

# LA TRACTION ÉLECTRIQUE DES CHEMINS DE FER par le "monophasé 50 périodes" est-elle possible ?

La prochaine électrification de l'artère Paris-Lyon remet au premier plan de l'actualité ferroviaire le problème du courant de traction. Il n'est pas exagéré de dire que la France, « cristallisée », si l'on peut dire, sur la formule du courant continu 1 500 V distribué par caténaire, est aujourd'hui en train de réviser largement ses positions (1).

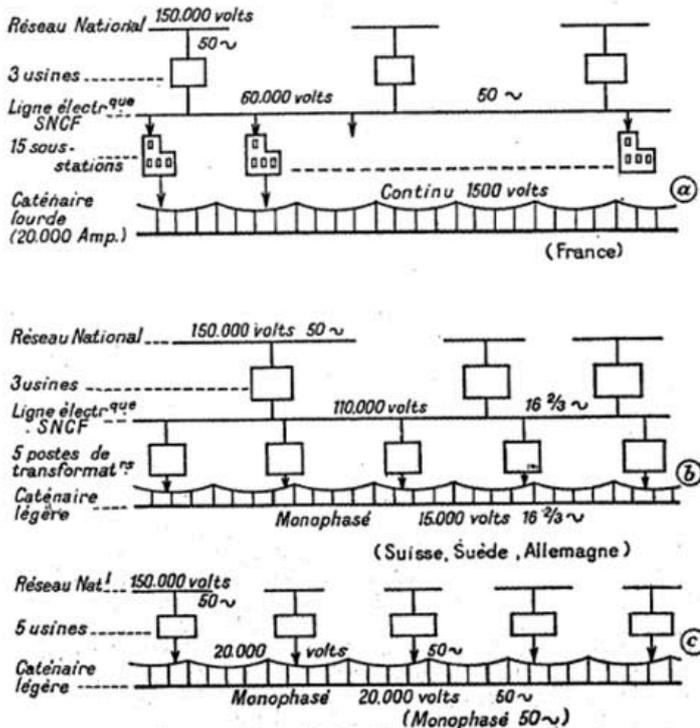
## Rentabilité des électrifications.

A mesure qu'on s'engage dans l'électrification, on est conduit à considérer des ensembles de lignes reliées les unes aux autres ; autrement dit, il est impossible d'électrifier les artères principales seules. Ceci est évident, notamment, en ce qui concerne le rempla-

1. On consultera plus particulièrement deux études techniques de M. ARMAND, Directeur général adjoint à la S.N.C.F. et de M. Marcel PROZ, Ingénieur en Chef des Transports aux Travaux Publics, *Revue générale des Chemins de fer*, février 1948.

Fig. 1. — Comparaison des installations fixes nécessitées par trois modes d'électrification d'une artère de 300 km.

a) Electrification en courant continu à 1 500 V, système français : le chemin de fer doit construire une ligne électrique triphasée 60 000 V, 50 périodes, le long des voies, 15 sous-stations réparties le long du parcours pour transformer le courant alternatif en courant continu 1 500 V, une caténaire lourde (2 000 A). — b) Electrification en courant alternatif ordinaire (monophasé) 15 000 V, système Suède, Suisse, Allemagne : le chemin de fer doit construire une ligne à 110 000 V spéciale 16 2/3 périodes, trois usines, cinq postes et une caténaire légère. — c) Electrification en monophasé 20 000 V, 50 périodes : le chemin de fer doit construire des postes de transformation aux points de rencontre de la voie avec les lignes du réseau national (ici, cinq points) et une caténaire légère. C'est de beaucoup la solution la plus économique (schémas simplifiés d'après une étude de M. ARMAND sur l'électrification de Clermont-Ferrand-Nîmes).



cement des locomotives : électrifier uniquement les lignes à gros trafic, ce serait rendre disponibles d'excellentes locomotives à vapeur, difficilement utilisables ailleurs, sans qu'il soit néanmoins possible d'éviter les dépenses de modernisation du parc des machines secondaires. Il ne saurait être question, en outre, de réformer prématurément les nouvelles locomotives à vapeur acquises par la S. N. C. F. depuis 1944, telles que les 141-P et les 141-R, dont les délais d'amortissement portent sur une quarantaine d'années.

Toutefois, un programme d'équipement comprenant une proportion élevée de lignes secondaires se heurte à un « seuil de rentabilité », du fait que les investissements nécessaires ne sont pas justifiés par le trafic. Pratiquement — et c'est là une conclusion qui surprendra — le Conseil supérieur des Chemins de fer a reconnu, bien avant la guerre, qu'il n'y avait pas d'intérêt économique à équiper, en plus de Paris-Lyon, quelques centaines de kilomètres de lignes, toutes importantes.

Le problème se pose donc ainsi, sur le plan technique : existe-t-il des systèmes d'électrification dont les installations fixes seraient beaucoup moins coûteuses que celles du 1 500 V ? Peut-on utiliser deux systèmes électriques différents sur un même réseau de chemin de fer ?

Il faut avouer que la plus aimable variété caractérise les courants électriques de traction utilisés dans le monde. D'après une statistique empruntée à M. Barjot, l'Allemagne emploie le courant alternatif monophasé 15 000 V 16 2/3 périodes ; la Belgique le continu 3 000 et 1 500 V ; l'Espagne, la France, la Hollande, le Japon du continu 1 500 V ; la Grande-Bretagne du continu 600 et 650 V ; l'Italie du continu 3 000 V et de l'alternatif triphasé 3 700 V 16 2/3 périodes ; la Norvège et la Suisse du monophasé 15 000 V 16 2/3 périodes ; la Suède le même courant à 16 000 V ; la Russie du continu 1 500 et 3 000 V ; l'Argentine du continu 800 V ; le Chili, l'Algérie et le Maroc du continu 3 000 V ; les Etats-Unis du continu 650 et 3 000 V et du monophasé 11 000 V 25 périodes ; l'Afrique du Sud emploie du continu 1 500 et 3 000 V. Toutes les distributions se font par fils aériens de contact excepté en Grande-Bretagne et en Argentine où le troisième rail est employé ; les lignes italiennes triphasées utilisent deux fils aériens de contact.

On notera la large diffusion du courant alternatif à 16 périodes 2/3, chiffre fractionnaire qui représente le tiers de fréquence standard des grands réseaux nationaux à 50 périodes. Son emploi est fort intéressant, le courant étant transformé sur la locomotive elle-même, ce qui permet de réduire considérablement les intensités dans la caténaire aérienne ; en outre, les sous-stations peuvent être espacées d'une cinquantaine de kilomètres.

Par contre, le courant 16 périodes 2/3 présente l'inconvénient majeur d'être spécial à la traction et d'imposer par suite des lignes et des installations uniquement ferroviaires. La solution la plus séduisante, celle qui occupe actuellement les techniciens de la S. N. C. F. serait l'alimentation directe des locomotives par du courant monophasé industriel, à 50 périodes et à haute tension, en provenance du réseau national. Sous l'énergique impulsion de M. Armand, actuellement Directeur général adjoint de la S. N. C. F., des études furent entreprises dès après la Libération, avec le concours de nombreux spécialistes français ; des expériences furent faites en Allemagne sur une ligne équipée précédemment à haute tension par les Allemands dans la vallée du Hölental, en Forêt Noire. Des résultats définitifs peuvent être aujourd'hui considérés comme acquis.

## Le problème des moteurs (1).

L'application de la traction électrique par courant monophasé à 50 périodes soulève des difficultés techniques d'un grand intérêt.

La première difficulté consiste à prélever sur le réseau national, qui est triphasé, des puissances monophasées considérables sans déséquilibrer les phases de ce réseau. Dans ce cas, il se produit des inégalités de tension, de charge, des déphasages, qui perturbent l'éclairage, abrègent la vie des lampes et provoquent dans les machines tournantes des champs parasites produisant des effets de freinage et des pertes.

On s'attachera donc à réduire l'importance des déséquilibres en divisant la ligne de contact (caténaire) en sections indépendantes alimentées par des phases différentes. Il sera par ailleurs généralement suffisant de choisir judicieusement les points d'alimentation haute tension ; l'essentiel est de se raccorder, par des chemins de moindre impédance (moindre résistance inductive), aux machines aptes à l'absorption des courants parasites, c'est-à-dire aux compensateurs synchrones, aux alternateurs munis d'amortisseurs, etc... Ordinairement, il suffira, à cet effet, de se relier à des centres importants ou à des artères à très haute tension.

Rien n'empêche au surplus d'équiper les sous-stations de dispositifs équilibrateurs, notamment de prévoir, au lieu de transformateurs ordinaires, des transformateurs Scott à double enroulement secondaire.

1. Voir l'étude de M. ARMAND dans le même numéro de la R. G. des Chemins de fer.

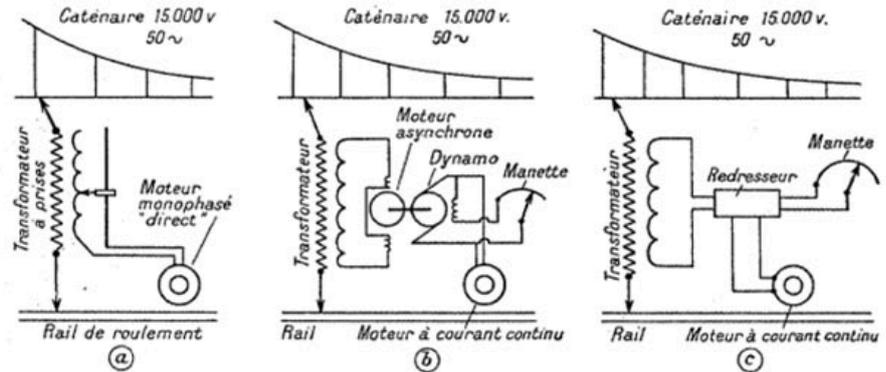


Fig. 2. — Trois systèmes de locomotives électriques fonctionnant en courant monophasé 50 périodes (tension 15 000 à 20 000 V).

a) Locomotive à « moteurs directs » alimentés par un transformateur à prises multiples, permettant la régulation de la puissance. — b) Locomotive à groupe convertisseur. — c) Locomotive équipée d'un « mutateur » à vapeur de mercure jouant le rôle de redresseur.

Une objection se présente, concernant le courant alternatif de traction à 50 périodes ; ce sont les graves perturbations d'induction qui sont à craindre pour les lignes de télécommunications installées actuellement le long des voies. Cette question trouve naturellement sa solution, les P. T. T. ayant précisément un programme d'ensemble pour le remplacement de ces lignes aériennes par des câbles posés le long des routes.

Passons aux problèmes de moteurs.

Le moteur monophasé universellement employé pour la traction est le moteur à collecteur. Il s'agit, bien entendu, de moteurs du type « moteurs à courant continu », excités en série, non de moteurs à répulsion ou du type Latour, dont les caractéristiques ne conviendraient nullement aux nécessités de la traction. De prime abord, les choses paraissent fort simples : le courant alternatif s'inversant simultanément dans l'inducteur et dans l'induit, le sens du couple moteur demeure inchangé. Il faut toutefois

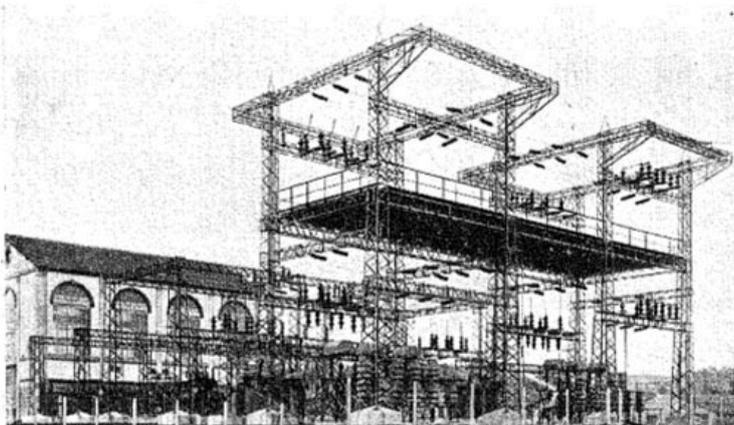
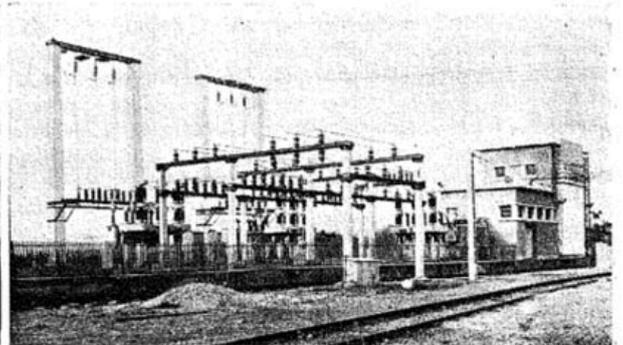
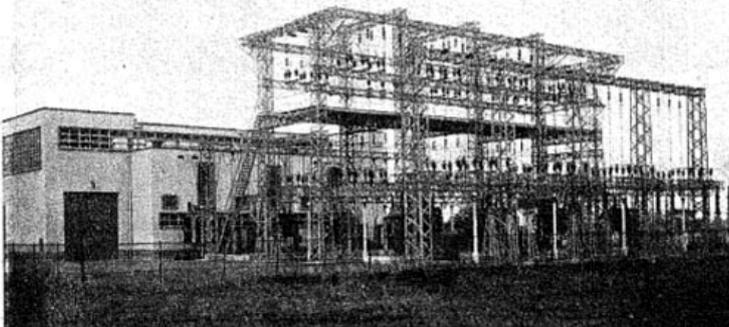


Fig. 3 à 5. — Trois sous-stations de transformation édifiées à des dates différentes.

En haut : Sous-station de Saint-Chéron, sur la ligne Brétigny-Dourdan, mise en service en 1926. — A gauche : Sous-station de Gazeran, sur la ligne Paris-Le Mans, mise en service en 1937. — A droite : Sous-station Gourdon, de la ligne Brive-Montauban, mise en service en 1943. — On remarquera la réduction de volume des postes extérieurs à H.T. et des bâtiments abritant les groupes convertisseurs « triphasé-continu ». Les sous-stations de la ligne Nîmes-Sète mises en service en 1947 reproduisent à très peu près celles de la ligne Brive-Montauban. L'utilisation directe du courant industriel sur la ligne de contact supprimera ces dernières.



remarquer que ceci n'est vrai que pour un moteur série, car la self des enroulements introduit des déphasages différents dans l'inducteur et dans l'induit quand on a affaire à un moteur dérivation. C'est une des raisons pour lesquelles ce type de moteur n'est pas employé avec le courant alternatif.

En continu comme en alternatif, la caractéristique couple-vitesse du moteur série est tombante, c'est-à-dire que le couple diminue quand la vitesse augmente et inversement. Elle est donc auto-régulatrice pour la traction, la vitesse s'adaptant automatiquement à la charge. Avec ses gros enroulements, le moteur est robuste et supporte bien la surcharge,

Comparé au moteur à courant continu, le moteur monophasé à collecteur présente des différences remarquables. Tout d'abord, la tension admissible entre deux lames consécutives du collecteur est plus faible avec l'alternatif, à cause, en particulier, des maxima sinusoïdaux de la tension, supérieurs de près de la moitié à la tension efficace nominale. A égalité de diamètre, la puissance monophasée est donc moindre.

La self, en alternatif, entraîne une diminution de la puissance spécifique, que l'on peut toutefois corriger en compensant suffisamment le moteur. Ceci pour l'induit. L'inducteur ne peut être retouché que par une diminution de l'importance des pôles, c'est-à-dire des flux. Dans un moteur monophasé, les flux sont faibles et l'importance relative de l'induit par rapport à l'inducteur est plus grande qu'en courant continu.

### Commutation et conduite.

Mais la difficulté capitale, dans les moteurs monophasés à collecteur, est celle de la *commutation*. On sait que ce terme désigne le passage, sous un balai, de deux lames consécutives, la section d'enroulement de l'induit correspondante se trouvant forcément mise en court-circuit par l'épaisseur du balai. Le problème est d'éviter des arcs destructeurs.

En courant continu, le problème est simple. L'inversion du sens du courant, imposée à la section commutée, induit dans cette section une force électromotrice dynamique, dont les effets destructeurs sont proportionnels à la vitesse et au courant principal. On y remédie par l'artifice classique de pôles auxiliaires de commutation, produisant une force électromotrice qui annule la précédente.

Avec le courant alternatif, le même phénomène existe, mais il est pulsatoire. Il s'y en ajoute un autre, dû au flux alternatif principal inducteur, qui induit dans la section en commutation une force électromotrice n° 2, analogue à celle qui prend naissance dans le secondaire d'un transformateur. Elle est proportionnelle à la fréquence et, d'autre part, à l'intensité du flux, c'est-à-dire au courant, les circuits magnétiques d'un moteur monophasé étant loin de la saturation.

La « tension entre lames » sera la résultante de ces deux forces électromotrices qui sont en quadrature (« décalage » de 90°), toutes deux dépendant du courant, mais une seule dépendant de la vitesse. La résultante sera donc décalée sur le courant d'un angle variable avec la vitesse ; on pourra la détruire à l'aide de pôles auxiliaires, mais à condition de décaler également le flux de ces pôles de la valeur voulue par rapport au courant. Ceci s'obtient très simplement en montant en parallèle, sur les enroulements de ces pôles, une résistance convenable. Toutefois, pour que la commutation fût parfaite à toutes les vitesses, on devrait faire correspondre à chaque vitesse une valeur différente de la résistance, au moyen d'un régulateur, ce qui est pratiquement irréalisable. On se contente d'un réglage moyen, convenant au régime de marche le plus usité.

Il est clair que plus le conducteur s'écarte de ce régime, plus la tension augmente entre lames et moins la commutation est bonne. Lors des démarrages, on devra s'efforcer d'obtenir de fortes accélérations pour atteindre rapidement la zone des vitesses correspondant à une bonne commutation. En somme, avec le monophasé,

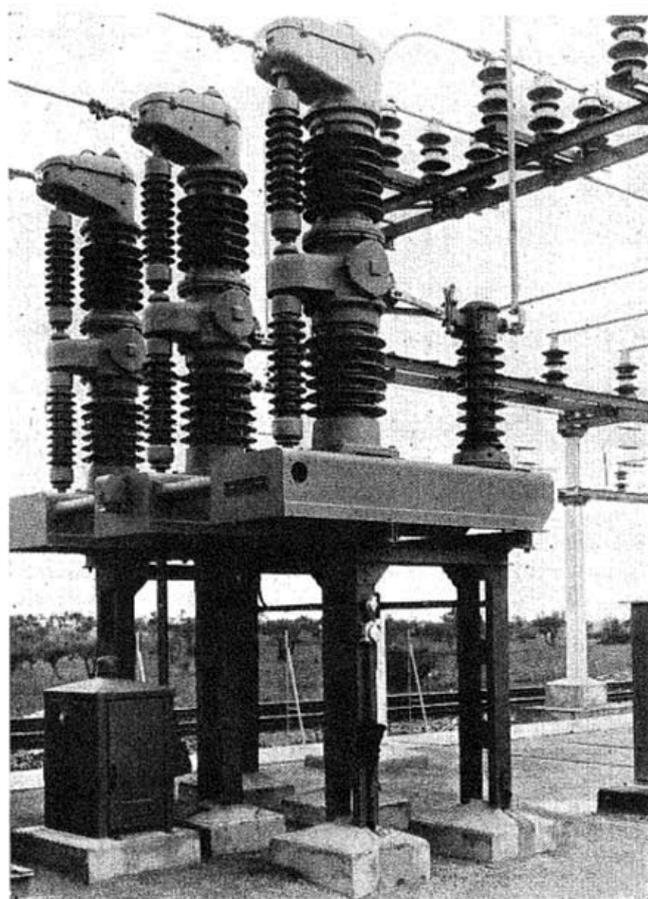


Fig. 6. — Disjoncteur 60 000 V, à faible volume d'huile. Ligne Sète-Nîmes, groupe traction.

la zone de marche autorisée en régime permanent n'est pas seulement délimitée par la caractéristique d'échauffement des moteurs, c'est-à-dire par leur contrainte thermique, comme c'est le cas en courant continu, mais aussi par la tension de commutation, qui ne doit pas dépasser une certaine valeur (contrainte de commutation).

Actuellement, ces problèmes peuvent être considérés comme parfaitement résolus pour la fréquence 16 2/3 périodes par seconde. Que se passera-t-il si l'on alimente le moteur avec du courant à 50 périodes ? Les phénomènes de commutation demeurent de même nature, mais la force électromotrice parasite n° 2 se trouve triplée et il faut la ramener à sa valeur limite admissible en réduisant en proportion le flux polaire.

Ceci conduit à une tension d'induit trois fois moindre, donc, pour obtenir la même puissance, à un courant trois fois plus élevé, ce qui augmente en proportion le collecteur. Pour conserver le même couple, il faut tripler le nombre des pôles et, bien entendu, celui des lignes de balais.

On arrive finalement à un moteur beaucoup plus lourd et d'une construction plus délicate, mais dont la mise au point se présente aujourd'hui de façon très favorable.

Au regard de ces inconvénients, le moteur monophasé présente des avantages qui lui sont propres. En continu, le moteur doit être établi pour la tension maxima de la ligne, alors que sa tension moyenne de fonctionnement est notablement inférieure ; il y a là une mauvaise utilisation constructive. Pour le démarrage, comme on ne peut régler la tension, on doit obligatoirement opérer à l'aide de résistances, sur lesquelles on ne peut rester qu'un temps limité ; il est également nécessaire d'agir sur l'excitation pour disposer, avec chaque couplage des moteurs, de gammes de vitesses

suffisantes. Les possibilités de ce mode de réglage ne sont pas très étendues. Quant à l'équipement électrique nécessité par le réglage de ces résistances et de l'excitation, il présente une complication extrême, caractéristique de l'équipement en courant continu.

Avec le moteur monophasé série, on réalise très simplement un réglage progressif de vitesses, par variation continue de la tension d'alimentation, au moyen de prises ménagées sur le transformateur ; le conducteur peut rester indéfiniment sur chaque prise. Le moteur peut être établi pour donner sa pleine puissance même aux grandes vitesses, et il est toujours possible de l'utiliser jusqu'à sa limite.

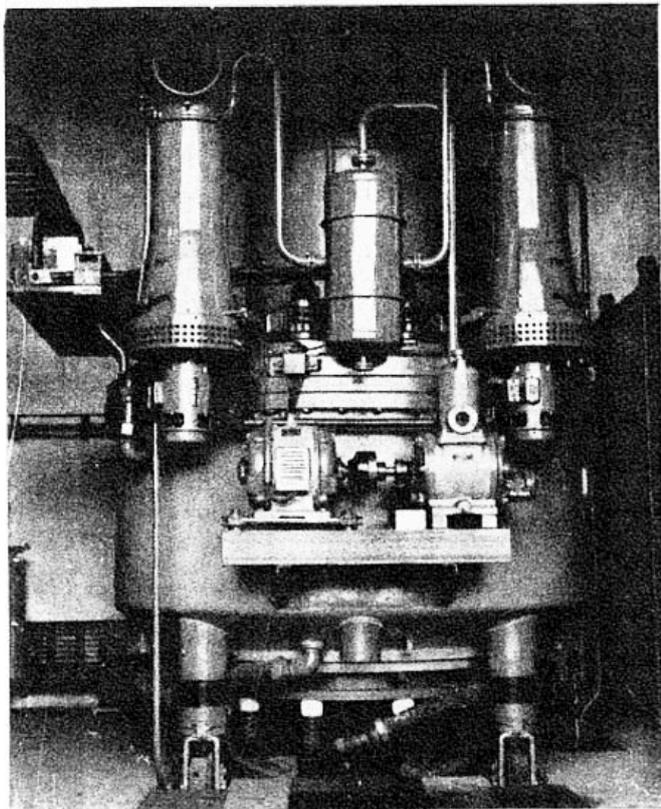
### Les nouvelles locomotives monophasées.

Deux catégories de locomotives monophasées existent : les locomotives où le courant est directement utilisé dans des moteurs de traction à collecteur, et celles dans lesquelles le courant monophasé est d'abord transformé par un groupe convertisseur.

Une locomotive de la catégorie « moteurs directs » est en service sur la ligne du Höllental, en pays de Bade ; deux locomotives de la même catégorie viennent d'être étudiées pour la S. N. C. F. ; l'une possède un moteur par essieu, l'autre un moteur double par essieu, ce qui assouplit le problème. Toutes deux développent environ 330 ch par essieu (1).

1. Les ingénieurs allemands ont essayé, voici quelques années, un type curieux de moteur sans collecteur (moteur asynchrone) à double induit. L'induit auxiliaire, logé dans l'entre-fer, est une simple cage d'écureuil entièrement libre, montée sur billes. On commence par lancer la cage à une vitesse voisine du synchronisme ; elle continue alors à tourner, étouffant à peu près complètement l'un des deux champs tournants de sens inverses dont l'ensemble constitue le champ monophasé de l'inducteur. Le moteur possède ainsi les caractéristiques d'un moteur asynchrone polyphasé ; il peut notamment démarrer en charge.

Fig. 7. — Redresseur à vapeur de mercure actuellement en service à la sous-station de Nîmes, pour l'alimentation des caténaires en continu 1 500 V.



Dans la seconde catégorie de locomotives, comportant une conversion du courant, des précédents existent également. Le système de Kando, appliqué sur une ligne hongroise, comporte un groupe convertisseur tournant fournissant du courant triphasé aux moteurs de traction, qui sont du type à champ tournant.

Une locomotive Krupp à groupe convertisseur, basée sur un principe analogue, est en service sur le Höllental.

Deux autres locomotives du Höllental possèdent des redresseurs à vapeur de mercure, permettant l'alimentation en courant quasi continu des moteurs de traction.

La S. N. C. F. a fait étudier une locomotive à groupe tournant convertisseur monophasé-continu. Le courant monophasé à 50 périodes, dont la tension est d'abord abaissée dans un transformateur, alimente un moteur asynchrone qui entraîne des génératrices à courant continu.

Les moteurs de traction fonctionnent ainsi en continu sous tension variable, ce qui autorise un excellent réglage par simple contrôle de l'excitation des génératrices, suivant le classique principe Ward-Léonard.

Pour l'instant, la S. N. C. F. s'en tient à l'étude de ces trois types de locomotives (moteurs directs et groupe tournant), mais l'évolution technique rapide que subit actuellement le mutateur à vapeur de mercure pourrait révéler également des formules intéressantes dans les locomotives à redresseurs.

En conclusion, on peut considérer dès aujourd'hui comme possible d'entreprendre des électrifications ferroviaires en courant industriel 50 périodes, avec les avantages suivants :

1<sup>o</sup> suppression de toutes lignes haute tension spéciales au chemin de fer, l'électrification perdant ainsi son caractère de « grands travaux » ;

2<sup>o</sup> alimentation de la caténaire par de simples transformateurs espacés de 50 à 100 km ;

3<sup>o</sup> caténaire légère alimentée sous tension élevée, de l'ordre de 25 000 V.

On peut prévoir que le coût des installations fixes sera moins de la moitié des dépenses en 1 500 V, les locomotives étant, par ailleurs d'un prix sensiblement équivalent.

Un détail technique mérite d'être signalé en terminant : c'est la nécessité, tout au moins pour un certain nombre de locomotives monophasées, de circuler dans les « gares-frontières » limitrophes des zones électrifiées en 1 500 V continu. Pour des raisons de simplicité, ces gares seront « mono-courant » ; certaines locomotives monophasées devront donc pouvoir fonctionner, au moins à vitesse réduite, sous caténaire à 1 500 V.

Ce problème a été étudié pour les trois locomotives prototypes de la S. N. C. F. La locomotive à groupe convertisseur fournit une solution parfaite ; les locomotives à moteurs monophasés directs seront équipées d'un groupe auxiliaire, continu-continu ou continu-monophasé, de puissance réduite.

PIERRE DEVAUX,  
Ancien Elève de l'École Polytechnique