

L'Importance des Phénomènes Capillaires

DANS LES

Chaudières à Vapeur

PAR

Jos. JADOUL

Ingénieur des Arts et Manufactures et des Mines, Constructeur
Professeur à l'Ecole Technique de Liège

Equation du courant thermique. — L'analogie entre les phénomènes thermiques et les phénomènes électriques est frappante, surtout pour quiconque y regarde d'un peu près.

Par exemple, la transmission de la chaleur à travers une paroi est un courant analogue au courant électrique.

L'intensité du courant de chaleur qui a lieu au travers de cette paroi est, en effet, proportionnelle à la différence de potentiel thermique entre la source de chaleur et l'endroit récepteur; le potentiel thermique n'est autre chose que la température; cette intensité est, en outre, inversement proportionnelle à la résistance thermique opposée par la paroi à ce courant.

Si Θ est la température de la source de chaleur, si t est la température du récepteur, si K est la résistance thermique de la paroi par unité de surface, si nous considérons un élément ds de cette surface, si enfin dq est la quantité de chaleur qui traverse cet élément de surface en une seconde on peut écrire :

$$dq = \frac{\Theta - t}{K} ds (1).$$

Cette équation est l'expression mathématique de la loi que nous venons d'énoncer.

Nous n'allons envisager, dans la suite, que la résistance thermique.

Résistance thermique. — La quantité de chaleur qui passera par seconde à travers une paroi métallique, sera donc d'autant plus élevée que la résistance thermique sera plus petite.

Appliquons l'équation (1) à une chaudière à vapeur.

Illustrons aussi simplement que possible le phénomène thermique

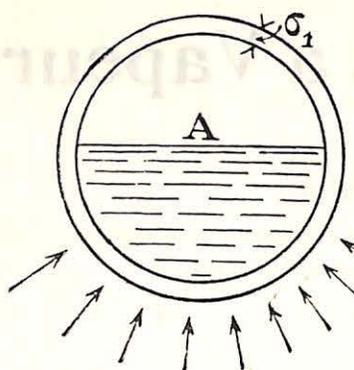


FIG. 1

de la chaudière en supposant (fig. 1) l'eau contenue dans un cylindre A d'épaisseur σ_1 et recevant la chaleur de l'extérieur, soit directement d'un foyer, soit de gaz chauds.

Le courant a le sens marqué par les flèches et traverse normalement l'épaisseur σ_1 de la tôle, qui présente, par unité de surface, une résistance thermique K_1 .

Le courant thermique ayant atteint l'autre face de la paroi, c'est-à-dire, la face interne, atteint, par le fait même, la première couche liquide.

Attraction capillaire. — Si nous considérons, dans cette première couche liquide en contact avec la face interne de la paroi métallique, une masse élémentaire touchant l'élément ds (fig. 2) de la surface

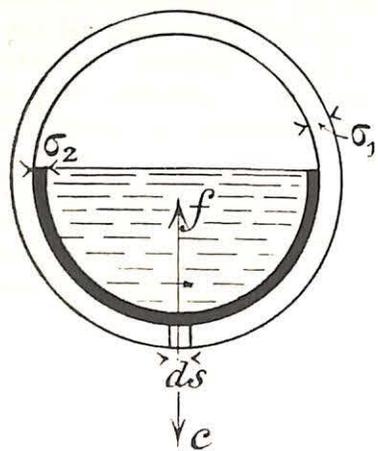


FIG. 2.

de l'attraction capillaire de la paroi.

métallique, cette masse élémentaire ayant absorbé de la chaleur va perdre de la densité et, grâce à sa fluidité, tendre à se détacher de la paroi et des masses adjacentes et à s'élever à travers la masse liquide jusqu'à une position nouvelle d'équilibre.

En d'autres termes, la masse élémentaire que nous considérons va subir l'action d'une poussée f qui lui donnera un mouvement ascensionnel.

Mais à l'action de cette poussée s'oppose une réaction c directement opposée, provenant

On sait, en effet, que la paroi métallique exerce sur les couches liquides les plus voisines une attraction dont l'intensité décroît à mesure que ces couches s'éloignent de la paroi.

L'intensité de cette attraction c est donc variable; elle reste plus grande que f depuis la face interne de la paroi, jusqu'à une certaine distance de cette paroi; c'est-à-dire pour une certaine épaisseur σ_2 du liquide comptée normalement à partir de la face interne de la paroi.

Ceci étant, considérons deux périodes : 1° avant l'ébullition; 2° pendant l'ébullition.

1° Avant l'ébullition.

Il existe donc une couche liquide d'une certaine épaisseur σ_2 , que nous appellerons *couche capillaire*, que la poussée f ne parvient pas à détacher de la tôle.

Et la masse élémentaire, qui prendra un mouvement ascensionnel sous l'action de la résultante $R = f - c > 0$, par le fait d'avoir absorbé de la chaleur et d'être suffisamment éloignée de la paroi interne, sera une masse élémentaire qui devra se trouver au-delà de la couche capillaire.

Le courant thermique aura donc à traverser, non seulement la paroi métallique de résistance K_1 , mais encore la couche capillaire dont nous désignerons la résistance par K_2 , en sorte que nous aurons :

$$dq = \frac{\Theta - t}{K_1 + K_2} ds. (2)$$

Mouvements de convection. — Tandis que cette masse élémentaire qui se trouve au-delà de la couche capillaire s'élèvera dans la masse d'eau de la chaudière, une masse voisine descendra et viendra prendre sa place.

Nous pouvons ainsi imaginer une quantité plus ou moins grande de ces masses élémentaires, au-delà de la couche capillaire, ayant absorbé de la chaleur et prenant un mouvement ascendant, en même temps que d'autres plus froides des régions supérieures descendent pour venir reprendre la place abandonnée par les premières atteintes par le courant thermique.

Finalement, il se produira dans le sein de la masse de l'eau de la chaudière, des courants giratoires normaux à la surface latérale du cylindre, semblables à ceux que nous représentons à la fig. 3.

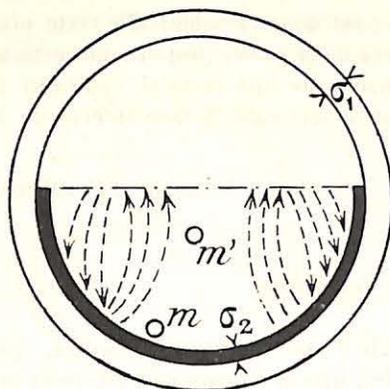


FIG. 3.

Ces courants qui ont lieu au delà de la couche capillaire sont comme on le sait, les courants de convection.

Transmission de la chaleur à la masse d'eau par les courants de convection. — C'est grâce à ces courants de convection que la chaleur transmise de la source thermique à la face interne de la couche capillaire est à son tour com-

muniée à toute l'eau de la chaudière.

Il ne faut pas, en effet, compter sur la conductibilité de l'eau, conductibilité qui est voisine de zéro, pour transmettre la chaleur des molécules m , par exemple, à d'autres molécules m' trop distantes de m .

Nous n'avons donc à considérer le courant thermique que de l'extérieur à l'intérieur de la paroi de la chaudière et jusqu'au-delà de la couche capillaire, c'est-à-dire jusqu'à la couche liquide immédiatement au contact de la couche capillaire; à partir de là, les courants de convection se chargent de distribuer la chaleur reçue à travers toute la masse d'eau.

Capacité thermique. — Mais en outre, comme en électricité, intervient un phénomène de capacité dont nous n'avons pas tenu compte jusqu'ici, c'est-à-dire qu'en même temps que la différence de température $\Theta - t$ crée un courant thermique, la paroi métallique et la paroi liquide de la couche capillaire absorbent et retiennent une certaine quantité de chaleur proportionnelle à leur capacité thermique.

Cette capacité thermique est insignifiante en ce qui concerne les métaux et par conséquent la paroi métallique.

Tandis qu'au contraire elle est considérable pour l'eau, mais la quantité de chaleur ainsi absorbée par la couche capillaire est aussi proportionnelle à son poids; or l'épaisseur de cette couche capillaire

est extrêmement mince et son poids est donc peu important en comparaison avec le poids d'eau de la chaudière; c'est pourquoi on peut aussi, sans grande erreur, négliger cette perte de chaleur par capacité, dans l'équation du courant thermique.

Résistance thermique de la couche capillaire. — Le courant thermique a donc à traverser nécessairement l'épaisseur σ_1 du métal et ensuite l'épaisseur σ_2 de la couche capillaire (fig. 3).

La résistance opposée à ce courant par la paroi métallique est faible par rapport à la résistance de la couche capillaire.

C'est d'ailleurs ce qui se conçoit « a priori » si l'on considère que cette résistance varie en raison directe de l'épaisseur et en raison inverse du coefficient de conductibilité.

Si l'épaisseur de la couche capillaire est extrêmement petite par rapport à l'épaisseur de la tôle de la chaudière, le coefficient de conductibilité de la tôle est très élevé tandis que celui de l'eau est presque nul.

Le principal inconvénient qui résulte de la résistance totale $(K_1 + K_2)$ au passage du courant thermique dans les chaudières est que, notamment, pour obtenir l'épuisement calorifique aussi complet que possible des produits gazeux de la combustion, il faut, du foyer à la cheminée, une surface métallique d'autant plus développée, une surface de chauffe d'autant plus grande, que cette résistance est plus élevée.

En effet, si nous reprenons l'équation (2), sachant que la quantité de chaleur dq cédée par les gaz à l'eau de la chaudière au travers de l'élément de surface ds des parois σ_1 et σ_2 est égale à $pcd\Theta$, p étant le poids du gaz qui passe par seconde au contact de l'élément ds , c étant le calorifique spécifique des gaz chauds à pression constante, on a :

$$S = (K_1 + K_2) \times p \times c \times \int \frac{d\Theta}{\Theta - t} \quad (3)$$

C'est ainsi qu'on arrive à des rapports de la surface de chauffe S à la surface de grille G oscillant autour de 40, atteignant même parfois 50, dans des chaudières dont le rendement thermique se tient aux environs de 70 %.

Observons encore que, dans une chaudière, 1/10 à peine de la surface de chauffe est soumise au rayonnement direct du foyer et que

les neuf autres dixièmes servent à l'utilisation progressive de la chaleur contenue dans les gaz brûlés.

On comprend dès lors que si on parvenait à réduire cette résistance K_2 , on pourrait, par suite, réduire la surface de chauffe des générateurs de vapeur, c'est-à-dire que ceux-ci ne devraient plus comporter autant de surface de chauffe pour une même surface de grille, pour une même puissance de vaporisation; bref, on réaliserait une économie qui pourrait être appréciable sur le coût et sur le poids de la chaudière.

Circulation. — On arrive à réduire K_2 en procurant artificiellement à l'eau une certaine force vive qui puisse vaincre l'attraction capillaire au moins partiellement; en d'autres termes, en provoquant la circulation artificielle de l'eau dans la chaudière.

« Artificielle », disons-nous, pour la distinguer des courants de convection qui constituent, eux aussi, une circulation — mais circulation naturelle — acquise par l'eau; comme nous l'avons vu plus haut, ces courants de convection n'agissent aucunement sur la couche capillaire, ils ont lieu en dehors d'elle, au-dessus d'elle.

Or, nous avons précisément des chaudières sans circulation, telles sont les chaudières à gros volume d'eau, les chaudières à foyer intérieur, par exemple, et des chaudières dites à circulation: chaudières multitubulaires à tubes d'eau.

Disons tout de suite que la circulation dans ces dernières chaudières n'est pas aussi active qu'on a voulu le prétendre et n'a pas lieu également dans toutes les parties de la chaudière; néanmoins, une certaine circulation y existe et elle est de nature à amoindrir la résistance K_2 .

Il paraît, dès lors, logique de demander aux faits la confirmation de notre théorie: en passant des chaudières à foyers intérieurs dans lesquelles n'existe aucune circulation artificielle, aux chaudières multitubulaires à tubes d'eau du genre Babcock et Wilcox, par exemple, qui sont, elles, des chaudières à circulation, le rapport $\frac{S}{G}$ critérium de notre thèse, a-t-il été réduit?

Précisément, à l'encontre de notre thèse, dans l'un et l'autre système de chaudières, ce rapport est sensiblement le même et d'environ 35 à 40 pour un même rendement.

C'est que, en premier lieu, dans la chaudière à foyers intérieurs, l'eau de la chaudière absorbe presque à elle seule la chaleur rayon-

nante du foyer, tandis que dans la chaudière multitubulaire à tubes d'eau, la chaleur rayonnante de la chambre de combustion est absorbée en très grande partie par les maçonneries réfractaires des parois latérales du foyer, dont le pouvoir absorbant est notablement moindre que celui de l'eau, et dont la résistance thermique est considérable.

En supposant qu'on emploie pour les deux chaudières une même qualité de combustible appropriée aux foyers intérieurs des chaudières du premier type, si l'on tient compte que c'est dans la région du foyer que la dépression de la chaudière est la moindre, et que, par conséquent, les rentrées d'air dans les chaudières à tubes d'eau sont les moins à craindre, pourvu toutefois que les maçonneries soient soigneusement exécutées, il s'en suit que les gaz sortent logiquement des foyers de la chaudière à foyers intérieurs à une température moindre que du foyer des chaudières multitubulaires, et qu'il restera une plus grande quantité de chaleur des gaz brûlés à utiliser dans les chaudières à tubes d'eau que dans les chaudières à foyers intérieurs.

En second lieu, l'utilisation de la surface de chauffe n'est ni méthodique ni complète dans les chaudières à tubes d'eau: non méthodique, parce que les gaz ont une trajectoire normale aux sur-

faces de chauffe et que leur contact avec celles-ci est intermittent; non complète, parce que dans leurs trajectoire, les gaz ne lèchent pas la totalité de la surface latérale des tubes; en effet, il suffit de s'en rapporter aux figures 4 et 5 ci-contre pour se rendre compte qu'une partie de la surface latérale des tubes, correspondant aux arcs $a b$ et $a' b'$ n'est pas touchée par la veine gazeuse ascendante (fig. 4) ou descendante (fig. 5). On a estimé que $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{3}$ de

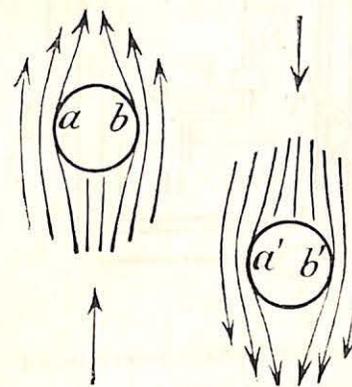


FIG. 5

la surface de chauffe tubulaire échappe ainsi au contact des gaz.

Enfin, les rentrées d'air et le rayonnement extérieur sont plus importants dans les chaudières à tubes d'eau que dans les chaudières à foyers intérieurs.

Pour toutes ces raisons, nous n'avons pu dégager explicitement du

fait industriel l'importance de la résistance thermique de la couche capillaire.

Il est cependant à remarquer, à l'appui de notre thèse, qu'il faut, dans une chaudière à foyer intérieur autant de surface de chauffe que dans la multitubulaire à tubes d'eau pour épuiser moins de chaleur contenue dans les gaz brûlés sortant du foyer.

A défaut de l'expérience industrielle, nous possédons cependant des résultats d'expériences faites par le savant danois Hagemann.

Ces expériences ont mis incontestablement en évidence l'efficacité de la circulation artificielle de l'eau. Je vais en décrire sommairement l'appareillage et la marche (fig. 6).

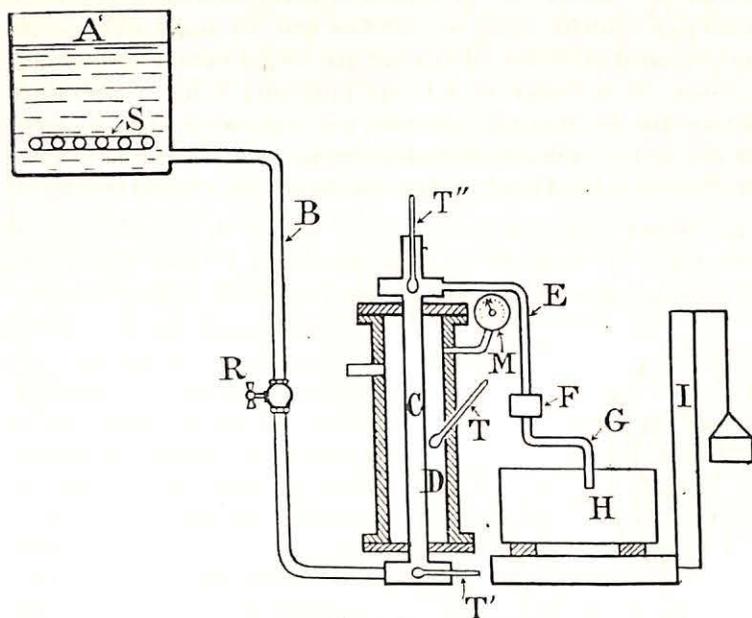


FIG. 6.

Un réservoir A contient de l'eau; dans le fond de ce réservoir, est un serpentín S dans lequel peut circuler de la vapeur d'eau pour chauffer plus ou moins l'eau du réservoir A.

Un tuyau B conduit cette eau dans un tube C fixé concentriquement à un cylindre D en fonte rempli de vapeur d'eau; ce cylindre reste, pendant l'opération, en communication permanente avec un générateur de vapeur, cette vapeur, destinée à échauffer l'eau du tube C est à la pression atmosphérique; la température régnant autour du tube C est donc invariable et égale à 100°.

Du tube C, l'eau s'écoule, par les tuyaux E et G, dans la cuve H placée sur le plateau de la balance I; la tubulure G peut tourner dans le manchon F.

On mesure le temps de l'expérience et le poids d'eau qui, pendant ce temps, est tombé dans la cuve H.

On a enregistré la température t_1 de l'eau à l'entrée du tube C, au moyen du thermomètre T', la température t_2 de cette eau à la sortie du tube C à l'aide du thermomètre T''. La température Θ de la vapeur est constamment contrôlée grâce au thermomètre T et au manomètre M.

On manœuvre le robinet R pour faire varier la vitesse de circulation de l'eau dans le tube C.

Hagemann a enregistré les chiffres suivants dans onze expériences :

Nos de l'expé- rience	Tempé- rature de la vapeur Θ	Températures		Poids d'eau ayant passé dans le tube C et pesé Kgs.	Durée de l'expérience minutes	Vitesse de l'eau dans le tube C m.
		t_1	t_2			
1	100°	26° ,1	70° ,6	11,5	5	} 0,092
2	id.	25° ,8	70° ,7	11,5	5	
3	id.	32° ,2	63° ,7	17,7	5	
4	id.	32° ,2	63° ,4	17,5	5	} 0,140
5	id.	37°	58° ,8	35,2	5	
6	id.	36° ,8	58° ,7	32,8	5	} 0,272
7	id.	41° ,3	56°	40,2	2	
8	id.	41° ,2	56°	39,4	2	} 0,792
9	id.	41° ,3	52° ,9	46	1,30	
10	id.	42° ,8	51° ,4	43,4	1	1,703
11	id.	41° ,2	50° ,5	51,5	1,10	1,726

Voilà des données dont on n'a pas assez apprécié la portée pratique.

On n'en a pas jusqu'ici, à mon avis, tiré les véritables déductions, à savoir : l'importance de la réduction de la résistance thermique en même temps que croissait la circulation de l'eau soumise à l'action de la chaleur.

C'est ce que nous allons tâcher de faire.

Auparavant, tousefois, il importe de ne pas perdre de vue ce qui suit :

En premier lieu, il faut observer que pour tirer la valeur de K de l'équation thermique, il faut que la température extérieure Θ soit constante sur toute l'étendue de la face extérieure de la surface de chauffe et durant toute l'expérience, de telle façon que le courant thermique ait lieu uniquement d'une face à l'autre du tube C .

En effet, si par exemple, la source de chaleur marquait une température Θ_1 à la partie inférieure du cylindre D , plus grande que Θ_2 , température qui serait relevée à la partie supérieure de D , par suite de cette différence de potentiel $\Theta_1 - \Theta_2$, il y aurait un courant de chaleur du bas en haut du tube C , et une fraction seulement du courant thermique traverserait la paroi, fraction qu'il serait impossible de chiffrer ; par suite, nous ne pourrions tirer de l'expérience la véritable mesure de la variation de K . Disons immédiatement que dans les chaudières à vapeur, la température Θ varie d'un point à l'autre de la surface de chauffe.

En second lieu, pour les raisons que nous avons énoncées plus haut, la capacité thermique est ici négligeable ; nous n'en tenons donc pas compte.

Nous pouvons par conséquent admettre sans erreur appréciable que la transmission thermique s'est faite normalement de la face extérieure de la paroi du tube c jusqu'à la face intérieure du cylindre que constitue la couche capillaire le long de ce même tube c ; par suite, que toute la chaleur traversant les deux épaisseurs τ_1 et τ_2 est absorbée entièrement par l'eau qui s'écoule du tube C dans la cuve H .

Considérons donc un élément ds de la surface latérale de ce tube C et écrivons de nouveau l'équation du courant thermique :

$$dq = \frac{\Theta - t}{K} ds$$

Ici, dq est la quantité de chaleur absorbée par le poids a d'eau qui passe par seconde dans le tube C au contact de l'élément ds , c'est $a dt$; K est la résistance totale $K_1 + K_2$.

En introduisant ces valeurs dans l'équation précédente, en faisant les transpositions voulues et intégrant nous obtenons :

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{\Theta - t} = \int_0^s \frac{ds}{a(K_1 + K_2)}$$

Θ étant constante et égale à 100° , on obtient :

$$\text{Log. népérien } \frac{100^\circ - t_1}{100^\circ - t_2} = \frac{S}{a(K_1 + K_2)}$$

ou enfin,

$$(K_1 + K_2) = \frac{S}{a} : \text{log. nép. } \frac{100 - t_1}{100 - t_2} \quad (4)$$

Appliquons cette équation (4) aux chiffres de l'une ou de l'autre des expériences de Hagemann.

Le tube C qui a servi à ces expériences mesurait 45 m/m de diamètre extérieur et 941 m/m de hauteur entre les fonds du cylindre D . La surface de chauffe de ce tube était donc de $0^{\text{m}^2}133$.

Ces chiffres et ceux que nous extrairons du tableau des expériences vont nous permettre de déterminer $K_1 + K_2$ dans chacune de ces expériences, c'est-à-dire pour chacune des vitesses de circulation de l'eau dans le tube C enregistrées par l'expérimentateur.

Nous ne considérerons que les trois expériences extrêmes : n^{os} 1, 2 et n^o 11.

Expériences n^{os} 1 et 2 :

$$t_1 = \frac{26^\circ,1 + 25^\circ,8}{2} = 25^\circ,95$$

$$t_2 = \frac{70^\circ,6 + 70^\circ,7}{2} = 70^\circ,65$$

$$a = \frac{11,5}{5 \times 60}$$

D'où l'on a :

$$K_1 + K_2 = \frac{0,133 \times 5 \times 60}{11,5} : \text{log. nép. } \frac{74,05}{29,35} = 3,7$$

Expérience n° 11.

$$t_1 = 41^{\circ},2; t_2 = 50^{\circ},5$$

$$a = \frac{51,5}{70}$$

D'où :

$$K_1 + K_2 = \frac{0,133 \times 70}{5,5} : \log. \text{ nep. } \frac{58,8}{49,5} = 1,05$$

En d'autres termes, là où la vitesse de circulation de l'eau dans le tube chauffé est de 0^m,092 par seconde, c'est-à-dire *presque nulle*, la résistance thermique s'élève à 3,7 par mètre carré de surface de chauffe; elle tombe à 1,05, c'est-à-dire est réduite de *plus de 70 %*, lorsque la circulation est établie et que sa vitesse atteint 1^m,726.

3,7 et 1,05, voilà deux chiffres suggestifs; ils illustrent suffisamment le rôle de la circulation de l'eau dans les générateurs de vapeur, avant l'ébullition.

Il est donc incontestable que la circulation artificielle de l'eau est un moyen des plus efficace pour combattre l'attraction capillaire des parois, diminuer l'épaisseur de la couche capillaire et, par suite, en réduire notablement la résistance, au moins dans les parties de chaudières où l'eau de la couche capillaire n'entre pas entièrement en ébullition, c'est-à-dire pour la plus grande portion de la surface chauffée.

2° Pendant l'ébullition.

Il nous reste à examiner comment se comporte la couche capillaire à l'endroit de la chaudière où l'ébullition est assez vive pour entamer toute cette couche liquide adhérant aux parois.

Cette période de la chauffe est pour ainsi dire instantanée, au moins pour chaque masse élémentaire du liquide; c'est l'aboutissement d'une période préalable et relativement longue de réchauffement dont il a été question ci-avant.

Des bulles de vapeur se forment finalement au-delà de la couche capillaire pourvu que la tension thermique $\Theta - t$ est suffisante, et participent aux mouvements de convection.

Des bulles se forment même au contact de la tôle, au sein de la couche capillaire, pourvu aussi que la tension thermique $\Theta - t$ est suffisante; mais ces bulles restent relativement longtemps au contact

de la paroi, car la bulle doit encore vaincre l'attraction capillaire pour s'en détacher.

Il a été prouvé expérimentalement, en outre, notamment par MM. Thomas et Laurens, que la circulation augmente la puissance de vaporisation d'une surface de chauffe; c'est donc que la convection est insuffisante, comme précédemment, à vaincre à elle seule l'attraction capillaire des parois.

On conçoit d'ailleurs que la circulation aide les bulles de vapeur formées dans la couche capillaire à se détacher rapidement des parois et amènent en leur place d'autres masses liquides du voisinage de la paroi, donc plus chaudes.

Mais ce mouvement de circulation concentre les bulles de vapeur, à mesure qu'elles se produisent, en un endroit d'où elles doivent pouvoir se dégager aisément, et ce afin d'éviter leur accumulation en des points de la surface de chauffe qui seraient ainsi livrés à sec à l'action d'une trop forte chaleur: d'où tubes rougis, brûlés, troués et toutes sortes d'éventualités graves.

Dans beaucoup de chaudières à circulation, telles les chaudières à tubes d'eau du genre Balcock et Wilcox, les bulles ainsi entraînées convergent d'abord vers une extrémité de la chaudière et l'on doit donc veiller à ce qu'elles disposent en cet endroit d'un exutoire suffisant; il n'en est pas ainsi dans les chaudières à foyers intérieurs Cornouailles et Lancashire par exemple, où les bulles disposent, pour se dégager, de tout le plan d'eau de la chaudière.

Nous disons donc pour conclure: pourvu que le dégagement de la vapeur soit suffisant, il y a tout avantage à ce que la circulation existe là où l'ébullition est le plus active.

Enfin, de tout ce qui précède, il résulte que l'on doit s'efforcer de réaliser dans les chaudières, aussi bien là où se fait plus spécialement le réchauffement de l'eau que là où la vaporisation est plus intense, la circulation artificielle de l'eau.

En pratique?

Nous avons déjà signalé plus haut que les systèmes actuels de chaudières dites « à circulation », ne manifestent pas leur supériorité sur les chaudières à foyers intérieurs où la circulation est nulle.

A rendement thermique égal, en effet, le rapport de la surface de chauffe à la surface de grille $\frac{S}{G}$ des premières n'est pas inférieur à celui des secondes.

Nous en avons déjà donné les causes, nous les résumons ci-après :

1° Dans les chaudières à foyers intérieurs, les gaz quittent vraisemblablement le foyer à une température moins élevée que dans les chaudières à tubes d'eau ;

2° Le cheminement des gaz dans les chaudières à tubes d'eau est irrationnel ;

3° Dans les chaudières à tubes d'eau, la surface de chauffe n'est pas entièrement léchée par les gaz chauds ;

4° Le dégagement de vapeur se fait difficilement, par saccades ; les amas de bulles annulent périodiquement la circulation de l'eau ;

5° Enfin, des expériences industrielles ont démontré que la circulation n'existe dans ces chaudières que dans les tubes inférieurs, qu'elle est nulle dans les tubes du milieu, qu'elle existe enfin, mais lente et en sens inverse, dans les tubes supérieurs.

Si, en outre, on tient compte des difficultés d'entretien et de nettoyage des tubes d'eau et de la grande réserve d'eau offerte par les chaudières à foyers intérieurs, on comprendra que celles-ci, en dépit de leur manque de circulation artificielle, restent préférées aux chaudières multitubulaire à tubes d'eau.

Cependant, lorsque la vaporisation atteint une certaine puissance, 1,200 à 1,400 kilogrammes de vapeur par heure, par exemple, les chaudières à foyers intérieurs deviennent trop encombrantes, trop lourdes et trop coûteuses ; elles perdent alors tous leurs avantages économiques et l'on est forcé de recourir à la chaudière multitubulaire à tubes d'eau.

L'emploi des chaudières multitubulaires à tubes d'eau, tout imparfaites qu'elles soient, est pour le moins inévitable dans les grands centres de production de vapeur.

Il y a donc intérêt majeur à les améliorer.

Mais le problème n'est pas si simple : on se trouve en face d'une circulation rudimentaire acquise au prix de beaucoup d'efforts, d'un dégagement de vapeur malaisé et qu'on n'a pu rendre meilleur, d'une utilisation défectueuse des gaz ; enfin il faut améliorer ici sans nuire ailleurs.

Le problème n'est cependant pas insoluble, certains résultats d'ailleurs ont été récemment atteints.

Liège, juin 1921.