

BULLETIN OERLIKON

No. 26 — Août 1923

Les chaudières électriques et accumulateurs de vapeur. Par F. Rutgers.

L'emploi de l'énergie électrique à la production de la vapeur est continuellement en progression. Aussi, nous proposons-nous de décrire dans cet article les chaudières électriques, leur mode de réglage et les accumulateurs de vapeur. Nous indiquerons ensuite la manière de les dimensionner; nous ajouterons un exemple d'installation exécutée et examinerons finalement quels sont les cas dans lesquels il convient de produire électriquement la vapeur.

1^o Mode de fonctionnement et réglage des chaudières électriques (Chaudières à électrodes et tubulaires).

Dans les **chaudières à électrodes** les électrodes plongent dans l'eau que le courant traverse en la chauffant jusqu'à ce qu'il y ait production de vapeur.

Les chaudières triphasées qui sont les plus employées comportent 3 électrodes. La chaudière même constitue le point neutre mis à la terre. Le courant passe en partie par l'eau entre les électrodes (couplage triangle), en partie, des électrodes au point neutre formé par la paroi de la chaudière et une électrode spéciale (couplage étoile). Au point de vue électrique la chaudière triphasée à électrodes constitue un système avec couplage parallèle triangle-étoile dont le point neutre, obtenu par des résistances liquides, est à la terre.

La production de vapeur dépend de la puissance électrique absorbée. Un kW/h donne en moyenne env. 1,3 kg de vapeur de 6 à 12 atm. La puissance absorbée sous une tension donnée varie avec la résistance électrique de la chaudière, et comme elle doit être réglable, nous allons donc examiner de plus près cette résistance. La résistance électrique comprend essentiellement 3 parties: la résistance des électrodes, la résistance de passage entre les électrodes et l'eau, et la résistance de l'eau.

Les électrodes sont généralement prévues en fer ou en acier, et offrent par conséquent une faible résistance; mais, dans certains cas, par exemple quand il s'agit de fortes tensions ou d'électrodes auxiliaires, on peut aussi employer des matériaux à grande résistivité, tels que: nickel chromé, charbon, graphite, silite ou autres matières semblables, ainsi que des conducteurs de seconde classe.

La résistance de passage entre les électrodes et l'eau joue un rôle considérable. Elle semble être d'autant plus grande que la surface des électrodes est plus petite par rapport à l'intensité de courant, c'est-à-dire que la densité du courant est plus grande. Les bulles de vapeur qui se dégagent aux électrodes où elles forment une sorte de matelas ont une grande influence. Lorsque la densité de courant est trop forte il peut

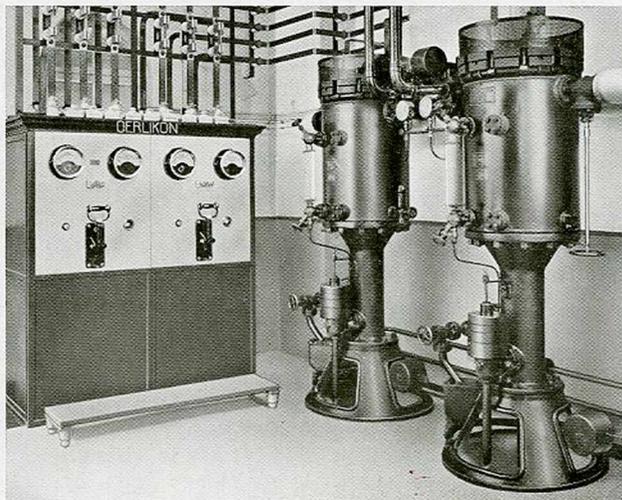
se produire sous l'eau des étincelles qui rendent la marche très agitée et augmentent l'usure des électrodes.

La troisième partie de la résistance, celle de l'eau, dépend de plusieurs facteurs qui nécessitent un examen approfondi en raison de leur importance. Cette résistance dépend premièrement de la longueur du chemin que le courant parcourt dans l'eau, deuxièmement de sa section, troisièmement du nombre de bulles de vapeur qui se dégagent, quatrièmement de la température de l'eau et cinquièmement de sa composition chimique. Le réglage de la chaudière à électrodes repose sur la connaissance exacte et la maîtrise de ces 5 facteurs.

Les 3 premiers facteurs sont de nature géométrique et dépendent du système et de la grandeur de la chaudière. Le système le plus avantageux est celui où, pour une forte charge, le courant traverse le maximum d'eau. Dans ce cas on a relativement la plus faible densité de courant aux électrodes et dans l'eau, de sorte que le chauffage de l'eau et la production de bulles de vapeur se répartissent sur un plus grand volume. L'inconvénient résultant des bulles de vapeur en formation se réduit alors au minimum. C'est la chaudière Revel, telle que la construisent les Ateliers de Construction Oerlikon en collaboration avec la Maison EscherWyss & Cie. à Zurich, qui remplit le mieux cette condition.

Le réglage s'effectue en faisant monter ou descendre le niveau de l'eau, tandis que les électrodes restent fixes, de sorte qu'à la plus forte charge on a le niveau le plus élevé avec le maximum d'eau et de surface active des électrodes. Il existe d'autres systèmes dans lesquels, au contraire, on augmente la puissance en rapprochant les électrodes avec ou sans l'aide de contre-électrodes. Le maximum de puissance correspond, dans ce cas, au plus petit écartement des électrodes et au minimum du volume d'eau actif, ce qu'il faut précisément éviter. Il est moins facile d'agir sur le quatrième facteur, la température de l'eau, qui dépend surtout de la pression de vapeur à obtenir. Mais, comme cette température n'est pas uniformément répartie dans la chaudière, on s'arrange pour que les parties qui doivent laisser passer le moins de courant, se trouvent dans les régions les plus froides de l'eau.

L'eau froide accuse une plus grande résistance que l'eau chaude, ce qui se fait d'ailleurs sentir à la mise en marche de la chaudière. Cet état de chose est inséparable de la constitution chimique de l'eau qui joue aussi un rôle important, car elle se modifie considérablement et d'une façon permanente



Installation de chaudières Revel du tissage de soie de la Maison Heer à Thalwil, pour une production horaire de 1000 kg de vapeur.

ATELIERS DE CONSTRUCTION OERLIKON, OERLIKON

par suite du chauffage progressif, au cours duquel certains sels de chaux sont éliminés aux différentes températures. Il ne faut pas perdre de vue que l'eau chimiquement pure n'est pas conductrice, et que, d'après la conception actuelle des électrolytes, ce sont les sels en dissolution, dissociés sous forme d'ions qui rendent possible le passage du courant. Comme les solutions faibles ont toutes leurs molécules de sel dissociées, leur conductibilité est donc proportionnelle à leur degré de concentration. A mesure qu'on élève la température d'une solution la dissociation de la plupart des sels diminue bien un peu, mais les ions acquièrent une plus grande mobilité. La meilleure conductibilité qui en résulte, se trouve toutefois de nouveau partiellement réduite, lors de la mise en marche de la chaudière à électrodes, par l'élimination des sels de chaux qui occasionne une diminution du nombre d'ions. La puissance accuse d'abord un fort accroissement à mesure que l'eau chauffe, pour diminuer ensuite quand les sels de chaux les plus importants sont éliminés. Ce phénomène est particulièrement gênant dans les chaudières où l'écartement des électrodes est réglable, tandis que dans les chaudières Revel on l'évite facilement en faisant varier le niveau de l'eau.

Les considérations précédentes sur la variation de la résistance et de l'état chimique de l'eau qui résulte de l'accroissement de température, conduisent à d'importantes déductions au point de vue pratique. Comme toutes les eaux d'alimentation contiennent toujours, en petites quantités, des sels qui restent dans la chaudière pendant la vaporisation, il s'ensuit que le degré de concentration et la conductibilité de la solution augmentent constamment. Il serait donc impossible de maintenir toujours une chaudière à électrodes en service sans la vider complètement par intervalles réguliers, ou sans qu'il fût possible d'éliminer pendant la marche les sels qui s'y accumulent. La chaudière Revel possède des dispositifs spéciaux qui permettent de régler pendant le service la quantité d'ions conducteurs qu'elle contient en dissolution. Il en résulte un autre avantage de la chaudière Revel, en ce sens que, par suite du maintien de la pureté de l'eau, on peut la construire pour une faible capacité, ce qui facilite une mise en marche et un réglage rapides.

Après avoir examiné les facteurs théoriques dont dépend le fonctionnement des chaudières à électrodes, nous indiquerons rapidement comment les Ateliers de Construction Oerlikon en tiennent compte. A cet effet nous considérons spécialement le type de chaudière employé pour des tensions jusqu'à environ 10000 volts et une puissance d'env. 2000 kW. Cette chaudière possède des électrodes fixes et un dispositif intérieur formé de plaques isolantes fixes qui prescrivent la longueur du chemin que le courant doit suivre dans l'eau. Ce chemin est prévu en grande partie dans le sens horizontal, de manière que les bulles de vapeur qui le traversent verticalement s'échappent par la voie la plus courte. Le réglage de la puissance s'effectue en faisant monter ou descendre le niveau de l'eau et ne nécessite aucun mécanisme dans la chaudière. Pour augmenter la puissance on élève le niveau de l'eau qui couvre alors une plus grande surface des électrodes et présente une plus forte section au passage du courant, de sorte que la puissance augmente sans que la densité de courant subisse une variation sensible. C'est là un grand avantage sur les autres systèmes de chaudière avec réglage de l'écartement des électrodes. Les tubes isolants, bien connus, sujets à des dérangements et accidents fréquents, sont complètement éliminés dans les chaudières Revel.

La chaudière Revel peut, suivant le besoin, être complétée par différents dispositifs automatiques de sécurité, tels que:

1° Une soupape automatique d'évacuation de l'eau, qui agit momentanément en cas d'augmentation subite de la pression.

2° Un contact supérieur qui, une fois immergé, arrête la pompe d'alimentation pour empêcher l'eau d'atteindre un niveau trop élevé dans la chaudière. Ce contact peut être combiné avec un dispositif qui remet automatiquement la pompe en marche lorsque le niveau est redescendu assez bas.

3° Une soupape de réglage automatique qui laisse l'eau s'échapper (ou réduit son admission) quand son niveau est trop élevé, et qui se referme lorsque le niveau est assez bas.

4° Un contact inférieur qui déclenche l'interrupteur principal dès que l'eau descend au-dessous d'un certain niveau minimum, pour éviter la formation d'étincelles entre les pointes d'électrodes et la surface de l'eau.

On peut en outre employer les différents dispositifs connus, tels que: relais à courant maximum et minimum, déclenchement à tension nulle, déclenchement par courant à la terre, mise hors-circuit de la chaudière en cas de trop forte pression. Il convient encore de citer un dispositif qui permet d'agir sur la concentration de l'eau dans la chaudière pendant le service; ce dispositif peut être réglé soit à la main, soit automatiquement par la hauteur du niveau de l'eau. Pour les hautes tensions il peut être utile de prévoir au-dessous du niveau le plus bas, des électrodes auxiliaires de faible surface ou de forte résistance ohmique, qui sont raccordées aux électrodes principales (électrodes de travail) et dont le but est d'empêcher une coupure de la tension contre l'eau, quand, par suite de l'abaissement du niveau, les électrodes principales émergent complètement. Comme elles sont montées dans le bas de la chaudière, elles donnent toujours passage à une partie du courant et permettent d'éviter la formation d'étincelles au bout des électrodes principales.

Dans les chaudières à électrodes, surtout lorsqu'elles sont raccordées directement à des réseaux haute tension, la mise à la terre du point neutre par l'eau de la chaudière mérite une attention spéciale. Il faut en tenir compte pour disposer le compteur, comme il faut aussi examiner dans chaque cas quelle grandeur atteindraient les courants à la terre et les surtensions qui en résulteraient s'il se produisait un dérangement sur le réseau. Cette grandeur dépend entr'autres de la résistance de la ligne et de la plaque de terre. On peut au besoin prévoir un relais à courant ou à tension de mise à la terre, qui déclenche la chaudière lorsqu'une perte sur l'une des phases du réseau occasionne un fort déplacement des tensions des autres phases contre terre. Jusqu'ici nous n'avons pas eu connaissance de dérangements produits par la mise à la terre du point neutre d'une chaudière.

Un autre groupe de générateurs électriques de vapeur comprend les **chaudières tubulaires** dans lesquelles le courant ne passe plus du tout par l'eau, mais par des résistances isolées, logées dans des tubes de chauffe. Comme ces chaudières ont déjà fait l'objet d'une description détaillée (voir Schweiz. Bauzeitung, tome LXXI, 1918, et le Génie Civil du 30 Août 1919) nous nous bornerons à quelques remarques. Le dernier genre de construction permet de tenir en stock, comme réserve, des tubes de chauffe séparés, complètement bobinés, qu'il est facile de monter sur les lieux mêmes à la place de ceux qui pourraient être avariés. Les chaudières tubulaires conviennent plutôt, de par nature, pour les petites puissances et les tensions inférieures à 600 volts; mais elles offrent l'avantage d'être réglables par degrés fixes, par la mise en ou hors circuit de leurs différents groupes de tubes, et de ne nécessiter aucun personnel ayant des connaissances techniques. Elles sont aussi

ATELIERS DE CONSTRUCTION OERLIKON, OERLIKON

mieux appropriées pour le courant continu que les chaudières à électrodes qui, en raison de la décomposition de l'eau, exigent des mesures de prudence et n'entrent par conséquent guère en ligne de compte pour ce genre de courant.

2° Les accumulateurs de vapeur s'emploient avec les chaudières électriques lorsqu'on ne dispose pas d'énergie électrique en temps voulu ou en quantité suffisante pour couvrir les besoins de vapeur. Dans le cas le plus fréquent on produit la vapeur avec du courant fourni la nuit, à prix réduit, ou en dehors des heures de travail. Cette vapeur est alors utilisée au chauffage un peu avant le commencement du travail, ou à la fabrication et au chauffage pendant les heures de travail. On emploie aussi souvent un accumulateur pour couvrir un besoin de vapeur variable par une puissance électrique constante, exactement comme une chaudière ordinaire à grand volume d'eau, qui peut donner un débit de vapeur très variable quand on la chauffe d'une façon uniforme.

Le principe de l'accumulateur de vapeur est très ancien.

Il consiste à envoyer de la vapeur dans une chaudière close, remplie d'eau. Cette vapeur chauffe l'eau et fait monter la pression dans la chaudière, suivant la courbe connue de température et de pression de la vapeur saturée. Pour soufrier de la vapeur il suffit d'ouvrir la soupape de l'accumulateur. Il se produit alors une diminution de pression et, en raison de la haute température de l'eau, un dégagement de vapeur par vaporisation subséquente, qui dure tant que la pression qui règne dans l'accumulateur, est inférieure à la pression de vapeur qui correspond à la température de l'eau. Le volume de vapeur de l'accumulateur ne joue qu'un rôle peu important; la capacité thermique principale réside dans l'eau. La disposition de l'installation est très simple. La vapeur est amenée de la chaudière électrique à l'accumulateur par un dispositif spécial aboutissant sous l'eau. La vapeur dont on a besoin est prise dans la chambre au-dessus de l'eau, p. ex. au moyen d'une soupape de réduction. Une soupape de retenue entre l'accumulateur et la chaudière électrique empêche l'eau ou la vapeur de retourner dans cette dernière. Dans bien des cas, lorsque la vapeur a atteint une pression qui correspond à la charge maximum de l'accumulateur, elle agit sur une soupape qui laisse passer l'excédant de vapeur dans d'autres chaudières qu'il faut chauffer ou dans des récepteurs (p. ex. appareils de chauffage) avant que la soupape de sûreté de l'accumulateur entre en action.

Il est très important de désaérer journalièrement l'accumulateur, car il y pénètre toujours des gaz permanents tels que l'air, l'acide carbonique etc. qui sont contenus dans l'eau d'alimentation. Ces gaz ne se condensent pas et par suite de leur pression partielle qui s'ajoute à celle de la vapeur, ils peuvent donner l'impression que l'accumulateur est chargé à sa capacité maximum, tandis qu'en réalité, bien que la pression totale soit atteinte, la température de l'eau n'a pas encore la valeur qui, d'a-

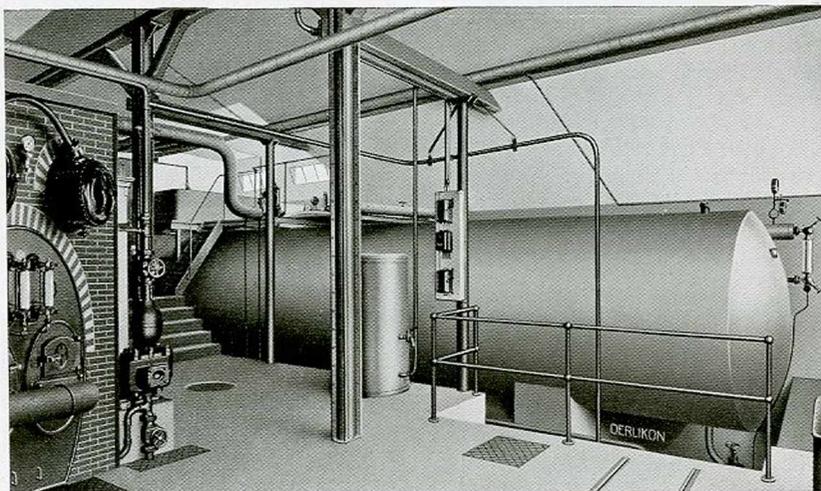
près la courbe de saturation, correspond à cette pression. Une désaération journalière empêche ce phénomène de se produire.

Pour déterminer la grandeur de l'accumulateur, c'est-à-dire pour calculer le volume d'eau nécessaire, il suffit généralement de recourir à une méthode approchée. La pression maximum dans l'accumulateur et la pression minimum de décharge, admise pour l'utilisation de la vapeur, étant données, on établit la différence de capacité thermique de l'eau pour ces pressions maximum et minimum. Les capacités thermiques sont indiquées dans toutes les tables caractéristiques de la vapeur, sous le nom de „chaleur du liquide“ en calories par kg d'eau. Si cette différence est par ex. de 85 calories entre les pressions maximum et minimum, chaque kilogramme d'eau dans l'accumulateur peut absorber 85 calories et les recéder sous forme de vapeur. Sous 2 atm. la chaleur de vaporisation est de 518 calories. Celles-ci sont fournies à la vapeur naissante par l'eau contenue dans l'accumulateur; on connaît donc le nombre de calories nécessaires pour un débit de vapeur dé-

terminé. Ce nombre, divisé par la différence de capacité thermique précitée, donne le nombre de kg d'eau que doit contenir l'accumulateur pour satisfaire au besoin de vapeur imposé. Lorsque la consommation de vapeur est d'assez longue durée, p. ex. une journée de travail, la quantité de vapeur disponible pendant ce temps diminue d'env. 10% par suite des pertes par refroidissement. Pour charger l'accumulateur en partant de la pression minimum il faut lui fournir la quan-

tité de chaleur qu'il devra plus tard céder sous forme de vapeur, augmentée des pertes pendant la charge. Celles-ci atteignent, pour une nuit, env. 10% de l'énergie fournie. En pratique on peut admettre que, en cas de charge d'un accumulateur pendant la nuit et souffrage de la vapeur le jour suivant, il faut compter environ 1 kilowatt-heure d'énergie de nuit par kg. de vapeur soufifiée, par un accumulateur avec un revêtement calorifuge de qualité normale. Il y a lieu de faire remarquer que, pour charger un accumulateur, on doit toujours, par suite des pertes de chaleur, lui fournir un peu plus d'eau qu'il n'en revaporise. On retire ensuite chaque fois cet excédant d'eau pour l'employer à l'alimentation de la chaudière à électrodes.

3° Un des nombreux exemples d'exécution de chaudières à vapeur à électrodes avec accumulateur de vapeur est donné par l'installation dans le tissage de soie de la maison Heer & Cie à Thalwil (Suisse). Cette installation, d'une puissance de 850 kW, comprend un accumulateur qui peut débiter 3000 kg de vapeur après chaque charge. L'énergie électrique est fournie sous forme de courant triphasé à 8000 volts. En raison des conditions locales on a préféré installer un transformateur pour éviter de recourir à des chaudières à électrodes à haute tension. Afin de disposer d'une réserve pendant le nettoyage d'une chaudière la puissance est répartie sur 2 chaudières à électrodes munies chacune d'une



Accumulateur de vapeur du tissage de soie de la maison Heer, pour 5000 kg de vapeur. A gauche, la chaudière Cornouailles employée également comme accumulateur.

ATELIERS DE CONSTRUCTION OERLIKON, OERLIKON

pompe d'alimentation. L'accumulateur est prévu pour un volume d'eau d'env. 55 m³. Sa pression maximum est de 12 atm. et la pression minimum de décharge de 2 atm. (chauffage de la fabrique). Lorsque l'accumulateur est chargé à sa pression maximum, une soupape donne passage à l'excédant de vapeur qui est envoyé dans les chaudières à foyer intérieur existantes qu'elle chauffe également jusqu'à leur pression maximum, ce qui d'ailleurs est rarement nécessaire. Le plus souvent on dirige directement, vers le matin, la vapeur en excédant sur le chauffage de la fabrique pour commencer à chauffer cette dernière avant le commencement du travail. Les figures montrent d'autres détails de l'installation. Depuis des années qu'elle est en service, celle-ci a toujours fonctionné sans aucun dérangement et donne satisfaction à tous les points de vue.

4^o Il reste encore à examiner dans quels cas il est surtout recommandable de prévoir une installation de chaudières électriques. Les chaudières électriques à vapeur, sans accumulateurs, peuvent être, entre autres, employées avantageusement:

a) quand on dispose constamment ou à certaines époques de l'année d'un excédant de courant à bon marché. Il y a lieu d'examiner dans chaque cas quel prix on peut payer pour le courant. Cela dépend beaucoup du rendement pratique de la production de la vapeur par du charbon dans l'installation en question, ainsi que de la grandeur des pertes pendant les arrêts de service et des pertes dans les conduites de vapeur. Les chaudières électriques Oerlikon qui se distinguent surtout par leur mise en route rapide qui ne dure environ que 5 minutes, peuvent être mises hors circuit pendant les arrêts du service. Elles peuvent en outre être installées dans les salles de travail à proximité des endroits où la vapeur est employée, de sorte que les pertes dans les conduites disparaissent.

b) quand on n'a besoin de vapeur que pendant quelques jours de la semaine et seulement quelques heures dans la journée. Dans ce cas les chaudières électriques travaillent dans des conditions très avantageuses parce qu'elles ne nécessitent aucun chauffage préalable et qu'il n'y a pas de pertes de chaleur produites par les arrêts. On peut alors souvent payer le kilowatt-heure à un prix aussi élevé que pour les moteurs.

c) quand on a besoin de petites quantités de vapeur dans des endroits éloignés de la chaufferie centrale.

Dans ce cas les pertes dans les longues conduites atteignent souvent plusieurs fois le besoin réel de vapeur. Comme la chaudière Revel peut être installée sur les lieux d'utilisation de la vapeur, elle est beaucoup plus économique, même si le courant est d'un prix élevé, qu'une chaudière chauffée au charbon et placée dans un endroit éloigné.

d) quand la vapeur peut être utilisée en dehors des heures de travail. Dans beaucoup de fabriques il est possible d'employer en dehors des heures de travail proprement dites les appareils qui consomment de la vapeur. On peut alors, la plupart du temps, utiliser avantageusement le branchement électrique existant à la production de la vapeur.

Les chaudières électriques à vapeur avec accumulateur sont nécessaires:

1^o quand de l'énergie électrique provenant de la propre centrale ou d'une centrale étrangère, est disponible la nuit à bon compte, et que la vapeur doit être utilisée dans la journée soit au chauffage soit à la fabrication.

Les fabriques qui possèdent des forces hydrauliques peuvent, avec l'eau disponible, produire et accumuler de la vapeur pendant de nombreuses heures en dehors des heures de travail, pour l'utiliser la journée suivante.

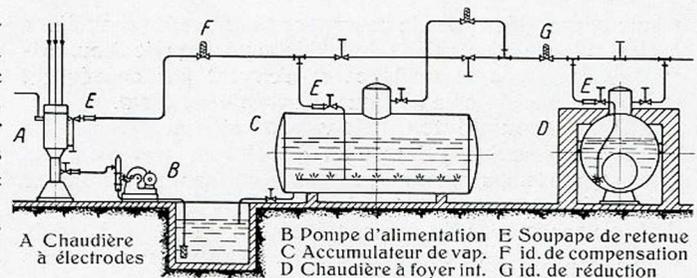


Schéma de l'installation d'une chaudière à électrodes raccordée à un accumulateur de vapeur.

Il faut alors mettre en service des turbines de réserve ou de nouvelles turbines qui sont prévues non pas pour le débit d'eau moyen d'hiver, comme cela s'est produit souvent jusqu'ici, mais pour le débit moyen d'été, car, dans cette saison, on dispose souvent, pendant le jour, d'un excédant d'énergie qui peut aussi être utilisé à produire de la vapeur. Le besoin de vapeur en été est couvert en grande partie par la propre centrale, ou par l'énergie qui reste encore disponible dans les centrales voisines.

2^o quand on a momentanément besoin de plus de vapeur que la chaudière électrique ne peut fournir en service normal.

Dans ce cas il suffit souvent de prévoir un petit accumulateur ou même une petite chaudière à foyer intérieur qui sert d'accumulateur-tampon. Dans certains procédés de fabrication la première mise en marche des appareils nécessite souvent une consommation de vapeur double de celle qui correspond au service permanent; un tel accumulateur-tampon qu'on chauffe avant de commencer le travail, est alors très avantageux.

3^o Il peut aussi se présenter le cas contraire où, par moment, on n'a pas besoin de la vapeur produite, tandis que l'énergie électrique reste disponible. A la place de l'accumulateur d'un prix élevé on emploie alors souvent un simple réservoir à eau chaude dans lequel tout l'excédant de vapeur est envoyé automatiquement, de sorte qu'on a toujours assez d'eau pour les besoins du service. De telles installations ont été exécutées dans des laiteries.

Il serait trop long d'examiner tous les cas où les chaudières électriques à vapeur sont avantageuses, soit pour l'industrie qui les utilise, soit pour les centrales électriques (compensation de la charge). Toutefois une remarque générale s'impose. L'installation existante, avec chaufferie centrale, n'est pas toujours rationnelle. Dans bien des cas on peut réaliser une économie considérable en décentralisant la production de la chaleur. Il est souvent préférable de remplacer certains récepteurs de vapeur par le chauffage électrique direct. En d'autres endroits de la fabrique, des petites chaudières électriques installées séparément sont avantageuses. Il faut tenir compte que la chaudière électrique possède pratiquement le même rendement sur une grande échelle de charge (les pertes n'atteignent qu'un faible pourcentage), et qu'on peut la chauffer dans 3 ou 4 minutes au moment où l'on a besoin de vapeur. Une fois ce besoin passé, on la met hors-circuit en une seconde et elle ne consomme plus d'énergie.

Celui qui sait bien mettre ces avantages à profit, pourra très souvent, en produisant électriquement la vapeur dont il a besoin, améliorer son exploitation et en réduire les frais. Mais il devra aussi toujours examiner dans quels cas il est avantageux de remplacer la vapeur par le chauffage électrique direct.