LES TRANSPORTEURS BREVETES

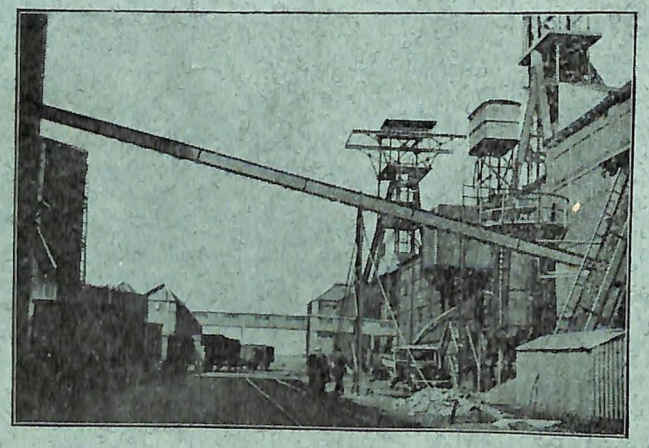
REDLER

HORIZONTAUX - INCLINÉS - VERTICAUX

pour

toutes distances,
toutes capacités (5-500 t./h.),
tous les

CHARBONS
& MATIÈRES ANALOGUES



«REDLER» installé à la Société Anonyme John Cockerill, Division du Charbonnage des Liégeois à Zwartberg, pour le transport de charbons et mixtes 0/10 et 0/30, mélangés de schlamms.

Principaux **avantages :**

Encombrement très réduit, d'où montage plus simple, suppression de passerelles et de charpentes coûteuses.

Sécurité de marche de 100 p. c., suppression des engorgements, du graissage.

Economie considérable de force.

Suppression du dégagement de poussières.

DEMANDEZ REFERENCES,
CATALOGUES ET VISITE D'INGENIEUR A

BUHLER FRÈRES

Tél. 12.97.37 — BRUXELLES — 2a, rue Ant. Dansaert
Usines à UZWIL (Suisse).

MÉMOIRE

Le rendement des installations motrices à vapeur

PAR

H. PAQUAY,

Ingénieur civil des Mines et Ingénieur-Electricien A.I.Lg. à Liége (*)

(Suite.) (1)

Le rendement d'un cycle utilisant de la vapeur à 100 kg. 500° et le soutirage continu de 9,5 atmosphères à 0,04 atmosphère se calcule comme suit :

La chaleur totale de la vapeur à 100 atmosphères 500° est 808 calories.

L'eau étant réchauffée jusqu'à 175° par soutirage, le foyer devra fournir 808-175 = 633 calories par kg. de fluide évoluant.

Le travail obtenu par détente de 100 atmosphères 500° jusqu'à 9.5 atmosphères est 145 calories, celui qui est obtenu par détente avec soutirage continu de 9,5 à 0,04 atmosphères est 156 calories.

Le travail total par kg. de fluide est 145 + 156 = 301 calories et le rendement est 301/633 = 47,5 % au lieu de 45,5 % avec soutirage unique à 9,5 atmosphères.

(*) Lauréat du Concours Universitaire 1930-1932.

(1) Voir *Annales des Mines de Belgique*, t. XXXVI (année 1935), 2e et 3e liv.

Le gain supplémentaire dû au soutirage continu sur le soutirage unique est donc 2 %, alors que le gain dû au soutirage unique (p. 761) était de 2,8 %. On peut admettre grossièrement qu'un soutirage donne un bénéfice égal à la moitié d'un soutirage continu, qu'un second soutirage amène encore un bénéfice du quart et ainsi de suite. Celà montre qu'en pratique, avec trois ou quatre soutirages, on aura un rendement très sensiblement égal à celui que produit le soutirage continu :

Ce dernier sera d'autant plus avantageux que la détente en zône humide sera plus longue. Si cette détente est courte, on se bornera le plus souvent à deux ou même à un seul soutirage. Or le diagramme entropique et le diagramme de Mollier montrent que la détente en zône humide sera d'autant plus longue que la pression initiale sera plus élevée et que la surchauffe sera moins forte.

On voit encore par là tout l'intérêt des hautes pressions au point de vue théorique : par elles-mêmes, elles sont avantageuses et l'amélioration qu'apporte le soutirage est d'autant plus forte qu'elles sont plus élevées.

Ajoutons que le choix des pressions des divers soutirages devra s'étudier sur le diagramme de Mollier de façon à obtenir le rendement le plus élevé possible, lorsqu'on s'est fixé le nombre de ces soutirages.

Si l'on n'effectue qu'un seul soutirage, il devra s'exécuter comme nous l'avons vu à la pression la plus élevée dans la zône de la vapeur saturée.

Remarquons que si le soutirage exige un plus grand poids de vapeur pour un même travail qu'un cycle simple, il demande cependant une moindre quantité de charbon brûlé ; la chaudière ne doit fournir que la chaleur de vaporisation ; la quantité de chaleur à transmettre à l'eau dans la chaudière est moindre et sa surface pourra être diminuée, l'eau y entrant à une température élevée.

Si le soutirage est appliqué après l'installation des chaudières, celles-ci pourront développer une puissance plus élevée ou bien elles disposeront d'une aptitude renforcée à franchir les pointes (1). Dans le cas considéré (100 atmosphères 500°), le réchauffage par soutirage amène l'eau à 175° (9,5 atmosphères). Or, la température de vaporisation est de 310°. On pourrait donc utilement employer un économiseur en série avec les réchauffeurs par soutirage.

Si les fumées sortent de la chaudière proprement dite à 400° (écart de 90°), elles peuvent porter l'eau à une température voisine de 300° dans un économiseur, alors que les réchauffeurs ne l'amenaient qu'à 175°.

Les fumées sortant de l'économiseur à 250° pourraient encore servir à réchauffer l'air de combustion dans une certaine mesure ; cet air pourrait alors circuler dans les murs doubles du foyer où il serait encore réchauffé davantage.

Dans l'exemple traité (100 atmosphères 500°) on pourrait évidemment réchauffer l'eau à une température plus élevée par soutirage dans la zone de surchauffe. Les soutirages effectués dans cette zône sont cependant moins intéressants : le rendement des turbines en zône surchauffée est très bon comme nous le verrons plus loin. Ils présenteraient cependant aussi des avantages : meilleur vide au condenseur qui aurait encore moins de vapeur à traiter, élimination de l'économiseur, augmentation d'importance du réchauffair, échanges accélérés dans la chaudière.

(1) La production horaire de vapeur devra être plus forte pour une même puissance développée Aussi, la surchauffe baissera-t-elle si l'on n'y pourvoit en donnant une plus grande surface de chauffe au surchauffeur.

Ceci montre bien comment tous les éléments se lient dans la technique des installations motrices.

Résumé de l'étude théorique.

L'étude théorique du cycle de Rankine nous montre que :

1° il y a avantage à adopter la plus haute surchauffe possible ;

2° il y a avantage à adopter la plus basse pression possible au condenseur ;

3° il y a avantage (pour une surchauffe et une pression au condenseur données) à adopter la plus haute pression possible sauf dans la zône anormale comprise entre 325 et 400° de surchauffe, températures pour lesquelles les pressions optima varient de 110 à 225 atmosphères de pression (d'après Roszak et Véron).

Les trois conclusions ci-dessus s'appliquent au cycle simple de Rankine avec surchauffe (cycle de Hirn) ;

4° il y a avantage à utiliser des fluides ayant une faible chaleur spécifique à l'état liquide. Le cycle de Rankine sans surchauffe est alors très voisin du cycle de Carnot.

A défaut d'un tel corps pouvant évoluer entre des températures supérieure et inférieure très écartées ;

5° il convient de superposer des cycles, par exemple les cycles mercure-eau ;

6° il convient d'envisager l'emploi d'une ou de plusieurs résurchauffes, mais il faut voir au préalable si le rendement propre de la resurchauffe est plus élevé que le rendement propre du cycle initial sans résurchauffe ;

7° il y a avantage à pratiquer le réchauffage de l'eau d'alimentation par vapeur soutirée.

Etude pratique.

Dans l'étude théorique faite ci-dessus, on suppose :

1° que la pression à la chaudière et la surchauffe à la sortie du surchauffeur sont exactement les mêmes qu'à l'admission de la machine motrice ;

2° que la détente est adiabatique réversible, que la machine est exempte de toute perte mécanique et que la pression au condenseur est exactement la même qu'à l'échappement de la machine motrice.

3° qu'il n'y a pas d'auxiliaires.

En fait, aucune de ces conditions n'est réalisée. Nous allons voir d'un peu plus près ce qui se produit en pratique.

I. — *Pertes de charge et refroidissement dans les conduites entre chaudières et machines.*

Nous en avons fait l'étude au chapitre rendement de transmission. Nous n'aurons donc guère à nous y attarder.

Donnons cependant l'ordre de grandeur des pertes de charge dans les conduites d'après les abaques de Brown-Boveri qui conseille d'admettre les vitesses suivantes :

30 à 50 m/seconde pour la vapeur surchauffée ;

20 à 40 m/seconde pour la vapeur saturée,

les plus faibles vitesses étant prises pour les faibles diamètres et les plus grandes pour les tubes de forts diamètres, en raison des pertes de chaleur d'autant plus grandes et des pertes de charge d'autant plus faibles pour une vitesse donnée que le diamètre de la conduite est plus grand.

Connaissant cette vitesse, le volume spécifique moyen du fluide dans la conduite et le débit en poids, on calcule aisément le diamètre. Possédant celui-ci, des abaques donnent les pertes de charge dans les conduites de tout genre.

Considérons trois cas :

vapeur à 100 atmosphères 450°; volume spécifique 0,031 m^3/kg.;

vapeur à 35 atmosphères 300°; volume spécifique 0,07 m^3/kg.;

vapeur à 14 atmosphères 200° (vapeur saturée); volume spécifique 0,14 m^3/kg.

Supposons qu'il faille réaliser le même débit de 36 tonnes/heure ou 36000/3600 = 10 kg. par seconde, soit respectivement 0,31 m^3/sec., 0,7 m^3/sec. et 1,4 m^3/sec.

Adoptons une vitesse de 30 m./seconde dans chaque cas. Les sections devront être 0,01 m^2; 0,023 m^2 et 0,047 m^2 et les diamètres 11,5 cm., 17,1 cm. et 24,5 cm.

L'abaque donne une perte de charge respectivement de :

1,5 kg./cm^2/100 m. de conduite rectiligne,
0,45 kg./cm^2/100 m. de conduite rectiligne,
0,15 kg./cm^2/100 m. de conduite rectiligne.

La perte de charge calculée sur ces bases varie entre 1 et 1,5 % de la pression de vapeur.

Les pertes de charge pour ce qui concerne les coudes, les vannes, etc., sont entre elles comme 0,35 : 0,16 : 0,075. Ainsi, pour un coude normal on aurait des pertes de charge respectives de :

0,105; 0,048; 0,0225 kg./cm^2.

Ces pertes de charge se chiffreront donc toujours par un faible pourcentage de la pression à la chaudière. Supposons qu'elles atteignent 5 % de cette pression et que la perte de charge constitue une détente adiabatique sans travail donc irréversible. Nous négligeons par suite les faibles variations de volume spécifique et d'énergie cinétique qui en résultent et nous ne tenons pas compte des pertes de chaleur.

Voyons quel serait l'effet de cette perte de charge dans les cas considérés. Nous comparons donc le cycle de Rankine :

1) sans pertes de charge; 2) avec pertes de charge de 5 %.

Le diagramme de Mollier donne immédiatement la solution : la chaleur totale étant constante, l'évolution dans les conduites est représentée par une horizontale A C (voir fig. 42).

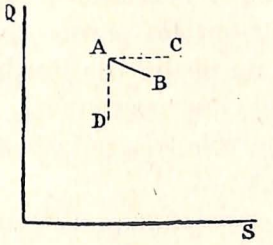


Fig. 42.

On voit ainsi qu'une faible détente adiabatique sans travail n'amène guère de différence au point de vue de la quantité de travail obtenu par kg. de vapeur : la perte est très faible. Mais cette détente concourt à augmenter faiblement, il est vrai, l'entropie du fluide et par suite la perte au condenseur. Cet accroissement d'entropie est compensé en partie par le refroidissement par les parois des conduites. En fait, sur le diagramme de Mollier, l'évolution de la vapeur dans une conduite serait représentée par une courbe AB comprise entre AC

(droite de chaleur totale constante) et AD (droite d'entropie constante). En régime normal ces pertes sont très faibles quelles que soient les pression et surchauffe de la vapeur. Par contre, l'abaissement de température est plus notable.

II. — *Machines réelles.*

Ici nous rencontrerons des causes de pertes beaucoup plus importantes.

Considérons d'abord la détente dans les machines à piston.

MACHINES A PISTON.

Sans l'effet des parois, la détente serait proche de la détente adiabatique réversible. En effet, les frottements de la vapeur sur les parois sont négligeables, vu les faibles vitesses du piston (de l'ordre d'une dizaine de mètres par seconde au maximum). Malheureusement, les parois jouent un rôle très néfaste que l'on peut schématiser comme suit :

1° A l'admission et pendant la première partie de la détente, la vapeur est à une température supérieure à celle des parois qui vont absorber des calories au détriment de la vapeur.

Si la vapeur est saturée, un refroidissement amène fatalement une condensation de vapeur sur les parois; au contraire, si la vapeur est surchauffée, un refroidissement pourra se faire simplement au détriment des calories de surchauffe. Néanmoins, la vapeur surchauffée étant mauvaise conductrice de la chaleur, et par suite de l'absence de mouvements tourbilonnaires intenses au sein de la masse de vapeur, il pourra se faire qu'une certaine masse de celle-ci voisine des parois arrive dans

la zône saturée alors qu'au sein de la masse, la vapeur reste surchauffée. Le commencement de la détente de la vapeur se marquera donc sur le diagramme de Mollier par une courbe inclinée B.-C (voir fig. 43) vers l'origine du diagramme (diminution simultanée de la chaleur totale et de l'entropie).

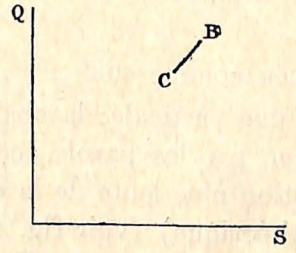


Fig. 43.

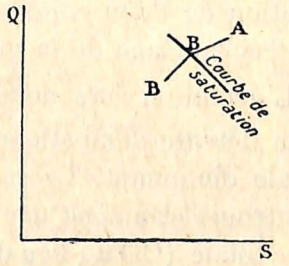


Fig. 44.

Il en est de même pendant l'admission. Ici, il faut tenir compte du fait que la masse varie. Mais si l'on considère la masse totale admise, à un instant quelconque de l'admission, une partie de cette masse a subi un refroidissement et par suite, l'évolution pendant l'admission est déjà dirigée vers l'origine du diagramme de Mollier.

Pendant l'admission, la pression est constante et par suite, la courbe AB (voir fig. 44) sera une isobare qui pourra même devenir ABB' si une condensation se produit (il y a une inflexion au point où l'on recoupe la courbe de saturation).

En fait, les choses sont plus compliquées. Il serait plus exact de considérer deux parties de la masse; l'une ne subissant pas l'effet des parois, l'autre la subissant. On aurait alors deux diagrammes à sommer. L'allure du phénomène est toujours une évolution vers l'origine du diagramme de Mollier.

Les parois ayant reçu de la chaleur pendant l'évolution considérée ci-dessus et la détente se poursuivant, un moment arrive où les parois sont à plus haute température que la vapeur. A partir de ce moment, elles restituent de la chaleur à la vapeur; c'est ce qui se produit pendant la fin de la détente et pendant l'émission. Cette restitution de chaleur se manifeste par la revaporisation de l'eau condensée sur la paroi ou par un simple réchauffage de la vapeur.

L'évolution sera donc marquée comme suit :

la détente adiabatique serait une verticale, la chaleur totale diminuant. Le réchauffage par les parois accroît l'entropie et amène une diminution plus lente de la chaleur totale (CD au lieu de CD' théorique) (voir fig. 45). L'émission théorique serait marquée par le point D seul si l'on ne tient pas compte de ce qui se produit au condenseur (émission dans une enceinte athermane).

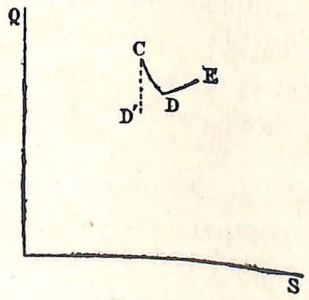


Fig. 45.

En pratique, l'émission se produit avec accroissements simultanés de Q et de S : DE. On voit ainsi ce qui se produirait si la détente était poussée jusqu'à la pression du condenseur. En fait, il n'en est jamais ainsi.

La détente se poursuit au commencement de l'émission (voir diagramme d'indicateur: DD', fig. 46).

Or, cette détente s'effectuant en fin de course du piston se produit presque sans travail : elle sert à donner de la vitesse à la vapeur qui se dirige vers le condenseur, l'énergie cinétique qui en résulte étant ensuite retransformée en chaleur. C'est donc sensiblement une détente sans travail : DD' horizontale sur le diagramme de Mollier (voir fig. 47), ou même légèrement montante (réchauffage par les parois).

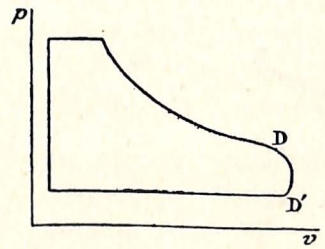


Fig. 46.

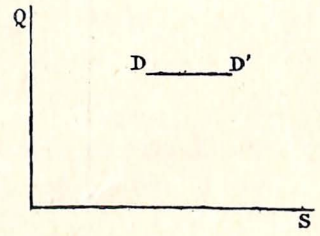


Fig. 47.

Le cycle sera donc représenté sur le diagramme de Mollier par la courbe ABB'CDD'E (voir figure 48). Or, le travail fourni par la vapeur serait marqué par $Q_A - Q_E$ si les parois restituaient à la vapeur toute la chaleur qu'elles lui ont prise.

En réalité, le travail est moindre encore, car les parois subissent des pertes de chaleur vers l'extérieur s'il n'existe pas d'enveloppe. La chaleur ainsi éliminée vers l'extérieur ne contribue plus à fournir du travail pendant la détente. On a en effet (principe de la conservation de l'énergie) : $Q_A - Q_E = AT + q$,

T étant le travail fourni par la vapeur,

A l'équivalent calorifique du travail

et q la perte de chaleur vers l'extérieur, q pouvant d'ailleurs être négatif si l'enveloppe fournit de la chaleur à la vapeur qui évolue dans le cylindre.

La pratique montre que Q_E est beaucoup plus grand que Q_F . Ceci s'explique intuitivement comme suit :

Une perte de chaleur Q donnée à haute pression amène une certaine diminution d'entropie : S_1. Un réchauffage Q identique à basse pression amène un accroissement d'entropie S_2 beaucoup plus grand que S_1.

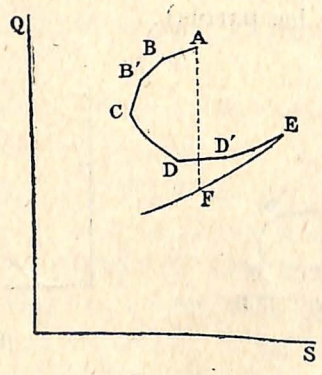


Fig. 48.

Celà provient de l'allure des isobares sur le diagramme de Mollier; la montée de celles-ci aux hautes pressions est plus rapide qu'aux basses pressions. Donc, à une quantité de chaleur donnée correspond un accroissement d'entropie d'autant plus grand que la pression est plus basse.

Si l'on suppose que les parois restituent à la vapeur toute la chaleur que celle-ci leur a cédée, il en résultera une entropie plus grande que si aucun échange ne s'était produit.

Or, l'état final ne dépend que de la pression au condenseur et de l'entropie.

Si l'entropie finale est accrue par le fait des échanges, la chaleur finale est aussi accrue et, par suite, le travail fourni par la vapeur pendant sa détente est diminué.

Ce phénomène étant dû aux échanges parois-vapeur sera d'autant plus marqué que ces échanges sont plus intenses.

Pour diminuer l'intensité de ces échanges, l'emploi de vapeur surchauffée se montre très efficace. Il convient aussi que les températures extrêmes entre lesquelles évolue la vapeur soient aussi rapprochées que possible. La température des parois étant alors toujours peu écartée de celle de la vapeur, les échanges seraient peu importants. Ceci s'opposerait aux fortes détentes dans une machine monocylindrique. Il faudrait utiliser des cylindres étagés fractionnant la détente.

Enfin on peut employer des machines à grande vitesse pour lesquelles les échanges intenses n'ont guère le temps de se produire.

Chacun de ces trois procédés possède une limite :

L'emploi de fortes surchauffes très avantageuses sous tous rapports est ici contre indiqué, car le piston devant être graissé, l'huile de graissage serait distillée; elle subirait une espèce de cracking ou une carbonisation qui annuleraient ses qualités lubrifiantes et gripperaient le cylindre à bref délai. Certaines huiles spéciales mais très coûteuses résistent bien jusqu'à la température de 350°. S'il s'agit d'une installation à haute pression, une telle surchauffe sera perdue dans les premiers cylindres et les derniers utilisant de la vapeur saturée seront fortement affectés par les échanges avec les parois.

Remarquons cependant que seul le dernier cylindre sera frappé d'une perte importante, car si les parois accroissent la perte au condenseur, elles accroissent aussi la quantité de chaleur apportée dans les cylindres successifs.

Le diagramme de Mollier le montre très bien :

la quantité de chaleur reçue par le deuxième cylindre est $q_2 > q'_2$ (voir. fig. 49). Le compoundage amène des pertes dues aux pertes de charge qui ont lieu entre les cylindres successifs.

Tous les cylindres sont affectés par un refroidissement par l'atmosphère.

Enfin, les phénomènes de laminage deviennent très importants aux grandes vitesses.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur les machines à piston qui sont entrées dans le domaine classique.

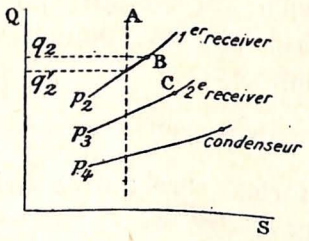


Fig. 49.

Leurs nombreux inconvénients :

marche lente convenant mal pour la commande des génératrices électriques,

rendement plus faible que celui des turbines pour les fortes puissances,

grand encombrement,

vibrations dues aux efforts non équilibrés

font qu'elles ne sont plus guère employées que comme réserve, ou dans les mines où la marche avec condensation est assez compliquée et où la marche lente ne présente pas d'inconvénient, ou dans les centrales de petite puissance, ou encore dans les usines demandant

à la fois de la vapeur pour force motrice et pour chauffage.

Dans ce dernier cas, les grandes pertes au condenseur des moteurs à piston sont supprimées en utilisant la vapeur rejetée pour le chauffage dans la marche à contre-pression.

Remarquons cependant que la vapeur ayant subi une détente dans une machine à piston entraîne avec elle de l'huile qui est toujours gênante pour les opérations de chauffage. Il convient alors de déshuiler la vapeur.

Quoi qu'il en soit, le nombre des moteurs à piston va constamment en décroissant. Ils sont remplacés de plus en plus par les turbines.

TURBINES.

Dans les turbines, on ne doit étudier que le phénomène de détente.

Quel que soit le système de turbine à considérer, celle-ci comporte des aubages fixes ou des tuyères et des aubages mobiles. Par rapport à chacun de ces organes, la vapeur possède une vitesse relative. Or, un phénomène de vitesse s'accompagne toujours de phénomènes irréversibles : frottements, mouvements tourbillonnaires amortis, en un mot pertes de charge ou si l'on veut encore, détente adiabatique sans travail.

La détente réelle est donc composée d'une détente adiabatique réversible combinée avec une détente adiabatique irréversible. Par suite, la détente, au lieu d'être isentropique, est une détente à entropie croissante.

On peut s'expliquer physiquement ce fait comme suit : la vapeur au cours de sa détente ne reçoit, ni ne cède de la chaleur (en réalité, il y a toujours une légère perte vers l'extérieur). La détente adiabatique réversi-

ble laisserait sortir la vapeur d'un aubage donné avec une certaine vitesse à une pression statique déterminée. On constate que la vitesse réelle de sortie de cet aubage est inférieure à la vitesse théorique. C'est que les frottements ont donc transformé une partie de l'énergie cinétique de la vapeur en énergie calorifique.

Si C_2 est la vitesse théorique de sortie d'un aubage ou d'une tuyère fixe et c'_2 la vitesse réelle, on pose communément : $C'_2 = \varphi\, C_2$, φ variant habituellement entre 0,90 et 0,97 suivant la perfection de la tuyère et suivant sa forme. On sait, en effet, que l'intérieur d'une tuyère ou d'un aubage produit moins de pertes s'il est parfaitement poli. La forme de l'aubage a aussi une grande importance à cet égard; s'il s'agit d'un aubage (1) dont l'axe est en ligne droite, les frottements seront évidemment moindres que si l'axe est courbe, car la déviation du filet fluide entraîne des mouvements tourbillonnaires de la vapeur et par suite des pertes de charge.

S'il s'agit d'une tuyère, dont l'axe est habituellement rectiligne, la partie divergente si elle existe devra avoir une ouverture assez faible (environ 10° — voir fig. 50) sinon il y aura décollement des filets fluides et chocs qui entraînent une transformation d'énergie cinétique en énergie calorifique.

Les aubages fixes et mobiles de la turbine ne peuvent jamais avoir un axe rectiligne car la vitesse à la sortie des aubes fixes n'aurait pas une direction convenable ou bien il ne s'exercerait pas de poussée motrice sur les aubages mobiles. Leur courbure obligée entraînera donc des pertes assez élevées.

(1) Il faut entendre ici le mot aubage dans le sens le plus large englobant aussi les tuyères. Il est en effet certain qu'une tuyère à axe rectiligne produira moins de pertes par frottements qu'un aubage à axe courbe, toutes autres choses égales d'ailleurs.

Il faudra encore que les arêtes d'entrée des aubes soient aussi vives que possible pour éviter les chocs et que l'aube soit profilée de façon que son dos soit tangent à la vitesse relative d'entrée W_1 (voir fig. 51).

Malgré toute la perfection que l'on puisse atteindre, il existe toujours des chocs à l'entrée et des frottements à l'intérieur de l'aubage. Aussi, la vitesse à la sortie de l'aube mobile sera-t-elle non pas W_2 théorique mais bien $W_2' = \psi\, W_1$ pour une roue d'action où théoriquement W_2 serait égal à W_1. ψ varie d'ailleurs fortement avec la vitesse relative considérée. Il est d'autant plus grand que la vitesse est plus grande.

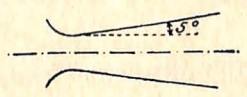


Fig. 50.

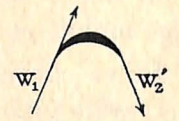


Fig. 51.

S'il s'agit d'une roue à réaction, celle-ci se comporte en partie comme roue d'action et en partie comme une tuyère dans laquelle se produit une détente.

On aura donc :

$$W_2^2 = \psi^2\, W_1^2 + \varphi^2 .\, 2\, g \int_1^2 v\,dp$$

le premier terme étant relatif à la perte d'énergie cinétique dans une roue d'action et le second relatif à la perte d'énergie cinétique engendrée par la détente produite à l'intérieur d'un aubage mobile.

Il faut ensuite tenir compte des fuites aux bourrages, vers les pistons d'équilibrage, entre les aubes fixes et le tambour de la turbine, entre les aubes mobiles et l'enveloppe de la turbine.

Les fuites aux bourrages et vers les pistons d'équilibrage qui peuvent se monter à quelques % de la quantité totale de vapeur traitée constitueraient une perte sèche si on ne les recupérait pour les utiliser au réchauffage de l'eau d'alimentation.

Les fuites entre aubes et tambour ou enveloppe de la turbine sont rendues aussi faibles que possible par la diminution au strict minimum des jeux entre extrémités des aubes et tambour ou enveloppe. Ces jeux sont d'ailleurs toujours supérieurs à une certaine limite qui tient compte de l'usure des paliers et de la dilatation. Les fuites ne se présentent que si les pressions de part et d'autre de l'aubage considéré sont différentes. Donc, dans une turbine d'action, il n'y aura pas de fuites entre l'extrémité de l'aubage mobile et l'enveloppe.

Les fuites consistent en une détente sans travail avec production de vitesse, celle-ci s'accompagnant forcément de phénomènes irréversibles par frottements. Mais l'irréversibilité pourra être plus forte encore si la vitesse produite par la détente n'est pas utilisée dans un aubage subséquent.

Dans ce cas l'énergie cinétique de la vapeur se transformera en énergie calorifique avec accroissement d'entropie.

Quel que soit donc le processus des fuites, elles amènent des pertes au condenseur. Aussi, faut-il les limiter.

A cet égard, on se rend compte que les pertes relatives seront d'autant plus faibles que l'écart des pressions existant de part et d'autre de l'aubage que l'on considère est plus faible et que l'aubage aura une plus grande hauteur.

Aussi, les turbines de grande puissance traitant un fort débit de vapeur par heure auront-elles des fuites relatives moindres que les turbines qui traiteraient de la vapeur de

même pression et même surchauffe mais de moindre puissance.

Les hautes pressions amènent assez aisément des fuites conséquentes, car le volume de vapeur à haute pression est beaucoup plus faible que celui de cette même vapeur détendue. Par conséquent, le pourcentage des fuites sera assez grand, les roues à haute pression étant de diamètre assez faible et ayant des aubages de faible hauteur.

Certains auteurs envisagent pour cette raison une première détente de la vapeur à haute pression dans une machine à piston échappant dans une turbine à pression moyenne. Cette solution paraît cependant peu favorable car la machine à piston pour être accouplée avec la turbine exigerait une multiplication de vitesse par engrenage.

La machine à piston de dimensions assez faibles aurait un rendement peu élevé par suite des pertes par les parois, laminage aux organes d'admission et d'émission. De plus, on ne pourrait y utiliser de la vapeur fortement surchauffée. Il faudrait au préalable désurchauffer la vapeur en perdant tout le bénéfice de la forte surchauffe.

Nous verrons que l'intérêt des fortes pressions est assez faible si l'on ne peut les utiliser en même temps que les fortes surchauffes. Aussi, estimons-nous que cette solution est à rejeter et qu'il faut détendre complètement la vapeur dans les turbines.

Certains constructeurs emploient une solution plus homogène et plus avantageuse à tous points de vue. Ainsi, Brown-Boveri provoque d'emblée une forte détente dans une roue d'action, le restant de la détente se poursuivant dans des roues à réaction.

On arrive ainsi à localiser en une toute petite partie de la turbine, les organes qui doivent résister aux hautes

pressions. La détente assez conséquente qui se produit dans les tuyères de la roue à action amène immédiatement la vapeur à un volume important. De cette façon, les fuites aux aubages n'auront jamais qu'une faible influence. Elles sont presque nulles dans la roue d'action et elles sont relativement petites dans les roues à réaction puisque leur volume y est très élevé; la section offerte aux fuites est presque négligeable vis-à-vis de la section des aubages et ceci d'autant plus que la pression devient plus basse.

Les roues à réaction présentent un rendement plus élevé que celles d'action car les vitesses de vapeur y sont moindres. Par contre, le nombre d'étages est plus élevé et le trajet de la vapeur plus long pour une même chute de pression; le prix de ces turbines est aussi plus élevé. Aussi, certains constructeurs s'en tiennent-ils aux turbines à action (Sté Alsacienne de constructions mécaniques, Général Electric Company, etc.). L'absence de détente dans celles-ci amène des pertes assez élevées par tourbillons dans les aubages mobiles. Pour pallier à cet inconvénient, on a parfois recours à des ailettages d'action comportant une très légère détente qui amène un écoulement plus régulier.

La tendance vers les hautes puissances unitaires (diminution des fuites) entraîne encore d'autres avantages : faible encombrement; prix unitaire moindre; accroissement de la puissance massique; parfois, équilibrage automatique par turbines à double flux. Ceci supprime la nécessité des pistons d'équilibrage et les fuites qui ont toujours lieu vers ces organes.

Par contre, dans ces grosses turbines, le volume de la vapeur détendue est énorme et il faut offrir à cette vapeur un chemin offrant d'aussi faibles pertes de charge que possible vers le condenseur; sinon, le vide réalisé

à celui-ci serait mal utilisé et le rendement pourrait baisser de ce fait, la détente réelle se terminant, non pas à la pression du condenseur, mais à cette pression augmentée des pertes de charge dans les organes d'échappement. Dans ce but, on a été amené à réaliser des échappements multiples pour de grosses turbines.

La vitesse absolue de sortie du dernier aubage devra être aussi faible que possible car l'énergie cinétique de la vapeur est alors complètement perdue. Une bonne conception de la turbine satisfera à cette condition.

Enfin, il faudra diminuer autant qu'on le pourra les pertes mécaniques de la turbine : frottements de la turbine dans la vapeur; frottements aux paliers; ventilation. Ceci ne peut guère s'obtenir que par une construction soignée rendant minima les surfaces frottantes des roues ou du tambour sur la vapeur, en polissant parfaitement ces surfaces, en employant des paliers bien conçus et bien graissés. Les pertes par ventilation sont supprimées si l'injection est totale, ce qui a toujours lieu dans les turbines à réaction. La bande rivée aux extrémités des ailettes diminue les pertes par ventilation .

Le rendement organique de la turbine croît avec sa puissance. Il est plus élevé pour les turbines à réaction qui présentent peu de frottements de la vapeur sur le tambour et qui sont exemptes de pertes par ventilation.

Effets de l'humidité.

Une trop grande humidité de la vapeur est particulièrement nuisible dans les turbines. On peut l'expliquer comme suit (voir fig. 52):

Lorsque des gouttelettes d'eau se sont formées au sein de la vapeur saturée et que cette vapeur suit une trajectoire courbe dans les aubages, les gouttelettes d'eau par

suite de leur inertie se jettent sur la face de l'aube. La vapeur léchant l'eau l'entraîne vers le bord de sortie B de l'aube. Un courant d'eau se produit donc de A vers B avec frottements. En même temps, l'eau est entrainée vers la périphérie de l'aubage par la force centrifuge.

Fig. 52.

Elle est ensuite jetée par la même force sur l'enveloppe où elle est encore entraînée par l'effet de la vapeur. Toutes ces causes agissent pour produire des frottements supplémentaires de la vapeur. De plus, le mouvement de l'eau et le choc des gouttelettes sur l'aubage amènent une usure rapide de celui-ci. Aussi, certains auteurs proposent-ils de limiter la détente théorique à 20 % d'humidité tandis que d'autres (Gleichmann) proposent de limiter la détente réelle à 8 % d'humidité. L'effet du réchauffage dû à l'irréversibilité de la détente fait que ces deux limites ne sont guère différentes l'une de l'autre.

Nous basant sur ce que nous savons de la détente réelle et sur l'effet de l'humidité, nous allons examiner en particulier l'effet des divers procédés que nous conseille la théorie pour l'augmentation du rendement.

1) Haute surchauffe.

L'accroissement d'entropie en cours de détente et les pertes par frottements qui en sont la cause sont faibles dans la zône surchauffée, ce qui s'explique par l'absence d'humidité sur les aubes qui s'usent peu pour la même raison pour autant que la température ne soit pas trop

élevée. Dans l'état actuel de la technique, il semble qu'on puisse utiliser de la vapeur à 400° sans grands risques, avec espoir de pouvoir dépasser cette température dans un proche avenir. On atteint même déjà dans des installations d'essai des températures plus élevées au surchauffeur : jusqu'à 550°. Il faut évidemment que le surchauffeur soit placé dans des fumées à haute température ce qui exige que le débit de vapeur dans le surchauffeur soit toujours élevé si l'on ne veut pas voir celui-ci brûlé à bref délai. Les hautes surchauffes s'accommodent donc assez mal d'une marche à trop faible charge. Dans ce cas d'ailleurs, la vapeur pourrait atteindre une température élevée au point qu'il y aurait danger de détérioration des premiers aubages de la turbines.

Le trajet de la vapeur dans le surchauffeur à vitesse élevée provoque des phénomènes irréversibles (pertes de charge) qui accroissent dans une certaine mesure les pertes au condenseur. La surchauffe réelle n'est donc pas tout à fait une surchauffe isobare.

Les soupapes, vannes et autres organes de régulation doivent être construits en matériaux résistant bien aux hautes températures car celles-ci agissant en même temps qu'une pression souvent forte pourraient souder les soupapes sur leurs sièges (phénomène constaté par Spring aux hautes pressions).

La surchauffe s'accompagne d'une augmentation du volume spécifique qui permet de donner aux différentes roues de la turbine des dimensions plus fortes pour un même poids de vapeur, de même qu'aux aubages ce qui diminuera légèrement l'importance relative des fuites. Cette influence est très peu importante.

Par contre, une haute surchauffe retarde le moment où la détente se produit en zône humide et permet d'at-

teindre de basses pressions et même souvent d'atteindre la pression du condenseur sans arriver à une vapeur exagérément humide. Ceci est surtout avantageux lorsqu'on utilise de la vapeur à haute pression.

L'irréversibilité de la détente nuisible à d'autres égards est favorable à ce dernier point de vue : elle diminue le pourcentage d'humidité de la vapeur en fin de détente.

Les avantages des fortes surchauffes se résument donc comme suit :

augmentation du rendement théorique du cycle de Rankine ;

augmentation du rendement propre des turbines (rendement rapporté à celui du cycle de Rankine correspondant) ;

longévité des aubages ;

diminution d'importance du condenseur et de la turbine pour une puissance donnée.

Ses inconvénients sont :

l'obligation d'employer des matériaux spéciaux assez coûteux ;

l'obligation de marcher à une charge pas trop faible

En cas d'allure forcée du foyer, la température de surchauffe croît si le surchauffeur est seulement soumis à la convection des fumées. Pour éviter cet inconvénient qui pourrait provoquer la brûlure des tubes, il convient de soumettre une partie du surchauffeur au rayonnement du foyer. On arrive ainsi à régulariser la température de surchauffe, mais alors, en cas de faible charge, la partie soumise au rayonnement est en danger de brûler.

Si un accroissement de charge se produit sans que l'on fasse varier l'allure du foyer, le volant d'eau intervient seul pour y parer, et dans ce cas, la surchauffe diminue.

Le surchauffeur est donc un organe qui diminue la souplesse de la chaudière.

2) Fort vide au condenseur.

Nous avons vu dans l'étude théorique que l'on ne peut guère atteindre un vide inférieur à 0,04 atmosphère.

Plus le vide est poussé, plus la quantité d'eau à faire circuler dans le condenseur est grande et plus est élevée la puissance de la pompe de circulation ; plus le travail absorbé par la pompe à vide est grand. Ce dernier point est d'ailleurs peu important car si les gaz incondensables exigent un travail plus élevé pour leur compression jusqu'à la pression atmosphérique, ils ont fourni un travail équivalent pendant leur détente dans la turbine en supposant que le rendement de la turbine et de la pompe à vide soient égaux à l'unité. On diminuera ce travail autant que possible par le dégazage de l'eau d'alimentation et par l'emploi de bons bourrages empêchant les rentrées d'air.

Un vide très poussé entraîne la présence de beaucoup d'humidité dans la vapeur. On emploiera néanmoins le vide économiquement le plus poussé et on tâchera de pallier à un excès d'humidité par une forte surchauffe initiale ou par une résurchauffe.

Nous résumons comme suit l'effet d'un accroissement du vide au condenseur :

rendement élevé, augmentation de puissance et de prix de la pompe de circulation et de la pompe à vide, augmentation de l'importance de la turbine et du condenseur. Il faudra chercher le compromis le plus économique.

3) Pression élevée.

Nous avons vu que, théoriquement, il y a avantage, pour une température donnée de surchauffe, à adopter la plus haute pression de la vapeur sauf pour ce qui concerne la zône anormale comprise entre les températures de surchauffe de 325 à 400° pour lesquelles le rendement maximum est atteint pour des pressions comprises entre 110 et 225 atmosphères.

Les praticiens présentent beaucoup d'objections contre les hautes pressions de vapeur. Celles-ci exercent une forte influence aussi bien sur les générateurs de vapeur que sur les turbines et sur tous les organes de la centrale.

Influence des pressions élevées sur les générateurs.

Il pourrait sembler illogique que nous ayions à revenir ici sur ce qui concerne les générateurs que nous avons examinés au chapitre Ier. Dans ce chapitre, nous avons considéré seulement les moyens d'augmenter le rendement des générateurs sans nous occuper à proprement parler de leur construction qui dépend surtout de l'utilisation

La nature de la vapeur à produire n'a qu'une faible influence sur le rendement de production. C'est pour cette raison que nous devons aborder dans le présent chapitre la construction des générateurs sans avoir d'ailleurs à revenir au rendement de ceux-ci.

Le corps de la chaudière à haute pression ne peut plus être construit en tôles rivées à partir des pressions voisines de 60 atmosphères. En effet, les rivures déforcent les tôles d'une façon très importante. Aussi, serait-on obligé alors d'employer des tôles d'une épaisseur incompatible avec l'emploi des rivets. La pression que

ceux-ci exercent sur les tôles pourrait de plus devenir insuffisante pour assurer l'étanchéité. Le cintrage de tôles de fortes épaisseurs exige de plus un matériel spécial très coûteux. Aussi, pour les pressions supérieures à 35 atmosphères, emploie-t-on couramment des corps de chaudière en acier forgé.

Ces corps proviennent d'un seul lingot pesant parfois plus de cent tonnes. Ces lingots doivent subir pendant leur forgeage, plusieurs réchauffages à une allure d'autant plus lente que leur épaisseur est plus forte (danger de surchauffe et brûlure de l'acier).

D'après Roszak et Véron, les opérations de forge sont basées sur le schéma suivant :

étirage; trépanage en vue d'éliminer le noyau contenant les inclusions, soufflures, retassures et liquations; corroyage par étampage; étirage sur mandrin. Cet étirage allonge les défauts suivant les génératrices et permet de les déceler à l'épreuve de pression. Le corps est alors tourné à la dimension voulue si les fonds sont rapportés.

Les fonds peuvent être rapportés sur un corps forgé par rivure car on sait que les rivures circulaires subissent un effort deux fois plus faible que les rivures longitudinales. Les fonds sont alors emboutis hémisphériques ou très bombés. On peut encore rapporter les fonds ou même fabriquer toute une chaudière en utilisant les assemblages par soudure pour des pressions allant jusqu'à 100 kg./cm². Enfin, les fonds peuvent être eux-mêmes forgés avec le corps cylindrique.

L'épaisseur des fonds est plus forte que celle du corps et leur forme est souvent hémisphérique ou celle d'un goulot de bouteille. Ces formes résistent bien aux hautes pressions et permettent de réaliser facilement les trous d'homme.

Le corps est ensuite recuit pour détruire les tensions internes et s'opposer au vieillissement, percé pour les prises de vapeur, appareils de sécurité, tubes d'eau qui sont rivés ou mandrinés sur le corps. Il convient d'être excessivement prudent dans la construction de ces corps à haute pression. Aussi, l'association des propriétaires allemands a-t-elle prescrit des essais assez sévères.

Ces corps à haute pression peuvent atteindre des épaisseurs supérieures à 100 mm. (centrale de Weymouth) pour des diamètres intérieurs ne dépassant guère 1 mètre. Il va sans dire que l'adoption de diamètres beaucoup supérieurs à ces dimensions serait incompatible avec la sécurité. Leur prix deviendrait d'ailleurs exorbitant. Aussi, faut-il se limiter à des diamètres assez faibles, fût-on même obligé de recourir à de fortes longueurs pour obtenir le volant d'eau indispensable.

Il faut tenir compte de plus de la nécessité de déforcer le corps pour la jonction aux tubes d'eau. Ceux-ci sont d'une construction beaucoup plus aisée vu leur diamètre beaucoup moindre. Leur épaisseur sera beaucoup plus faible, ce qui est très heureux, car en fortes épaisseurs il leur serait impossible de résister à l'action de la chaleur du foyer.

Encore faut-il épurer l'eau d'alimentation d'une façon parfaite pour éviter les incrustations.

Les garnitures et les tuyauteries doivent être étudiées spécialement pour résister aux hautes pressions et aux hautes températures qui les accompagnent. On est amené dans cette voie à des résultats satisfaisants par l'emploi de métaux spéciaux (monel, acier stainless), verres spéciaux (pour niveaux d'eau) et par une construction prudente et soignée. Les joints demandent des précautions spéciales.

On a proposé de nombreux systèmes de chaudières à haute pression en vue de diminuer autant que possible le volume des réservoirs à haute pression.

On doit rechercher en même temps qu'un prix très bas, un volant d'eau élevé (souplesse), une circulation suffisante de l'eau pour obtenir une bonne vaporisation.

Or, la circulation naturelle et la séparation de l'eau et de la vapeur deviennent de plus en plus malaisées à mesure que la pression croît. Celà tient en grande partie au fait que la densité de la vapeur se rapproche de plus en plus de celle de l'eau.

Roszak et Véron admettent que la circulation naturelle et la vaporisation ordinaire suffisent jusqu'à 110 kg./cm² et qu'au delà, on doit recourir à des artifices pour y pourvoir.

Si l'on veut conserver un fort volant d'eau avec une grande souplesse, il est nécessaire d'utiliser plusieurs réservoirs habituellement protégés contre le contact des fumées qui, comme nous l'avons vu, nuirait fortement à la résistance des corps de forte épaisseur. Cette solution est trop coûteuse (chaudières Schmidt, Steinmuller, Borsig, Walter, Yarrow).

Aussi convient-il de réserver les hautes pressions pour une marche à puissance peu variable en donnant à la chaudière la souplesse la plus élevée que l'on puisse atteindre avec un seul réservoir à haute pression.

Les hautes pressions conviennent alors particulièrement bien pour desservir les unités de base dans de grandes centrales.

Aussi a-t-on adapté des chaudières Babcock et Wilcox cross-type à la production de vapeur à haute pression. La souplesse est obtenue dans une certaine mesure par variation du tirage. Le charbon pulvérisé confère d'ailleurs aux foyers une souplesse assez grande comme nous

l'avons vu. Il permet de plus d'utiliser des tubes d'eau et même des tubes de surchauffe soumis au rayonnement.

Roszak et Véron ont prouvé qu'il serait intéressant pour obtenir une surchauffe régulière, en dépit des variations d'allure de la chaudière, d'employer un surchauffeur chauffé en partie par rayonnement et en partie par convection.

D'autres chaudières ont été construites en vue d'éviter les réservoirs à fortes épaisseurs. A cet effet, on a adopté des petits corps cylindriques de faible épaisseur raccordés chacun à un petit nombre de tubes vaporisateurs (chaudières Duquenne à tubes verticaux).

Toutes les chaudières ci-dessus sont suffisantes pour autant que la circulation de l'eau et la séparation de la vapeur puissent se faire naturellement dans les tubes de vaporisation. Lorsque la pression devient trop élevée, il faut recourir à des artifices tels que ceux qui sont employés dans les chaudières Atmos, Löffler ,Brown-Boveri et Benson.

1) Chaudière Atmos.

La chaudière Atmos comporte des tubes vaporisateurs animés d'un mouvement rapide de rotation (300 à 375 tours par minute).

L'eau est foulée à une extrémité de ces tubes en quantité insuffisante pour les remplir et elle est entraînée en rotation avec le tube par des ailettes dont celui-ci est pourvu. L'eau est alors appliquée contre les parois par la force centrifuge et les bulles de vapeur moins dense que l'eau se dégagent au centre du tube où la vapeur est recueillie pour passer au surchauffeur.

Le coefficient de convection paroi-eau étant très bon

en l'absence du mouvement de rotation des tubes, la vaporisation n'est guère améliorée par ce mouvement des tubes. Par contre, les suies sont éliminées par le mouvement de rotation et la transmission de chaleur est améliorée de ce fait.

La vaporisation par unité de surface ne sera donc guère différente de celle de tubes fixes bien entretenus.

De plus, l'intérêt de ces tubes rotors diminue lorsque la pression croît, car la densité de la vapeur se rapproche de plus en plus de celle de l'eau et le mouvement de rotation perd tout intérêt sous la pression critique. La vitesse de rotation devra être d'autant plus forte que la pression sera plus élevée pour permettre le dégagement de la vapeur.

La rotation des tubes nécessite des mécanismes coûteux, des joints compliqués, une consommation d'énergie non négligeable. De plus, le prix d'une telle chaudière doit être très élevé.

Cette chaudière ne paraît pas devoir être avantageuse sous cette forme.

D'après une communication de M. Ehlinger au congrès international de mécanique générale (Liége 1930), une autre chaudière Atmos (construite par la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques serait constituée de rotors plus compliqués tournant à 20 tours par minute. L'eau n'y est plus collée contre les parois par la force centrifuge, mais elle s'établit à un certain niveau dans chacun des tubes laissant ainsi une grande surface pour le dégagement de la vapeur (voir fig. 53).

Les nouveaux rotors sont certainement beaucoup plus avantageux que les anciens quoique leur construction soit plus compliquée.

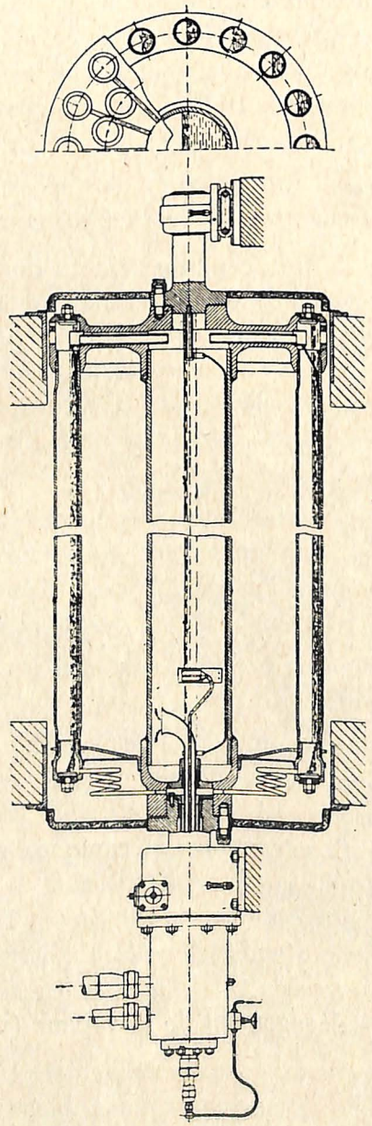


Fig. 53. — Chaudière Atmos.

En effet, les anciens rotors étaient constitués d'un seul gros tube de 25 à 35 centimètres de diamètre soumis à une haute pression et à une température élevée. On était donc forcé de leur donner une forte épaisseur et la température de ces rotors au contact des fumées devait être très élevée.

Au contraire, les nouveaux rotors en cage d'écureuil portent à leur périphérie une série de tubes de petit diamètre et de faible épaisseur résistant bien aux températures élevées et donnant au rotor une forte surface de chauffe.

Les gaz avant d'arriver au contact du gros tube central sont notablement refroidis par les petits tubes périphériques qui en outre le protègent contre le rayonnement.

Le gros tube central se trouve donc dans des conditions de résistance beaucoup meilleures que dans les anciens rotors. La surface de chauffe est énormément plus grande et le volume d'eau probablement plus élevé, ce qui contribuerait à donner de la souplesse à la chaudière.

Le taux de vaporisation très élevé (300 kg./m²/h) ne présente rien d'extraordinaire. L'eau réchauffée dans un économiseur entre dans le rotor à une température très proche de sa température d'ébullition et par suite, le rotor ne doit fournir à l'eau que sa chaleur de vaporisation qui est d'autant plus faible que la pression est plus élevée. Les tubmurs placés dans les mêmes conditions donnent des taux de vaporisation du même ordre de grandeur.

Le taux de vaporisation très élevé exige une épuration parfaite ou bien l'élimination du tartre à l'intérieur des tubes, ce qui se réalise automatiquement par des chaînes

de râclage et une purge continue. Il va sans dire que le frottement des chaînes amène une certaine consommation d'énergie, l'usure des chaînes et aussi celle des tubes rotors. L'absence du tartre permet l'attaque des tubes par le gaz si le dégazage n'est pas parfait.

La vitesse de rotation assez faible permet un certain dépôt de suies que l'on peut éliminer par soufflage.

On explique l'avantage de la forme des rotors sur les tubes de vaporisation fixes par le moindre travail mécanique de l'acier qui les constitue (température uniforme des parois successivement exposées au rayonnement, liberté de dilatation).

Des tubmurs fixes donnent cependant d'excellents résultats sans aucun ennui.

Si la chaudière Atmos proprement dite est moins coûteuse qu'une chaudière normale par suite de la fabrication en série des rotors et de la forme simple du casing, les appareils de récupération (économiseurs, réchauffairs) y sont beaucoup plus importants, car la surface de vaporisation n'absorbe qu'une faible partie du pouvoir calorifique du charbon.

Pour permettre un bon dégagement de la vapeur, il faut absolument empêcher le niveau de l'eau de s'élever au-delà de certaines limites; le bon refroidissement des tubes et surtout du tube central exige que le niveau de l'eau ne puisse descendre trop bas.

La chaudière Atmos est munie d'un dispositif très ingénieux de régulateur du niveau d'eau.

La puissance absorbée par rotor de 15 tonnes à l'heure ne serait pas supérieure à un cheval, ce qui est très faible.

Cette chaudière pourrait donc être avantageuse pour des pressions variant de 100 à 130 kg./cm². Pour les

pressions inférieures à ces limites, les chaudières tubulaires ont nos préférences.

2) Chaudière Löffler.

La chaudière Löffler ne comporte comme surface de chauffe qu'un simple surchauffeur à haute pression.

La vapeur surchauffée en provenant est utilisée en partie pour vaporiser un poids d'eau égal au poids de l'autre partie, celle-ci étant utilisée pour la production de force motrice (voir fig. 54).

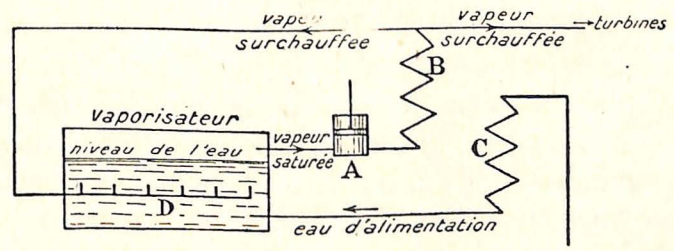


Fig. 54. — Chaudière Löffler.
A = pompe de circulation de vapeur.
B = surchauffeur.
C = économiseur ou réchauffeur d'eau d'alimentation.
D = tuyères à vapeur surchauffée.

La seule capacité est constituée par le vaporisateur qui consiste en un réservoir contenant de l'eau dans laquelle débouchent des tuyères alimentées en vapeur surchauffée.

De la vapeur saturée se dégage du vaporisateur, elle est comprimée par une pompe qui la refoule au surchauffeur. Cette pompe compense les pertes de charge dans le surchauffeur, la conduite de vapeur surchauffée du vaporisateur et celles des tuyères.

On évite ainsi la nécessité de réservoirs à haute pression d'autant plus coûteux qu'ils sont percés et on éli-

mine la difficulté du dégagement de la vapeur dans des tubes de petit diamètre.

La quantité de vapeur devant faire retour au vaporisateur est d'autant plus faible que la pression est plus élevée. En effet, la chaleur de surchauffe sert à fournir au poids de l'eau utilisée dans les turbines sa chaleur de vaporisation et celle-ci est d'autant moindre que la pression est plus haute.

L'alimentation peut se faire en eau impure, les dépôts ne servant qu'à calorifuger le vaporisateur.

Tous les éléments se trouvant dans le foyer sont constitués de petits tubes peu coûteux.

La pompe de circulation de vapeur absorbe une puissance d'autant plus faible que la pression est plus élevée : moindres dimensions de la pompe, vitesses moins grandes de la vapeur dans les conduites (moindre volume spécifique, moindre quantité de vapeur à faire circuler).

Cette chaudière exige un appareillage de sécurité assez coûteux. Elle présente les inconvénients suivants: on doit y surchauffer un poids de vapeur d'autant plus élevé que la pression est plus basse et, dans tous les cas, un poids beaucoup plus élevé que celui qu'il est nécessaire de surchauffer dans une installation normale. Or le taux de transmission de chaleur gaz-vapeur surchauffée est faible; aussi faudra-t-il une très grande surface de surchauffeur qui sera détruite si la pompe de circulation de vapeur vient à s'arrêter. Cette pompe absorbe d'ailleurs une puissance assez élevée, ce qui diminue dans une forte mesure le surcroît de rendement que l'on poursuivait par les fortes pressions. Si l'on arrivait avec cette chaudière à la pression critique, elle se confondrait avec la chaudière Benson. En effet, le vaporisateur n'aurait

plus de raison d'exister et l'installation consisterait en un économiseur placé en série avec un surchauffeur.

3) Chaudière Brown-Boveri.

La chaudière Brown-Boveri utilise encore la vapeur surchauffée pour provoquer la vaporisation mais sans devoir recourir à la pompe de circulation comme la chaudière Löffler. Cette chaudière est conçue comme suit (voir fig. 55) :

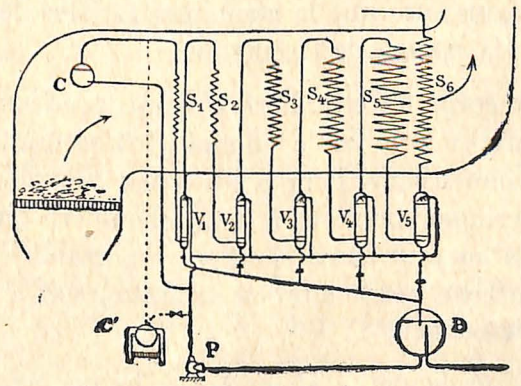


Fig. 55. — Chaudière Brown-Boveri.

Un petit corps de chaudière à haute pression fournit un poids de vapeur saturée égal à environ les 5 % du poids de vapeur que l'on veut produire. Cette vapeur est surchauffée; puis elle passe dans un saturateur qui produit un poids de vapeur saturée beaucoup plus élevé, mais à une pression un peu plus basse que celle de la vapeur initiale puisque le surchauffeur est le siège de pertes de charge.

Cette vapeur saturée est surchauffée pour passer à nouveau dans un saturateur et ainsi de suite jusqu'au dernier saturateur après lequel la vapeur est surchauffée et utilisée.

Le poids de vapeur croît après chacun des saturateurs qui doivent être alimentés en eau réchauffée. Une seule pompe suffit pour l'alimentation des divers saturateurs et l'eau qu'on y envoie peut être impure sans inconvénient.

Le volume de vapeur à faire circuler est beaucoup moins grand que dans la chaudière Löffler, la pompe de circulation est supprimée.

Cette chaudière nouvelle paraît être plus avantageuse et surtout plus sure que la chaudière Löffler dont la vie dépend de la pompe de circulation.

Le petit corps de chaudière à haute pression ne sera pas coûteux vu son faible volume; les saturateurs sont de faibles dimensions. Leur poids d'eau contribue à donner une certaine souplesse à cette chaudière qui malgré tout sera d'un prix assez élevé vu ses grandes surfaces de surchauffeur, ses nombreux saturateurs et les tuyères qu'elles contiennent.

Pour éviter la petite chaudière à haute pression, on peut prendre un poids de vapeur correspondant, à une pression quelconque, cette valeur provenant d'une autre chaudière. On comprime alors cette vapeur dans une pompe de circulation analogue à celle des chaudières Löffler mais de dimensions beaucoup plus faibles. La vapeur ainsi comprimée passe alors dans le premier surchauffeur puis dans le premier saturateur et ainsi de suite.

La chaudière Brown-Boveri ainsi que la chaudière Löffler exigent des appareils de récupération très développés car les fumées quittent les surchauffeurs à des températures très élevées.

4) Chaudière Benson (voir fig. 56).

Celle-ci construite par Siemens fonctionne sous la pression critique. Une pompe foule l'eau sous cette pression dans des tubes en série qui garnissent la chambre de combustion.

L'eau s'échauffe graduellement dans ces tubes jusqu'à la température critique où elle se vaporise sans ébullition, puis elle est surchauffée. La pression élevée ne constitue pas un grand danger puisqu'il n'existe aucun réservoir et que la masse d'eau en circuit est très faible.

Il va sans dire que le travail de la pompe d'alimentation n'est plus négligeable. De plus dans l'état actuel des turbines, on ne peut pas utiliser la vapeur sous la pression critique (zone humide atteinte trop tôt, fuites trop importantes).

Aussi est-on obligé de lui faire subir une détente préalable sans travail jusqu'à 100 à 150 atmosphères, ce qui abaisse sa température. Or, le travail de la pompe alimentaire serait beaucoup moindre à 100 atm. qu'à 225 atm., pression pour laquelle l'énergie consommée sera au moins égale à 5 % de l'énergie produite tandis qu'elle ne serait qu'environ 2 % de cette énergie à 100 atmosphères. De plus, on ne disposera d'aucun volant d'eau et la pompe alimentaire à la pression critique ne pourra avoir que très peu de souplesse.

Les fumées sortant très chaudes de la chaudière proprement dite servent d'abord à surchauffer la vapeur, puis à la resurchauffer après sa détente sans travail et enfin à réchauffer l'air de combustion. Il n'y a pas d'économiseur, la chaudière proprement dite n'étant autre qu'un économiseur puisque la vapeur à la pression critique n'a pas de chaleur de vaporisation. Pour être certain qu'il n'y aura pas d'ébullition (dégagement diffi-

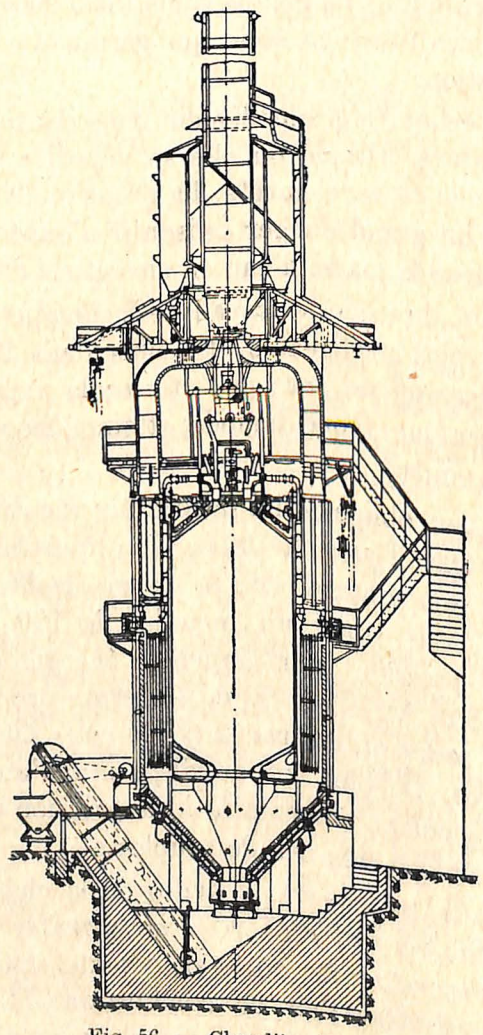


Fig. 56. — Chaudière Benson.

cile de la vapeur dans les tubes en série), on marche à une pression supérieure à la pression critique.

La détente sans travail jusqu'à 100 atm. s'effectue dans une vanne de détente et par pertes de charge dans un surchauffeur. A pleine charge, la vanne est ouverte, la détente dans le surchauffeur étant suffisante; aux charges partielles, on doit régler l'ouverture de la vanne.

Conclusion à propos des chaudières.

En résumé, les divers types nouveaux de chaudières ne paraissent convenir que pour des pressions très élevées. Leur surface de chauffe et leur prix seront aussi fort élevés. Les auxiliaires absorbent une puissance importante : mouvement des rotors de la chaudière Atmos, pompe de circulation de vapeur de la chaudière Löffler, pompe d'alimentation d'eau de ces diverses chaudières mais surtout de la chaudière Benson.

Les échanges sont ralentis par le fait de la température élevée du fluide à chauffer et de sa nature (surchauffeurs Löffler et Brown-Boveri surtout). Des organes de récupération importants s'imposent.

La disposition en série des tuyauteries dans les chaudières Löffler, Brown-Boveri et Benson entraînent de fortes pertes de charge qui doivent être compensées par les pompes, totalement pour les chaudières Löffler et Benson, en partie seulement pour les chaudières Brown-Boveri.

Les tubes sont difficiles à nettoyer (Benson, Atmos), à remplacer et à démonter. Ces tubes soumis à des hautes pressions sous températures élevées sont dans des conditions très dures de sollicitation mécanique, ce qui exigera

sans doute fréquemment l'emploi d'aciers spéciaux ou calorisés et le remplacement de tubes.

Ces chaudières manquent de souplesse vu leur faible volant d'eau. On ne peut compter à cet égard que sur la souplesse du foyer et des pompes. La chaudière Löffler exige une chaudière auxiliaire pour la mise en marche, les chaudières Atmos et Benson nécessitent une épuration et un dégazage parfaits de l'eau (sauf la nouvelle chaudière Atmos à chaînes de râclage).

Tous ces inconvénients s'accumulant semblent établir que l'on devra abandonner toutes ces solutions particulières sauf peut-être la chaudière Brown-Boveri et la chaudière Benson qui semblent être moins coûteuses que les deux autres et plus sûres de fonctionnement.

Cependant, chaque fois qu'on le pourra (en dessous de 110 kg./cm²), on devra se borner à employer les anciens types à circulation naturelle adaptés pour les hautes pressions, avec un seul réservoir. On pourra aller ainsi jusqu'aux pressions d'environ 100 à 110 kg./cm². Avec ces anciens types, on obtiendra une plus grande souplesse, une sécurité de marche plus grande, des sollicitations mécaniques moins fortes, une moindre puissance des auxiliaires.

Le rendement sera peu différent de celui qu'on obtiendrait sous la pression critique pour une même température de surchauffe.

On trouvera dans l'ouvrage cité de Roszak et Véron d'utiles indications quant à la répartition de la surface de chauffe entre les divers organes d'une chaudière (tubes de vaporisation, surchauffeur, économiseur, réchauffair) en fonction de la pression et de la surchauffe.

Influence des pressions élevées sur l'utilisation de la vapeur.

Un inconvénient qui se présente immédiatement à l'esprit est le fait que malgré les hautes surchauffes, la détente atteint rapidement la zone de la vapeur saturée. Le taux d'humidité est d'autant plus élevé que la pression initiale est plus forte. Il pourra même se produire souvent que le titre de la vapeur devienne trop bas et que l'on soit obligé de resurchauffer la vapeur avant qu'elle atteigne la zone de saturation. Dans ce cas cependant, il ne faudra plus étudier séparément les effets des hautes pressions et des resurchauffes sur le rendement, mais bien leur effet simultané puisque ces deux procédés sont forcément employés en même temps.

Nous devrons donc d'abord augmenter la pression d'un cycle sans qu'il soit nécessaire de resurchauffer; puis, suivant les indications de la théorie, nous pourrons encore élever la pression, mais alors la pratique nous forcera à resurchauffer la vapeur. Nous devrons encore chercher quelles sont les meilleures conditions pour la resurchauffe. C'est ce que nous étudierons sous la rubrique « Resurchauffe ».

La vapeur à haute pression étant très dense, le corps de turbine à haute pression sera de faibles dimensions, ce qui lui permettra de résister à des pressions et des surchauffes élevées même pour de fortes puissances. Il en serait de même pour le premier cylindre d'une machine alternative compound.

Afin d'éviter des pertes trop conséquentes dues à la présence d'eau dans les derniers aubages, on cherche à la séparer et à l'extraire par draînage vers les réchauffeurs aux points des prélèvements de vapeur.

L'accroissement du rendement dû à l'élévation de la

pression permet d'utiliser souvent un moindre poids de vapeur pour une puissance et une surchauffe données.

Ce poids sera encore fortement diminué dans les roues à basse pression si l'on effectue un ou plusieurs prélèvements. Ce fait permettra de réaliser des puissances très élevées sans devoir recourir à des ailettes de hauteur exagérée dans les roues à basse pression ou à des roues doubles à basse pression. On arrivera aussi grâce à ces procédés à obtenir et à utiliser avantageusement un bon vide au condenseur ou bien à augmenter la puissance unitaire en recourant alors à des ailettes à basse pression de hauteur maxima admissible. Les turbines seront d'autant mieux à l'abri des variations de température et des dilatations qui en proviennent que la pression sera plus élevée. En effet, ce qui varie surtout avec la charge d'une turbine, c'est la température de la vapeur en zone surchauffée. La température en zone saturée varie très peu avec la charge. Or, la longueur de la détente en zone surchauffée pour une température donnée de surchauffe initiale est relativement d'autant moindre que la pression est plus élevée. Ainsi de la vapeur à 100 atm. 500° atteint déjà la zone saturée à 10 atm. (175°), tandis que la vapeur à 20 atm. 500° atteint la zone saturée à 0,8 atm. 95°.

Les variations de température de surchauffe affecteront donc une partie beaucoup plus grande de la turbine à basse pression que pour celle à haute pression.

Nous savons que l'humidité en fin de détente a pour effet d'accroître les frottements et de diminuer fortement le rendement propre des machines. Aussi, pour une surchauffe initiale fixe, le rendement interne sera d'autant plus bas que la pression initiale est plus élevée. Les prélèvements diminuant la quantité de vapeur affectée par les pertes dues à l'humidité accroîtront donc le rendement interne, de même qu'une forte surchauffe initiale et qu'une resurchauffe.

Ces deux derniers procédés retardant l'entrée de la vapeur en zone saturée diminuent le champ réservé aux prélèvements. Il faudra donc rechercher la solution qui donne, non pas le rendement interne le plus élevé, mais bien celle qui donne le rendement global le plus élevé. Or, celui-ci est égal au rendement du cycle théorique multiplié par le rendement propre des machines, celui-ci étant d'ailleurs égal au produit du rendement interne par le rendement mécanique ou organique de la machine.

Nous avons vu dans l'étude théorique quelles étaient les conditions à réaliser pour obtenir un cycle théorique de rendement maximum. Nous venons de constater que le rendement interne baisse quand la pression augmente.

Le rendement mécanique ou organique est affecté par des facteurs de sens divers: pour une puissance et une surchauffe données, le poids de vapeur est d'autant moindre que la pression est plus élevée. Il n'en résulte pas que le poids du rotor soit moindre, car aupoids de la partie à basse pression, il faut ajouter celui de la partie à haute pression. Il en résultera habituellement un accroissement du poids du rotor, d'où un accroissement de la puissance absorbée par les paliers.

Le tambour plus long provoquera de plus fortes pertes par frottements sur la vapeur. Il en sera de même si une roue d'action est soumise au frottement de vapeur plus dense. Les frottements par ventilation seront moindres (diamètre et vitesse périphérique moindres pour la haute pression).

Le poids de vapeur à faire évoluer pour obtenir une puissance donnée ne décroît d'ailleurs lorsque la pression croît que dans certaines limites. En dehors de ces limites, le contraire pourra se produire.

Tenant compte de tous ces éléments, Hirshfeld et Ellenwood ont pu montrer que le rendement propre des turbines diminue lorsque la pression augmente.

Il en résultera un rendement global de la machine ou rendement sur l'arbre (rendement propre multiplié par le rendement théorique du cycle) atteignant un maximum pour une certaine pression.

Ce rendement maximum dépend des modifications apportées au cycle de Rankine (prélèvements, resurchauffes). Certains exemples traités montrent que ce rendement maximum croît si l'on effectue des resurchauffes et des prélèvements et que la pression optima varie pour ces cycles perfectionnés entre 50 et 120 atmosphères.

La puissance de l'unité considérée a évidemment aussi une influence à cet égard puisque le rendement propre d'une machine croît avec sa puissance.

Suivant la perfection du cycle utilisé, on devra donc, pour obtenir le rendement maximum sur l'arbre, admettre une pression que l'on classe parmi les hautes pressions (au-dessus de 30 kg./cm²).

4) Fluides à faible chaleur spécifique.

De tels fluides ne sont pas encore connus à présent.

On ne peut qu'inciter physiciens et chimistes à les rechercher.

5) Cycles superposés.

Parmi ces cycles, le seul qui soit utilisé industriellement est le cycle mercure-eau. L'étude théorique montre que ce cycle donne un rendement très élevé. Malheureusement, ce procédé se heurte à des difficultés pratiques presqu'insurmontables.

Tout d'abord, le prix du mercure, déjà très élevé pourrait devenir rapidement inabordable si quelques centrales à mercure venaient encore à se créer.

Ensuite, le mercure jouissant sous certains rapports de grands avantages au point de vue physique (c et C_p très faibles) présente des inconvénients au même point de vue, sous d'autres rapports.

Il se prête assez mal à la transmission de la chaleur par convection pour plusieurs raisons dont les plus importantes sont certainement sa densité élevée et le fait qu'il ne mouille probablement pas les parois des tubes de vaporisation.

Le phénomène de convection peut se schématiser comme suit : la chaleur traversant le tube vaporisateur se transmet par conductibilité au film liquide qui adhère au tube. Ce film mauvais conducteur de la chaleur est soumis à des tourbillons en cas de circulation rapide et il échauffe la masse par mélange ou, en cas de circulation lente, surtout par conductibilité. La transmission est particulièrement rapide dans le cas de mouvements tourbillonnaires.

L'échauffement du mercure est probablement moins facile que celui de l'eau par suite de l'absence de ce film. Ce fait ainsi que la forte densité du mercure expliquent sans doute sa mauvaise circulation et l'échauffement des tubes vaporisateurs. Pour provoquer la circulation, on utilise des tubes concentriques spéciaux très coûteux (voir fig. 57).

Le tube de descente du mercure A se trouve au centre. Un tube concentrique B est séparé de A par un gaz mauvais conducteur de la chaleur. Ce gaz s'oppose au réchauffage et à la vaporisation du mercure pendant sa

descente dans le tube A. Enfin, le tube vaporisateur C est en contact extérieur avec les gaz de la combustion.

Le mercure et sa vapeur s'opposent à l'emploi de certains métaux.

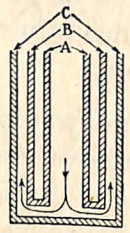


Fig. 57.
Coupe diamétrale schématique d'un tube vaporisateur à mercure.

La vapeur du mercure étant beaucoup plus dense que celle de l'eau, une détente correspondant à une chute calorifique donnée ne produit qu'une vitesse beaucoup moindre. Ceci oblige à employer des turbines tournant à un nombre de tours inférieur à 1.000.

La moindre vitesse de la vapeur n'entraîne pas nécessairement un meilleur rendement interne, les pertes par frottements croissant avec la densité de la vapeur.

Il faut absolument limiter les fuites de vapeur en employant des bourrages spéciaux coûteux et cela pour deux raisons : parce que le mercure perdu doit être remplacé au prix d'une dépense élevée et parce que les vapeurs de mercure sont toxiques.

Les fuites ne peuvent se produire que pendant la détente au-dessus de la pression atmosphérique. Elles sont décelées par des indicateurs au sélénium.

Il faut encore s'opposer absolument aux rentrées d'air pendant la détente en-dessous de la pression atmosphérique, car les vapeurs de mercure sont très oxydables, d'où

des pertes de mercure et des obstructions dans les conduites.

Le mercure étant détendu est condensé dans un condenseur servant de vaporisateur d'eau sous pression.

Nous avons déjà vu qu'un kilogramme d'eau pouvait condenser environ 10 kg. de vapeur de mercure. Le mercure condensé peut retourner à la chaudière à mercure par simple gravité si la pression n'est pas trop élevée. Le restant de l'installation est une installation motrice à vapeur d'eau comprenant : surchauffeur, turbine à basse pression, condenseur et réchauffeur d'eau d'alimentation par soutirages.

La présence du mercure complique donc fortement l'installation et en augmente considérablement le prix.

On ne peut aspirer à obtenir une chaudière à fort volant de mercure vu le prix de celui-ci. Toute la souplesse devra donc provenir du volant d'eau constitué par le condenseur à mercure.

Pour toutes les raisons ci-dessus: mauvaise aptitude à fixer la chaleur, hautes températures des fumées, coût trop élevé des installations et du mercure, danger d'intoxication, etc., les centrales au mercure ne peuvent entrer dans la pratique courante.

Une installation a cependant donné un excellent rendement à South Meadow et une nouvelle installation plus puissante a été créée à Shenectady.

Le mercure présente quelques avantages d'ordre secondaire : il ne contient pas d'impureté ; il ne demande pas de pompe d'extraction.

6) Resurchauffes.

Nous avons déjà vu que si l'on part de vapeur à très haute pression, la teneur excessive d'humidité de cette vapeur en fin de détente exige, par crainte d'une usure

trop rapide des aubages, que l'on effectue une ou plusieurs resurchauffes.

La resurchauffe considérée seule amène parfois un accroissement de rendement théorique. Elle amène toujours un accroissement du rendement interne de la turbine et même, peut-on dire, du rendement mécanique.

Il en résultera presque toujours un accroissement du rendement sur l'arbre.

Mais on ne doit pas considérer ainsi la resurchauffe en elle-même, car, habituellement, on n'utilisera la resurchauffe que si elle est indispensable, c'est-à-dire conjointement avec les hautes pressions, surtout si celles-ci ne s'accompagnent pas d'une surchauffe initiale.

Ainsi, supposons qu'on utilise de la vapeur à 100 atm. 400°. Une détente adiabatique réversible recouperait la courbe de saturation à 27,5 atm. 230° et, au condenseur à 0,04 atm., le titre serait 0,71.

Si même la turbine n'avait qu'un rendement interne de 70 %, le réchauffage dû à l'irréversibilité et aux frottements serait de :

$$0{,}3 \times 292 = 87{,}6 \text{ calories,}$$

soit une chaleur totale à l'émission de :

$$446 + 87{,}6 = 533{,}6 \text{ calories}$$

ce qui correspond au titre réel de 0,87.

Ce titre est encore insuffisant si l'on suit le conseil de Gleichmann de ne pas tolérer plus de 8 % d'humidité.

Si l'on partait de vapeur à 100 atm. 450° le résultat pratique pour le même rendement serait un titre de 0,945, titre suffisant.

Chaque fois donc que l'on pourra atteindre 500° de surchauffe à l'admission de la turbine, il ne sera pas indispensable de resurchauffer.

Aux charges partielles, la surchauffe sera moins élevée mais la détente sans travail qui se produira à l'admission augmentera le titre à la fin de la détente.

Mais jusqu'à présent, on n'utilise de telles surchauffes que dans des installations d'essai et, en général, on se tient encore en-dessous de 400° de surchauffe.

En Europe, on cherche à éviter les resurchauffes. Aussi pour une surchauffe initiale donnée limite-t-on la pression à une valeur telle que le pourcentage d'humidité ne soit pas excessif en fin de détente.

En Amérique au contraire, plusieurs grosses centrales utilisent la resurchauffe.

Celle-ci présente plusieurs inconvénients en pratique.

Elle exige une installation de resurchauffe qui se trouve soit dans la centrale de chauffe, soit dans la salle des turbines :

1° Dans le premier cas, les conduites de vapeur à resurchauffer et de vapeur resurchauffée sont très longues et elles créent des pertes de charge qu'il faut ajouter à celles du resurchauffeur proprement dit. Ces pertes de charge peuvent dans ce cas atteindre une valeur assez élevée.

Il faut encore tenir compte des pertes de chaleur dans ces conduites. Lors des variations de charge de la turbine, la resurchauffe variera et, si la charge devient trop faible, les tubes du resurchauffeur pourraient même être brûlés.

Ce resurchauffeur ne peut utiliser que des fumées à haute température et son rendement serait très faible si une chaudière ne lui était adjointe.

Cette chaudière conduite pour donner une resurchauffe constante subira le contre-coup des variations de charge de la turbine et elle aura un mauvais rendement.

De plus, si à un moment donné, l'admission de vapeur vive était coupée, la vapeur se trouvant dans les conduites et dans le resurchauffeur pourrait emballer la turbine en se détendant dans sa partie à basse pression.

Pour éviter ces inconvénients, la conduite amenant la vapeur resurchauffée à la turbine est munie d'une soupape d'admission fermée par le régulateur en même temps que la soupape haute-pression. Cette manœuvre s'effectue par un relai électrique qui, au même moment, ouvre des portes à la façade de la chaudière de resurchauffe et coupe le tirage forcé. De cette façon, les tubes du resurchauffeur sont rafraîchis par l'air relativement froid qui circule dans la chaudière.

2° Le resurchauffeur se trouvant dans la salle des machines sera constitué d'échangeurs utilisant comme fluide chauffant de la vapeur vive ou de la vapeur déjà détendue et soutirée à haute pression. On règlera aisément la température de resurchauffe par variation de la quantité de vapeur vive admise. Les pertes de chaleur et de charge sont très réduites de même que le prix et l'encombrement.

Mais la resurchauffe est d'autant plus avantageuse qu'elle est poussée plus haut. A cet égard, la première solution est plus avantageuse.

Des calculs effectués par Brown-Boveri, il résulte que le cycle le plus avantageux sans resurchauffe serait celui qui utilise la vapeur à 100 atm. 450° (limite de surchauffe admissible), tandis qu'avec resurchauffe, la vapeur à 120 atm. 450° donnerait le rendement le plus élevé.

Les consommations respectives seraient : 3,270 calories par kwh. et 3,050 cal./kwh., soit un bénéfice de 6.5 % de la consommation lorsqu'on utilise la resurchauffe par les fumées.

D'après le même constructeur, la resurchauffe par la vapeur vive ne pourrait donner qu'un bénéfice de 1 à 1,6 %.

Il nous paraît que la resurchauffe pratiquée à Mannheim doive donner un bénéfice plus élevé. Dans cette centrale, la vapeur est produite à 100 atm. 460°. La vapeur détendue à 19,5 kg. 250° est resurchauffée par de la vapeur vive qui se condense. On arrive ainsi à 300°. Cette vapeur partiellement resurchauffée passe alors dans un deuxième resurchauffeur où elle est portée à 360° par toute la vapeur vive qui se refroidit de 460 à 430°, température d'admission à la turbine.

On admet que le surchauffeur se comporte bien jusqu'à une température de 460° mais on préfère n'admettre la vapeur à la turbine qu'à une température plus basse.

Quoi qu'il en soit, on limitera la resurchauffe de façon que la vapeur soit légèrement humide en fin de détente.

La resurchauffe ainsi conçue restreint le champ favorable aux soutirages. Aussi constate-t-on presque partout en Amérique que les économiseurs sont conservés en série avec des réchauffeurs par vapeur soutirée. La présence des économiseurs limite alors le réchauffage de l'air de combustion, celle-ci s'effectuant souvent sur grille mécanique (Philo, Crawford, Weymouth).

Ainsi, on se trouve dans la situation suivante: ou bien compliquer fortement l'installation pour réaliser une resurchauffe notable dans les fumées avec un bénéfice important, ou bien compliquer l'installation d'une façon moindre, mais obtenir un bénéfice faible par resurchauffe à la vapeur vive; dans tous les cas, voir restreindre le champ d'application des soutirages.

Par crainte de ces inconvénients, on n'applique guère la resurchauffe en Europe, mais, à défaut de resurchauffe, on applique le réchauffage de l'eau d'alimenta-

tion d'une façon plus poussée par vapeur soutirée (170° à Issy-les-Moulineaux; 140° à Rummelsburg; 195° à Langerbrugge).

On parvient ainsi à éviter les économiseurs et à réchauffer l'air de combustion d'une façon très notable.

Brown-Boveri a même une tendance à rejeter la resurchauffe pour les très hautes pressions. Pour éviter les ennuis de l'humidité dans la vapeur, il cherche à séparer l'eau de celle-ci dans la turbine même.

L'eau est séparée entre les cylindres et entre chacune des rangées d'aubes des derniers étages par des canaux spéciaux d'où elle passe au condenseur ou aux réchauffeurs d'eau d'alimentation.

Disons sous caution, d'après Brown-Boveri lui-même, que ce procédé serait plus économique que la resurchauffe.

En tous cas, il diminuerait le coût de l'installation, supprimerait les pertes de charge des resurchauffeurs et tendrait tout comme la resurchauffe (c'est son seul grand avantage) à augmenter le rendement interne de la turbine et à diminuer l'usure des roues à basse pression. Si la séparation de l'eau est efficace, nous aurions une préférence pour ce procédé.

7) Soutirages.

En pratique, les soutirages sont moins avantageux que ne l'indique la théorie, car il est impossible que de la vapeur à la température $t°$ amène de l'eau à la même température dans un réchauffeur par surface.

Par mélange, l'opération pourrait se rapprocher davantage de la théorie.

Le plus grand nombre des réchauffeurs fonctionnent par surface. Celà répond à une nécessité, car l'eau d'alimentation comprimée par la pompe alimentaire est à une pression différente de celle de la vapeur soutirée .

Si l'on voulait effectuer le réchauffage par mélange de l'eau avec la vapeur soutirée, l'eau devrait subir une détente pour entrer dans le premier réchauffeur qui fonctionne souvent en-dessous de la pression atmosphérique, ceci n'étant vrai que si l'eau est puisée dans un réservoir soumis à la pression atmosphérique (eau d'appoint, bâche alimentaire). Pour ce qui concerne l'eau venant du condenseur, elle devrait subir une première compression.

L'eau réchauffée dans le premier réchauffeur par mélange serait alors aspirée par une deuxième pompe qui la comprimerait jusqu'à la pression du 2e soutirage et ainsi de suite. Ce système exigerait un grand nombre de pompes. Aussi n'est-il presque jamais employé intégralement sous cette forme. Par contre, il arrive souvent qu'un réchauffeur au moins fonctionne par mélange. Il sert alors de dégazeur de l'eau d'alimentation (voir fig. 21 Kreg-Cochrane donnée au chapitre Ier).

Quoi qu'il en soit, le rendement est inférieur au rendement théorique, d'autant plus que par crainte d'une vaporisation pouvant donner lieu à des coups de bélier dans les réchauffeurs, on limite souvent le réchauffage à une température d'environ 50° inférieure à la température de saturation à la chaudière. Par suite de l'impossibilité de porter l'eau à la température de la vapeur soutirée, on est obligé de soutirer un poids de vapeur inférieur au poids théorique. De plus, la vapeur soutirée, de même que l'eau réchauffée, est affectée par des pertes de chaleur vers l'extérieur.

Pour pallier à ces inconvénients, on est parfois amené à effectuer des soutirages dans la zone surchauffée.

Ceci permet de porter l'eau à une température assez

élevée et même d'éviter un économiseur en série avec les réchauffeurs.

Par contre, ce soutirage a un moins bon rendement que celui qui s'effectue en zone saturée : la différence de température entre la vapeur soutirée et l'eau réchauffée est très forte.

On ne peut guère atteindre par ce moyen une température de l'eau supérieure à la température de saturation correspondant à la pression du soutirage. De plus, la vapeur ainsi soutirée était encore apte à fournir du travail avec un bon rendement propre.

Il arrive fréquemment que l'on récupère des fuites de vapeur aux bourrages en vue de réchauffer l'eau d'alimentation en série avec les réchauffeurs à vapeur soutirée. Ces fuites donnent le plus souvent de la vapeur surchauffée, car les fuites ne se produisent qu'aux pressions élevées et elles s'accompagnent d'une détente sans travail. Aussi conviendra-t-il habituellement de désurchauffer cette vapeur avant de l'introduire dans un réchauffeur d'eau par surface.

Enfin, on pourra encore réchauffer l'eau d'alimentation par la vapeur à pression relativement élevée rejetée par les moteurs de commande des auxiliaires, ceux-ci ne profitant que d'une faible détente de la vapeur vive.

Les auxiliaires dans ce cas absorbent un poids notable de vapeur vive; leur rendement en travail sera faible, mais comme ils fonctionnent à contrepression, leur rendement thermique total est proche de l'unité.

Il convient de voir si ce dernier système ne serait pas préférable à celui des soutirages.

Comparaison soutirages-auxiliaires à échappement récupéré.

En réglant correctement les pressions d'échappement des auxiliaires, il serait possible d'arriver exactement au même résultat, au point de vue du réchauffage de l'eau d'alimentation, qu'en effectuant des soutirages à la machine principale.

De cette façon, chacun des auxiliaires devrait être pourvu de son propre moteur à vapeur et muni de son système de régulation pour sa pression à l'échappement et pour sa puissance.

Ce système amènerait malheureusement une complication extrême de conduites de vapeur (admission et échappement) parcourues chacune par un débit relativement faible de vapeur, malgré la marche à contre-pression, la puissance des auxiliaires étant peu élevée. Toutes ces conduites seraient affectées par un refroidissement très notable vers l'extérieur et leur prix serait élevé.

Au point de vue du rendement thermique total, les pertes de charge dans ces conduites n'auraient aucune influence puisque l'échappement est récupéré, mais au point de vue économique, il n'en est plus de même, car la portion de l'énergie de la vapeur qui est transformée en travail a plus de valeur que celle qui reste sous forme d'énergie thermique.

Le rendement propre de tous ces petits moteurs est faible (rendement organique).

La marche à contrepression pourrait d'ailleurs présenter des inconvénients en cas de fortes variations de charge, les variations de puissance et de demande de vapeur d'échappement n'étant pas nécessairement du même ordre de grandeur.

Les soutirages effectués sur la machine principale éliminent ces divers inconvénients. De plus, ils sont particulièrement utiles si l'on désire employer des machines de grosse puissance. La réalisation de celles-ci dépend surtout du conditionnement des roues à basse pression et de l'échappement.

Nous avons déjà vu que, par suite de la nécessité de limiter le rayon des roues à basse pression et la hauteur de leurs aubages tout en obtenant une bonne utilisation du vide au condenseur, on pourrait être obligé d'employer plusieurs corps à basse pression et des échappements multiples. Or, le soutirage réduit considérablement la masse de la vapeur à basse pression (réduction de l'ordre de 20 %). Aussi permet-il de réaliser des turbines de très forte puissance sans devoir recourir aux artifices ci-dessus.

Les prélèvements permettent encore de réduire notablement la surface du condenseur ou, pour une même surface, d'obtenir un meilleur vide.

L'emploi du soutirage supprimera donc les diverses turbines de commande des auxiliaires ,turbines dont le rendement mécanique est faible vu leur petite puissance.

Le rendement de ces turbines peut même être inférieur au rendement combiné d'une turbo-génératrice fournissant toute la puissance auxiliaire et des moteurs électriques de commande de ces auxiliaires.

Les réchauffeurs à surface sont le siège d'échanges actifs entre de la vapeur en voie de condensation et de l'eau pure. Aussi leur surface sera-t-elle assez faible d'autant plus que la circulation des deux fluides s'y fait à contre-courant.

Si les réchauffeurs ne sont pas munis de régulateurs automatiques de pression de vapeur, il est bon que la

pompe de circulation soit mue par une turbine sur laquelle s'effectuent les soutirages. On obtient ainsi une certaine autorégulation de la température de réchauffage car dans ce cas, les pression et température de vapeur soutirée et le débit d'eau varient dans le même sens que la charge.

L'eau qui provient de la condensation de la vapeur soutirée peut être entraînée par aspiration avec l'eau réchauffée, à la sortie du réchauffeur. En cet endroit, les températures des deux eaux considérées sont presque les mêmes.

On peut encore produire le réchauffage sans pompes ni réchauffeurs en foulant l'eau dans un Venturi à une pression supérieure à celle de la chaudière. Les différentes prises de vapeur sont alors raccordées chacune à une section du Venturi. Les échanges dans ce cas se font par mélange.

Les soutirages ont donc le grand avantage sur les auxiliaires à échappement récupéré de simplifier fortement l'installation et l'exploitation. Cependant, il peut arriver que le réchauffage de l'eau par soutirage ne soit guère poussé et que l'on doive employer en série un économiseur avec les réchauffeurs.

Dans ce cas, on pourra parfois estimer préférable de conserver certains auxiliaires à échappement récupéré qui donneront à l'eau d'alimentation le surcroît de calories que l'économiseur aurait dû lui donner. On parviendra ainsi à supprimer l'économiseur et à réchauffer fortement l'air de combustion. Si l'appareillage de prélèvement existe, il sera même souvent indiqué de ne pas utiliser l'air et l'huile des génératrices électriques pour le réchauffage de l'eau.

Roszak et Véron l'établissent comme suit :

Si les pertes mécaniques et électriques de la génératrice se montent à 4 % et que le rendement de l'installation motrice soit de 25 %, les pertes correspondent à 1 % du pouvoir calorifique du charbon, ce qui permet de réchauffer l'eau d'alimentation de 6,7°. Or, on obtiendra la même élévation de température en soutirant

$$\frac{6,7}{550} = 1,2\ \%$$ de la vapeur admise prise à 50°,

température moyenne de l'air et de l'huile des paliers. Si l'on est parti de vapeur à 24,5 kg. et 420° de surchauffe, cette vapeur a donné 85 % de son pouvoir énergétique. La perte de travail due au soutirage de 1,2 % de vapeur vaut :

$$1,2 \times 0,15 = 0,2\ \%,$$

perte de travail qui sera compensée par une admission de 0,2 % de vapeur en plus, ce qui est négligeable et ce qui permet de supprimer le coûteux appareillage de récupération de la chaleur contenue dans l'air de refroidissement des génératrices et dans l'huile des paliers.

Nous avons déjà signalé à plusieurs reprises que le domaine convenant aux soutirages à haut rendement était celui de la vapeur saturée et que ce domaine était d'autant plus étendu que la pression était plus élevée pour une surchauffe donnée.

Le réchauffage dû aux frottements dans la détente, une forte surchauffe initiale et les resurchauffes, auront donc pour effet de diminuer l'intérêt des soutirages.

Nous avons vu que dans le cas d'un cycle simple, il existe une certaine pression donnant un rendement total maximum. Les soutirages et la resurchauffe considérés

séparément ont pour effet d'augmenter cette pression optima.

Par contre, les charges partielles ont pour effet de diminuer ce rendement, car, aux charges partielles, l'admission se fait à une pression plus basse ; les soutirages auront donc lieu aussi à des pressions plus basses, ce qui diminue leur rendement (température moindre du réchauffage de l'eau d'alimentation malgré son faible débit) ; le rendement interne sera moins bon par suite des chocs à l'entrée des aubes (voir chapitre IV) ; la détente sans travail à l'admission et dans les aubages aura pour effet d'accroître l'entropie de la vapeur et, en cas de resurchauffe, celle-ci s'effectuant aussi à plus basse pression, la vapeur aura une tendance à s'échapper au condenseur à l'état surchauffé, malgré la limitation de la resurchauffe à une température constante.

Par la combinaison de la resurchauffe et des soutirages qui doivent s'effectuer, la première en zone surchauffée, les seconds en zone saturée, on obtiendra le rendement le plus élevé.

Cependant, l'installation sera de ce fait compliquée d'une façon notable et il est douteux que cette combinaison soit avantageuse au point de vue du prix de revient du kwh. sauf peut-être pour les très grosses installations.

Ce système n'est d'ailleurs certainement pas à conseiller pour les moyennes et les basses pressions.

En résumé, les soutirages et la resurchauffe permettent une augmentation du rendement ; ils amènent un accroissement du prix de l'installation ; ils rendent celle-ci plus compliquée, moins souple et plus dépendante des accessoires (surtout la resurchauffe par les fumées). Ils ont pour effet l'emploi des auxiliaires commandés par mo-

teurs électriques. On conserve cependant comme moyen de secours la commande par la vapeur des auxiliaires.

Remarquons que le rendement des soutirages est d'autant plus élevé que leur nombre est plus grand, ce qui accroît le prix de l'installation. Il faut rechercher le compromis le plus économique souvent obtenu pour deux ou trois soutirages.

Il faut prendre la précaution de placer sur les conduites de vapeur soutirée des clapets de retenue qui empêchent le retour à la turbine de la vapeur aux moments où l'admission serait fermée par le régulateur. Sinon, la turbine pourrait s'emballer.

Ajoutons que le passage de l'eau d'alimentation dans les réchauffeurs entraîne des pertes de charge accroissant quelque peu le travail à fournir par la pompe d'alimentation.

III. — *Services auxiliaires.*

Comme nous l'avons vu, ceux-ci sont avantageusement commandés par moteurs électriques.

Les auxiliaires prennent une importance d'autant plus grande que l'on emploie des cycles plus perfectionnés, l'amélioration du cycle ayant d'ailleurs des influences contradictoires sur les divers auxiliaires.

Aussi, la puissance des auxiliaires croît-elle avec la perfection de ces cycles et on en arrive à réaliser des installations qui comportent une turbine et une génératrice auxiliaires, ou bien seulement une génératrice auxiliaire commandée par la turbine principale. Enfin, on peut encore fournir le courant aux moteurs auxiliaires par transformation du courant principal.

Il est intéressant de voir quel est, parmi ces trois systèmes, celui qui donne le rendement économique le plus élevé : c'est incontestablement celui qui consiste à alimenter les moteurs auxiliaires par transformation du courant principal, car le gros turbo-alternateur principal aura un rendement nettement plus élevé qu'un groupe auxiliaire ou même qu'une génératrice auxiliaire malgré la perte d'énergie au poste de transformation. Le prix du poste de transformation sera beaucoup moins élevé que celuid'une turbo-génératrice ou même que celui d'une génératrice auxiliaire.

D'ailleurs, lorsque l'on installe un groupe turbo-générateur auxiliaire, c'est fréquemment en vue d'employer la turbine de ce groupe comme turbine de réchauffage, c'est-à-dire comme turbine spéciale à contre-pression et à prises de vapeur qui, à elle seule, produit le réchauffage de l'eau d'alimentation.

Ce système entraîne des inconvénients ; il est plus compliqué que celui des soutirages sur la turbine principale, il amène une interdépendance entre les turbines principale et auxiliaire ; enfin le rapport entre la quantité d'eau à réchauffer et la quantité de vapeur soutirée peut ne pas être correct, car la charge des auxiliaires ne varie pas dans le même rapport que la charge de la turbine principale, ce qui produit une influence sur le rendement de la turbine auxiliaire et sur le réchauffage.

Nous estimons donc que la commande des auxiliaires doit se faire par moteurs électriques alimentés par transformation du courant principal.

CONCLUSION.

Tenant compte des diverses possibilités d'amélioration des cycles tant au point de vue théorique qu'au point de vue pratique, des études récentes de Brown-Boveri, Havlicek, Félix et Noack (compte rendu de la conférence mondiale de l'énergie à Berlin 1930), montrent que la pression la plus économique au point de vue de la consommation de charbon et pour les grandes puissances serait voisine de 130 kg./cm².

Nous donnons ci-contre les courbes tracées par Brown-Boveri, courbes montrant les rendements pratiques que l'on peut atteindre pour diverses pressions et pour diverses puissances.

On en déduit que, pour des unités supérieures à 25.000 kw., les pressions optima sont supérieures à 100 kg./cm².

Ces courbes tiennent compte, les unes des soutirages, les autres des soutirages et de la resurchauffe qui, on le voit, ne pourrait donner qu'un bénéfice assez faible et au prix d'une forte complication et d'une diminution conséquente de la souplesse.

Celle-ci a d'ailleurs une tendance très caractérisée à diminuer lorsque la pression est élevée par suite du faible volant d'eau de la chaudière. Cependant, l'emploi de fortes surfaces de chauffe rayonnées (1), la souplesse du foyer au charbon pulvérisé, des chaudières bien conçues permettront sans doute d'obtenir une certaine souplesse tout en conservant un bon rendement aux diverses charges.

(1) Par elles-mêmes, les surfaces rayonnées diminuent plutôt la souplesse car la chaleur qui leur est transmise par rayonnement est presqu'indépendante de l'allure de la combustion. Mais, par le refroidissement des gaz qu'elles produisent, elles permettent de fortes variations d'allure de la combustion sans détérioration des maçonneries.

Pour augmenter la souplesse de la chaudière, Brown-Boveri préconise des accumulateurs d'eau d'alimentation chaude. Cette eau est réchauffée aux faibles charges par de la vapeur soutirée. Pendant les pointes, on en tire l'eau d'alimentation fortement réchauffée et les soutirages sont suspendus.

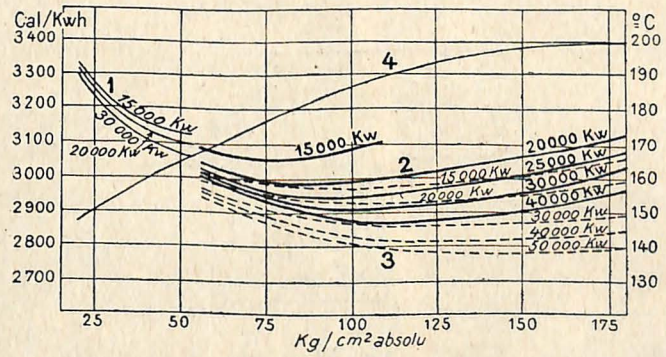


Fig 58.

1. **Consommation en cal./kwh. pour turbines à 3 cylindres avec évacuation** de l'eau et sans resurchauffe.
2. Consommation en cal./kwh. pour turbines à 4 cylindres avec évacuation de l'eau et sans resurchauffe.
3. Consommation en cal./kwh. pour turbines à 4 cylindres avec évacuation de l'eau et avec resurchauffe.
4. Température de l'eau d'alimentation réchauffée par soutirages.

(D'après la revue *Brown-Boveri*, janvier 1931.)

Consommation totale en calories-charbon par kwh. aux bornes en tenant compte des auxiliaires (rendement net).

Conditions à l'admission : Température 450°.
Vide au condenseur : 0,04 kg./cm².
Evacuation de l'eau entre les cylindres de la turbine.

Cet accumulateur est alimenté lors des faibles charges par l'eau condensée additionnée d'eau froide préalablement épurée.

La charge de la chaudière et celle de la turbine subissent ainsi une certaine régulation surtout aux hautes

pressions où le réchauffage et le soutirage sont plus poussés.

La marche de l'installation est d'ailleurs automatique : si la pression décroît à la chaudière, la soupape des conduites d'eau de circulation des accumulateurs se ferme partiellement en diminuant le réchauffage et le soutirage (voir fig. 59).

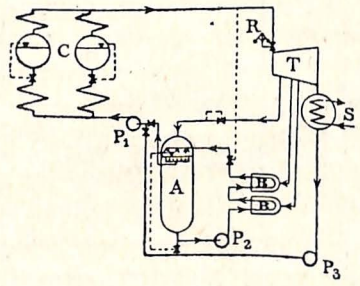


Fig. 59.

Quant aux turbines, il en existe qui donnent de bons rendements dans de fortes limites de puissance. Ainsi Brown-Boveri construit une turbine de pointe donnant en charge normale un rendement de 84-86 %. Cette turbine peut se surcharger de 50 %. Dans ce cas, la vapeur vive est admise à un étage inférieur de l'ailettage à réaction du cylindre à haute pression sans avoir travaillé dans les premières rangées d'aubes. De cette façon, la pression à l'admission étant plus basse qu'en charge normale (1) on parvient à éviter des pertes trop conséquentes par choc dans les aubages et on offre à la vapeur une plus forte section de passage.

Le rendement de cette turbine varie de 78 % en demi-

(1) Par suite des pertes de charge plus élevées dans les conduites de vapeur (plus grand débit) et de la tendance à la chute de pression à la chaudière.

charge à 84 % en pleine charge et 81 % aux 6/4 de charge.

Le condenseur est largement dimensionné pour la charge normale et, grâce à une pompe supplémentaire de réfrigération mise en marche lors des surcharges, on obtient encore pendant celles-ci un vide satisfaisant. La puissance auxiliaire n'est pas exagérée en charge normale puisque cette pompe spéciale de réfrigération ne fonctionne que pendant les surcharges.

Ces turbines sont évidemment beaucoup plus coûteuses que les turbines normales. Elles se justifient surtout pour les unités de forte puissance. La turbine de 160,000 kw. de Hell-Gate répond à ces spécifications.

Malgré tous les artifices que l'on puisse réaliser, une centrale à haute pression, dans l'état actuel des choses, ne possède pas la souplesse indispensable pour parer à toutes les conditions de l'exploitation d'une centrale ordinaire.

Aussi, pour des centrales à fortes variations de charge se voit-on obligé de n'utiliser les installations à haute pression que comme unités de base, des chaudières très souples à moyenne pression fournissant l'appoint variable. Dans les grands réseaux, en suivant ces directives, on en arrive à avoir des centrales homogènes à haute pression marchant constamment en pleine charge et utilisant de grosses unités à fort rendement (centrales de base) interconnectées avec les centrales d'appoint très souples à moyenne pression et à rendement beaucoup moindre. Lorsqu'une centrale existante à moyenne pression devient insuffisante par suite de la demande croissante d'énergie, il est souvent avantageux de la « coiffer » par une unité à très haute pression échappant à contre-pression dans les conduites d'admission des turbines à moyenne pres-

sion. De la sorte, on pourra faire marcher constamment en pleine charge l'unité à haute pression et l'appoint très souple est fourni par les unités à moyenne pression alimentées en partie par des chaudières à grand volant d'eau et en partie par l'échappement des turbines à haute pression. Ce dernier procédé permet d'accroître la puissance d'une centrale par l'adjonction d'une chaudière à haute pression et sans qu'il soit nécessaire d'employer un volume d'eau beaucoup plus grand pour la condensation vu le rendement élevé de la partie à haute pression.

En résumé, il est impossible de donner ici une solution convenant pour toutes les installations, mais on peut dire sans risque de contradiction que les hautes pressions employées en connexion avec les soutirages et parfois la resurchauffe donneront les rendements les plus élevés pour les centrales de base de forte puissance.

Les variations de la charge dans le temps pourront contribuer à faire employer une pression plus basse car le prix de revient est dans ce cas fortement grevé par le service du capital, d'autant plus élevé par kwh. produit que les variations de charge sont plus fortes car le prix de l'installation est en rapport direct avec la puissance maxima depointe et avec la pression. Si ces variations de charge sont très fortes, on pourra être forcé de recourir aux moyennes pressions de façon que les installations aient la souplesse voulue, et ceci indépendamment de toute considération économique.

La solution la plus économique ne pourra donc être choisie qu'après une étude approfondie du rendement, du coût de l'installation, des frais d'entretien. De plus, la sécurité du service et la possibilité de répondre même aux demandes extraordinaires d'énergie pourront encore faire réviser le choix de la pression et du cycle que l'on

eût admis en se basant seulement sur la production la plus économique du kwh.

Nous nous garderons donc bien de préconiser telle ou telle solution, mais nous pensons qu'à l'avenir, on pourra obtenir, grâce aux progrès apportés à la construction des centrales et de leurs divers organes, des rendements très élevés avec des installations répondant à tous les desiderata et conçues suivant le schéma suivant :

Chaufferie au pulvérisé.

Haute pression et surchauffe.

Chaudières à tubes à ailettes (pour les pressions inférieures à 110 kg./cm²).

Soutirages multiples pour le réchauffage de l'eau d'alimentation.

Réchauffage par les fumées de l'air de combustion.

Pas d'économiseur ni de resurchauffeur.

Auxiliaires commandés par moteurs électriques alimentés par transformation du courant principal.

Emploi de fortes unités aussi bien pour les chaudières que pour les turbines.

L'emploi de ces fortes unités permet dans une certaine mesure d'accroître leur rendement (moindres pertes par rayonnement de la chaudière et de la turbine, meilleurs rendements interne et organique, meilleur rendement des moteurs auxiliaires dont la puissance serait plus élevée), de diminuer leur prix par kw. installé, de réduire le personnel, en un mot, d'obtenir un prix de revient minimum du kwh.

La sécurité de service est cependant moindre que lorsqu'un utilise un plus grand nombre d'unités de plus petite puissance (voir chapitre IV : Interconnexion des centrales).

Il nous paraît qu'une installation conçue suivant le schéma donné plus haut serait peu compliquée, peu exposée à des pannes, relativement peu coûteuse et qu'elle donnerait un prix de revient du kwh. très avantageux.

De nombreuses circonstances pourront obliger l'exploitant à s'écarter de cette solution type.

Parmi ces circonstances, celle qui se présente le plus fréquemment et qui est la plus gênante à tous égards est la nécessité de parer à des variations de charge brusques et très fortes.

Aussi consacrons-nous un chapitre spécial à ces variations de charge, à leurs effets (voir aussi à ce propos surchauffe, resurchauffe et soutirages) et aux moyens de les atténuer.

Note concernant les centrales de force motrice utilisant de la vapeur pour le chauffage et la fabrication.

Jusqu'à présent, nous avons seulement examiné les centrales à condensation ne demandant pas de vapeur pour le chauffage des locaux et pour la fabrication.

Or, il existe de nombreux établissements qui ont à réaliser à la fois la production de la force motrice et l'utilisation de vapeur pour des chauffages.

Dans ce cas, les solutions qui étaient avantageuses pour la production de la force motrice seule peuvent être absolument anti-économiques.

Le schéma de l'installation devra toujours être conçu de façon à utiliser la même vapeur dans les machines et pour le chauffage. On peut prouver en effet que cette solution est beaucoup plus avantageuse que celle qui consisterait à construire deux installations distinctes: l'une pour la production de la force motrice seule, l'autre pour le chauffage seul.

Deux solutions sont à envisager :

a) l'emploi de machines à contre-pression;

b) l'emploi de machines à soutirages.

Nous admettons dans la suite que seule la chaleur latente de vaporisation est transmise au corps à chauffer.

a) Machines à contre-pression.

Supposons d'abord que les besoins de force motrice et de chauffage soient concomitants et dans un rapport sensiblement constant (sucreries, teintureries, fabriques de briquettes).

Le chauffage par la vapeur exige une pression déterminée p_c correspondant à une certaine température de la vapeur t_c et il exige que celle-ci soit saturée ou légèrement surchauffée pour ce qui concerne le chauffage par surface.

Une surchauffe assez élevée pourrait n'être pas nuisible en cas de chauffage par mélange (barbotage).

En général,il sera bon que la vapeur de chauffage soit légèrement surchauffée à son entrée dans les conduites qui la mènent vers les appareils de chauffage. De cette façon, les pertes de chaleur dans les conduites seront faibles (mauvaise convection de la vapeur surchauffée), et la vapeur arrivera sensiblement saturée à l'appareil de chauffage.

La vapeur étant produite à une pression p_a, température de surchauffe t_s subira une détente jusqu'à la pression p_c (voir fig. 60). A cette pression p_c correspond une température t_c de saturation. Supposons qu'arrivée à la pression p_c, la vapeur soit encore surchauffée à la température $t'_c > t_c$.

Pendant cette détente réelle, chaque kg. de vapeur

fournit un travail T kgm. Admettons que le chauffage nécessite A kg. de vapeur par seconde.

Le travail fourni par la détente sera :

A T kgm/sec. = AT/75 chevaux.

Il faut, pour que l'installation marche correctement, que cette puissance soit égale à celle qui est demandée par l'usine.

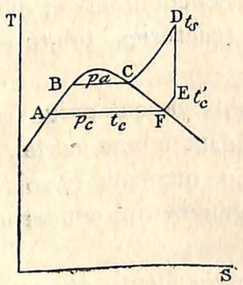


Fig 60.

Le point E étant bien défini par les conditions du chauffage, de même que le poids A de vapeur, on parviendra à réaliser la puissance voulue en agissant sur la position du point D, qui devra rester sur la verticale de E ou plutôt sur la courbe de détente réelle passant par E. On voit donc qu'on ne peut agir que sur la pression p_a, la température t_s étant imposée dès que p_a est fixé.

Si la puissance nécessaire est élevée et si A n'est pas très grand, on sera obligé d'employer une pression p_a très forte. Il pourrait même se faire qu'il soit impossible d'obtenir la puissance nécessaire.

Au contraire, si la puissance nécessaire est faible et si A est très grand, p_a sera très proche de p_c ; la détente très

faible d'une forte quantité de vapeur exigerait une machine de fortes dimensions, à mauvais rendement organique et à faible vitesse pour un travail très faible.

Dans ces deux cas, la marche à contre-pression ne s'indique pas. Cependant, on pourrait modifier les conditions en procédant comme suit : au lieu d'exiger que la vapeur soit sèche à la pression p_c, on pourrait admettre qu'elle soit humide, surtout si les conduites de vapeur sont courtes.

Exemple :

p_c imposé = 3 kg./cm².

Si la vapeur était sèche, il faudrait 3.600 kg. de vapeur par heure pour le chauffage.

Dans ce cas, il revient au même que la vapeur soit humide au titre x à conditon que le poids de vapeur soit: $3.600/x$ kg. : le nombre de calories transmises au corps à chauffer est celui qui est nécessaire, mais les conduites, les pompes d'alimentation de la chaudière etc. sont conçues pour des débits différents et pour d'autres pressions.

Si une puissance de 566 HP est nécessaire (42,500 kgm/sec. ou 100 cal./sec. ou 100 cal./kg. de vapeur), et si la vapeur est sèche à 3 atmosphères, il faudra que p_a = 18 kg./cm² et t_s = 350°.

Par contre, si nous admettons que le titre final, soit 0,9, il faudra 4.000 kg. de vapeur par heure ou 1,11 kg. par seconde qui devront fournir 100/1,11 = 90 cal./kg.

Il faudra alors que : p_a = 22,5 atm. t_s = 250°.

Nous supposons dans cet exemple que les détentes sont adiabatiques réversibles.

On voit donc qu'en abaissant le titre, on doit élever la pression et la quantité de la vapeur à détendre. Par con-

tre, on abaisse fortement sa surchauffe, ce qui pourra être utile dans certains cas.

Effets des variations de charge.

La machine étant réalisée pour la marche à contre-pression, supposons qu'à un moment donné la puissance demandée croisse : la quantité de vapeur admise est plus élevée, il y a un excès de vapeur pour le chauffage et cet excès doit être rejeté à l'atmosphère, ce qui constitue une perte très élevée de vapeur à haut potentiel thermique.

Si au contraire, à un moment donné, la demande de vapeur de chauffage croît, la puissance restant constante, il sera impossible de satisfaire à la demande. La contre-pression baissera, la machine produira un excès de puissance et le régulateur agira de façon à diminuer encore la quantité de vapeur admise.

On parvient à pallier à cet inconvénient en admettant dans les conduites de chauffage de la vapeur vive préalablement détendue à la pression du chauffage, et ceci grâce à un régulateur automatique de la pression du chauffage.

Cette vapeur vive apte à produire de l'énergie mécanique est économiquement assez mal utilisée.

On voit ainsi que les machines à contre-pression ne peuvent être d'usage pratique et économique que dans les installations ayant des besoins concordants de vapeur de chauffage et de force motrice.

Dans ce cas, le rendement sera très proche de 100 % et la force motrice sera produite à un prix extrêmement bas.

Il faudra que l'installation soit conçue de façon que l'on ne doive jamais rejeter de la vapeur à l'atmosphère.

Remarquons que les pertes intérieures de la turbine sont récupérées sous forme de chaleur dans la vapeur d'échappement.

b) Machines à soutirages.

Si les conditions spéciales qui sont indispensables pour qu'une installation à contre-pression donne satisfaction ne sont pas réalisées, on devra recourir aux machines à soutirages.

Une usine peut avoir des besoins très variables ou même intermittents de vapeurs de chauffage à diverses pressions.

Dans ce cas, seule une machine à soutirages peut être satisfaisante.

Le principe du soutirage étant connu, de même que ses avantages, nous ne devrons guère insister (voir chapitre III: Etude théorique) :

$$\eta = 1 - \frac{S_c\, T_c\, (1 - x)}{Q_1 - x\, q_1}$$

Pour cette installation, la seule perte importante est celle du condenseur. Il faut la réduire autant que possible par le choix judicieux des conditions de vapeur à l'admission.

Remarquons que les parties à basse pression alimentées d'une façon très irrégulière en vapeur et contribuant assez peu à la production de puissance diminuent le rendement organique de la machine et en augmentent le prix par rapport à celui d'une installation à contre-pression. Celle-ci n'exige aucun condenseur, ni des clapets de retenue sur les conduites, ni d'éjecteurs, ni de pompes d'extraction.

Il faudra donc recourir aussi souvent qu'on le pourra aux machines à contre-pression.

Sans pouvoir nous étendre sur ces installations qui utilisent de la vapeur de chauffage et qui ne rentrent pas à proprement parler dans notre sujet, nous dirons qu'elles sont arrivées à un degré de perfection que l'on ne pourra guère dépasser.

REMARQUES :

I. — La disproportion entre les étendues respectives des chapitres I, II et III est frappante. Nous allons justifier cette disproportion.

On peut estimer qu'une installation moderne ayant les rendements signalés ci-dessous est déjà très perfectionnée:

Rendement de production : 80 à 85 %.

Rendement d'utilisation : 25 %.

Rendement global sur l'arbre : 20 %.

Si l'on parvient à réaliser un gain de 1 % sur le rendement de production, le gain relatif sur le rendement global sera :

1/80 = 1,25 %, soit 1,25 % d'économie de charbon.

Si l'on parvient à réaliser un gain de 1 % sur le rendement d'utilisation, le gain relatif sur le rendement global sera :

1/25 = 4 %, soit 4 % d'économie de charbon.

Or, il est beaucoup plus aisé de réaliser un gain de 1 % sur le rendement d'utilisation que surle rendement deproduction, celui-ci étant déjà très proche de la perfection.

Fût-ce même au prix d'une perte de 1 % sur le rendement de production, le gain de 1 % sur le rendement d'utilisation serait encore très avantageux.

Aussi, nous sommes-nous étendu plus longuement sur le chapitre III que sur le chapitre Ier.

Quant au chapitre II, il n'est guère possible d'améliorer le rendement de transmission, celui-ci étant actuellement très voisin de l'unité.

II. — Nous avons puisé de nombreux renseignements dans la belle étude de Roszak et Véron intitulée : « La production industrielle et l'utilisation mécanique de la vapeur d'eau à haute pression ».

Cette étude est, à notre connaissance, la plus complète que l'on ait publiée jusqu'à ce jour sur les hautes pressions.

III. — De nombreux renseignements ont encore été puisés dans d'autres ouvrages et dans de très nombreuses revues qu'il serait fastidieux d'énumérer, mais parmi lesquelles nous citerons cependant le bulletin édité par Brown-Boveri et la revue « Chaleur et Industrie ».

———

CHAPITRE IV.

INFLUENCE DES VARIATIONS DE CHARGE

Tout ce que nous avons dit jusqu'à présent se rapporte surtout à la marche de régime en charge normale !

Que se passera-t-il lorsque pour une raison quelconque, on se verra forcé de marcher en surcharge ou en sous-charge?

Examinons d'abord le cas de marche en charge réduite.

La vaporisation horaire est moindre, la circulation de l'eau dans l'économiseur et dans la chaudière est ralentie, celle de l'air de combustion et celle des gaz brûlés diminue également. Ce sont là toutes raisons pour que le taux de transmission de chaleur diminue par unité de surface de chauffe et par unité de temps. Mais si le taux de transmission diminue, la quantité de chaleur apportée en l'unité de temps par les gaz est plus petite qu'en marche normale.

Aussi constatera-t-on toujours que la température de sortie des gaz est moindre en charge réduite qu'en charge normale. C'est là une cause de l'amélioration du rendement, amélioration toujours faible car un bon générateur en marche normale ne rejette à la cheminée que des fumées épuisées au maximum. On verra la température des fumées baisser de quelques degrés. L'amélioration ne serait d'ailleurs réelle que pour autant que le poids des fumées par kg. de charbon soit le même.

Si cette amélioration n'était pas compensée par d'autres pertes, la marche en charge réduite serait donc avantageuse au point de vue du rendement de production. Mais les pertes par rayonnement et conduction des parois sont peu affectées par l'allure. Elles se chiffreront donc par un pourcentage plus élevé en charge réduite. Le bénéfice sur la chaleur sensible des cendres sera négligeable.

Reste alors le chapitre des imbrûlés et de l'excès d'air.

Considérons d'abord la grille-chaîne.

Les pertes extérieures des parois de la chambre de combustion restant sensiblement les mêmes qu'en charge normale, et la quantité de chaleur développée par unité de temps dans cette chambre de combustion diminuant, les parois seront à plus basse température et par suite l'allumage sera plus lent, le brassage des gaz moins bon, le refroidissement par rayonnement du charbon incandescent plus rapide; toutes ces causes tendent à donner des imbrûlés aussi bien dans les escarbilles que dans les gaz. Ceux-ci se refroidissant plus rapidement pourraient même aller, en cas d'allure très lente jusqu'à emporter des imbrûlés gazeux malgré la présence d'un excès d'air. Toutes ces raisons conduiront d'ailleurs souvent à un excès d'air plus grand qu'en régime normal. L'amélioration très faible constatée par suite de l'abaissement de température à la cheminée est donc tout à fait illusoire.

Les mêmes causes produiront sensiblement les mêmes effets sur le charbon pulvérisé.

En cas de surcharge, les effets seront évidemment inverses; les fumées seront plus chaudes avec une baisse du rendement, l'accroissement de température étant beaucoup plus rapide en cas de surcharge que ne l'avait été

la baisse en cas de charge réduite. Le taux de transmission plus élevé par unité de surface de chauffe est compensé et au delà par le peu de temps dont disposent les gaz pour se refroidir.

On constatera une surélévation de température dans la chambre de combustion, donc une combustion complète des imbrûlés gazeux et des conditions favorables à première vue pour la combustion du pulvérisé. Mais celui-ci étant injecté à une vitesse exagérée viendra plus rapidement en contact avec les tubes froids où il s'éteindra avant consumation complète. Les remarques faites précédemment à propos des chambres de combustion avaient fait voir que celles-ci pour des dimensions données ne pourraient pas se prêter à un taux de combustion trop élevé. La combustion sur grille à allure accélérée donnera encore une tendance à trop grand excès d'air et à la fusion des cendres avec obstruction des passages pour l'air.

Il résulte de ces considérations qu'une chaudière donnera toujours son rendement maximum pour des conditions de marche bien déterminées qui doivent correspondre à son régime de charge le plus fréquent.

Quant au rendement d'utilisation, il est affecté dans une plus forte mesure encore par les variations de charge. En effet, deux moyens sont à notre disposition pour diminuer la charge d'une turbine :

1. Si la pression à la chaudière est la même qu'en pleine charge, il faut diminuer le débit de la vapeur en produisant un laminage qui constitue une détente sans travail.

2. On peut abaisser la pression à la chaudière. Ce dernier moyen est peu employé, car le foyer ne pouvant forcer instantanément la pression de la vapeur, on ne pourrait satisfaire à la demande instantanée si une surcharge succédait à la marche en sous-charge. Le laminage est donc à peu près le seul moyen que l'on puisse utiliser.

Or, un laminage provoque une chute de pression et un accroissement d'entropie. Ce dernier phénomène est toujours nuisible car il entraîne une perte supplémentaire au condenseur. Le fait qu'une chute de pression se produit est aussi très nuisible au point de vue du rendement. En effet, l'écart total de pression entre l'admission et le condenseur est plus faible qu'en régime normal. Il s'ensuit que la différence de pression entre l'amont et l'aval de chaque aubage est aussi plus faible qu'en régime normal. Par suite, la détente étant plus faible dans chacun des aubages donnera une vitesse absolue moindre à la vapeur. Il faut noter que le nombre de tours/minute de la turbine est très souvent maintenu fixe quand la charge varie, soit par régulateur, soit par l'effet des courants synchronisants dans les alternateurs. Les vitesses d'entrainement resteront donc les mêmes qu'en régime normal. Il en résultera que les vitesses relatives d'entrée dans les aubages mobiles et que les vitesses absolues d'entrée dans les aubages fixes ne seront plus tangentes aux dos des aubes et qu'il y aura partout production de chocs, autre cause d'accroissement de l'entropie et de diminution du rendement.

Par contre, les fuites de vapeur diminueront quelque peu si la pression baisse.

Le vide au condenseur sera souvent aussi amélioré pendant la marche en faible charge. On sait de plus que même en l'absence de chocs, le rendement indiqué d'une roue de turbine est maximum pour un certain rapport de la vitesse de la vapeur et de la vitesse d'entraînement de l'aubage et que ce rendement indiqué baisse si ce rapport de vitesse est modifié.

Toutes les mêmes causes d'irréversibilité se produiront si l'on doit marcher en surcharge car les vitesses absolues de la vapeur dans les différentes roues seront plus fortes qu'en régime normal. De plus, dans ce cas, le vide au condenseur sera moins bon et des fuites plus conséquentes se produiront.

Donc, à partir du moment où la puissance demandée à la turbine diffère de la puissance de régime, le rendement indiqué baisse fortement.

Les pertes par frottements aux paliers sont sensiblement indépendantes de la charge de la turbine, de même que les pertes par ventilation et par frottements de la turbine dans la vapeur.

Le pourcentage de ces pertes sera donc d'autant plus faible que la puissance débitée par la turbine sera plus forte.

Il résulte des considérations ci-dessus qu'une turbine aura un rendement maximum pour une charge bien déterminée qui doit être celle où elle fonctionne le plus souvent.

En employant une roue de tête à action pure et à injection partielle, on arrive à diminuer les pertes en marche à faible charge. En effet, dans ce cas un laminage n'est plus nécessaire. Il suffit pour régler la charge d'agir sur le degré d'injection en agissant sur le nombre des tuyères en activité ; le régulateur obstrue ou dégage l'entrée des tuyères d'injection. Les autres roues seront néanmoins affectées par les chocs à l'entrée des aubages, le débit et par suite les vitesses absolues de la vapeur n'étant plus les mêmes qu'en pleine charge.

Une turbine bien étudiée dans ce but pourra cependant donner un rendement très satisfaisant et presque constant entre certaines limites de charges, limites qui en réalité ne sont jamais très écartées.

Cela étant, l'installation devra être conçue de façon à donner un rendement maximum non pas seulement à son allure normale, mais dans les conditions d'exploitation auxquelles elle est soumise ; nous entendons par là que le nombre de calories/charbon par kilowatt-heure et par an doit être aussi faible que possible.

Si le diagramme de charge est connu à l'avance, par observation de ce qui s'est passé au cours de l'exploitation antérieure ,l'installation pourra être prévue en conséquence. Sinon, il faudra tâcher de se faire à l'avance une idée de ce que sera la demande de puissance de la centrale dans le temps.

Aussi, pour prendre un cas très simple, supposons que le diagramme de charge d'une centrale soit le suivant (voir fig. 61) et qu'il soit sensiblement le même tous les jours. Dans ce cas, il sera vraisemblablement plus économique d'avoir deux chaudières et deux turbines : une chaudière et la turbine correspondante donnant en permanence la charge de base : A ;

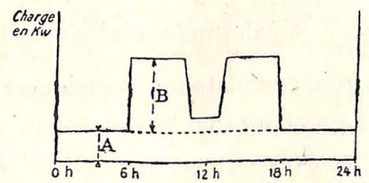


Fig. 61.

l'autre turbine et l'autre chaudière marchant de 6 heures à 18 heures également en pleine charge sauf pendant l'heure de midi.

De la sorte, toutes les machines marcheront toujours à leur plein rendement.

Il existe cependant des inconvénients notables : l'arrêt

et le refroidissement d'une chaudière pendant la nuit, sa mise sous pression le matin exigeant la présence de personnel pendant une période de non production; l'intérêt au capital et l'amortissement doivent être comptés sensiblement au même taux, que la machine soit active ou non.

De plus, le coût se rapportant à deux chaudières et à deux turbines est plus important que celui d'une seule chaudière et d'une seule turbine capables de fournir la puissance totale. Mais dans ce dernier cas, le rendement pendant les heures de nuit serait faible. Enfin, il faut envisager la nécessité d'avoir toujours au moins une chaudière et une turbine de réserve, ou bien des moteurs électriques si l'on est raccordé à un réseau.

Toutes ces considérations s'appliquant cependant à un cas très simple montrent l'utilité énorme de la régulation de la charge d'une centrale. Aussi, a-t-on étudié fortement cette question pendant ces dernières années et y a-t-on apporté de nombreuses solutions plus ou moins heureuses suivant les cas.

Les solutions principales préconisées sont les suivantes:

1. chargement d'accumulateurs électriques;
2. bassin d'eau en charge;
3. accumulateurs de vapeur;
4. interconnexion des centrales;
5. accroissement des réseaux et compensation des besoins;
6. établissement de tarifs faibles aux heures de sous-consommation;
7. création d'industries chimiques absorbant le surcroît de courant produit;
8. établissement de réseaux de chauffage public.

I. — Accumulateurs électriques.

Ce système qui fut employé couramment autrefois est abandonné de plus en plus en faveur de certains autres procédés.

Principe : On fait, en permanence, fonctionner l'installation motrice en pleine charge. A certains moments, l'énergie dépasse celle qui est demandée. L'énergie en excès sert alors à entraîner une dynamo à courant continu qui charge une batterie d'accumulateurs. Aux moments où l'énergie demandée dépasse l'énergie produite, les accumulateurs se déchargent sur la dynamo qui fonctionne alors comme moteur contribuant à fournir de l'énergie à l'installation motrice.

Inconvénients : Un élément d'accumulateur ne peut emmagasiner que très peu d'énergie; le courant qui le traverse doit toujours être limité à une certaine valeur et par suite la tension à laquelle est soumise la batterie ne peut varier que dans d'étroites limites; le rendement en énergie de la batterie est faible; il faut encore le multiplier par le rendement de la dynamo fonctionnant comme génératrice puis comme moteur.

Exemple: rendement moyen de la dynamo quelle que soit sa fonction : 85 %; rendement des accus en énergie : 65 %.

Un excédent d'énergie de 100 kwh. transmettra 85 kwh. à la batterie qui en restituera $85 \times 0{,}65 = 55$ kwh. au moteur, lequel en utilisera $55 \times 0{,}85 = 47$. Le rendement global en énergie du système serait donc au maximum de 47 %, les rendements admis étant très avantageux, vu les conditions de fonctionnement.

L'installation est très coûteuse; son entretien qui exige un personnel spécialisé, est aussi très onéreux; les accumulateurs doivent être placés dans un local distinct, bien ventilé et soumis encore à de nombreuses autres conditions; enfin, ils exigent un appareillage électrique assez coûteux.

Sans vouloir étudier davantage ces régulateurs de charge qui ressortent au domaine de l'électricité, ce que nous en avons dit suffit à les faire rejeter pour cet usage.

On ne pourrait envisager leur établissement que si la centrale motrice était en même temps une centrale électrique, auquel cas on disposerait du personnel voulu et où la dynamo ne servirait pas exclusivement à ce but. Même alors, l'adoption d'accumulateurs ne s'indiquerait que s'ils devaient servir en même temps pour d'autres usages, par exemple, comme réserve d'éclairage et pour l'alimentation des auxiliaires en cas de panne de la génératrice principale. Mais nous répétons que c'est là une solution tout à fait exceptionnelle.

II. — **Accumulateurs d'eau en charge.**

Principe : Un excédent momentané de force motrice sert à fouler de l'eau dans un réservoir en charge au moyen d'une pompe centrifuge. Au moment où il y a défaut de force motrice, l'eau accumulée dans le réservoir en descend et elle transforme son énergie potentielle en force motrice dans une turbine hydraulique qui pourra d'ailleurs être la pompe centrifuge elle-même.

Application : Le seul énoncé ci-dessus permet de voir que ce système ne pourra s'appliquer que dans des cas très particuliers. En plaine, il serait inapplicable. En pays montagneux, si les circonstances sont très favorables, il pourrait être appliqué pour une grande centrale.

Il ne faut pas se dissimuler en effet que le coût de l'installation d'un semblable accumulateur hydraulique sera extrêmement élevé.

Il exige l'installation d'une turbo-machine hydraulique, d'une conduite forcée, d'un lac souvent artificiel et parfois d'un barrage. L'entretien de toute cette installation n'est pas négligeable. Son rendement ne sera habituellement pas élevé : il faut tenir compte du rendement de la pompe centrifuge, de celui de la turbine, des pertes de charge à la montée et à la descente de l'eau, des infiltrations d'eau dans le sol, éventuellement sous les tropiques des pertes par évaporation.

Aussi ce procédé sera-t-il d'un emploi tout à fait exceptionnel et ne s'indiquera-t-il guère que si l'adduction d'un ruisseau pouvait amener un appoint d'eau important au lac créé, auquel cas le rendement pourrait devenir supérieur à l'unité et ainsi payer l'amortissement de l'installation.

III. — **Accumulateurs de vapeur.**

Nous nous trouvons ici en face d'une solution beaucoup plus intéressante que les précédentes et d'une application beaucoup plus simple.

Principe : Les chaudières sont maintenues constamment à leur pleine charge. A certains moments, leur production de vapeur dépasse la demande; l'excédent est alors envoyé à l'accumulateur; à d'autres moments, leur production est insuffisante : l'accumulateur fournit le supplément.

Description : Nous ne considérerons ici que l'accumulateur Ruths tel qu'il est employé à Charlottenbourg.

L'accumulateur consiste en un grand cylindre calori-

fugé rempli en grande partie d'eau. Une conduite de vapeur provenant de la chaudière pénètre au sein de l'eau et se termine par un nombre élevé de tuyères qui envoient dans l'eau l'excédent de production des chaudières. La vapeur se condense dans l'eau en portant celle-ci à une température assez élevée à laquelle correspond une certaine pression de saturation. Une prise de vapeur existe dans un dôme de l'accumulateur.

Mode d'emploi dans ce cas :

A certains moments, l'accumulateur reçoit de la vapeur de la chaudière et il n'en débite pas. A d'autres moments, il ne reçoit pas de vapeur, mais il en débite. Aussi sa pression varie-t-elle constamment. C'est là un obstacle à son utilisation sous la forme simple décrite.

Remarquons cependant que les variations de pression seront assez lentes vu l'énorme masse d'eau qui constitue volant calorifique. Néanmoins, on sera obligé d'utiliser un régulateur de pression à la suite de l'accumulateur de façon que les turbines d'utilisation reçoivent de la vapeur à pression constante. La surface de vaporisation étant très grande, l'accumulateur pourra donner un fort débit de vapeur sans précaution spéciale : la vapeur sera toujours sèche, sans entraînement d'eau. On s'astreindra habituellement à maintenir la pression à l'accumulateur entre certaines limites: une limite supérieure correspondant à sa résistance mécanique; une limite inférieure telle que l'utilisation de la vapeur sortant de l'accumulateur en vue de production de force motrice soit encore intéressante. S'il existe une marge suffisante entre ces limites et si le poids d'eau contenu dans l'accumulateur est suffisant, on conçoit que la marche des chaudières puisse être maintenue toujours aussi voisine que possible de leur marche à plein rendement. La présence d'un accumulateur est encore intéressante si l'on emploie de la vapeur à haute pression. Le prix des chaudières exige alors que leur volume soit faible; leur volant d'eau est donc très limité et sans l'accumulateur, l'installation n'aurait guère de souplesse.

On pourra dans ce cas alimenter l'accumulateur par de la vapeur soutirée à un certain étage où la pression ne soit plus trop élevée pour que le prix de l'accumulateur ne soit pas exagéré. L'accumulateur ne serait d'ailleurs alimenté que si la détente complète de la vapeur donnait un excès de puissance. Au contraire, si la détente complète de la vapeur venant de la chaudière donnait à certains moments une puissance insuffisante, l'accumulateur enverrait de la vapeur à la turbine.

La conduite de la chaudière se fera alors, non d'après l'indication de son manomètre, mais d'après la pression de l'accumulateur.

Les générateurs de vapeur seront ainsi calculés pour une production constante et non pour la pointe maxima. De ce fait et grâce au faible volant d'eau qui leur est nécessaire, leur prix sera réduit au minimum.

Le rendement de l'accumulateur est très élevé: il n'est sujet à des pertes que par sa surface extérieure qui est soigneusement calorifugée et lors des vidanges périodiques nécessitées par la vérification de l'état de l'accumulateur. Encore pourra-t-on parfois utiliser l'eau chaude.

Les constructeurs donnent souvent comme limite de déperdition 1 calorie/heure par m^2/degré de différence de température entre l'intérieur et le milieu ambiant.

Un accumulateur de 10 m. de longueur et de 2 m. de diamètre contenant de l'eau à 150° aurait une déperdition horaire, calculée d'après ce taux de 10.000 calories. Son volume intérieur serait de 30 m^3.

S'il contenait 20 m³ d'eau à 150°, son contenu en chaleur serait :

$$20.000 \times 150 = 3.000.000 \text{ calories.}$$

La perte horaire serait donc approximativement 3 °/₀₀, ce qui est très faible.

Si même l'accumulateur restait inactif pendant une journée, cela représenterait une perte maxima de 8 %.

Il est possible que le taux de perte donné plus haut soit trop faible, mais il semble qu'en donnant 85 % comme rendement, on ne puisse tomber dans l'exagération.

Un accumulateur permettra pendant des durées variant de un à quelques jours de régulariser la charge d'une batterie de chaudières d'une façon avantageuse et aussi dans une certaine mesure celle de la turbine.

Si la charge varie avec la saison, l'accumulateur ne pourrait évidemment plus remplir ce rôle. Il faudra alors recourir à des chaudières de réserve qui pourront aussi éventuellement être munies d'un accumulateur.

Le prix d'un accumulateur est évidemment assez élevé. Il peut s'établir en plein air et il n'exige pas d'entretien ni de précautions spéciales sous le rapport de l'eau qui l'alimente. Aussi, semble-t-il qu'il puisse s'appliquer avantageusement dans beaucoup de centrales autonomes. Il se révèle encore plus avantageux s'il s'agit d'une centrale qui consomme d'une façon discontinue de la vapeur ou de l'eau chaude pour des chauffages de fabrication.

On peut imaginer toutes sortes de variantes dans l'application des accumulateurs de chaleur. Ainsi, à la mine de Furst-Hardenberg, il existe un accumulateur consistant simplement en un second corps de chaudière non chauffé relié directement au corps de chaudière proprement dit.

Celui-ci en cas de surproduction de vapeur envoie de la vapeur à l'accumulateur où elle se condense. En cas de sous-production ,l'accumulateur qui est toujours à la même pression que la chaudière enverra à son tour de la vapeur à celle-ci. Dans ce cas donc, l'accumulateur ne sert qu'à augmenter le volant d'eau de la centrale. De ce fait, les variations de charge de la chaudière seront fortement atténuées et, au moment des pointes qui subsistent quand même, l'alimentation de la chaudière en eau de l'accumulateur qui est donc déjà à sa température d'ébullition contribue encore à atténuer la variation de charge.

Dans ce cas, l'accumulateur atténue très fortement l'effet des variations de charge sur la chaudière et l'appareillage est extrêmement simple. De plus, la vapeur qu'il fournit traverse le surchauffeur et ne doit pas être utilisée dans des turbines spéciales (Ruths ou à deux vapeurs). Par contre, le surchauffeur qui est un organe important de la chaudière est encore soumis à toutes les variations de charge. Il y aura donc de fortes variations de la surchauffe avec la charge.

Dans tous les cas, les accumulateurs auront pour effet d'améliorer le rendement des générateurs de vapeur. Il existe des générateurs de vapeur bien étudiés pour lesquels la variation du rendement avec la charge est faible, grâce surtout aux récupérateurs. Dans ce cas. sauf variations de charges extrêmement fortes. la présence d'un accumulateur ne s'imposerait pas au point de vue du rendement. Mais supposons qu'une centrale ait des pointes très élevées et de courte durée. L'accumulateur permettra alors d'établir des chaudières moins coûteuses, ce qui pourrait justifier sa présence. Tout dépend donc encore ici des circonstances de l'exploitation.

IV. — Interconnexion des centrales.

L'interconnexion des centrales constitue l'une des plus belles solutions présentées pour obtenir le maximum de rendement des installations motrices en même temps que le minimum d'immobilisations. Nous aurons à nous étendre plus longuement sur ce chapitre que sur les autres pour bien en faire ressortir tous les avantages.

La plupart des installations actuelles de force motrice ont en vue la production de courant électrique qui permet une grande diffusion de force motrice sous une forme très avantageuse. Or, ce qui a fait le succès de l'énergie électrique est la facilité de son transport économique.

On conçoit ainsi que les centrales de force motrice puissent se raccorder par des lignes électriques et se fournir une aide mutuelle. Pour celà, et en vue d'une exploitation économique, il faut que les diverses génératrices électriques soient à courant alternatif triphasé de même fréquence.

On modifiera la tension lorsque celà sera nécessaire par des transformateurs.

Enfin, on fera facilement passer le courant sous la forme que l'on désire :

a) par transformateurs polymorphiques si l'on désire du courant biphasé (fours électriques) ou hexaphasé (redresseurs à mercure, commutatrices) ;

b) par redresseurs à mercure, commutatrices, groupe moteur générateur si l'on désire du courant continu (tramways, laminoirs, mines, appareils de levage, etc.).

Sans avoir à insister ici sur le côté électrique de la question, nous pouvons cependant remarquer que les rendements de la transformation et du transport de l'électricité sont très élevés et que l'électricité seule permet de donner des télé-indications qui sont nécessaires pour la bonne conduite de centrales interconnectées.

But de l'interconnexion.

Le but poursuivi est d'organiser l'exploitation en commun des installations génératrices des affiliés comme s'il s'agissait d'une entreprise unique en vue d'assurer la production de l'énergie avec un maximum d'économie pour l'ensemble des coopérateurs. Il est bon que ceux-ci représentent toutes les espèces d'industries :
métallurgie, charbonnages, chemins de fer et tramways. industries chimiques, sociétés de distribution d'électricité, etc.

Avantages de l'interconnexion.

Les avantages en résultant sont :

1. *Amélioration des courbes de charge.*

Les diverses industries interconnectées étant de natures différentes ne présentent pas leurs pointes de consommation en même temps. La sommation des diagrammes de charge des divers consommateurs donnera donc lieu à une pointe maxima inférieure à la somme des pointes maxima des divers consommateurs. Le résultat tangible est que la puissance installée nécessaire totale sera moindre que la somme des puissances à installer par les diverses centrales agissant séparément. De plus. la réserve indispensable, beaucoup moindre, sera plus souvent utilisée, ce qui accroît encore l'avantage de l'interconnexion.

2. *Amélioration du coefficient d'utilisation des machines.*

La puissance installée étant beaucoup moindre que dans le cas de la marche autonome. et la consommation de force motrice étant toujours la même, il va de soi que le coefficient d'utilisation des machines sera beaucoup plus élevé.

Le coefficient d'utilisation est le rapport de l'énergie réellement produite à celle qui serait produite si la machine était constamment à pleine charge.

3. *Possibilité d'utiliser les sources d'énergie les plus économiques.*

Si chaque consommateur est forcé d'établir sa propre installation motrice, il arrivera fréquemment que les petites installations même bien conçues n'auront qu'un rendement relativement bas car ces petites installations ne justifieraient souvent pas, au point de vue économique, l'établissement de tous les organes qui entraînent un rendement élevé.

Dans un réseau d'interconnexion, il existe des installations anciennes mais qui, économiquement, ne peuvent encore être remplacées par des installations modernes à haut rendement; enfin, viennent en troisième lieu, les installations pourvues de tous les perfectionnements modernes et donnant un haut rendement en régime.

En marche autonome, chacune de ces installations verra encore son rendement économique baisser du fait des variations de charge.

Etablissons l'interconnexion et faisons marcher en permanence et en pleine charge les machines qui donnent le rendement le plus élevé ou plus exactement les machines qui produisent le courant au prix de revient minimum. Nous réalisons du même coup une forte économie en

laissant au repos les installations les plus coûteuses et en n'utilisant les moins mauvaises que comme appoint ou comme réserve.

4. *Création d'un excès de puissance disponible.*

Nous avons vu que, du moment où l'on a réalisé l'interconnexion, on ne doit plus disposer que d'une puissance installée beaucoup moindre. Tout le surcroît passe à la réserve. Si on ne juge pas qu'il soit préférable de démolir une partie de ce surcroît, il pourra être utilisé au moment d'une demande extraordinaire d'énergie et en tout cas, il permettra de ne pas devoir faire de nouvelles installations avant un certain temps et cela malgré l'accroissement partout constaté de la consommation d'énergie.

Cet avantage qui n'existe que pendant les quelques années qui suivent l'interconnexion est compensé d'ailleurs en partie par la nécessité d'amortir ces installations qui vieillissent sans être utilisées.

5. *Possibilité d'emploi d'unités de grande puissance.*

Dès que l'on aura des unités à remplacer, on s'attachera à y substituer des unités de grande puissance bien connues pour leur rendement élevé et économique. Des chiffres feront mieux ressortir ces avantages que de longs discours.

Lorsque la Linalux (Union des centrales électriques Liége-Namur-Luxembourg) a réalisé l'interconnexion, la somme des pointes des consommateurs affiliés était 156,000 kw. Après l'interconnexion, la pointe maximum tombait à 135,000 kw., d'où réduction possible de 21,000 kw. dans la puissance installée si l'on ne tient pas compte de la réserve.

Avant l'interconnexion, la réserve totale était 54,000 kw., après l'interconnexion, une réserve de 34,000 kw. suffit.

On disposait donc d'un excédent de puissance installée d'au moins : (156,000 + 54,000) — (135,000 + 34,000) = 41,000 kw., qu'il fallait malheureusement amortir jusqu'à ce qu'on puisse le désaffecter. Le coefficient d'utilisation des moteurs à gaz passe de 71 à 97 % ; celui des turbines à vapeur de 0,61 à 0,625. Il est certain qu'en l'absence des moteurs à gaz de récupération plus avantageux que les turbines, le coefficient d'utilisation de celles-ci eût subi une augmentation beaucoup plus forte pour les unités les plus économiques surtout.

On a pu évaluer le bénéfice quotidien à 400 tonnes de charbon, ce qui correspond à une production d'énergie d'au moins 400.000 kwh. dans les centrales à vapeur.

Les bénéfices dus à l'interconnexion sont donc énormes et tout à fait évidents. Encore faut-il qu'une bonne organisation amène les industriels à s'y rallier en leur donnant la certitude de bénéfices financiers tels qu'ils abandonnent de bon gré la conduite de leur centrale à la société d'interconnexion malgré certaines questions d'amour-propre qui s'immiscent parfois dans ces problèmes. Nous donnons ci-dessous un aperçu de l'organisation de la Linalux qui semble toucher de près à la perfection.

Organisation de la Linalux.

Cette organisation est basée sur un système de tarification appelée tarification RFK.

Le terme R (en anglais rent) représente les intérêts et l'amortissement d'une installation. Ce terme est fonction de la puissance installée et il existe même si l'installation est arrêtée. Il s'exprime en francs par an et par kwh. ;

F (fees) représente les frais fixes occasionnés par une marche à vide : personnel, charbon, huile, etc. et est à peu près proportionnel à la puissance. Il s'exprime en francs par an et par kwh. ;

K représente les frais de combustibles supplémentaires pour faire débiter la machine. Ce terme est sensiblement proportionnel à la puissance débitée et au temps pendant lequel elle est débitée. Il s'exprime en francs par kwh.

Exemple : Soit une centrale de 1.000 kw. marchant 4.000 heures par an et produisant donc 4.000.000 de kwh. par an.

$$R = \frac{220.000}{4.000.000} = 0{,}055 \text{ fr./kwh.}$$

$$F = \frac{244.000}{4.000.000} = 0{,}061 \text{ fr./kwh.}$$

$$K = \frac{584.000}{4.000.000} = 0{,}146 \text{ fr./kwh.}$$

220,000 ; 244.000 et 584.000 francs représentant respectivement l'intérêt et l'amortissement, les frais fixes, et le prix du combustible supplémentaire en un an.

Le prix de revient en marche autonome est donc :

$$0{,}055 + 0{,}061 + 0{,}146 = 0{,}262 \text{ fr./kwh.}$$

Si le producteur est affilié, le prix de revient du kwh. devra rester le même. Donc :

a) si on lui impose d'arrêter son installation que l'on affecte à la réserve, celle-ci lui occasionne des frais égaux à R = 0,055 fr. par kwh. consommé. On ne pourra donc lui faire payer que F + K = 0,207 fr./kwh.

b) si on lui impose de tenir sa machine en marche à

vide ou en sous-charge (machine d'appoint), les frais qui lui incombent sont R + F par kwh. qu'il prend au réseau et on ne pourra lui faire payer que K = 0,146 fr. par kwh.

c) si on lui impose de fournir du courant au réseau, on lui paiera R + F + K = 0,262 fr. par kwh.

d) enfin, si l'affilié peut se dispenser de faire construire une telle installation, grâce à l'interconnexion, on ne pourra lui faire payer que le prix de revient y correspondant : 0,262 fr. par kwh., faute de quoi il établirait sa centrale autonome.

On ne voit pas encore jusqu'à présent l'avantage que pourrait retirer l'affilié de l'interconnexion. Mais la société d'interconnexion par la meilleure organisation de la production dispose de courant à un prix plus avantageux que celui qu'elle fait payer à ses affiliés, aussi pourra-t-elle réaliser un bénéfice qui sera réparti entre les affiliés au prorata de leurs fournitures ou de leurs consommations de courant.

Ceci ne constitue évidemment qu'un schéma de l'organisation, car il faut tenir compte de la variation des besoins dans le temps et du rôle que devra jouer l'affilié dans l'organisation. On cherche en somme à rendre l'affilié indifférent à l'allure de sa centrale ou même à son existence.

L'application des redevances se base sur des mesures électriques. La marche des diverses centrales est réglée de la façon la plus économique par un organe central dénommé dispatching. Cet organe donne ses ordres aux diverses centrales en se basant sur les charges des jours antérieurs et sur tous les moyens de prévision dont il peut disposer.

Ajoutons que les machines thermiques marchent autant que possible toujours en pleine charge, l'appoint étant fourni par la centrale hydraulique de la Serma qui possède une plus grande souplesse que les centrales thermiques.

On constate ainsi qu'au lieu de se concurrencer, les centrales thermiques et hydrauliques peuvent très bien se conjuguer et s'aider efficacement dans la poursuite du prix de revient minimum.

Signalons au passif de l'interconnexion des centrales, le coût d'établissement des réseaux de compensation souvent à haute tension et de l'appareillage supplémentaire qu'elle occasionne, l'amortissement, les frais d'entretien et de salaires qui lui incombent et les pertes d'énergie dans les lignes et les postes de transformation.

Dans la majorité des cas, l'interconnexion sera donc avantageuse. Cependant, une centrale autonome disposant d'une charge assez régulière et douée des perfectionnements modernes pourra très bien se suffire à elle-même.

Ce sera surtout ce qui se présentera lorsque l'usine qui possède la centrale a des besoins importants de vapeur pour sa fabrication.

Une installation bien conçue avec turbine à contre-pression ou à soutirage donnera un rendement économique tel que l'interconnexion ne présenterait plus guère d'intérêt; le prix de revient de l'énergie pouvant être très faible dans ces conditions, il ne serait guère possible à la société d'interconnexion de fournir du courant à l'usine considérée; mais celle-ci pourrait être construite de façon qu'elle fournisse en permanence du courant au réseau d'interconnexion à un prix très avantageux pour celui-ci aussi bien que pour la centrale elle-même, ceci pour autant qu'il ne soit pas nécessaire d'établir une ligne électrique très longue pour un transport minime d'énergie.

L'interconnexion est donc toujours avantageuse sauf cas tout à fait spécial.

V. — Grands réseaux de distribution d'électricité.

L'accroissement des réseaux électriques grâce à la compensation des besoins des consommateurs aura aussi souvent d'heureux effets pour les mêmes raisons qui ont fait trouver avantageuse l'interconnexion des centrales : diminution de l'importance relative des pointes, emploi de fortes unités à grand rendement, emplacement avantageux des centrales (transport de charbon, eau de condensation), fort pourcentage des machines et des chaudières fonctionnant en pleine charge, diminution relative de la réserve. Un grand réseau comprenant plusieurs centrales constitue à lui seul un système d'interconnexion.

Il n'est donc pas nécessaire d'insister sur ce chapitre.

Remarquons seulement que les centrales qui alimentent un réseau doivent être réparties géographiquement de façon que le coût du réseau soit le plus faible possible et que les pertes d'énergie dans les lignes soient minima, ce qui demande une étude approfondie.

Si l'on agrandit encore un peu l'horizon, on en arrive à l'établissement de grands réseaux interconnectés entre eux. Ceci explique l'idée de certains ingénieurs qui cherchent à relier tous les grands réseaux européens par des lignes de compensation, les centrales thermiques et hydrauliques contribuant à la production de toute l'énergie électrique consommée en Europe. On pourrait certainement arriver par cette voie à une production très économique de la force motrice.

Jusqu'à présent cependant, on doit se borner à des solutions plus modestes qui d'ailleurs donnent d'excellents résultats.

VI. — Etablissement d'une tarification spécaile.

Si les centrales de distribution fixaient un prix plus élevé pour l'énergie consommée au moment des pointes et un prix plus bas pour celle demandée pendant les périodes de sous-consommation, il serait possible qu'elles parviennent à amener les consommateurs à répartir leurs demandes d'une façon plus avantageuse au point de vue de la régularité de la charge.

Mais les consommateurs pourraient outrepasser les souhaits des centrales en permutant les moments des pointes et des sous-consommations. Le comptage de l'énergie soumise à un tarif différentiel présenterait d'ailleurs de grandes difficultés. Elle pourrait entraîner certains gros consommateurs à établir des centrales autonomes pour pouvoir maintenir leurs habitudes. Ce serait donc une solution pouvant ne donner que des déboires à ceux qui voudraient l'appliquer d'une façon trop énergique.

VII. — Etablissement d'industries électro-chimiques.

Les industries chimiques basées sur les applications de l'électricité deviennent de plus en plus nombreuses et ont des débouchés croissant constamment. Aussi, a-t-on pu penser que de telles industries adjointes à des centrales de force motrice pourraient régulariser la charge de celles-ci en accroissant leur rendement.

La centrale serait prévue pour une puissance dépassant la plus forte pointe de consommation et elle fonctionnerait constamment en pleine charge.

L'excédent d'énergie serait utilisé à des fabrications chimiques.On remarque immédiatement qu'en procédant ainsi, on tourne dans un cercle vicieux car on supprime les variations de charge de la centrale mais on les reporte

sur l'usine chimique qui ne pourrait disposer que d'une puissance variant dans le temps en sens inverse de la consommation du réseau.

Cette solution ne peut donc devenir d'application générale. Elle apporterait cependant des avantages dans certaines circonstances. Ainsi, pour nous placer dans un cas simple, supposons que le diagramme de charge d'une centrale soit le suivant :

Il s'agit d'une centrale qui pendant le jour fournit une force motrice constante; le soir, elle fournit encore la même charge jusqu'à 24 heures; puis de 24 heures à 8 heures du matin, sa charge est faible (voir fig. 62). L'adjonction d'une fabrication chimique absorbant une puissance B-A de 0 h. à 8 h. pourrait être avantageuse. Cette usine chimique devrait d'ailleurs s'accommoder d'une marche discontinue et exiger un personnel peu nombreux qui serait difficile à recruter pendant ces heures creuses, sans compter avec la loi qui pourrait s'y opposer.

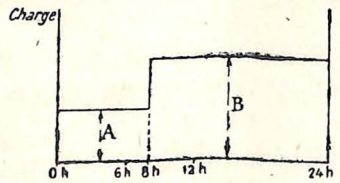


Fig. 62

L'exemple donné est d'ailleurs tout à fait schématique.

La charge d'une centrale subit toujours des variations quel que soit le moment du jour ou de la nuit. Néanmoins, il est possible que l'adjonction d'une industrie chimique à une centrale puisse régulariser la charge de celle-ci et se montrer avantageuse, mais celà ne peut se produire que dans des cas spéciaux

VIII. — Etablissement de réseaux de chauffage urbain.

Des réseaux de chauffage par la vapeur ont déjà été établis dans certaines villes d'Amérique, d'Allemagne et de France. La vapeur qu'ils fournissent peut avoir subi une certaine détente préalable dans des turbines à contrepression ou à soutirage avant d'être livrée au réseau.

La centrale se comporte alors comme une installation demandant de grandes quantités de vapeur pour la fabrication en même temps que de la force motrice.

Une partie sinon la totalité de la vapeur produite sera condensée dans le réseau de chauffage et n'aura donc pas à passer dans un condenseur qui exige de la force motrice (eau de circulation, pompe d'extraction) et qui doit être amorti et donner un intérêt au capital.

Par contre, la vapeur n'aura pas épuisé toute sa capacité de travail car elle sera fournie au réseau sous une pression dépassant toujours une atmosphère.

La vente de la vapeur devra donc rapporter au moins une somme égale au prix de l'énergie qui eût pu en être extraite diminué du coût de production de cette énergie (machines, condenseur) et augmenté de l'intérêt, de l'amortissement et des frais d'entretien et de salaires relatifs au réseau de chauffage.

La vapeur ne fournissant pas tout le travail qu'elle eût pu donner, la production de vapeur sera plus grande et par suite la batterie de chaudières sera plus importante.

Il va de soi que dans ce cas, tout comme dans celui d'un chauffage industriel, le rendement en travail de la vapeur sera moins élevé que dans une centrale à condensation pure, mais le rendement thermique total sera plus élevé puisqu'il n'y a pas de pertes au condenseur ou qu'il n'y en a guère tant.

De plus, une bonne répartition dans le temps de la demande de force motrice et de vapeur de chauffage pourra contribuer à la régulation de la charge de la batterie de chaudières, mais pas à la régulation de la charge des turbines qui devront toujours fournir la force motrice demandée.

L'établissement d'un réseau de chauffage public sans avoir un grand effet sur la régulation de la charge pourra donc améliorer le rendement thermique de l'installation et donner de bons résultats financiers si les circonstances s'y prêtent : centrale établie dans un quartier en voie de construction, à population dense. Dans ces conditions, les conduites de vapeur ne devront pas très trop longues et à défaut d'installations pré-existantes de chauffage, les propriétaires se raccorderont en général au réseau de chauffage urbain.

CONCLUSIONS A PROPOS DES MOYENS DE REGULATION DE LA CHARGE

Il résulte des huit moyens envisagés pour régulariser la charge des centrales et augmenter leur rendement économique que l'interconnexion des réseaux et l'établissement de grands réseaux, si possible interconnectés, donneront en général d'excellents résultats.

Ces solutions ne peuvent s'appliquer qu'à la suite d'ententes entre les industriels et que par l'obtention de vastes concessions. Elles procèdent l'une et l'autre de la doctrine économique qui tend à la concentration industrielle. Ces solutions ne pourront s'appliquer que dans les pays industriels ou dont la population est assez dense.

Si par manque d'entente ou pour toute autre raison, ces solutions ne peuvent être envisagées, ou bien s'il s'agit

de centrales éloignées de tout centre industriel ou de centrales établies dans des pays à population peu dense ou encore dans des pays neufs, il faudra envisager les autres solutions; il n'en existe guère que deux qui puissent donner de bons résultats d'une façon assez générale: l'adoption d'accumulateurs de vapeur et l'établissement de fabrications chimiques. Enfin, les trois autres systèmes; accumulateurs électriques, accumulateurs hydrauliques, tarification différentielle ne pourront jamais s'appliquer avantageusement que dans des circonstances tout à fait spéciales.

En tout cas, quelque séduisante que soit à première vue une de ces solutions, il ne faudra l'adopter qu'après une étude économique approfondie et tenant compte de toutes les circonstances dans lesquelles on se trouve.

C'est précisément la présence de toutes ces contingences auxquelles on ne pense pas à priori qui fait que telle solution très avantageuse dans tel cas est complètement anti-économique dans tel autre cas.

Citons un exemple : la recherche de l'amélioration du rendement amenant souvent une augmentation du prix de l'installation, on pourra se permettre de faire une installation plus coûteuse en vue d'obtenir un rendement plus élevé en un pays dépourvu de charbon qu'en un pays où le charbon est abondant et à bon marché, si même les deux installations doivent répondre exactement aux mêmes besoins.

Il est donc impossible de tirer une conclusion absolue d'une étude générale si approfondie soit-elle. On ne peut qu'y signaler les avantages et les inconvénients des divers systèmes préconisés. Dans chaque cas particulier, il faudra envisager ces avantages et ces inconvénients que fait ressortir l'étude générale et de plus toutes les contin-

gences propres à l'installation considérée. On pourra déjà par là rejeter un certain nombre de solutions.

Le choix parmi celles qui restent sera basé sur une évaluation du prix de revient de l'énergie, évaluation qui devra encore tenir compte des conditions auxquelles est soumise l'exploitation. La solution donnant le prix de revient le plus bas sera alors admise.

Tout ce que nous disons a simplement pour but de montrer la prudence qui s'impose dans le choix d'une installation et non pas de dénigrer la recherche du meilleur rendement car il est incontestable que celui-ci joue un rôle primordial dans l'établissement du prix de revient de l'énergie, seule base rationnelle d'un projet d'installation de force motrice. Aussi, ne peut-on s'exagérer l'importance d'une amélioration du rendement surtout si celle-ci coïncide avec une diminution du prix de l'installation. C'est à ce but que doivent tendre toutes les recherches du domaine des centrales thermiques.

A ce propos, et sans vouloir dire que cette solution s'impose dans tous les cas, il semble qu'une installation conçue comme suit doive donner un excellent rendement thermique aussi bien qu'économique :

chaudière à très haute pression et très haute surchauffe, chauffée au pulvérisé ; récupération par réchauffair ; unités de turbines très puissantes ; réchauffage de l'eau d'alimentation par soutirages ; éventuellement résurchauffe en cours de détente ; production de courant alternatif à haute tension ; centrale interconnectée.

Cette solution se rapportant à une centrale puissante produisant exclusivement de la force motrice et non de la vapeur de chauffage est déjà adoptée dans certaines grandes installations américaines disposant de capitaux importants. Elle réunit la plupart des éléments d'un rendement élevé et si elle n'est pas encore plus en vogue, cela est certainement dû à la prudence des industriels qui attendent les résultats des essais avant de se lancer dans une voie aussi neuve.

Certains établissements belges ont d'ailleurs déjà adopté ces principes pour leurs nouvelles installations: citons à cet égard la centrale de Langerbrugge qui suit résolument la voie du progrès et de la recherche expérimentale des hauts rendements par ses installations d'essai.

FIN