

## L'électrification de la ligne de Modane

par Marcel JAPIOT, Ingénieur en chef adjoint du Matériel de la Traction des Chemins de fer P.-L.-M.

*Avant de vous entretenir de ces travaux, il me paraît indispensable d'aller au devant d'une question que vous ne manqueriez certainement pas de me poser, si je ne prenais l'initiative de la soulever moi-même.*

*Pourquoi, me direz-vous, la Compagnie P.-L.-M s'est-elle bornée jusqu'ici à entreprendre l'électrification de la ligne de Modane, alors que les Compagnies du Midi et d'Orléans ont déjà électrisé de vastes portions de leurs réseaux ?*

*Ce qui peut vous sembler une anomalie s'explique aisément par diverses considérations, les unes d'ordre technique, les autres d'ordre économique*

Au point de vue technique, l'électrification des Chemins de fer du Midi était liée à l'aménagement des ressources hydrauliques des Pyrénées, et à l'installation d'un vaste réseau à haute tension pour l'interconnexion des usines et le transport de l'énergie à grande distance. De même, l'adoption de la traction électrique sur les lignes de la Compagnie d'Orléans était subordonnée à la construction de puissantes usines hydroélectriques dans le Massif central, et à leur liaison avec la région parisienne par des artères à très haute tension. Dans un cas comme dans l'autre, l'emploi de l'énergie électrique pour la traction ne constituait donc que l'un des aspects d'un problème beaucoup plus vaste, visant l'utilisation rationnelle d'importantes ressources hydrauliques encore inexploitées.

Aucun problème de ce genre ne se posait pour la Compagnie P.-L.-M. : l'aménagement des chutes d'eau des Alpes avait été entrepris depuis fort longtemps, et se développait rapidement tandis que de nombreuses artères à haute tension transportaient déjà l'énergie à grande distance, jusqu'aux principaux centres de consommation. Au lieu d'avoir à créer usines et lignes de transport, comme le Midi dans les Pyrénées, ou l'Orléans dans le Massif central, la Compagnie P.-L.-M. avait le privilège de se trouver en présence de puissantes entreprises de production et de transport d'énergie, en plein essor ; aussi a-t-elle estimé que son rôle devait être de contribuer à leur développement et à leur prospérité en s'adressant à elles pour se procurer l'énergie nécessaire à la traction électrique, plutôt que de la produire elle-même.

Le Midi et l'Orléans, conduits à s'instituer producteurs et transporteurs d'énergie, se trouvaient dans l'obligation de réaliser d'emblée une tranche très importante de leur programme d'électrification, afin d'assurer dès le début à leurs usines et à leurs artères à haute tension une utilisation satisfaisante. La Compagnie P.-L.-M., au contraire, décidée à ne faire appel qu'aux disponibilités des grandes sociétés d'électricité de la région, conservait la liberté de procéder par étapes beaucoup plus modestes, et d'attendre, pour électriser la ligne, le moment le plus opportun.

Cette faculté d'ajournement s'est révélée pour nous très précieuse, lorsque nous eûmes à faire face, dans ces dernières années, à des difficultés économiques et financières exigeant une compression énergique du budget des dépenses. De 1924 à 1926 notamment, il fallut différer impitoyablement toute dépense qui n'était pas strictement indispensable à la sécurité de l'exploitation et

à l'acheminement du trafic. Ce dernier s'étant brusquement développé avec une ampleur anormale, nécessita des dépenses considérables pour l'augmentation du débit des lignes et l'agrandissement des gares et des dépôts. Il devint dès lors impossible de trouver, dans des budgets sévèrement limités, les crédits nécessaires aux travaux d'électrification, qu'on dut par suite ralentir, et même suspendre complètement.

Sur les réseaux voisins, la situation était quelque peu différente. Le trafic subissait une progression bien moins rapide que sur le P.-L.-M., et n'imposait pas un effort financier aussi considérable pour l'agrandissement des gares, de sorte que les budgets présentaient quelques disponibilités pour les travaux d'électrification. Ceux-ci n'auraient pu être d'ailleurs suspendus sans risquer de laisser trop longtemps improductives les dépenses fort importantes déjà engagées dans ce but.

Tels sont les motifs, d'ordre à la fois technique et économique, pour lesquels la traction électrique n'a pu prendre, sur notre réseau, une extension aussi rapide que sur ceux du Midi et d'Orléans.

C'est en 1921 que la Compagnie P.-L.-M. décida d'électrifier la ligne de Modane, et les premières commandes pour la construction des locomotives électriques et l'installation des sous-stations furent lancées en 1922 et 1923. On avait entrepris en même temps l'équipement des voies entre Chambéry et St-Pierre-d'Albigny, et dès le printemps de 1925, on effectuait sur cette section les premiers essais de locomotives électriques.

Les travaux suspendus à cette époque, en raison de la crise économique à laquelle j'ai fait allusion, ne purent être repris au delà de St-Pierre-d'Albigny qu'en 1927. Mais diverses difficultés et notamment les intempéries et les rigueurs de l'hiver vinrent entraver les efforts de nos entrepreneurs, et retarder les travaux, de sorte que les locomotives électriques n'ont pu parvenir jusqu'à St-Jean-de-Maurienne qu'au printemps de cette année. Elles remplacent progressivement les locomotives à vapeur sur la section de Chambéry à St-Jean-de-Maurienne, et, sauf difficultés imprévues, cette substitution sera complètement achevée dans le courant de l'été.

Au delà de St-Jean, les travaux sont poussés activement, et, si les rigueurs du prochain hiver ne se manifestent pas trop prématurément, l'équipement de la ligne jusqu'à Modane pourrait être terminé avant la fin de l'année. De toute façon, c'est seulement en 1930 que le service complet de la ligne de Chambéry à

Modane pourra bénéficier des avantages de la traction électrique.

L'énergie nécessaire à la traction électrique sur la ligne de Modane nous est fournie par la Société d'électro-chimie, d'électro-metallurgie et des Acieries électriques d'Ugine, dont vous connaissez tous les belles installations et notamment l'audacieux aménagement du lac de la Girotte

La puissance des alternateurs installés dans les usines de cette société dépasse 70 000 kilowatts, et sa capacité de production atteint 250 millions de kilowatt-heures par an. En regard de ces chiffres imposants, les besoins de la ligne de Modane semblent bien modestes, car la consommation annuelle ne sera guère que d'une vingtaine de millions de kilowatt-heures au début, avec des pointes de puissance de l'ordre de 10 000 kilowatts.

Ce rapprochement permet de saisir avec quelle facilité notre fournisseur d'énergie couvrira nos besoins

Il fait également ressortir l'avantage qu'une entreprise de traction électrique peut trouver, au point de vue de la sécurité de son alimentation, à n'être qu'un gros client d'un puissant producteur d'énergie, au lieu d'aménager des usines pour ses propres besoins. Il est clair, en effet, qu'on n'aurait pu donner, à une usine spécialisée à la ligne de Modane, une réserve de puissance comparable à celle que présentent les nombreuses usines génératrices de notre fournisseur, réparties en outre dans plusieurs bassins différents.

D'autre part, tant à cause de l'importance des machines à tenir en réserve pour faire face à des avaries accidentelles, qu'en raison des fluctuations considérables à prévoir dans la demande d'énergie sur la ligne de Modane, une usine spécialisée n'aurait eu fatalement qu'une utilisation peu satisfaisante. En branchant, au contraire, les lignes de traction sur un important réseau alimentant des installations de nature très variée, on profite d'un facteur bien connu de toutes les sociétés de distribution d'électricité : c'est la diversité de la clientèle, qui vient atténuer dans l'ensemble les irrégularités des demandes de chaque consommateur, pour assurer aux usines productrices une marche avantageuse.

Les usines de la Société d'électro-chimie sont reliées entre elles par un réseau de lignes triphasées à 42 000 volts, aboutissant au poste de Venthon, où se fait notamment la jonction avec la ligne à 120.000 volts de la STEDA.

C'est également de ce poste de Venthon que partent les lignes à haute tension de la Compagnie P.-L.-M. pour lesquelles nous avons conservé la tension de 42 000 volts adoptée antérieurement par notre fournisseur d'énergie.

Nos artères à 42.000 volts suivent d'abord la vallée de l'Isère, pour rejoindre la ligne de Modane près de la gare de St-Pierre-d'Albigny, et se diriger ensuite d'un côté vers Chambéry, et de l'autre vers Modane.

Toutes ces artères comportent six câbles d'aluminium constituant deux lignes triphasées indépendantes. Normalement, les deux lignes de chaque artère fonctionnent en parallèle, mais les sections des câbles sont suffisantes pour permettre de travailler avec une ligne seulement en cas d'avarie à la seconde, sans que les chutes de tension atteignent des valeurs excessives.

Par raison d'économie, les six câbles d'une artère double sont portés par les mêmes pylônes, mais l'écartement des isolateurs est tel qu'on puisse travailler sans danger sur une ligne en maintenant l'autre sous tension

Pour la tension de 42.000 volts, on a pu se contenter d'isola-

teurs à tige, sauf sur les pylônes d'ancrage et pour certaines portées spéciales, où l'on a adopté des isolateurs suspendus.

L'énergie fournie sous forme de courants triphasés à 42.000 volts est transformée en courant continu à 1 500 volts dans huit sous-stations réparties le long de la ligne, tous les vingt kilomètres environ, sauf sur la section de St-Jean à Modane, où l'écartement des sous-stations a dû être ramené à dix kilomètres, en raison de la présence de rampes atteignant jusqu'à trente millimètres par mètre.

La sous-station de St-Pierre-d'Albigny est d'un type spécial, parce qu'elle est chargée de régler le facteur de puissance de toute l'installation. Dans ce but, la conversion du courant alternatif en courant continu s'effectue au moyen de groupes moteurs-générateurs, permettant de régler de façon indépendante les régimes de fonctionnement du côté alternatif et du côté continu. Grâce aux moteurs synchrones de ces groupes, nous pouvons produire l'énergie réactive nécessaire pour maintenir, au point de livraison de l'énergie par notre fournisseur, un facteur de puissance aussi voisin que possible de l'unité, quel que soit le régime de marche de nos autres sous-stations.

Pour ces dernières, où l'on n'a plus, dès lors, à se préoccuper d'un réglage quelconque du côté alternatif, on a pu se contenter de commutatrices, plus simples et moins coûteuses que des groupes moteurs-générateurs, et d'un rendement bien plus élevé.

Ces commutatrices produisent du courant continu à 750 volts, seulement, et sont groupées par deux en série pour alimenter à 1.500 volts les lignes de traction. La puissance nominale de chaque machine est de 1 000 kilowatts, avec possibilité de fournir 1.500 kilowatts pendant deux heures, et jusqu'à 3.000 kilowatts pour des pointes de courte durée : cette faculté de surcharge est indispensable pour permettre aux sous-stations de répondre aisément aux besoins très variables de la traction électrique. Ces machines sont en outre établies pour pouvoir fonctionner en récupération sous une charge égale à leur puissance nominale, soit 1.000 kilowatts.

Les sous-stations sont construites pour recevoir trois groupes de deux commutatrices, soit au total 6.000 kilowatts de puissance nominale. Mais pour l'instant nous avons pu nous contenter, dans la plupart des sous-stations, de deux groupes seulement, soit 4.000 kilowatts.

Il semblerait a priori qu'il eût été plus simple d'employer des commutatrices à 1.500 volts et non à 750 volts, ce qui eût évité de placer deux machines en série dans chaque groupe. Mais la construction des commutatrices de traction à 1.500 volts, alimentées en courant triphasé à 50 périodes, est assez délicate, surtout pour des machines appelées à subir, comme nous l'avons dit, des surcharges fréquentes et considérables, et devant en outre supporter impunément les violents courts-circuits qui constituent l'apanage peu enviable, mais inéluctable, de la traction électrique.

On peut dire qu'actuellement, les constructeurs n'ont encore réussi à fabriquer couramment des machines de ce genre que pour des puissances nominales ne dépassant guère 750 kilowatts. En admettant même qu'on ait pu atteindre 1.000 kilowatts, il eût fallu installer, dans nos sous-stations, le même nombre de commutatrices dans les deux hypothèses, qu'elles fussent à 1.500 volts ou à 750 volts. Mais le nombre des tableaux et des jeux d'appareillage eût été doublé, car il suffit d'un seul tableau et d'un seul appareillage pour un groupe de deux commutatrices à 750 volts en série.

En résumé, la solution que nous avons adoptée était donc, dans l'espèce, la plus simple et de beaucoup la moins coûteuse. Mais il faudrait bien se garder de généraliser cette conclusion.

Le problème se fût posé, en effet, de façon toute différente, si nous avions dû être alimentés, comme dans la région du Sud-Est, par exemple, en courants triphasés à vingt-cinq périodes au lieu de cinquante, ce qui eût rendu possible la construction de commutatrices à 1.500 volts de grande puissance. Il est permis d'espérer d'autre part que, même pour la fréquence de 50, les progrès de la technique permettront plus tard de dépasser largement la limite de puissance dont il faut se contenter actuellement pour les commutatrices à 1.500 volts.

Il est à craindre toutefois que ces machines n'aient dans l'avenir que des débouchés assez restreints, en raison du développement de la fabrication des redresseurs à vapeur de mercure, dont les multiples avantages vous sont bien connus. Leur seul inconvénient est de ne pas se prêter à la récupération, mais il est largement compensé, dans la plupart des cas, par la supériorité de leur rendement, surtout à faible charge. Ce n'est donc que dans des conditions assez spéciales, par exemple sur les lignes à très longues déclivités, que le bilan final pourra être favorable aux commutatrices.

Toutes nos sous-stations constituent, pour les lignes doubles à haute tension, des postes de sectionnement et de couplage en parallèle, sur un double jeu de barres omnibus.

Pour écouler à la terre les charges statiques qui peuvent prendre naissance sur les lignes à haute tension par suite de phénomènes atmosphériques, on a branché, sur chaque barre omnibus à 42.000 volts, une bobine de réactance à noyau de fer, immergée dans l'huile, et dont l'extrémité est à la terre. Grâce à leur faible résistance, ces bobines peuvent laisser passer un courant continu suffisamment important pour écouler rapidement à la terre une charge statique accidentelle, tandis que leur forte réactance rend absolument insignifiantes les fuites en courant alternatif à 50 périodes.

Quant à la protection contre les surtensions présentant le caractère d'ondes à front raide ou à haute fréquence, et provenant soit de décharges atmosphériques, soit de mise accidentelle d'un câble à la terre, soit même simplement de l'ouverture brusque d'un disjoncteur sous charge, elle est assurée, dans la plupart des sous-stations, par des amortisseurs d'ondes. Cet appareil est constitué par un condensateur branché entre deux bobines de self insérées sur la barre omnibus, la bobine placée du côté des lignes étant elle-même shuntée par une résistance. Toutefois, dans les sous-stations de St-Pierre-d'Albigny et de la Praz, ce dispositif est remplacé par des parafoudres à oxyde de plomb, installés sur les entrées et les départs des lignes à haute tension. Toutes ces lignes sont en outre munies de câbles de terre placés au sommet des pylônes.

Au point de vue des surintensités, la protection est réalisée, par un système très complet de relais divers, soit à action directe, soit à action différentielle, soit à retour d'énergie provoquant le déclenchement sélectif des disjoncteurs à 42 000 volts, de façon à isoler un tronçon de ligne défectueux sans interrompre l'alimentation des sous-stations par la ligne restée saine.

Du côté des circuits à courant continu, la protection contre les courts-circuits est assurée par des disjoncteurs extra-rapides, installés tant sur les départs à 1.500 volts que sur le pôle négatif de chaque groupe de commutatrices. A l'inverse des disjoncteurs de feeders, qui coupent directement le circuit, ceux des groupes de commutatrices se bornent à insérer dans le circuit une résistance pour limiter immédiatement le débit; la coupure est ensuite effectuée par un disjoncteur ordinaire, placé du côté positif. On réalise ainsi la coupure en deux temps, avec de moindres risques pour l'appareillage, et sans qu'il se produise de coup

de feu aux collecteurs des commutatrices, d'ailleurs protégés par des écrans spéciaux.

En fait, cette protection s'est toujours montrée entièrement efficace, même en cas de court-circuit franc, provoqué intentionnellement au droit de la sous-station, pour éprouver la valeur des appareils dans les conditions les plus dures.

Je me souviens notamment d'avoir fait exécuter cette expérience en présence de l'éminent spécialiste de l'électrification des Chemins de fer suisses, mon ami le docteur Hubor, qui manifestait son étonnement de me voir infliger un pareil traitement à des commutatrices dans le seul but de lui être agréable: il fut quelque peu déçu de constater que le court-circuit ne fut décelé que par le déclenchement du disjoncteur, alors qu'il avait eu l'espoir d'assister à un feu d'artifice impressionnant.

Avec le courant continu à 1.500 volts, on peut employer indifféremment la prise de courant sur ligne aérienne ou sur rail conducteur, dit « troisième rail ».

Au point de vue économique, la ligne aérienne est plus avantageuse pour l'électrification des lignes à trafic relativement peu important, pour lesquelles on peut se contenter de caténaires simples et légères. Mais sur les lignes à fort trafic, où il faut pouvoir capter à des vitesses très élevées des courants de très forte intensité, on est conduit à recourir à des caténaires plus compliquées et à les compléter par d'importants feeders pour obtenir la conductibilité totale requise. Les dépenses sont alors du même ordre que pour l'installation d'un rail conducteur.

Ce dernier présente d'ailleurs de précieux avantages, car la pose et l'entretien en sont beaucoup plus faciles que dans le cas des lignes aériennes, exigeant l'emploi d'échelles et d'échafaudages roulants. Les agents de la voie peuvent visiter et entretenir le rail conducteur au cours de leurs tournées de surveillance, comme ils le font pour les rails de roulement eux-mêmes. En cas d'accident, les avaries sont bien moins graves qu'avec les lignes aériennes, et les réparations nécessaires peuvent être exécutées bien plus rapidement. Toutes ces qualités sont particulièrement intéressantes pour l'électrification des lignes à fort trafic, où le passage de nombreux trains gêne les opérations d'entretien, et exige une remise en état aussi rapide que possible de tout organe avarié. Telles sont les considérations primordiales qui ont décidé la Compagnie P.-L.-M à faire l'essai du troisième rail sur la ligne de Modane, de préférence aux caténaires aériennes adoptées par le Midi et l'Orléans.

Mais ce type de conducteur présente, par contre, certains inconvénients que ne possèdent pas les lignes aériennes. Tout d'abord, il risque de constituer un obstacle dangereux pour la circulation du public dans les gares, et du personnel sur les voies. On peut y remédier efficacement en le protégeant sur toute sa longueur par une gaine en planches, qui ménage simplement une rainure pour le passage des frotteurs des locomotives: avec une protection de ce genre, convenablement étudiée, le risque de contact accidentel est pratiquement supprimé. En pleine voie, les rails conducteurs sont d'ailleurs installés systématiquement dans l'entre-voie, afin de faciliter la circulation des agents sur les côtés de la ligne. Mais cette disposition ne peut être réalisée uniformément dans les gares, où la présence d'aiguilles et de croisements oblige à installer certains tronçons du rail conducteur à l'extérieur des voies.

Au droit de ces appareils (aiguilles et croisements), le troisième rail doit forcément être interrompu sur une certaine longueur: les deux tronçons de conducteur situés de part et d'autre de la coupure sont alors reliés par un câble armé souterrain, pour rétablir la continuité du circuit à 1.500 volts.

Tant que la longueur de cette coupure reste inférieure à l'écartement des frotteurs placés aux deux extrémités de la locomotive, le passage s'effectue sans que la prise de courant subisse d'interruption, et tout se passe comme si le troisième rail ne présentait aucune solution de continuité. Il en est ainsi, notamment, dans le cas d'aiguilles isolées, ou suffisamment éloignées les unes des autres.

Mais lorsque les appareils de voie se succèdent à de faibles intervalles, les coupures deviennent alors trop longues pour qu'on puisse éviter de priver momentanément les locomotives de courant. Dans les gares peu importantes, l'inconvénient n'est généralement pas grave, parce que ces coupures anormales sont peu nombreuses, et que leur longueur est assez réduite pour que les machines puissent aisément les franchir au lancé. Au surplus, si elles tombent accidentellement en panne au milieu d'une lacune par suite d'une fausse manœuvre, on peut les dépanner très rapidement au moyen d'un câble muni de poignées isolantes, avec lequel on établit une connexion temporaire entre les frotteurs et le tronçon de rail conducteur le plus voisin. Au besoin, on peut réduire ce risque de panne en remaniant les appareils de voie afin d'éviter les coupures de longueur exagérée, la disposition assez simple des voies de service des petites gares se prête facilement à des modifications de ce genre.

Mais cette solution devient inapplicable dans les grandes gares, où l'enchevêtrement des appareils de voie rendrait un tel remaniement extrêmement onéreux, et parfois même impossible, et où le risque de panne deviendrait inadmissible en raison du nombre et de la grande longueur des coupures. On est alors obligé d'en revenir à la ligne aérienne, comme nous avons dû le faire en particulier en gare de Chambéry, où le troisième rail n'a été installé nulle part, même sur les voies principales.

Dans d'autres gares importantes, comme Montmélian et Saint-Jean-de-Maurienne, on a pu conserver le troisième rail sur les voies principales, tout en installant des lignes aériennes sur les voies de service, afin d'éviter des remaniements trop onéreux. A Modane, par contre, on ne pouvait envisager pareille solution, à cause de la présence des lignes aériennes triphasées pour l'alimentation des locomotives italiennes : on a donc été forcé de prévoir les remaniements de voies nécessaires pour permettre l'implantation du troisième rail sur les voies de service.

Cette dualité du mode de prise de courant, normalement sur troisième rail, et accessoirement, sur fil aérien, a entraîné l'installation de zones de transition, dans lesquelles coexistent les deux types de conducteurs, afin de permettre aux locomotives de passer de l'un à l'autre sans interrompre ni même ralentir leur mouvement. De multiples expériences, exécutées dans des conditions très variées, nous ont montré que cette transition pouvait s'effectuer sans aucune difficulté, et à des vitesses bien supérieures à celles qui seront pratiquement atteintes à la traversée de ces zones.

Les dispositions adoptées permettent donc de remédier efficacement à l'inconvénient des coupures de grande longueur dans le troisième rail.

A l'époque où il fut question d'entreprendre des essais préliminaires de ce type de conducteur sur la section de Chambéry à St-Pierre-d'Albigny, on admettait que les coupures de grande longueur, franchissables seulement au lancé, devaient être systématiquement écartées. Cette opinion était fondée sur le résultat d'expériences effectuées en Amérique par la General Electric Company, sur la demande des ingénieurs de la Compagnie d'Orléans. Ces expériences paraissaient avoir établi que, si l'on ne prenait pas la précaution de couper le courant sur la locomotive avant d'abor-

der une telle lacune, il se produirait, au moment où le frotteur arrière de la locomotive abandonnait le troisième rail un arc de rupture important, susceptible d'atteindre les boîtes ou le châssis de la machine, en provoquant un court-circuit assez violent pour faire déclencher les sous-stations. Aussi avions-nous exécuté sur la section de Chambéry à St-Pierre-d'Albigny tous les remaniements d'appareils de voie et toutes les installations de tronçons de ligne aérienne nécessaires pour faire disparaître complètement les coupures de grande longueur dans le troisième rail.

Mais dès que cette section fut équipée, nous entreprîmes aussitôt de rééditer les expériences américaines, dans les conditions les plus variées, tant au point de vue de la vitesse que de l'intensité des courants captés, qui devaient être coupés par le frotteur lui-même, au moment où il quittait le troisième rail. A notre grand étonnement, le phénomène annoncé ne s'est jamais produit : l'arc de rupture n'a rien d'inquiétant, et s'éteint de lui-même sans sauter à la masse. On peut donc en conclure qu'avec les dispositions adoptées par notre troisième rail et nos frotteurs de locomotives, il est inutile de couper le courant sur la machine avant de franchir au lancé une lacune de grande longueur dans le troisième rail.

Cette conclusion est particulièrement intéressante. Car elle nous a permis, lors de la reprise des travaux d'électrification au delà de St-Pierre-d'Albigny, d'accepter de telles lacunes dans le rail conducteur, toutes les fois qu'il s'agissait de coupures susceptibles d'être aisément franchies au lancé, sans risque de panne, par des machines effectuant des manœuvres. Nous avons pu éviter ainsi bien des remaniements d'appareils, et certains tronçons de lignes aériennes, dont l'exécution eût entraîné au total des dépenses fort élevées.

Le troisième rail installé sur la ligne de Modane est du type ordinaire, « à contact par dessus », tel qu'on le rencontre par exemple sur le Chemin de fer Métropolitain de Paris, ou sur notre ligne de Chamonix, c'est-à-dire que les frotteurs viennent s'appliquer sur la face supérieure du rail.

On a souvent prétendu qu'avec cette disposition la prise de courant devenait fatalement très défectueuse en cas de neige, et surtout de verglas, et que cet inconvénient ne pouvait être évité qu'en adoptant un type de rail conducteur différent, avec contact sur le côté ou même par dessous. En réalité, les brillants feux d'artifice que l'on peut observer par temps de neige ou de verglas sur certaines lignes électrifiées avec un rail à contact supérieur proviennent uniquement du fait que les frotteurs sont d'un type défectueux. Ils caressent mollement le rail conducteur au lieu de s'appuyer énergiquement sur lui. L'expérience déjà longue de notre ligne de Chamonix montre bien qu'on peut aisément capter des courants intenses sur un troisième rail à contact supérieur, malgré les intempéries, à la condition d'exercer une pression suffisante sur les frotteurs au moyen d'air comprimé, et en les munissant au besoin de lames d'acier qui débarrassent le rail de toute couche de verglas. Avec de pareils dispositifs nous n'avons jamais éprouvé aucune difficulté sur la ligne de Chamonix, où les intempéries sont cependant particulièrement fréquentes et sévères. Leur application est d'ailleurs bien plus facile avec le type ordinaire de troisième rail, de sorte que les variantes à contact latéral ou à contact par dessous ne semblent présenter, en définitive, aucun intérêt bien marqué.

Le rail à contact supérieur, utilisé couramment pour des tensions de 600 à 800 volts, peut être adapté sans difficulté à la tension de 1.500 volts : il suffit de le placer sur des isolateurs convenables.

Ceux de la ligne de Modane sont constitués par de gros blocs en grès, en porcelaine, ou en basalte fondu.

Ces deux derniers types donnent un isolement meilleur, mais on peut atténuer largement l'infériorité que présentent à cet égard les isolateurs en grès en les trempant simplement dans un bain de paraffine : ce traitement est peu coûteux, et l'expérience montre que l'amélioration obtenue se maintient malgré les intempéries.

Au demeurant, les qualités isolantes de ces blocs ne sont pas seules en jeu leur résistance aux chocs n'a pas moins d'importance car les traverses sur lesquelles ils reposent leur transmettent de violentes réactions lors du passage des trains. Ils sont en outre soumis à des épreuves encore plus brutales dans les manutentions qui précèdent leur mise en place.

Or les isolateurs en grès paraissent supporter ces traitements sévères beaucoup plus facilement que ceux en basalte fondu ou en porcelaine. Ils sont d'ailleurs d'un prix sensiblement moins élevé, même avec les frais de traitement à la paraffine. L'écart augmente encore si l'on considère non pas les prix en usine, mais les prix de revient des isolateurs mis en place, auquel cas il faut tenir compte du nombre des isolateurs brisés au cours des manutentions. Il semble donc que, pour l'instant du moins, on serait conduit à donner la préférence aux isolateurs en grès paraffiné, tout en espérant que l'on pourra faire encore mieux dans l'avenir.

L'adoption du troisième rail à 1.500 volts sur la ligne de Modane constituant l'une des particularités les plus originales de cette électrification, j'ai cru devoir, pour cette raison, entrer dans quelques développements à ce sujet ; mais je crains maintenant d'avoir dépassé la mesure. Aussi m'abstiendrai-je de vous entretenir d'autres détails de cet équipement comme le montage de la gaine de protection du troisième rail sur cales isolantes encastrées dans son profil, ou le dispositif de sectionnement des conducteurs à 1.500 volts, ou l'échissage électrique du troisième rail et des rails de roulement. Sans doute aurais-je pu vous signaler à cette occasion plusieurs dispositions nouvelles, susceptibles d'intéresser au moins certains spécialistes, mais je risquerais d'abuser ainsi de votre bienveillance. Il me paraît donc préférable d'aborder de suite la dernière partie de mon exposé, en vous parlant des locomotives électriques.

Les locomotives électriques de la ligne de Modane appartiennent à deux classes distinctes : d'une part, les machines rapides, et d'autre part celles affectées aux trains à vitesse modérée (trains omnibus de voyageurs, trains de messageries et trains de marchandises).

L'adoption de machines capables d'assurer indifféremment les trains de ces trois dernières catégories présentait pour nous un grand intérêt. En raison du prix élevé des locomotives électriques, il était, en effet, indispensable de chercher à réduire au minimum l'effectif nécessaire : on ne pouvait y parvenir qu'en employant le même type de machines à des services assez variés, pour augmenter le plus possible leur utilisation journalière.

Le problème de la construction d'un seul type de locomotive répondant à la fois aux besoins de tous les services, sauf celui des rapides, se présentait toutefois dans des conditions particulièrement difficiles sur la ligne de Modane, en raison de son profil très variable. Jusqu'à Aiguebelle, c'est presque une ligne de plaine ; puis apparaissent des rampes de plus en plus fortes à mesure qu'on s'élève dans la haute vallée de l'Arc. Les déclivités ne sont d'abord que de 10 à 15 pour mille jusqu'à St-Jean-de-Maurienne, mais elles atteignent ensuite 20 à 25 pour mille avant

St-Michel, et enfin 30 pour mille au delà. En sens inverse, la présence de pentes aussi fortes sur une pareille longueur imposait naturellement le freinage électrique par récupération, ce qui compliquait encore le problème.

En raison de cette complexité du programme à remplir, nous nous sommes adressés, pour l'étude et la fabrication de ces machines, à trois groupements de constructeurs, chaque groupement ayant à livrer une série de dix machines, dont la première serait essayée et mise au point avant de poursuivre la fabrication des suivantes.

Nous avons spécifié à ces constructeurs qu'une seule machine aurait à remorquer un train de marchandises de 800 tonnes de Chambéry jusqu'à St-Jean, et que la même charge devrait être enlevée au delà, sur les rampes de 20 à 30 pour mille, avec le renfort d'une deuxième locomotive du même type. Les machines qui nous ont été livrées paraissent devoir remplir largement ce programme, tout en assurant par ailleurs dans d'excellentes conditions le service des trains de voyageurs omnibus et des trains de messageries.

Les locomotives de ces trois séries comportent uniformément six essieux moteurs encadrés entre deux essieux porteurs, mais avec des dispositions assez différentes d'un constructeur à l'autre. Les machines fournies par les Constructions Electriques de France et la Société Alsacienne n'ont qu'une seule caisse, reposant sur deux trucks, chacun d'eux étant monté sur trois essieux moteurs et un bissel. Celles des autres constructeurs sont au contraire constituées par deux unités indépendantes, avec deux caisses distinctes, les châssis des deux unités étant reliés par un robuste attelage à rotule sphérique. Parmi ces dernières locomotives, celles de la Compagnie Electro-Mécanique et de la Compagnie de Fives-Lille possèdent sous chaque caisse trois essieux moteurs et un bissel directeur ; sur celles de la Compagnie Thomson-Houston et des Etablissements Schneider, les deux essieux moteurs arrière de chaque unité sont seuls montés sous le châssis principal portant la caisse, tandis que le troisième essieu moteur forme avec l'essieu porteur un truck articulé.

La puissance de ces machines varie de 2.300 à 2.400 chevaux.

Leurs moteurs sont tous du type usuel, dit type tramway avec suspension « par le nez ».

Pour les machines de rapides nous avons, au contraire, jugé indispensable d'expérimenter d'autres types de transmission, avant de prendre parti ; nous avons donc demandé à plusieurs constructeurs de nous livrer chacun une seule locomotive d'essai, afin de procéder à des comparaisons. Ces expériences, entreprises en 1925 sur la section de Chambéry à St-Pierre-d'Albigny, ont conduit à donner la préférence aux machines à moteurs jumelés, avec transmission par arbre creux entourant l'essieu moteur.

Deux locomotives de ce type ont pris part aux essais, l'une entièrement fabriquée par la Société Alsacienne, tandis que la Société Oerlikon avait fourni les moteurs et l'équipement électrique de la seconde, dont la partie mécanique était construite par la Compagnie des Batignolles et la Compagnie Générale de Construction de Locomotives à Nantes.

Les dispositions d'ensemble de ces deux machines sont identiques, avec caisse unique reposant sur deux trucks, chacun d'eux comportant deux essieux moteurs et un bogie directeur. Ces locomotives ne diffèrent entre elles que par l'appareillage électrique, et par les systèmes de transmission entre les arbres creux et les roues motrices.

Leur étude avait été faite en vue de remorquer des trains de 500 tonnes à des vitesses légèrement supérieures à celles des rapides actuels, ce qui avait conduit à leur donner une puissance d'environ 2 600 chevaux.

Encouragé par les excellents résultats obtenus aux essais j'ai pensé que ce programme était trop modeste, et qu'on pouvait envisager sans difficulté des machines beaucoup plus puissantes, susceptibles de permettre une majoration considérable des charges et des vitesses actuelles.

J'ai donc demandé au groupement Batignolles-Nantes-Oerlikon d'étudier une nouvelle locomotive construite suivant les mêmes principes que la machine d'essai, mais comportant six essieux moteurs au lieu de quatre. En conservant les moteurs de la machine primitive, on pouvait ainsi majorer d'emblée de 50 pour cent la puissance de la locomotive.

Mais il m'a paru possible de faire encore mieux : j'ai invité en conséquence la Société Oerlikon à reprendre l'étude du moteur lui-même, de façon à en augmenter la puissance, et à l'adapter aux très grandes vitesses. Cette tentative a pleinement réussi, car la puissance des nouvelles machines a pu ainsi être portée à 5 400 chevaux, soit le double de la puissance de la locomotive d'essai, bien que le nombre des moteurs n'ait été majoré que de moitié.

La première des quatre locomotives commandées sur ce nouveau type vient de nous être livrée tout récemment, de sorte que nous n'avons pas encore eu le temps de procéder à des essais complets. Il serait par suite prématuré de formuler dès maintenant une opinion précise sur les résultats qu'on peut attendre de la mise en service de ces nouvelles machines. Il est cependant permis de dire que les premières impressions sont excellentes, et que nos espérances ne paraissent pas devoir être déçues bien au contraire.

D'après les essais des moteurs à l'usine, ces locomotives devraient pouvoir remorquer un rapide de 700 tonnes à la vitesse de 90 kilomètres à l'heure en rampe de 8 millimètres par mètre, et de 110 kilomètres à l'heure en palier. Si les expériences auxquelles nous allons procéder sur la ligne confirment ces résultats, de tels engins permettraient par exemple de gagner environ

une heure entre Marseille et Nice, et plus d'une heure entre Paris et Dijon, par rapport aux horaires les plus accélérés du service actuel, tout en portant la charge des rapides de 500 à 700 tonnes. Sur la ligne de Modane, en raison des sujétions de service, et à cause du faible développement des portions de lignes franchissables à grande allure, on ne peut naturellement pas escompter des résultats aussi sensationnels : quoi qu'il en soit, ces machines pourront remorquer des rapides beaucoup plus lourds qu'actuellement, en réalisant partout la vitesse plus élevée que puisse autoriser la constitution de la voie.

J'ai quelque peu surpris mes bons amis d'Amérique en leur annonçant l'an dernier que la Compagnie P.-L.-M. allait détenir le record de puissance pour les locomotives électriques. Ils m'ont déclaré que je devais faire erreur, et que ce record reste certainement leur apanage, notamment avec les grosses machines de 7.000 chevaux, qui remorquent sur le *Virginian Railway* des trains de charbon de plus de 8.000 tonnes. Je leur ai répondu que je connaissais bien ces machines pour les avoir vues en construction à Pittsburgh, mais qu'elles se composaient en réalité de trois unités indépendantes, dont chacune ne développait même pas la moitié de la puissance de la nouvelle locomotive du P.-L.-M.

Il est clair, en effet, qu'en attelant l'une derrière l'autre un nombre quelconque de machines fonctionnant en unités multiples comme les automotrices d'un train de banlieue, on pourra atteindre au total telle puissance qu'on voudrait, et battre aisément tous les records : mais il s'agit là d'un véritable train de locomotives, et non d'une machine isolée.

Il existe déjà, tant en Europe qu'en Amérique, d'autres locomotives électriques à caisse unique développant une puissance bien supérieure à celle d'une unité isolée du *Virginian Railway*. Mais la puissance individuelle d'aucune de ces machines n'atteint encore celle de la nouvelle locomotive du P.-L.-M. auquel revient bien pour l'instant, n'en déplaise aux Américains, la gloire toujours éphémère d'un record mondial.

*(Conférence faite à la Chambre de Commerce de Grenoble, 5 juillet 1929.)*

