

CHAPITRE XII a

LES INCRUSTATIONS

Leur formation et leurs conséquences

A - L'ENTARTREMENT

L'entartrement d'une chaudière est le dépôt, sur les parois en contact avec l'eau, d'une couche de sels minéraux adhérente et relativement dure, appelée *tartre*, dont la nature dépend de la composition de l'eau et du régime de la chaudière (timbre, taux de vaporisation, vitesse de circulation de l'eau, etc...).

Les eaux naturelles, généralement utilisées pour l'alimentation des chaudières, contiennent, en dissolution ou en suspension, une quantité variable de matières diverses : les unes sont d'origine organique, les autres, beaucoup plus importantes, sont des composés minéraux (1) :

- sels de sodium et de potassium,
- sels de calcium et de magnésium,
- sels de fer et d'aluminium,
- silice.

Ce sont les sels de calcium et de magnésium qui constituent la majeure partie des incrustations. L'aptitude d'une eau à provoquer des entartrements peut donc se mesurer à l'aide de sa teneur en sels de calcium et de magnésium. D'où l'habitude, pour exprimer cette teneur, d'avoir recours à une donnée simple : le *titre hydrotimétrique* — ou dureté de l'eau.

Le titre hydrotimétrique s'évalue en degrés, chaque degré équivalant en France à une teneur de 4 milligrammes de calcium ou 2,4 millig. de magnésium par litre d'eau (2).

(1) En présence de l'air atmosphérique, l'eau absorbe aussi les gaz situés au contact de sa surface et les dissout. On trouve surtout dans les eaux naturelles de l'oxygène et du gaz carbonique. La quantité dissoute de ces deux gaz peut être très importante et atteindre 10 milligrammes par litre pour l'oxygène. Pour le gaz carbonique, sa dissolution entraîne une transformation chimique des carbonates dissous et la quantité absorbée par le jeu de ce mécanisme peut être très grande.

(2) **Hydrotimétrie.**

L'hydrotimétrie est une méthode de titrimétrie qui a pour but la détermination rapide mais approchée de la teneur globale d'une eau naturelle en sels de calcium et de magnésium (dureté).

Le degré hydrométrique qui exprime cette dureté est une unité conventionnelle donnant par litre d'eau une teneur de :

0 gr. 0103	de carbonate	de calcium	CaCO ₃
0 gr. 0140	de sulfate	de calcium	CaSO ₄
0 gr. 0125		magnésium	MgSO ₄

soit environ $\frac{1}{10,000}$ de la masse moléculaire de chaque sel.

Le dosage hydrotimétrique est basé sur la réaction chimique sur l'eau à doser d'une solution (liqueur titrée) d'alcool et de savon de soude qui précipite les sels de calcium et de magnésium à l'état de savons calcaires insolubles ne produisant

I - Formation du tartre

Dans la formation du tartre, il faut distinguer deux phénomènes :

1° l'apparition des particules solides dans l'eau,

2° le mécanisme de l'agglomération de ces solides sur les parois.

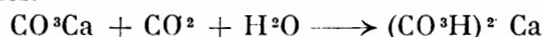
1° Apparition de particules solides dans l'eau.

C'est l'action de la chaleur qui provoque le passage, à l'état solide, de certains sels dissous dans l'eau.

La chaleur agit de deux façons :

a) par décomposition des bicarbonates.

Les carbonates neutres de calcium (CO^3Ca) et de magnésium (CO^3Mg) sont très peu solubles dans l'eau pure. Mais les eaux contenant en solution du gaz carbonique (CO^2), et c'est le cas d'un grand nombre d'eaux naturelles, peuvent dissoudre ces carbonates en quantités appréciables en les transformant, grâce au gaz carbonique qu'elles contiennent, en bicarbonates beaucoup plus solubles.



Ainsi, à la température ordinaire, un litre d'eau ne peut dissoudre que quelques milligrammes de calcium sous forme de carbonate, alors qu'il peut en dissoudre 500 milligrammes et plus sous forme de bicarbonate.

Or, sous l'action de la chaleur, les bicarbonates sont décomposés, le gaz carbonique s'échappe et il se reforme des carbonates qui, étant donné leur très faible solubilité, se déposent.

À la pression atmosphérique, cette réaction est complète et rapide à 100°C.

Pour le carbonate de magnésium, la décomposition se poursuit même plus loin et conduit à la magnésie $\text{Mg}(\text{OH})^2$.

b) par concentration et coagulation.

En concentrant par évaporation une solution d'un sel dans l'eau, il arrive un moment où la concentration de ce sel dans la solution atteint la limite de sa solubilité, la solution est dite saturée et si l'évaporation se poursuit, du sel à l'état solide se forme dans la solution. On dit qu'il *précipite*.

C'est ainsi que, dans une chaudière, par suite de l'évaporation de l'eau, le carbonate neutre de calcium et le sulfate de calcium précipitent.

Le sulfate de calcium présente de plus la particularité d'être d'autant moins soluble dans l'eau que la température de cette eau est plus élevée; il en résulte que lorsqu'une eau contenant du sulfate de calcium s'évapore dans une chaudière, c'est au contact des parties les plus chaudes de celle-ci, où la limite de solubilité du sulfate est la plus basse, que ce sel se précipite.

Les sels de fer et d'alumine, ainsi que la silice, précipitent également sous l'action de la concentration : une partie de ces substances peut exister d'ailleurs sous forme colloïdale, et la chaleur les coagule.

pas de mousse. La mousse n'apparaît que lorsque le savon de soude (alcalin) est en excès. On déduit donc de la quantité de savon versée avant qu'on puisse faire mousser la quantité de sels contenus dans l'eau et par conséquent son degré hydrotimétrique.

La « dureté totale » d'une eau est la teneur totale en substances décomposant le savon exprimée en CaCO^3 par litre : $0,0103 \times T^\circ$.

La « dureté permanente » correspond aux sels dissous non précipités par l'ébullition (sulfates et chlorures, et carbonates solubles, ceux-ci correspondant à 3°H environ) exprimée en CaSO^4 par litre; $0,0140 \times P^\circ$.

La « dureté temporaire » exprimée en CO^2 par litre : $0,0045 (T-P)$.

Toute une série d'analyses chimiques permettent de doser la teneur d'une eau en ses différents sels (sulfates, carbonates, nitrates et nitrites, chlorures, etc...).

Ces analyses ont été faites par le laboratoire pour toutes les prises d'eau de la S. N. C. F.

2° Mécanisme physique de la formation des incrustations.

Certaines des particules solides qui apparaissent, ainsi que nous venons de le voir, dans l'eau des chaudières, sont sous forme de cristaux.

Ces cristaux, en s'accroissant, s'enchevêtrent, s'agglomèrent et constituent des édifices résistants dans lesquels se trouvent enrobés d'autres éléments. Ces édifices résistants ne se forment cependant que lorsque les petits cristaux qui en sont à l'origine, et que l'on appelle germes de cristallisation, sont fixés sur les parois de la chaudière. Jamais, en effet, on ne constate d'accroissement au delà de 1/10 de mm. pour les cristaux qui restent en suspension dans l'eau.

L'apparition du tartre est donc liée à deux phénomènes physiques :

1° **L'accrochage des germes aux parois,**

2° **L'accroissement de l'incrustation et le maintien de sa solidité.**

1° **Accrochage des germes aux parois.**

On pourrait penser que la rugosité des surfaces joue un rôle primordial dans l'accrochage des germes; cependant, si les germes s'accrochent incontestablement plus facilement sur les surfaces rugueuses, on constate pratiquement que des surfaces parfaitement polies ne sont pas exemptes d'incrustations.

La rugosité n'est donc pas la seule cause d'adhérence. La plus importante est l'attraction, d'ordre électrique, qu'exercent les surfaces métalliques sur les particules solides se formant au sein des liquides. Aussi constate-t-on la formation de tartre même sur des surfaces balayées par des courants violents. C'est dire que les forces attractives mises en jeu sont considérables et très supérieures aux efforts qu'exercent les courants d'eau sur les particules, et **l'accrochage des incrustations ne peut être empêché ni par la nature des surfaces, ni par la vitesse de circulation de l'eau.**

2° **Accroissement du tartre.**

L'accroissement du tartre est dû à la précipitation de sels au fur et à mesure, d'une part, du départ du gaz carbonique (entartrement des appareils d'alimentation et des parties voisines des introductions d'eau dans la chaudière), d'autre part, de la vaporisation de l'eau. Cette vaporisation étant très intense au voisinage des surfaces de chauffe, celles-ci s'entartrent beaucoup plus vite que les autres.

Le maintien du tartre ainsi formé dépend des déformations auxquelles sont soumises les surfaces entartrées.

En effet, toute déformation de la tôle tend à décoller le tartre.

Il y a deux sortes de déformations à considérer :

a) *déformation entraînant une modification de la forme de la tôle.*

C'est le cas des arrondis de foyer dont la courbure varie un peu sous l'effet de la pression et de la température. Le tartre, plus rigide que le métal, ne le suit pas dans sa déformation et se décolle fréquemment.

b) *dilatation faisant varier les dimensions sans modifier les formes.*

C'est le cas d'une tôle plane ou cylindrique. Le tartre se détachera alors si son coefficient de dilatation est différent de celui du métal qui lui sert de support.

Ainsi, l'entartrement des foyers en acier est plus rapide et plus important que celui des foyers en cuivre parce que le coefficient de dilatation du tartre est très voisin de celui de l'acier, alors qu'il est sensiblement différent de celui du cuivre.

Les effets de la dilatation disloquent le tartre mais celui-ci ne se détache pas toujours car avec une eau incrustante, les fissures formées sont colmatées par de nouveaux dépôts.

II - Constitution du tartre

La nature du tartre dépend, d'une part, de la composition des eaux d'alimentation, d'autre part, de la zone dans laquelle il se forme.

Les composants principaux du tartre sont :

- le carbonate de calcium,
- le sulfatè de calcium,
- le silice, à l'état libre ou en combinaison avec la chaux.

1° Tartres carbonatés.

Le carbonate de calcium peut cristalliser soit sous forme *d'aragonite*, soit sous forme de *calcite*.

L'aragonite n'apparaît, à chaud, que sous faible pression. Elle se présente sous forme d'aiguilles atteignant des longueurs de un ou deux millimètres, capables de constituer des tartres compacts assez solides et parfois translucides, que l'on trouve dans les réchauffeurs d'eau d'alimentation.

La calcite apparaît aux pressions plus élevées et se forme, par conséquent, dans la chaudière. Les cristaux de calcite sont des rhomboèdres de petites dimensions (de l'ordre de 1/1000^e de millimètre) qui ont moins tendance à s'agglomérer que les aiguilles d'aragonite; aussi la calcite précipite-t-elle principalement sous forme de boues.

Cependant, la calcite peut, dans certains cas, constituer des tartres assez durs; l'agglomération s'effectue alors par une succession de dissolutions et recristallisations soudant les cristaux entre eux. C'est ce qui explique le durcissement des tartres carbonatés lors de la vidange à chaud des chaudières.

De même, lors de l'emploi d'eaux adoucies à la chaux-soude, il arrive que la chaux se dépose sur les parois de la chaudière et se carbonate ensuite au contact d'une eau d'alimentation contenant du gaz carbonique ou au contact de l'air lors des vidanges de la chaudière. Il se produit, dans ce cas, un phénomène de durcissement analogue à la prise des mortiers.

En résumé, les tartres carbonatés, constitués par de la calcite, ne se consolident qu'après leur dépôt; ils résistent donc mal à l'action des courants d'eau et aux efforts résultant des dilatations tant qu'ils ne sont pas durcis.

2° Tartres sulfatés.

Le sulfate de calcium se trouve dans le tartre à l'état *d'anhydrite* qui se présente sous forme de prismes allongés. Lorsqu'un tartre est composé presque exclusivement de sulfate de chaux, les prismes d'anhydrite qui le constituent sont accolés solidement les uns aux autres et lui donnent un aspect fibreux caractéristique.

L'épaisseur de tels tartres atteint fréquemment 5 mm. et même plus.

3° Tartres mixtes sulfatés.

Dans ces tartres, l'anhydrite prend généralement la forme d'aiguilles dont la longueur (de l'ordre de plusieurs centièmes de millimètres) est beaucoup plus grande que celle des autres éléments (calcite et magnésie) qui l'entourent. Ces aiguilles jouent le rôle d'armature et consolident l'ensemble. **Aussi, la compacité et la dureté du tartre sont-elles en liaison avec sa teneur en sulfate.**

4° Tartres silicatés.

La silice, contenue en quantité bien moindre que les sels de calcium dans les eaux d'alimentation, joue cependant un grand rôle dans les tartres où elle se retrouve en presque totalité. L'épuration préalable des eaux ne l'élimine pas en général. C'est ainsi que dans les chaudières alimentées avec des eaux épurées à la chaux et au carbonate de soude, on trouve souvent un tartre essentiellement silicaté.

Les tartres silicatés se présentent sous forme de couches généralement peu épaisses (de l'ordre de 2 mm.) extrêmement dures et adhérant très fortement. Ils constituent un enduit résistant et méritent la désignation de *tartre porcelaine*.

5° Magnésium et autres constituants des tartres.

On ne connaît pas de tartres exclusivement magnésiens mais la magnésie arrive à représenter jusqu'à 20 % et plus du tartre, en poids. Elle s'y trouve, soit combinée avec la silice, soit plus généralement à l'état de magnésie hydratée $Mg(OH)_2$.

La magnésie ne peut constituer de tartres durs que lorsqu'elle est associée à du sulfate de calcium ou à de la silice.

Parmi les autres constituants des tartres, on peut citer l'**alumine et l'oxyde de fer** qui forment des inclusions dans les tartres de tous types et aussi le **sulfate de baryte** qui provient de l'utilisation de certains produits anti-tartre à base de sels de baryum.

III - Nature des incrustations des chaudières de locomotives en France

1° Appareils d'alimentation.

Les incrustations des appareils d'alimentation sont constituées presque exclusivement de carbonate de calcium et de carbonate de magnésium, provenant de la décomposition des bicarbonates.

Elles se produisent dans les injecteurs (principalement dans les tuyères), dans les tuyaux de refoulement, dans les chapelles d'introduction, dans les réchauffeurs d'eau, dans les pompes à eau chaude et dans les tuyaux des économiseurs. Ces tartres, quoique peu résistants, atteignent des épaisseurs considérables, car, n'étant pas en contact avec des surfaces chauffantes, ils subissent très faiblement les effets de la dilatation.

2° Foyers.

Nous avons vu déjà que dans une chaudière le sulfate de calcium se précipite de préférence sur les surfaces les plus chaudes, ce qui est le cas pour les tôles de foyers où l'on trouve des tartres durs, sulfatés ou silicatés.

Le ciel de foyer, horizontal, est plus sensible à l'entartrement que les parois verticales desquelles les couches de tartre peu adhérentes ou disloquées tombent sous l'effet de la pesanteur ou des courants violents qui balayent les lames d'eau.

Ces décollements sont parfois retenus par des entretoises dans des zones peu agitées et il arrive qu'ils se soudent entre eux par de nouveaux dépôts de tartre et constituent ainsi des masses compactes qui relient les tôles et empêchent la circulation de l'eau. On dit que la lame d'eau est *murée*. Ces murages sont souvent la cause de coups de feu.

Le tartre se dépose également sur les clouures et sur le corps des entretoises et des tirants. Parfois les têtes de rivets sont complètement enrobées et les filets des entretoises disparaissent sous une gaine de tartre.

Cette gaine entourant les tirants et les entretoises s'épaissit au voisinage des tôles et vient se souder au tartre de celles-ci, constituant ce que les chaudronniers appellent les *pattes d'éléphants* dont le tartre est particulièrement dur.

3° Tubulures.

La composition du tartre déposé sur la tubulure n'est pas la même sur toute la longueur des tubes. Sur les parties les plus chauffées, c'est-à-dire les plus voisines du foyer, le tartre formé est plus riche en sulfate de calcium. Sur les parties moins chauffées, il est plus riche en carbonate de calcium.

Sur les tubulures des chaudières alimentées en eaux préalablement épurées à la chaux et au carbonate de soude, il se forme un tartre sulfaté et silicaté en couches compactes, peu

épaisses (2 à 3 mm.) très adhérentes, se détachant très difficilement du métal. Les tartres carbonatés, moins durs mais plus épais, s'écaillent en larges plaques et il en résulte qu'à l'intérieur du faisceau tubulaire, où le jet de lavage n'a pas d'action directe et ne peut, par conséquent, enlever ces décollements, ceux-ci s'agglomèrent et constituent de véritables *maçonneries* qui relient les tubes et empêchent la circulation de l'eau.

Dans les zones d'alimentation, il se forme d'importants dépôts de carbonate de chaux, qui, s'ils ne sont pas enlevés aux lavages, durcissent et « murent » les tubes.

C'est pour éviter cet inconvénient qu'on éloigne les arrivées d'eau de la tubulure (arrivées d'eau dans la vapeur) ou que l'on dispose une tôle de protection autour des tubes. Les dépôts de boues carbonatées se forment sur cette tôle qu'il suffit de nettoyer périodiquement.

4° Lavage des chaudières.

Le lavage consiste à vidanger la chaudière et à laver, avec un jet d'eau, les surfaces intérieures, par des ouvertures autoclaves disposées à cet effet, afin de débarrasser la chaudière des boues et des incrustations qui l'encombrent et de décoller le plus possible de tartre.

Dans les parties accessibles au jet, les lavages limitent l'épaisseur des tartres, surtout des tartres carbonatés, mais ils ne permettent pas d'éviter la formation de couches fortement adhérentes, à base de sulfates, qui atteignent, même sur les surfaces les mieux lavées, des épaisseurs de plusieurs millimètres.

B - INFLUENCE DU TARTRE SUR LE RENDEMENT ET LES FRAIS D'ENTRETIEN DES CHAUDIÈRES DE LOCOMOTIVES

Les effets du tartre sont multiples; nous distinguerons **les effets de l'entartrement des appareils d'alimentation de ceux de l'entartrement des surfaces de chauffe.**

1° Entartrement des appareils d'alimentation

Dans les injecteurs, le tartre se dépose principalement sur les tuyères et il en résulte une diminution du débit et des défauts d'amorçage, ce qui nécessite le changement des appareils et leur détartrage à l'acide. Avec certaines eaux, ce changement doit être effectué après les parcours relativement faibles (8 à 10.000 km. et même moins) d'où des dépenses et des risques d'incidents graves, en cas de non fonctionnement des appareils en cours de route. Des inconvénients du même ordre résultent de l'entartrement des tuyaux de refoulement des injecteurs.

Dans les réchauffeurs d'eau, les pompes d'alimentation sont particulièrement sensibles à l'entartrement, qui gêne bien vite leur fonctionnement. Aussi est-on conduit à détartrer périodiquement ces appareils au bout de parcours qui, pour des eaux moyennement dures, sont de l'ordre de 15.000 km.

Ce détartrage, qui s'opère par circulation d'une solution d'acide passivé, est une opération délicate et non sans risques, car les morceaux de tartre qui se décollent après attaque, se coincent parfois sur les clapets ou dans les segments des pistons et provoquent rapidement des incidents ou avaries.

2° Entartrement des surfaces chauffantes

Les tartres sont mauvais conducteurs de la chaleur. Leur conductivité calorifique varie avec leur structure. Les tartres compacts, comme ceux qui sont formés de cristaux de sulfate de calcium, orientés perpendiculairement aux surfaces de chauffe, sont moins isolants que certains tartres carbonatés de structure hétérogène. **Les tartres silicatés sont, à cause de leur porosité, les plus isolants.**

En moyenne, la conductivité calorifique des tartres est environ 25 fois plus faible que celle de l'acier et 150 fois plus faible que celle du cuivre (1).

Or, le passage d'une certaine quantité de chaleur à travers une paroi s'accompagne d'une chute de température proportionnelle, toutes choses égales par ailleurs, à la résistance qu'offre cette paroi au passage de la chaleur.

Il s'en suit que, dans une chaudière, pour assurer un régime de vaporisation déterminé, il est nécessaire de porter les tôles à une température d'autant plus élevée qu'elles sont plus entartrées et qu'elles offrent, par conséquent, plus de résistance au passage de la chaleur.

C'est ainsi qu'une couche de tartre d'épaisseur courante (2 mm. de tartre sulfaté et carbonaté ou 1 mm. de tartre siliceux poreux pouvant se former, avec des eaux couramment utilisées, au bout d'un parcours de 10 à 20.000 km.), peut élever la température des tôles de foyer de 130° et celle des tubes de 60°.

Cet effet du tartre est encore plus important dès que les dépôts gênent la circulation de l'eau, ce qui est surtout sensible pour les tubes.

L'élévation de la température des tôles constituant les chaudières, influe :

- sur le rendement calorifique,
- sur la tenue des éléments de ces chaudières.

3° Influence de l'entartrage sur le rendement des chaudières

On conçoit facilement que, les tôles étant à une température plus élevée, les fumées doivent sortir plus chaudes d'une chaudière entartrée que d'une chaudière propre, d'où une perte de calories.

L'importance de cette perte de calories est fonction de nombreux facteurs; type de chaudière, taux de combustion, variation de production, nature et épaisseur du tartre, etc... et est, par conséquent, difficile à chiffrer.

On peut cependant indiquer, après de multiples expériences, que l'augmentation de consommation de combustible due à l'effort isolant d'un entartrage moyen, est de l'ordre de 5 %.

Pour les locomotives en service courant, à l'effet direct du tartre sur le rendement des chaudières, s'ajoute l'effet indirect des immobilisations. Nous verrons, en effet, que les locomotives entartrées sont plus souvent arrêtées pour l'entretien des foyers d'où, d'une part, des extinctions et des rallumages qui consomment inutilement du combustible et, d'autre part, des parcours mensuels moins importants et irrégulièrement répartis qui ont également une influence sensible sur la consommation de combustible.

(1) Les incrustations sont un véritable isolant thermique qui diminue sensiblement le coefficient K de transmission de la chaleur à travers les surfaces de chauffe.

$$K = \frac{Q}{\theta_1 - \theta_2}$$

ou $\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ calories/m}^2\text{/heure transmises} \\ \theta_1 \text{ température de la paroi} \\ \theta_2 \text{ température de l'eau.} \end{array} \right.$

D'après Ten Bosch la température d'une paroi de 18 mm d'épaisseur atteint les chiffres suivants dans les deux cas de transmission d'une même quantité de chaleur à travers une paroi propre et à travers paroi recouverte d'une incrustation de 10 mm, ($\theta_2 = 180^\circ$).

Quantité de chaleur transmise Q cal/m ² /h	Température θ_1	
	paroi propre	paroi incrustée.
100.000 cal.	210°	710°
50.000 —	195°	445°
25.000 —	187°	312°
10.000 —	183°	233°

L'influence de l'incrustation sur la transmission de chaleur (ainsi qu'on peut calculer K) est donc moins grande qu'on aurait pu le craindre (K est diminué d'environ 10 %) mais elle est désastreuse sur la température de la paroi et la solidité de la tôle.

Des comparaisons effectuées entre des locomotives sans tartre et des locomotives entartrées montrent qu'en service courant, la différence de consommation de combustible peut atteindre et même dépasser 10 %.

4° Influence du tartre sur la tenue des chaudières

L'élévation de température provoquée par la présence de tartre dans les chaudières a, d'une part, **un effet direct sur la tenue au feu des éléments de ces chaudières et, d'autre part, un effet indirect dû aux dilatations qui en résultent.**

L'effet direct de l'élévation de la température est de diminuer la résistance des métaux.

C'est ainsi que les gros amas de tartre peuvent provoquer des accidents graves (coups de feu, entraînant la déformation du foyer ou des tubes).

Avec un entartrement normal, l'élévation de température des tôles ne diminue pas dangereusement leur résistance. Cependant, dans les zones qui travaillent beaucoup, par exemple, dans les arrondis de la plaque tubulaire, une élévation de la température peut faire descendre la limite élastique du métal au-dessous de la valeur de certaines contraintes et, par conséquent, provoquer l'apparition de criques. De même, il arrive que les flancs des foyers entartrés soient assez surchauffés pour prendre des déformations permanentes : c'est l'origine des matelassages locaux de certaines chaudières poussées. Par ailleurs, l'élévation de température peut favoriser certaines corrosions.

Enfin, il faut citer, comme conséquences directe de l'élévation de température, les usures de têtes d'entretoises; celles-ci, qui sont fortement chauffées par le rayonnement du feu et par les flammes, ne sont refroidies que par le contact de l'eau avec le corps de l'entretoise et les parties voisines de la tôle. Lorsque le refroidissement est gêné par la présence de tartre, fréquemment épais à la base des entretoises, les têtes se trouvent portées à une température élevée. Or, le bronze au manganèse, qui constitue la majeure partie des entretoises des foyers en cuivre, est très sensible à l'élévation de température et les têtes de ces entretoises « se brûlent au feu ». Aussi est-on dans l'obligation de changer, pour cette cause, plusieurs centaines d'entretoises à chaque lavage. Sur les entretoises en cuivre ou en acier, l'usure des têtes se produit sous l'effet combiné de la température et des fuites; comme celles-ci sont liées aussi à l'entarrement, on peut dire que la tenue des têtes d'entretoises est conditionnée par l'absence de tartre.

L'élévation de la température des surfaces de chauffe, provoquée par la présence de tartre, a également un effet indirect : les différences de température entre ces surfaces et les autres parties de la chaudière sont fortement augmentées et il en résulte des dilatations très inégales et des efforts supplémentaires qui font travailler tous les assemblages et tendent à disloquer la chaudière.

C'est ainsi que la partie intérieure de la chaudière, tournée du côté du feu et qui comprend le faisceau tubulaire et le foyer est plus chaude que l'enveloppe extérieure comprenant la plaque tubulaire de boîte à fumée, le corps cylindrique et la boîte à feu.

La partie intérieure se dilate par conséquent plus que la partie extérieure, et, comme elles sont liées invariablement, il en résulte des contraintes et des déformations.

Dans le sens longitudinal, les tubes exercent, en se dilatant, une poussée sur les plaques tubulaires qui se déforment, particulièrement la plaque tubulaire de foyer, plus chaude et moins épaisse. Les assemblages perdent leur étanchéité, certains alvéoles s'ovalisent, d'où des « fuites aux tubes ». L'eau, en passant dans ces fuites, dépose du tartre entre le tube et la plaque, ce qui empêche de réaliser des assemblages étanches. Aussi est-il très difficile, dans une chaudière entartrée, d'éviter les fuites aux plaques tubulaires, malgré les dudgeonnages fréquents. De plus, les nombreux dudgeonnages entraînent des usures anormales des pinces et c'est la cause principale des remplacements de tubulures.

Dans les foyers en cuivre, les plaques tubulaires, fatiguées par des dudgeonnages fréquents et par la poussée des tubes se fissurent dans les interstices entre les tubes et nécessitent des réparations très délicates.

Dans les foyers acier, ces incidents sont plus rares et plus facilement réparables par soudure.

La plaque tubulaire de foyer transmet la poussée des tubes aux flancs du foyer. Ces flancs, qui se dilatent aussi, se déforment et transmettent la poussée résiduelle à la plaque arrière de boîte à feu par l'intermédiaire de la plaque arrière de foyer et des entretoises qui relient ces plaques. Les assemblages reliant la plaque tubulaire aux flancs et au ciel du foyer se disloquent — d'où des « fuites aux pinces » — et les arrondis se déforment — d'où les gerçures classiques des arrondis des foyers en cuivre.

La poussée longitudinale due à la dilatation des tubes et du foyer s'appuyant, d'un côté sur la plaque tubulaire de boîte à fumée et de l'autre sur la plaque arrière de boîte à feu, il en résulte que le corps cylindrique et la boîte à feu doivent résister à un effort d'allongement. Ils travaillent dans de bien meilleures conditions, étant plus épais et moins chauds. Cependant, les arrondis verticaux de boîte à feu subissent des déformations suffisantes dans certains cas pour provoquer des fissures, soit parce que la limite de fatigue à la flexion alternée est atteinte, soit par corrosions fissurantes sous l'action de certaines eaux.

En plus des dilatations longitudinales, il existe aussi des dilatations transversales : les tôles de foyer et de boîte à feu, liées entre elles par le cadre de foyer, se dilatent différemment, se déplacent l'une par rapport à l'autre, dans le sens vertical, d'une quantité qui augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cadre et dans une direction qui est la résultante des déplacements verticaux et longitudinaux.

Les entretoises, encastrées dans chacune de ces tôles qu'elles relient, subissent de ce fait une déformation qui les fait travailler à la flexion.

Dans les foyers en cuivre, où les entretoises sont plus dures que la tôle, celle-ci se déforme et il se produit des fuites.

Dans les foyers acier, lorsque les contraintes deviennent trop fortes, les entretoises se rompent, spécialement au ras de la tôle extérieure. Côté foyer, la tôle, plus mince et plus chaude, se déforme, d'où des fuites et aussi des fissures « en étoile » autour des trous, fissures qui demandent de nombreuses interventions et qui, dans certains cas, servent d'amorce aux déchirures classiques des flancs en acier. Ces déchirures, dont la longueur atteint un mètre et plus, se produisent parfois brutalement pendant le refroidissement du foyer. Il semble qu'elles soient dues aux tensions qui se développent dans les flancs lorsque l'équilibre, qui s'était établi à chaud, est détruit par le refroidissement des tubes et des tôles du foyer.

Pour éviter les ruptures d'entretoises, on utilise aux emplacements où celles-ci sont soumises aux contraintes les plus fortes, des entretoises articulées. Mais, même dans ce cas, le tartre, en s'introduisant dans les têtes articulées et en empêchant celles-ci de jouer convenablement, fait perdre le bénéfice qu'on peut attendre de ce dispositif.

Dans l'ensemble, on voit que la tenue des chaudières est conditionnée par l'entartrement. **Les foyers en acier, qui s'entartrent plus facilement que les foyers cuivre et qui sont plus sensibles à l'influence du tartre, donnent lieu, avec des eaux incrustantes à de grosses avaries. Certains dispositifs placés sur les locomotives poussées, comme les arch-tubes ou les siphons ne sont pratiquement pas utilisables en présence de tartre.** Il apparaît donc que la suppression du tartre est d'une importance capitale pour l'économie de la locomotive et son développement. Elle permet, simultanément, d'économiser du combustible, d'augmenter la puissance et de réduire les frais d'entretien ainsi que les immobilisations.

On conçoit que, dans ces conditions, les Réseaux de Chemins de Fer aient, depuis longtemps, cherché à combattre l'entartrement des chaudières. Au début, il fallut éviter les avaries graves qui en résultaient. Faute de mieux, on se contenta de palliatifs : lavages fréquents des chaudières, adoucissement de l'eau, utilisation de désincrustants, qui, sans supprimer l'entartrement, le réduisirent sensiblement et permirent le développement des chaudières.

Plus récemment, on s'est aperçu de l'importance des économies que l'on pouvait attendre de la suppression totale du tartre, d'où la recherche d'un procédé *traitement intégral* des eaux d'alimentation et, étant donné les résultats obtenus, la généralisation de son application.