

ÉLECTRICITÉ

Les Chaudières électriques.

Par M. BERGEON, *Ingénieur Conseil, Sous-Directeur de l'Institut Electrotechnique de Grenoble*

GÉNÉRALITÉS

Les chaudières électriques, presque inconnues avant la guerre, sont aujourd'hui de plus en plus employées. D'après la documentation forcément très incomplète que nous avons pu rassembler sur ce sujet, nous croyons pouvoir dire qu'il existe actuellement en fonctionnement ou en construction dans le monde entier, plusieurs centaines de chaudières électriques capables d'absorber une puissance supérieure à 500.000 chevaux.

L'ingénieur italien Revel est, croyons-nous, le premier qui construisit des chaudières électriques vraiment industrielles, car il réalisa avant la guerre, dès 1902, plusieurs installations importantes, notamment à l'usine de Bussi de la Società Italiana di Elettro Chimica où il mit en service en 1907 des chaudières de grande puissance fonctionnant directement à la tension de 6.000 volts. Nous avons eu l'occasion en 1920 de voir ces chaudières dont la presse technique a beaucoup parlé. Il y en avait alors 7 en service de 800 chevaux chacune dont le fonctionnement était très satisfaisant. Ces chaudières utilisaient l'énergie de nuit de la Centrale du Pescara qui alimente Naples.

Depuis la guerre, à cause du prix élevé du charbon, les applications des chaudières électriques se sont développées assez rapidement surtout en Italie, en Suède, en Norvège et en Suisse. En France, ces appareils commencent à être employés dans la région des Alpes. Depuis le début de 1920 une importante batterie, formée de deux chaudières capables d'absorber chacune 5.000 chevaux en régime normal et 6.000 chevaux en surcharge sous forme de courant triphasé à la tension de 6.500 volts, fonctionne aux Papeteries de Brignoud, dans le Dauphiné, et a déjà absorbé plus de cinq millions de kilowatts-heure de hautes eaux, économisant ainsi au moins 7.000 tonnes de charbon (1). Ce sont, à notre connaissance, les plus puissantes chaudières électriques qui existent à ce jour.

Il est possible actuellement de construire des chaudières pour des tensions relativement très élevées. En Suisse plusieurs de ces appareils reçoivent le courant à 15.000 volts et la tension de 20.000 volts peut très bien être employée directement. On peut construire également des chaudières de grande puissance et à haute pression. Les chaudières électriques sont donc entrées franchement dans le domaine de l'industrie où elles sont appelées à rendre de grands services.

Les différents types de chaudières électriques

Il existe deux catégories de chaudières électriques :

a) Les chaudières à résistance dans lesquelles la chaleur est produite par le passage du courant dans une résistance convenable.

b) Les chaudières à induction où l'on utilise, pour chauffer l'eau, les pertes par courant de Foucault et par hystérésis dans une masse de fer.

Les chaudières à résistance sont de beaucoup les plus employées. Les chaudières à induction sont d'une construction plus coûteuse, sauf peut-être lorsque la tension est élevée et la puissance à absorber relativement faible. Elles produisent, en outre, un décalage important du courant. Le $\cos \varphi$ avec ces chaudières est compris entre 0,5 et 0,7 tandis que dans le cas des chaudières à résistance il est pratiquement égal à l'unité, ce qui constitue un avantage très important.

Dans les chaudières à résistance si R est la résistance chauffante en ohms, U la différence de potentiel aux bornes de la résistance en volts, la puissance P absorbée par la chaudière est évidemment donnée en kw. par la formule suivante :

$$P = \frac{U^2}{1000 R}$$

Pour faire varier le débit de vapeur, c'est-à-dire la puissance absorbée, il faut donc agir ou bien sur la tension, ou bien sur la résistance. Généralement on fait varier la résistance, car les chaudières doivent fonctionner normalement à tension constante.

On voit que si la tension du réseau n'est pas régulière la puissance absorbée par la chaudière peut varier beaucoup, puisque celle-ci est proportionnelle au carré de la tension. C'est là un avantage pour le producteur d'énergie, car la chaudière charge ou décharge automatiquement le réseau, suivant que la tension s'élève ou s'abaisse. Elle diminue donc, jusqu'à un certain point, l'amplitude des variations de tension.

En améliorant le $\cos \varphi$ d'un réseau et en atténuant les à-coups de tension, une chaudière électrique peut donc rendre le fonctionnement d'un réseau bien meilleur. C'est ce qui a été observé notamment à Brignoud où les chaudières électriques sont branchées sur un réseau important qui alimente à la fois de nombreux moteurs et des fours électriques de grande puissance.

Si la chaudière électrique ne fonctionne pas en parallèle avec d'autres chaudières au charbon et si elle ne possède pas une réserve d'eau chaude suffisante, les variations de tension peuvent devenir gênantes pour son bon fonctionnement en rendant le débit de vapeur irrégulier. Il est nécessaire alors d'avoir recours à un réglage automatique dont l'action, forcément assez lente, n'empêche pas cependant l'influence favorable de la chaudière sur les variations brusques de la tension.

Les chaudières à résistance peuvent elles-mêmes se subdiviser en deux groupes :

1° Les chaudières qui ont pour résistance chauffante l'eau même de la chaudière dans laquelle le courant est amené au moyen d'électrodes ;

2° Les chaudières qui emploient des résistances différentes de l'eau (résistances en métal ou en charbon).

Les premières sont surtout appelées chaudières à électrodes et l'on réserve simplement aux secondes la désignation de chaudière à résistance.

Dans ces dernières chaudières, les résistances sont généralement constituées par des fils en alliage très résistant et très peu oxydable comme le nickel-chrome ; ceux-ci sont convenablement

(1) Voir l'article de M. Maillat paru dans *Chaleur et Industrie* d'octobre 1920.

isolés et protégés autant que possible de l'oxydation puis disposés ordinairement à l'intérieur de tubes métalliques plongeant entièrement dans l'eau. Le réglage de la puissance absorbée est obtenu en faisant varier le nombre des résistances montées en parallèle.

Chaudières à électrodes

Pour les hautes tensions et les grandes puissances les chaudières à électrodes sont seules pratiquement utilisables parce que les fils résistants seraient alors beaucoup trop coûteux et trop difficiles à établir. Les chaudières à électrodes présentent d'ailleurs d'une façon générale sur les chaudières à résistance d'importants avantages dont les principaux sont les suivants : sécurité de fonctionnement plus grande car, en cas d'insuffisance d'eau, la puissance absorbée diminue simplement tandis que dans les chaudières à résistance des coups de feu sont à craindre, ainsi que la mise hors service des résistances ; réglage automatique plus facile à réaliser, ce réglage étant obtenu soit en faisant varier le niveau de l'eau dans la chaudière et par suite la plongée des électrodes soit en déplaçant celles-ci ; entartrage beaucoup moins gênant, le tartre se fixe un peu sur les électrodes, sauf cependant sur celles à haute tension, mais jamais sur les parois de la chaudière, car celles-ci ne sont pas plus chaudes que l'eau. Le nettoyage d'une chaudière à électrodes est donc très facile à obtenir, un simple lavage étant suffisant. Ces chaudières sont donc très avantageuses à ce point de vue.

Par contre, lorsque l'on veut réaliser une chaudière à électrodes, on se heurte à une difficulté assez sérieuse due à la résistivité très variable de l'eau. Suivant son origine, sa pureté et sa température, l'eau possède une résistivité très différente. A 15° la résistivité de l'eau distillée est supérieure à 7.000 ohms cm. cm², celle de l'eau de glacier est comprise ordinairement entre 6.000 et 4.000 ohms cm, tandis que celle de l'eau de rivière peut varier de 4.000 à 800 et même dépasser largement cette dernière limite si l'eau contient beaucoup de sels en dissolution. Lorsque l'on évapore de l'eau, par suite de la concentration des sels contenus dans l'eau, la résistivité peut tomber après un certain temps à moins de 300 ohms cm. D'autre part, la résistivité de l'eau diminue avec la température du moins jusqu'à 100°. A cette température l'eau a une résistivité qui est à peu près deux fois plus faible que celle qu'elle possède à 15°.

Il est donc indispensable de munir les chaudières à électrodes d'un réglage automatique pour maintenir la puissance absorbée constante malgré les variations de résistivité de l'eau.

Lorsque l'on veut employer des tensions un peu élevées, la résistivité de l'eau n'étant plus suffisante, le courant absorbé devient trop grand pour les surfaces d'électrode en contact avec l'eau et des arcs peuvent alors s'amorcer et occasionner des courts-circuits dangereux.

Jusqu'à 3.000 volts environ on n'éprouve pas trop de difficultés à ce point de vue, mais pour des tensions supérieures il n'en est plus de même. Cependant les chaudières de l'usine de Bussi en Italie fonctionnent depuis longtemps à 6.000 volts, et celles de Brignoud depuis plus de deux ans à 6.500 volts, d'une façon très normale sans artifices spéciaux. (Les chaudières de Brignoud ont même marché pendant plusieurs mois à 7.000 volts). Ces résultats ont été obtenus pour les raisons suivantes : à Bussi l'eau employée est très pure et les chaudières sont conduites par un personnel exercé ; à Brignoud, où l'eau a une résistivité moyenne, les chaudières sont à grand volume d'eau, et surtout le démarrage est effectué en prenant des précautions spéciales (démarrage lent et progressif, électrodes semblables et de même longueur afin qu'elles plongent toutes au début de la

même façon), car c'est au départ, surtout lorsque l'eau est froide, que les amorçages sont à craindre.

Pour pouvoir établir des chaudières à haute tension on est obligé de canaliser l'eau dans des tubes en porcelaine afin d'obtenir des résistances assez fortes, malgré des surfaces d'électrodes relativement grandes.

Les chaudières à électrodes ne sont pas employées avec le courant continu, car la production du gaz tonnant par électrolyse pourrait les rendre très dangereuses.

Avec le courant alternatif, les essais que nous avons entrepris nous ont montré que le phénomène d'électrolyse est très faible, surtout si l'eau n'est pas acidulée et qu'il se produit à basse tension simplement une usure très lente des électrodes par oxydation lorsque celles-ci sont constituées par des métaux ordinaires comme le fer et le cuivre. A haute tension les arcs qui se produisent continuellement, sauf si l'on emploie des dispositifs spéciaux, peuvent décomposer une petite quantité d'eau, mais cette quantité doit être très petite, car l'oxydation des électrodes est encore assez lente. (On a constaté par exemple à Brignoud que la perte des électrodes à 6.500 volts par suite de l'oxydation était seulement de 30 kilogs en chiffres ronds pour un million de Kwh. dans le cas d'électrodes en acier doux ordinaire).

D'autres essais très sérieux, qui ont été effectués de divers côtés, notamment en Suisse par les Chemins de fer Fédéraux, la Société Sulzer Frères et la Société Brown-Boveri (1) sur une chaudière alimentée par du courant alternatif à 15.000 volts 16 2/3 périodes, ont montré que la production du gaz tonnant dans les chaudières électriques à courant alternatif était pratiquement nulle dans tous les cas.

Comparaison des chaudières électriques et des chaudières au charbon au point de vue du prix de revient de la vapeur

Toute l'énergie électrique étant intégralement transformée en chaleur à l'intérieur même de la chaudière, les seules pertes à considérer sont celles qui proviennent du passage de la chaleur à travers le calorifuge. En donnant à celui-ci une épaisseur suffisante, on peut obtenir facilement un rendement supérieur à 95 %. Ainsi, le rendement d'une chaudière électrique ne dépend donc que de son calorifuge.

On sait qu'un kilowatt-heure transformé en chaleur donne 863 grandes calories. En tenant compte du rendement de la chaudière, on peut admettre en chiffres ronds qu'il est possible de produire par Kwh. au moins 1,25 kg. de vapeur lorsque l'eau d'alimentation est froide (15°), et 1,40 kg. lorsque l'eau d'alimentation est chaude (85°).

Pour obtenir la même quantité de chaleur que celle produite par la combustion d'un kilogramme de charbon à 7.000 calories il faudrait théoriquement au moins 8 kilowatts-heure. Or, si l'on remplace une chaudière au charbon par une chaudière électrique, on constate que, suivant les cas, il faut compter de 2 à 5 Kwh, seulement pour produire la même quantité qu'avec 1 kg. de charbon à 7.000 calories. C'est la conclusion à laquelle est arrivé M. Ruthers, Ingénieur à Oerlikon (2). « La pratique a montré que par suite du meilleur rendement et d'une utilisation favorable, surtout dans le cas d'un service intermittent, il est rare qu'il faille plus de 5 kilowatts-heure pour remplacer 1 kg. de charbon ; le plus souvent, ce chiffre ne dépasse pas 3 à 4 kilowatts-heure. On peut même citer des cas où, pour obtenir le même ré-

(1) *Revue B. B. C.*, mai 1921.

(2) *Génie Civil* du 30 août 1919.

sultat que celui obtenu jusqu'alors avec 1 kg. de charbon, 1 à 2 kilowatts-heure seulement étaient nécessaires. »

En admettant qu'il soit nécessaire d'absorber 4 Kwh. pour remplacer 1 kg. de charbon, et en comptant pour le prix de celui-ci rendu aux chaudières 80 fr. la tonne, on voit que dans ce cas le kilowatt-heure peut être payé 0 fr. 02.

Ainsi, l'énergie employée dans les chaudières électriques peut elle être payée sensiblement le même prix que celle que l'électrochimie peut absorber actuellement et le placement de cette énergie est autrement facile, car une installation de chaudières électriques de grande puissance est loin d'être comparable à celle d'une usine d'électro-chimie.

Emploi des chaudières électriques

Les chaudières électriques, au-dessus d'une certaine puissance, ne peuvent, bien entendu, utiliser que le courant provenant des chutes d'eau et seulement ce que l'on appelle « les résidus d'énergie » (énergie disponible pendant les hautes eaux, la nuit, les dimanches et jours de fête, etc...) Ce sont d'ailleurs à peu près les seuls appareils capables d'utiliser actuellement ces résidus d'énergie dans de bonnes conditions, car les chaudières électriques peuvent être installées sans grands frais et possèdent une grande souplesse. Après quelques minutes pour les chaudières de faible puissance, une heure au plus pour les très grandes puissances, on peut obtenir de la vapeur utilisable et l'arrêt imprévu de ces appareils n'occasionne aucune perte, sauf celle d'un peu de courant sans grande valeur. Le réglage de la puissance absorbée est extrêmement facile, celle-ci pouvant varier dans de très grandes limites presque instantanément.

Tous les réseaux alimentés par des usines hydro-électriques possèdent plus ou moins des résidus d'énergie. Les exploitants auraient intérêt, afin de réaliser sans frais nouveaux un supplément de recette très appréciable, à faciliter l'installation de chaudières électriques chez leurs abonnés. Mais beaucoup d'entre eux, en France surtout, préfèrent perdre de l'énergie plutôt que de la vendre à très bas prix, craignant que leurs clients ne trouvent ainsi un argument pour justifier l'opinion malheureusement trop répandue que l'énergie de la Houille Blanche ne coûte presque rien (1).

Les chaudières électriques sont donc employées actuellement surtout par les usines qui produisent elles-mêmes leur énergie et qui utilisent également de la vapeur. Pour ces usines, le prix du kilowatt-heure n'intervenant pas, l'économie réalisée sur le charbon devient alors très sensible. Aussi l'emploi des chaudières électriques pour maintenir sous pression pendant les heures d'arrêt les chaudières au charbon d'une centrale thermique présente-t-il beaucoup d'intérêt. Le courant de nuit d'une chute d'eau, courant sans valeur, peut, par exemple, être utilisé dans une chaudière électrique ayant pour rôle de réchauffer continuellement par injection de vapeur les chaudières au charbon qui ne doivent alimenter les machines à vapeur qu'en cas de secours ou pendant la journée seulement.

Une application de ce genre a été réalisée en Suède ces temps

derniers d'une façon très remarquable : la Ville de Malmœ, qui reçoit son énergie d'une chute d'eau par l'intermédiaire d'une ligne à 50.000 volts, possède une station thermique de secours. Pour éviter de conserver les chaudières toujours sous pression avec leurs feux allumés, on a installé deux accumulateurs de vapeur Ruths (1) capables de fournir suffisamment de vapeur pour parer à un arrêt de courte durée. Ces accumulateurs, dont la capacité totale est de 456 m³, sont remplis d'eau presque complètement et sont maintenus à une pression effective voisine de 7 kg. au moyen d'une chaudière électrique qui ne fonctionne que la nuit. Pendant la journée la pression tombe seulement de 1/2 kg. Ces accumulateurs peuvent fournir 36.000 kgs de vapeur avec une chute de pression de 7 à 1 kg. ce qui permet d'obtenir 3.300 Kwh. au moyen d'une turbine établie spécialement pour utiliser de la vapeur à pression variable.

En Italie, en Suisse et aux Etats-Unis on commence à employer beaucoup les chaudières électriques pour le chauffage des trains remorqués par des locomotives électriques. Ces chaudières sont ordinairement installées sur un fourgon spécial et reçoivent le courant directement des fils de trolley. Elles permettent ainsi d'assurer électriquement sans modification le chauffage des voitures établies pour la vapeur.

Certaines applications des chaudières électriques peuvent sembler tout à fait paradoxales. Ainsi, il peut être parfois avantageux de produire électriquement de la vapeur pour créer ensuite de la force motrice. Par exemple, dans une papeterie on peut avoir intérêt à faire passer la vapeur venant d'une chaudière électrique dans une turbine à vapeur avant de l'envoyer dans les sècheries des machines à papier. Le rendement dans ce cas est au moins aussi bon que celui que l'on obtiendrait en employant un transformateur et un moteur asynchrone pour remplacer la turbine car la chaudière électrique, qui peut fonctionner à haute tension, possède sensiblement le même rendement qu'un transformateur, et dans une turbine à contre-pression les seules pertes réelles sont celles qui sont dues au refroidissement de cette machine, pertes que l'on peut réduire, avec un bon calorifuge, à l'importance de celles d'un moteur asynchrone.

Autre exemple : les Usines Fredet à Brignoud possèdent une locomotive à vapeur à voie normale pour effectuer les manœuvres en gare et en usine. Cette locomotive, dont le volume d'eau est relativement important (5 m³), est mise sous pression par chauffage électrique. Elle commence son service lorsque sa réserve d'eau a été portée à la pression de 12 kg. et peut manœuvrer pendant trois à quatre heures de suite jusqu'à ce que la pression soit tombée à 3 kg. environ. Sans doute l'énergie électrique est ainsi très mal utilisée, mais, comme cette locomotive n'absorbe que des résidus d'énergie, les Usines Fredet trouvent son emploi très intéressant, d'autant plus que cette machine est remarquable par sa robustesse, son absence d'entretien et sa facilité de conduite.

Dans bien des applications, les chaudières électriques peuvent utiliser de l'énergie au prix de la force motrice chaque fois qu'il est nécessaire de produire dans une industrie de la vapeur en quantité relativement faible ou d'une façon très intermittente, c'est-à-dire chaque fois que la consommation de courant doit être relativement faible. Elles présentent alors une très grande supériorité sur les chaudières ordinaires, car on retrouve avec elles les mêmes avantages qui font tant apprécier les moteurs électriques dans l'industrie : installation économique, fonctionnement sans surveillance avec un réglage automatique convenable, entretien presque nul, emploi à l'endroit même d'utilisation, absence de fumée, très grande propreté, etc...

(1) Lorsque le coefficient d'utilisation est faible et lorsqu'il faut transmettre l'énergie à grande distance, le prix de revient du kwh. hydraulique, même produit avec des chutes d'eau aménagées avant la guerre, est actuellement très voisin de celui que l'on peut obtenir avec une centrale à vapeur puissante bien équipée. Aussi, comme les abonnés acceptent de payer le courant produit à la vapeur à un prix plus élevé que le courant engendré par les chutes d'eau, les Sociétés de Distribution trouvent plus avantageux d'installer des centrales à vapeur plutôt que d'aménager de nouvelles chutes.

(1) *Génie Civil*, novembre 1921.

Ainsi, dans bien des cas, les petites chaudières électriques peuvent-elles être employées avantageusement même lorsque le courant est produit à la vapeur. Ces chaudières sont surtout intéressantes lorsque, grâce à une accumulation facile à obtenir, il est possible de ne les faire fonctionner que pendant les heures de faible charge, la nuit surtout. C'est actuellement le seul moyen vraiment pratique de combler les heures creuses des usines génératrices d'électricité.

CONCLUSIONS

Les chaudières électriques, dont l'emploi dans l'industrie date surtout de la fin de la guerre, sont appelées à se répandre de

plus en plus, car ce sont actuellement les appareils les mieux adaptés pour utiliser les importants résidus d'énergie des chutes d'eau. Elles sont doublement intéressantes en permettant de réaliser une économie de combustible très appréciable et en procurant aux Sociétés Hydro-électriques un supplément de recette intéressant.

Pour les petites puissances elles ont un très grand avenir. Les qualités de commodité et de propreté, qui les font tant apprécier par ceux qui les emploient, rendent en effet leur usage possible même avec du courant à un prix assez élevé comme celui des centrales à vapeur. Les Sociétés de Distribution d'énergie commencent d'ailleurs à comprendre que, pour augmenter leur coefficient d'utilisation, elles ont un grand intérêt à développer le plus possible l'emploi des chaudières à accumulation.

Application du Régulateur à action rapide aux Machines à Papier.

Par V. SYLVESTRE, Ingénieur A. M. et I. E. G.

Les machines à papier modernes avec leur énorme production demandent non seulement un réglage de la vitesse très étendu, mais il est de plus nécessaire que celle-ci ne soit pas influencée par des causes extérieures et cela pour tous les régimes.

Les variations de vitesse se traduisent, en effet, par des inégalités dans l'épaisseur du papier qui en nécessitent la mise au rebut, ou bien par des déchirures ce qui donne lieu en fin de compte à des pertes sensibles, surtout aux grandes vitesses.

En outre, par suite de la hausse des matières premières, on a été amené à travailler, ces dernières années, des matières de qualité inférieure et ce fait augmente encore l'importance des avantages de la commande électrique. Seule celle-ci est en état de répondre à toutes les exigences. D'où la tendance générale, bien justifiée du reste, d'adopter la commande électrique dans toutes les fabriques de papier, non seulement lorsqu'il s'agit de nouvelles installations mais encore pour les fabriques existantes.

Etant donné l'importance de ce sujet, avant de décrire les applications du régulateur à action rapide, nous allons rappeler les différents systèmes de commande électrique employés aujourd'hui à la commande des machines à papier.

CHOIX DU GENRE DE COURANT

La plupart des machines dans les fabriques de papier travaillent à vitesse constante. D'après les expériences faites jusqu'ici, le courant triphasé s'est montré le mieux approprié à ces installations. En tout premier lieu, ce sont les propriétés remarquables du moteur asynchrone triphasé qui, dans le choix du système, ont fait pencher la balance en faveur du courant triphasé. Il faut, il est vrai, transformer ce courant pour l'alimentation du moteur de la machine à papier, mais il convient de remarquer qu'il en est de même dans les installations à courant continu, étant donné la nécessité de réaliser de grandes variations de vitesse, ainsi qu'une grande précision de réglage.

Etant donné que les machines fonctionnant à vitesse constante sont celles qui, dans les fabriques de papier, consomment la plus grande quantité d'énergie, il semble opportun de profiter des avantages des moteurs asynchrones et d'adopter le courant triphasé pour l'ensemble de l'installation.

Comme l'emploi du courant triphasé dans les fabriques de papier semble devenir d'un usage courant, on a essayé d'utiliser également ces moteurs triphasés pour la commande de machines nécessitant un réglage de vitesse étendu.

Le moteur asynchrone, dont la vitesse se règle par insertion de résistances dans le circuit du rotor, ne peut convenir, étant donné, d'une part, les pertes élevées auxquelles donne lieu le mode de réglage et, d'autre part, la relation à observer entre le couple et la vitesse. L'emploi d'un moteur triphasé à collecteurs permettrait, il est vrai, d'obtenir dans de larges limites un réglage exempt

de pertes, mais l'inconvénient résultant de l'instabilité de la vitesse n'en subsisterait pas moins, car le moteur triphasé à collecteur ayant une caractéristique série, les variations de charge ont pour effet de provoquer des variations de vitesse sensibles. En employant un moteur triphasé à collecteur ayant une caractéristique shunt, on arriverait, il est vrai, à diminuer l'influence des variations de charge sur la vitesse, mais les limites entre lesquelles cet effet se fait sentir étant assez restreintes, il en résulte que ces moteurs ne permettraient pas non plus de réaliser un réglage de la vitesse dans de larges limites. Il ne reste donc qu'une solution, c'est de produire du courant triphasé et de le convertir en courant continu pour l'alimentation des moteurs actionnant les machines à vitesse variable.

COMMANDE ÉLECTRIQUE DES MACHINES A PAPIER

Pour la commande de la partie à vitesse variable de la machine à papier, on emploie presque dans tous les cas, un moteur à courant continu excité en dérivation, dont on peut faire varier la vitesse dans de larges limites en agissant sur le champ et en faisant varier la tension du courant fourni par la génératrice alimentant le moteur.

Si l'installation comporte plusieurs machines à papier dont la vitesse doit pouvoir varier dans le rapport de 1 à 3 ; par exemple si les sortes de papier diffèrent peu entre elles, comme c'est le cas pour les papiers courants destinés à l'imprimerie, on peut se dispenser d'installer une génératrice par moteur. On prévoit, dans ce cas, l'alimentation de tous les moteurs par une commuta-