HOUILLE NOIRE

L'Utilisation rationnelle de la Vapeur d'Échappement

Par Emile Huc, *Ingénieur-Conseil.*

Introduction

L'intérêt que présentent de nombreuses questions, entre autres celle de l'Électrification des chutes d'eau, détourne quelquefois l'attention du monde industriel de questions d'autant plus impérieuses encore qu'elles sont davantage d'actualité.

On a tendance, trop souvent, à penser que l'énergie hydro-électrique est moins coûteuse que le fonctionnement d'une machine à vapeur. Et, pourtant, dans le premier cas, il y a une installation d'une grande valeur avec les turbines hydrauliques, les canaux, les barrages, les lignes, les transformateurs, toutes choses qui grèvent le prix de revient du kilowatt ; il faut, en outre, tenir compte des interruptions inévitables, dans les grandes installations à puissant réseau, et remarquer, en passant, que le prix du kilowatt sera notablement augmenté dans les installations à consommation constante, parce que les Centrales devront tenir continuellement, pendant certaines périodes, des machines thermiques qui, marchant à charge réduite, fourniront l'appoint aux baisses instantanées de courant.

J'ai, sous la main, un mémoire dû à l'ingénieur italien Giuseppe Brezzi, qui signale des installations où le prix du kilowatt a été établi après de nombreux essais pratiques. Il s'agit d'installations avec machines à vapeur à condensation.

Une Centrale d'Égypte est équipée avec trois turbos-alternateurs de 1.500 kw. chacun, destinés à assurer le service de tramways. Deux de ces turbos marchent seulement à 800-900 kw., la consommation est de 1.100 grammes de charbon au kw/h., avec de la vapeur surchauffée à 300 degrés.

Dans une installation de la Haute-Italie, avec deux unités de 750 kw. (turbos-alternateurs), il s'y est consommé 1.200 grammes par kw/h., avec un courant moyen de 500 kw. et de la vapeur surchauffée à 280 degrés.

Dans une troisième Centrale, de réserve, — toujours dans la Haute-Italie, — pendant la période d'hiver, avec des unités de 2.500 et 5.000 HP (turbos-alternateurs), fonctionnant de jour et de nuit, consomment 900 grammes de charbon.

Dans l'Italie méridionale, des unités de 2.000 et 3.000 HP (turbos-alternateurs), marchent avec une consommation de 950 grammes de charbon.

Ceci, du reste, correspond aux garanties normales.

Tenons compte d'une augmentation pour l'huile, le personnel, l'amortissement, les intérêts, on arrive à un chiffre qui peut faire concurrence au kw. produit par les installations hydro-électriques.

Cela est vrai pour de grosses et c'est aussi très exact pour de petites installations.

Pour les grosses Centrales, il y en a, en France qui, purement thermiques, vendent le kw. meilleur marché que leurs voisins hydro-électriques !

Dans certaines usines, cependant, pour la simplification du service ou par suite de l'intermittence du travail, l'énergie électrique a fait une sérieuse concurrence à la force motrice à vapeur. Mais j'ai la conviction, reposant sur des bases solides, que la machine thermique peut, industriellement, soutenir la lutte et vaincre, le plus souvent, l'énergie d'origine hydro-électrique.

La supériorité de la machine thermique n'est pas douteuse à l'heure actuelle et elle s'accroît chaque jour davantage, avec l'évolution rapide vers les superpressions de vapeur et les hautes températures de surchauffe et d'autres moyens récents donneront encore un nouvel essor aux machines thermiques. Les turbines et les machines à vapeur sont encore bien vivantes ; elles ont traversé une crise, mais elles « reviennent » bien vite, car elles ne veulent pas mourir et elles résisteront victorieusement, toujours dans l'industrie et dans la plupart des usines, aux moteurs à combustion comme elles tiennent à l'énergie d'origine hydro-électrique.

Quelques exemples sur les grandes Centrales thermiques mondiales, seront encore de nature à éclairer la question :

Sur une moyenne de 50 résultats, un rendement de Centrale se confirme aux environs de 71 à 76,6 % ; dans les moyennes et petites installations, les plus nombreuses oscillent entre 60 et 70 % ; par contre, quelques-unes atteignent 80 %.

À l'heure actuelle, on peut aisément garantir un rendement de 82 à 84 % pour les petites et moyennes installations et les grandes Centrales partent, comme celle de Colfax, sur des garanties de 89 %. Cela nous descend à 630 grammes de charbon par HP/h en marche poussée et 575 grammes en marche continue ! L'étude a été faite en détail, rien n'a été négligé et l'on a recouru aux hautes pressions de vapeur.

Si, à cela, on compare les résultats de l'utilisation de la vapeur d'échappement, on constate que, dans ce cas, le HP/h correspond à une consommation de 150 à 180 grammes de charbon, 210 au plus. Ces chiffres sont de nature à retenir l'attention.

Le rendement d'une machine à vapeur, mesuré au tableau, est d'environ 12,5 %, cela tient à la perte au condenseur de la plus grande partie des calories contenues dans la vapeur admise à la machine.

On peut admettre, en gros, que les propriétés mécaniques de la vapeur correspondent à 1/6 des calories de la vapeur passant au travers de la machine, les 5/6 restants constituant la perte au condenseur, qu'il s'agit de diminuer et même de supprimer.

Nombreuses sont les usines où les besoins de vapeur sont variés et importants pour les fabrications (chauffages, séchages, etc.), et qui, de ce fait, possèdent une chaufferie à laquelle, d'ailleurs, on n'apporte qu'une attention toute secondaire.

Cependant, l'utilisation des calories de la vapeur d'échappement serait plus logique dans les corps de chauffe que dans un

condenseur qui les évacuera à l'égout. La production de la force motrice étant encore passablement négligée, on recourra souvent à un réseau extérieur à l'usine, alors qu'à portée de la main on a toute la force motrice nécessaire à un prix réellement infime.

Certaines usines sont dans une situation véritablement honteuse à ce point de vue et leurs propriétaires, trop pris par ailleurs, sans doute, ont perdu de vue que *l'économie de combustible est un devoir national*, il importe donc, toutes les fois que les circonstances le permettent, de poser le doigt sur la plaie et d'indiquer le chemin à suivre.

Si celui qui paye est libre de gaspiller son argent qui est son bien, personne ne lui reconnaît le droit de dilapider un bien public comme le combustible.

Et, partant les premiers, les constructeurs spécialistes ont concentré leur attention et l'intérêt de leurs études à la recherche de moyens efficaces pour mieux utiliser les calories contenues dans la vapeur.

Au début, la vapeur d'échappement des machines et des pompes à vapeur fonctionnant à échappement libre a été utilisée pour le réchauffage de l'eau d'alimentation des chaudières, mais cette façon de faire a perdu de sa valeur, quand on a monté sur les carneaux des générateurs des réchauffeurs d'eau d'alimentation ou économiseurs qui récupèrent les calories sur les fumées allant à la cheminée, et que, d'autre part, on a récupéré les eaux chaudes provenant de la condensation de la vapeur utilisée dans des corps de chauffe.

On a, quelquefois, avantage à réchauffer l'eau d'alimentation, au moyen de vapeur ayant été détendue par la production d'un travail, mais il s'agit là, évidemment, d'un cas d'espèce.

Nous laisserons de côté, dans le cadre de cette étude, les installations thermiques qui n'utilisent la vapeur que pour la production de la force motrice et nous nous bornerons à étudier les installations qui recourent à la vapeur, pour effectuer des opérations de chauffage, évaporations, etc., et qui ont besoin, en même temps, de force motrice.

L'emploi de la vapeur judicieusement étudié, permet, comme nous allons le voir, de réaliser des combinaisons heureuses, en ce sens que les propriétés mécaniques et les propriétés thermiques de la vapeur, mises en œuvre successivement, donnent la possibilité de juxtaposer, dans une certaine mesure, les deux aspects du problème « chauffage et force motrice » par l'utilisation de la vapeur d'échappement et d'obtenir des solutions élégantes et qui plus est, économiques.

Considérations générales sur la question

L'idée d'utiliser la vapeur d'échappement n'est pas neuve, mais la réalisation pratique est toute récente, c'est ce qui fait comprendre que la solution n'a pas été aussi simple qu'elle paraissait l'être.

Il semble que la vapeur, après avoir produit un travail mécanique par détente, dans une machine à vapeur ou une turbine à vapeur, est toute prête à effectuer des opérations de chauffage.

Cette conception toute lumineuse qu'elle apparaisse n'est point aussi aisée à mettre en œuvre que le schéma rapide tracé hâtivement sur une feuille de papier le pourrait faire prévoir. Et les échecs sont nombreux pour ceux qui, non spécialistes, se sont imaginés que l'on pouvait impunément faire merveille de prime abord.

Il est bon de remarquer que la carrière thermique est faite de bien d'autres choses que de causeries, de calculs ou de réflexions *intra muros*. Les rêveries d'un penseur solitaire sont parfois précieuses par la douce philosophie qui s'en dégage, mais les résultats pratiques, fils de l'expérience, sont de nature plus précieuse encore.

Les discussions pharamineuses font perdre un temps qui nous est cher, parce qu'elles sont dénuées d'intérêt pratique.

L'usine est, pour l'ingénieur, un milieu extrêmement favorable à tous points de vue et c'est la pratique acquise sur le « tas » qui donnera toujours la solution la plus convenable ou qui fera entrevoir dans quel sens on doit poursuivre une recherche.

Le problème de l'utilisation de la vapeur d'échappement est, en effet, un de ceux qui, par sa délicatesse, pose au technicien spécialiste, une série de difficultés à la résolution desquelles il faut mettre en « chantier » une étude très serrée et de longue haleine où l'on fera appel à toute l'expérience acquise pour solutionner des cas très simples en apparence et qui, du côté pratique, ne sont que des « nids à pépins ».

Il faut bien dire que cette difficulté de la réalisation pratique a échappé à beaucoup de personnes et j'ai des exemples où des constructeurs de machines à vapeur ont échoué. Est-ce là, la raison qui justifierait, dans une certaine mesure, le petit nombre d'installations de ce genre existant à l'heure actuelle, c'est encore possible ; mais il y a aussi, de la part des industriels, mal documentés pour la plupart sur les questions de cet ordre, une défiance marquée vis-à-vis de ces procédés et de tous procédés en général, qui rompent brutalement avec les vieilles méthodes suivies.

Nombreuses sont les installations où la production et surtout l'utilisation de la vapeur ne répondent à aucun plan défini. Je m'efforce de mettre au point cette importante question, toutes les fois que cela m'est permis et le plan méthodique constitue ce que j'appelle : *l'utilisation de la vapeur en cascade*, dont l'utilisation de la vapeur d'échappement n'est qu'un des stades.

Mon but est d'utiliser la vapeur rationnellement en lui faisant produire un travail et de mettre en œuvre, après coup, les propriétés thermiques, pour les diverses opérations que l'usine requiert et les eaux chaudes étant collectées, avec ou sans pression, sont retournées à la chaufferie et le cycle se ferme.

Encore une idée, plus simple en apparence qu'en réalisation pratique, et qui, bien souvent, ne donne pas les résultats prévus si elle est mise en œuvre par un non-spécialiste : l'exemple est encore tout frais à ma mémoire, car il s'agit d'un de mes collègues ayant conçu un admirable travail de ce genre. Le scalpel du raisonnement eut bien vite disséqué le corps de ce travail et l'insuffisance était si grande que le plan ne pouvait, pratiquement, recevoir de solution économique.

Plus une chose paraît simple, plus il faut l'étudier, plus il faut la sonder, la pénétrer à fond, car la simplicité est redoutable et l'expérience de chaque jour confirme le bien-fondé de cette observation.

L'utilisation de la vapeur en cascade nécessite une connaissance approfondie de l'industrie où l'on veut faire l'application du procédé et quand cette condition est réalisée, l'installation est possible avec le maximum de souplesse et surtout d'économie. De là, les chiffres de 50 et 60 % d'économie de combustible que l'on peut aisément obtenir et avec une mise de fonds qui est elle-même récupérée en l'espace de un an environ.

Il faut bien se mettre un problème dans la tête et c'est un cortège d'ennuis à qui l'on ouvre la porte, lorsqu'on fait étudier

une installation d'utilisation de vapeur d'échappement par un technicien qui base son étude sur des renseignements qui ne sont, le plus souvent, que de grossières approximations dont le moins qu'on puisse dire, c'est qu'ils méritent toujours d'être vérifiés sur place. Il faut un minimum de huit jours pour recueillir, dans une usine, les divers renseignements qui seront indispensables pour mener à bien l'étude que l'on se propose de mettre sur pied en bonne et due forme. Nous sommes donc bien loin de ce qui se fait habituellement et, pourtant, comment pourrait-on faire autrement, pour être logique et consciencieux ?

Remarquons de suite que l'imperfection est chose si humaine que, dans quelques usines, on installera, à grands frais, des grilles mécaniques aux chaudières, des économiseurs, des réchauffeurs d'air, des surchauffeurs, des souffleurs de suie, des ventilateurs de soufflage et de tirage mécanique, des appareils de contrôle même et que l'on adoptera des machines à condensation qui enverront au condenseur des calories cependant chèrement payées, quitte à monter des détendeurs, pour réduire la pression de vapeur aux installations de chauffage ! !

J'aurais mauvaise grâce à ne pas reconnaître que le problème présente plusieurs variantes, mais je me permets de croire que le maximum d'utilisation des calories n'a pas été obtenu malgré l'illusion qu'un coup d'œil trop rapide peut donner.

* * *

D'une façon générale, les installations de chauffage par la vapeur d'échappement, ont pour principe, de faire fonctionner la machine avec une contre-pression égale à la pression de la vapeur de chauffage.

L'examen de la question indiquait que la vapeur utilisée dans les chauffages n'agissait que par sa température de saturation, à laquelle correspond une pression dont l'observation sert de guide pour l'opération envisagée.

La température pourrait être obtenue par la surchauffe de la vapeur à basse pression, mais la vapeur surchauffée étant mauvaise conductrice de la chaleur, l'échange thermique serait lent et faible, parce que la chute de température correspondant au refroidissement de la vapeur surchauffée, ne représente qu'une cession peu importante de calories.

L'échange thermique est maximum, quand la vapeur est saturée sèche : le refroidissement de cette vapeur conduit à une condensation d'où une cession de calories correspondant à la chaleur de vaporisation de la quantité d'eau condensée ; l'effet est maximum.

L'avantage des hautes pressions ressort de la remarque suivante, que pour élever la pression de la vapeur, il faut :

19 calories pour monter de	1 kg à 5 kgs,
8 calories pour passer de	5 kgs à 10 kgs,
4 calories pour élever de	10 kgs à 15 kgs,
3 calories pour porter de	15 kgs à 20 kgs.

Et l'on entrevoit de suite l'intérêt que l'on trouvera à faire de la vapeur à haute pression, pour avoir une énergie mécanique importante, par détente, dans une machine thermique et cela pour une dépense qui sera d'autant moindre que la pression sera plus élevée, relativement.

L'avantage thermique que l'on obtient par l'utilisation de la vapeur d'échappement est tel que, dans la plupart des cas, en papeterie par exemple, la détente de la vapeur de chauffage représente, quand son énergie est récupérée, la puissance absorbée

par la machine à papier, pour son fonctionnement ! Voilà donc une solution élégante qui consisterait à n'envoyer que de la vapeur à haute pression dont l'énergie de détente récupérée actionnerait la machine à papier, tandis que la chaleur de vaporisation de la vapeur détendue assurerait le travail de séchage du papier.

C'est là, du reste, un cas particulier qui correspondrait à une fabrication absolument suivie. Le plus souvent, le problème se complique, il consiste à utiliser de la vapeur d'échappement en quantité variable, tant en quantité produite (variation de charge) qu'en quantité utilisée. La pression peut aussi varier entre certaines limites.

La complication devient plus grande encore, car la variation de puissance (donc, en fin de compte, la quantité de vapeur d'échappement) ne correspond pas toujours à une variation de même sens de la demande de vapeur et, en papeterie, le cas se produit avec différentes sortes de papier qui pourront exiger plus ou moins de force à la machine, pour une même consommation de vapeur de « sèche » ou inversement. Et avec ça, la pression de vapeur qui peut varier, on conçoit immédiatement que : *puissance — pression de vapeur — quantité de vapeur*, constituent trois facteurs dont les combinaisons, par suite de variations en plus ou en moins de chacun d'eux, représentent un certain nombre de problèmes qui, dans la majorité des cas, peuvent se suivre dans un ordre quelconque ! !

Cela suffirait à démontrer l'extrême souplesse que doit posséder une utilisation de vapeur d'échappement.

Certaines fabrications se trouvent cadrer avec l'un des problèmes et, du premier janvier au 31 décembre, l'utilisation de la vapeur est sensiblement la même, encore que la variation de pression à la vapeur vive provenant directement des chaudières ne soit pas un facteur négligeable dans certaines installations irrégulièrement conduites.

Cela se rapporte au cas où il n'y a qu'un réseau de chauffage, mais l'installation peut comporter deux réseaux de chauffage, l'un de ceux-ci, celui qui est la plus basse pression de vapeur, recevra l'échappement de la machine, l'autre sera desservi par de la vapeur partiellement détendue par un détendeur statique ordinaire ou par une deuxième machine à contre pression plus élevée que la première, ou encore par une prise de vapeur effectuée sur une machine compound ou une turbine à prise de vapeur intermédiaire, comme nous le verrons plus loin. Cela dépend des conditions de l'installation et les débits-poids de vapeur, nécessaires à chaque instant.

Il arrive, parfois, que l'on conserve le condenseur de la machine à vapeur, comme terme ultime du réseau de chauffage qui fonctionnera comme un condenseur par surface. Le condenseur sert de pompe à air et reçoit éventuellement l'excès de vapeur non condensée au chauffage. Dans ce cas, le condenseur ne donnera qu'un vide réduit à une valeur telle que la tension correspondante de la vapeur ait une valeur déterminée et suffisante, pour assurer le chauffage prévu.

Les installations de ce genre ne sont pas recommandables, elles ne présentent qu'un intérêt limité, parce qu'elles ne sont pas spécialement conçues pour le service envisagé.

Et je m'explique. Il existe des systèmes de chauffage par le vide qui demandent, qui exigent une véritable technique et sont des causes d'ennuis, si l'ingénieur qui les a faits n'est pas spécialiste. En revanche, les systèmes de chauffage par le vide sont très intéressants, à beaucoup de points de vue, et ils permettent de réduire, dans une certaine mesure, la contre-pression à la machine. Personnellement, j'ai mis au point un de ces

systèmes qui possède une assez grande souplesse, pour permettre bon nombre de réalisations.

Tous ces systèmes doivent être judicieusement appliqués, car il est des cas où ils ne rendraient pas le maximum. Il est des conditions particulières que seuls ils peuvent remplir et, souvent, une installation complète ne pourra être exécutée par l'un de ces procédés. Car, une installation, quelle qu'elle soit, doit toujours concourir à l'économie générale. La première conséquence de cette manière de voir conduit à concevoir l'installation thermique en deux stades : celui d'été et celui d'hiver.

Dans les cartonneries, fabriques de papiers couchés, la vapeur d'échappement peut-être dirigée sur un aéro-condenseur qui est, comme chacun sait, une surface très grande, mais calculée, constituée par des plaques, des tuyaux à ailettes, dans lesquels arrive la vapeur d'échappement et sur lesquels souffle un ventilateur. L'air froid est réchauffé à une température déterminée et la condensation de la vapeur dans les tuyaux, plaques, qui ne résulte crée un certain vide (pas excellent) qui assure l'écoulement de la vapeur, au travers de la canalisation de l'échappement.

Quelquefois, on place le condenseur par mélange, en bout de conduite, mais l'installation, nous l'avons dit, n'est pas heureuse.

Dans les installations où il existe des besoins d'eau chaude en quantité assez importante, on peut utiliser le condenseur à mélange ou le condenseur par surface, pour obtenir cette eau chaude. Avec le condenseur par surface, on se servira de l'eau de condensation de la vapeur pour l'alimentation des générateurs et de l'eau de circulation tiède pour les besoins de chauffage : on la fera circuler en circuit fermé. Avec le condenseur à mélange, l'eau de condensation de la vapeur est perdue.

Comme on peut le voir par cet exposé rapide, les solutions sont nombreuses et il est possible de réaliser des solutions absolument adaptées à chaque problème posé. Et je considère que, pratiquement, il n'y a pas de problème de cet ordre qui ne soit susceptible de recevoir de solution parfaitement adaptée ; il sera certainement nécessaire de faire une étude plus ou moins longue, mais rigoureuse qui donnera la route à suivre.

L'utilisation de la vapeur d'échappement n'est pas une, comme d'aucuns l'ont pensé, ni un matériel unique qui peut être adapté à tous les cas ; il faut connaître, avant tout, la marche de l'usine et rechercher, sur place, tous les éléments qui sont indispensables pour la mise en œuvre de procédés délicats ; des variations instantanées sont possibles dans certaines usines et l'industriel ne les perçoit pas toujours ; certaines demandes sont modifiables, réductibles ou seulement susceptibles de groupement, l'étude seule minutieusement poursuivie, donne des moyens insoupçonnés pour ces combinaisons.

On trouverait difficilement une industrie dans laquelle, sur une période de travail de plusieurs jours, il existerait, à une heure déterminée, un rapport constant entre la consommation d'énergie et celle de vapeur. Ce sera, en hiver, le matin, que la demande a des chances d'être plus importante pour la vapeur, à cause des chauffages et la force motrice sera plus élevée vers le soir, parce que les besoins de l'éclairage nécessiteront la mise en route d'une dynamo spéciale ou une demande supplémentaire d'électricité.

Ce petit aperçu donne une idée qui corrobore ce que je disais plus haut, à propos des difficultés rencontrées qui exigent les connaissances d'un spécialiste, et j'ajouterais que la méthode

rationnelle suivie est quelquefois telle que, dans les cas limites, elle peut démontrer l'inopportunité d'une installation.

Il sortirait du cadre de cette étude, d'entrer dans le détail de la méthode que j'ai inaugurée, qu'il me suffise de dire que l travail d'étude seul demande deux semaines au moins.

Sur une simple utilisation de la vapeur, je citerais en passant que l'on peut, avec 1.000 kgs de vapeur, produire jusqu'à 250 HP c'est-à-dire que l'on peut arriver à produire le cheval-heure avec 4 kgs de vapeur, et voici comment :

Avec de la vapeur saturée à 8 kgs de pression, dans une machine à vapeur, nous pouvons, à raison de 8 kgs au cheval heure, obtenir 125 chevaux ;

Avec de la vapeur saturée sèche, toujours à la même pression avec la turbine à vapeur, nous pourrions atteindre 143 HP, soit du 7 kgs de vapeur au HP/h. ;

La turbine marchant à la même pression, mais en vapeur surchauffée, nous donnera, avec 5 kgs de vapeur au cheval-heure, 200 HP/h. ;

Un autre montage, comprenant des turbines combinées, nous donnera, en cascade, 150 et 100 HP soit 250 HP, c'est-à-dire une consommation de 4 kgs au cheval-heure.

Voilà donc quatre exemples assez suggestifs ; ils présentent une difficulté initiale, c'est de n'être possibles, partiellement, vue pour des puissances de l'ordre de 500 HP, mais enfin, cela montre tout de même que l'utilisation de la vapeur offre de la ressource et qu'il suffit de vouloir, pour arriver à des solutions dignes d'un intérêt croissant.

Nous allons aborder le problème à la lueur de ce qui vient d'être dit.

Le problème. Comment il se pose

Avant de nous engager plus avant, il convient de remarquer que les différentes réalisations peuvent, à la rigueur, se ranger en trois grands groupes qui sont les suivants :

1° La demande de vapeur pour les chauffages et autres opérations est *équivalente* à la demande de puissance traduite en vapeur ;

2° La demande de vapeur est *inférieure* aux besoins-vapeur de la dite force motrice ;

3° La demande de vapeur est *supérieure* aux besoins de la force motrice ;

On peut, sans conteste, dire que, dans la plupart des cas, l'emploi général de la vapeur convient à merveille, car c'est intentionnellement que j'écris « à la demande de puissance traduite en vapeur » et « besoins-vapeur de la force motrice » n'a pas, dans l'énumération ci-dessus, d'autre sens que celui d'équivalence. On considère la demande d'énergie et on l'interprète, comme s'il s'agissait de la quantité de vapeur à haute pression nécessaire pour développer par détente, dans une machine thermique, la puissance requise.

Premier cas : L'installation paraît assez simple, puisque la quantité de vapeur d'échappement sera toujours utilisée par les besoins des chauffages. Il faudra prévoir un jeu de régulateurs spéciaux qui devront régler la pression de la vapeur d'échappement et les débits de vapeur à l'échappement et aux prises de chauffage.

Il faut apporter toute l'attention nécessaire aux variations de prises de vapeur d'échappement, parce que la soupape de sûreté prévue sur l'échappement ne doit, autant que possible, fonctionner qu'exceptionnellement, puisque la vapeur est perdue à l'atmosphère.

tation des chaudières, parce que, pour des quantités de vapeur, même pas très élevées, on peut réchauffer plus d'eau qu'il n'en faudrait pour assurer l'alimentation de la chaufferie.

On recherche alors la solution, en maintenant le condenseur de la machine à vapeur, ou de la turbine. La machine à vapeur

Fig. 1. — Un schéma d'installation d'une machine à vapeur monocylindrique pour utilisation de la vapeur d'échappement (marche en contre-pression)

A : machine — B : déshuileur — C : corps de chauffe — D : échappement à l'atmosphère.

De plus, ces variations possibles peuvent, par leur fréquence, dévier le problème. Et l'on conçoit que l'équivalence de vapeur, prise aux chauffages et celle s'écoulant de la machine, doive être constante à chaque instant (variation de même sens).

A noter que, dans les cas où l'utilisation de la vapeur d'échappement est totale, la consommation en charbon de la machine fonctionnant à la contre-pression (pression de chauffage) ne dépasse pas 3 % de la consommation de chaudières spéciales qui

sera du type compound et la turbine à prise de vapeur intermédiaire.

La machine à vapeur compound est constituée par deux cylindres — l'un petit, l'autre plus grand — qui reçoivent successivement la vapeur ; le petit cylindre reçoit directement la vapeur à haute pression et la détend (en produisant un travail) à une pression déterminée.

Cette vapeur détendue passe dans un réservoir intermédiaire, entre les deux cylindres, où l'on peut effectuer la prise de vapeur

Fig. 2. — Un schéma d'utilisation de vapeur avec une machine à double expansion à prise de vapeur au « receiver ».

produiraient de la vapeur à basse pression pour les chauffages et cela dans les meilleures conditions de marche de ces dernières.

Deuxième cas : La demande de vapeur pour les chauffages est inférieure à la quantité de vapeur obtenue à l'échappement.

On ne peut, évidemment, pas laisser échapper à l'atmosphère, l'excès de vapeur. Il est difficile de condenser par barbotage, cette vapeur en excès dans un réchauffeur d'eau, pour l'alimen-

(c'est la prise au « receiver »), la pression de cette vapeur sera la pression de chauffage.

La quantité de vapeur non utilisée pour les chauffages, c'est-à-dire non dérivée du receiver, passera au grand cylindre, achèvera de se détendre, en produisant un travail, et sera évacuée ensuite au condenseur.

Dans ces conditions, on comprend que si la prise de vapeur

de chauffage augmente, la quantité passant au grand cylindre sera plus petite et peut même devenir nulle : la vapeur détendue sortant du premier cylindre est totalement utilisée, on réalise la marche la plus économique.

Si la prise de vapeur devient nulle, toute la vapeur venant du petit cylindre passera dans le grand et la détente complète peut alors donner plus de puissance qu'il n'en faut, c'est alors que les régulateurs vont agir.

La puissance développée dépassant la puissance demandée, la machine tendra à s'emballer, aussitôt le régulateur d'admission de vapeur réduira en moins la quantité de vapeur entrant à la machine.

Si une prise de vapeur subite vient à se faire au receiver, la vapeur arrivant en quantité moindre au grand cylindre, il y a perte de puissance aussitôt compensée par une admission plus importante au petit cylindre.

De sorte que de telles machines peuvent fonctionner, tantôt à contre pression, réduite au petit cylindre, c'est-à-dire utilisation totale de vapeur, tantôt en machine ordinaire à condensation.

Une turbine à vapeur, à prise intermédiaire, est une turbine analogue au type ordinaire, avec la seule différence qu'à un étage de détente où la pression de vapeur correspond à la pression requise pour le chauffage, on dérive la vapeur au moyen d'un régulateur spécial, comme dans le cas de la machine compound, on dérivait la vapeur de chauffage à partir du receiver.

On peut encore réaliser des combinaisons intéressantes, parmi lesquelles nous signalerons le cas où il existe deux réseaux de chauffage à deux pressions différentes. Voici quelques solutions possibles :

On peut installer une machine à vapeur à triple expansion qui, possédant deux receivers, permet deux prises de vapeur à deux pressions différentes : ou bien une machine monocylindrique, dont chaque face de piston travaillera à une pression différente ; une machine compound double-expansion à contre-pression, avec prise au receiver ; turbine à vapeur à contre-pression, avec prise de vapeur intermédiaire.

Ce sont là des questions qui nécessitent un calcul sérieux, d'ailleurs, par lui-même, très intéressant, mais qui nous conduirait encore assez loin.

Troisième cas : La demande de vapeur de chauffage est supérieure aux besoins de force motrice, ce qui revient à utiliser la totalité de la vapeur d'échappement et d'ajouter, au fur et à mesure des besoins, la quantité supplémentaire de vapeur vive détendue.

Une machine monocylindrique, servant de détendeur, serait une solution simple, mais la pratique impose des conditions tellement variables que, dans beaucoup de cas, l'on préfère recourir à une machine compound, avec prise de vapeur sur le receiver.

Une machine monocylindrique peut encore fonctionner en simple détendeur, mais avec la possibilité de mettre en communication l'une des faces du piston avec le condenseur, donc au vide, ou encore, reprenant un cas déjà vu, mettre les deux faces du piston en relation avec deux réseaux de chauffage à pression différente.

Cette combinaison serait applicable dans un cas de deux régimes, hiver et été, mais quelque séduisante qu'elle apparaisse, elle est délicate à réaliser et doit plutôt être regardée comme un pis aller.

Ces différents processus d'utilisation sont souvent envisagés, parce qu'il importe de ne perdre que le moins possible de calories.

Ainsi, on monte parfois sur un même arbre, deux machines identiques qui fonctionnent, l'une à contre-pression, l'autre à condensation. Le prix de l'ensemble est double de celui d'une seule machine, mais la combinaison est soutenable.

La machine à condensation est réglée par le régulateur de vitesse et fournit l'appoint de puissance.

La machine à contre-pression fournit la vapeur de chauffage et possède, sur l'échappement, un régulateur de pression de vapeur de chauffage.

Le fonctionnement est le suivant :

Si la prise de vapeur au chauffage augmente, la machine à contre-pression admet davantage de vapeur et fournit, de ce chef, une puissance déterminée ; comme l'énergie demandée est fixe (on le suppose par le raisonnement), la différence de puissance sera fournie par l'unité fonctionnant à condensation. Inversement, si la prise au chauffage diminue, la machine à condensation verra sa consommation augmenter. La souplesse des régulateurs est telle que les compensations successives sont pratiquement réalisées quelles que soient les variations de puissance et les variations de chauffage.

Cette installation étant coûteuse, comme quelques autres, l'industriel ne regarde pas toujours l'économie réalisable sur sa façon de faire qui est la suivante :

La machine marche à condensation ou à contre-pression, l'appoint de vapeur est fourni par un détendeur statique.

Or, le détendeur de vapeur est un appareil, si j'ose dire, de secours ; il ne devrait être utilisé que dans quelques cas extrêmement rares et non dans la multiplicité de combinaisons où il vient montrer l'insuffisance d'étude et de conception.

Le détendeur est un engin qui détend la vapeur par perte de charge, résultant d'une résistance opposée à l'écoulement du fluide.

Un détendeur opère généralement par laminage de vapeur. Ce laminage sèche la vapeur et, si cette vapeur est sèche à l'entrée du détendeur, à la sortie, on remarque une certaine surchauffe de la vapeur détendue.

Un exemple démontrera la perte mécanique par détente :

Supposons que 1.000 kgs de vapeur passent, par heure, dans un détendeur et que la chute de pression soit de 9 à 2 kgs.

La perte de pression correspond à une perte de calories de 16,72 par kilog de vapeur, soit 16.720 calories par heure pour les 1.000 kgs.

Le cheval-heure correspond à 636,6 calories, nous aurons donc perdu, par détente des 1.000 kilogs, environ 25 HP/h. ! !

Si la pression initiale avait été de 16 kgs, la détente, à 2 kgs de la même quantité de vapeur-heure, aurait donné 36 HP environ.

Ce n'est pas négligeable, mais ce n'est pas tout.

La perte de charge, au travers d'un détendeur, étant produite par laminage, il peut se produire une surchauffe qui peut être utilisée pour réduire la perte calorifique de la conduite d'aval si les corps de chauffe sont assez éloignés, mais si les corps de chauffe sont immédiatement placés à la suite du détendeur, la surchauffe de la vapeur détendue peut gêner le chauffage, en ce sens que l'effet thermique sera retardé légèrement jusqu'à ce que la valeur soit devenue saturée. Une partie de la surface de

chauffe ne fonctionnera qu'incomplètement (la vapeur surchauffée étant mauvaise conductrice de la chaleur), le coefficient de transmission de la vapeur surchauffée étant d'environ 1/100 de celui de la vapeur saturée.

Dans certaines usines, on emploie, pour produire de la vapeur à basse pression, des batteries de chaudières spéciales. On a donc deux chaufferies, une à haute-pression pour la force motrice, l'autre, à basse-pression pour les chauffages.

Cette solution n'est pas plus heureuse que l'utilisation de détendeurs, elle est aussi anti-économique que possible, parce que la vapeur basse-pression exige des canalisations de gros diamètres, donc des dépenses de tuyauteries, de robinetterie, de calorifuge, très élevées qui, s'ajoutant aux dépenses inhérentes à un matériel important, constituent, si j'ose dire, une véritable hérésie, et plus simplement « un loup » !

Il n'est pas mieux de transporter au loin de la vapeur à basse pression que de détendre de la vapeur vive dans un détendeur statique, situé près des appareils utilisateurs de vapeur détendue.

Enfin, il est encore une solution que je crois devoir indiquer, c'est celle qui peut se présenter dans quelques cas particuliers.

Les Papeteries, entre autres industries, ont besoin de beaucoup d'eau et se placent, le plus souvent, sur un cours d'eau qui peut donner une certaine puissance hydraulique, que les circonstances permettent, par exemple, de mettre à profit économiquement.

Dans ce cas, la machine monocylindrique travaillera comme un simple détendeur et fournira une énergie qui variera avec les besoins de chauffage, l'appoint peut être fourni par les moteurs hydrauliques ; par une machine à condensation, on retombe sur un cas déjà vu ; par un moteur à combustion interne, on donne une solution qui ne vaut pas celle de la vapeur partout ; par des moteurs électriques prenant au dehors de l'usine l'énergie consommée, c'est enfin une atteinte au bon sens.

* * *

Il est encore une autre forme d'utilisation de la vapeur d'échappement, surtout dans les cas de flux intermittent.

Je m'explique. Lorsque l'on veut utiliser la vapeur d'échappement d'une machine à vapeur monocylindrique échappant à l'atmosphère, on peut, dans le cas de marche continue, utiliser à l'échappement, une turbine spéciale, à échappement sous vide poussé. Ce cas a été vu plus haut, mais, si nous considérons une marche intermittente pour la machine à vapeur qui fera un service analogue à celui des machines d'extraction dans les mines, et des machines de laminoirs en métallurgie, il devient évident que l'échappement ne peut être utilisé que sous certaines réserves, et la plus importante est la régularisation du flux d'échappement.

Cette régularisation de flux entraîne la mise en œuvre des accumulateurs de vapeur (thermiques ou volumétriques, suivant que le volume est constant ou variable, ce qui entraîne une pression variable ou une pression constante), ces accumulateurs fonctionnent sous de faibles pressions et absorbent la vapeur d'échappement, quelles que soient les variations d'arrivée de vapeur ; ils restituent cette vapeur d'une façon continue à une turbine à basse pression sous vide élevé.

D'autres accumulateurs peuvent être utilisés qui, eux, présenteront des variations de pression beaucoup plus importantes et pourront recevoir de la vapeur à différentes pressions.

L'accumulateur devient, en quelque sorte, le volant thermique de l'usine, en absorbant l'excédent de vapeur, qu'il restituera ensuite, suivant des modalités que l'on peut prévoir aussi variées que l'on voudra.

On aura, sous la main, une réserve importante qui permettra de faire face aux variations des besoins du chauffage, par exemple.

Cette réserve donnera la possibilité de servir les chauffages, pendant l'arrêt des machines ; elle pourra encore permettre la mise en route immédiate de turbines à basse pression fonctionnant au vide et donnant une puissance instantanée pendant que les chaudières à haute pression seront mises en route.

Cette solution séduisante par son élasticité qui la moule sur de multiples cas, se trouvera moins bonne en été qu'en hiver, et l'on aura des chances de se trouver, assez souvent, avec de la vapeur en excès qu'on ne pourra utiliser, et alors on s'expose à perdre des calories par ailleurs précieuses.

La solution qu'on adoptera sera souvent un compromis entre la marche à contre-pression et accumulateur de vapeur, si l'on veut (saison d'hiver), et la marche à condensation, pour la saison d'été.

L'emploi des accumulateurs de vapeur, de plus en plus répandu, répond à une série de conditions qui rendent la solution plus ou moins intéressante, dans les différents cas possibles.

Dans les usines à grandes variations (fréquence, durée, importance), l'appareil devrait s'imposer de prime abord, mais il resterait à savoir le genre de compensation que l'on aurait plus d'intérêt à adopter et les problèmes deviennent nombreux et les combinaisons possibles seront innombrables. Question d'étude évidemment.

La mise en service d'un accumulateur de vapeur exigera donc une étude approfondie de la situation de l'usine et de la marche journalière avec toutes ses variations de consommation de vapeur, la simple régularisation qu'apporte un accumulateur de vapeur avec grande fourchette de pressions permet une économie de combustible de 16 à 17 %, on note 25 % dans un cas suédois, mais les appareils sont de très grand volume (pour ce dernier cas, de 235 m³).

Nous limiterons à ces quelques notions, la question de l'emploi des accumulateurs, réservant pour une autre étude, le développement de ce sujet si important par lui-même.

Machines et Turbines à Vapeur à contre-pression

La machine à contre-pression est adoptée dans le cas où la vapeur d'échappement est en quantité suffisante ou insuffisante pour assurer les chauffages.

La machine est munie d'un régulateur de vitesse à l'admission, comme les machines ordinaires, et on y adapte, en plus, un régulateur de pression destiné à maintenir constante la pression de la vapeur de chauffage (nous verrons ultérieurement comment agissent ces régulateurs de pression).

Si la vapeur d'échappement est en quantité insuffisante, il devient nécessaire d'admettre, en temps utile, un appoint de vapeur détendue par des moyens ordinaires (détendeurs statiques, à commande généralement, c'est-à-dire asservis).

S'il arrive, par hasard, que la quantité de vapeur d'échappement soit supérieure à la quantité demandée par les chauffages, une soupape évacue l'excédent, soit à l'atmosphère, soit, quand la quantité étant assez faible, dans des réchauffeurs d'eau d'alimentation (bâches, etc.).

Si la compensation de force motrice peut être demandée à une installation appartenant à l'usine (énergie hydraulique, par exemple), on peut utiliser la machine à contre-pression qui fournira toujours la totalité de la vapeur de chauffage, après l'avoir détendue à la valeur demandée et la force motrice sera

proportionnellement fournie à la prise de vapeur. Ici, on ne risque pas de perdre de la vapeur à l'atmosphère, puisqu'il y a utilisation totale constante.

Nous allons voir comment une installation de ce genre se conçoit et nous l'envisagerons au moyen d'une turbine à contre-pression du système Brown Boveri (de la Cie Electro-Mécanique).

Une turbine à contre-pression est une turbine ordinaire à laquelle on a supprimé l'étage basse-pression.

Le dispositif de réglage est analogue à celui des turbines à condensation, à cette différence près que l'on adjoint, dans le cas présent, un « régulateur de pression » que l'on intercale sur le circuit de circulation d'huile sous pression.

Ce régulateur de pression consiste en une membrane élastique dont l'une des faces est soumise à l'action d'un ressort, l'autre face étant en communication avec la conduite de vapeur de chauffage, donc supportant la pression régnant dans cette conduite.

La membrane est solidaire d'une tige portant une soupape qui règle la pression de l'huile dans son circuit, par simple étranglement de la veine liquide : elle laisse plus ou moins passer l'huile.

Le schéma ci-joint permet de comprendre que, dès l'instant où la consommation de vapeur diminue au chauffage, la pression dans la conduite, qui débite moins, tend à augmenter. Cette pression agissant sur la partie supérieure de la membrane du régulateur de pression va faire fléchir la membrane et abaisser, de ce fait, la soupape qui, s'ouvrant davantage, laisse échapper une plus grande quantité d'huile.

L'écoulement de l'huile entraîne une diminution de pression de celle-ci dans son circuit, cela va entraîner un mouvement descendant du piston du servo-moteur dont le ressort antagoniste ne sera plus équilibré par la pression d'huile.

Le piston du servo-moteur est, lui aussi, solidaire d'une soupape, la soupape d'admission de vapeur à la turbine ; la descente du piston du servo-moteur entraîne la descente, donc la fermeture de la soupape d'admission de vapeur haute-pression. On conçoit que la diminution de la quantité de vapeur d'échappement est la conséquence de l'étranglement de l'admission et il se produira un nouvel état d'équilibre qui subsistera jusqu'à ce que la pression à l'échappement diminuant, par suite de prise au chauffage, la pression de l'huile va augmenter par fermeture partielle de son circuit (action du régulateur de pression), le piston du servo-moteur va se soulever et ouvrir la valve d'admission de vapeur vive à la turbine.

Comme on le voit, ce dispositif de régulation présente un certain intérêt, par sa judicieuse combinaison.

Mais ce n'est pas encore tout. Comme il y a un régulateur de

vitesse, il faut bien que son action se fasse sentir. La turbine est tantôt réglée par le régulateur de pression, tantôt par le régulateur de vitesse et cette substitution s'effectue automatiquement, de sorte que l'emballement de la machine n'est pas à craindre.

L'alternance d'action des deux régulateurs répond aux considérations suivantes :

Admettons que la quantité de vapeur utilisée aux chauffages soit constante et que la charge du réseau (comprenant la turbine à contre-pression et un groupe hydraulique de complément, par exemple) vienne à diminuer. Il est évident que, pendant tout le temps, la demande de puissance sera supérieure à l'énergie fournie par le turbo, l'admission de vapeur vive demeurera constante.

Lorsque la puissance requise atteindra juste la valeur de celle fournie par la turbine, le groupe hydraulique fonctionnera à vide, mais si la charge diminue encore au-dessous de cette valeur, la vitesse de la machine va augmenter et le régulateur de vitesse agissant, son manchon découvrira l'ouverture de la douille de réglage : la diminution de charge entraîne alors une réduction de l'admission de vapeur.

La pression de la vapeur de chauffage diminuera à son tour et la membrane du régulateur de pression poussée vers le haut, par le ressort antagoniste, fermera la soupape sur le circuit d'huile, mais la vitesse de la turbine ne pourra pas s'accroître parce que la machine est sous l'action du régulateur de vitesse.

Enfin, un régulateur de sûreté agirait immédiatement si, pour une cause quelconque, le régulateur de vitesse n'intervenait pas.

Ce régulateur de sûreté agit lorsque la vitesse atteint une valeur trop élevée, il commande un déclenchement qui libère un puissant ressort fermant l'admission de vapeur.

Telle est la description d'une combinaison, où la part du hasard est réduite à zéro. J'ai tenu à l'indiquer pour montrer tout ce que l'on peut faire dans certains cas et nous verrons, plus loin, que la complexité de certaines installations trouve encore des solutions tout aussi satisfaisantes.

Les Régulateurs de pression

L'exemple que nous venons de voir en détail sera complété, plus loin, par l'adjonction d'autres appareils sur le circuit de l'huile, entre autres « le défendeur asservi » pour l'admission de vapeur détendue comme appoint, en cas de baisse de pression au chauffage non suivie par une variation de charge de la machine.

Nous traiterons ici de régulateurs différents de construction et de commande.

(A suivre.)