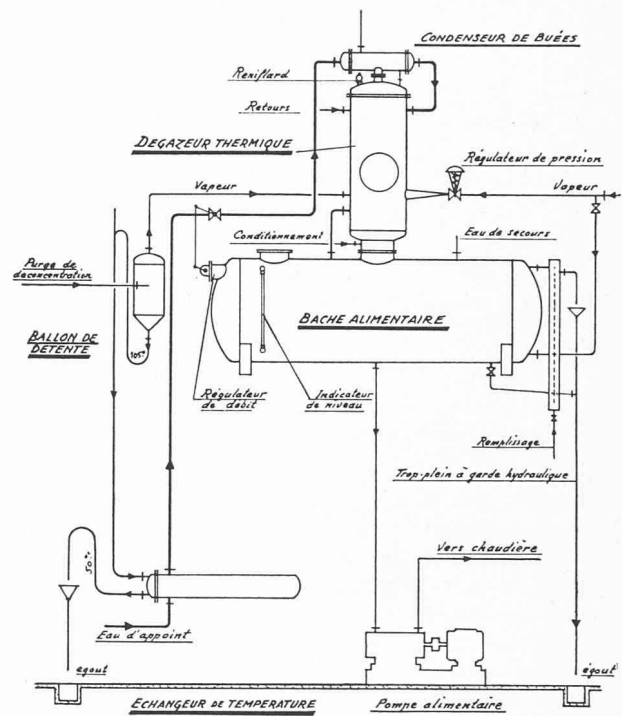


Fig. 16. — Traitement d'eau de chaudière.

Pression kg/cm ²	Température °C	Pression kg/cm ²	Température °C	Pression kg/cm ²	Température °C
0,1	45,45	5	151,11	12	187,08
0,5	80,85	6	158,08	13	190,71
1,0	99,09	7	164,17	14	194,13
1,5	110,79	8	169,61	15	197,36
2,0	119,62	9	174,53	16	200,43
3,0	132,88	10	179,04	17	203,55
4,0	142,92	11	183,20	18	206,14
				19	208,81
				20	211,38

6.2 Chauffage à l'eau surchauffée

Lorsque l'installation de chauffage à eau chaude n'est pas à l'air libre et que le fluide occupe la totalité de la capacité de l'installation on peut dépasser avec l'eau sous sa forme liquide la température de 100°C. Il faut dans ce cas que l'installation soit munie des appareils de sécurité indispensables : soupapes mécaniques ou à mercure empêchant la pression de dépasser une valeur déterminée.

De telles installations présentent évidemment une plus grande complexité quant à leur réalisation ou pour leur conduite et c'est un inconvénient vis-à-vis d'installations ordinaires à thermosiphon, par exemple.

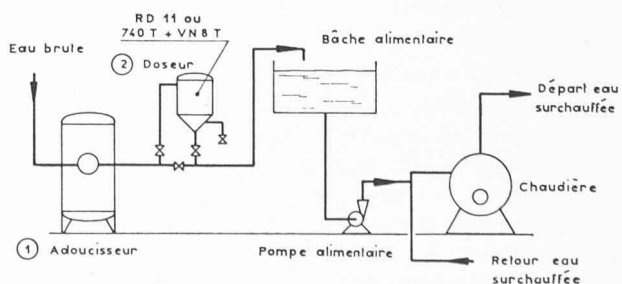


Fig. 17. — Eau surchauffée à 120°C.

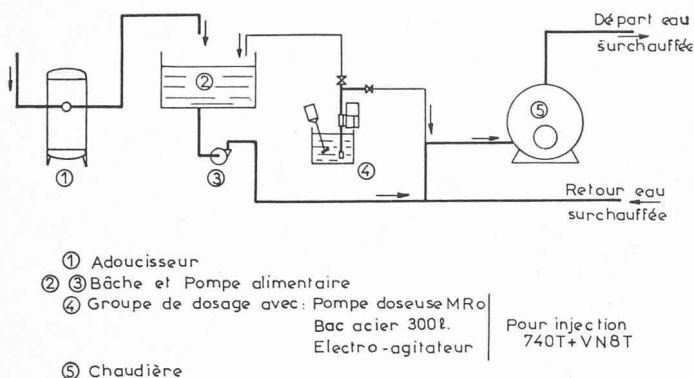


Fig. 18. — Eau surchauffée $t^{\circ} > 120^{\circ}\text{C}$.

De plus, elles ne sont pas sans danger, car la rupture d'une canalisation entraîne la vaporisation très rapide d'une partie de l'eau contenue dans l'installation sans compter les brûlures graves qu'elle peut entraîner.

Un autre danger réside dans l'alimentation d'échangeur avec des eaux surchauffées à 180°C et servant à la préparation d'eau chaude sanitaire.

D'une manière générale le fluide servant au réchauffage de l'eau chaude sanitaire ne doit pas avoir une température supérieure à 110°C .

Par précaution, il est préférable d'installer un circuit intermédiaire qui recevant les calories du primaire, jouera à son tour le rôle de primaire dans l'échangeur destiné à la préparation de l'eau chaude sanitaire.

Aussi, pouvons-nous considérer que l'eau surchauffée et principalement celle dont la température est supérieure à $110\text{-}120^{\circ}\text{C}$, n'est utilisée que pour les installations de très grande distribution.

Ce mode de chauffage est très répandu dans les grands ensembles, les ateliers de grande surface, les hôpitaux, etc.

Il permet de simplifier les retours du fluide, car l'eau chaude à haute température évolue sous pression en circuit fermé, et est réintroduite directement dans le générateur. Il en résulte une diminution importante des déperditions calorifiques dues par exemple avec les chauffages à vapeur haute pression à la nécessité de récupérer les vapeurs condensées dans des bâches puis à les ramener vers la chaudière par gravité ou à l'aide de pompes électriques.

Si nous savons que les circuits d'eau surchauffée doivent par exemple être réalisés avec des tubes d'acier étiré sans soudure, que la robinetterie en bronze doit être prohibée au profit des robinets en acier, que les sièges et les clapets doivent être en acier inoxydable, nous comprendrons d'autant mieux le soin tout particulier qui doit être apporté au traitement et au conditionnement des eaux de telles installations.

6.3 Principaux éléments entrant dans une installation d'eau surchauffée

Préparation de l'eau surchauffée

Procédé dit « à chaudière noyée »

L'eau surchauffée est produite directement dans un générateur qui au même titre que pour une chaudière à production de vapeur peut être une chaudière verticale ou horizontale, à tubes d'eau ou à tubes de fumée, etc.

Le vase d'expansion fermé sous atmosphère d'azote est placé en dérivation, celui sous atmosphère de vapeur est monté à la partie haute de l'installation et sert de collecteur départ.

La mesure des niveaux d'eau s'effectue dans le vase d'expansion au lieu de l'être sur la chaudière comme dans le cas d'une production de vapeur.

Une pompe de circulation placée en aval du générateur de chaleur assure le déplacement du fluide dans l'installation. L'eau surchauffée est dirigée vers les points d'utilisation échangeur pour la production de vapeur, échangeur pour la production d'eau chaude sanitaire à l'aide d'un fluide intermédiaire jouant à son tour le rôle de primaire sur l'échangeur fluide chauffant à 110°C maximum — eau chaude sanitaire, aérotherme, etc.

Avec un vase d'expansion sous azote aucun soutirage de vapeur n'est possible au niveau du vase. Par contre avec une enceinte sous atmosphère vapeur, cette opération est réalisable. Toutefois si l'eau surchauffée est conditionnée avec un réducteur du type hydrate d'hydrazine (cf. Conditionnement 6.4) ou avec une amine volatile la vapeur n'a pas une qualité alimentaire et ne peut être utilisée pour des stérilisations, fabrication d'aliments, de produits blancs ou colorés par amines, etc. La vapeur doit impérativement être produite par un vaporisateur alimenté en primaire par l'eau surchauffée.

Obtention de l'eau surchauffée par préparateur

L'installation comprend un générateur de vapeur haute pression et l'eau surchauffée est obtenue dans un ballon appelé « préparateur », où s'effectue un mélange direct eau-vapeur haute pression.

L'eau est celle qui provient du réseau, et elle est apportée au préparateur par action de la pompe de circulation placée en aval du préparateur.

Le vase d'expansion disparaît, car c'est le préparateur qui indirectement joue ce rôle.

Dans le préparateur, la vapeur provenant de la chaudière arrive à la partie médiane, l'eau à surchauffer à la partie supérieure.

Elle ruisselle sur les chicanes qui assurent le mélange intime eau-vapeur.

L'eau surchauffée tombe dans la partie inférieure du ballon d'où elle est extraite pour être distribuée dans le réseau. Des appareils de contrôle de niveau placés dans le préparateur assurent la régulation du niveau moyen en permettant des extractions de l'excédent d'eau provenant de la condensation de la vapeur de réchauffage.

Cet excédent sera dirigé vers la chaudière pour y être vaporisé.

Production d'eau surchauffée par échangeur

Ce troisième procédé est parfois employé. Il consiste à alimenter avec la vapeur haute pression, comme dans le procédé précédent, non plus un préparateur, mais des échangeurs par surface. Ce système provoque une diminution du rendement qui est nettement inférieur à celui des deux précédents processus.

6.4 Conditionnement des eaux surchauffées

But

L'eau ayant été obligatoirement adoucie par traitement si elle est dure, celui-ci aura pour but :

1. De régler l'alcalinité de l'eau au pH requis en fonction de la température du fluide.
2. De passiver le métal vis-à-vis de l'eau chaude.
3. De maintenir un excès de phosphates pour prévenir le risque d'incrustation par apport accidentel d'eau dure.
4. De procéder à la réduction de l'oxygène dissous dans l'eau et de maintenir un excès indispensable de réducteur dans le circuit.

Elle peut être considérablement augmentée avec des produits appelés catalyseurs: cations lourds, cuivre, cobalt, etc.

Définition d'un catalyseur

Substance qui possède la propriété d'accélérer une réaction chimique sans subir elle-même de modification. D'autres éléments peuvent accroître ou réduire la vitesse de la réaction: nature de l'eau — eau de mer, eau de surface — température, pH.

Les tannins

Ceux-ci se présentent sous forme de poudre brune ou brun-jaune et en général dérivent de l'acide gallique provenant de la noix de galle.

Les tannins qui proviennent de ce produit sont appelés tannins pyrogalliques.

D'autres tannins pyrogalliques peuvent être extraits du chêne, du mimosa, du châtaignier.

Suivant le degré de pureté très important pour un conditionnement de qualité, ils peuvent, en cas de produits suffisamment épurés, donner lieu à des formations en chaudière de dépôts gélatineux appelés « gommages » qui flottent à la surface des eaux.

Propriétés des tannins

- 1) donner avec l'eau des solutions colloïdales;
- 2) réduire l'oxygène en milieu alcalin;
- 3) colorer en noir foncé les sels de fer;
- 4) donner à l'eau une couleur ambrée.

Dose d'emploi

Les tannins réagissent en tant que réducteurs dans les proportions de 2,0 à 2,5 grammes par gramme d'oxygène à réduire. L'action réductrice se développe moyennement à froid ou à tiède, elle est très bonne entre 100 et 200°C.

Inconvénients

Les tannins colorent l'eau dans laquelle ils sont dissous et cette coloration est un obstacle pour les divers dosages colorimétriques que doivent être effectués à partir de cette solution.

La décoloration avant dosage de telles eaux peut être obtenue par filtration sur charbon.

Si la teinte n'est pas trop prononcée, il est possible de doser les produits dans l'eau colorée en ayant au préalable dilué cette dernière dans de l'eau déminéralisée, et en tenant compte pour les calculs du taux de dilution.

L'hydrazine

L'hydrazine est un produit très complet car en plus de ses fonctions réductrices, c'est un accélérateur de la formation de la couche protectrice de magnétite sur le fer et un agent alcalinisant de l'eau.

De formule chimique N_2H_4 c'est un liquide clair, très averse d'oxygène, obtenu par oxydation de l'ammoniac avec de l'hypochlorite de sodium.

Très facilement inflammable il ne peut être employé à l'état pur. On l'utilise sous forme ininflammable d'hydrate d'hydrazine $N_2H_4 \cdot OH_2$ à la concentration de 24 ou 35 % contenant de 15 à 22 % d'hydrazine pure.

La réduction de l'oxygène par l'hydrazine se fait suivant la réaction $N_2H_4 + O_2 \rightarrow 2H_2O + N_2$

Hydrazine + oxygène \rightarrow eau + azote (gaz inerte).

Cette réaction montre l'intérêt présenté par l'utilisation de l'hydrazine, car après réduction il ne se forme aucune substance solide ou corrosive.

Le caractère légèrement alcalin présenté par l'hydrazine permet de réduire les doses de sels minéraux basiques nécessaires à l'obtention du pH requis pour l'installation. L'hydrazine a une température d'ébullition supérieure à 100°C. Elle se concentre aux points d'évaporation pour réduire complètement l'oxygène.

A 270°C l'hydrazine se décompose partiellement pour libérer de l'ammoniac, agent alcalinisant, et de l'azote gaz inerte.

Cette substance accélère la formation de la couche protectrice de magnétite sur le fer.

Dosage

Théoriquement 1 g d'hydrazine pure réduit 1 g d'oxygène ou encore 7 g d'hydrate d'hydrazine à 24 % réduisent 1 g d'oxygène.

Mais compte tenu de la consommation de réducteur occasionnée par ses réactions avec les dépôts d'oxydes ferriques, les pertes par évaporations, la dose théorique doit être largement augmentée.

Avec l'eau surchauffée comportant des vases d'expansion, il est nécessaire que ceux-ci soient sous atmosphère d'azote, et s'ils sont au contact de l'air il faudra veiller à ce que les surfaces en contact avec l'extérieur soient les plus réduites possibles (huile de paraffine). L'inverse entraînerait une consommation importante d'hydrazine.

Inconvénients

L'hydrazine est un excellent réducteur mais d'un prix élevé.

Son utilisation devra être impérativement réduite aux fluides destinés à des usages industriels.

Il pourra être utilisé pour conditionner des circuits primaires destinés à la préparation d'eaux chaudes sanitaires à condition de s'assurer, qu'en cas de fuite de l'échangeur l'hydrazine ne risquera pas de passer dans l'eau alimentaire.

(Pression du secondaire > pression du primaire.)

Cette précaution peut être prise en plaçant un fluide intermédiaire entre le primaire et l'échangeur destiné à la préparation de l'eau chaude sanitaire.

D'autre part, compte tenu du coût relativement élevé, obtenu en période d'exploitation pour la réduction de l'oxygène par l'hydrazine, ce produit est généralement employé comme réducteur complémentaire du dégazage thermique.

Dégazage thermique

Principe

La présence d'oxygène dans les eaux alimentaires des installations est pratiquement constante. Les quantités d'oxygène dissous varient suivant la nature des eaux et seules quelques eaux de forage en sont dépourvues.

Nous avons vu précédemment que les phénomènes de corrosion dus à l'oxygène étaient d'autant plus importants et se développaient d'une façon d'autant plus rapide que la pression et donc la température de l'eau de l'installation était élevée.

Il est nécessaire d'éliminer cet oxygène par un dégazage chimique ou thermique dans des proportions telles, que les fractions résiduelles de gaz ne puissent occasionner de corrosions. Nous avons indiqué précédemment (1^{re} partie 3.3 Corrosion directe par action de l'oxygène) que la teneur en oxygène dissous d'une eau diminuait progressivement de 11,25 g/m³ à 0,17 g/m³ environ, lorsque la température était portée de 10 à 100°C. D'autre part, la

loi de *Henry* nous dit que la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle pour chacun de ces gaz à sa pression partielle dans l'atmosphère qui surmonte le liquide, le système étant supposé en équilibre de température. Donc si on élève la température de l'eau jusqu'à 100°C en assurant l'évacuation des gaz qui s'en échappent l'eau sera débarrassée de la presque totalité de son oxygène.

Ceci est réalisé avec le dégazeur thermique.

Principe du dégazeur thermique

C'est un appareil où se réalise un contact intime entre l'eau pulvérisée à dégazer et de la vapeur, l'opération se déroulant à l'abri de l'air.

La température de dégazage est réglée entre 102 et +115°C, températures pour lesquelles on obtient les minima de solubilité de l'oxygène dans l'eau.

Les teneurs en oxygène résiduel ont une valeur moyenne de l'ordre de 10 microgrammes (millième de milligramme).

En principe le dôme dans lequel se produit l'opération de dégazage surmonte une bache destinée à recevoir l'eau débarrassée de son oxygène.

Cette description d'un dégazeur thermique est évidemment très sommaire et n'avait pour but que d'expliquer le principe du dégazage.

Dans la pratique un dégazeur thermique est un appareil relativement complexe dans lequel l'eau subit un premier dégazage par rencontre d'un courant vapeur ascendant de la bache vers le dôme.

Puis dans la bache elle est l'objet d'un deuxième dégazage par la vapeur qui y barbote.

Neutralisation de l'acidité carbonique

Nous avons vu précédemment que l'eau contenait des quantités plus ou moins importantes de gaz carbonique soit sous forme de gaz carbonique libre, de gaz carbonique équilibrant ou de gaz carbonique associé.

L'élévation de la température de l'eau a pour effet au même titre que pour l'oxygène de libérer le gaz carbonique dissous ou encore d'en obtenir par décomposition des carbonates.

Nous avons expliqué dans la première partie (3.3 Corrosions par le gaz carbonique) l'action destructrice de l'acide carbonique sur le métal : amincissement généralisé de l'épaisseur métallique.

Pour prévenir de tels phénomènes, nous utilisons des agents neutralisant de l'acidité carbonique, parmi les principaux nous citerons et étudierons brièvement :

Les amines volatiles.

Amines volatiles

L'ammoniaque : NH_4OH contenant le gaz ammoniac dissout NH_3 la neutralisation se fait suivant la réaction
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{OH} \rightarrow \text{CO}_3\text{HNNH}_4 + \text{eau}$

L'ammoniac NH_3 est très volatil, son coefficient de partage vapeur-eau est élevé. En chaudière après sa mise en œuvre il n'en subsiste pratiquement plus.

La Morpholine : $\text{O} - (\text{CH}_2 - \text{CH}_2) - \text{NH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2$.

Amine liquide bouillant à 129°C.

Coefficient de partage = 0,5.

Elle réagit à raison de 2 g par gramme de CO_2 à neutraliser.

La cyclohexylamine : $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NH}_2$.

Amine cyclique ayant une température d'ébullition de 134°C.

A l'inverse de l'ammoniaque et des amines aliphatiques elle est sans action sur les éléments cuivre ou alliage de cuivre dans les réseaux.

Très alcaline elle réagit à raison de 2 g par gramme de CO_2 à neutraliser.

Diméthyléthanolamine : $(\text{CH}_3)_2 = \text{N} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{OH}$.

Amine tertiaire volatile ayant un pH de 10,2 à 1 % dans l'eau.

Point d'ébullition égal à 134°C. Elle a une très forte action neutralisante. 1 g d'amine tertiaire/gramme de gaz carbonique à réduire.

Elle attaque les éléments cuivre des réseaux en présence d'oxygène.

Quatrième partie

Le conditionnement des eaux de chaudières et des vapeurs industrielles et alimentaires

7. Généralités sur les générateurs de vapeur

Les générateurs de vapeur sont des appareils destinés à produire de la vapeur d'eau à une pression et à une température données.

7.1 Caractéristiques d'une chaudière

Timbre ou pression effective

C'est la pression de vapeur maximum qui peut être atteinte dans la chaudière.

Elle s'exprime en bar ou en kg par cm^2 .

1 bar est égal à 1,019 kg f/ cm^2 ;

1 kg f/ cm^2 est égal à 0,981 bar;

1 atmosphère est égal à 1,013 bar et à 1,03 kg f/ cm^2 .

Quelquefois pour les chaudières d'origine américaine ou anglaise, la pression est exprimée en « psi » (pound per square inch) :

1 psi est égal à 0,07 kg f/ cm^2 ;

1 kg f/ cm^2 est égal à 14,22 psi.

Epreuve officielle

Les générateurs et récipients de vapeur sont soumis à une réglementation.

La plupart des générateurs de vapeur utilisés par l'industrie française, par exemple, ont un timbre compris entre 8 et 40 bars.

Pour les centrales électriques, modernes les pressions sont beaucoup plus considérables et peuvent atteindre 190 bars à Porcheville, 300 bars à Huls (RFA), 357 bars à Edison (USA).

Vaporisation horaire

C'est la quantité de vapeur exprimée en tonne et fournie en une heure par une chaudière utilisée à son régime normal.

Surface de chauffe

C'est la surface du générateur en contact d'une part avec l'eau ou la vapeur, et d'autre part, avec les gaz de combustion du combustible.

Production horaire de vapeur par m² de surface de chauffe

C'est la puissance spécifique de la chaudière. Elle s'exprime en kg/m²/heure et peut varier de 15 à 100 kg/m²/heure.

En général, il se situe entre 0,5 et 0,9.

Rendement thermique

C'est le quotient du rapport :

$$\frac{\text{Chaleur emportée par la vapeur en kg calories}}{\text{Chaleur fournie par le combustible en kg calories}}$$

Le rendement thermique est très variable suivant les types de chaudière.

7.2 Principaux types de chaudières

Cette classification a été établie en fonction des impératifs du conditionnement des eaux.

Pour le problème qui nous intéresse : production de la vapeur à basse et à moyenne pression (jusqu'à 25 bars), nous avons retenu quatre grandes catégories de générateurs de vapeur.

Chaudières à grand volume d'eau

Chaudières à bouilleur

Composés d'un ballon supérieur de grand diamètre et de deux petits ballons inférieurs reliés au ballon principal. Ce sont des générateurs à grand volume d'eau et de vapeur encombrants et de faible rendement mais qui assurent facilement les débits de vapeur de pointe.

Chaudières à foyer intérieur

Pour ces appareils, l'encombrement a été réduit en plaçant le foyer à l'intérieur du corps cylindrique devenu de ce fait le corps de la chaudière.

L'échange calorifique est meilleur que pour les générateurs précédents, mais la circulation d'eau y est déficiente et des écarts importants de température sont relevés entre le haut et le bas du corps cylindrique.

Chaudières à tubes de fumée

Ces générateurs portent cette appellation car les tubes placés dans le corps sont parcourus par les gaz de combustion et l'eau est autour.

Nous noterons pour information les chaudières marines et les chaudières de locomotives.

Dans l'industrie, ce sont les chaudières monobloc.

Ces appareils sont caractérisés par un allègement très important de l'ensemble, allègement autorisé par l'amélioration de la qualité des aciers et par les dispositifs de chauffe au fuel oil ou au gaz.

Le taux de vaporisation y est élevé et peut atteindre 100 kg au m²/heure.

Chaudières à tubes d'eau

Deux types différents existent dans cette catégorie :

- les chaudières tubulaires horizontales ;
- les chaudières tubulaires verticales.

Chaudières tubulaires horizontales

Le faisceau de tubes est en général incliné de 15 à 20° sur l'horizontale. La circulation d'eau se fait naturellement.

Le collecteur de vapeur est situé à la partie supérieure du générateur.

Ce sont des appareils qui, suivant les modèles, peuvent fournir de la vapeur jusqu'à 75 bars et dont les surfaces de chauffe varient entre 20 et 2000 m².

Chaudières tubulaires verticales

Ce sont en général des générateurs de faible ou de moyenne production, surface de chauffe de 3 à 100 m² utilisés dans les petites entreprises.

L'encombrement au sol est très réduit et se limite au diamètre de la chaudière lequel est en général voisin de 2 mètres.

Les tubes suspendus dans le foyer reçoivent la chaleur rayonnante des flammes ; ils forment la partie principale de la surface de chauffe.

Les taux moyens de vaporisation varient suivant les modèles de 15 à 40 kg/m²/heure.

Chaudières à vaporisation instantanée

Ces appareils sont caractérisés par le très faible volume d'eau dans l'échangeur.

Le fluide à vaporiser passe dans un serpentin horizontal lequel reçoit extérieurement la chaleur des flammes.

En général, il y a un léger primage 2 à 3 %, dû à la conception même des générateurs.

Ces appareils sont en général d'un faible encombrement.

Souvent montés sur un support mobile et très employés sur les chantiers.

Les productions de vapeur sont relativement réduites : 0,5 à 2 tonnes/heure.

7.3 Auxiliaire des chaudières

Ce sont les appareils destinés à améliorer le rendement des chaudières ; pour les problèmes qui nous intéressent, l'eau et la vapeur, nous nous limiterons volontairement aux surchauffeurs et aux économiseurs.

Surchauffeur

Le surchauffeur est un appareil destiné à porter la température de la vapeur au-delà de celle obtenue lorsqu'elle est fournie sous sa forme saturée, c'est-à-dire en équilibre de pression et de température avec l'eau qui l'a produite.

En principe, un surchauffeur est constitué par deux collecteurs sur lesquels sont mandrinés des tubes de faible diamètre et de forte épaisseur.

Ces tubes constituent un faisceau qui est placé sur le parcours des fumées.

Il s'agit donc d'utiliser les calories des fumées pour porter la vapeur à une température supérieure à celle d'origine.

L'un des collecteurs reçoit la vapeur saturée ; l'autre dirige vers l'utilisation la vapeur surchauffée.

Température de surchauffe

Le maximum est d'environ 560°C. Cette température limite est due à la diminution des qualités mécaniques des aciers au-delà de 700°C.

Le surchauffeur est en général placé sur le parcours des fumées à l'endroit où la température de celles-ci est de 800 à 1000°C.

Avec une surchauffe de la vapeur à 560°C, la température du métal atteint 660°C.

Economiseur

C'est un appareil destiné à récupérer les calories qui se perdent avec les fumées évacuées.

On établit une circulation méthodique en faisant progresser les fumées suivant le parcours inverse de l'eau d'alimentation se déplaçant dans un faisceau de tubes lisses.

Deux conditions d'application doivent être respectées :

1) la vitesse d'évacuation des fumées sera suffisante pour éviter les dépôts de suie ;

2) les fumées refroidies par l'eau circulant dans l'appareil devront avoir tout le long de leur parcours une température supérieure à celle du point de rosée (température de condensation de la vapeur d'eau) faute de quoi les condensats se chargeraient de gaz sulfureux dont la combinaison avec l'eau donne des acides.

Il se produit en cas de température trop basse des fumées, une corrosion acide très rapide de l'acier.

Il est donc recommandé pour éviter cet inconvénient, d'alimenter l'économiseur avec une eau portée à 40 ou 50°C.

Ceci est souvent réalisable en pratiquant en amont de l'économiseur un mélange eau d'appoint-condensats ou encore par le passage préalable de l'eau froide dans un dégazeur thermique.

Les économiseurs sont munis d'organes de protection et de sécurité, clapets de retenue sur le circuit alimentaire, soupape de sûreté, etc.

Les économiseurs sont soumis à l'action entartrante corrosive ou agressive des eaux au même titre que n'importe quel échangeur.

Il est donc indispensable que les eaux passant dans l'économiseur soient traitées et conditionnées.

8. Vapeur saturée et vapeur surchauffée

8.1 Vapeur saturée

C'est la vapeur obtenue dans le générateur lorsqu'elle est en équilibre de pression et de température avec l'eau qui l'a produite.

La vapeur saturée est plus riche en calories que l'eau dont elle résulte bien qu'étant à la même température que cette dernière, car elle possède en plus des calories dues à la chaleur spécifique de liquide, celles dues à sa chaleur de vaporisation.

Par exemple à la pression de 1 kg f/cm², la température de l'eau est de 99,09°C kilocalories par kilo et la richesse calorifique de la vapeur saturée correspondante est de 638,5 kilocalories par kilo.

8.2 Vapeur surchauffée

La richesse calorifique de la vapeur saturée peut être accrue si le fluide passe dans un surchauffeur.

La température de la vapeur surchauffée est cependant limitée par la diminution des qualités mécaniques de l'acier comme nous l'avons exposé précédemment.

En moyenne, la température maximum de surchauffe se situe vers 560°C.

8.3 Température critique

Plus la pression exercée sur l'eau est faible, moins il faut de calories pour l'amener à sa température d'ébullition.

A l'inverse, si on élève la pression au-delà de la pression atmosphérique, l'eau est artificiellement maintenue en

dessous de son point d'ébullition bien que sa température dépasse 100°C.

Il existe une température de l'eau au-dessus de laquelle le fluide ne peut plus être maintenu liquide par compression.

Cette température est de 365°C et correspond à une pression de 202 kg f/cm².

9. Définitions se rapportant aux diverses eaux d'une chaufferie

9.1 Eau brute

Eau n'ayant subi ni traitement ni conditionnement.

9.2 Eau alimentaire

Eau destinée à être introduite en chaudière pour maintenir le niveau à une hauteur correcte et permettre la production de vapeur.

En général, l'eau alimentaire est stockée dans une bache appelée bache alimentaire et la capacité de cette dernière est calculée de façon à assurer par sa seule capacité une autonomie de fonctionnement de deux heures pour une marche normale du générateur de vapeur.

Si toute la vapeur produite par la chaudière n'est pas dispersée dans l'atmosphère mais qu'au contraire une partie, voire même la presque totalité, circule dans des échangeurs, la vapeur se condense et on la récupère, soit en bache, soit parfois par réinjection directe en chaudière pour assurer l'entretien de l'alimentation du générateur.

Ces eaux sont appelées *condensats*, ou encore *eaux de retour* ou même *eaux de purge* (provenant des purgeurs).

Les condensats ne représentent jamais, sauf exception, la totalité du volume d'eau évaporée.

Le volume initial doit donc être complété par une certaine quantité d'eau, appelée *eau d'appoint*.

Si la chaudière travaille totalement en vapeur perdue, *l'eau alimentaire* sera entièrement constituée par de *l'eau d'appoint*.

Si une partie de la vapeur condensée est récupérée, *l'eau alimentaire* sera constituée par une partie *d'eau de retour* et un complément en *eau d'appoint*.

9.3 Eaux de chaudière

Ce sont les eaux contenues par la chaudière et ce à l'exclusion de toutes autres.

Ces termes sont très importants car il se glisse fréquemment des erreurs dans les dénominations des différentes eaux et comme chacune des quatre peut avoir des qualités physiques et chimiques totalement différentes, la solution des problèmes capitaux de traitement et de conditionnement peut en être faussé.

Toute erreur dans le traitement ou le conditionnement des eaux peut entraîner de graves conséquences pour l'installation.

Nous allons illustrer par un exemple les différences qui existent entre les eaux précitées.

9.4 Exemple

Une chaudière timbrée à 10 bars est alimentée par l'intermédiaire d'une bache laquelle reçoit de l'eau d'appoint adoucie et 50 % de la vapeur produite sous forme de condensats.

Caractéristiques physiques et chimiques des cinq eaux

Caractéristiques	Eau brute	Eau d'appoint	Eau de chaudière	Eaux de retour	Eau alimentaire
Dureté en °TH	25	0	0	0	0
Alcalinité en °TAC	20	20	100	2	11
Chlorures en mg/l	4,5	5	25	Traces	25
Silice en mg/l	8	8	40	0	4
Températures en °C	20	20	180	80	50

9.5 Contrôle des eaux d'une chaufferie

Si les eaux d'une chaufferie en dehors du traitement par adoucissement et d'un simple conditionnement au phosphate trisodique n'offrent d'autres éléments de protection pour une installation, il est à craindre, même si les contrôles sont parfaitement exécutés qu'ils ne pourront empêcher les corrosions de se développer tant en chaudière, que dans le réseau vapeur.

Toutefois, ils auront pour effet d'empêcher l'entartrage car l'eau restera douce dans le générateur et le primage sera évité car l'alcalinité des eaux de chaudière sera maintenue à un taux raisonnable.

D'autre part, un pH alcalin correct permettra de combattre le phénomène de l'instabilité thermodynamique du fer au contact de l'eau.

Si ces simples précautions étaient observées partout, elles montreraient très vite aux exploitants que l'eau de la chaudière devient rouge par exemple ou que les condensats véhiculent des particules métalliques.

Ces observations les mèneraient à s'interroger sur l'efficacité de leur système de protection et à consulter une société spécialisée dans le conditionnement.

Il est à noter, malheureusement, que trop de chaufferies sont encore conduites sans contrôle des eaux, soit par ignorance légitime du propriétaire, soit encore, et c'est souvent la raison la plus fréquente, parce que ce poste, pourtant capital dans une entreprise ou dans un immeuble, est considéré avec mépris.

Il ne se passe pas de mois que nous n'ayons à intervenir dans des usines, des entreprises, des immeubles, privés de vapeur au moment le plus critique de l'année, soit pour les fabrications, soit pour le chauffage, parce que l'installation est hors d'usage.

Il est certain que l'évidence de la nécessité du contrôle des eaux n'apparaît pas toujours. Pourquoi contrôler une chose aussi naturelle que l'eau ?

Dans la majeure partie des cas, absence de conditionnement et absence de contrôle sont liées.

Or, si nous savons qu'une chaudière neuve très classique de moyenne puissance peut être mise hors d'usage en six semaines, si les eaux ne sont ni surveillées, ni conditionnées, nous ne saurions trop insister sur le caractère impératif du contrôle et du conditionnement et du traitement.

Généralement, les installations pour lesquelles les eaux sont conditionnées sont surveillées car le propriétaire ayant eu le désir de s'assurer la protection de son installation, entend aussi en suivre les effets et en retirer le maximum d'efficacité.

Indépendamment de ce désir, il y a le rôle déterminant joué par la société spécialisée dans le conditionnement.

Son action ne se limite pas à vendre des produits, mais à étudier un processus de conditionnement, à informer le client, à former le personnel de chauffe, tant au point de vue technique que pratique, et à suivre les résultats du conditionnement et son évolution.

Pour des installations courantes, deux contrôles quotidiens sont, en principe, nécessaires et suffisants. La durée moyenne totale n'excède pas deux heures.

Des contrôles intempestifs n'améliorent en rien la conduite d'une chaudière et se concrétisent par une perte de temps.

La nécessité d'une méthode appliquée aux contrôles sur ce poste est évidente.

Éléments à contrôler sur les eaux d'une chaufferie

Nous étudierons plus loin le conditionnement des diverses eaux et par des exemples précis, nous illustrerons en même temps les travaux de contrôle.

Cependant, un tableau général peut être dressé, tableau qui pourra servir de point de repère pour les différents cas.

Il portera sur une installation complète, offrant tous les types d'eaux.

Eau brute	Eau traitée ou eau d'appoint	Eau alimentaire ou eau de bache (appoints + retours)	Eau de chaudière	Vapeur condensée ou condensats ou retours
<i>Éléments à contrôler</i>	<i>Éléments à contrôler</i>	<i>Éléments à contrôler</i>	<i>Éléments à contrôler</i>	<i>Éléments à contrôler</i>
Dureté	Dureté	Dureté	Dureté	Dureté
Teneur en chlorures	Teneur en chlorures	Teneur en chlorures	Teneur en chlorures	Teneur en chlorures
Teneur en silice	Teneur en silice	Teneur en silice	Teneur en silice	Teneur en silice
	Titre alcalimétrique	Titre alcalimétrique	Titre alcalimétrique	Titre alcalimétrique
	Titre alcalimétrique complet	Titre alcalimétrique complet	Titre alcalimétrique complet	Titre alcalimétrique complet
		pH	pH	pH
		Teneur en produits de conditionnement	Teneur en produits de conditionnement	Teneur en produits de conditionnement
		Teneur en fer	Teneur en fer	Teneur en fer

Remarque : Il s'agit d'un cas général, qui volontairement a été pris très complet. Suivant la puissance de la chaudière, les usages de la vapeur, les modalités du traitement, le processus du conditionnement, un ou plusieurs de ces contrôles pourront ne pas être effectués.

10. Matériel nécessaire pour le prélèvement des échantillons d'eau

Trop fréquemment encore, les techniciens et le personnel de chaufferie sont obligés de se livrer à de véritables acrobaties pour prélever des échantillons d'eau, soit parce que les canalisations ou les bâches sont dépourvues de robinets ou parce que ceux-ci sont difficilement accessibles.

Les opérateurs, au risque de se brûler gravement, doivent soutirer directement de l'eau de chaudière ou condenser de la vapeur, faute d'appareils de prise d'échantillon.

Un travail sérieux de contrôle ne peut être effectué dans ces conditions ; nous donnons ci-dessous, à titre indicatif, la liste des matériels indispensables pour les prises d'échantillons ainsi que leur meilleur emplacement.

10.1 Eau brute

Matériel : robinet.

Emplacement : en amont des appareils de traitement.

10.2 Eau traitée (adoucie, décarbonatée, déminéralisée, etc.)

Les constructeurs d'appareils de traitement prévoient des vannes ou des robinets permettant de soutirer aisément de l'eau traitée.

10.3 Eau alimentaire (eau de bêche)

Matériel : robinet.

Emplacement : sur une des parois de la réserve d'eau si celle-ci est à hauteur d'homme.

Si la bêche est placée en hauteur, une canalisation sera tirée vers le sol avec en bout une vanne ou un robinet.

10.4 Eau de chaudière

Matériel : Serpentin avec vanne, extérieurement refroidi par un courant d'eau réglable manuellement.

Emplacement : sur la canalisation de purge de la chaudière et en amont de la vanne d'extraction.

10.5 Vapeur condensée

Matériel : Serpentin avec vanne, extérieurement refroidi par un courant d'eau réglable manuellement.

Emplacement : sur une canalisation de retour et en un lieu aisément accessible à hauteur d'homme.

Nota : Les échantillons d'eau de chaudière prélevés sans précaution soit à la purge des niveaux ou à la sortie de la vanne d'extraction, ne sont pas représentatifs de l'eau en chaudière.

Dans le premier cas, la minéralisation est inférieure à la minéralisation réelle ; dans le second, par suite de la vaporisation partielle de l'eau de purge à sa sortie dans l'atmosphère, l'eau recueillie est concentrée par rapport à l'eau en chaudière.

11. Vapeurs industrielles et vapeurs blanches ou alimentaires

Ce distinguo doit immédiatement être établi par l'industriel lors de l'achat de son générateur de vapeur et par la Société chargée du conditionnement.

Le terme de *vapeurs industrielles* s'attache aux vapeurs qui ne sont pas destinées même par accident, à se trouver en contact avec des produits blancs ou de couleur altérable, des produits chimiquement purs — des aliments,

des produits pharmaceutiques, des eaux chaudes sanitaires, des atmosphères où séjourne un personnel sédentaire, etc.

A l'inverse, les *vapeurs blanches* ou *alimentaires* conviennent non seulement aux applications précitées en exemple, mais évidemment aussi à toutes celles pour lesquelles une vapeur industrielle est suffisante.

La nécessité de cette distinction apparaît lorsque nous savons que toute vapeur résultant d'une distillation de l'eau est acide, donc corrosive vis-à-vis des métaux qui la contiennent et qu'il est possible, grâce à des produits volatiles de combattre cette acidité.

Or ces éléments volatiles étant incompatibles avec les applications des vapeurs blanches seules, il y a encore à peu près un an les vapeurs industrielles pouvaient être conditionnées.

Les laboratoires de notre société ont mis au point un produit officiellement agréé pour « les vapeurs blanches ou alimentaires » et désormais par des processus différents, l'action corrosive acide de toutes les vapeurs peut être efficacement combattue.

12. Le conditionnement des générateurs de vapeur

Au début de cet exposé, nous avons étudié en détail les trois grandes catégories d'inconvénients : entartrage, corrosion, primage, qui résultaient de l'association : eau-métal-chaueur.

Avec les générateurs de vapeur, ces trois phénomènes apparaissent, et leurs conséquences sont plus ou moins graves suivant le type de chaudière, son timbre, les qualités naturelles de l'eau, les usages de la vapeur, etc.

Le traitement de l'eau (adoucissement, décarbonisation, déminéralisation, filtration, etc.) est plus que jamais indispensable avec les générateurs actuels, mais parallèlement plus que jamais insuffisant, étant donné le degré de technicité toujours plus élevé des chaudières.

Aussi, allons-nous nous attacher au même titre que pour les eaux chaudes sanitaires ou les eaux de chauffage, connaissant désormais les inconvénients, à présenter les remèdes dus au conditionnement, les éléments qui les composent, et leur processus d'action.

Pour les générateurs de vapeur, le conditionnement porte sur les eaux et sur les vapeurs.

Il est fonction de la nature de l'eau, du traitement, du matériel mis en œuvre ; il tient compte de la destination industrielle ou alimentaire des vapeurs et s'attaque aux risques d'entartrage, de corrosion et de primage.

C'est en fonction de cet ordre des inconvénients qu'il nous a paru le plus simple d'étudier point par point, les divers processus de conditionnement.

12.1 Le conditionnement et l'entartrage

Généralités

Dans la première partie de cette étude, nous avons défini le phénomène de l'entartrage, expliqué son mécanisme et présenté les principales incrustations.

Rappelons brièvement que les tartres ont une conductibilité thermique très inférieure à l'acier ;

- qu'un générateur entartré voit son rendement thermique s'abaisser ;
- qu'en parallèle la température des fumées au sortir des générateurs ou des économiseurs augmente aux dépens du rendement précédemment cité ;
- la résistance mécanique de l'acier est diminuée à la suite de l'échauffement anormal qu'il subit au niveau des zones entartrées ;

— étant donné le degré plus ou moins élevé de porosité des tartres, l'eau de chaudière peut parvenir au contact du métal surchauffé, se concentrer en soude caustique, occasionner des corrosions fissurantes, ou par aération différentielle.

Parfois des plaques entières de dépôts incrustants se détachent des parois métalliques et la brutale vaporisation de l'eau au contact de l'acier provoque son éclatement.

Suivant la composition chimique du dépôt, le type de chaudière, le danger varie.

Conductibilité des principaux dépôts incrustants

La conductibilité est exprimée en grandes calories transmises par m² de chauffe, heure et degré de différence de température. « Chaleur et Industrie 1946 », cycle de conférences de M. Rath sur le conditionnement des eaux industrielles.

Si pour l'acier cette conductibilité est de 15, elle varie :

- de 1 à 2 pour les tartres sulfatés ;
- de 0,5 à 0,9-1,0 pour les dépôts carbonatés ;
- et de 0,2 à 0,5 pour les incrustations siliceuses.

Il est évident que plus le tartre possède une faible conductibilité thermique, plus il est néfaste.

Extrême danger des incrustations pour les générateurs modernes

Pour les anciennes chaudières, les quantités de chaleur transmises du foyer au fluide par m², n'excédaient pas 18 000 à 20 000 calories/m²/heure.

Pour les générateurs modernes, ces quantités sont passées à plus de 300 000 calories.

De ce fait, un dépôt de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur de tartre siliceux par exemple peut avoir, sur des tubes coups de feu, de très graves conséquences pour le métal.

L'acier peut atteindre et même dépasser 450°C et au-delà de cette température sa résistance mécanique est considérablement amoindrie.

Détartrage et tartrifuges

Pour les premiers générateurs, le combat contre le tartre se résumait en une action curative appelée détartrage et ce n'est qu'avec l'apparition du traitement interne intégral Armand que les moyens préventifs seront codifiés et rationnellement exploités.

Détartrage — Principaux modes de détartrage

Détartrages mécaniques

Ceux-ci s'effectuaient auparavant par piquage — ce mode de détartrage relativement dangereux pour l'installation, si des coups violents étaient portés au métal — était de plus incomplet par suite de zones d'accès difficile ou impossible.

On utilise actuellement des fraises rotatives spéciales commandées par flexibles.

Ce système permet de nettoyer des tubes de faible diamètre, des régions coudées, etc. L'opération est assez rapide et complète.

Cependant, si elle est réalisée à fond, elle provoque une usure mécanique non négligeable du métal,

Emploi des ultra-sons en continu

Ce système a été essayé à maintes reprises car il évite en principe l'usure du métal ; cependant il s'est révélé inopérant sur les zones coudées et les parties situées en aval de ces zones par rapport à la source d'ultra-sons car ceux-ci ne se propagent pas dans les coudes.

Détartrage chimique

Acide chlorhydrique passivé

Pour les tartres tendres à forte teneur en carbonates alcalino-terreux, le détartrage à l'acide chlorhydrique passivé peut être appliqué.

Ce procédé est communément employé pour les chaudières.

L'efficacité des produits passivants minéraux ou organiques est variable et assez souvent insuffisante si l'opération n'est pas conduite à basse température ou si divers métaux en présence permettent la formation de couples.

D'autre part, certains passivants sont toxiques (sels mercureux anhydride arsénieux) et des précautions indispensables doivent être prises lors de la manipulation de l'acide.

Phosphate trisodique

Processus sans danger sur le matériel, sauf pour les éléments en cuivre.

L'opération est conduite à chaud avec une teneur en anhydride phosphorique P₂O₅ équivalente à 80 à 100 mg/l.

Pendant ce traitement, il est nécessaire d'effectuer de nombreuses purges et de réduire au maximum les soutirages de vapeur car il y a des risques certains de primage.

A la fin de l'opération et après ouverture de la chaudière, il est nécessaire de laver rapidement le générateur pour éliminer les boues.

Nota : Pour des chaudières très entartrées, il est nécessaire d'augmenter l'excès de P₂O₅ en le maintenant à 250-300 mg/l.

La chaudière doit alors être totalement isolée du réseau, et les purges régulières et abondantes auront pour effet d'éliminer les boues formées.

Comme dans le cas précédent, aussitôt après l'ouverture, rincer la chaudière pour chasser les dépôts résiduels.

E.D.T.A. (Acide éthylènediaminotétracétique)

Avec ce produit, le détartrage est effectué de façon progressive pendant la période de marche de l'installation et sans modification de régime de vaporisation.

Le processus de détartrage consiste en une séquestration sous forme stable des éléments incrustants. L'opération est progressive et ne provoque pas la formation de boues.

Toutefois, un contrôle chimique rigoureux et régulier est nécessaire afin d'éviter un surdosage.

L'action de l'E.D.T.A. est considérablement réduite en présence d'oxygène. Il est donc nécessaire de l'utiliser avec des eaux totalement dépourvues de cet agent oxydant ou d'ajouter à sa solution un réducteur compatible.

Nota : Le sulfite catalysé sera exclu car il comporte des métaux lourds qui seraient séquestrés préférentiellement par l'E.D.T.A.

Tartrifuges ou agents inhibiteurs d'incrustation

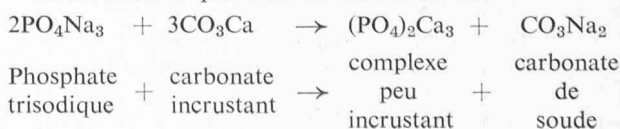
Prévention des tartres carbonates

Traitement interne : phosphate trisodique

Pour les chaudières à grand volume d'eau et basse pression, il est possible avec des eaux alimentaires titrant jusqu'à 15° TH de prévenir les dépôts alcalino-terreux (calcium et magnésium) avec le phosphate trisodique PO₄Na₃.

Avec les ions calcium, par exemple, le phosphate trisodique forme des précipités floconneux très peu incrustants, légers et dispersés sous forme de gel.

La réaction d'épuration en chaudière est :



Il est nécessaire de maintenir un excès de PO_4Na_3 (phosphate trisodique) pour obtenir la précipitation du calcium sous forme de phosphates et non sous forme de sulfates très incrustants.

Traitement préventif

Pour toutes les autres chaudières, il est absolument indispensable de prévoir l'alimentation avec de l'eau adoucie.

Cependant, un apport accidentel d'eau dure est toujours possible (fuite d'eau dure sur le réseau - cycle d'adoucissement épuisé, etc.) et il est nécessaire de prévenir tout risque d'entartrage en maintenant un excès de phosphate dont la quantité est proportionnelle à la pression de la chaudière.

On admet que jusqu'à 25 kg de pression, la teneur en P_2O_5 (anhydride phosphorique) en excès varie de 5 à 20 mg/l d'eau de chaudière.

Au-delà de 25 kg, il convient d'avoir en solution de 20 à 40 g de P_2O_5 .

Eaux partiellement adoucies ou de faible dureté

Dans le cas d'alimentation de chaudières avec de forts pourcentages de retour, il est parfois possible d'utiliser des eaux de faible dureté naturelle ou partiellement adoucies.

Toutefois, il se forme des dépôts entartrants dans les canalisations d'alimentation, sur les vannes, clapets de retenue dans les pompes alimentaires.

Cet entartrage peut être prévenu en conditionnant l'eau alimentaire en bache avec des polyphosphates.

Prévention des tartres sulfatés

Les tartres sulfatés, beaucoup plus résistants que les tartres carbonatés, ont une meilleure conductibilité thermique.

Carbonate de soude

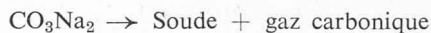
Ces tartres peuvent être évités comme l'a démontré Hall, lorsque l'on maintient dans les eaux de chaudière, une certaine quantité de carbonate de soude par rapport à la teneur de l'eau en sulfate et ce, en fonction de la pression de marche du générateur.

Le carbonate de soude provient, soit à la suite de l'adoucissement de l'eau par permutation sodique du remplacement par des ions sodium, des ions calcium et magnésium associés au carbonate, soit d'un conditionnement complémentaire de l'eau en carbonate de sodium.

Le rapport carbonate de soude/sulfate de soude évolue proportionnellement à la pression et le tableau ci-dessous nous indique les rapports à maintenir.

Valeur minimum du rapport carbonate de soude / sulfate de soude	Pression de la chaudière exprimée en bars
0,04	5
0,07 à 0,08	7-8
0,10	10
0,15	12-13
0,19	15
0,25	17-18
0,31	20
0,37	22-23
0,45	25
0,52	27-28
0,62	30

Remarque : Le carbonate de soude est dissocié par la chaleur :



En fonction de la pression en chaudière, le pour-cent de carbonate dissocié peut être assez important.

% de carbonate dissocié en soude + gaz carbonique	Pression en chaudière en bars
10	5
30	7-8
40	10
60	15
73	20
82	25
89	30

Il y a donc lieu, lors du calcul du rapport carbonate/sulfate en fonction de la pression en chaudière de tenir compte du pour-cent de carbonate dissocié pour obtenir le rapport souhaitable.

Donc le rapport :

carbonate de soude / sulfate de soude en chaudière, sera égal au rapport :

$$\frac{\text{Alcalinité évaluée en carbonate de soude}}{\text{Sulfate de soude}} \times \frac{100 - \% \text{ de carbonate dissocié}}{100}$$

Du fait de cette dissociation des carbonates en chaudière, il devient difficile dès que la pression atteint 15 bars (60 % des carbonates dissociés) de conserver en chaudière suffisamment d'ions CO_3^{--} (carbonates) sans provoquer une alcalinité caustique exagérée.

Il sera donc nécessaire de faire appel aux ions phosphatés pour éviter les tartres sulfatés.

Anhydride phosphorique (P_2O_5)

L'anhydride phosphorique amené par les phosphates, doit nécessairement être maintenu en excès dans les eaux de chaudière comme l'a démontré Hofer, afin d'éviter la précipitation des sulfates.

Cet excès est fonction de la teneur en eau en sulfates et il varie dans les proportions suivantes :

Teneur de l'eau en sulfate de soude en mg/l	Excès d'anhydride phosphorique à maintenir en mg/l
150	10
300	20
450	30
600	40
750	50
900	60
1100	70

Nota : Dans le cas d'un conditionnement des eaux avec des sulfites de soude (agent réducteur d'oxygène) il est nécessaire de tenir compte, pour avoir un excès correct en P_2O_5 , de la part de sulfates amenée par le réducteur.

Prévention des tartres siliceux

En principe, dans les eaux d'alimentation, la silice est à faible teneur par rapport aux autres constituants exception

faite des eaux épurées à la chaux, adoucies ou simplement bipermutées.

Dans ce cas, la silice peut avoir un rôle important vis-à-vis des incrustations.

La silice peut exister sous trois formes dans les incrustations :

- silice sous forme de bioxyde de silicium SiO_2 ;
- métasilicate de calcium $\text{Si O}_3 \text{ Ca}$;
- orthosilicate hydrate de magnésium.

Ces tartres extrêmement durs en couche peu épaisse (1 à 2 mm) adhèrent fortement aux parois métalliques, et ont une très faible conductibilité thermique.

Pour les chaudières à moyenne pression alimentées accidentellement avec de l'eau dure, le magnésium entre dans le composé entartrant siliceux en association avec les phosphates pour former un dépôt moyennement perméable et peu incrustant appelé « serpentine ».

A la suite de cette observation, la magnésie fut utilisée avec des eaux contenant de la silice pour former ce tartre préférentiellement à un dépôt siliceux dur.

A haute température et sur les parois des surfaces coup de feu, la silice en présence d'alumine et de soude peut donner lieu à la formation d'un composé très dur et isolant $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Na}_2\text{O}_4 \text{ Si O}_2 \text{ 2 OH}_2$.

Désiliciage

En règle générale, si la silice est un obstacle à la bonne marche d'un générateur, soit à cause de sa concentration dans l'eau, soit à cause de la pression de marche du générateur, elle doit être éliminée par traitement.

Nous citerons, pour exemples : l'élimination de la silice par échangeurs d'ions, sa précipitation par voies chimiques avec la magnésie, par la chaux, l'alumine, par filtration sur neutralité, avec une épuration thermique préalable, etc.

Conditionnement des eaux contre les tartres siliceux

Lorsqu'il est possible de maintenir dans l'eau de chaudière une alcalinité suffisante sans occasionner le primage et un excès de phosphate trisodique, il est possible, pour des pressions moyennes, d'éviter les tartres siliceux.

La silice est transformée en silicate de sodium lui-même stabilisé par l'excès d'alcali.

Ce conditionnement préventif est efficace à condition de maintenir de façon rigoureuse le rapport silice alcalinité et de procéder à des purges de déconcentration nombreuses et régulières.

Rapport silice-alcalinité à maintenir en chaudière

La teneur limite des eaux de chaudière en silice diminue avec l'augmentation de la pression de marche des générateurs.

L'alcalinité maximum exprimée en degrés d'alcalinité TAC varie aussi suivant le même principe.

Normalement ces teneurs maxima sont indiquées dans les normes fournies par le constructeur de chaudière.

Le rapport silice en SiO_2 (bioxyde de silicium) mesuré en mg/l sur l'alcalinité de l'eau mesurée en °TAC doit aussi diminuer lorsque la pression en chaudière s'élève.

A titre indicatif, nous pouvons écrire par exemple que, pour une chaudière timbrée à 15 bars, le rapport dans l'eau de chaudière :

$$\frac{\text{SiO}_2 \text{ (mg/l)}}{\text{TAC (en}^\circ\text{)}} \text{ sera voisin de } 1,5\text{-}1,8$$

à 30 bars, ce rapport se rapproche de 1.

Le rapport silice/alcalinité varie suivant les constructeurs.

Dans les tableaux ci-après, l'un fourni par American Boiler and Ai, l'autre par un constructeur français, nous suivons l'évolution de ces rapports en fonction des pressions.

American Boiler		Constructeur français	
Pression en bars	$\frac{\text{SiO}_2 \text{ mg/l}}{\text{TAC}^\circ}$	Pression en bars	$\frac{\text{SiO}_2 \text{ mg/l}}{\text{TAC}^\circ}$
6 à 18	2,5 maxi	6 à 18	1,2
18 à 25	1,5	18 à 25	de 1,2 à 0,85
25 à 35	1,0	25 à 35	de 0,85 à 0,60
35 à 45	< 1,0	35 à 45	de 0,60 à 0,45

12.2 Le conditionnement et les corrosions dans les chaudières et les circuits

Généralités

Les éléments de corrosions naturellement contenus dans l'eau sont l'oxygène et le gaz carbonique, les sels de chlore, de magnésium, des particules métalliques de cuivre, fer, etc.

Il faut y ajouter les éléments directement corrosifs ou favorisant la corrosion et résultant de l'association eau-chaleur : gaz carbonique des carbonates, tartre provoquant les phénomènes d'aération différentielle, augmentation de la causticité des eaux, etc.

A ce sombre tableau, il convient d'inclure les éléments apportés par l'installation : particules métalliques, couples électrolytiques formés par l'association de métaux différents, etc.

Les diverses manières suivant lesquelles les corrosions se développent et les aspects sous lesquels elles se révèlent ont été décrits dans la première partie, nous allons donc aborder directement les remèdes apportés par le conditionnement.

Conditionnement contre les corrosions dues à l'oxygène

Les procédés d'élimination de l'oxygène se répartissent en procédés physiques dépendant du traitement des eaux et en procédés chimiques relatifs au conditionnement.

L'élimination par traitement fait appel au dégazeur thermique (Les eaux de chauffage, III^e partie, 6.4).

L'eau provenant de la condensation de la vapeur à l'abri de l'air est à peu près exempte d'oxygène. Le condenseur peut être utilisé comme dégazeur.

L'élimination physique de l'oxygène doit être complétée par un dégazage chimique en conditionnant les eaux.

Les tanins

Le tanin est une poudre brun jaunâtre extraite des bois. Le plus connu est l'acide gallique provenant de la noix de galle. C'est un corps qui possède les fonctions d'un trialcool et d'un acide faible.

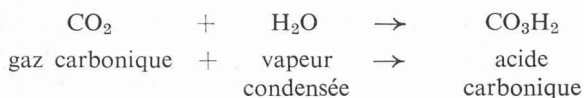
Il est utilisé sous la forme de pyrogallol $\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_3$ résultant de la transformation de l'acide gallique à 200°C.

Les tanins pyrocatechiques ayant pour base un diphenol sont parfois utilisés.

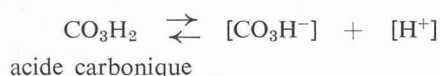
En raison de leur acidité, les tanins sont associés avec un ou plusieurs réactifs alcalins : phosphates ou phosphates-carbonates, car leurs polyphénols sont de bons réducteurs de l'oxygène en milieu alcalin.

Les tanins sont utilisés dans les proportions de 2 à 2,5 g par gramme d'oxygène à réduire.

Leur action protectrice vis-à-vis de la corrosion des aciers se poursuit par la formation de tannates de fer sur les parois métalliques (film complexe d'oxydes ferriques et de tannates de fer).



Cette dissolution est immédiatement suivie d'une ionisation de l'acide qui provoque un abaissement du pH par augmentation de la concentration des condensats en ions H^+ :



Les effets se traduisent comme nous l'avons étudié dans la première partie 3.3 par un amaigrissement du métal.

La diminution d'épaisseur peut être généralisée et uniforme sur toute la surface de la tuyauterie en contact avec les condensats acides, ou aller, en augmentant, vers le fond de la tuyauterie.

Cette forme de corrosion est très difficile à déceler au départ, surtout si elle se produit en l'absence d'oxygène, car il n'y a formation d'aucune particule.

Dans le cas d'une action conjuguée, si le métal s'amincit, il laisse par contre apparaître, en divers endroits, des formations de pustules sous lesquelles on décèle une cavité.

Les oxydes formés sont de la rouille, alors que le bicarbonate de fer ne demeure pas car il passe en solution dans les condensats.

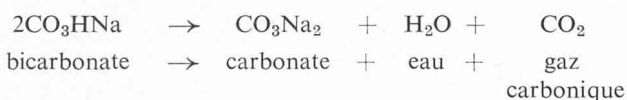
Traitement

Celui-ci peut avoir plusieurs objectifs :

- 1° l'élimination du gaz carbonique libre ;
- 2° l'élimination du gaz carbonique libre et d'une partie du gaz carbonique présent à l'état combiné ;
- 3° l'élimination du gaz et des éléments pouvant libérer ce gaz.

Suivant la nature de l'eau, dans le premier cas, l'élimination du gaz se fera par ruissellement, par addition de réactifs alcalins par neutralisation sur des produits alcalino-terreux, Neutralite - Marbre neutralite - magno.

Dans le second cas, le dégazage thermique provoque l'élimination du gaz carbonique libre et la disparition du gaz carbonique lié aux bicarbonates suivant la réaction :



Pour le troisième cas, on aura recours pour l'élimination des bicarbonates et des carbonates soit à un traitement sur résines carboxylique avec dégazeur, soit à une déminéralisation sur résine avec élimination des gaz.

Pour l'élimination des matières organiques, dont la décomposition en chaudière conduit à la formation de gaz carbonique, il faudra avoir recours, soit :

- à la coagulation en milieu acide,
- au permanganate de potassium avec élimination du réactif en excès sur charbon actif,
- au peroxyde de chlore,
- à l'ozone.

Conditionnement

Le conditionnement destiné à combattre l'acidité carbonique de la vapeur peut avoir pour effet, soit la neutralisation de l'acidité par réaction avec l'acide carbonique, soit la protection du métal par dépôt d'un film isolant sur ce dernier.

Les vapeurs industrielles et les vapeurs blanches et alimentaires peuvent être conditionnées par des produits et des processus totalement différents.

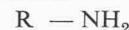
Le choix du produit sera déterminé en fonction de la qualité et de la destination de la vapeur — et des métaux entrant dans le réseau.

Conditionnement des vapeurs industrielles avec les amines volatiles

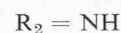
Les amines

Sous le nom d'amines, la chimie désigne des produits organiques qui peuvent dériver de l'ammoniac NH_3 par remplacement d'un, deux ou trois atomes d'hydrogène par un, deux ou trois radicaux organiques.

Une amine primaire aura pour formule générale :



Une amine secondaire :

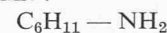


Une amine tertiaire :



Exemple :

Amine primaire cyclique : cyclohexylamine :



Amine secondaire : morpholine : $(\text{C}_2\text{H}_4)_2 - \text{O} - \text{NH}$

Amine tertiaire : diméthyléthanolamine :



Ces amines situées dans les premiers termes de la fonction sont parfaitement solubles et sont utilisées pour la neutralisation du gaz carbonique entraîné par la vapeur.

Caractérisées par un coefficient de partage — eau de chaudière — vapeur, elles s'échappent avec cette dernière et se condensent avec le fluide et neutralisent l'acide carbonique des condensats.

Elles ont des propriétés alcalines supérieures à celles de l'ammoniac.

Processus de neutralisation de l'acide carbonique par les amines

On peut admettre que les amines en solution dans l'eau donnent des hydroxydes d'amine suivant la réaction :



et en présence d'acide carbonique, la réaction de neutralisation se traduit par l'obtention d'un bicarbonate d'amine :



Les condensats retournant en chaudière par l'intermédiaire de la bache alimentaire, les bicarbonates d'amine se trouvent en milieu fortement alcalin (pH 11,0-11,5) et sous l'action des bases, ils se décomposent pour restituer l'amine et du carbonate de soude.

Neutralisation de l'acidité carbonique par l'ammoniac

Le gaz ammoniac NH_3 est très soluble dans l'eau et il s'hydrolyse pour donner de l'ammoniaque NH_4OH .

La neutralisation de l'acide carbonique par l'ammoniaque donne du bicarbonate d'ammonium suivant la réaction :



Le gaz ammoniac est un corps très volatil à haut coefficient de partage vapeur-eau et de ce fait il ne subsiste pratiquement plus d'ammoniac en chaudière.

Son pouvoir alcalinisant est très moyen. L'ammoniac en excès réagit avec le bicarbonate d'ammonium pour donner du carbonate d'ammonium.

A ce stade de la neutralisation le pH de la solution est voisin de 9.

Nous avons calculé les quantités respectives d'ammoniac et d'ammoniaque correspondant qu'il fallait employer en fonction de la richesse d'une eau en gaz carbonique pour maintenir un pH de 9,0 donc, moyennement alcalin.

Gaz carbonique en g/m ³ d'eau	NH ₃ en g pour obtenir le pH = 9,0	NH ₄ OH correspondant en g
0,25	0,50	1,10
0,50	0,70	1,54
1,00	1,00	2,21
1,5	1,35	2,95
2	1,70	3,76
2,5	2,10	4,65
3,0	2,40	5,30
4,0	3,10	6,85
5,0	3,75	8,30
6	4,50	9,95
7	5,25	11,60
8	5,90	13,02
9	6,70	14,80
10	7,35	16,25

Il est impossible de conditionner un réseau vapeur avec de l'ammoniac si des éléments cuivre sont inclus dans le circuit car ce dernier métal est attaqué préférentiellement.

Ce phénomène s'explique de la façon suivante :

Le potentiel électrochimique de l'hydrogène E_H⁰ est par définition égal à zéro.

Les potentiels électrochimiques pratiques de divers métaux déterminés à partir du potentiel zéro donnent :

- Etain (Sn 98) -0,809 volts
- Fer de -0,440 à 0,300 volts
- Zinc -0,284
- Cuivre +0,010
- Argent +0,149

Dans l'étude du processus de la corrosion, il a été démontré que lorsque deux métaux différents créent un couple galvanique dans l'eau, les métaux ayant un potentiel électrochimique inférieur au potentiel hydrogène deviennent anodiques et sont le siège d'une corrosion électrochimique, alors que les métaux ayant un potentiel électrochimique supérieur à zéro deviennent cathodiques et sont protégés (H. E. Hömig).

Or, il a été constaté qu'en présence d'oxygène (milieu aéré) avec une solution ammoniacale alcaline, le potentiel électrochimique du fer devient supérieur à celui du cuivre d'où attaque de ce dernier et formation avec l'ammoniaque de complexes cupro-ammoniacaux solubles.

Neutralisation par la benzilamine

La Benzilamine est une amine primaire de formule C₆H₅ — CH₂ — NH₂. C'est un liquide à haut point d'ébullition 185°C réagissant lors de la neutralisation de l'acidité carbonique dans les proportions de 2,2 g par gramme de gaz carbonique.

Son coefficient de partage est élevé puisque 4/5 partent avec la vapeur et 1/5 demeure dans l'eau de chaudière.

Il est possible d'utiliser la benzilamine en amont d'un dégazeur thermique, car son point d'ébullition est élevé. Son rôle dans le dégazeur consistera à relever le pH de l'eau donc, à protéger le métal contre une attaque du fluide à trop bas pH.

Neutralisation par la morpholine

Nous avons vu, dans la 3^e partie (6.4) que la morpholine avait un coefficient de partage eau vapeur équivalent à 50 %.

Son principal avantage tient donc au fait qu'elle accompagne l'eau dans tout le cycle eau - vapeur - condensats.

Son point d'ébullition est de 129°C — A pH neutre, il faut, en moyenne 2 g de morpholine pour neutraliser 1 g de gaz carbonique.

Lors de la condensation de la vapeur, la morpholine se dissout dans l'eau, neutralise l'acidité carbonique et confère aux condensats un pH alcalin.

pH des solutions de morpholine :

Poids de morpholine en g/m ³	pH de la solution correspondante
0,87	8,7
8,7	0,2
87,0	9,7
870,0	10,2

En général le dosage de la morpholine, comme celui des amines neutralisantes, est réglé de façon à obtenir un pH des condensats voisin de 8,5.

Neutralisation par amine tertiaire

Certaines amines tertiaires telle la diméthyléthanolamine (cf. 3^e partie) ont des points d'ébullition élevés et peuvent être dosées en amont des dégazeurs thermiques pour alcaliniser l'eau au contact du métal.

Leur alcalinité est assez élevée et leur pouvoir neutralisant important.

La neutralisation de l'acide carbonique dans les condensats conduit à des formations de bicarbonates et de carbonates d'amine qui se décomposeront en milieu alcalin en chaudière.

La diméthyléthanolamine ne peut, comme les précédentes, être utilisée dans des réseaux comportant des éléments cuivre car ceux-ci sont attaqués en présence d'oxygène.

Neutralisation par amine cyclique

La cyclohexylamine est une amine à grand coefficient de partage vapeur-eau ayant un point d'ébullition supérieur à 130°C.

De ce fait, elle peut être admise en bêche alimentaire même si les retours représentent un pourcentage important de l'eau alimentaire et si leur température est élevée.

Contrairement à l'ammoniac et aux amines aliphatiques, la cyclohexylamine est sans action sur les éléments des réseaux en cuivre ou alliages cuivreux.

Nous verrons, à propos des amines filmantes, que la cyclohexylamine associée à la butylamine permet la protection du métal contre la corrosion par chimisorption, c'est-à-dire par un ancrage de la molécule organique à la surface du métal.

Conditionnement des vapeurs industrielles avec les amines filmantes

Nous avons expliqué, précédemment, que les effets de l'action corrosive du gaz carbonique dans les vapeurs condensées pouvaient être considérablement aggravés s'il y avait présence d'oxygène dans les condensats (4^e partie — « Conditionnement contre les corrosions dues au gaz carbonique — introduction »).

Avec les amines volatiles, la protection du métal provient essentiellement de l'action neutralisante beaucoup plus que de leur pouvoir filmant qui est très faible.

Aussi, en cas de réduction incomplète de l'oxygène, ce corps peut entrer au contact du métal des canalisations contenant les condensats et corroder ces derniers indépendamment de l'absence ou de la présence d'acide carbonique.

Il est donc nécessaire de rechercher des produits capables à la fois de neutraliser l'acidité carbonique et de protéger intérieurement le métal contre l'oxygène.

Ces produits existent et sont désignés sous l'appellation d'amines passivantes ou amines filmantes.

Généralités sur les amines filmantes

Il existe des variétés d'amines, à longues chaînes carbonées comportant de 8 à 20 et même plus d'atomes de carbone à haut poids moléculaire dues aux actions acides, oxydantes, ou, aux deux conjuguées.

En général, des produits sont relativement peu solubles dans l'eau et leur caractère alcalin est peu prononcé.

Les principales amines filmantes sont :

l'hexadécylamine	$C_{16}H_{33}$	$-NH_2$
l'octadécylamine	$C_{18}H_{37}$	$-NH$
la dioctadécylamine	$(C_{18}H_{37})_2$	$=NH$

Il sera nécessaire de les injecter séparément à l'aide d'un groupe de dosage spécial.

On a pu rendre ces amines solubles dans l'eau, et celles-ci peuvent être, dès lors, injectées en bêche conjointement avec les autres produits si la température de l'eau alimentaire n'excède pas 50°C.

Au-delà, l'injection devra être sur la canalisation située entre la bêche et l'aspiration des pompes alimentaires.

Processus de protection des amines filmantes

Ces amines sont appelées filmantes parce qu'elles se déposent sur les parois métalliques internes des canalisations et isolent ainsi le métal du fluide.

L'amine filmante comprend deux parties distinctes et d'affinités différentes :

- 1° un radical R représentant la chaîne carbone grasse qui est hydrophobe,
- 2° un groupe NHx fonction amine basique hydrophile.

Les amines s'absorbent sur le métal par leur groupement NHx fixé à l'extrémité de la chaîne hydrocarbonée.

Les molécules sont donc orientées perpendiculairement par rapport à la surface du métal et forment une couche de protection extrêmement mince pouvant être considérée comme monomoléculaire et cependant suffisante pour établir une barrière contre la diffusion des ions fer et hydrogène.

D'autre part, le film offre une excellente résistance contre l'action corrosive de l'acide carbonique et de l'oxygène.

Par suite de l'orientation moléculaire des amines, celles-ci provoquent la polarisation du métal et modifient son comportement réactionnel face au milieu ambiant.

Un métal recouvert par une amine filmante présente un état hydrophobe, c'est-à-dire qu'il ne peut être mouillé par l'eau.

Pour s'en rendre compte, il suffit de déposer une goutte d'eau à l'intérieur d'un tube protégé pour observer que la goutte d'eau roule sur le métal sans s'écraser ni le mouiller.

Amines filmantes et installations corrodées

Il arrive fréquemment que le conditionnement des réseaux vapeurs n'intervienne qu'à la suite de dégâts constatés sur les tubes au contact des condensats.

Dans ce cas, le métal présente des corrosions et les amines pénètrent au sein des produits de corrosion. De ce fait ils peuvent demeurer sur le métal car les couches sous-jacentes sont isolées et la détérioration cesse.

Les résultats de l'efficacité du conditionnement par les amines filmantes doivent faire l'objet de contrôles périodiques.

Ceux-ci sont effectués à l'aide de manchettes témoins démontables installées sur le circuit des retours de vapeur.

Le démontage de la manchette permet d'examiner l'homogénéité et la régularité du film protecteur.

Nota

Pour les initiés, nous dirons que les processus de protection par les amines filmantes sont très complexes.

Il est certain que les composés aminés inhibent la corrosion par adsorption à l'interphase métal-eau, plusieurs modes d'adsorption semblent possibles, mais il y en a deux principaux : l'adsorption électrostatique et la chimisorption.

Adsorption électrostatique

C'est un processus relativement rapide qui se développe indépendamment de la température.

Il dépend, comme l'a démontré le D^r Foroulis de l'Esso Research and Engineering Co, de la charge de potentiel zéro à la surface du métal, de la position du potentiel de corrosion déjà existant par rapport au potentiel zéro, de la nature de l'adsorbabilité des anions acides de l'eau, et de la concentration des cations amine mis en solution.

A ce propos il faut noter que la dissolution de l'amine filmante dans le milieu corrodant est une condition préalable à son adsorption à l'interphase métal-eau.

Lorsque la solubilité de l'amine est trop faible, l'efficacité de la protection est réduite parce qu'il n'y a qu'une faible quantité d'inhibiteur qui atteint l'interphase métal-eau.

A l'inverse, si la solubilité est trop grande, l'amine peut être « lessivée » au niveau de l'interphase par le fluide corrosif.

Chimisorption

La chimisorption des molécules d'amine sur un métal en contact avec une eau corrosive implique le déplacement des molécules d'eau de la surface du métal et un partage de charge entre N (azote) de la molécule d'amine et les atomes à la surface du métal.

Ce processus est plus lent que le précédent et dépend de la température du fluide.

D'autre part, la nature du réseau cristallin présenté par le métal et la nature chimique du groupe d'ancrage influent sur le processus.

Éléments permettant pour les vapeurs industrielles d'établir un choix entre amines volatiles et amines filmantes

Deux éléments principaux entreront en ligne de compte pour déterminer le choix entre amines volatiles et amines filmantes :

- 1° difficultés éventuelles rencontrées pour la réduction ou l'élimination par traitement de l'oxygène de l'eau alimentaire des chaudières ;
- 2° importance de la production de vapeur.

Nous avons vu, en effet, que les amines filmantes au contraire des amines volatiles protègent efficacement les canalisations contre l'action corrosive de l'oxygène seul ou associé avec le gaz carbonique.

D'autre part, les quantités d'amines filmantes à mettre en œuvre pour protéger les réseaux sont beaucoup plus faibles que pour les autres amines : 10 à 15 g/m³ pour les premières contre 50 à 100 suivant la nature des eaux pour les secondes.

L'investissement réalisé par l'installation d'un groupe de dosage spécial pour les produits passivants est rapidement amorti par les économies obtenues sur les quantités du produit mis en œuvre.

Conditionnement des vapeurs alimentaires

Dans certaines industries : pharmaceutiques, alimentaires, produits blancs, etc. il n'est pas possible, pour des raisons d'hygiène ou d'incompatibilité, de procéder à un conditionnement des circuits vapeur et condensats au moyen de produits aminés (amines volatiles ou amines filmantes) car ces produits sont toujours plus ou moins toxiques.

Polymères spéciaux

Il est désormais possible de conditionner les vapeurs blanches et alimentaires par neutralisation de leur acidité carbonique sans leur ôter leurs qualités.

Le conditionnement est réalisé avec des polymères spéciaux brevetés et agréés.

A la différence des autres produits de conditionnement, les polymères spéciaux sont injectés directement dans le réseau vapeur - condensats à l'aide d'un groupe de dosage indépendant.

Le conditionnement s'effectue proportionnellement aux quantités de vapeur produites et à leur richesse en acidité carbonique.

Les doses de polymères mises en œuvre sont très faibles et inférieures à celles utilisées avec les amines filmantes.

Les entreprises concernées par ce conditionnement sont pour les principales : les laboratoires, les hôpitaux, toutes les industries alimentaires, les teintureries, les papeteries, les sociétés produisant des produits blancs.

12.3 Le conditionnement et le primage

Généralités

Dans le chapitre relatif à ce sujet (1^{re} partie, 3—4) nous avons expliqué que le phénomène appelé primage se définissait par l'entraînement vésiculaire de l'eau de chaudière avec la vapeur.

Le mécanisme du primage peut dépendre de l'augmentation de la viscosité de l'eau (augmentation de sa salinité), de l'abaissement de la tension superficielle du fluide (eau polluée par les détergents), de la quantité de particules solides en suspension et aussi, parfois, de la conception du générateur de vapeur, ou du rythme de marche de l'installation.

Lutte contre le primage

S'il est démontré que ce sont des solides ou la salinité qui sont causes de ces entraînements, il est facile de procéder à certaines corrections en agissant sur l'eau de la chaudière, soit en diminuant la concentration de cette eau par des extractions appropriées, soit en changeant ou en corrigeant le conditionnement de l'eau alimentaire.

L'alcalinité est parfois un facteur important vis-à-vis du primage et elle peut être corrigée par ajustement du conditionnement ou changement du traitement (décarbonisation supplémentaire par exemple).

Pour éviter les mousses et le primage dus à la présence d'huiles minérales en chaudière, il faut faire appel à un traitement particulier de déshuilage.

Agents de conditionnement anti-primage

Souvent, les causes d'entraînement ne peuvent être corrigées pour des raisons d'exploitation ou simplement à cause des pertes de calories qu'elles entraîneraient, par des purges abondantes ou par l'ajustement de la salinité de l'eau alimentaire.

Dans de très nombreux cas, le conditionnement à l'aide d'agents anti-primage a permis d'obtenir les résultats désirés.

Au cours de la dernière décennie, des agents anti-mousse très actifs ont été mis au point.

Ce sont en général des esters, des alcools ou amides macromoléculaires.

Processus de l'anti-primage

De très nombreuses théories ont été avancées pour expliquer leur action.

De cet ensemble, et suite aux nombreuses recherches qui ont été effectuées dans ce domaine par les chimistes et les techniciens, celle qui semble la plus logique est celle de l'adsorption dont nous vous avons entretenus à propos des amines.

On admet, désormais, que l'agent anti-mousse s'adsorbe à la surface du métal et provoque sur le plan d'eau la formation de bulles plus volumineuses donc plus fragiles et moins nombreuses (modification de la tension interfaciale).

De plus, la surface du métal imprégnée d'anti-mousse devient hydrophobe et si les bulles d'eau entrent à son contact elles éclatent libérant de la vapeur.

Conséquences pratiques

Ces différentes propriétés ont un effet régulateur sur l'ébullition évitant la formation de mousses (petites bulles d'air - d'eau, d'huile, etc.) sur le plan d'eau et empêchent la migration des particules liquides (vésicules d'eau) le long des parois des collecteurs en contact avec la vapeur.

L'utilisation de produit anti-primage pour des démonstrations expérimentales a permis d'atteindre des concentrations en solides de 150 000 ppm (parties pour million) avant de constater un entraînement.

Comparativement, lorsqu'il n'était pas fait usage de ces anti-mousses, le primage était immédiat.

Les produits de conditionnement anti-primage permettent donc d'augmenter sensiblement la concentration en chaudière et donc de réduire le volume des purges d'extraction : amélioration du bilan thermique.

La disparition du primage permet l'obtention d'une vapeur pure et la protection des organes mécaniques au contact de la vapeur.

Les quantités d'agent anti-primage à mettre en œuvre sont en général de 4 à 5 g par m³ d'eau alimentaire.

BIBLIOGRAPHIE

- R. L. STARKEY, K. M. WIGHT : *Anaerobic corrosion of iron in soil*.
C. A. H. WOLZGERKUHR et L. S. VANDEER VLUGT : *Aerobe en anaerobe corrosie in waterleiding buizen*.
W. FEARON : *Cavitation corrosions and its prevention in Diesel engines*.
R. VINCENT : *Conditionnement des circuits d'eau de refroidissement* (Société Dia Prosim).
J. PUYO : *Corrosion et entartrage*.
K. W. H. LEEFLANG : *Corrosion biochimique des circuits en métal ferreux*.
D. THIN : *Corrosion dans les services d'eau chaude* (Costic).
A. MISSENAUD : *Cours supérieurs de chauffage*.
J. BOUCHARD : *Evolution des méthodes de traitement de l'eau dans les chaudières et les circuits thermiques* (Société Degrément).
R. GIRARD : *Etudes techniques*.
R. WALL : *Etude des effets des vibrations sur la corrosion aqueuse du fer et son inhibition*.
J. MAYET : *Généralités sur le traitement des eaux* (Société Permo).

E. CARBONNEL : *Informations techniques* (Société Dia Prosim).
 L. PAULING : *Introduction à la chimie descriptive*.
 H. JARLAN : *L'eau*.
 Société Degremont : *Mémento technique de l'eau*.
 Dr HÖMIG : *Metal und Wasser*.
 L. COLAS, J. ROUQUET, J. BOUTIN : *Prévention de la corrosion des circuits d'eau*.
 M. BERENGUER : *Problèmes de refroidissement par l'eau*.

Dr GRUNAU : *Résistance des tubes en cuivre dans les installations d'eau potable et industrielle*.
 L. GERMAIN, L. NICOLAS : *Traitement des eaux*.
 Ces articles ont été publiés dans les nos 313-16 (1969) de la revue française *L'Installateur*.

Adresse des auteurs :
 Société PERMO, Groupe Degremont, 1800 Vevey.

Construction d'une maison expérimentale au Lesotho¹

par JEAN-CHRISTOPHE LAEDERACH, architecte EPF-SIA

1. Introduction

Le Lesotho, entièrement entouré par la République de l'Afrique du Sud, est un pays où la culture européenne affronte journellement la culture indigène pour la détruire graduellement. C'est un pays pauvre en matériaux de construction de base. En général, tous les matériaux (briques, ciment, bois, fer, fenêtres, portes, tôle ondulée, éternit, etc.) sont importés de la République sud-africaine. Non seulement, la balance des devises du pays en souffre, mais le Lesotho n'a pas les moyens financiers pour construire avec des matériaux importés.

Les méthodes de construction utilisées par les indigènes pour l'habitat sont rudimentaires et peu développées. Les matériaux mis en œuvre sont mal utilisés et souvent mal connus. La construction expérimentale décrite ci-après a cherché :

- 1) à donner une réponse à ces questions, en donnant la possibilité au Mosotho de se construire une habitation stable sans trop de frais ;
- 2) de proposer une architecture issue de la culture régionale.

2. Amélioration des matériaux de construction utilisés dans les constructions indigènes

Le Lesotho est un pays pauvre en matériaux de construction de base. Il est formé de roches éruptives basaltiques et de grès. Le sable de grès est fin, rare, contient du sel et beaucoup de particules d'argile. Il est toutefois utilisé pour le béton et le mortier. Les résultats obtenus sont moyens. Le basalte concassé donne un excellent composant pour le béton. Le bois est inexistant. Seules, les inflorescences d'agaves peuvent être utilisées dans certains cas.

L'argile, très répandue, pourrait permettre la fabrication de briques cuites d'une qualité acceptable.

Les matériaux utilisés dans les constructions indigènes sont :

- a) *Murs*
 terre argileuse dans tout le pays
 basalte en montagne
 grès plus ou moins taillé en plaine
 les joints sont en argile
- b) *Crépis extérieurs*
 Dila (pâte d'argile et d'excréments de vaches)
- c) *Crépis intérieurs*
 Badigeon d'argile
- d) *Charpente*
 Inflorescences d'agaves

e) *Couverture*

Chaume

f) *Sol*

Dila ou mélange de papier de journal avec de la sève d'agave, cuit pendant plusieurs heures.

Les Basutos ont une très bonne connaissance des terres utilisables pour la construction.

Les faits mentionnés ci-dessus, la connaissance de la terre comme matériau de construction, le fait qu'elle soit répandue dans tout le pays, nous ont poussés à étudier la terre stabilisée et ses techniques d'utilisation. Les résultats expérimentaux et analytiques ayant été concluants, nous avons décidé de les appliquer à la construction d'une maison d'habitation. Cette étude, accompagnée d'un rapport² a été nécessaire avant d'envisager la réalisation de cette construction. Les résultats obtenus ont démontré que l'utilisation d'un mélange de terre argileuse non végétale contenant au moins 15-20 % de sable mélangé avec du ciment (volume 1 : 10) donne de bons résultats.

La quantité et la qualité d'eau de gâchage nécessaire doivent être déterminées exactement (l'expérience et certains tests, très simples, sans appareil, sont suffisants).

Le pourcentage optimum de ciment dépend de la teneur en argile de la terre mise en œuvre. Il varie entre 8 et 14 %.

Il est indispensable d'abriter la terre stabilisée du soleil pendant au moins cinq jours.

D'autre part, il faut humidifier les murs pendant cinq jours au moins à raison de deux à trois fois par jour. La résistance à la compression, aux chocs, est égale à celle

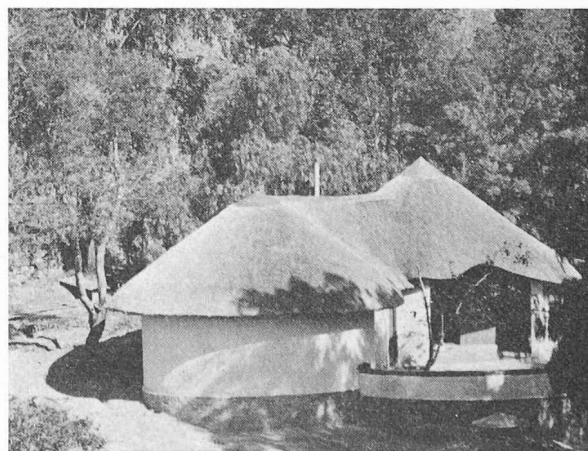


Fig. 1. — Vue générale de la maison expérimentale.

¹ Projet financé à raison de 50 % par l'Ecole normale de jeunes filles à Morija et de 50 % par la Confédération suisse.

² « Stabilisierte Erde im Hochbau ». Testrapport über Grundlagenforschungen in Lesotho, août 1969, collaborateur R. Hungerbühler.