

CHAPITRE VIII

SURCHAUFFEUR

1° Rôle et utilité de la surchauffe

a) Eviter les condensations.

Nous avons vu qu'une vapeur saturée est une vapeur se trouvant dans des conditions de température et de pression à la limite entre eau et vapeur et qu'une légère modification de ces conditions peut faire condenser la vapeur en eau. Dans son parcours pour aller du régulateur aux cylindres et dans les cylindres la vapeur ne reçoit plus aucune quantité de chaleur et a plutôt tendance à en perdre par son contact avec des parois relativement froides. Il y a donc des condensations dans les tuyaux d'admission et surtout dans les cylindres. L'eau ainsi obtenue ne fournit aucun travail et les calories qu'elle a prises au foyer, puis abandonnées lors de sa condensation sont perdues. Cette perte s'accroît encore du fait que les échanges de chaleur avec les parois s'intensifient lorsqu'elles sont mouillées. En outre la présence d'eau accumulée dans les cylindres est dangereuse pour le mécanisme et peut provoquer des ruptures de pièces (pistons, plateaux); il faut alors purger les cylindres de temps en temps et surtout aux démarrages, ce qui provoque une perte supplémentaire par échappement direct dans l'atmosphère de vapeur qui n'a pas travaillé.

La présence d'eau à l'état liquide dans le fluide évoluant (vapeur humide) accroît les pertes de charge par laminage, particulièrement à travers les orifices d'échappement aux grandes vitesses, ce qui diminue encore le rendement thermique de la machine.

On voit donc l'utilité d'employer une vapeur qui soit à l'abri de ces phénomènes nuisibles. Il faut qu'elle puisse subir des abaissements de température dans son trajet entre la chaudière et l'échappement sans cesser pour cela de rester entièrement sèche; elle doit donc être suffisamment surchauffée au départ.

La vapeur surchauffée présente en outre l'intérêt, étant moins conductrice que la vapeur saturée, de céder moins facilement sa chaleur aux parois des conduits et cylindres.

b) Augmenter le rendement thermique.

On démontre que le rendement théorique d'une machine thermique s'accroît lorsque l'écart de température entre la source chaude et la source froide augmente. La limite supérieure de ce rendement est donnée, lors de l'évolution du fluide suivant le cycle de Carnot, par la formule :

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

T_1 étant la température absolue de la source chaude et T_2 celle de la source froide. Il est donc nécessaire de relever la valeur de T_1 si on veut pouvoir accroître la valeur du rendement réel des machines.

Les rendements théoriques maxima sont respectivement dans le cas de vapeur surchauffée à 350° et dans le cas de vapeur saturée sèche à 204° (vapeur d'échappement à 100°) :

$$\frac{(350 + 273) - (100 + 273)}{350 + 273} = 0,40$$

et
$$\frac{(204 + 273) - (100 + 273)}{204 + 273} = 0,21$$

Plus simplement, on voit d'abord que l'emploi de la vapeur surchauffée entraîne une économie d'eau (donc de charbon) sur l'emploi de vapeur saturée, du simple fait que la densité de la vapeur surchauffée est plus faible que celle de la vapeur saturée : 1 kg. de vapeur saturée à 16 hpz. de pression relative et 201° de température centigrade occupe un volume de 120 litres, tandis que cette même quantité de vapeur surchauffée à 350° et à la même pression occupe un volume de 167 litres (phénomène de *dilatation* de la vapeur à pression constante sous l'action de la chaleur).

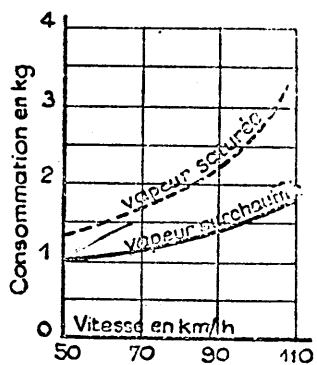


FIG. 141 bis

Pour une même puissance développée ou pour remplir un même volume donné de cylindre (1) on fait donc, en surchauffant la vapeur à 350° une économie d'eau de :

$$1 - \frac{120}{167} = 0,28 \text{ (28 \%)}.$$

Comme le kg. de vapeur saturée contient 670 calories alors que celui de vapeur sèche à 350° en contient 750, on voit que l'économie en eau entraîne immédiatement une économie de calories qui est de :

$$670 - \frac{120}{167} \cdot 750 = 130 \text{ calories}$$

soit $\frac{130}{670} = 0,19 \text{ (19 \%)}$

L'expérience confirme que l'économie de charbon obtenue pratiquement est de beaucoup supérieure à celle en calories indiquée ci-dessus, car dans le raisonnement précédent, il n'a pas été tenu compte des pertes par condensation qui se produisent avec la vapeur saturée.

La figure 141. bis donne le résultat d'un essai comparatif de la Région SO concernant la variation de consommation de charbon au CV/H en fonction de la vitesse (pour une puissance de 700 CV au crochet) de 2 locomotives 231 compound de même série, l'une timbrée à 16 hpz et à vapeur saturée, l'autre timbrée à 16 hpz et à vapeur surchauffée à 320° seulement. Les économies de charbon indiquées ne sont valables qu'aux puissances élevées. En service courant elles sont plus réduites car l'avantage de la surchauffe diminue quand l'allure de la combustion se ralentit (dans ce cas le degré de surchauffe diminue, par contre, la vapeur saturée devient plus sèche : de plus l'économie de charbon se rapproche de l'économie de chaleur).

c) Augmenter la puissance.

Pour une même consommation donnée d'eau et de charbon la surchauffe élève la puissance de la machine. 1 kg. de charbon utilisé en vapeur saturée donne la même puissance que $1 - 0,19 = 0,81$ kg. de charbon utilisé en vapeur surchauffée (dans les mêmes conditions que celles du cas précédent). Le supplément de puissance est donc de :

$$\frac{1 - 0,81}{0,81} = 0,23 \text{ (23 \%)}$$

La figure 141 ter donne, dans le cas de l'essai précédent, la variation du plafond de puissance en fonction de la vitesse. On remarque, comme d'ailleurs sur la figure 141 bis que les écarts de puissance et de consommation, sensibles à faible vitesse sont davantage considérables au fur et à mesure que la vitesse s'élève, preuve tangible de l'influence qu'ont les laminages sur le rendement des machines.

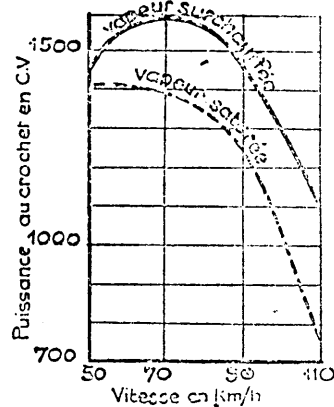


FIG. 141 ter

La puissance développée au cylindre s'accroît aussi lorsqu'on élève la température de surchauffe. Dans le même essai, pour une même consommation de vapeur de 3 kg. par seconde on a obtenu les puissances indiquées suivantes :

1330 CV pour	270°
1510 CV pour	315°
1640 CV pour	355°

Par conséquent, l'application pure et simple de la surchauffe permet d'avoir un parc de machines à la fois plus puissantes et plus économiques que les machines à vapeur saturée du même type.

(1) A la vérité, à la détente, la pression de vapeur surchauffée tombe un peu plus vite que celle de la vapeur saturée sèche. Pour produire le même travail il faudrait donc une admission un peu plus longue (ou une consommation de vapeur majorée de 5 à 10 %) et l'économie théorique est légèrement inférieure à celle calculée ci-après.

2^o Principe de construction des surchauffeurs

Nous avons déjà indiqué dans les considérations générales sur la chaudière que le rapport $\frac{S_g}{S}$ de la surface de surchauffe à la surface totale de chauffe a été augmenté sur les machines modernes. Cet accroissement n'a pas simplement pour raison l'élévation de la température de surchauffe, il a été nécessaire pour maintenir cette dernière à la valeur obtenue sur les machines anciennes courtes.

En effet, si l'on allonge le corps cylindrique et, par suite, les tubes à fumée tout en conservant des rapports $\frac{S_d}{S_i}$ $\frac{S_g}{S}$ donc $\frac{S_g}{S_i}$ constants, c'est-à-dire, si l'on allonge proportionnellement les tubes et les éléments, l'extrémité du faisceau s'éloigne de la plaque tubulaire du foyer et se trouve baigné par des gaz dont la température est de plus en plus basse. Il s'ensuit que le degré de surchauffe s'abaisse.

C'est ce que l'on a constaté en comparant 2 machines pour lesquelles le rapport commun $\frac{S_g}{S}$ valait 0,20 et dont les tubes à fumée avaient une longueur de 4 mètres et de 6 mètres. Dans le premier cas (machine Ten Wheel) la température de la vapeur surchauffée était de 300 à 320° et pouvait atteindre 360° en pointe. Tandis que dans le deuxième cas (machines Pacific ou Mikado) la température de la vapeur surchauffée était de 250 à 280° et ne dépassait pas 310° en pointe.

Le rapport $\frac{S_g}{S}$ n'est donc pas un facteur déterminant du degré de surchauffe.

Le degré de surchauffe de la vapeur (différence entre la température de la vapeur surchauffée et celle de la vapeur saturée à la même pression) est en relation directe avec la fraction de la quantité de chaleur produite par le foyer qui est absorbée par le surchauffeur; c'est-à-dire qu'il dépend du rapport entre la quantité de chaleur affectée au surchauffeur et la quantité de chaleur totale fournie aux surfaces de chauffe mouillées.

Ce degré de surchauffe dépendra finalement, du rapport des sections de passage des gaz dans les tubes surchauffeurs et dans les autres tubes de la chaudière, si toutefois les résistances opposées au passage des gaz chauds à travers le faisceau surchauffeur et à travers le faisceau brouilleur sont les mêmes afin que les vitesses des gaz soient égales dans les deux faisceaux.

Le moyen le plus simple et le plus efficace pour relever le degré de surchauffe d'une machine est donc d'augmenter le nombre de ses tubes surchauffeurs.

Mais on se doute aussi que ce degré dépend de la façon dont est distribuée la chaleur emmenée par les gaz dans les tubes surchauffeurs, une partie va à l'élément surchauffeur, l'autre partie va à travers le tube à l'eau de la chaudière. Il va d'autant plus de chaleur à l'élément que le rapport de la surface frottante de l'élément à celle du tube qui les contient est plus grand. Et cette considération intervient pour le choix du type d'élément surchauffeur à adopter; on doit prendre celui dont la section a le plus grand périmètre extérieur. La répartition n'est pas seulement proportionnelle à ce rapport car les échanges de chaleur sont plus difficiles à surface égale avec la vapeur qu'avec l'eau.

Enfin, les éléments introduisent par leurs extrémités des discontinuités dans les sections de passage; ce qui trouble l'écoulement des gaz, crée des pertes de charge supplémentaire, modifie la répartition des débits des gaz entre petits tubes et gros tubes et même aussi la distribution de la chaleur à l'élément et au gros tube.

Soient : S_s la section totale de passage des gaz dans les tubes surchauffeurs,
 S_v ————— petits tubes,
 S_1 la surface frottante totale des gaz dans les tubes surchauffeurs,
 S_2 ————— petits tubes,
 s_1 la surface frottante en m² par mètre ou périmètre de l'élément surchauffeur,
 s_2 ————— du tube surchauffeur,
 ω_1 la section de passage minimum de la vapeur à travers l'élément surchauffeur.

Le degré de surchauffe, pour une production déterminée de vapeur et proportionnel :

— au rapport des débits des gaz dans les gros et petits tubes. Ces débits sont, pour une dépression h dans la boîte à fumée sensiblement égaux à :

$$Q_1 = K_1 S_s \sqrt{h}$$

$$Q_2 = K_2 S_v \sqrt{h}$$

Or, les coefficients de débit K_1 et K_2 qui dépendent de la résistance de passage sont en première approximation inversement proportionnels aux rapports :

$$\sqrt{\frac{S_1}{S_s}} \quad \text{et} \quad \sqrt{\frac{S_2}{S_v}}$$

Le degré de surchauffe varie donc proportionnellement à :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{S_s}{S_v}\right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Cette relation met en évidence l'influence prédominante des sections de passage S_s et S_v au rapport de répartition de la chaleur amenée dans les gros tubes entre l'élément surchauffeur et la surface mouillée du tube; ce rapport est proportionnel au rapport $\frac{S_1}{S_2}$

à la quantité de chaleur reçue par l'unité de poids de vapeur, c'est-à-dire au rapport $\frac{s_1}{s_2}$.

Le degré de surchauffe est donc finalement proportionnel au facteur.

$$(1) \quad \left(\frac{S_s}{S_v}\right)^3 \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \frac{s_1}{s_2} \frac{s_1}{s_2}$$

Pour déterminer le degré de surchauffe d'un surchauffeur, il suffit de connaître les éléments ci-dessus et de comparer la valeur du facteur (1) à celle du même facteur pour un autre surchauffeur dont on connaît par expérience le degré de surchauffe qu'il peut donner sur la machine en cause.

Coupe d'un collecteur de surchauffe

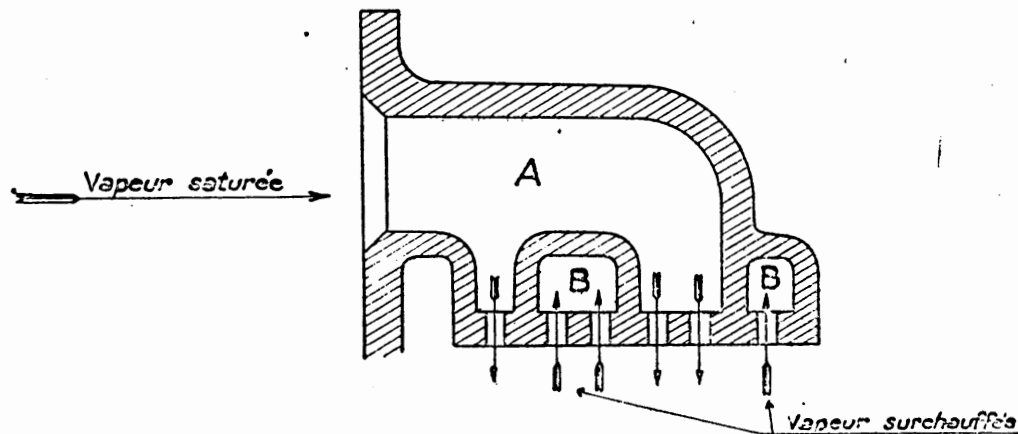


FIGURE 142

Mais si l'on compare deux chaudières dissemblables, dont les surfaces de chauffe directes et indirectes ne sont pas dans les mêmes proportions, dont les capacités de production sont totalement différentes, ce facteur (1) ne suffit pas pour déterminer le degré de surchauffe sur l'une des machines en partant de celui obtenu sur l'autre. Car, ainsi par exemple, que nous l'avons signalé plus haut, avec une tubulure courte où les coudes des éléments sont plus rapprochés de la plaque tubulaire les gaz arrivent plus chauds aux éléments surchauffeurs qu'avec une tubulure longue et le degré de surchauffe sera plus élevé, même si le facteur (1) calculé ne l'est pas. (1)

3° Description d'un surchauffeur

D'une façon générale, un surchauffeur comprend un collecteur de surchauffe et des éléments surchauffeurs.

La vapeur venue du régulateur arrive dans le collecteur qui la répartit entre les éléments; elle parcourt les éléments qui sont des canalisations de forme spéciale situées dans les gros tubes à fumée et entourées par les gaz chauds venus du foyer; là elle prend sa température de surchauffe. Puis la vapeur retourne au collecteur et de là part aux tuyaux d'admission et aux cylindres.

(1) Signalons toutefois, qu'on a pu raccourcir de plus d'un mètre les tuyaux de seconde circulation des éléments Schmidt sans qu'il en résulte de baisse sensible du degré de surchauffe. Il faut supposer que cette modification, justifiée par des raisons d'économie de matières, favorisait les échanges de chaleur entre les gaz chauds et l'extrémité des tuyaux de première circulation, c'est-à-dire que ceci compensait cela.

Le collecteur de surchauffe (fig. 142) est une caisse cloisonnée en fonte ou acier moulé qui est divisée en deux chambres. Dans l'une (A) arrive la vapeur saturée venue du régulateur et qui va aux éléments surchauffeurs; dans l'autre (B) est rassemblée la vapeur surchauffée qui vient des éléments surchauffeurs et va aux cylindres.

Dans certains cas le collecteur est à chambres séparées, l'une pour la vapeur saturée, l'autre pour la vapeur surchauffée. La fabrication en est plus facile, car il n'y a pas de cloison. Cette séparation en évitant des échanges de chaleur entre vapeur surchauffée et vapeur saturée

Joint_s métalloplastiques
entre collecteur et éléments surchauffeurs

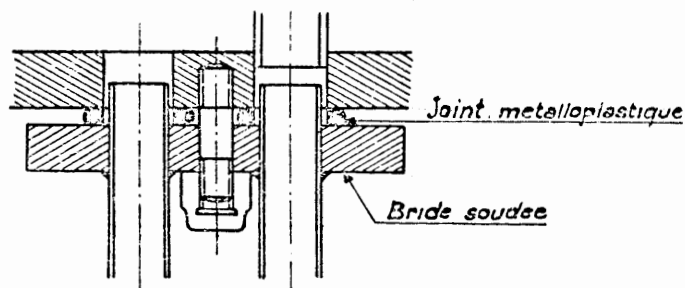


FIGURE 143

Joint_s sphériques
entre collecteur et éléments surchauffeurs

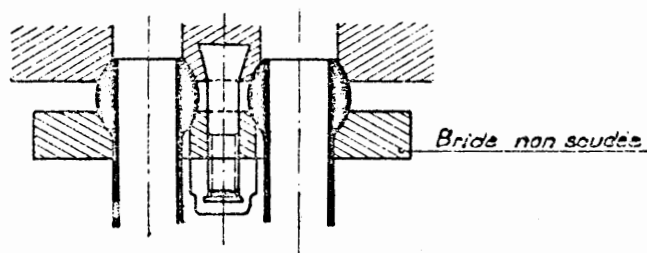


FIGURE 144

élève la température de surchauffe de 10° environ. Elle élimine enfin le risque de court-circuitage de la vapeur par les fissures se développant en service entre les cloisons par suite des tensions.

Nous avons décrit le collecteur spécial comportant le régulateur en aval des éléments surchauffeurs. Il est plus pratique de recourir au collecteur plutôt qu'au dôme pour y placer ce type de régulateur à soupapes multiples qui exige de plus grandes dimensions. On a voulu également éviter un échauffement exagéré des éléments lors de la marche à régulateur fermé; en fait, comme la vapeur est presque stagnante dans ces éléments, elle les refroidit peu.

L'emploi de l'étouffoir placé dans la boîte à fumée et arrêtant le tirage à travers les gros tubes, lorsque le régulateur est fermé, a été reconnu inutile et n'est plus utilisé actuellement.

Les machines 232 TA ont deux collecteurs verticaux l'un à droite, l'autre à gauche; mais chacun des deux a deux chambres : l'une pour la vapeur saturée, l'autre pour la vapeur surchauffée.

Les éléments sont fixés au collecteur soit par brides soudées aux tubes et fixées par goujons au collecteur avec interposition de joints métallo-plastiques (*fig. 143*), soit par brides non soudées et serrant contre le collecteur un renflement des tubes qui forme joint rodé (*fig. 144*), soit par simple sertissage (surchauffeur Robinson).

4^o Différents types de surchauffeurs

Les surchauffeurs diffèrent entre eux par la forme des éléments.

Le surchauffeur le plus répandu sur les locomotives à vapeur est le surchauffeur Schmidt qui a été appliqué dès 1898 en Allemagne, puis a été adopté dans tous les pays depuis 1910.

— Elément surchauffeur "SCHIMDT" —

Section aa

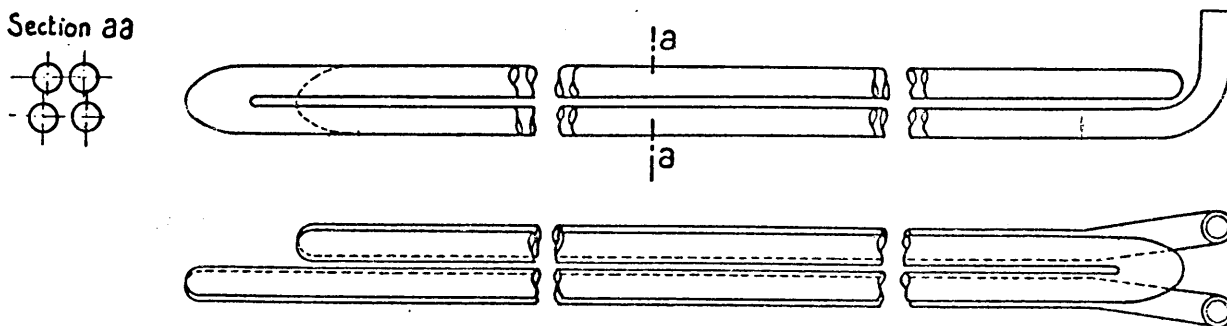


FIGURE 145

D'autres types ont été essayés pour améliorer le rendement de l'appareil; ce sont : le surchauffeur Robinson, le surchauffeur DM (Duchatel et Maistre), le surchauffeur Houlet, le 5 P 4.

La vapeur refroidit assez mal les parois de l'élément surchauffeur parce qu'elle est mauvaise conductrice de la chaleur et que sa surchauffe demande peu de calories, comparative-ment à ce qu'il faut à l'eau pour sa vaporisation. Il en résulte que la température des parois du surchauffeur est voisine de celle des gaz contrairement à la température des parois des tubes voisine de celle de l'eau. On ne peut donc mettre les éléments très près du foyer, car au-delà de 600° la résistance du métal est affaiblie.

On fabrique les éléments en acier étiré. A titre d'essai, des éléments Houlet (décrits ci-après) ont leurs extrémités en une seule pièce en acier au chrome-molybdène.

a) Surchauffeur Schmidt :

Chaque élément est formé par 4 tubes de 27×34 ou de 28×35 , ou 31×38 (*fig. 145*). Ces tubes sont réunis à leurs extrémités par un culot en acier A forgé qui est soudé, de telle sorte que la vapeur fasse deux allers et retours depuis son départ du collecteur jusqu'à son retour.

La « Compagnie des surchauffeurs » ne rapporte pas un culot soudé mais réunit les extrémités des tubes par soudure à la forge et matriçage.

L'extrémité du coude est soumise à l'action du feu, elle est mal refroidie par la vapeur et se ronge facilement; aussi comporte-t-elle une forte surépaisseur.

Le collecteur adjoint au surchauffeur Schmidt est généralement un collecteur cloisonné (fig. 142); le cloisonnement peut ne pas être en fonte, mais en tubes. L'élément est tenu dans le tube à fumée par des colliers et par des talons rapportés par soudure.

b) Surchauffeur Robinson :

Les éléments du surchauffeur Robinson ne diffèrent de ceux du Schmidt que parce que leur boucle est plus courte et parce qu'ils sont sertis dans les orifices du collecteur au lieu d'être fixés par bride.

Elément surchauffeur DM

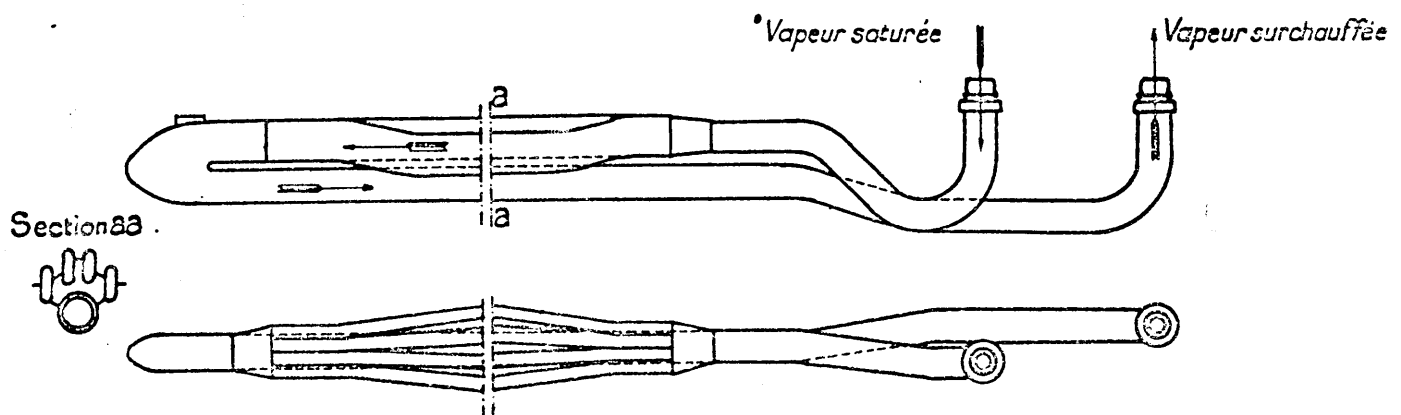


FIG. 146

c) Surchauffeur D M : (Duchatel-Maistre).

La vapeur saturée est divisée entre 3 ou 4 tubes aplatis et se surchauffe puis retourne par un tube unique (fig. 146). La vapeur ne fait donc qu'un seul aller et retour au lieu de deux dans l'élément Schmidt; la chute de pression entre chaudière et boîte à vapeur HP est ainsi plus faible (environ la moitié de celle du surchauffeur Schmidt).

d) Surchauffeur Houlet :

La vapeur pénètre dans un tube annulaire de (92×98) et $(74,5 \times 82,5)$ où elle est surchauffée puis retourne par un tube central de 31×38 qui a la même section que l'anneau. Ce dispositif (fig. 147) est d'un très bon rendement; mais le raccordement à l'extrémité côté foyer entre la partie annulaire et le tuyau de retour est délicat, la soudure qui est portée à une haute température est fragile. On essaye des extrémités rapportées en acier « chromes-caut » (au chrome molybdène) qui résistent bien à de hautes températures.

e) Surchauffeur 5 P 4 :

La vapeur sortant du collecteur est répartie par élément dans 4 tuyaux à ailettes de 19×25 et revient par un tuyau central de 31×38 dont la section est la somme de celles des 4 tuyaux d'aller (fig. 148).

f) Remarques sur les différents types d'éléments :

La vapeur surchauffée étant peu conductrice, il est nécessaire que toutes les particules

Elément surchauffeur "Houlet"

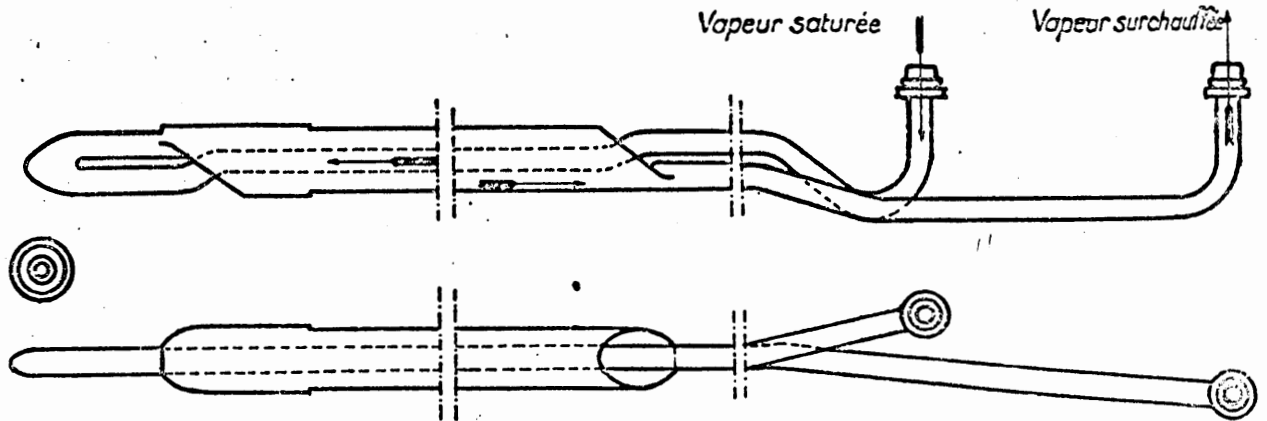


FIG. 147

de vapeur viennent au contact des parois, c'est-à-dire que le rapport $\frac{S_1}{S_2}$ soit élevé. On réalise le mieux cette condition en utilisant des éléments de faible section par rapport à leur périmètre extérieur et en brisant le courant de vapeur pour opérer un brassage. D'où l'utilisation de

— Elément surchauffeur 5 P 4 —

Section aa

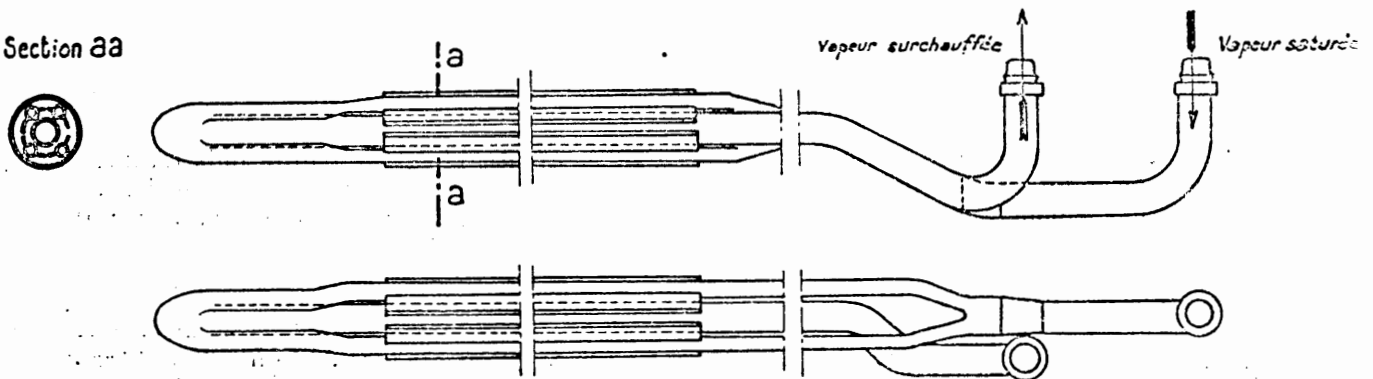


FIGURE 148

tubes aplatis (surchauffeur DM) d'espaces annulaires (surchauffeur Houlet) et de tubes à ailettes (surchauffeur 5 P 4), ce qui permet d'ailleurs d'augmenter en même temps le rapport $\frac{S_1}{S_2}$ égal à 1,21 (Schmidt) - 1,68 (Houlet) et 1,75 (5. P. 4) (ailettes comprises).

Le sens méthodique de circulation de la vapeur et des gaz est celui à courants contraires dans lequel la différence de température est à peu près constante sur tout le parcours; la

surface d'échange est réduite au minimum et on peut abaisser davantage la température des gaz à la sortie. Dans les éléments Schmidt la circulation est mixte (à courants contraires sur trajet aller, courants parallèles sur trajet retour) avec le même rapport $\frac{S_1}{\omega_1}$ pour les 2 trajets.

La valeur de ce rapport est égale à : $\frac{4}{d}$ dans le cas de tubes cylindriques soit 129 pour les tubes de diamètre intérieur 31 mm. Dans les autres éléments la circulation est également mixte mais avec prédominance d'échange de chaleur sur le trajet aller à courants contraires. C'est ainsi que le rapport $\frac{S_1}{\omega_1}$ reste égal à 129 sur le trajet retour comme pour l'élément Schmidt mais qu'il est sur le trajet aller de 210 pour l'élément 5. P 4 et de 420 pour l'élément Houlet.

Dans le même ordre d'idées on remarquera l'utilité des ailettes longitudinales soudées sur chacun des tubes périphériques de l'élément 5. P 4 qui protègent contre le refroidissement par rayonnement de la vapeur circulant au centre de l'élément sur le trajet de retour et favorisent la surchauffe sur le trajet aller.

5° Température de surchauffe

Dès le début de l'emploi de la surchauffe, on a réalisé des températures de 350° sur des machines du type Atlantic ou Ten Wheel. Actuellement, ces valeurs ont été dépassées. Avec le surchauffeur Houlet on obtient facilement de hautes températures de vapeur dépassant 400°. Il n'y a d'ailleurs aucune difficulté à obtenir une haute surchauffe: il suffit par exemple d'augmenter le nombre d'éléments. Des valeurs de 430 à 440° ont été atteintes sur les machines 230 D ou 230 M avec le surchauffeur Schmidt ou le surchauffeur Houlet.

La haute surchauffe crée des difficultés pour le graissage des cylindres; les huiles se décomposent à partir de 400°; déjà pour cette température on doit employer un lubrifiant particulièrement stable. C'est surtout pourquoi on reste limité à une surchauffe à température inférieure à 400°. On doit en même temps employer pour les segments des fontes spéciales capables de conserver leur élasticité et de résister à l'usure.

Avec une surchauffe de 100° la vapeur allant travailler à la B. P. est encore surchauffée de 100° environ et il peut même subsister une légère surchauffe de la vapeur d'échappement.