

CHAPITRE II

PRODUCTION DE LA VAPEUR

1^o Pression absolue, pression relative

L'action exercée par la vapeur sur chaque cm² de la surface intérieure de la tôle de chaudière est la pression absolue de cette vapeur. La différence entre cette pression absolue de la vapeur et la pression atmosphérique est la pression relative.

Rappelons les unités utilisées pour mesurer les pressions :

Dans le système C.G.S. (centimètre, gramme, seconde) l'unité de pression s'appelle barye; c'est la pression produite par une force d'une dyne sur 1 cm². Dans l'industrie on évaluait jusqu'ici les pressions en kilogrammes par cm² ou en colonne d'eau ou parfois en colonne du fluide employé. Pour évaluer la pression en colonne de liquide quelconque, il suffit de diviser la pression évaluée en kilogrammes par le poids du m³ de liquide.

Actuellement on a adopté le système M.T.S. (mètre, tonne, seconde) dans lequel l'unité de pression est la pièze (pz), soit 1 sthène par m². Le sthène (sn) est l'unité de force, force qui, en une seconde, communique à une masse d'une tonne (1.000 kg.) un accroissement de vitesse de 1 m/sec.

$$1 \text{ sthène} = 1 \text{ kg. poids} \times \frac{1000}{9,8} = 102 \text{ kg poids.}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ pièze} &= 1 \text{ stène par m}^2 = 102 \text{ kgp par } 100 \text{ dcm}^2. \\ &= 1,02 \text{ kgp. par dcm}^2. \end{aligned}$$

L'hectopièze vaut 102 kgpoids ou environ 1 quintal poids par dcm², ou encore sensiblement 1 kgp. par cm², valeur très approchée de celle de la pression atmosphérique qui peut à son tour servir d'unité de pression (la pression atmosphérique qui vaut 1,033 kg/cm² vaut également

$$\frac{1,033}{1,02} = 1,012 \text{ hectopièzes}).$$

On appelle timbre d'une chaudière la pression relative limite de la vapeur qu'elle est chargée de produire. Cette pression est limitée par les soupapes de sûreté qui laissent échapper la vapeur dès que cette pression dépasse la valeur admise.

Cette pression limite est indiquée sur une médaille en cuivre fixée par trois goujons rivés à l'arrière de la boîte à feu et poinçonnée par le Service des Mines.

2^o Vaporisation

La vaporisation est la transformation du liquide en vapeur. Cette transformation se fait à la surface du liquide tant que la pression due à la vapeur n'atteint pas une certaine valeur qui dépend de la température du liquide et qui croît lorsque cette température s'élève.

Lorsque la tension de vapeur atteint cette tension correspondant à la température, il se crée un état d'équilibre dans lequel il n'y a plus de formation de vapeur. Cet état d'équilibre est rompu lorsque la température du liquide se modifie; si elle s'élève la vaporisation recommence, de sorte que la tension de vapeur au-dessus du liquide monte à la valeur correspondant à la nouvelle température; si cette température baisse, c'est l'inverse il y a condensation de la vapeur située au-dessus du liquide de sorte que la tension descende à la valeur correspondant à la nouvelle température .

De même, si par un procédé quelconque on peut modifier la tension de vapeur au-dessus du liquide sans changer la température, on provoquera une vaporisation lorsqu'on fait baisser cette tension et une condensation lorsqu'on la fait monter.

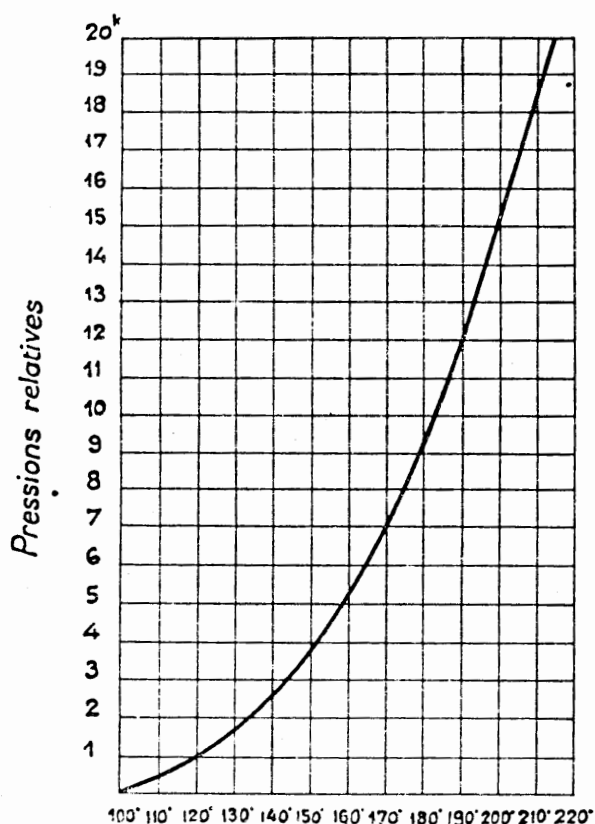


FIG. 1^{ter} Températures

Aux alentours de 100° la correspondance entre la tension de vapeur et la température est donnée par la formule approchée de Duperray :

$$p = \left(\frac{t}{100}\right)^4$$

où p est la pression absolue en kg/cm² et t la température en degrés centigrades.

Pour des valeurs de la pression absolue très différentes de 1 kg. cette relation n'est plus acceptable. Il faut se rapporter à des tables numériques.

Le tableau ci-dessous donne les pressions absolues en kg/cm² correspondant aux températures de la vapeur saturée.

| | | |
|------------|-----------|--------------------|
| 15° | p = 0,017 | kg/cm ² |
| 50° | 0,1275 | |
| 100° | 1 | |
| 150° | 5 | |
| 180° | 10 | |
| 200° | 15 | |
| 210° | 20 | |
| 280° | 65 | |
| 290° | 76 | |
| 300° | p = 87 | kg/cm ² |
| 310° | 100 | |
| 320° | 115 | |
| 330° | 131 | |
| 340° | 149 | |
| 350° | 168 | |
| 360° | 190 | |
| 370° | 214 | |
| 374° | 224,24 | |

Ce tableau a été traduit graphiquement figure 1 ter pour les pressions relatives de 0 à 20 kg/cm².

374° est la température critique de la vapeur d'eau, 224 kg. 24 la pression correspondante; au-dessus de cette température il est impossible d'obtenir sa liquéfaction par compression, la vapeur se rapproche de l'état de gaz parfait (1). Au-dessus de la température et de la pression critiques, la période de vaporisation n'existe plus : l'eau amenée dans la chaudière se vaporise instantanément, elle passe directement à l'état de vapeur surchauffée.

Le volume de vapeur à la température t et à une pression p hpz absolues, fourni par 1 kg. d'eau, est, en litres :

$$V = 4,543 \frac{273 + t}{p}$$

(1) Pour un gaz parfait la transformation d'égale chaleur est également isotherme c'est-à-dire, que le produit de la pression par le volume spécifique divisé par la température absolue est constant.

3° Ébullition

Le phénomène de l'ébullition est celui de la formation de vapeur, non plus à la surface, mais à l'intérieur même de la masse liquide. La vapeur qui se forme ainsi dans la masse s'agglomère en formant des bulles de vapeur qui, plus légères que le liquide, montent à la surface et vont y crever.

La bulle formée dans la masse ne contient que de la vapeur, il faut que la tension de celle-ci équilibre la pression du liquide qui l'entoure, sans cela, la bulle n'existerait pas. La pression du liquide entourant la bulle est égale à la pression de l'atmosphère qui surmonte le liquide augmentée de celle due à la hauteur de liquide existant au-dessus de la bulle jusqu'à la surface libre.

Par conséquent, pour que l'ébullition ait lieu, il faut que la température du liquide soit celle pour laquelle la tension de vapeur est égale à la pression de l'atmosphère qui se trouve au-dessus du liquide.

Par exemple, pour provoquer l'ébullition à l'air libre, il faut que la température soit celle pour laquelle la tension de vapeur est de 1 kg/cm^2 c'est-à-dire 100° . Lorsque l'ébullition a lieu en vase clos, elle se produit à une température correspondant à la pression du milieu qui est au-dessus du liquide et la relation entre la température d'ébullition et la pression des gaz situés dans le vase clos est donnée par la formule indiquée ci-dessus.

4° Vapeur saturante, vapeur surchauffée

La vapeur qui est au contact de son liquide est, comme nous venons de le voir, à une pression bien déterminée par sa température; une légère augmentation de cette pression entraîne immédiatement de la condensation jusqu'à ce que l'équilibre soit de nouveau retrouvé. De même, une légère baisse de température, si légère soit-elle, entraîne aussi de la condensation. Une vapeur qui est dans un tel état est dite vapeur saturante. Elle se trouve dans des conditions de pression et de température qui sont justes à la limite entre liquide et vapeur.

Une vapeur est dite humide lorsqu'elle contient des gouttelettes de liquide. On désigne sous le nom de titre de vapeur humide la proportion de vapeur sèche qu'elle contient.

Une vapeur saturée sèche est au titre 1.

Lorsqu'on diminue la pression de la vapeur sans changer sa température ou lorsqu'on élève sa température sans changer sa pression, ou bien encore lorsqu'on lui fait subir à la fois une élévation de température et une diminution de pression, on obtient de la vapeur surchauffée. Cette vapeur n'est plus dans un état limite entre liquide et vapeur; elle peut subir des compressions et des refroidissements sans se condenser, à condition toutefois que ces compressions ou refroidissements ne soient pas d'une ampleur suffisante pour ramener cette vapeur à l'état de vapeur saturante.

5° Chaleur latente et chaleur totale de vaporisation

Nous devons distinguer trois phases d'évolution du fluide :

1° La période d'échauffement du liquide jusqu'à l'origine de la vaporisation. Avec une approximation suffisante la chaleur d'échauffement de 1 kg. d'eau prise à 0° est égale, d'après Regnault à :

$$q = 1,013 t$$

(t degrés centigrades).

(q calories kg).

2° La période de vaporisation ou d'ébullition.

On appelle chaleur latente de vaporisation à la température t la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kg. d'eau pris à cette température t pour le transformer en 1 kg. de vapeur à la même température.

Elle est égale avec une bonne approximation à :

$$q' = 606,5 - 0,695 t$$

On appelle chaleur totale de vaporisation la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kg. d'eau pris à 0° pour la transformer en 1 kg. de vapeur à t°. Elle est donc égale à :

$$\lambda = q + q' \text{ soit approximativement (si } q = t)$$

$$\lambda = 606,5 + 0,305 t$$

Pour transformer 1 kg. d'eau à 0° en 1 kg. de vapeur au titre x la chaleur totale de vaporisation ne sera donc que :

$$\lambda = 1,013 t + (606,5 - 0,695 t) x$$

3° La période de surchauffe. La chaleur nécessaire est égale à :

$$q'' = C (t' - t)$$

où t' est la température de surchauffe et C la chaleur spécifique qui dépend de la pression et de la température mais dont la valeur moyenne s'étend de 0,5 à 0,6.

6° Surface de chauffe

On appelle ainsi la surface des parois de la chaudière qui sont au contact des flammes et des fumées. C'est elle qui conditionne la production de vapeur.

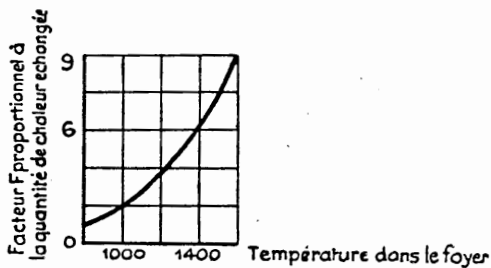


FIG. 1 quater A

Les parois du foyer constituent la surface de chauffe directe Sd. Les tubes constituent la surface de chauffe indirecte Si. Bien que Sd soit 10 à 15 fois plus faible que Si, Sd absorbe de 60 à 40 % de la chaleur totale absorbée en passant de faible à forte allure de combustion, soit la moitié environ pour un taux moyen de vaporisation (40 kg/m²/h). Cette absorption de chaleur de Sd se fait surtout par « rayonnement ». Or, la température Ta du combustible en ignition a une influence considérable sur la quantité de chaleur rayonnée. On voit par

exemple (fig. 1 quater) que cette dernière pour Ta = 1400° est triple de celle pour Ta = 1000° (remarquons ici que la pression de la vapeur dans la chaudière ou sa température sont pratiquement sans influence sur la quantité de chaleur rayonnée et absorbée par Sd). On s'explique donc la souplesse de la chaudière locomotive puisque du simple fait de l'élévation de Ta en fonction de l'allure, Sd est capable d'absorber presque intégralement le surcroît de production de chaleur résultant de la variation de l'allure.

La chaleur rayonnée absorbée par Sd passe facilement par « conductibilité » à travers le métal de la paroi, entre les deux faces de laquelle la différence de température n'est que de 5° environ (parois non entartrées) puis par « convection » dans l'eau de la chaudière.

La quantité de chaleur dégagée par le foyer et qui a échappé à la transmission par rayonnement à Sd est incorporée aux gaz de combustion qui la véhiculeront à travers Si. L'absorption de chaleur par Si est surtout importante dans les 4 à 5 premiers mètres du faisceau, ce que confirme l'abaissement particulièrement rapide de la température des gaz au début de leur trajet (fig. 77 bis).

La valeur du coefficient de transmission de la chaleur par convection varie proportionnellement à la vitesse V des gaz, assurant ainsi un rendement sensiblement constant de la transmission calorifique.

La figure 1 quater B représente la variation des températures approximatives des gaz. Ta près du combustible, Tb à l'entrée du faisceau tubulaire et Tc à la sortie, en fonction du taux de combustion. La faible variation de Tc montre de suite l'excellente faculté d'absorption calorifique de la surface de chauffe totale S pour toutes les allures de combustion.

Soit un foyer brûlant 0 kg. 35 de charbon par seconde. Si le pouvoir calorifique de ce charbon est de 8000 cal., il est produit (combustion complète) $8000 \times 0,35 = 2800$ calories. Si le poids d'air entrant par seconde au foyer est de 4 kg. 10 et la chaleur spécifique des gaz à pression constante 0,34, la quantité de chaleur entrant dans le faisceau tubulaire sera pour $Tb = 1200^\circ$

$Qb = (0,35 + 4,10) 0,34 \times 1200 = 1812$ calories
celle absorbée par Si pour $Tc = 300^\circ$:

$Qc = (0,35 + 4,10) 0,34 (1200 - 300) = 1359$ calories
et celle absorbée par Sd :

$$Qa = 2800 - 1812 = 988 \text{ calories.}$$

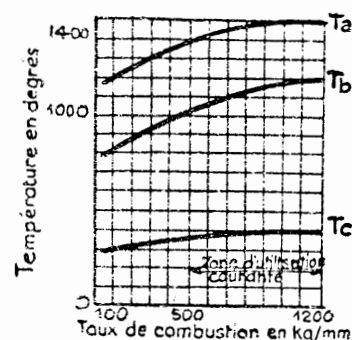


FIG. 1 quater B

Pour un taux de combustion double, on aura $Tb = 1300^\circ$ et $Tc = 305^\circ$. Dans l'hypothèse d'un même rendement de la combustion on aura :

$$Qc = (0,35 + 4,10) 2 \times 0,34 (1300 - 305) = 3005 \text{ calories}$$

$$Qa = 2800 \times 2 - (0,35 + 4,10) 2 \times 0,34 \times 1300 = 1675 \text{ calories.}$$

Le partage entre les quantités de chaleur transmises par rayonnement à Sd et par convection à Si s'est fait dans les deux rapports :

$$\frac{Qa}{Qc} = \frac{988}{1359} = 0,73 \text{ et } \frac{1675}{3005} = 0,55$$

Du fait des excellentes facultés d'absorption de chaque surface de chauffe, ce partage se fait toujours facilement. Il varie avec le rapport $\frac{Sd}{Si}$ qui varie pratiquement lui-même entre de grandes limites ($Si = 10$ à $15 Sd$) et avec le taux de combustion.

Le rendement d'une chaudière dépend assez peu, à partir d'une certaine valeur, de l'étendue S de la surface de chauffe et du rapport $\frac{S}{G}$ de cette surface à celle de la grille. Ce rapport qui était environ de 100 sur les premières locomotives est maintenant de 40 à 50 sur les locomotives puissantes actuelles.

Par contre, on constate que Sd absorbe par unité de surface environ 15 à 20 fois plus de chaleur que Si. D'autre part, la fatigue correlative du foyer (tenue des entretoises, etc.) augmente avec Ta suivant le taux de combustion. Pour ne pas éprouver de trop grandes difficultés de tenue des parois il faut donc, pour les chaudières poussées, faire le rapport $\frac{Sd}{G}$ le plus élevé possible qui permet de réduire Ta. Ce rapport qui est de 5 sur les anciennes machines, est de 4 sur les machines récentes d'origine Ouest (231-500, 141-000) et de 6 sur les machines d'origine Est (241-000, 150-000). A ce point de vue, les foyers longs encastrés sont plus avantageux que les foyers débordants.

Le tableau ci-dessous donne quelques surfaces de chauffe directe et indirecte et surfaces de surchauffe des locomotives de la Région.

| SÉRIES de locomotives | SURFACE DE CHAUFFE | | | SURFACE de surchauffe |
|-------------------------------|--------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| | du foyer | des tubes | totale | |
| | mètres carrés | mètres carrés | mètres carrés | mètres carrés |
| 030 - C | 8,10 | 146,33 | 154,43 | |
| 131 - TA | 12,56 | 166,74 | 179,30 | |
| 141 - TD | 17,30 | 122,33 | 138,63 | 35,98 |
| 220 - B | 12,05 | 153,60 | 165,65 | |
| 221 - A | 16,17 | 223,23 | 239,40 | |
| 230 - F | 13,50 | 146 | 159,50 | 37,50 |
| 230 - G | 16,17 | 223,23 | 239,50 | |
| 231 - C-D-E-F-G-H-J | 16,37 | 195,60 | 211,97 | 63,50 |
| 241 - A | 26,20 (1) | 197 | 223,20 | 94,20 |
| 140 - B | 16,81 | 156,16 | 172,97 | 39 |
| 141 - B-C-D | 15,10 | 192,25 | 207,35 | 64 |
| 150 - A | 20,38 (1) | 182,98 | 203,36 | 81,14 |
| 141 - P | 15,66 | 183,14 | 198,80 | 87,10 |
| 141 - R | 27,22 (1) | 223,43 | 250,65 | 65,40 |

(1) Y compris la surface de la chambre de combustion et celle des siphons Nicholson.

7° Surchauffe

Nous verrons l'utilité de l'emploi de vapeur surchauffée au chapitre VIII. Pendant longtemps, on s'est tenu aux environs de 300°. Actuellement, on atteint 400°.

La température de surchauffe, pour un surchauffeur donné et pour un même rapport entre les surfaces de chauffe directe et indirecte, dépend essentiellement du rapport des sections de passage des gaz à travers les tubes à surchauffe et à travers les autres tubes de chaudière. Pour relever le degré de surchauffe d'une machine, il faut augmenter le nombre de tubes de surchauffe.

Un autre facteur intéressant à considérer est le rapport :

$$\frac{S_g}{S}$$

dans lequel :

S_g est la surface de surchauffe et S la surface de chauffe.

Le rapport est passé de 0,20 sur les premières machines à surchauffe à 0,40 sur les machines à haute surchauffe actuelles; il n'est d'ailleurs pas le facteur déterminant essentiel du degré de surchauffe.

8° Détermination des surfaces de chauffe

Nous avons vu que la surface de grille a été déterminée en se basant sur la production de vapeur que l'on veut obtenir.

La surface de chauffe ne peut pas s'établir directement par le calcul. Pratiquement, on se base sur la production moyenne horaire d'un m² de surface de chauffe. Cette production moyenne dépend bien entendu du tirage, du type de chaudière et de l'étendue relative des trois surfaces de chauffe directe, indirecte et surchauffe.

Pour une locomotive, on peut adopter : 60 à 75 kg/m²/h. On enregistre parfois en marche des pointes de 80 et même 100 kg/m²/h.

9° Réservoir d'eau et de vapeur

Dans une chaudière, l'eau occupe une partie du volume et la vapeur le reste. Le premier volume est le réservoir d'eau, le deuxième est le réservoir de vapeur. Une chaudière à grand volume d'eau possède une grande réserve de chaleur et les variations dans l'activité du foyer ou dans les dépenses de vapeur influent moins sur la pression que si le réservoir d'eau est petit. Les chaudières de locomotive ont leur volume limité par le gabarit et le poids. Le volume d'eau des chaudières de machines puissantes est de 9 à 10 m³ et celui de vapeur de 3 à 4 m³ pour une production horaire de 20.000 kg. de vapeur.

Quand on met une chaudière en pression, l'eau et la chaudière augmentent de volume. on constate que le niveau de l'eau s'élève dans la chaudière. Suivant les types de machines, cette élévation est de 5 à 8 cm., elle est donc importante et il y a lieu d'en tenir compte à l'allumage de la chaudière et au moment où l'on jette le feu.

Les volumes relatifs de l'eau à différentes températures sont :

| | | | |
|------------|-------|------------|-------|
| 4° | 1 | 250° | 1,259 |
| 100° | 1,04 | 300° | 1,42 |
| 150° | 1,09 | 320° | 1,51 |
| 200° | 1,159 | | |

10° Circulation de l'eau

Il y a intérêt à créer un brassage de la masse d'eau pour y favoriser la propagation de la chaleur et par suite, une bonne vaporisation. Ce phénomène constitué par les courants de circulation de l'eau consécutifs à son échauffement au contact de la paroi chaude s'appelle la « convection ». Si la chaleur ne se propage pas, elle sert à élever d'une façon excessive la température locale en des points déterminés où la vapeur se surchauffe, tandis qu'à côté, l'eau ne se vaporise pas; la production est ainsi très mauvaise.

De même, pour éviter une surélévation excessive de la température des parois en contact avec le feu ou les gaz chauds, il faut qu'il y ait circulation d'eau le long de ces parois. Sans cela, un trop grand échauffement des parois diminue leur résistance, provoque des dilatations réparties de façon hétérogène qui créent des tensions excessives, disloquent les joints et provoquent des fissures et des fuites (1).

Si les parois sont entartées leur conductibilité devient beaucoup plus faible, car le coefficient de conductibilité du dépôt calcaire est près de 50 fois moindre que celui du cuivre. Si le dégagement de vapeur se fait difficilement (lames d'eau obstruées) la transmission de chaleur se fait aussi très mal de la tôle à la vapeur.

Divers systèmes sont employés pour activer la circulation de l'eau; ce sont les tubes supports de voûte et le siphon Nicholson.

(1) Voir article de M. G. Bont (numéros novembre-décembre 1940 de la Revue Générale des Chemins de fer) sur la mesure des températures des foyers en cuivre et en acier.

Locomotive compound de la
Compagnie du Nord.

Vue d'arrière.

