

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 28 (1937)
Heft: 19

Artikel: Mesures et dispositifs à adopter en traction électrique pour réaliser des économies d'énergie
Autor: H.E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058755>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

auch in der Fachliteratur wird häufig die Meinung vertreten, dass ein Motor mit flacher Drehmomentlinie, die beispielsweise dem Motor mit Doppelnutanker eigen ist, gleichmässige Massendrücke während der Beschleunigungsperiode verursache, was die Uebertragungsteile schonen. Dass dies in dieser allgemeinen Form bei weitem nicht stimmt, beweist nicht nur die eben angestellte Ueberlegung, sondern auch das Beispiel der Zentrifugalpumpe (Fig. 9). Man sieht, dass infolge des nahezu quadratisch mit der Drehzahl steigenden Pumpendrehmomentes gerade der übliche Drehmomentsverlauf des Motors mit Vielnut- oder Tiefnutanker eine praktisch gleichbleibende Beschleunigung verursacht.

Wesentlich anders dagegen liegen die Verhältnisse bei raschlaufenden Maschinen. Wenn z. B. ein Motor mit 3 kW Leistung, 1450 U/min, mit einem $GD^2 = 0,1 \text{ kgm}^2$, die mit 6000 U/min laufende Arbeitswelle einer Holz-Hobelmaschine antreibt, deren $GD^2 = 0,27 \text{ kgm}^2$ beträgt, was auf 1450 U/min bezogen 4,6 kgm^2 ausmacht, so ergibt sich für den unbelasteten Anlauf mit 175 % Drehmoment eine Anlaufzeit von etwa 5,2 s, gegenüber rund 0,1 s Eigenanlaufzeit des Motors. Hier wird also so gut wie das gesamte, vom Motor entwickelte Drehmoment als Beschleunigungsdrehmoment wirksam und wenn irgendwo, so liesse sich hier, oder ganz allgemein gesprochen, bei starker Uebersetzung ins Schnelle, die Verwendung eines Motors mit flacher Drehmomentcharakteristik zur Erzielung gleichmässiger Beschleunigungsdrücke rechtfertigen. Ob dies auch praktisch von Bedeutung ist, bleibe hier unerörtert.

Die angeführten Beispiele zeigen, dass die Beschleunigungsdrücke von ganz anderer Grössenordnung sind, als man nach oberflächlicher Beurteilung auf Grund des vom Motor entwickelten Anlaufdrehmomentes annimmt. Es geht aber daraus auch hervor, dass die Kenntnis des Motor-Anlaufdrehmomentes *allein* überhaupt keine Schlüsse auf den Verlauf des während des Anlaufes übertragenen Drehmomentes zulässt, sondern dass dieses Mo-

ment (oder die Beschleunigungsdrücke) sich nur ermitteln lässt, indem man die Verteilung der gesamten Schwungenergie auf Motor und Maschine berücksichtigt:

Bedeutet:

M	das vom Motor entwickelte (mittlere) Anlaufdrehmoment,	
M_1	das von der Maschine während des Anlaufes benötigte Nutz- und Reibungs-Drehmoment,	} auf die Motor-Drehzahl bezogen
GD^2_m	das Schwungmoment des Rotors des Motors (einschliessl. Kupplung oder dergleichen),	
GD^2_a	das Schwungmoment der bewegten Teile der Arbeitsmaschine (einschliesslich Uebertragungsorganen),	

so ist das von den Uebertragungsorganen während des Anlaufes auf die Maschine übertragene Dreh-

$$\text{moment} = M_1 + (M - M_1) \frac{GD^2_a}{GD^2_a + GD^2_m}$$

Zusammenfassend ergibt sich:

1. Bei langsamlaufenden Arbeitsmaschinen ist in der Regel die Beschleunigungsarbeit klein und die Anlaufzeit kurz, weil die in den bewegten Massen beim Anlauf aufzuspeichernden Energien durch das Quadrat der Drehzahl bestimmt sind und der Einfluss selbst grosser Massen zurücktritt.

2. Dagegen ist bei raschlaufenden Arbeitsmaschinen, auch wenn es sich um verhältnismässig kleine Massen handelt, die Beschleunigungsarbeit und damit die Anlaufzeit verhältnismässig gross.

3. Als Beschleunigungsdrehmoment wird vom Wellenende des Motors nicht die ganze Differenz zwischen dem Anlaufdrehmoment und dem Drehmoment der statischen Bewegungswiderstände übertragen, sondern nur ein Bruchteil davon, der durch die Verteilung der gesamten Schwungenergie auf Motor und Arbeitsmaschine bestimmt ist.

Der Verlauf des Anlaufdrehmomentes des Motors ist daher für die erzeugten «Beschleunigungsdrücke» nur recht bedingt von Einfluss.

Mesures et dispositifs à adopter en traction électrique pour réaliser des économies d'énergie.

621.331 : 625.1.003

A. Préambule.

Ce sujet fit l'objet d'une des questions portées à l'ordre du jour de la 13^e session de l'Association internationale du Congrès des Chemins de fer, session tenue en juin 1937 à Paris; il fut le complément de la question de l'électrification des chemins de fer au point de vue économique, traitée dans la 12^e session de 1933, qui incorpora deux questions auxiliaires, savoir: le choix de l'emplacement des usines et du système de courant. Ces dernières ne furent pas reprises, mais constituèrent la ligne de démarcation de la question à examiner.

Les rapports qui furent présentés sur la question de l'électrification des chemins de fer au point de vue économique relèvent entre autres qu'en électrifiant une ligne on cherche à économiser du charbon soit en utilisant des forces hydrauliques disponibles, soit en utilisant le charbon

dans des centrales thermiques, et que les électrifications de chemins de fer exigent de grands capitaux d'établissement, dont les intérêts et l'amortissement doivent être compensés par une forte diminution des frais d'exploitation. Cet aphorisme montre l'importance capitale que revêt le coût de l'énergie dans l'économie d'une exploitation électrique. Il n'est donc pas téméraire d'affirmer qu'en raison de cette nécessité de comprimer les dépenses d'exploitation, rien n'a été négligé pour diminuer la consommation d'énergie par tous les moyens économiques et rationnels connus et applicables à l'époque de la réalisation des diverses électrifications de chemins de fer.

La recherche de la solution la plus économique, à des époques différentes de l'évolution technique, devait donner lieu indubitablement à l'application des différents systèmes pratiques de traction électrique. Dès lors, tous les disposi-

tifs et mesures susceptibles de diminuer la consommation d'énergie ne peuvent pas être généralisés; ils ne sont pas partout au même degré un remède économique, et certains ne le sont même pas du tout là où leur application entraîne la transformation onéreuse d'installations anciennes qui fonctionnent encore bien et suffisent aux besoins du service.

L'étude de la question ne pouvant porter dans tous les détails, elle dut être limitée à la recherche des dispositifs et mesures susceptibles d'être en traction électrique des moyens pour réaliser des économies d'énergie. Parmi ces moyens c'est le mutateur qui, actuellement, tient le premier rang. Il était dès lors naturel qu'il devait retenir spécialement l'attention.

Avant de passer en revue les applications du mutateur en traction électrique on essaya de donner un exposé sommaire et élémentaire du fonctionnement de cet appareil, dans l'idée qu'un tel exposé, quoique bien incomplet, permettrait de mieux saisir ses conditions de travail en service.

B. Mutateur.

Les premières applications du mutateur pour convertir du courant triphasé en courant continu remontent à une trentaine d'années. Ce n'est toutefois que depuis une quinzaine d'années que ces appareils ont acquis un degré de développement qui leur a procuré une place prépondérante dans la traction électrique.

En principe, le mutateur se compose d'une cuve étanche en verre ou en fer, dans laquelle sont disposées, à la partie inférieure, la cathode contenant le mercure et, à la partie supérieure, les anodes isolées de la paroi.

Le mercure de la cathode se vaporise sous l'action de l'arc électrique et se condense sur les parois de la cuve, d'où il retourne à l'état liquide à la cathode. La cathode est ainsi constamment régénérée et ne s'épuise pas.

Les anodes sont en matière plus réfractaire à la vaporisation, telle que le graphite.

Le vide dans la cuve est poussé jusqu'à 10^{-5} à 10^{-6} mm de mercure.

La pression de la vapeur de mercure est déterminée par la température des surfaces de condensation, et varie entre 10^{-3} à 10^{-1} mm de mercure.

Les grilles polarisées constituent l'élément nouveau apporté au mutateur. Comme les anodes, les grilles sont en matière réfractaire à la vaporisation et sont isolées de la paroi; elles sont disposées devant chaque anode. Il y a donc dans chaque appareil autant de grilles que d'anodes. Les grilles sont intercalées dans un circuit indépendant à courant continu fermé sur la cathode. Suivant la commutation de la source d'énergie de polarisation, les grilles peuvent être portées à volonté à un potentiel positif ou négatif par rapport à la cathode.

De la vapeur de mercure composée uniquement d'atomes électriquement neutres serait un isolant; pour qu'elle puisse laisser passer un courant lorsqu'on la soumet à une différence de potentiel, il faut qu'elle renferme des porteurs de charge, ions ou électrons, grâce auxquels s'effectue le passage du courant.

Chaque atome électriquement neutre peut donner naissance à un ion positif et à un électron. Les électrons sont des charges élémentaires d'électricité négative grâce auxquelles un courant peut circuler dans un conducteur. Un ion positif ou négatif est un atome ayant perdu ou capté un électron; ni l'un ni l'autre ne peut servir au transport du courant dans le circuit extérieur.

L'arc électrique est l'effet de diverses décharges qui, dans une atmosphère ionisée, sont capables de transporter des courants importants sous une faible chute de tension.

La décharge devient monopolaire lorsque le courant est transporté uniquement par des électrons engendrés à l'une des électrodes, et certaines décharges ne peuvent exister que si l'on donne à leurs électrodes une polarité déterminée.

C'est une des propriétés du mercure de devenir, sous l'effet d'un arc électrique, un foyer d'émission d'électrons en quantité illimitée lorsque l'électrode mercurielle est reliée au pôle négatif de la source de tension d'alimentation, c'est-à-dire lorsqu'elle constitue la cathode. Ce foyer d'émission se concentre en une tache lumineuse qui voyage à la surface du mercure. L'expulsion des électrons cathodiques

d'un arc à vapeur de mercure est surtout l'effet d'un champ intense de l'ordre de 10^6 V/cm régnant devant la cathode, et n'est que facilitée par l'échauffement plus ou moins grand de la cathode, car le mercure se vaporise avant d'atteindre une température suffisante pour produire par elle-même une émission électronique importante. La chute de tension dans la zone cathodique n'étant que de 10 V, cette zone formée d'une concentration d'ions positifs est très mince.

Depuis la limite de la zone cathodique jusqu'à l'anode, s'étend la colonne positive où les porteurs de chaque signe sont en nombres sensiblement égaux; le long de celle-ci se produit une chute de tension uniforme de 8 à 15 V dirigeant les électrons vers l'anode et provoquant une ionisation suffisante pour compenser les pertes d'ions positifs se produisant le long de la colonne. L'anode plongeant dans cette colonne y prélève les électrons nécessaires au transport du courant et produit une chute de tension de 2 à 8 V. La chute de tension totale dans l'arc ne dépasse pas 20 à 30 V.

Le vide doit être très poussé pour éviter que les gaz résiduels ne puissent donner naissance à des ions positifs en nombre suffisant pour que la décharge électronique perde son caractère de décharge monopolaire.

La température à laquelle les vapeurs de mercure se condensent, détermine la pression des vapeurs; elle joue un rôle très important parce qu'une pression trop élevée donne lieu à une super-ionisation qui provoque des allumages en retour, et parce qu'une pression trop faible augmente la chute de tension dans l'arc.

La grille polarisée est une électrode auxiliaire; elle n'exerce aucune action sur le milieu environnant lorsqu'elle est au potentiel de l'espace. Mais, si on la porte à un potentiel négatif par rapport à la cathode, elle développera autour d'elle un champ qui refoule les électrons et qui s'oppose ainsi à tout passage d'électrons de la cathode vers l'anode. Une grille négative peut ainsi empêcher l'allumage d'une décharge électronique; elle ne peut par contre pas éteindre un arc allumé, parce que la grille se trouve à ce moment dans un milieu très dense de porteurs de charge, sur lesquels son champ d'action est trop limité pour pouvoir s'opposer au passage des électrons vers l'anode.

Les pertes auxiliaires dans les mutateurs de 1500 à 3000 kW sont, pour l'excitation, les pompes à vide préliminaire et élevé, et, pour le dispositif de mesure du vide, de l'ordre de 2,7 à 3 kW. La réfrigération artificielle à l'aide de pompes à circulation d'eau et de ventilateurs absorbe environ 0,2 % de la puissance nominale. Les pertes auxiliaires étant relativement très petites, le rendement du mutateur est essentiellement fonction de la tension d'exploitation; il augmente avec cette dernière et atteint 98 % pour les tensions du courant de traction.

La température idéale à la marche des mutateurs se meut dans les limites de 45° à 55° C. Ils fonctionnent cependant encore sûrement à une température minimum de $+15^{\circ}$ C. Pour une surcharge, la température doit être supérieure, afin qu'on ait une vapeur de mercure plus dense et conséquemment plus de porteurs de charge entre les anodes et la cathode.

L'allumage en retour rompt complètement l'effet de soupape du mutateur; il résulte en général de la formation d'une cathode sur une anode. Quelques causes d'allumage en retour sont:

- un accroissement de pression de la vapeur de mercure provoqué par une température trop élevée dans la cuve, ou par une surcharge, ou encore par des gouttes de mercure projetées sur une anode;
- la condensation de la vapeur de mercure sur une anode trop froide;
- la vaporisation de l'anode elle-même ensuite d'une trop haute température;
- une surtension se produisant entre une anode et une partie quelconque du mutateur et provoquant la dégénérescence d'une décharge lumineuse en arc de retour;
- impuretés métalliques ou alcalines dont les traces sur l'anode ont la propriété d'émettre des électrons ou peuvent produire des gaz à l'intérieur de la cuve, et, par analogie, un mauvais vide.

La possibilité de bloquer l'allumage à volonté à l'aide des grilles polarisées leur a donné les fonctions suivantes:

a) régulation de la tension obtenue par un retard à l'amorçage, grâce auquel les demi-ondes positives du courant alternatif ne sont plus utilisées à la valeur efficace maximum de la tension, mais à une valeur réduite;

b) *interruption de courants de court-circuit et de surcharge*, réalisée par le blocage complet de l'allumage. Si la polarisation de la grille est commandée par un relais de surintensité à action ultra-rapide, la durée de l'interruption complète du courant de court-circuit ne dépassera pas celle d'une période et, le plus souvent, le disjoncteur ne sera pas sollicité.

Grâce aux propriétés que le mutateur a acquises avec les grilles polarisées, son champ d'application s'est étendu à la conversion du courant continu en courant alternatif, au couplage de réseaux triphasés de fréquence différente et à la transformation du courant triphasé en courant monophasé.

En traction électrique, la conversion du courant continu en courant alternatif permet de récupérer l'énergie de freinage là où, à certains moments, l'énergie récupérée dépasse la charge et doit être absorbée tout ou partie par le réseau triphasé.

Le rôle du mutateur est donc de laisser passer dans le réseau triphasé le courant continu fourni par la ligne de contact. Il y a, à ce moment-là, renversement du sens d'écoulement du courant continu. Le mutateur ne pouvant changer sa polarité, doit être commuté. Par cette commutation, le mutateur ne travaille plus sur les fréquences positives du courant alternatif, mais sur ses fréquences négatives.

Les deux possibilités de soustraire et de rendre du courant continu à un réseau triphasé à l'aide de mutateurs, permettent de coupler deux réseaux triphasés de fréquence différente en utilisant, comme pour l'alimentation et la récupération en traction électrique, deux groupes de mutateurs qui peuvent être réversibles ou non, selon que l'échange de courant doit se faire d'un réseau déterminé ou alternativement d'un réseau à l'autre.

La conversion du courant triphasé en courant monophasé peut être considérée comme un problème résolu.

Quoiqu'on ait déjà pu produire des tensions continues jusqu'à 50 000 V avec le mutateur, il y a encore maintes difficultés à surmonter pour réaliser à l'aide de ces appareils la transmission d'énergie à grandes distances par courant continu à haute tension avec toute la sûreté requise.

Dans le fonctionnement ordinaire du mutateur, son influence sur le facteur de puissance du courant triphasé est insignifiante et résulte de l'excitation résiduelle. Le déphasage produit par le mutateur augmente en proportion du retard à l'amorçage, mais ne donne lieu à aucune difficulté du côté primaire, en tant que la charge des mutateurs sur le réseau n'est pas prépondérante.

La simplicité et la sûreté de fonctionnement du mutateur en font un appareil apte à être commandé à distance et à fonctionner automatiquement.

C. Lignes de transport.

Pour la distribution primaire de l'énergie de traction deux systèmes sont adoptés, savoir: le *système indépendant* où les lignes de transport sont affectées exclusivement à la transmission de l'énergie de traction, et le *système mixte* où l'énergie de traction et l'énergie industrielle sont confondues et transmises sous une même forme de courant à haute tension à l'aide de canalisations communes.

La distribution de l'énergie nécessaire aux petites exploitations est une question élucidée d'emblée. La production individuelle de l'énergie de traction n'entrant pas en ligne de compte, leur approvisionnement en énergie et le système de distribution sont dictés par les circonstances.

Pour les grandes exploitations ferroviaires, le système de distribution à adopter, indépendant ou mixte, dépend des puissances à transmettre, des fluctuations de ces puissances et des distances de transmission. Sur un réseau à mailles serrées, l'absorption de l'énergie se concentre en des nœuds de trafic assez rapprochés, d'où bifurquent plusieurs voies ferrées. Par ailleurs, les exigences imposées à un réseau industriel quant à la régulation de la tension sont très grandes, tandis que la traction électrique tolère des variations

momentanées de la tension dans des limites d'autant plus larges que les pointes de charge maximum sont rares et exceptionnelles. Les lignes de transmission de chemins de fer peuvent ainsi être utilisées dans une plus forte mesure, et, eu égard à la courte durée des pointes de charge, plus économiquement, sans qu'on doive recourir à l'installation de régulateurs de tension, qui sont très coûteux. Les considérations qui ont engagé certains chemins de fer à produire l'énergie nécessaire à leur exploitation dans de propres usines sont, par analogie, applicables à l'établissement d'un réseau primaire de distribution d'énergie. Les lignes de transmission partant de ces usines peuvent ainsi constituer des canalisations complètes qui ne supportent plus une charge supplémentaire appréciable pour des usages industriels.

Sur un réseau ferroviaire peu serré, les nœuds de lignes divergentes sont plus rares et les distances de transmission d'énergie relativement plus grandes que sur un réseau à mailles serrées. Les sous-stations n'alimentant chacune qu'une section de ligne de contact y sont plus nombreuses et constituent des consommateurs individuels d'énergie moins importants, qui peuvent être branchés avantageusement sur une interconnexion dont la charge industrielle est prépondérante. Dans ces cas le système mixte de distribution devient la solution la plus économique.

La comparaison de l'exploitation électrique commune des Réseaux d'Orléans et du Midi, avec celle des Chemins de fer fédéraux suisses montre d'une façon éclatante la différence qui peut exister dans les conditions de distribution de l'énergie de traction sur un réseau étendu et sur un réseau serré. Le réseau électrifié PO-Midi, bien qu'étant de 22 % plus étendu que celui des CFF, accuse une consommation annuelle d'énergie de 13 % plus faible que celle des CFF. Rapportée au km électrifié, la consommation d'énergie des CFF est de 35 % plus élevée que celle du PO-Midi. Le réseau primaire de distribution électrique PO-Midi comprend, par contre, 4060 km de canalisations de 60 à 220 kV, tandis que celui des CFF ne comprend que 1241 km de canalisations de 33 à 132 kV, c'est-à-dire 30 % seulement du premier. En d'autres termes, à une densité de consommation d'énergie de 35 % plus élevée sur le réseau des CFF correspond un réseau primaire de distribution de 30 % plus petit, ce qui fait un écart total de 65 % par rapport aux conditions du PO-Midi.

Les *pertes d'énergie et les chutes de tension* dans les lignes de transport varient de 1,9 à 8,5 %, respectivement de 2 à 15 %. Les plus hautes valeurs se rapportent aux canalisations affectées exclusivement au transport de l'énergie de traction et la chute de tension de 15 % doit être considérée comme un maximum exceptionnel.

D. Sous-stations.

Il est entendu par sous-station une installation complète nécessaire à la transformation ou à la conversion du courant emprunté à un réseau primaire de distribution, et comprenant en outre les appareils de couplage, de contrôle, de signalisation nécessaires à l'alimentation des lignes de contact et à la localisation des dérangements.

Les sous-stations, quel que soit leur genre, sont des installations relativement coûteuses; le nombre de sous-stations nécessaires à l'alimentation de la ligne de contact est réduit à un minimum dicté, en général, par la chute de tension admissible dans la ligne de contact, laquelle se traduit en pertes d'énergie. Des économies d'énergie seront réalisées si le nombre des sous-stations peut être augmenté convenablement. Mais, pour que cette mesure ne soit pas onéreuse, il faut diminuer les frais d'exploitation des sous-stations. A cet effet, on peut mentionner les moyens suivants.

a) Introduction de la commande à distance ou automatique en vue de réduire les frais de personnel. Grâce à la simplicité et à la sûreté de fonctionnement des transformateurs et des mutateurs, ce moyen s'applique aux deux systèmes fondamentaux de traction électrique: à courant continu et à courant monophasé. Les expériences faites avec l'automatisme plus ou moins complet sont concluantes et ont contribué au développement de ce mode de commande.

b) Installation de postes transformateurs pour l'alimentation des lignes de contact à courant alternatif, lesquels ne comprennent qu'un transformateur installé à ciel ouvert et

les disjoncteurs nécessaires à son couplage. Le poste transformateur se distingue de la sous-station en ce sens que l'installation est réduite à sa plus simple expression et que la manœuvre des interrupteurs est exécutée par le personnel d'une gare sur ordre d'une centrale ou d'une sous-station.

c) L'utilisation de sous-stations mobiles, installées sur wagons. Ce genre de sous-stations a trouvé une première application sur certains chemins de fer de montagne, à exploitation saisonnière.

L'équipement des sous-stations est déterminé en premier lieu par le type des courants primaires et du système de traction, en second lieu par les moyens les plus appropriés et les plus économiques pour transformer ou convertir, ou encore pour ces deux fonctions ensemble, et enfin par les conditions de travail.

Le transformateur est l'appareil universel qui, grâce à sa nature, à son rendement très élevé, et à son fonctionnement statique, peut être considéré comme quasi parfait. A vues humaines, il n'est plus susceptible de perfectionnements permettant de réaliser des économies d'énergie, étant bien entendu que toute réduction des pertes dans le cuivre et dans le fer au détriment du coût de l'appareil, n'est pas un perfectionnement dans l'acception du mot. Le courant d'excitation du transformateur est appelé par la tension primaire et non pas par la puissance ou la charge de celui-ci; il produit les pertes à vide auxquelles s'ajoutent les pertes de charge, et il abaisse, par son décalage de phase, le facteur de puissance du réseau primaire. Ces effets nuisibles pour une même puissance totale des transformateurs augmentent avec le nombre de ceux-ci; pour les diminuer, il faut donc choisir de grandes unités. Ce choix est d'autant plus facile que la sûreté de fonctionnement du transformateur est devenue très grande. On peut aussi réduire le nombre des transformateurs nécessaires en augmentant leur capacité de surcharge par une bonne réfrigération. Le rendement du transformateur est de l'ordre de 98 % à 99 %.

Le groupe convertisseur, composé d'un moteur synchrone ou asynchrone triphasé et d'une génératrice, a un rendement qui varie de 81 à 90 % de la demi-charge à la pleine charge. Étant donné le régime de consommation d'un chemin de fer, le rendement moyen en service est plutôt inférieur à 81 % et est encore diminué par celui du transformateur. Le groupe convertisseur à moteur synchrone a l'avantage de pouvoir fonctionner simultanément comme compensateur de phase et d'améliorer le facteur de puissance du réseau primaire ou au moins de ne pas l'aggraver.

La commutatrice, qui réunit en une machine le moteur et la génératrice d'un groupe convertisseur, augmente le rendement de conversion de 92 à 96 % de la demi-charge à la pleine charge. En revanche, son excitation étant déterminée par la tension continue, elle ne peut pas fonctionner indépendamment comme compensateur de phase à l'instar du moteur synchrone du groupe convertisseur.

Le mutateur, avec son rendement presque constant de l'ordre de 98 % aux tensions de 1500 à 3000 V sans transformateur, et de 96 % avec transformateur, serait par là déjà le moyen le plus économique pour convertir le courant triphasé en courant continu, mais il l'est encore en raison de son coût inférieur à celui des convertisseurs, sa simplicité et sa sûreté de fonctionnement.

Le mutateur peut être alimenté par un transformateur à couplage hexaphasé simple ou à couplage double triphasé avec bobine d'absorption. Ce dernier couplage présente sur le premier l'avantage de diminuer le courant spécifique des diverses anodes par une meilleure répartition et d'augmenter ainsi la capacité de surcharge du mutateur, de diminuer les chutes de tension dans l'arc et d'améliorer le facteur d'utilisation de l'installation.

Une autre amélioration du rendement du mutateur ne peut plus guère être recherchée que dans une réduction des pertes auxiliaires à un minimum. Comme moyen utilisé à cet effet, on a cité la ventilation convenable des locaux; elle peut être importante dans les endroits où il est recommandable de maintenir pendant l'hiver, dans les sous-stations, une température de quelques degrés supérieure à la température extérieure pour éviter qu'une buée ne se dépose sur les parties métalliques des appareils et où il est même né-

cessaire, par les grands froids, de renforcer le chauffage par des radiateurs électriques.

Les convertisseurs de courant triphasé en courant monophasé, que nous appelons «*convertisseurs de fréquence*», sont de deux types: l'un est rigide et l'autre élastique.

Le type «rigide» comprend une machine triphasée, synchrone ou asynchrone, et un générateur monophasé. Tandis que la machine triphasée synchrone et le générateur monophasé tournent à un synchronisme absolu avec la fréquence du réseau sur lequel ils sont branchés, la machine triphasée asynchrone accuse un glissement en fonction de la charge. Suivant que la machine travaille comme moteur ou comme générateur, ce glissement correspond à un ralentissement ou à une accélération par rapport à la vitesse de synchronisme. Le glissement à la charge normale est de l'ordre de 0,5 à 0,75 % seulement; chaque variation en plus ou en moins provoque une augmentation ou une réduction proportionnelle de la charge. Or, les variations de fréquence atteignant dans un réseau industriel $\pm 1\%$ et dans un réseau indépendant de chemin de fer $\pm 3\%$, on conçoit que le moteur asynchrone, malgré son glissement, ne se prête pas du tout au couplage de deux réseaux indépendants dont la fréquence n'est pas constante. C'est pourquoi le moteur asynchrone est aussi considéré comme rigide. Le convertisseur rigide de fréquence est utilisé pour alimenter tout ou partie du chemin de fer par l'intermédiaire d'un seul et même réseau triphasé, et aussi pour accoupler un des alternateurs d'une usine indépendante sur un réseau de traction alimenté par d'autres usines qui ne suffisent pas. A un facteur de puissance de 0,8, son rendement se meut entre 85 et 90 % de la demi-charge à la pleine charge.

Le groupe convertisseur élastique de fréquence a apporté une solution pratique au problème technique de l'échange d'énergie entre le réseau triphasé industriel et le réseau monophasé de traction¹⁾. Le groupe proprement dit comprend une machine synchrone monophasée et son excitatrice, une machine asynchrone triphasée, une machine Scherbius à collecteur faisant fonction de machine de réglage de la machine asynchrone triphasée, et un convertisseur de fréquence pour l'excitatrice de la machine Scherbius; il répond aux exigences suivantes:

- 1° débit dans les deux sens d'une puissance active constante réglable entre zéro et la puissance maximum admissible, indépendamment des variations de fréquence et des différences entre les fréquences des deux réseaux accouplés;
- 2° transmission de l'énergie en fonction de la fréquence de l'un des réseaux et indépendamment des variations de fréquence de l'autre réseau;
- 3° alimentation séparée d'un canton de lignes de contact;
- 4° débit d'énergie réactive des deux machines principales, réglable à volonté en quantité et en direction.

Le rendement du convertisseur élastique est à un facteur de puissance de 0,8 de l'ordre de 83 à 88 % de la demi-charge à la pleine charge.

L'installation complète d'un convertisseur de fréquence est dispendieuse et, ainsi, ne peut être généralisée.

Pour diminuer les frais d'établissement et d'exploitation des convertisseurs de fréquence, et pour réaliser des économies d'énergie, on peut envisager l'installation d'unités aussi grandes que possible en vue d'en réduire le nombre. Grâce à la haute tension du courant monophasé, les sous-stations peuvent être très espacées les unes des autres, par quoi leur charge est augmentée; celle des convertisseurs peut l'être encore davantage si l'on recourt à des postes transformateurs intermédiaires alimentés à l'aide de feeders d'une tension plus élevée que celle de la ligne de contact, par exemple de 30 kV. Le convertisseur travaille alors sur un transformateur à 3 enroulements dont l'un des 2 enroulements secondaires fournit la tension de la ligne de contact et l'autre la tension du feeder. Ce feeder prenant lieu et place d'un feeder de ligne de contact peut être monopolaire, le rail étant utilisé pour le courant de retour, et cela d'autant mieux que le courant de retour à la double tension du feeder est réduit dans la proportion inverse. Enfin, on peut, pour un rapport de 1 : 2, utiliser avantageusement des auto-transformateurs, dont les pertes sont plus petites que dans un transformateur ordinaire.

¹⁾ Bull. ASE 1934, No 2, p. 33, et No 3, p. 65.

Le facteur de charge d'une sous-station, qu'on obtient en divisant la pointe maximum enregistrée par la charge moyenne arithmétique pendant 24 heures, varie dans de larges limites; il est plus ou moins fonction de l'énergie absorbée, étant bien entendu qu'il dépend encore d'autres facteurs inhérents au caractère du chemin de fer et à son genre d'exploitation et de trafic, tels que le profil de la ligne, le poids, la vitesse et la fréquence des trains. Mais, quelle que soit l'influence de ces différents facteurs, la représentation graphique du facteur de charge en fonction de l'énergie absorbée garde l'allure d'une courbe hyperbolique. Considérant la consommation hebdomadaire pour englober les jours ouvrables et fériés, nous voyons que le facteur de charge atteint le chiffre 12 pour une consommation inférieure à 50 000 kWh; il tombe rapidement à 4 environ au fur et à mesure de l'augmentation de la consommation jusqu'à 500 000 kWh et ne descend guère au-dessous de 2 pour une consommation de plus de 1 500 000 kWh. Le débit hebdomadaire de 50 000 kWh est celui d'une petite sous-station alimentant une section de ligne de 20 à 30 km. Dans une grande exploitation, le facteur de charge du réseau entier s'améliore ainsi avec le nombre et l'importance des sous-stations. Cette constatation montre que les petites exploitations peuvent avoir un grand intérêt à réduire le facteur de charge selon les conditions qui leur sont faites pour la fourniture d'énergie. Pour les grandes exploitations, cet intérêt réside principalement dans les économies réalisables sur les frais d'établissement et d'exploitation de sous-stations. On peut diminuer considérablement le facteur de charge en répartissant la circulation des trains uniformément sur les heures de la journée et en veillant que plusieurs trains ne gravissent pas simultanément les fortes rampes du réseau.

E. Lignes de contact.

1° *Troisième rail.* L'extension de la traction à courant continu à basse tension sur les grandes lignes exige la transmission de très fortes intensités de courant aux automotrices de grande puissance. Le *troisième rail* devenait le type de ligne de contact qui seul permettait la prise de courant et la transmission sur des distances convenables sans l'aide de feeders. A cause de ses gros inconvénients on lui préféra, dans certains milieux, d'abord la ligne de contact bipolaire du système triphasé, puis, pour ne pas sacrifier les avantages de la ligne monopolaire et pour pouvoir augmenter encore davantage la tension du courant, le système monophasé, à une époque où les moteurs monophasés de traction étaient encore bien imparfaits. Cependant, le 3^e rail peut encore trouver une application judicieuse dans des cas particuliers, tels que pour les chemins de fer urbains et de banlieue, affectés essentiellement au service des voyageurs. Les rails utilisés comme conducteurs ont un poids de 39 à 76 kg par mètre courant; pour augmenter leur conductibilité, on choisit un acier spécial au manganèse à faible teneur de carbone, dont la résistivité n'est que huit fois celle du cuivre, au lieu de douze fois environ pour les rails ordinaires.

2° *Ligne de contact au-dessus des voies.* Tous les avantages des systèmes de traction par courant alternatif sur le système à courant continu reposent sur la facilité d'élever et d'abaisser la tension à volonté dans n'importe quelles limites pratiques. Pour la traction à courant triphasé, on a adopté, en général, une tension de 3000 à 3700 V dans la ligne de contact et exceptionnellement 6000 V; elle est limitée par les difficultés d'isoler les deux phases aériennes jusqu'à l'entrée du courant sur les locomotives. Le choix des tensions de 10 à 15 kV pour le courant monophasé a été dicté par des considérations relatives à la sécurité de l'exploitation. Tout changement des caractéristiques fondamentales d'un système est d'autant plus difficile que son application est étendue. Un changement des tensions normales du courant alternatif de traction, comme aussi de sa fréquence, ne peut donc plus être considéré comme mesure à adopter pour réaliser des économies de courant.

En traction à courant continu, deux tensions, l'une 1500 et l'autre 3000 V, s'affrontent. Le mutateur permettant de produire, avec toute la sûreté d'exploitation requise, toute tension continue pouvant convenir pour la traction, cette ten-

sion n'est plus limitée que par les collecteurs des moteurs à courant continu. Un moyen simple et économique d'abaisser la tension du courant, à l'instar de la transformation du courant alternatif, est encore inconnu. Les constructeurs ont abordé avec succès la construction du moteur de traction à 3000 V, mais le prix de ce matériel est sensiblement plus élevé que celui d'un matériel à courant continu de 1500 V.

Le troisième rail est encore utilisé sur quelques lignes pour la tension de 1500 V, qui semble être la limite admissible. Pour la transmission des courants de tensions plus élevées, la ligne de contact au-dessus de la voie ferrée reste seule en compétition. La section courante adoptée pour le fil de contact en cuivre des voies principales est de l'ordre de 100 à 110 mm². La surface de contact de ce fil avec les pantographes des automotrices suffit aux plus fortes intensités de courant absorbées à la tension de 15 kV. Pour les intensités considérablement plus grandes du courant de 3000 V, on augmente la surface de contact et à la fois la conductibilité de la ligne en doublant le fil de contact.

La chute de tension admissible, les pertes d'énergie, le coût du cuivre, de l'énergie et des sous-stations sont autant de facteurs variables qui déterminent la section de cuivre la plus économique.

Sur 3650 km de route électrifiés avec le système à courant continu de 1500 et 3000 V, les sections de cuivre ou équivalentes de la ligne de contact et des feeders ensemble, mais sans tenir compte des rails de roulement, se répartissent comme suit:

1100 mm ²	sur environ	5 %	de la longueur			
642 à 660	»	»	49 %	»	»	»
435 à 490	»	»	26 %	»	»	»
100 à 330	»	»	20 %	»	»	»

Les 2626 km de route électrifiés avec le système à courant monophasé de 11 000 et 15 000 V, sur lesquels portait notre étude, accusent les sections de cuivre ou équivalentes de la ligne de contact et des feeders suivantes:

100 à 135 mm ²	sur environ	23 %	de la longueur			
150 à 220	»	»	77 %	»	»	»

La comparaison de ces sections de cuivre fait ressortir une différence caractéristique entre les deux systèmes en cause, qui montre que dans l'un l'absence des effets inductifs du courant continu permet d'utiliser de grandes sections de cuivre, tandis que dans l'autre ces effets et les plus petites sections de cuivre sont largement compensés par la plus petite intensité de courant à une tension beaucoup plus élevée.

L'utilisation des *rails de roulement* comme conducteurs n'exige pas les mêmes précautions dans les deux systèmes à courant continu et à courant alternatif, et cela principalement à cause des courants vagabonds dans la terre, dont l'action électrolytique, en continu, peut endommager les canalisations métalliques souterraines, tandis que cette action, en alternatif, n'est pas à craindre. De ce fait, il y a, en traction à courant continu, une nécessité impérieuse de canaliser le courant de retour et de limiter sa dispersion dans la terre. Cependant, cette nécessité quoique moins grande, peut aussi exister en traction à courant alternatif, pour deux autres raisons; d'abord à cause des effets d'induction électromagnétique sur les canalisations aériennes et souterraines à courant faible du chemin de fer, puis, à cause d'actions thermiques des courants vagabonds concentrés sur des canalisations métalliques souterraines. Les courants de la ligne de contact monophasée produisent par effet électromagnétique une tension induite dans les fils aériens et dans les âmes des câbles des canalisations à courant faible, et un courant induit dans les manteaux métalliques de ces câbles. Ces effets d'induction diminuent en fonction de l'augmentation de l'intensité du courant dans les rails de roulement, en raison de l'effet antagoniste de ce courant.

La comparaison des valeurs obtenues par mesurage de la résistance ohmique des rails de roulement sur des lignes à voie unique et à double voie, fait ressortir que la terre augmente de 40 % la conductibilité d'une voie ferrée simple, munie de connexions de rail; on peut évaluer cette augmentation à plus de 100 % sur une voie ferrée sans éclissage électrique.

La nécessité de canaliser le courant continu de retour dans les rails rend l'éclissage électrique indispensable et, dès lors, toute possibilité d'améliorer les connexions de rail constitue une mesure à adopter en traction à courant continu pour réaliser des économies d'énergie; en traction à courant alternatif par contre, l'éclissage électrique des rails à cette unique fin devient une mesure illusoire ou du moins onéreuse.

Les pertes d'énergie dans les lignes de contact sont de l'ordre de 10 à 12 % en courant continu et de 4 % en courant monophasé.

Le facteur de puissance de l'énergie monophasée dans la ligne de contact dépend du travail des locomotives en service; il est bas lorsque les locomotives marchent à vide, et s'améliore avec l'augmentation de leur charge, donc aussi avec la charge de la ligne de contact et de la sous-station où il monte à 0,87, c'est-à-dire à une valeur satisfaisante. Ce facteur de puissance ne pourrait être encore amélioré que par des mesures spéciales à prendre sur les locomotives.

F. Matériel roulant.

1° *Locomotives.* L'enquête sur la question de savoir si des mesures sont prises pour diminuer le poids des locomotives a révélé que le besoin n'existe pas pour les locomotives à courant continu, soit pour ne pas diminuer le poids adhérent, soit parce que toute mesure serait illusoire ou onéreuse.

Le poids des locomotives par unité de puissance dépend de la vitesse et de l'effort de traction que les locomotives doivent développer, et aussi de ce qu'on entend par puissance de la locomotive. La comparaison des poids des locomotives qui ne tiendrait pas compte de ces facteurs serait fautive. Pour ne pas commettre cette erreur, il fallait se borner à ne comparer que les poids de locomotives de même catégorie et de même système entre eux. Le poids spécifique des locomotives à courant continu anciennes et nouvelles ne varie que très peu, ce qui confirmerait que le poids des locomotives de ce système est dicté par l'adhérence nécessaire et par des dispositifs qui doivent être adoptés pour une bonne tenue de route.

La comparaison du poids des locomotives à courant monophasé, anciennes et nouvelles, par unité de puissance, présente un aspect différent. Tandis que, vers 1912, le poids spécifique était de l'ordre de 100 à 140 kg par cheval de puissance unihoraire pour des machines de 500 à 700 CV, et vers 1920 de 60 à 85 kg par CV pour des machines de 1000 à 2000 CV, il varie aujourd'hui de 40 kg à 26 kg par CV pour les locomotives de 2000 à 6000 CV à grande vitesse et de 55 kg à 35 kg par CV pour les locomotives de trains de marchandises. Le parc des locomotives électriques des Chemins de fer fédéraux suisses donne deux exemples typiques et incontestables de la préoccupation de l'époque de réduire le poids spécifique, respectivement d'augmenter la puissance spécifique des locomotives à courant monophasé, savoir:

1° Dans la série des locomotives Be $\frac{4}{6}$ à commande combinée des essieux-moteurs par engrenages et par bielles, et toutes pour la même vitesse maximum de 75 km/h, celles qui ont été livrées en 1920 ont un poids total de 106,5 tonnes et une puissance unihoraire de 1760 CV, ce qui correspond à un poids spécifique de 60 kg par CV, tandis que celles qui ont été livrées en 1922 pèsent 109,6 tonnes pour une puissance de 2040 CV, ce qui fait 54 kg par CV, c'est-à-dire une diminution de 10 %.

2° Dans la série des locomotives Ae $\frac{4}{7}$ à commande individuelle des essieux-moteurs, et toutes pour la même vitesse maximum de 100 km/h, celles qui ont été livrées en 1927 pèsent 118,2 tonnes et ont une puissance unihoraire de 2800 CV, ce qui fait 42,2 kg par CV, tandis que celles qui ont été livrées une année plus tard accusent un poids de 120 tonnes et une puissance unihoraire de 3300 CV, ce qui fait 36,4 kg par CV, c'est-à-dire une diminution de 14 %.

Cet aperçu dénote que le poids des locomotives à courant monophasé était au début trop élevé. Aujourd'hui, le poids spécifique de ces locomotives est ramené à celui des locomotives à courant continu, ce qui explique que les administrations ne cherchent plus à réduire le poids des locomotives récentes.

Dans la construction des premières locomotives électriques de grande puissance, on avait cru devoir abandonner la commande individuelle des essieux-moteurs et la suspension par le nez des moteurs, pour concentrer toute la puissance en un seul ou au plus en deux moteurs. On voulait par là diminuer le poids-moteur actif, élever le centre de gravité et, par l'accouplement des essieux-moteurs à l'aide de bielles, atténuer le danger de patinage. Mais, l'accouplement mécanique des essieux exige un renforcement des longerons pour éviter des déformations du châssis et des variations de distance entre les boutons de manivelle. Ce renforcement annihile l'économie de poids réalisée par l'emploi de grands moteurs. Par ailleurs, l'accouplement élastique à biellettes ou à ressorts a résolu d'une façon satisfaisante le problème de la commande individuelle des essieux des locomotives à grande vitesse; enfin, on peut établir une dépendance électrique entre moteurs ou groupes de moteurs, pour empêcher un essieu de s'emballer au patinage. Dès lors, toutes les administrations sont d'accord que le grand moteur de traction et la commande collective des essieux ne présentent plus un avantage suffisant pour conserver son application en traction électrique.

Le poids des moteurs de traction est diminué surtout par l'augmentation du nombre de tours; il est limité par les vitesses circonférentielles admissibles pour l'induit et le collecteur et se meut dans les limites de 500 à 1000 tours à la minute.

La forme aérodynamique des locomotives à grande vitesse ne serait efficace que si elle était complétée par celle de la composition du train. Mais eu égard au caractère international d'un grand nombre de rapides, et à la composition variée de ces trains, un tel ensemble est, pour le moment, encore irréalisable. Par ailleurs, l'avantage de la locomotive électrique est de marcher indifféremment dans les deux sens, ce qui s'oppose à l'application de la forme aérodynamique.

2° *Automotrices.* La nécessité croissante d'augmenter la vitesse et la fréquence des trains, et d'assouplir l'exploitation d'un chemin de fer, a donné une impulsion nouvelle à l'utilisation des automotrices. On peut les classer en trois catégories: 1° l'automotrice faisant l'office de locomotive de puissance réduite; 2° l'automotrice individuelle, légère; 3° la rame d'automotrices légères.

Les automotrices de la 1^{re} catégorie sont assimilables aux locomotives; à l'instar de celles-ci, leur poids et leur puissance sont adaptés aux charges qu'elles doivent remorquer. Ces automotrices ne se distinguent plus guère des locomotives de petite puissance que par l'aménagement de la caisse.

Les automotrices des 2^e et 3^e catégories peuvent être confondues ici en ce sens qu'une rame d'automotrices est considérée comme une unité individuelle; elles représentent la nouvelle mode de matériel roulant, caractérisée par le genre de construction, la forme extérieure et la vitesse de marche. Les moyens employés pour alléger ce matériel roulant sont: le choix d'aciers de haute résistance pour la construction du châssis et de métaux légers pour la caisse, l'assemblage à la soudure autogène, la commande individuelle des essieux et l'emploi de moteurs à grande vitesse de l'ordre de 1500 tours à la minute. La résistance au roulement est fonction du poids de l'automotrice et du carré de la vitesse de marche. La tendance de diminuer le poids et d'augmenter la vitesse fait que la résistance de l'air devient un facteur de plus en plus important pour les voitures circulant isolément. Pour diminuer cette résistance qui s'exerce surtout à la tête et à la queue du train, on donne à la voiture ou à la rame de voitures une forme aérodynamique plus ou moins prononcée.

3° *Roulements à billes ou à rouleaux.* Le roulement à billes ou à rouleaux a, au point de vue de la consommation d'énergie, l'avantage d'accuser sensiblement le même coefficient idéal de frottement au repos et à n'importe quelle vitesse; par rapport au palier à glissement, il diminue considérablement la résistance au démarrage et encore sensiblement la résistance au mouvement. Malgré d'autres avantages connus des roulements à billes ou à rouleaux, leur emploi dans la construction du matériel roulant n'a pas encore pu être généralisé. Toutes les administrations les ont adoptés ou du moins appliqués à titre d'essais pour les paliers de

grandeur moyenne qui ne sont pas soumis aux chocs de la voie. Des applications du roulement à billes ou à rouleaux comme paliers d'essieux existent déjà, mais plutôt à titre d'essai à cause des dangers de rupture de billes ou de rouleaux.

4° *Chauffage des trains.* La quantité d'énergie absorbée pour le chauffage électrique des trains représente 5 à 15 % de la consommation totale du chemin de fer. Rapportée à la période de chauffage, la puissance nécessaire au chauffage électrique des trains atteint et dépasse même 30 % de la puissance moyenne locomotive. Il en résulte que les besoins en énergie peuvent être plus grands en hiver qu'en été, bien que le trafic soit au contraire plus faible.

Le chauffage électrique à l'aide des radiateurs répartis à l'intérieur de la caisse des voitures est le système ordinaire, appliqué en général. A l'instar du chauffage à vapeur, les interrupteurs des radiateurs électriques sont à la portée des voyageurs qui peuvent les manœuvrer à volonté.

Le contrôle automatique permet en tout cas d'éviter le surchauffage des voitures, qui, en général, est fréquent et inévitable avec le contrôle manuel; il facilite considérablement la surveillance que le personnel des trains doit tout de même exercer pour qu'une certaine quantité d'énergie ne soit pas gaspillée en chauffant avec portes et fenêtres ouvertes.

Plusieurs administrations ont installé à titre d'essai, sur quelques voitures et automotrices, un système de chauffage

électrique à courant d'air chaud, forcé, avec réchauffeur central disposé sous le plancher de chaque voiture et avec contrôle automatique. Ce système a l'avantage d'être plus rapide que le chauffage par radiateurs; il permet de réduire sensiblement la durée nécessaire du chauffage préalable et peut aussi, par là, contribuer à la réalisation d'économies d'énergie.

5° *Récupération de courant au freinage.* Le freinage par récupération n'est pas utilisable pour arrêter un train, mais uniquement pour régler la vitesse sur des fortes pentes; son installation demande dans le système à courant continu et dans le système à courant monophasé un appareillage supplémentaire sur les locomotives, et, par conséquent, une augmentation de poids des locomotives. Cette augmentation de poids se meut dans les mêmes limites pour les deux systèmes de traction, savoir: de 3500 à 8000 kg pour les grandes machines de plus de 100 tonnes, c'est-à-dire de 3 à 4 % du poids de la locomotive. Le transport de ce poids supplémentaire absorbe une quantité d'énergie qui est à déduire de l'énergie récupérée. Si l'on tient compte, en outre, des frais d'installation, on conçoit que le freinage par récupération ne peut être appliqué économiquement que sur les lignes à fortes et longues déclivités, où le freinage électrique permet d'augmenter la sécurité et de diminuer considérablement l'usure des bandages et des sabots de freins. — (H. Eggenberger et H. Eckert, Rev. mens. Bull. Ass. Int. du Congrès des Chemins de Fer, janv. 1937.) H. E.

Der elektrische Doppeltunnelparzellen-Brennofen der Porzellanfabrik Langenthal.

621.365.4 : 666.5

Wie schon gemeldet wurde¹⁾, fand am 24. August in Langenthal die Kollaudation des neuen Porzellan-Brennofens statt.

«Eine technische Grosstat in Langenthal» wurde der Bau dieses Ofens in den Lokalzeitungen genannt. Wir Techniker und besonders wir SEVer sind ja sonst nicht sehr auf Superlative eingestellt, aber in diesem Falle hat dieser Titel seine volle Berechtigung, denn es wurde hier wieder einmal wie in früheren Zeiten so oft, in letzten Jahren vielleicht etwas seltener, in der Schweiz eine technische Erfindung ersten Ranges von internationaler Bedeutung in die Wirklichkeit umgesetzt.

Schon lange besteht das Bestreben, die elektrische Wärme auch in die Keramik einzuführen; grosse Erfolge wurden auch schon seit Jahren gemacht. So ist wohl den meisten Lesern des Bulletin bekannt, dass in Langenthal seit dem Jahre 1927 ein Durchlaftunnelofen für das Einbrennen der Garnituren in Porzellangeschirr besteht. Der Ofen wurde seinerzeit von der A.-G. Brown, Boveri & Cie. geliefert und steht seither so einwandfrei im Betrieb, dass man nicht mehr viel von ihm redet, obwohl auch diese Konstruktion grosse Bedeutung hatte.

Die Porzellanfabrik Langenthal steckte sich das Ziel aber weiter. Im Bestreben nach möglichst einwandfreien Produkten und guter Ausnützung einheimischer Energiequellen suchte sie unter der Leitung von Herrn Gareis, dem Keramiker der Firma, auch das Hartbrennen des Porzellans durch Elektrowärme zu ermöglichen.

Es ist ja zum vorneherein einleuchtend, dass dieses Problem bei den nötigen Temperaturen von über 1400° C schon rein wärmetechnisch besonders schwierig ist. Der Elektriker denkt dabei natürlich an die Beherrschung der hohen Temperaturen und zerbricht sich den Kopf, wie und mit welchem widerstandsfähigen Material diese erzeugt werden können, bei Temperaturen, bei denen bekanntlich jeder Nicht- oder Halbleiter zu einem Leiter wird, bei denen man schon über der Schmelztemperatur des Eisens steht und alles Material, das man bisher kannte, weich und flüssig wird; und doch lag das Hauptproblem und die Hauptschwierigkeit nicht einmal auf dem elektrotechnischen und kalorischen Gebiet. Es war ebenso sehr eine *chemische* Frage. Das Glühen des Porzellans und auch das Einbrennen der Dekors auf fertigem Porzellan

vollzieht sich bei nur 900 bis 1000° C, und zwar in einer *oxydierenden* Atmosphäre (mit Sauerstoffüberschuss), deren Herstellung und Dosierung keine allzu grossen Schwierigkeiten bereitet. Das Hartbrennen des Porzellans muss aber — wenigstens eine Zeitlang bei bestimmten höchsten Temperaturen — in einer *reduzierenden* Atmosphäre geschehen, um die ausserordentlich schädigende Wirkung der auch im besten Rohmaterial enthaltenen Eisen- und andern Oxyden zu kompensieren.

In der Keramik ist als Reduktionsmittel allgemein CO, das Kohlenoxyd, gebräuchlich. Im Feuerbrandofen, d. h. dem bisher gebräuchlichen kohlegeheizten Rundofen, ist eine solche Atmosphäre durch Reduktion der Sauerstoffzufuhr zu den Verbrennungsgasen relativ leicht herzustellen; dass es aber auch nicht eine ganze einfache Sache ist, beweist die Tatsache, dass die grosse Rauchfahne, die von Zeit zu Zeit in nicht gerade schöner Weise schon fast in Bern auf die Porzellanfabrik Langenthal hinwies, dadurch zustande kommt, dass während gewisser Zeiten die Feuerung im Hartbrandofen auf die Produktion von genügend CO eingestellt wird, wobei dann unerwünschterweise viel Russ und dergleichen entstand. Nebenbei erfuhr man, dass der freie Kohlenstoff, eben der Russ, einer der gefährlichsten Feinde guten Porzellans ist und dass dessen Beseitigung ein weiteres Problem bildete.

Es ist der unermüdeten Forscherarbeit von Herrn Gareis, die sich über viele Jahre erstreckt, zu verdanken, dass das Problem einer reduzierenden Atmosphäre im Elektroofen gelöst wurde, und zwar zu einer Zeit, da noch massgebende Zeitschriften feststellen mussten, dass es wohl in absehbarer Zeit nicht lösbar sei. Dass dabei durch einen ganz besonders genialen Kunstgriff auf ein weiteres nationales Urprodukt, nämlich auf Holz, gegriffen wurde, ist ein weiteres erfreuliches Resultat dieser Bestrebungen.

Es erforderte von Direktion und Verwaltungsrat der Porzellanfabrik Langenthal einen mutigen, schwerwiegenden Entschluss, von der bisherigen, seit Jahrhunderten üblichen Brennmethod abzugehen und einen von den vier Oefen abzureissen, um genügend Platz zu bekommen zur Aufstellung des neuen elektrischen Tunnelofens. In fruchtbarer und verständnisvoller Zusammenarbeit mit der Erstellerfirma des Ofens, Brown, Boveri in Baden, entstand nun dieser grosse Doppeltunnelofen mit gegen 100 m Länge, der in einer 120 m

¹⁾ Bull. SEV 1937, Nr. 18, S. 437.