
NOTE

SUR LE

DÉVELOPPEMENT DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE EN ITALIE

Par M. PARODI

INGÉNIEUR DU SERVICE ÉLECTRIQUE A LA COMPAGNIE D'ORLÉANS.

C'est en Italie que semblent se poursuivre actuellement avec le plus d'ampleur et de continuité les travaux d'électrification de lignes de chemin de fer importantes. Le vaste programme élaboré par le Réseau d'Etat comporte l'électrification de près de 2.000 kilomètres de lignes pour un réseau ayant un développement total d'environ 13.000 kms (1). Par la substitution de la traction électrique à la traction à vapeur sur ces lignes, qui sont presque toutes des lignes de montagne présentant de fortes déclivités et de nombreuses courbes, on escompte des résultats économiques intéressants en même temps qu'une augmentation considérable de la capacité du trafic.

L'Italie est en plein essor industriel et agricole, et le développement commercial extrêmement rapide de ports de mer comme Gênes, Savone, etc., imposé aux chemins de fer l'organisation de services de marchandises à grand débit, que la traction à vapeur ne pourrait réaliser que très difficilement sur des lignes à fortes rampes, de tracé sinueux, traversant de longs tunnels. La traction à vapeur est d'ailleurs d'une façon générale particulièrement onéreuse en Italie, du fait de la cherté du combustible, dont le prix moyen ressort pour l'exercice 1911-1912 à 34 fr. la tonne.

La traction électrique semble devoir bénéficier de la hausse continue des charbons ainsi que de l'immense développement des réseaux de transport de force électrique utilisant l'énergie engendrée dans de grandes centrales hydrauliques. En 1910, sur une puissance globale d'usines installées de 1.000.000 H.P. plus de 650.000 H.P. étaient produits dans des usines hydrauliques. Sur ce total, 60.000 H.P. sont déjà à la disposition des chemins de fer pour l'alimentation des lignes à traction électrique.

(1) La partie du réseau à électrifier, bien qu'elle ne représente que 15 % de la longueur totale du réseau, figure pour 25 % dans les dépenses de combustible.

Les premières installations de traction électrique effectuées en Italie ont été réalisées en 1901 et 1902 avant le rachat des chemins de fer par la Rete Adriatica, sur les lignes de la Valteline et par les chemins de fer de la Méditerranée sur celles de la banlieue de Milan. Les résultats extrêmement favorables obtenus sur ces lignes aussi bien au point de vue de la régularité du service qu'à celui de la réduction des dépenses d'exploitation, ont décidé l'Etat Italien, à poursuivre la réalisation d'un programme d'application de la traction électrique aux lignes de montagne ; mais pour diverses causes, les travaux n'ont été commencés qu'en 1909.

En 1910, 235 kms de ligne étaient électrifiés et la puissance utilisable, répartie dans 16 sous-stations de transformation, était d'environ 8.000 kw.'

En 1912, la longueur électrifiée s'élevait à 313 kms et la puissance utilisable, répartie dans 28 sous-stations, s'élevait à 44.000 kws ; 365 kms de lignes à haute tension reliaient les sous-stations entre elles et aux usines génératrices.

Le tableau suivant donne approximativement les longueurs de lignes électrifiées dans différentes parties du réseau de chemin de fer italien.

DÉSIGNATION DE LA LIGNE		LONGUEUR DE LA LIGNE	
VALTELINE	Chiavenno-Colico	26 ^k ,570	} 143 ^k ,610
	Sondrio-Colico	40 ^k ,790	
	Colico-Lecco	38 ^k ,250	
	Lecco-Monza	38 ^k ,000	
BANLIEUE DE MILAN	Milan-Gallarate-Varèse et Porto-Ceresio	»	72 ^k ,020
LIGNES D'ACCÈS A GÈNES	Ronco à Sanpierdarena (Giovi)	24 ^k ,000	} 53 ^k ,000
	Ronea à Sanpierdarena (Succursale)	25 ^k ,000	
	Sanpierdarena-Gênes	4 ^k ,000	
	Sampierdarena-Campasso et gare de Gênes	»	»
	Voies de garage, de formation, etc	»	»
LIGNE DU MONT-CENIS	Modane à Busoleno par Bardonnèche-Chiomonte.	»	49 ^k ,000

Les chemins de fer de l'Etat Italien se proposent en outre en 1913-1914 de pousser activement les travaux d'électrification des lignes de Vintimille à Gênes (151 km), de Turin à Pignerol (36 km), de Gênes à la Spezzia (90 km); etc....

Pour assurer le service sur ces lignes, des commandes importantes de matériel roulant ont été passées et en 1914 le parc de locomotives électriques triphasées comprendra 153 unités représentant une puissance globale de plus de 300.000 H.P., sans compter 51 automotrices et 6 locomotives à courant continu de la ligne de Milan à Gallarate d'une puissance globale de 40.000 H.P. environ. Tous ces projets et les travaux actuellement en cours ont été étudiés par les chemins de fer de l'Etat Italien en profitant de l'expérience acquise dans 10 années d'exploitation de traction électrique à courant continu sur les lignes de Milan à Gallarate, à courant triphasé sur les lignes de la Valteline. Les résultats de cette expérience ont permis aux Ingénieurs des Chemins de fer Italiens de fixer d'une façon remarquable les méthodes d'établissement et d'exploitation de leurs lignes électrifiées et ce sont ces « caractéristiques » des électrifications en cours que nous nous proposons d'examiner maintenant.

SYSTÈMES DE TRACTION.

Toutes les électrifications italiennes en cours comportent l'emploi du système de traction par courant triphasé 3.000 à 3.300 volts entre phases, 15 à 16,6 périodes par seconde.

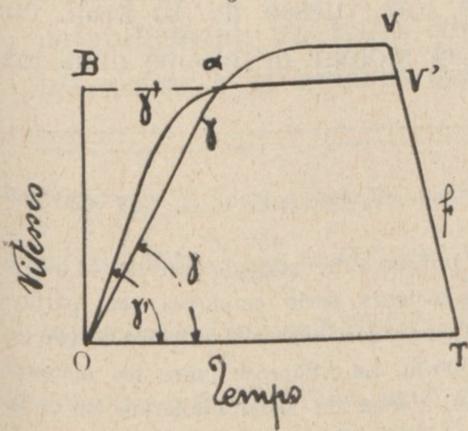
Dans ce système de traction, le courant est capté sur trois conducteurs d'alimentation, constitués l'un par les voies de roulement, les deux autres par deux conducteurs aériens. Le courant d'alimentation à 3.000 volts environ est utilisé directement dans les moteurs asynchrones triphasés que l'on peut bobiner facilement pour cette tension élevée. Les enroulements primaires et secondaires de ces moteurs peuvent recevoir plusieurs dispositions permettant d'obtenir, par connexion des moteurs en cascade ou par variation du nombre de pôles, 2, 3 ou 4 vitesses économiques qui sont chacune des fractions définies à 2 ou à 3 % près de la vitesse de synchronisme du moteur.

L'emploi des moteurs à champ tournant entraîne donc la réalisation d'une vitesse de marche de régime constante et indépendante des charges remorquées, des conditions atmosphériques, de la direction et de la vitesse du vent, des résistances de la voie, etc..., c'est dire que la durée de chaque parcours est théoriquement et pratiquement constante.

Cette constance des durées de parcours est considérée comme un très sérieux avantage par les services d'exploitation des chemins de fer de l'État Italien. Les comparaisons faites à ce point de vue sur les lignes de la banlieue de Milan et de la Valteline pour des parcours d'une longueur moyenne de 4.500 m. environ, entre la traction électrique à courant continu et celle à courant triphasés, ont toutes été à l'avantage de ce dernier mode de traction. Les raisons que l'on donne communément pour montrer la supériorité des moteurs à caractéristique série (effort de traction rapidement décroissant avec la vitesse) sur les moteurs à vitesse constante et qui sont excellentes pour les parcours de faible longueur, perdent presque toute portée dès que la longueur de parcours moyen dépasse 1.500 à 2.000 m. (1). Dans tout service de traction, les

(1) Avec les systèmes de traction, autres que le triphasé, pour lesquels l'effort moteur est une fonction de la vitesse et décroît rapidement quand celle-ci augmente, il est impossible d'assurer, dans de bonnes conditions, la remorque de trains de tonnages différents. Soit un parcours de longueur L à effectuer dans le temps T , et soit $O\gamma\alpha VT$ (Fig. 1) la courbe représentative des vitesses en fonction du temps pour le train de poids normal. La surface de cette courbe est proportionnelle à la longueur L . Pour un train plus lourd de 20 à 25 %, la vitesse maximum de marche V' sera de 10 à 12 % plus faible, et la nouvelle courbe représentative des vitesses $O\gamma'\alpha V'T$ devra avoir la même surface que la précédente. L'accélération correspondante γ' devra être beaucoup plus grande que γ : si par exemple, pour effectuer un parcours de 2.700 m. en 3,5 minutes (vitesse moyenne de 50 Km/h), il faut une accélération moyenne, au démarrage, de $0^m,4$ par seconde, correspondant à la charge normale des moteurs, cette accélération devra être portée à $0^m,7$ pour un train de 20 % plus lourd que le précédent, et au démarrage, la charge des moteurs du tracteur sera de $1,2 \times \frac{0,7}{0,4} = 2,1$ fois la charge normale. Avec un tracteur à courant triphasé, la vitesse normale de marche aurait été la même dans les deux cas et la même accélération au démarrage nécessaire aurait été obtenue en donnant seulement aux moteurs une surcharge de 20 %.

Fig. 1.



Soit un parcours de longueur L à effectuer dans le temps T , et soit $O\gamma\alpha VT$ (Fig. 1) la courbe représentative des vitesses en fonction du temps pour le train de poids normal. La surface de cette courbe est proportionnelle à la longueur L . Pour un train plus lourd de 20 à 25 %, la vitesse maximum de marche V' sera de 10 à 12 % plus faible, et la nouvelle courbe représentative des vitesses $O\gamma'\alpha V'T$ devra avoir la même surface que la précédente. L'accélération correspondante γ' devra être beaucoup plus grande que γ : si par exemple, pour effectuer un parcours de 2.700 m. en 3,5 minutes (vitesse moyenne de 50 Km/h), il faut une accélération moyenne, au démarrage, de $0^m,4$ par seconde, correspondant à la charge normale des moteurs, cette accélération devra être portée à $0^m,7$ pour un train de 20 % plus lourd que le précédent, et au démarrage, la charge des moteurs du tracteur sera de $1,2 \times \frac{0,7}{0,4} = 2,1$ fois la charge normale. Avec un tracteur à courant triphasé, la vitesse normale de marche aurait été la même

dans les deux cas et la même accélération au démarrage nécessaire aurait été obtenue en donnant seulement aux moteurs une surcharge de 20 %.

Bien entendu, il faut noter qu'avec la traction à courant continu pour des parcours suffisamment longs, pour lesquels la surface $\alpha VV'$ est plus grande que la surface $OB\alpha$, il sera impossible de compenser par une augmentation d'accélération la perte de temps due à la réduction de vitesse en pleine marche, et cette perte de temps sera inéluctable. C'est d'ailleurs

horaires sont en effet établis de manière à allouer aux trains une durée de parcours de 5 à 15 % supérieure à la durée minimum réalisable en utilisant à chaque instant la puissance maxima disponible des tracteurs (allure de combustion poussée pour les machines à vapeur, voltage maximum d'alimentation des moteurs pour les tracteurs à courant continu ou monophasé). Cette marge permet normalement d'effectuer une partie plus ou moins longue du parcours en vitesse acquise et en pratique pour rattraper une perte de temps accidentelle on réduit l'importance de cette marche "courant coupé" ou "régulateur fermé". L'aptitude que possède un tracteur à rattraper une perte de temps ne dépend donc pas en fait du système de traction, mais de « l'élasticité » laissée à l'horaire. D'ailleurs, avec les moteurs à vitesse constante, la plupart des pertes de temps accidentelles que subissent les trains remorqués par tracteurs à vapeur ou électriques à caractéristique série et dues à des vents contraires ou à des surcharges exceptionnelles, ne peuvent se produire du fait même de la constance de la vitesse, avec les tracteurs triphasés.

Parlerons-nous du gain de temps que pourrait procurer en apparence par suite d'une augmentation de vitesse la suppression de la récupération à la descente des pentes, alors que la récupération permet précisément de descendre de fortes pentes à une vitesse que l'on jugerait imprudent d'atteindre avec des freins mécaniques seuls ? (A Giovi la descente des pentes de 35 ‰ s'effectue à 45 kmh. avec récupération ; sans récupération, la vitesse prescrite est environ moitié).

Le système à courant triphasé permet, en outre, grâce à l'emploi sur les locomotives de rhéostats liquides à réglage automatique et continu, de démarrer réellement à couple constant, tandis qu'avec les tracteurs à courant continu ordinaires où le démarrage s'effectue en série et en parallèle par variation discontinue de la résistance de réglage, le courant oscille entre deux valeurs de l'intensité qui diffèrent l'une de l'autre de 50 à 20 % suivant le nombre de crans de marche du contrôleur. L'effort moteur par essieu varie de 3.500 à 2.500 kg. pour un effort moyen d'environ 3.000 kg. par exemple. Ces variations sont du même ordre de grandeur que celles qui se produisent dans les machines à vapeur à chaque tour du fait de la transformation du mouvement alternatif en mouvement circulaire, et elles ont le même effet défavorable au point de vue de l'utilisation de l'adhérence (1). Les locomotives triphasées de la série 0-50 de l'Etat Italien qui démarrent à couple pratiquement constant ont pu donner couramment, sans sabler, des efforts à la jante correspondant à un coefficient d'adhérence de 20 à 25 % ; sur la pente de Giovi de 35 ‰ un train d'un poids total de 500 tonnes comprenant une locomotive en tête et une en queue, a atteint sans difficulté au démarrage une vitesse de 45 kmh. en 200 secondes (accélération 6,25 cm. par seconde-seconde). L'effort moteur développé dans ces

pour compenser cette infériorité des moteurs série, que l'on commence à utiliser un peu partout le shuntage des inducteurs pour la marche en vitesse.

Dans le cas des services de Métropolitain ou de petite banlieue, où les parcours moyens entre stations varient de 500 à 1.500 m., les tracteurs fonctionnent presque uniquement comme démarreurs, et les moteurs série employés sont parfaitement adaptés à ce service ; mais ce type de moteurs commence à montrer nettement son infériorité au point de vue de l'observation des horaires, dès que le trajet moyen a une longueur supérieure à 1.500 m. La différence entre les moteurs à caractéristique série et shunt devient tout à fait apparente, dans des cas analogues à ceux de Milan-Gallarate et de la Valteline, où la longueur de parcours moyen est d'environ 4.500 mètres.

(1) Avec le courant monophasé où le démarrage s'effectue en général par augmentation du voltage d'alimentation par bonds de 50 volts environ, on obtient des effets analogues. Aussi, dans les essais comparatifs effectués en Allemagne entre locomotives à vapeur et électriques, à propos de l'électrification de la Ceinture de Berlin, n'a-t-on trouvé aucune supériorité de ces dernières au point de vue de l'utilisation du poids adhérent et de la réalisation de fortes accélérations.

conditions, en admettant une résistance au roulement moyenne de 4 kg. par tonne pour l'ensemble du train est environ 12.000 kg. par tracteur de 60 tonnes c'est-à-dire environ 20 % du poids adhérent.

Le système à courant triphasé est celui qui permet de construire les locomotives les plus légères pour une puissance donnée. Les machines de Giovi par exemple pèsent 60 tonnes pour une puissance de 2.000 HP, soit 30 kg. par cheval, pendant que les locomotives à courant continu ou monophasé les plus légères pèsent au moins 40 kg. par HP (1). Cette légèreté est particulièrement appréciable dans le cas de lignes à fortes pentes où, le poids remorqué étant proportionnel au poids adhérent du tracteur on a intérêt à utiliser des tracteurs à adhérence totale et à puissance spécifique (par tonne de machine) maximum. C'est ainsi qu'à Giovi avec la traction triphasée on a pu réaliser des tracteurs de 60^T à 5 essieux couplés (12^T par essieu) alors qu'au Loetschberg le poids total d'environ 180 tonnes a dû être réparti sur 7 essieux dont 5 seulement sont moteurs (17^T par essieu).

Enfin, le système triphasé est le seul qui permette d'obtenir directement, sans aucune augmentation du poids des tracteurs et sans addition d'aucun appareil aux machines, le freinage électrique avec récupération d'énergie. La récupération procure une économie d'ailleurs assez faible en pratique courante sur la consommation totale d'énergie (2), mais elle permet d'une part de réduire la puissance maxima demandée au réseau aux heures de forte charge ou plusieurs trains sont en marche, les uns descendant, les autres montant, et d'autre part de diminuer l'usure mécanique des voies et des appareils de freinage. C'est ainsi qu'au Giovi où les rails des voies descendantes qui étaient usés et devaient être remplacés après 15 ou 18 mois de service avec la traction à vapeur, ont repris une durée normale d'existence depuis que la traction électrique avec freinage électrique par récupération est utilisée en service courant. Nous avons déjà indiqué plus haut que ce système de traction permet aussi d'augmenter la vitesse à la descente des longues pentes à très forte déclivité.

II. — PRODUCTION DE L'ÉNERGIE.

Premier Etablissement. — Systèmes de traction. — Les chemins de fer italiens ont commencé par produire eux-mêmes l'énergie nécessaire à la traction dans des usines génératrices de puissance relativement faible ; par exemple pour la ligne de Milan à Gallarate, l'usine thermique de Tornavento a une puissance de 2.250 H.P. (3 unités de 750 kw) ; pour les lignes de la Valteline, l'usine hydraulique de Morbegno 8.000 H.P. (4 unités de 2.000 H.P.) et pour les lignes de Giovi, l'usine de la Chapella 10.000 H.P. (2 unités de 5.000 kw) ; mais naturellement, en Italie comme en France, la tendance semble être d'emprunter l'énergie nécessaire à la traction des trains aux grandes centrales hydrauliques de la région en

(1) Les nouvelles locomotives à courant continu, de la ligne Milan-Varèse, pèsent 75 tonnes et ont une puissance de 1.800 HP ; $\frac{75.000}{1.800} = 41,5$ kgs ; les locomotives monophasées du chemin de fer du Loetschberg pèsent 105 tonnes pour une puissance d'environ 2.500 HP ; $\frac{105.000}{2.500} = 42$ kgs.

(2) Sur la ligne de Giovi, qui a une pente moyenne de 27 %, la dépense réelle d'énergie, en employant en service courant la récupération, ressort à 75,3 wh par T. K. remorquée. Les essais effectués pendant plusieurs jours en réalisant un service identique sans usage de la récupération, ont montré que la consommation serait, dans ce cas, d'environ 90 wh par TK remorquée.

transformant l'énergie directement fabriquée par ces usines sous forme de courants triphasés à haute tension, 50 périodes, dans des sous-stations munies de commutatrices ou de groupes moteurs-alternateurs.

III. — SOUS-STATIONS.

Les sous-stations telles qu'elles sont construites actuellement pour les chemins de fer de l'État Italien, ont un double but : elles produisent d'abord l'énergie directement utilisable dans les lignes de contact, et de plus elles régularisent la charge des stations centrales. Mais alors que dans les premières installations réalisées, l'amortissement des variations brusques de voltage était obtenu au moyen de batteries d'accumulateurs et de survolteurs-dévolteurs, dans les nouvelles installations on a appliqué à la traction les dispositifs de tamponnement (groupes Ilgner, réglage de l'excitation système Léonard) qui ont été employés avec succès dans les installations métallurgiques, laminoirs, machines d'extraction, etc... Qu'il s'agisse de produire du courant continu ou du courant triphasé, le principe est le même ; on accumule de l'énergie dans un volant très lourd tournant à très grande vitesse et au moment d'un appel d'énergie sur le réseau, on libère l'énergie cinétique du volant en laissant tomber sa vitesse de rotation. De très grandes puissances peuvent être fournies pendant un temps relativement court. C'est ainsi qu'avec des volants de 3^m,60 de diamètre pesant 50 tonnes, et tournant à la vitesse de 500 tours, il est possible d'obtenir par variation de vitesse d'environ 20 %, une puissance utile d'environ 1.000 H.P. pendant une minute.

Dans les nouvelles sous-stations à courant continu de la ligne de Milan à Gallarate, se trouvent des commutatrices à 50 périodes et des transformateurs statiques transformant le courant triphasé à 50 périodes, 45.000 volts, en courant continu à 650 v. En parallèle avec ces commutatrices sont connectées des dynamos à courant continu 650 volts accouplées directement à un des volants précités et fonctionnant tantôt comme motrices, tantôt comme génératrices. Un régulateur automatique agissant sur l'excitation de la machine permet à celle-ci d'amener le volant à sa vitesse de régime quand il n'y a pas de demande de courant en ligne, et d'emprunter au volant une partie de son énergie en faisant baisser de 15 à 20 % sa vitesse de rotation en débitant 800 à 1.000 kvs sur le réseau quand il y a une forte demande de courant en ligne.

Au Mont-Cenis, dans la sous-station triphasée de Bardonnèche, l'énergie électrique reçue de la station centrale de Chiomonte sous forme de courant triphasé à 30.000 volts, 50 périodes est transformée en courant triphasé à 16 périodes $\frac{2}{3}$, 3.300 volts, au moyen de 3 groupes de 2.000 kw formés chacun d'un alternateur, d'un moteur asynchrone avec son volant et d'un moteur triphasé à collecteur. Le moteur triphasé à collecteur qui est connecté en cascade avec le rotor du moteur asynchrone principal, suivant le dispositif Scherbius, permet d'obtenir sans perte d'énergie trop considérable un glissement de 15 à 20 %. L'effet tampon des volants est aussi bon que celui produit par les batteries d'accumulateurs, mais le fonctionnement est, paraît-il, beaucoup plus régulier et les frais d'entretien beaucoup moindres.

Il y a lieu de remarquer que si l'emploi de volants permet d'accumuler des quantités d'énergie importantes utilisables pour la régularisation de la charge, il ne permet pas, comme les batteries d'accumulateurs électriques, de constituer des réservoirs d'énergie toujours disponibles et prêts à fournir la puissance nécessaire en cas d'interruption du courant d'alimentation à haute tension.

La continuité du service paraît cependant largement assurée grâce à l'installation de deux lignes d'alimentation distinctes et au raccordement à des centrales de très grande puissance dont les interruptions totales de service sont en pratique presque impossibles.

IV. — LIGNES DE TRANSPORT DE FORCE. LIGNES DE CONTACT.

Les lignes de contact ont été généralement considérées comme le point faible de la traction triphasée en raison des difficultés insurmontables de construction qu'elles étaient censées présenter ; mais quand on a visité les installations de gares compliquées, comme celles de Brigue, de Bardonnèche et surtout comme celles des gares de marchandises de Gênes à Ronco (lignes de « Giovi » et de la « Succursale ») et que l'on a pu constater la régularité et l'importance du service assuré, on se rend compte que toutes les difficultés ont été résolues d'une façon complète et que l'alimentation ininterrompue des tracteurs est parfaitement réalisable et réalisée.

En voie courante si la ligne est à deux voies, chacune d'elles possède une ligne d'alimentation complètement indépendante à deux conducteurs et les sous-stations sont reliées entre elles et à la centrale par deux lignes de transport de force à haute tension, également indépendantes l'une de l'autre.

Dans les gares toutes les lignes de contact sont au contraire reliées les unes aux autres et le courant est coupé ou lancé en même temps dans l'ensemble des voies.

Les poteaux portant chaque ligne triphasée à haute tension sont placés de chaque côté de la plateforme et une de ces séries de poteaux ou les deux, suivant que la ligne est à simple ou double voie, sert également à supporter les lignes de contact (1).

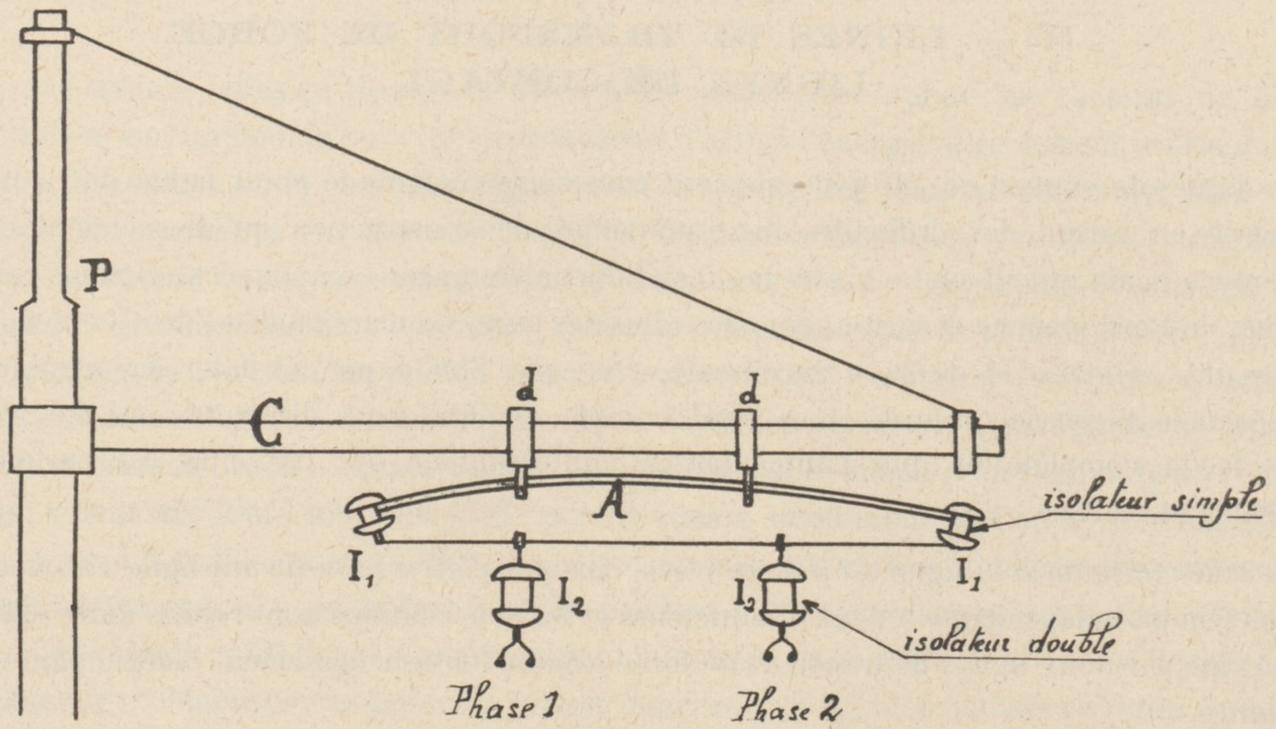
Pour la traversée des tunnels on sépare complètement les 2 canalisations haute et basse tension, l'expérience directe ayant montré qu'il était pratiquement impossible de maintenir l'isolement des lignes nues à haute tension quand l'air des tunnels est ionisé par les gaz et vapeurs électrisés, s'échappant des cheminées des locomotives à vapeur ordinaires.

L'appareillage des lignes d'alimentation établi par les chemins de fer de l'État Italien avec la collaboration des principales Sociétés de constructions italiennes, et en particulier avec la fabrique d'isolateurs Ginori paraît excessivement bien étudié et les essais systématiques auxquels sont soumis les différentes pièces qui le composent expliquent le succès complet obtenu en service courant sur les différentes lignes en exploitation. Nous étudierons sommairement les dispositions adoptées pour l'équipement des lignes de Gênes et du Mont-Cenis, dispositions que l'administration des chemins de fer de l'État compte rendre « normales » en même temps que celles de l'équipement ordinaire des voies de roulement. Les figures schématiques ci-contre représentent les différents types de suspension adoptés par les chemins de fer de l'État Italien pour la suspension aérienne en voie courante (Fig. 2) et pour la suspension en souterrain (Fig. 3). L'emploi de la suspension caténaire a été écarté après essai comme compliqué et on s'est contenté du dispositif normal des tramways amélioré seulement au point de vue de la robustesse et de

(1) Les poteaux supports des lignes à haute tension sont en palier et alignement droit, distants de 100 m., pendant que les poteaux supports de ligne de contact ont un écartement de 33 m. environ. Les files de poteaux comportent donc 1 poteau long (10 m.), pour deux poteaux courts (8 m.).

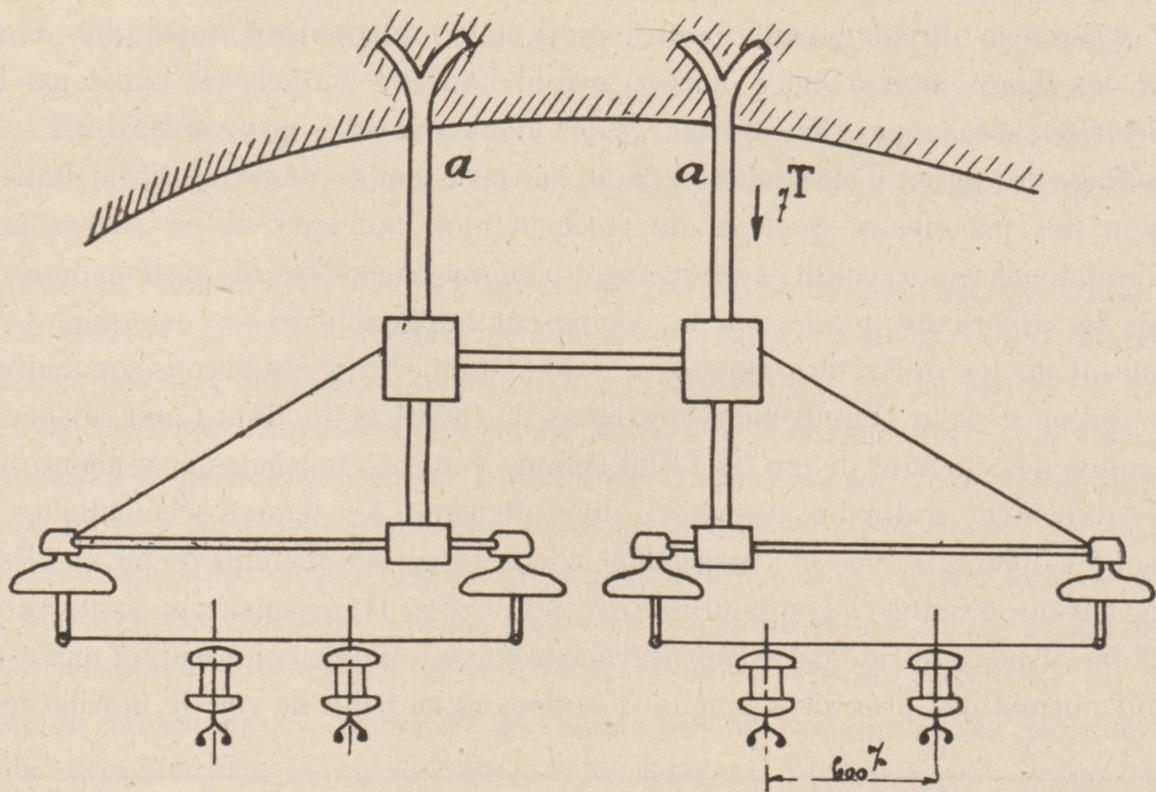
l'isolement, et il paraît douteux d'après les résultats obtenus que l'on revienne en Italie à la suspension caténaire, même pour les lignes à grande vitesse projetées.

Fig. 2.



Les conducteurs d'alimentation sont constitués chacun par deux fils de cuivre de section circulaire, rainurés, d'un diamètre d'environ 8^{mm}. Ces conducteurs sont suspendus au moyen

Fig. 3.



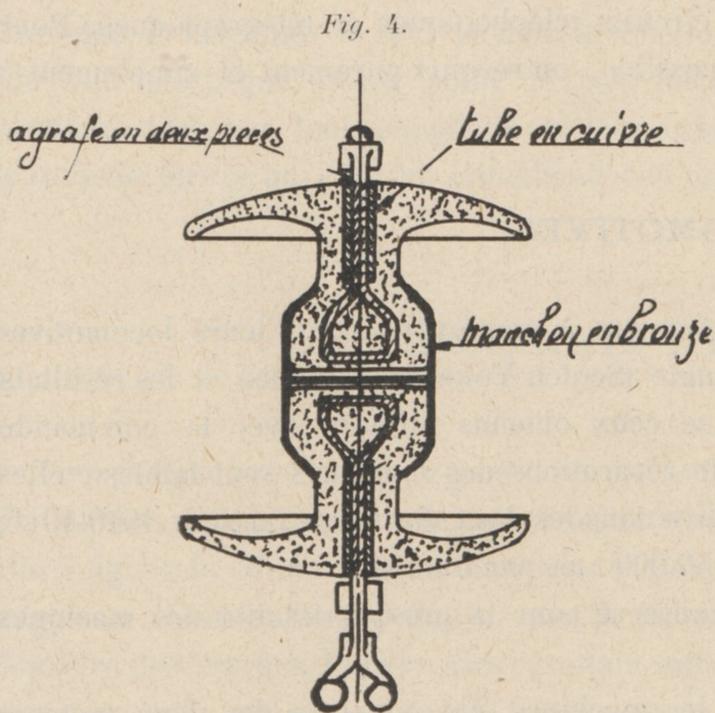
d'isolateurs doubles I₂ (formés de deux isolateurs en série) à un câble d'acier tendu entre deux isolateurs simples I₁. Dans ces conditions, l'isolement est assuré : entre phases par 4 isolateurs

en série, entre phases et terre par 3 isolateurs en série. La rigidité diélectrique de l'ensemble mesurée sous une pluie abondante a été éprouvée sous une tension minima de 44.000 volts, soit 13 fois la tension normale de service (3.300 v. environ).

En voie courante, la ligne de contact est montée (Fig. 2) sur des poteaux en acier étiré, système Mannesmann et l'ensemble de la suspension proprement dite est portée par une pièce A formée par un tube d'acier courbé suivant un cercle de 7 m. de rayon ; et fixée à la console C du poteau par deux étriers *d*.

En souterrain, la ligne est fixée à la voûte par deux barres de scellement dont la force portante a été éprouvée à 7.000 kg. Toutes les pièces composant la suspension peuvent se déplacer le long des barres de scellement afin de faciliter le réglage rapide de la ligne. Il y a lieu de noter que toutes les pièces métalliques employées dans l'équipement des lignes en souterrain sont en bronze spécial afin de leur assurer, sans entretien, une très longue durée.

Tous les isolateurs sont munis de dispositifs de garde tels qu'en cas de rupture de la porcelaine, la suspension mécanique subsiste. La Fig. 4 précise la disposition des isolateurs double



de suspension de ligne I_2 dans laquelle une agrafe, dont la base a un diamètre supérieur à celui du manchon en bronze enserrant le corps de l'isolateur, est enrobée dans la porcelaine. Si celle-ci vient à se rompre, l'agrafe vient directement buter contre le manchon et la ligne reste en place, légèrement dérégulée, mais encore isolée grâce à la multiplicité des isolateurs en série.

Des dispositions ingénieuses, dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici, étudiées en vue de faciliter le montage et l'entretien des lignes, ont permis de constituer tout un appareillage spécial aux chemins de fer dont la robustesse et la simplicité sont remarquables, ainsi qu'un outillage spécial monté sur wagons, permet-

tant d'effectuer rapidement et économiquement le montage et l'entretien des lignes à ciel ouvert et en souterrain.

Le train spécial de montage des lignes en souterrain comprend une voiture munie de moteurs à pétrole actionnant des dynamos et des compresseurs d'air, une voiture munie de perceuses à air comprimé, une voiture munie de treuils spéciaux pour la mise en place de la suspension, une voiture munie d'un treuil permettant de tendre les lignes à tension constante, une voiture avec échafaudage spécial pour les maçons, etc...

Grâce à ces dispositions, les dépenses de premier établissement des lignes de contact et de transport de force semblent ressortir seulement à 22.000 fr. par km. de voie simple, et les dépenses annuelles d'entretien correspondantes à 5 ou 600 francs.

Il n'apparaît donc pas que le système de la traction par courants triphasés soit plus coûteux au point de vue de la construction et de l'entretien des lignes, que les autres systèmes de traction. L'achat et la pose des supports représentant à peu près 80 % des frais totaux d'établissement de la ligne de contact, l'emploi de 2 fils de prise de courant au lieu de 1, n'entraîne pas

une majoration notable des dépenses. Le choix judicieux des types de pylônes ou de portiques ainsi que l'organisation méthodique du travail de montage sont, au point de vue économique, les facteurs principaux de la dépense. Au New York New Haven Hartford Railroad, par exemple, le prix global d'installation varie, suivant le type de ligne monophasée à suspension caténaire employée, de 50 à 70.000 fr. par km.

Il y aurait lieu de faire figurer dans les dépenses d'installation des lignes de contact, les frais accessoires entraînés par le déplacement ou la transformation des lignes télégraphiques et téléphoniques voisines dont le fonctionnement est troublé par les courants de traction. Mais il est impossible de donner, pour le moment, une évaluation de la dépense correspondante.

Les effets perturbateurs causés dans les circuits des télégraphes et des téléphones par l'induction électro-magnétique, l'induction électrostatique et les courants vagabonds sont très importants et quelquefois même dangereux, et aucun dispositif simple autre que l'emploi de conducteurs de retour isolés n'a donné *en pratique* de résultats satisfaisants. Les côtés de la plateforme étant en général entièrement occupés par les supports de ligne de contact et de transport de force, les chemins de fer de l'Etat italien se sont décidés à effectuer le transfert, le plus loin possible des lignes de traction, des circuits téléphoniques et télégraphiques. Pour les passages difficiles où ce transfert est impossible, on recourt purement et simplement à l'emploi de câbles souterrains.

V. — LOCOMOTIVES.

Les chemins de fer italiens ont été les premiers à employer, pour leurs locomotives puissantes, la transmission par bielles et triangle (Scotch Yoke des Anglais) et les résultats obtenus sont au moins aussi satisfaisants que ceux obtenus ailleurs avec la commande par engrenages. Les dépenses d'entretien et de réparations des machines sont faibles ; elles n'ont pas dépassé 5.300 frs environ par locomotive dans les deux derniers exercices 1910-1911, 1911-1912, pour un parcours moyen annuel de 50.000 kms par tracteur.

Ce système de commande des essieux a été conservé pour la presque totalité des machines en commande (1).

Le réglage de la vitesse se fait, dans toutes les machines, par couplage des deux moteurs

(1) Nomenclature des locomotives triphasées des chemins de fer de l'Etat en service ou en commande en juillet 1913 :

NUMÉRO DE SÉRIE	TYPE DE LA LOCOMOTIVE	PUISSANCE UNIHORAIRE	NOMBRE D'UNITÉS	POIDS DES MACHINES
0.34	⊖—⊕—⊕—⊕	600 HP.	2	60 T. environ
0.36	⊖—⊕—⊕—⊕—⊕	1.200 HP.	3	60 »
0.38	⊖—⊕—⊕—⊕—⊕	1.600 HP.	4	60 »
0.50	⊕—⊕—⊕—⊕—⊕	2.000 HP.	110	60 »
0.30	⊖—⊕—⊕—⊕—⊕	2.600 HP.	16	77 »
0.33	⊖—⊕—⊕—⊕—⊕—⊕	2.600 HP.	18	84 »
0.32	⊖—⊕—⊕—⊕—⊕	1.800 HP.	5 158	75 »

Soit au total 158 locomotives ayant une puissance globale de 22.600 HP. pour un poids total d'environ 12.300 T., soit 38 kgs par HP. en moyenne.

1 et 2 de chaque machine, soit en cascade, soit en parallèle, et par variation de la valeur ohmique de la résistance insérée dans le circuit du rotor du N° 2 seul dans le montage série, et des moteurs 1 et 2 dans le montage parallèle; des artifices divers, dans la description desquels nous ne pouvons entrer ici, ont été employés pour combiner les enroulements du stator du moteur N° 2, de manière à permettre de l'alimenter soit à basse tension par le courant engendré par le rotor du moteur N° 1, soit à haute tension par le courant du réseau. Ce sont les dispositions des enroulements électriques des moteurs qui constituent les principales différences entre les machines (1), car dans toutes, on utilise un rhéostat liquide à commande pneumatique automatique et continu du système de Mr de Kando.

Le type le plus remarquable de ces machines est celui de la série 0.50 des locomotives de 2.000 HP à 5 essieux couplés à adhérence totale, actuellement en service sur les lignes de Gênes et du Mont-Cenis.

Une description détaillée de ces machines ayant été donnée dans la *Revue Générale des Chemins de Fer*, par M. Vérole, dans le N° de février 1912, nous n'y reviendrons pas ici; nous dirons seulement qu'à la fin de 1911, les chemins de fer de l'Etat italien disposeront d'une centaine de machines de ce type dont le fonctionnement est irréprochable, aussi bien au point de vue électrique qu'au point de vue mécanique. Ces machines sont particulièrement remarquables par leur simplicité et leur robustesse, malgré leur extrême légèreté et elles paraissent être ce qui a été fait actuellement de mieux comme locomotive électrique de montagne.

RÉSULTATS D'EXPLOITATION

Pour compléter ce rapide exposé des électrifications réalisées ou en cours d'exécution en Italie, nous donnerons les résultats d'exploitation pendant les exercices 1910-1911 et 1911-1912 des 2 lignes de Milan-Varèse, et de la Valteline et des Giovi, tels qu'ils figurent dans les rapports adressés chaque année, par la direction des chemins de fer de l'Etat italien au Ministre des Travaux Publics. Ces résultats sont tout à fait comparables à ceux obtenus par la Compagnie du chemin de fer d'Orléans sur la ligne de Paris à Juvisy, où les dépenses de traction électrique par 100 TK, ressortent, à 0 fr. 42 environ pour la même année 1911.

(1) Les locomotives électriques du groupe 038, construites en 1906 pour la Valteline, comprennent deux moteurs différents, l'un à 8 pôles, de 1.500 HP, l'autre à 12 pôles, de 1.200 HP.

Avec ces moteurs différents, on pouvait obtenir 3 vitesses de marche économiques, 25 Km/h, 42 Km/h, 64 Km/h, en couplant d'abord les 2 moteurs en tandem, puis en marchant avec un seul moteur, celui à 12 pôles pour la vitesse moyenne, celui à 6 pôles pour la grande vitesse.

Malheureusement, le système de commande par bielles n'a pas permis de marcher *régulièrement* avec un seul moteur, ces machines ont été transformées et les deux moteurs rendus identiques, comme ceux des machines du groupe 036.

DÉPENSES D'EXPLOITATION.

TONNES KILOMÉTRIQUES		ÉNERGIE DÉPENSÉE PAR T. K.		DÉPENSES PAR 100 T. K.					
RÉELLES	VIRTUELLES	RÉELLE	VIRTUELLE (1)	EXPLOITATION		INTÉRÊT ET AMORTISSEMENT		TOTAL	
				Réelles	Virtuelles (1)	Réelles	Virtuelles (1)	Réelles	Virtuelles (1)
VALTELINE 1900-1911.									
119.962.910	145.077.916	51	42,5	0,368	0,304	0,266	0,22	0,634	0,524
MILAN-VARÈSE 1910-1911.									
137.904.052	167.097.139	46	39	0,689	0,566	0,470	0,388	1,159	0,954
VALTELINE 1911-1912 (Intérêt 3,5 %).									
118.157.933	142.839.370	42,1	34,8	0,388	0,323	0,250	0,207	0,638	0,53
VARÈSE.									
140.049.592	171.336.833	41,2	34,6	0,674	0,55	0,397	0,333	1,071	0,883
GIOVI.									
107.483.130	374.760.366	59	17	1,039	0,296	0,490	0,145	1,529	0,441

(1) Les chemins de fer de l'Etat Italien ont introduit dans leur comptabilité les notions de longueur virtuelle et de tonne kilométrique virtuelle en vue de préciser les conditions d'exploitation des différentes lignes. Pour chaque ligne, il serait désirable de rapporter les dépenses matières et main d'œuvre au travail mécanique réellement absorbé pour la remorque des trains ; mais comme ce travail dépend de facteurs très nombreux, les chemins de fer de l'Etat Italien se contentent en première approximation d'admettre que la résistance due à l'air et au roulement est indépendante de la vitesse et égale à 5 kgs par tonne.

Pour chaque ligne, il est alors possible de définir une longueur virtuelle telle que le travail effectué pour transporter une tonne de train à une distance l' soit équivalente au travail réel de transport de cette même tonne sur la ligne réelle de longueur l . Les longueurs virtuelles et réelles d'une ligne sont donc liées par la relation suivante :

$$l' = \frac{51 + \varepsilon p \lambda + \frac{\varepsilon 800 \lambda'}{R}}{5} \quad \text{dans un sens} \quad p: \text{ pente en mm. par mètre sur une longueur } \lambda$$

$$l' = \frac{51 - \varepsilon p \lambda + \frac{\varepsilon 800 \lambda'}{R}}{5} \quad \text{en sens inverse} \quad R: \text{ rayon d'une courbe de développement } \lambda'$$

Pour l'ensemble du réseau italien, le nombre de T.K. virtuelles est de 28,8 % supérieur au nombre de tonnes réelles.