

---

---

**LE DÉVELOPPEMENT ACTUEL**  
DE  
**LA TRACTION ÉLECTRIQUE**  
SUR LES GRANDS RÉSEAUX DE CHEMIN DE FER

Par **M. PARODI,**

INGÉNIEUR CHEF DES SERVICES ÉLECTRIQUES DE LA COMPAGNIE D'ORLÉANS.

---

Dans la présente note, nous nous proposons d'exposer sommairement l'état actuel du développement de la traction électrique sur les grands réseaux de chemin de fer, en utilisant la documentation recueillie au cours de voyages d'études effectués en Angleterre, en Italie, en Suisse et aux États-Unis en 1913, 1914 et 1919.

Dans une première partie, nous indiquerons sous quelle forme se pose le problème de l'électrification dans les principaux pays d'Europe et d'Amérique et quelles sont les mesures étudiées en vue d'assurer une production rationnelle et économique de l'énergie électrique.

Dans les trois autres parties consacrées chacune à un système de traction caractérisé par la nature du courant utilisé sur les lignes d'alimentation des tractors, nous passerons rapidement en revue les propriétés et les applications principales des systèmes monophasé, triphasé et continu.

---

PREMIÈRE PARTIE

**LE PROBLÈME DE L'ÉLECTRIFICATION  
DANS LES PRINCIPAUX ÉTATS D'EUROPE ET D'AMÉRIQUE**

---

INTRODUCTION

L'électrification des chemins de fer est une question à l'ordre du jour dans le monde entier, non seulement parce qu'elle peut constituer dans certains cas une opération financière rémunératrice, mais encore parce qu'elle semble pouvoir apporter un remède partiel à une des plus graves difficultés économiques du présent et peut-être de l'avenir : la disette de combustible.

1° **Production de l'énergie électrique.** — Mais l'électrification ne peut procurer les avantages escomptés que si son étude est poussée concurremment avec celle plus générale de la production et de l'utilisation rationnelle de l'énergie. Dans tous les pays du monde, en Amérique comme en Europe, on étudie des programmes généraux ayant pour objet une organisation d'ensemble de la production de l'électricité. Il faut, en effet, pour que l'électrification soit viable, que l'on dispose de sources d'énergie *économiques et sûres*. L'économie, dans la génération du courant, ne pourra être réalisée que par la mise en valeur des richesses hydroélectriques d'un pays, partout où elles se trouvent, même dans les régions où n'existe pas de clientèle locale, et par l'utilisation sur le pas des mines de combustibles de qualité moyenne et inférieure.

*Usines hydrauliques.* — On étudie l'aménagement et la régularisation des cours d'eau même à débit irrégulier, la construction de grands réservoirs accumulateurs permettant l'utilisation complète d'une chute et la régularisation journalière et saisonnière de la puissance disponible.

La mise au point de centrales hydrauliques automatiques (1) permettra d'utiliser économiquement la totalité de la puissance disponible dans un cours d'eau, en multipliant au besoin les usines hydrauliques dont le rendement demeure très satisfaisant même pour de faibles capacités.

*Usines thermiques.* — On envisage également la construction de supercentrales thermiques comprenant uniquement des unités de grande capacité alimentées avec de la vapeur à haute pression et à forte surchauffe. La mise en service de pareilles usines permettra de tirer d'un même poids de charbon une quantité d'énergie utilisable plus que double de celle obtenue à l'heure actuelle dans la poussière de centrales qui pullulent dans tous les pays d'Europe. Le rendement moyen de ces installations semble pouvoir atteindre les valeurs de 15 et même 18 %, déjà obtenues, paraît-il aux États-Unis ; une locomotive à vapeur à son allure de marche la plus économique ne dépasse pas 6 à 7 %.

En plaçant ces supercentrales sur le pas des mines, on pourra utiliser des combustibles intransportables, trop friables ou trop cendreaux, ainsi que les gaz résiduels des transformations métallurgiques. En effectuant d'ailleurs sur place cette transformation de l'énergie, on réduira non seulement le prix du combustible utilisé, mais encore l'encombrement des voies ferrées ou fluviales résultant du transport du charbon à grande distance. On rendra ainsi disponible un matériel qui pourrait être employé pour la circulation d'autres matières (2).

La *continuité* de l'alimentation et la *sécurité* de la marche se trouveront assurées naturellement, en même temps qu'un supplément d'économie, par l'interconnexion de toutes ces centrales thermiques et hydrauliques.

---

(1) La plupart des centrales automatiques actuellement en service aux États-Unis sont du type asynchrone, une turbine hydraulique marche à puissance constante en entraînant un moteur asynchrone dont le courant d'excitation est fourni par le réseau général ; la vitesse du groupe est réglée par la fréquence du courant de ligne. La mise en route et l'arrêt sont effectués à distance et l'usine contient tous les appareils de sécurité nécessaires pour éviter automatiquement tout accident.

Une centrale construite récemment pour essai par le General Electric Co est du type synchrone, elle contient les appareils de synchronisation automatique nécessaires pour la mise en parallèle avec le réseau.

(2) Aux États-Unis le transport des charbons représente environ le tiers du trafic total des réseaux américains qui s'élevait en 1914 à environ 1 million de millions de tonnes miles.

*Interconnexion des réseaux de distribution.* — C'est ainsi qu'est en train de se réaliser en Californie, une vaste concentration de toutes les usines de production dans un Etat ayant une superficie à peu près égale à celle de la France : par l'aménagement méthodique du Pitt River et de la Feather River, du Colorado River et du Big-Creek, on disposera d'une puissance globale supérieure à 1.500.000 kilowatts. Cette puissance sera réellement utilisable en « bloc » grâce à l'interconnexion de toutes les centrales hydrauliques et thermiques de la région ; cette liaison sera assurée par des lignes de tensions diverses atteignant 220.000 volts pour les grandes artères de circulation (1).

C'est ainsi également que l'on parle de transporter une puissance formidable produite sur les pas des mines de la région charbonnière des Alleghanys, dans une région industrielle éloignée, par l'emploi de cette même tension de 220.000 volts.

*Unification des fréquences.* — Mais pour arriver à une interconnexion pratique, il faut unifier les formes de courant et les fréquences, et ce problème n'est facile à résoudre nulle part. Dans tous les pays du monde, on a employé des courants à fréquences relativement basses, de 15 à 25 pour le service de traction et des fréquences de 40 à 133 pour l'éclairage. On a de plus utilisé toutes les formes possibles de courant : l'alternatif simple, le diphasé, le triphasé, etc. ; et dans Londres seulement, existent plus de 100 usines diverses utilisant plus de 8 fréquences et de 24 tensions différentes.

Il paraît difficile dans ces conditions d'apporter aux installations réalisées les modifications profondes qu'implique l'unification des fréquences et de concilier les intérêts en balance.

La circulaire du Ministre des Travaux publics et des Transports, en date du 1<sup>er</sup> avril 1918, constitue pour la France une première et fort intéressante tentative d'organisation : pour les installations à réaliser dans les régions dévastées par l'ennemi, et pour les concessions réellement nouvelles, on doit adopter de préférence le courant alternatif triphasé industriel, à la fréquence de 50 périodes par seconde. Dans la même circulaire ministérielle, on indique combien cette unification serait désirable, dans la mesure du possible, pour le reste de la France. Mais il est indiqué « qu'elle ne peut aboutir, dans l'état actuel de la réglementation que par une sage et judicieuse persuasion et une compréhension approfondie des nécessités de la distribution. »

*Organisation de la production.* — C'est l'Angleterre qui paraît pour le moment vouloir aller le plus loin dans la voie de l'organisation et une loi « Electricity Bill » est actuellement soumise à l'approbation des Chambres pour préciser les conditions de production et de distribution de l'électricité. Des « District Electricity Boards » seront probablement chargés, dans chaque région, d'opérer par rachat (2) la concentration des importantes centrales appartenant aux chemins de fer, tramways et autres services publics et de combiner l'alimentation de ces entreprises avec celles des autres consommateurs. Ces « district electricity boards » constitueraient des organismes administratifs, gérant les réseaux de distribution régionaux, sans en tirer aucun bénéfice.

---

(1) La tension la plus élevée actuellement utilisée en service courant aux États-Unis est de 150.000 volts, 60 périodes ; elle est employée pour le transport de force de Big-Creek à Los Angeles.

(2) Il est probable toutefois que les Compagnies de Chemins de fer pourront être autorisées à produire elles-mêmes l'énergie dont elles ont besoin, si elles font la preuve qu'elles sont capables de la fabriquer à des conditions meilleures que celles offertes par le réseau local de distribution.

Cette organisation, si elle est réalisée, est certainement susceptible de donner de bons résultats dans un pays comme l'Angleterre ; en serait-il de même en France ? En Suisse, en Suède, en Allemagne, une théorie purement étatiste et aussi très particulariste semble prévaloir. Les centrales construites et exploitées par l'État alimenteraient uniquement les réseaux électrifiés de chemin de fer ; la nature du courant produit serait choisie sans chercher à réaliser pratiquement l'interconnexion des usines d'Etat et des centrales industrielles.

En Italie, en Amérique et en France, on semble vouloir s'en tenir à un régime de concessions qui, tout en réservant les droits de propriété et de contrôle de l'Etat, n'apporterait aucune entrave sérieuse au libre développement des industries nationales.

**2° Utilisation de l'énergie électrique pour les services de traction.**

— Quelles que soient la source d'énergie et la méthode d'exploitation considérées, le but poursuivi est le même ; obtenir la force électrique au prix le plus réduit possible et avec toutes les garanties possibles de régularité et de continuité de fourniture.

Ces conditions étant supposées remplies, comment envisage-t-on dans les différents pays le problème de l'électrification ?

*Situation des États-Unis.* — Les États-Unis qui produisent près de 500 millions de tonnes de charbon et qui en consomment environ 115 pour leurs chemins de fer ne paraissent pas considérer l'électrification comme une opération susceptible de généralisation étendue ; malgré son augmentation considérable, le prix du combustible atteint à peine les valeurs européennes d'avant-guerre ; il est encore trop faible en général pour que la diminution de consommation de 35 à 50 % que procurerait l'électrification soit suffisante pour couvrir les dépenses d'établissement des usines, des sous-stations et des lignes (1).

Bien entendu, dans les états de l'Amérique du Nord où le charbon est rare et l'huile coûteuse, et où, par contre, existent d'importants réseaux hydrauliques de distribution, l'électrification

(1) Nous extrayons d'une conférence faite à Londres par M. Hobart, le tableau statistique suivant relatif aux longueurs des lignes de chemin de fer exploitées électriquement aux États-Unis :

ANNÉES	MONOPHASÉ kilomètres	COURANT CONTINU HAUTE TENSION		
		1.200-1.500 volts kilomètres	2.400 et 3.000 volts kilomètres	TOTAL kilomètres
1906 .....	1.050	»	»	»
1907 .....	1.680	»	»	»
1908 .....	1.820	»	»	»
1909 .....	1.550 *	»	»	»
1910 .....	1.600 *	970	»	970
1911 .....	1.680	1.780	»	1.780
1912 .....	1.680	2.600	180	2.780
1913 .....	1.520	3.560	320	3.880
1914 .....	2.160	4.450	730	5.180
1915 .....	2.400	4.550	1.470	6.020

\* Les réductions de longueur constatées de 1909 à 1913 sont dues particulièrement à la substitution du courant continu au courant monophasé sur environ 480 km. de voie simple (8 chemins de fer interurbains)

présente d'inappréciables avantages. Tel est le cas des Etats de Montana et de Washington où ont été électrifiées les lignes du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul et celles du Butte-Anaconda Railway.

Le développement actuel de la grande ligne d'Avery à Harlowton est de 700 kms environ. A la fin de l'année dernière, par suite du prolongement de la traction électrique d'Othello à Seattle, cette longueur a été portée à 1.000 kms.

Cette électrification, qui est certainement la plus importante du monde, comporte l'emploi de 42 locomotives de 3.500 HP (soit au total 147.000 HP) et l'utilisation d'une puissance abonée de 28.000 Kws fournie par la Montana Power Co. L'économie annuelle de combustible correspondante est d'environ 400.000 tonnes.

*Situation de l'Europe.* — En Europe, la crise du charbon a fait éclore de très nombreux projets d'électrification et il semble que leur réalisation doive être poussée avec activité dans les pays où la crise charbonnière est particulièrement aiguë, comme la Suisse, l'Italie et la France.

*Electrification des chemins de fer Suisses.* — La Suisse, qui consomme actuellement pour la remorque de ses trains environ 3.500.000 tonnes de charbon, est forcée d'acheter la totalité de son combustible à l'étranger alors qu'elle possède des richesses hydrauliques plus que suffisantes (3 millions de chevaux) pour électrifier la totalité de ses lignes de chemins de fer. Pour un réseau, comme celui des chemins de fer fédéraux, ayant un développement d'environ 4.500 kms, la puissance moyenne nécessaire pour l'ensemble des lignes exploitées électriquement ne s'élève qu'à 200.000 chevaux à l'axe des turbines avec maximum instantané de 600.000 HP.

La direction générale des chemins de fer fédéraux, qui s'est adjoint comme Conseil, M. Huber, ancien Directeur de la Société Oerlikon, a poursuivi d'abord l'étude de l'électrification de la ligne du Saint-Gothard en s'inspirant des directives données par la Commission d'études.

En 1913, l'Administration a décidé de commencer les travaux correspondants par la construction des usines hydrauliques de Ritom et d'Amsteg et par l'équipement d'un premier tronçon de ligne d'Erstfeld à Bellinzona de 109 kms de longueur. Le choix définitif du système de traction électrique était encore réservé en attendant les résultats d'exploitation de la ligne du Loetschberg, construite par une Compagnie privée, le chemin de fer des Alpes Bernoises.

Pendant la guerre, en 1916, la direction des Chemins de fer Fédéraux proposa l'adoption définitive du système monophasé 15 périodes à la tension de 15.000 volts, le seul réellement étudié, avec le triphasé, par les constructeurs suisses.

Ce n'est qu'en 1918 que le programme général d'électrification des chemins de fer suisses a été présenté à l'approbation du Gouvernement fédéral. Les lignes y sont divisées en 3 groupes d'importance très inégale.

Le premier groupe, d'un développement de 1.128 k., comprend toutes les lignes dont l'électrification est réellement intéressante ; avec une puissance hydraulique moyenne de 76.000 chevaux, on pourrait assurer un service de traction électrique correspondant à une économie de près de deux millions de tonnes de charbon (plus de la moitié de la consommation totale des chemins de fer).

Le second groupe, d'un développement de 601 k., comprend des lignes à faible trafic, mais dont l'électrification sera peut-être intéressante par leur situation géographique.

Le troisième groupe comprend le reste du réseau et aucune étude, même sommaire, ne semble avoir été faite de son électrification.

Ce vaste programme va entrer en exécution. Les chemins de fer fédéraux ne commandent plus, dès maintenant, de locomotives à vapeur et tout l'effort financier du réseau est concentré vers la réalisation de l'électrification.

La mise en service de la ligne du Saint-Gothard semble devoir être effectuée à très bref délai.

*Electrification des chemins de fer Italiens.* — Les Italiens ont poursuivi méthodiquement depuis vingt ans l'électrification de leurs chemins de fer avec une ténacité et une compétence particulières. Les installations actuellement réalisées sont comparables par leur ampleur à celles exécutées en Amérique.

La faveur que les services publics ont toujours accordée à l'électrification s'explique par la pauvreté de l'Italie en combustibles minéraux et sa richesse relative en force hydraulique. Alors qu'elle est obligée d'acheter à l'étranger la totalité du charbon dont elle a besoin (plus de 11 millions de tonnes), l'Italie possède chez elle plus de cinq millions de chevaux de puissance naturelle utilisée seulement en partie. L'importance de cette situation n'est apparue nettement avec toute son importance économique que pendant la guerre et les circonstances ont imposé au Gouvernement une « politique nationale des ressources hydrauliques ».

Le succès technique de la traction électrique en Italie justifiait d'ailleurs entièrement cette attitude. Les 450 k. de lignes exploitées électriquement ont un fonctionnement irréprochable et la traction triphasée, malgré les critiques auxquelles elle a donné lieu, a permis pendant la guerre, notamment au moment du transport des troupes alliées dans les plaines lombardes, de réaliser de véritables tours de force.

L'électrification des 450 k. de lignes en question sur les 13.641 que comprend le réseau total a permis d'économiser 180 à 200.000 tonnes de charbon et l'exécution du programme élaboré par les chemins de fer de l'État qui porte sur 1.770 k. de lignes actuellement exploitées à vapeur permettra de réduire encore de 500.000 tonnes la consommation totale de combustible qui a atteint pendant l'exercice 1917-1918, environ 2,5 millions de tonnes. Le programme complet d'électrification comprend 4.500 k. de lignes, soit près du tiers du réseau total et permettra de réduire de plus de moitié la consommation du charbon.

Toutes ces installations doivent être alimentées en courant triphasé à la fréquence de 15 à 16 périodes, par des usines exploitées industriellement. (1) Les chemins de fer de l'État italien ont renoncé en fait, sinon en droit, à construire eux-mêmes leurs usines génératrices, et d'accord sur ce point avec le Parlement et avec les principaux groupements industriels du pays, ils abandonnent aux grandes sociétés privées de distribution cette importante partie du travail.

Sur une puissance installée de 107.000 kw pour l'alimentation des lignes déjà électrifiées, 81.000 kw appartiennent aux usines des grandes compagnies de distribution : Société Dinamo et Edison pour les lignes voisines de Milan, Société Negri et Maïra pour les lignes de Gênes et du Mont-Cenis.

---

(1) Dans les centrales privées alimentant le réseau d'état, un certain nombre de turbines sont montées sur le même arbre que deux alternateurs, l'un à la fréquence industrielle, l'autre à la fréquence spéciale du service de traction.

Dans l'avenir, la même politique doit être suivie en accentuant peut-être son caractère industriel. Il est possible, en effet, que sous la pression de divers organismes techniques et financiers, on arrive à unifier entièrement les fréquences des courants triphasés produits dans les Usines génératrices. Mais les discussions qui ont eu lieu récemment au Congrès de Trente ne semblent pas indiquer que les Ingénieurs des Chemins de fer de l'Etat soient disposés à abandonner le triphasé à faible fréquence pour adopter le continu à haute tension ; la question sera étudiée par une commission de 15 membres nommée récemment par le Ministère des Travaux publics.

*Electrification des chemins de fer français.* — En France, la situation, sans être aussi critique au point de vue du charbon que dans les nations voisines, est néanmoins sérieuse et il convient de mettre en valeur, le plus rapidement possible, les richesses hydrauliques que nous possédons (environ 8 millions de chevaux).

En 1913, notre consommation de charbon était de 60 millions de tonnes alors que notre production n'atteignait pas les 2/3 de ce tonnage. Dans ce total de consommation, les chemins de fer français figuraient pour environ 7 millions de tonnes. Dans une dizaine d'années, le déficit de 20 millions de tonnes par an sera probablement porté à 37 ou 40 millions en tenant compte de la consommation de l'Alsace-Lorraine et de l'accroissement normal de nos besoins (1) ; la consommation de nos réseaux de chemins de fer sera alors portée de 7 à 10 ou 12 millions de tonnes, du fait de l'augmentation normale du trafic.

L'électrification permettra vraisemblablement de compenser au moins en partie cette augmentation. L'exécution du programme adopté, qui comprend environ 8.200 k. de lignes, y compris les 150 k. déjà équipés par la Compagnie du Midi, permettra de réduire la consommation actuelle de charbon d'environ 2 millions de tonnes.

*Projets d'électrification.* — Le réseau du Midi se propose d'électrifier 3.000 k. constituant l'ensemble de son réseau, à l'exception des lignes en palier de Bordeaux, Cette et embranchements.

Le réseau d'Orléans se propose d'électrifier 3.000 k. de lignes dans le Massif Central, de Châteauroux à Montauban, de Limoges à Gannat, de Clermont à Tulle, ainsi que tous les embranchements correspondants.

Le réseau du P.-L.-M. se propose d'électrifier 2.200 k. en commençant par les lignes de Nîmes à Langogne, de Culoz à Modane, de Lyon à Genève, en y comprenant la ligne à grand trafic de Lyon à Marseille, celles de Marseille à Vintimille, de Tarascon à Cette, etc.

*Organisation du Comité d'Etudes pour l'électrification des réseaux d'intérêt général.* — L'électrification partielle du réseau français a pris, dans ces conditions, une importance qui n'a pas échappé au Ministère des Travaux publics et des Transports qui, dès le mois de novembre 1918, a constitué un Comité d'Etudes pour l'électrification des réseaux d'intérêt général.

Ce Comité, qui est présidé par M. G. Cordier, Président du Conseil d'administration de la Compagnie d'énergie électrique du littoral méditerranéen, comprend des représentants de

---

(1) La production de combustible n'a été que de 27 millions de tonnes environ en 1917 du fait de l'occupation et de la destruction de nos usines du Nord.

l'Administration, de l'industrie et des six grands réseaux. Deux sous-commissions ont été créées. L'une administrative présidée par M. Mussat, Inspecteur général des Ponts et Chaussées, est chargée d'examiner les projets qui ont été soumis par les Compagnies du Midi, du P.-L.-M. et de l'Orléans; l'autre technique, présidée par M. Monmerqué, Inspecteur général des Services de Contrôle des distributions d'énergie électrique, est plus spécialement chargée d'étudier les systèmes de traction électrique actuellement en service et de rechercher la possibilité d'adopter, pour l'ensemble des électrifications projetées, un système unique.

Cette dernière sous-commission a déjà effectué dans les six premiers mois de 1919 des voyages d'études en Suisse, en Italie, aux Etats-Unis. Les renseignements recueillis ont été rassemblés dans un rapport rédigé par M. Mauduit, Professeur d'électrotechnique à la Faculté des Sciences de Nancy. Une note résumée parue au Journal Officiel du 13 août 1919, donne un aperçu sommaire des constatations faites aux Etats-Unis, et fait prévoir l'adoption prochaine du courant continu à haute tension, comme système unifié de traction électrique en France.

*Electrification des chemins de fer suédois.* — En Suède, la question est à l'étude depuis 1902 et les expériences effectuées de 1905 à 1907 sur la ligne de Tomteboda à Vartan et Stockholm avec du monophasé 20.000 volts ont décidé le gouvernement à adopter ce système de traction pour les électrifications futures. La ligne minière de Kiruna à Riksgransen, d'une longueur de 120 k., a été électrifiée et on songe à étendre l'électrification à une grande partie du réseau suédois, sinon à la totalité, pour utiliser l'énergie hydraulique, à bas prix, qui abonde dans la région (1).

Le projet étudié en 1919 par le Comité général des chemins de fer prévoit la création de huit centrales hydrauliques pouvant fournir environ 700 millions de kwh, dont 400 millions pour les chemins de fer de l'Etat.

*Electrification des chemins de fer allemands.* — L'Allemagne, bien qu'elle produisit 280 millions de tonnes de charbon par an, n'avait pas attendu la guerre pour étudier la même question dans toute son ampleur et un vaste programme d'électrification avait été élaboré, il y a une dizaine d'années. L'énergie électrique nécessaire à la traction des trains devait être fournie par des usines utilisant sur place la tourbe et les lignites de l'Allemagne du Nord, et la houille blanche de l'Allemagne du Sud. (Puissance utilisable, environ 1.5 million de chevaux). La ligne de Dessau-Bitterfeld, qui a été inaugurée 1909, n'est que le premier tronçon de l'électrification (2) de la grande ligne de Magdebourg à Leipzig (118 k.) qui est alimentée avec le courant produit dans l'usine de Muldenstein, près Bitterfeld, située au milieu d'un riche gisement de lignite.

*Expérience actuellement acquise dans la construction et l'exploitation des chemins de fer électriques.* — Au moment où d'aussi vastes projets sont à l'étude dans les pays d'Europe qui souffrent le plus de la disette de combustible, il paraît nécessaire de faire le bilan de l'expérience

---

(1) Energie évaluée à 6.75 millions de chevaux pour la Suède et à 7.5 millions de chevaux pour la Norvège.

(2) Pour l'électrification de ces 118 k., une dépense de 32.500.000 fr. avait été prévue en 1910, soit environ 275.000 fr. par kilomètre.

acquise dans la construction et l'exploitation des chemins de fer électriques. C'est ce que se sont efforcées de faire les commissions officielles et les Compagnies de chemins de fer, et ce sont les résultats de cette étude considérable que nous nous proposons de résumer rapidement ici.

*Expérience acquise au point de vue économique et financier.* — Il convient tout d'abord de remarquer que l'expérience acquise ne peut être considérée comme telle qu'au point de vue purement technique. Au point de vue économique et financier, il ne semble pas que l'on puisse tirer grand enseignement de la documentation, d'ailleurs incomplète, recueillie sur la question ; car il n'a été réalisé jusqu'à présent que des électrifications partielles, « fragmentaires », sur des lignes soumises à des conditions d'exploitation presque toujours exceptionnelles.

Sur les 1.200.000 k. de lignes de chemins de fer existant au monde, il y en a à peine 10.000 d'électrifiés (1), et encore s'agit-il, dans la plupart des cas, de lignes en tunnel ou à forte déclivité où le prix de la traction à vapeur n'a pas été déterminé isolément. Tel est le cas de la plupart des lignes européennes électrifiées ou en cours d'électrification, notamment les lignes de transit international du Simplon, du Loetschberg, du Mont-Cenis, du Saint-Gothard, etc.

Aux Etats-Unis où la traction électrique s'est développée avec le plus d'ampleur, près de 700 locomotives électriques, d'ailleurs de types très variés, circulent sur environ 8.000 k. de lignes (13.000 k. de voie) alors que 65.000 locomotives à vapeur, de types moins divers, circulent sur plus de 420.000 k. de lignes (650.000 k. de voie). Mais, même en Amérique, les zones électrifiées l'ont été pour des raisons particulières et locales ayant un caractère exceptionnel.

Le nombre total des locomotives électriques actuellement en service dans le monde dépasse à peine un millier alors que plus de 300.000 locomotives à vapeur assurent le trafic mondial.

L'ensemble de toutes ces installations ne représentent même pas 1 % du total général ; il est donc certain que leur exploitation n'a pu avoir d'effet tangible sur les conditions générales de l'industrie des transports et les comparaisons économiques faites avec la traction à vapeur sont par suite au moins aléatoires.

Nous nous abstenons ici de toute interprétation des résultats qui nous ont été communiqués ; nous nous bornerons à les enregistrer, en donnant la plus large part à l'exposé, malheureusement trop sommaire, des conditions techniques de fonctionnement.

*Expérience acquise au point de vue technique.* — Rappelons tout d'abord que l'électrification fournit plusieurs solutions acceptables du problème de la traction, chacune d'elles ayant ses avantages et ses inconvénients particuliers. Cette multiplicité des dispositions possibles a effrayé un peu certains ingénieurs de chemins de fer qui ont vu en elle pendant longtemps une preuve, ou tout au moins un indice, de l'infériorité de la traction électrique par rapport à la traction à vapeur.

On a tenté, pendant ces vingt dernières années, d'appliquer à la construction des locomotives et automotrices toutes les ressources de l'électro-technique, et on est encore loin actuellement d'avoir épuisé la série des combinaisons possibles de transformateurs statiques ou rotatifs, de moteurs générateurs, d'excitatrices, etc., susceptibles de donner au tracteur électrique une souplesse comparable à celle des machines à vapeur ou des machines d'extraction.

---

(1) Abstraction faite des lignes de tramways ou de chemins de fers interurbains, dont le développement atteint 80.000 k., aux Etats-Unis seulement.

Quelles que soient les combinaisons considérées, on peut les classer d'après la nature du courant d'alimentation qui ne peut se présenter que sous l'une des trois formes : *triphasee*, *monophasée* et *continue*.

A chaque forme de courant d'alimentation, on pourra faire correspondre, à son tour, un quelconque des trois types de moteur de traction : continu, monophasé ou triphasé. On conçoit donc l'existence d'au moins 9 systèmes de traction distincts ; quatre seulement ont été jusqu'à présent réalisés, en raison de leur simplicité relative :

- Le système triphasé pur ;
- » monophasé pur ;
- » monotriphasé ou « split phase » ;
- » continu pur.

Nous allons passer rapidement en revue les propriétés caractéristiques de chacun de ces systèmes, et indiquer sommairement leurs principales applications en essayant de distinguer aussi nettement que possible, les résultats actuellement acquis de ceux que l'on peut espérer obtenir à plus ou moins longue échéance.

---

## DEUXIÈME PARTIE

### SYSTÈME MONOPHASÉ

*Propriétés générales.* — Le système monophasé ou à courant alternatif simple est de tous les systèmes de traction celui qui présente le plus d'avantages théoriques, c'est ce qui explique le nombre considérable de tentatives qui ont été faites pour en rendre l'application pratique et sûre.

Il n'exige pour l'alimentation des tracteurs que deux lignes de contact : l'une constituée par un fil aérien, l'autre par les rails de roulement et la terre. Une tension très élevée peut être employée en ligne, et on peut théoriquement écarter énormément les sous-stations de transformateurs statiques, si on n'a égard qu'aux chutes de tension.

Sur le tracteur même, l'emploi d'une tension d'alimentation élevée ne présente pas d'inconvénients sérieux, puisque grâce à l'emploi d'un transformateur statique, on peut fournir aux appareils de traction proprement dits, de l'énergie à une tension quelconque, *variable à volonté*.

Pour utiliser cette énergie électrique disponible et la transformer en énergie mécanique, trois combinaisons principales sont possibles, chacune d'elles correspondant à l'emploi de moteurs de traction *monophasés*, *triphases* ou *continus*, pour la commande des roues motrices.

*Système monophasé proprement dit.* — La première de ces combinaisons dite « *monophasé proprement dit* » est la plus simple électriquement. Elle comporte l'emploi de moteurs monophasés à collecteurs alimentés à tension variable. On peut, en réglant la tension, obtenir, comme dans les machines à vapeur, un effort de traction déterminé pour toute une série de vitesses réglables à volonté.

*Système mono-triphasé.* — La seconde combinaison dénommée « split phase » par les Américains ou encore monotriphasé, comporte l'emploi d'un convertisseur de courant alternatif simple en courant triphasé et de moteurs asynchrones triphasés sans collecteur. Ces moteurs n'étant susceptibles que d'une seule vitesse de marche économique, presque indépendante de la tension d'alimentation, on ne bénéficie pas du réglage possible de la tension et on réalise des machines ne pouvant fonctionner qu'à une ou deux vitesses économiques ; la seconde vitesse de marche est réalisée en couplant en « tandem » deux moteurs différents.

*Système mono-continu.* — La troisième combinaison dite mono-continu comporte l'emploi d'un convertisseur de courant alternatif simple en courant continu et de moteurs série à collecteur. Ces moteurs alimentés à tension variable peuvent développer un effort de traction déterminé pour une série étendue de vitesses réglables à volonté.

Comme convertisseur de courant, il est possible d'employer des appareils de types très différents. On peut utiliser, comme l'a proposé Léonard en 1892, un groupe moteur-générateur : le réglage de la tension aux bornes des moteurs est obtenue en agissant seulement sur le courant d'excitation du générateur. Une locomotive munie de redresseurs de ce type a été construite en 1902 par la Société Oerlikon.

On peut aussi, comme l'ont proposé MM. Auvert et Ferrand, redresser le courant alternatif au moyen d'une permutatrice spéciale sans inducteurs. Une locomotive d'essai a été construite par la Société Alioth pour la Compagnie P.-L.-M. Cette machine a fonctionné sur la ligne expérimentale de Mouans Sartoux à Grasse.

On peut enfin recourir à l'emploi de convertisseurs à vapeur de mercure pour la production de courant redressé. Les essais effectués par la General Electric sur la ligne du Butte-Anaconda ne semblent pas avoir permis d'obtenir de résultats définitifs. La question est à l'étude et il faut espérer que les recherches en cours à la Société Brown Boveri, à la Westinghouse et à la General Electric C<sup>o</sup>, permettront de mettre au point une disposition entièrement satisfaisante.

Jusqu'à présent, les deux seules dispositions qui ont reçu d'importantes applications sont le *monophasé direct* et le *monotriphasé*.

De très nombreuses installations en courant monophasé ont été réalisées tant en Amérique qu'en Europe, et rien qu'aux États-Unis, il existait en 1915 environ 2.400 km, de lignes à courant alternatif simple en service ou en construction.

Il ne saurait être question de décrire ici ces installations aussi nombreuses que variées et nous nous bornerons à indiquer en quelques mots leurs caractéristiques générales en examinant successivement la production et le transport de l'énergie, la distribution et l'utilisation du courant.

**Production et transport de l'énergie sous forme de courant monophasé.** — On a essayé à l'origine d'utiliser du courant à fréquence industrielle pour la traction monophasée et la ligne d'Oranienbourg a été construite par la Société A. E. G. en utilisant des moteurs Winter Eichberg à 42 périodes. La fréquence du courant a été ensuite progressivement réduite pour faciliter la construction des moteurs à collecteur, d'abord à 25 périodes, puis à 15-17 périodes.

Les Américains se sont arrêtés à la fréquence de 25 qui était déjà presque standard pour les installations à courant continu ; en Europe, au contraire, on est descendu presque immédiatement

à la fréquence 15-17 périodes qui permet la construction de bons moteurs monophasés. Que la fréquence soit d'ailleurs de 15 ou de 25, le résultat est toujours le même au point de vue de la production de l'énergie ; il faudra toujours prévoir des génératrices de fréquence spéciale dans les centrales industrielles ou construire des usines indépendantes affectées uniquement au service du chemin de fer.

Toutes les combinaisons possibles ont été réalisées. Au Loetschberg, le courant monophasé à 15.000 volts, 15 périodes, est produit directement dans deux centrales (Spiez et Kandergrund) appartenant à la Société de transport de force de Berne, au moyen de groupes spéciaux à 15 périodes utilisant la même chute que les groupes triphasés à 42 périodes qui alimentent les autres abonnés du secteur.

Au New-York, New-Haven, Hartford, l'énergie monophasée est produite à 25 périodes dans l'usine de Cos Cob construite et exploitée par le chemin de fer. Cette usine est reliée aux grandes centrales industrielles de New-York qui lui fournissent un appoint important (25 millions de kwh.) sous forme de courant triphasé à 25 périodes. (Des transformateurs rotatifs de fréquence permettent au secteur d'assurer la continuité de la fourniture en utilisant au besoin le courant triphasé 60 périodes produit par ses centrales d'éclairage).

Une combinaison analogue a été réalisée par le Norfolk et Western qui produit dans ses usines de Bluefield du courant à 25 périodes et est relié par l'intermédiaire d'un transformateur de fréquence à l'Apalachian Power Co qui distribue du courant à 60 périodes.

Le Pennsylvania Railroad achète toute l'énergie nécessaire à la traction de ses trains à la Philadelphia Electric Co sous forme de courant triphasé et l'équilibrage de la charge sur les trois phases est assuré par un « phase balancer » qui n'est qu'un survolteur-dévolteur triphasé à réglage automatique.

En France, le réseau du Midi qui s'est rendu compte depuis longtemps des avantages de l'unification des fréquences a équipé ses usines hydrauliques récentes avec du matériel triphasé 50 périodes tout en prévoyant l'alimentation de ses lignes en monophasé 16 périodes. En fait, la Compagnie du Midi a utilisé jusqu'à présent ses centrales plutôt comme celles d'un réseau de distribution que comme usine de traction.

Pour les électrifications de lignes ne dépassant pas une centaine de kilomètres de longueur et où les centrales sont situées à proximité du chemin de fer, on peut réaliser des installations d'une simplicité remarquable ; tel est le cas du Loetschberg : l'énergie monophasée à 15.000 v. produite dans les usines de Spiez et de Kandergrund est distribuée directement sans aucune transformation au réseau de traction. Deux feeders partant de chacune des usines alimentent la ligne de 75 k. de longueur en 3 points (deux feeders aboutissent de part et d'autre du point de sectionnement de Kandergrund) ayant un écartement moyen de 25 k.

Pour la plupart des installations, les conditions ne sont pas aussi favorables et il faut en général recourir à l'emploi de la haute tension pour le transport d'énergie à grande distance. Les arrivées de feeder sont alors remplacées par des postes de transformateurs statiques n'exigeant qu'une surveillance sommaire des appareils de contrôle et de sécurité.

**Perturbations sur les lignes télégraphiques et téléphoniques.** — Si on n'a égard qu'à la chute de la tension, on peut admettre avec la traction monophasée un écartement entre sous-stations considérable compris suivant les cas entre 20 et 25 k. Malheureusement, un phénomène secondaire vient compliquer singulièrement la question, au moins dans

les pays comme le nôtre, où le réseau télégraphique et téléphonique est placé le long des voies de chemin de fer. En Angleterre, indépendamment de toute considération d'électrification, les lignes à courant faible sont presque toujours placées sous câble souterrain le long des routes ; c'est ce qui explique pourquoi des installations à courant monophasé 25 périodes comme celles du London Brighton n'ont eu à subir aucune modification pour atténuer les phénomènes d'induction sur des lignes voisines.

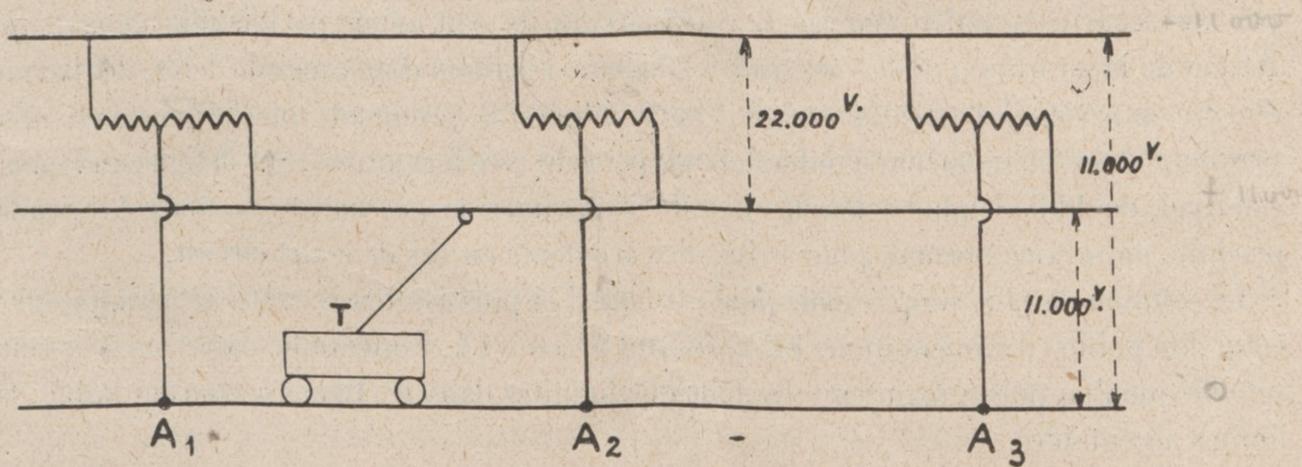
Dans la plupart des installations réalisées en Amérique et en France, on a été forcé de tenir compte des perturbations apportées au service des lignes télégraphiques et téléphoniques et on a été amené à compliquer énormément des systèmes de distribution dont la simplicité constituait peut-être le principal attrait de la traction monophasée.

Les troubles constatés sur les lignes à courant faible ont leur origine dans les phénomènes d'induction électrostatique et électromagnétique ; ces derniers étant de beaucoup les plus importants. Pour atténuer les perturbations, il faut en réduire les effets ou en supprimer la cause. Tous les dispositifs d'arrêt ou de dérivation des courants parasites placés sur les lignes à courant faible n'ont donné jusqu'à présent, malgré leur ingéniosité, que des résultats médiocres.

Les modifications apportées aux lignes de distribution ont permis, au contraire, de réduire notablement les tensions induites en *diminuant le plus possible la surface apparente du circuit magnétique inducteur*.

Si on consentait avec la traction monophasée à employer une ligne aérienne double, l'un des fils du contact constituant l'aller, l'autre le retour du courant, on réduirait d'autant plus les phénomènes d'induction que les conducteurs seraient plus rapprochés ; une pareille complication étant inadmissible, il faut, tout en n'utilisant qu'une seule ligne de contact, placer les conducteurs d'aller et de retour aussi près que possible et annuler par suite le courant pouvant passer par les rails ou la terre.

Fig. 1. — DISTRIBUTION DU NEW-YORK NEW-HAVEN-HARTFORD.

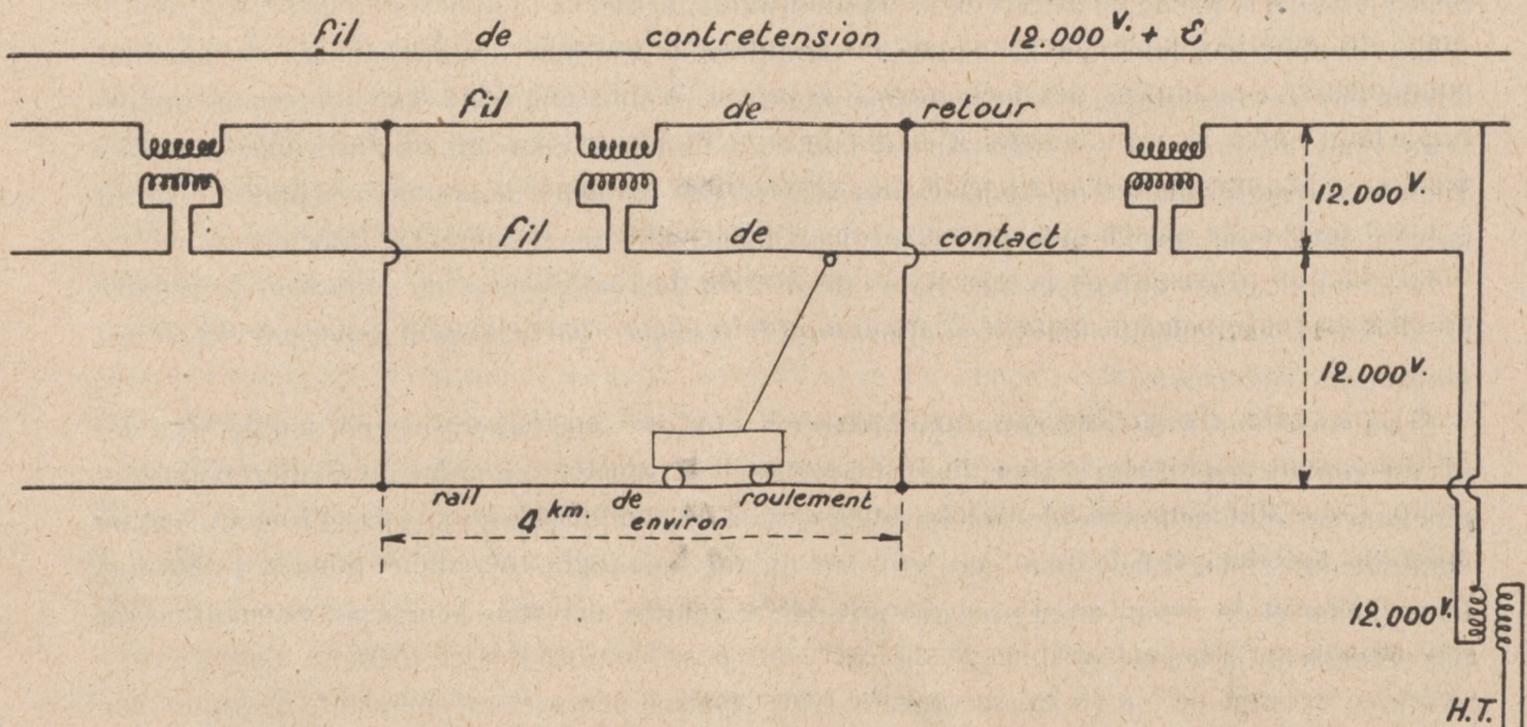


Sur le New-York, New-Haven, Hartford (Fig. 1), on constitue, au moyen de transformateurs statiques bobinés pour une tension double de celle d'alimentation (22.000-11.000 volts), une véritable distribution à 3 fils dans laquelle le courant d'alimentation du tracteur T ne passe dans les rails que dans l'intervalle  $A_1 A_2$  entre deux transformateurs de compensation (balancing transformer). Dans les sections voisines, il ne passe aucun courant dans le sol. Dans toutes les sections autres que celle où se trouve le tracteur, les conducteurs à  $\pm 11.000$  v. étant très près l'un de l'autre, l'induction électromagnétique est très faible ; l'induction totale qui dépend

surtout de la longueur de la section  $A_1 A_2$ , sera d'autant plus faible que les transformateurs seront plus rapprochés.

La Compagnie du Midi ainsi que certaines lignes américaines (Norfolk et Western Ry, New-York, New-Haven, Hartford Ry, dans la section New Canaan) réalisent une disposition analogue par l'emploi de transformateurs d'intensité de rapport 1/1. Ces transformateurs « suceurs » envoient dans le circuit de retour un courant égal et de sens contraire à celui circulant dans la ligne de contact (Fig. 2).

Fig. 2. — DISTRIBUTION DU NORFOLK AND WESTERN ET DU CHEMIN DE FER DU MIDI.



Ces dispositifs compliqués et coûteux de transformateurs « suceurs » ne donnent d'ailleurs pas une sécurité complète, en cas de court-circuit, ils sont même parfois plus gênants qu'utiles. Du fait de la saturation du fer des transformateurs résultant d'un excès de débit, des harmoniques d'ordre supérieur, particulièrement l'harmonique 3, prennent une importance notable et provoquent des phénomènes d'induction qui peuvent être fort graves. Sur la ligne du Pennsylvania Railroad, de Philadelphie à Paoli, on a dû supprimer les « suceurs », malgré l'amélioration produite en service normal, pour éviter des accidents en cas de court-circuit.

La solution la plus simple mais peut-être aussi la plus coûteuse, consiste à rapprocher beaucoup les points d'alimentation. En réduisant à 3 ou 4 k. l'intervalle entre les sous-stations, il semble que l'on puisse maintenir les tensions induites dans les lignes à courant faible dans des limites acceptables.

**Ligne de distribution.** — La distribution de l'énergie tout le long de la ligne est effectuée par une ligne aérienne en général à suspension caténaire et à double isolement.

Les lignes caténares étaient d'abord très compliquées : le fil de contact proprement dit était porté par deux câbles d'acier (messenger wire) reposant sur des isolateurs en matière moulée ou en porcelaine. Cette disposition adoptée notamment sur le New-York, New-Haven, Hartford et le London Brighton, avait pour objet principal d'éviter le balancement du fil en limitant les déplacements latéraux.

On se contente actuellement d'installer des lignes à suspension caténaire simple avec bras anti-balançants placés de distance en distance. Ces lignes sont plus légères, plus souples, moins coûteuses que les lignes triangulaires ; elles réduisent beaucoup moins la visibilité des signaux.

Le fil de contact proprement dit est généralement constitué par un fil de cuivre profilé d'une section d'environ 100 mq.

L'emploi d'une tension élevée sur les fils de contact ne présente aucun inconvénient pratique quand les lignes sont uniquement exploitées par l'électricité. Dans le cas où les machines à vapeur doivent circuler sur les voies équipées électriquement, il faut s'attendre à des incidents, notamment dans les tunnels où les gaz émis par les locomotives à vapeur séjournent longtemps. Des expériences directes faites à la Compagnie d'Orléans (1) par l'auteur de la présente note, ont montré que les gaz émis par les locomotives à vapeur étaient ionisés et par suite conducteurs. Les fumées des locomotives à vapeur établissent donc une liaison électrique imparfaite entre les conducteurs à haute tension et les masses métalliques voisines ; elles facilitent l'établissement d'arcs permanents susceptibles d'amener la chute de la ligne.

C'est pour cette raison que dans le projet d'électrification du Saint-Gothard, il a été prévu une réduction provisoire de la tension d'alimentation de 15.000 à 7.500 volts pour la période de mise en route pendant laquelle l'exploitation sera encore partiellement assurée à vapeur.

**Appareils de prise de courant.** — Pour les tensions de 11.000 à 15.000 volts ordinairement employées, le courant nécessaire pour les tracteurs les plus puissants, ne dépasse guère 150 à 200 ampères en marche normale ; il ne semblerait donc pas devoir exister de difficulté spéciale pour la captation du courant. En fait, particulièrement pour la traction à grande vitesse, la collection du courant est excessivement délicate. Tous les frotteurs aériens sont montés sur des pantographes aussi légers que possible, disposés de manière à assurer une pression verticale de 5 à 10 kg. suivant les types, mais à peu près indépendante de la hauteur de la ligne.

La valeur de la pression ne semble pas avoir une influence prépondérante sur l'usure des fils et ceux-ci semblent être seulement détériorés par la production d'étincelles. Les gaz des locomotives à vapeur semblent exercer une action corrosive notable sur les conducteurs aériens en cuivre probablement par sulfuration. Dans certains points spéciaux où circulent fréquemment les machines à vapeur, on constate une usure rapide des fils de contact.

**Résultats généraux d'exploitation.** — La traction monophasée semble avoir donné lieu à des difficultés sérieuses de mise en service dans un grand nombre d'installations pour des causes diverses : dans certains cas, du fait de défauts mécaniques auxquelles il a été remédié par la suite (Loetschberg, Norfolk et Western, etc.), dans d'autres du fait de l'interférence avec les lignes télégraphiques et téléphoniques (New-York, New-Haven, Hartford, Chemin de fer du Midi, etc.) Du fait des remaniements qui ont été apportés en service, il est difficile de déterminer les dépenses réelles de premier établissement et d'exploitation courante ; très peu de renseignements ont pu être recueillis sur ce sujet. Les tableaux reproduits pages 18 et 19 extraits d'un ouvrage de M. Droege, Chef du Service de l'Exploitation du New-York, New-Haven,

---

(1) Bulletin de la Société des Électriciens de 1913.

# COMPAGNIE DES CHEMINS DE FER DU NEW-YORK, NEW-HAVEN AND HARTFORD

## STATISTIQUES D'EXPLOITATION

### DIVISIONS DE LA LIGNE NEW-YORK AND SHORE.

(Comparaison du mois de Septembre 1915 avec le mois de Septembre 1914)

### SERVICE DES TRAINS DE VOYAGEURS

	TRAINS EXPRESS				TRAINS OMNIBUS				TRAINS A UNITÉS MULTIPLES			
	DIVISION EST		DIVISION OUEST		DIVISION EST		DIVISION OUEST		DIVISION EST		DIVISION OUEST	
	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915							
Trains km.....	87,291	78,713	92,130	90,617	49,413	55,767	46,061	47,818	35,215	25,652	34,081	25,919
Locomotives km.....	148,043	133,986	152,935	147,573	69,761	72,364	62,888	62,387	55,802	39,325	56,542	39,868
Voitures km.....	703,885	640,952	792,525	740,594	296,129	316,645	271,115	287,904	132,774	100,426	139,212	100,855
Tonnes km. remorquées.....	40,925,762	35,132,218	45,433,937	39,901,557	14,421,665	13,362,123	12,968,071	11,918,690	8,057,161	5,849,687	8,312,703	5,836,927
» locomotives.....	16,313,655	15,519,948	15,519,948	»	6,550,423	»	6,327,528	»	»	»	»	»
Kwhs utilisés.....	1,172,031	1,156,025	1,282,794	1,299,178	718,490	748,344	620,101	664,818	312,235	242,536	346,254	227,995
Locomotives km. par train km.....	1,70	1,70	1,66	1,63	1,41	1,30	1,36	1,30	1,59	1,33	1,66	1,54
Voitures km. par train km.....	8,06	8,14	8,60	8,06	5,99	5,68	5,89	6,02	3,80	3,91	4,08	3,89
Kwhs par train km.....	13,42	14,58	13,92	14,33	14,53	13,42	13,46	13,90	8,86	9,45	10,16	8,79
» par locomotive.....	7,91	8,62	8,38	8,80	10,29	10,31	9,85	10,65	5,59	6,16	6,12	5,71
» par voiture.....	1,66	1,80	1,61	1,77	2,42	2,36	2,28	2,30	2,33	2,41	2,48	2,26
» 1000 tonnes km. (*).....	28,64	32,90	28,26	32,57	49,82	56,02	47,83	55,79	38,76	41,47	41,66	39,07

(\*) Les tonnes km. s'appliquent à la charge remorquée. Les réparations de locomotives ne comprennent pas leurs frais d'achat. Le prix de revient d'énergie comprend les frais d'entretien et de main-d'œuvre de la station centrale mais non les charges fixes. Les frais par 1000 tonnes km. ne figurent pas en Septembre 1914.

### DÉPENSES D'EXPLOITATION

	REPARATIONS DES LOCOMOTIVES		ENERGIE		FOURNITURES POUR LOCOMOTIVES		DÉPENSES POUR DÉPÔTS		MÉCANIENS		ÉQUIPES DES TRAINS		TOTAL	
	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	
	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	(en francs)	
Trains remorqués par locomotives électriques :														
Frais par train km.....	0,60	1,25	1,51	1,17	0,04	0,03	0,03	0,03	0,53	0,59	0,59	3,31	3,63 (a)	
» locomotive km.....	0,37	0,79	0,92	0,73	0,02	0,02	0,02	0,02	0,33	0,37	0,37	2,04	2,28 (a)	
» voiture km.....	0,08	0,17	0,20	0,16	0,005	0,004	0,004	0,004	0,07	0,80	0,80	0,44	0,50 (a)	
» 1000 tonnes km.....	1,33	.....	3,31	.....	0,09	.....	.....	.....	.....	1,30	.....	7,26	»	
Trains à unités multiples :														
Frais par train km.....	0,93	0,87	0,81	0,65	0,01	0,01	0,01	0,01	0,28	0,56	0,56	2,68	2,43 (a)	
» locomotive.....	0,57	0,56	0,49	0,42	0,01	0,008	0,02	0,03	0,18	0,34	0,34	1,63	1,55 (a)	
» voiture.....	0,23	0,22	0,20	0,16	0,004	0,003	0,01	0,01	0,08	0,14	0,14	0,68	0,62 (a)	
» 1000 tonnes.....	3,60	.....	3,14	.....	0,07	.....	0,17	.....	.....	2,14	.....	7,28	»	

(a) Septembre 1914, renseignements revus.

SERVICE DES TRAINS DE MARCHANDISES

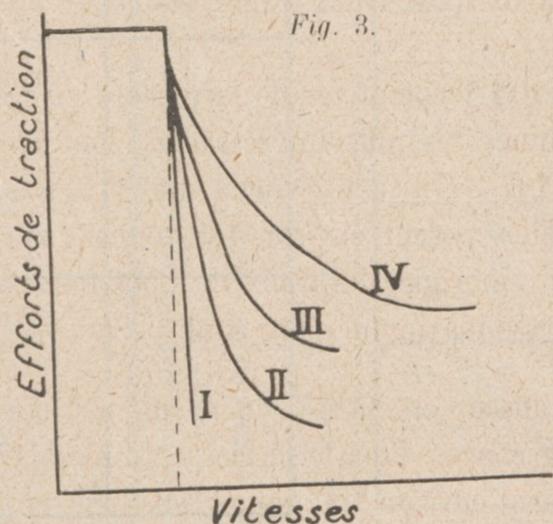
	DIRECTS						OMNIBUS						LOCAUX					
	DIVISION EST		DIVISION OUEST		DIVISION EST		DIVISION OUEST		DIVISION EST		DIVISION OUEST		DIVISION EST		DIVISION OUEST			
	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915															
Trains kilomètres.....	18,212	3,232	11,855	7,166	19,431	11,103	23,692	7,835	6,658	3,738	6,276	3,653	6,276	3,653	6,276			
Locomotives kilomètres.....	17,917	3,343	13,470	8,834	32,280	21,640	36,434	15,620	6,854	3,830	7,687	3,786	7,687	3,786	7,687			
Wagons kilomètres chargés.....	588,232	129,490	382,235	179,396	957,207	674,404	642,264	259,692	91,276	31,772	106,123	31,753	106,123	31,753	106,123			
» vides.....	4,463	323	44,599	118,913	56,476	36,480	585,064	332,465	60,859	12,219	54,528	14,470	54,528	14,470	54,528			
Fourgons kilomètres.....	12,812	3,232	11,855	7,166	19,431	11,103	23,692	7,835	6,658	3,738	6,276	3,653	6,276	3,653	6,276			
Tonnes kilomètres remorquées.....	20,284,595	4,054,598	11,284,533	6,827,233	36,840,381	25,786,041	29,783,806	13,539,498	3,733,217	1,130,994	4,212,426	1,260,149	4,212,426	1,260,149	4,212,426			
» locomotives.....	1,787,673	333,534	1,343,923	881,403	3,220,625	2,159,069	3,635,026	1,558,418	683,913	382,144	767,016	377,813	767,016	377,813	767,016			
Kilowatts heures consommés.....	333,481	64,482	220,943	143,637	627,445	424,500	664,061	274,686	160,965	78,963	151,464	66,793	151,464	66,793	151,464			
Locomotives km. par train km.....	1,39	1,03	1,14	1,23	1,66	1,95	1,54	1,99	1,03	1,02	1,22	1,04	1,22	1,04	1,22			
Wagons kilomètres chargés par train km.....	45,91	40,06	32,24	25,03	49,26	60,74	27,11	33,14	13,71	8,50	16,91	8,69	16,91	8,69	16,91			
Wagons kilomètres vides par train km.....	1,35	1,10	4,76	17,59	3,91	4,29	25,69	42,40	10,14	4,27	9,69	4,96	9,69	4,96	9,69			
Tonnes kilom. par train km.....	1,745,52	1,383,11	1,048,06	1,030,29	2,090,35	2,560,52	1,386,01	1,905,08	618,14	333,54	740,01	380,29	740,01	380,29	740,01			
» par locomotive km.....	1,248,16	1,337,21	923,65	852,05	1,258,27	1,313,74	901,29	955,68	600,45	325,56	604,16	366,81	604,16	366,81	604,16			
Rapport au tonnage moyen des trains à la charge normale.....	96	98	.....	.....	97	97	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....			
Tonnes km. par heure.....	18,060	20,278	12,939	12,204	14,254	19,212	10,895	14,858	2,368	1,252	3,168	1,521	3,168	1,521	3,168			
Vitesse moyenne (km. par heure)	24,26	34,39	28,91	27,25	15,99	17,59	18,42	18,29	9,00	8,81	10,03	9,39	10,03	9,39	10,03			
Kilowatts heures par train km.....	26,02	19,95	18,63	20,04	32,28	38,23	28,02	35,05	24,17	21,12	24,13	18,28	24,13	18,28	24,13			
» par locomotive kilomètres.....	18,61	19,29	16,40	16,25	19,43	19,61	18,22	17,58	23,49	20,61	19,70	17,63	19,70	17,63	19,70			
Kilowatts heures par wagon km.....	0,55	0,48	0,50	0,47	0,60	0,60	0,52	0,46	1,01	1,65	0,90	1,33	0,90	1,33	0,90			
» par 1000 tonnes kilomètres.....	16,44	15,90	19,58	21,04	17,04	16,52	22,30	20,28	43,11	69,84	35,95	53,01	35,95	53,01	35,95			

	FRAIS D'EXPLOITATION													
	RÉPARATIONS DES LOCOMOTIVES		ÉNERGIE		FOURNITURES POUR LOCOMOTIVES		DÉPENSES POUR LES DÉPÔTS		MÉCANICIENS		ÉQUIPES DES TRAINS		TOTAL	
	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	Septembre 1914	Septembre 1915	
Frais par train-kilomètre..... (en francs)	0,80	1,00	1,91	1,66	0,01	0,05	0,04	0,73	0,64	0,96	0,96	4,38	4,46	
» locomotive kilomètre.....	0,54	0,64	1,29	1,07	0,01	0,03	0,01	0,49	0,41	0,65	0,65	2,85	3,01	
» 1000 tonnes km. remorquées »	0,56	0,63	1,36	1,06	0,01	0,03	0,02	0,52	0,41	0,68	0,68	2,85	3,16	

Hartford, paraissent intéressants, car ils donnent une idée des conditions d'exploitation des lignes de grande banlieue les plus fréquentées de New-York.

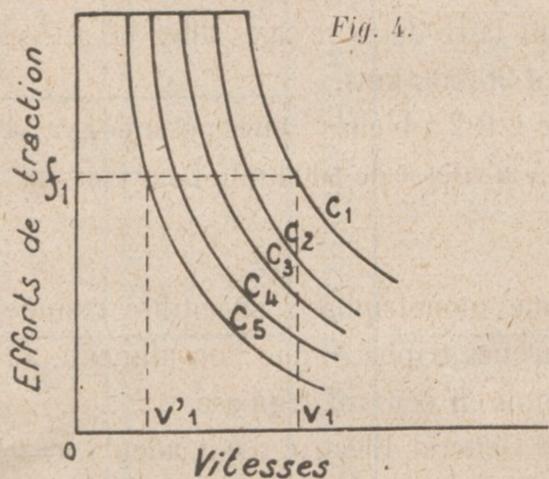
**Tracteurs monophasés.** — Dans le système monophasé proprement dit, nous avons vu que l'on utilisait des moteurs de traction du type série à collecteur. Ces moteurs sont



analogues comme disposition et comme propriétés générales, aux moteurs série à courant continu ; à voltage d'alimentation constant, l'effort de traction décroît avec la vitesse (courbe III) plus rapidement que dans une machine à vapeur (courbe IV) mais moins rapidement que dans un moteur série à courant continu très saturé (courbe II). Dans un moteur triphasé marchant à vitesse presque rigoureusement constante, l'effort décroîtrait suivant la courbe I.

Au démarrage, on peut obtenir des efforts considérables, mais il faut éviter de demander au moteur de les soutenir pendant longtemps sans tourner, car on risquerait de détériorer rapidement le collecteur et l'induit par échauffement local excessif.

En faisant varier le voltage d'alimentation par changement de la prise de contact sur le



bobinage du transformateur statique abaisseur de tension, on pourra obtenir une série de caractéristiques telles que C 1, C 2, C 3, et faire correspondre à un effort de traction quelconque  $f_1$ , une vitesse réglable à volonté entre les deux limites  $v'_1$  et  $v_1$  correspondant respectivement aux voltages minima et maxima d'alimentation.

Malgré leur diversité souvent plus apparente que réelle, tous les moteurs série monophasés utilisés pratiquement dans les installations modernes se rapprochent du type série compensé avec enroulement spécial de commutation (1) imaginé par le D<sup>r</sup> Behn Eschenburg,

Ingénieur en Chef de la Société Oerlikon, et employé pour la première fois sur la ligne de Seebach à Wettigen.

Ces moteurs, bien qu'ayant, à poids et à encombrement égal, une puissance notablement moindre que les moteurs à courant continu, sont parfaitement adaptés au service de traction ; malgré la complication de l'équipement, les locomotives monophasées à 15 périodes du Loetschberg, ne pèsent que 107 tonnes pour une puissance de 2.600 HP, soit environ 41,2 kgs par cheval ; le poids adhérent est de 90 T. Ces machines sont du type 1-E-1 (2) à cinq essieux

(1) L'enroulement de compensation permet d'annuler presque complètement la self induction apparente du moteur et l'enroulement de commutation permet, pour une certaine vitesse, de compenser exactement dans la spire, mise en court circuit par les balais au moment de la commutation, la force électromotrice d'origine statique, due à la pulsation du champ inducteur, par une force électromotrice d'origine dynamique, due à la rotation de la spire dans le champ local de commutation.

(2) La disposition des roues d'une locomotive à vapeur ou électrique est fréquemment représentée symboliquement en désignant les essieux porteurs par des chiffres et les essieux moteurs par des lettres.

A représentant un essieu moteur, B deux, C trois, etc., le symbole 1-C-1 — 1-C-1 désigne une locomotive comprenant deux parties constituées chacune par un bissel porteur (1 essieu), un système de 3 essieux moteurs et un bissel.

couplés, à commande par bielles triangulaires et engrenages ; elles peuvent remorquer à la vitesse de 50 kmh. un train de 300 tonnes sur la rampe de 27 ‰ d'une longueur d'environ 20 kilomètres.

Les dépenses d'entretien de ces tracteurs sont de l'ordre de 15.000 fr. par locomotive et par an, pour un parcours annuel d'environ 60.000 km. ; le poids moyen des trains remorqués est actuellement d'environ 160 tonnes.

Sur le New-York, New-Haven, Hartford, fonctionnent 103 locomotives de voyageurs et de marchandises qui sont de 11 types différents. Les machines les plus intéressantes sont les dernières machines à marchandises qui sont du type 1-C—C-1 à 6 essieux moteurs. Ces machines ont une puissance unihoraire de 2.040 HP ; elles pèsent environ 180 tonnes (soit 88 kgs par cheval de puissance unihoraire) ; elles peuvent remorquer des trains de 2.500 tonnes à la vitesse de 45 kmh. ; elles sont construites pour la vitesse maximum de 65 kmh.

Pour l'électrification de la ligne de Kiruna à Riksgransen, en Suède, on a employé des locomotives monophasées à commande par bielles sans engrenages. Pour le service des minerais, les machines sont à adhérence totale du type CC ; elles pèsent environ 100 tonnes, elles peuvent remorquer 40 wagons de minerai et un fourgon pesant au total 2.050 tonnes à la vitesse maximum de 50 kmh. La vitesse sur la rampe de 10<sup>mm</sup> par mètre et dans la courbe de 500 m. de rayon est d'environ 30 kmh. Huit trains portant 11.000 T. de minerai circulent chaque jour dans les deux directions ; chaque locomotive pouvant faire deux voyages aller et retour de Kiruna à Riksgransen, le parcours annuel moyen atteint 90.000 kms.

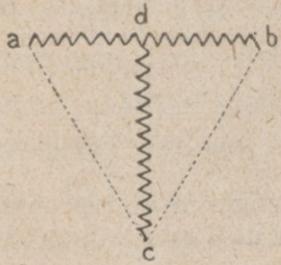
Pour le service des voyageurs, les machines sont du type 2 B 2 à bielles ; elles pèsent environ 70 tonnes et peuvent remorquer des trains de 200 tonnes à la vitesse de 100 kmh. Leur parcours moyen annuel est de l'ordre de 100.000 kms.

**Tracteurs monotriphasés.** — Dans le système monotriphasé, on utilise comme moteurs de traction proprement dits, des moteurs asynchrones triphasés que l'on alimente au moyen d'un groupe convertisseur de courant alternatif simple en courant triphasé.

Ce groupe peut être constitué de diverses manières : la General Electric avait adopté dans une locomotive d'essai construite en 1912 un dispositif synchrone triphasé imaginé par M. Alexanderson ; la Westinghouse Manufacturing Co a employé, dans les tracteurs qu'elle a construits pour le Norfolk et Western, des génératrices asynchrones diphasées fournissant par connexion Scott (1), avec le transformateur principal, le courant triphasé nécessaire pour l'alimentation des moteurs de traction proprement dits qui sont du type asynchrone triphasé.

Cette disposition a l'inconvénient d'utiliser l'énergie non seulement avec un très mauvais facteur de puissance, mais encore avec un déséquilibre marqué entre les phases du moteur.

Les machines du Norfolk et Western destinées à la remorque des trains très lourds de charbon en rampe de 15 à 20<sup>mm</sup> sont excessivement puissantes ; elles peuvent développer



(1) La disposition imaginée par M. Scott, professeur à l'Université d'Harvard, consiste à bobiner un transformateur ou un moteur diphasé, de manière que les tensions *a b* et *c d* de chacune des deux phases soient disposées en grandeur et direction de façon que les trois points *a b c* forment un triangle équilatéral.

pendant une heure un effort de 21.000 kgs aux vitesses de 22,5 ou de 45 kmh. Leur effort maximum garanti est de 66.500 kgs.

Ces tracteurs sont du type 1-B-B-1 1-B-B-1 ; ils pèsent 244 tonnes dont 200 tonnes sur les roues motrices. (Le poids par essieu est de 25 tonnes et de 68 kgs par cheval de puissance unihoraire).

Pour les rampes au-dessus de 10 à 15<sup>mm</sup>, la remorque des trains de charbon de 3 à 3.500 tonnes est assurée au moyen de deux tracteurs placés l'un en tête, l'autre en queue des trains.

La récupération automatique des moteurs triphasés maintient la vitesse constante dans les descentes et le frein à air, commandé par le mécanicien de tête, sert seulement pour l'arrêt ; pendant la marche en récupération, la machine de tête récupère seule sur les pentes de 15 à 20<sup>mm</sup> ; la puissance restituée au réseau pendant la récupération est environ moitié de celle absorbée pendant la montée à la même vitesse (1).

La vitesse de 22 km., 5 est seule employée pour la montée des pentes de 15 à 20<sup>mm</sup>, la vitesse de 45 kmh. étant réservée aux faibles pentes et à la marche en palier.

Les dépenses d'entretien de ces tracteurs semblent être de l'ordre de 100.000 fr. par locomotive et par an, pour un parcours annuel d'environ 70.000 kms.

Le fonctionnement de la partie mécanique de ces machines laisse beaucoup à désirer et il est probable que le groupe convertisseur diphasé asynchrone sera remplacé par un autre triphasé et synchrone.

Le *Pennsylvania Railroad* a construit, en vue de l'électrification de la ligne minière de Johnston à Altoona, une locomotive conçue, au point de vue électrique, d'après les mêmes principes que celles du Norfolk et Western, mais entièrement différente au point de vue mécanique. Ce tracteur peut développer une puissance de 4.800 HP à la vitesse de 33,5 kmh. ; il est du type 1-C-C-1 et pèse 248 tonnes dont 180 tonnes sur les roues motrices (30 tonnes par essieu moteur et 45 kgs par cheval de puissance unihoraire).

Deux de ces tracteurs employés en traction symétrique doivent pouvoir remorquer un train de 3.900 tonnes sur les rampes de 20 ‰ de 20 km. de longueur s'étendant d'Altoona à Gallitzin, et un train de 6.900 tonnes sur la rampe de 10 ‰ s'étendant sur 40 km. de longueur de Johnston à Gallitzin. Cette machine a été essayée sur la ligne de Philadelphie à Paoli où elle aurait donné des résultats satisfaisants.

---

(1) Cette observation pratique prouve que la résistance moyenne au roulement des trains de marchandises américains comprenant des wagons de très grande capacité est de l'ordre de 1 k. 5 par tonne, comme le montre un calcul simple.

### TROISIÈME PARTIE

## SYSTÈME TRIPHASÉ

**Propriétés générales.** — Le système triphasé est celui qui a donné lieu en Europe aux applications les plus étendues et peut-être les plus intéressantes. Les Ingénieurs des chemins de fer de l'État Italien ont su mettre entièrement au point un système, qui semblait presque devoir être rejeté à priori du fait de la complexité des lignes aériennes de prise de courant ; ils ont réalisé une exploitation irréprochable sur des lignes particulièrement difficiles et innové des méthodes d'exploitation dont nous pourrions nous inspirer dans l'étude de nos propres électrifications.

Le système triphasé exige pour l'alimentation des tractors, trois lignes de contact dont une est constituée par les rails de roulement et la terre. Les deux autres lignes, isolées l'une de l'autre et de la terre pour la tension totale d'alimentation, sont suspendues à un système de supports uniques.

Le courant utilisé dans les lignes italiennes est du triphasé à la tension de 3.000/3.300 volts et à la fréquence de 15 à 16 périodes  $\frac{2}{3}$  par seconde. Cette tension relativement basse a été adoptée pour permettre de réaliser un isolement suffisant entre phases surtout aux appareils de voie ; la fréquence faible a été choisie afin de pouvoir construire des moteurs asynchrones à bon rendement et à vitesse faible susceptibles de commander les roues motrices sans interposition d'aucun réducteur de vitesse.

Dans certains cas particuliers, d'autres fréquences et d'autres tensions ont été employées : sur la ligne Burgsdorf Thoune, la plus ancienne en date, on utilise 42 périodes et 750 volts ; sur la ligne américaine du tunnel des Cascades (Great Northern Railway), 25 périodes et 6.000 volts ; sur celle de Santa-Fe Gergal, 15 périodes et 5.500 volts, enfin sur la ligne expérimentale de Berlin Zossen, les chemins de fer de l'État prussien ont utilisé, pour leurs essais à grande vitesse (jusqu'à 200 kmh), la fréquence de 50 et la tension de 10.000 volts.

**Production et distribution du courant.** — Le courant triphasé de traction est produit en Italie presque en totalité dans des centrales industrielles appartenant à des sociétés privées. Pour bénéficier pleinement de la bonne utilisation de l'énergie du fait de la diversité des charges des grandes usines de distribution, on a placé sur le même arbre que la turbine hydraulique, deux alternateurs triphasés, l'un à 15 ou 16  $\frac{2}{3}$  périodes (fréquence de traction), l'autre à 42 ou 50 périodes (fréquence industrielle).

Les lignes de départ issues de deux tableaux de distribution complètement séparés, sont elles-mêmes entièrement indépendantes. Le voltage employé pour le transport de force est de l'ordre de 60.000 volts. L'énergie à haute tension est transformée en énergie utilisable sur les lignes de contact dans une série de sous-stations statiques écartées les unes des autres de 4 à 5 k. en moyenne pour une tension de 3.000 à 3.300 volts. Cet écartement semble devoir être notablement augmenté dans l'avenir ; sur la ligne du Mont-Cenis, on a pu déjà supprimer, sans inconvénients, plusieurs sous-stations de manière à porter la distance entre points d'alimentation de 5 à 10 k. Les Ingénieurs italiens espèrent pouvoir arriver à un écartement de 15 à 20 k. pour le prolongement de la ligne sur Turin, en portant la tension de 3.000/3.300 à 4.000 volts.

**Lignes de contact.** — La ligne de contact est d'aspect compliqué et de construction délicate; son entretien est certainement difficile et coûteux; néanmoins, l'exploitation est assurée avec une régularité complète. La mise au point des lignes semble cependant assez laborieuse, puisque la traction électrique des trains a dû être interrompue pendant plusieurs mois sur la ligne de Giovi, peu de temps après la mise en service, pour permettre l'exécution d'améliorations jugées nécessaires. Toutes les difficultés relatives aux appareils de voie, même les plus compliquées : traversées-jonction, bretelles, aiguilles, etc., sont maintenant heureusement résolues, puisque les Italiens songent à électrifier en triphasé des gares aussi compliquées que celles desservant le port de Gênes.

Les lignes aériennes sont à suspension simple analogue, aux dispositifs d'isolement près, à celle des lignes de tramways, et à faible écartement des supports : environ 20 m. La captation du courant, même à grande vitesse, semble pouvoir y être effectuée dans des conditions satisfaisantes, sans recourir à la suspension caténaire.

**Perturbations sur les lignes à courant faible.** — Les lignes triphasées de traction produisent sur les circuits à courant faible voisins des phénomènes d'induction analogues à ceux constatés avec les lignes monophasées; l'écartement des sous-stations triphasées étant très faible, les tensions induites ne sont pas très élevées; les effets sont cependant assez sensibles pour que les Ingénieurs des chemins de fer italiens aient été obligés de déplacer un grand nombre de lignes télégraphiques et téléphoniques (1). Dans bien des cas on a cependant obtenu des résultats satisfaisants en plaçant les lignes téléphoniques sous câbles; quelques lignes télégraphiques locales ont pu être maintenues avec retour par la terre.

L'administration ferroviaire poursuit des recherches en vue de réduire les phénomènes d'induction par des dispositifs analogues à ceux utilisés sur les lignes monophasées.

**Tracteurs triphasés.** — Les locomotives triphasées sont de beaucoup les plus simples des tracteurs électriques. Par couplage en tandem ou en parallèle des moteurs asynchrones, on obtient deux vitesses de marche à haut rendement; on peut en obtenir deux autres par variation du nombre des pôles. Ces 4 vitesses sont utilisables aussi bien pour le fonctionnement en moteur que pour le fonctionnement en génératrices asynchrones (récupération). Il faut bien insister sur ce fait que la récupération à vitesse sensiblement constante est obtenue automatiquement sans addition d'aucun appareil spécial.

Cette extrême simplicité permet de réaliser des machines à la fois légères et puissantes et avec aucun autre système de traction on n'a pu jusqu'à présent réaliser de machine ayant un poids par unité de puissance aussi faible : 30 kgs par cheval à 45 k. à l'heure pour les machines à marchandises de la série E 550  $\left(\frac{60.000 \text{ kgs}}{2.000 \text{ hp}}\right)$ ; 28 kgs par cheval à 100 kmh pour les machines à voyageurs de la série E 330  $\left(\frac{73.000 \text{ kgs}}{2.600 \text{ hp}}\right)$ .

---

(1) Il a été constaté par des essais oscillographiques, que les tensions induites sur des lignes parallèles aux circuits de traction, contenaient un harmonique 5 et un harmonique 7 en quadrature l'un avec l'autre et d'amplitude sensiblement égale à la moitié de celle de l'onde fondamentale, alors que la tension et le courant en ligne étaient sinusoïdaux. Ce fait expérimental n'a pas reçu jusqu'à présent d'explication complète.

La répartition de la charge entre différents tracteurs d'un même train se fait très aisément au moyen d'un réglage préalable simple consistant à intercaler une résistance fixe dans le circuit des rotors d'une des locomotives, dans le tracteur ayant les roues les plus petites pendant la marche normale, dans le tracteur ayant les roues les plus grandes pendant la marche en récupération.

Remarquons que si on consentait à compliquer les machines, on pourrait améliorer leur facteur de puissance et augmenter leur souplesse de fonctionnement en utilisant des dispositifs connus : le vibreur de Kapp a déjà été mis en essai sur quelques locomotives à marchandises italiennes, on pourrait (1) également expérimenter l'emploi de groupes triphasés à collecteur pour réaliser une variation de vitesse étendue de part et d'autre des vitesses naturelles de fonctionnement économique.

Il faut bien d'ailleurs se rendre compte que si des tentatives de ce genre n'ont pas été plus développées c'est uniquement parce que la marche à vitesse constante, considérée comme gênante par un grand nombre d'ingénieurs, n'a montré aux Ingénieurs italiens chargé de l'exploitation électrique des lignes de montagne que des avantages ; l'horaire fixé est observé sur ces lignes avec une régularité mathématique, quelles que soient les conditions atmosphériques, le tonnage des trains, l'état de la voie, etc.

Sur la ligne de Giovi Vecchia en pente de 35 millimètres par mètre à voie unique et partiellement en tunnel, on a pu assurer un trafic de 8 à 9 millions de tonnes kilomètres réelles remorquées par kilomètre de ligne pour un service journalier moyen de 24 heures.

Le parc de locomotives comprend actuellement près de 200 machines d'une puissance de 2.000 à 2.600 hp.

Les machines les plus nombreuses sont celles à marchandises du type E 550 à 5 essieux couplés à adhérence totale, pesant 60 tonnes et ayant une puissance unihoraire 2.600 hp à 45 kmh et d'environ 1.000 hp à 22.5 kmh.

Les machines à voyageurs de la série E 330 à 3 essieux couplés du type 1-C-1 pesant 73 tonnes dont 54 tonnes sur les essieux moteurs ont une puissance d'environ 2.600 hp à 100 kmh, 1.800 à 75 kmh, 1.300 hp à 50 kmh et 700 hp à 25 kmh.

**Mode d'exploitation.** — Sur la ligne de Giovi Vecchia, le service était assuré avant l'électrification par des locomotives à vapeur à 5 essieux couplés pesant, tender compris, 97 tonnes ; il comportait la remorque en 28 minutes de trains de voyageurs de Ponte Decimo à Busalla (vitesse 22 kmh) sur une distance de 10,4 km en rampe de 35 m/m. Pour les trains de marchandises la durée du trajet était de 31 minutes (vitesse 20 kmh).

Avec la traction électrique, la vitesse a pu être portée pour tous les trains montants 45 kmh, pour les trains descendants à 45 kmh (service voyageurs) et à 22.5 kmh (service des marchandises) en faisant normalement emploi de la double et même de la triple traction.

La comparaison des deux services à vapeur et électrique, est résumée dans le tableau suivant :

---

(1) L'emploi du vibreur de Kapp ou des moteurs triphasés à collecteur du type Scherbius permet d'injecter dans le rotor d'un moteur asynchrone des courants de fréquence et de phase variables et de régler ainsi les phases des courants d'alimentation et la vitesse des rotors.

	TRACTION A VAPEUR		TRACTION ÉLECTRIQUE	
Simple traction	Locomotive.....	97 T	Locomotive.....	60 T
	Tonnage remorqué.....	170 T	Tonnage remorqué.....	190 T
		<u>267 T</u>		<u>250 T</u>
	Rapport $\frac{170}{97} = 1,75$		Rapport $\frac{190}{60} = 3,16$	
Double traction	2 locomotives.....	194 T	2 locomotives.....	120 T
	Tonnage remorqué.....	310 T	Tonnage remorqué.....	380 T
		<u>504 T</u>		<u>500 T</u>
	Rapport $\frac{310}{194} = 1,60$		Rapport $\frac{380}{120} = 3,16$	
Triple traction	3 locomotives.....	291 T	3 locomotives (1).....	180 T
	Tonnage remorqué.....	450 T	Tonnage remorqué.....	530 T
		<u>741 T</u>		<u>710 T</u>
	Rapport $\frac{450}{291} = 1,55$		Rapport $\frac{530}{180} = 2,94$	

(1) La triple traction qui permet de disposer d'une puissance de 6.000 HP par train n'est employée qu'exceptionnellement à cause de la surcharge imposée aux sous-stations.

La traction à unités motrices multiples sans liaison électrique entre machines a été critiquée un peu à priori par bien des Ingénieurs de chemins de fer ; elle a été employée avec un plein succès en Italie malgré l'avis des techniciens (2). Elle a donné des résultats excessivement favorables, non seulement sur les lignes à pente uniforme comme celle de Giovi, mais encore sur des lignes en dent de scie comme celle de Savone à Ceva. Sur cette ligne qui comporte des pentes et des rampes successives de 11-17 et 25 m/m par mètre, la traction symétrique (un tracteur en tête, un autre en queue) est admise à la vitesse de 50 kmh sur toute la ligne dans les deux sens, sauf pour les trains impairs dans le tronçon San-Giuseppe Savone qui comporte une descente continue de 16.5 km, pente de 25 m/m par mètre ; dans ce tronçon la vitesse de descente est limitée à 22,5 kmh.

Il faut bien remarquer que la récupération automatique à vitesse constante du système triphasé ne constitue pas à proprement parler un dispositif de freinage ; pour obtenir le ralentissement ou l'arrêt, il faut recourir à l'action des freins mécaniques (3).

**Résultats d'exploitation.** — Les résultats généraux d'exploitation des lignes de chemins de fer de l'État italien exploitées à vapeur et électriquement sont indiqués dans les tableaux ci-après, empruntés à une communication faite par M. Greppi, Ingénieur en chef du matériel et de la traction, au congrès de Trente en 1919. L'examen de ce tableau met en évidence l'économie actuellement réalisée du fait de l'utilisation de la houille blanche dans un pays où le charbon brûlé dans les locomotives à vapeur a atteint pendant l'exercice 1917-1918, le prix de 248 fr. 46 la tonne. Ce prix doit actuellement dépasser 300 fr.

(2) Exposé de M. Bianchi, en 1917, sur les conditions de fonctionnement des lignes électrifiées devant la Commission parlementaire italienne.

(3) Nous verrons plus loin que la récupération dans le système à courant continu permet d'obtenir un ralentissement important quand la vitesse acquise n'est pas déjà trop grande ; pour l'arrêt, il faudra recourir également aux freins mécaniques. En Amérique, où la récupération à courant continu a été seulement essayée, jusqu'à présent, on dispose du frein à air comprimé même sur les wagons de marchandises.

**EXERCICE 1917-1918.**

**Dépenses des Services de Traction sur les lignes électrifiées du PIÉMONT  
et de la LIGURIE, desservies uniquement par locomotives (1).**

CHAPITRE DES DÉPENSES	Traction électrique								
	Longueur des lignes .....	km.	201						
	Parcours réel des locomotives en service .....	»	5.215.222						
	» virtuel .....	»	11.279.034						
	Rapports des parcours virtuels et réels .....		2,163						
	Parcours réel des locomotives de manœuvre .....		3.797						
	» des essieux remorqués .....	km.	141.887.600						
	Tonnes kilomètres remorquées :	virtuelles .....	2.425.779.800						
		réelles .....	1.182.400.600						
	Rapport des tonnes kilomètres virtuelles aux réelles .....		2,052						
	Poids moyen remorqué = $\frac{\text{Tonnes km. virtuelles}}{\text{kms. virtuels}}$ = tonnes		215,1						
	Tonnes kms. virtuelles par km. réel de locomotive = $215,1 \times 2,163$		465						
1	DÉPENSE totale	Dépense moyenne de l'heure de manœuvre (calculée)	DÉPENSES de manœuvres	DÉPENSES du service de route (2-4)	Dépense par loco-kilomètre de route	Dépense par essieu kilomètre remorqué	Dépense par tonne kilomètre remorquée		
	2	3	4	5	6	7	Virtuelle	Réelle	
							8	9	
1. Energie électrique de traction fournie par des étrangers .....	2.757.000	4.248	16.130	2.740.870	0,525	0,01932	0,00113	0,00232	
2. Personnel attaché aux Centrales électriques .....	40.096	0,083	315	39.781	0,008	0,00028	0,00002	0,00003	
3. Combustibles, matières diverses et dépenses diverses afférentes aux Centrales électriques .....	829.867	1,170	4.442	888.425	0,170	0,00626	0,00036	0,00075	
4. Personnel de conduite .....	1.603.843	2,073	7.871	1.595.972	0,306	0,01125	0,00066	0,00135	
5. Matières grasses pour lubrification et éclairage extérieur .....	474.358	0,325	1.234	473.124	0,091	0,00333	0,00019	0,00040	
6. Personnel de dépôt .....	360.865	0,250	949	359.916	0,069	0,00254	0,00015	0,00030	
7. Matières et dépenses diverses de dépôt .....	107.790	0,088	334	107.456	0,021	0,00076	0,00004	0,00009	
8. Manutention des locomotives .....	1.513.928	1,336	5.073	1.508.855	0,289	0,01063	0,00062	0,00128	
TOTAL des dépenses ordinaires d'exercice au compte du Service Traction .....	7.750.747	9,573	36.348	7.714.399	1,479	0,05437	0,00317	0,00652	
9. Renouvellement des locomotives (2) .....	313.065	0,226	858	312.207	0,060	0,00220	0,00013	0,00026	
10. Intérêt de la valeur des locomotives (3) .....	1.178.000	1,550	5.885	1.172.115	0,225	0,00826	0,00049	0,00099	
TOTAL des dépenses du Service Traction .....	9.241.812	11,349	43.091	9.198.721	1,764	0,06483	0,00379	0,00777	
11. Personnel des installations fixes de traction électrique .....	1.290.252	2,322	8.817	1.281.435	0,246	0,00903	0,00053	0,00109	
12. Matières et dépenses diverses pour les installations fixes de traction électrique .....	609.202	1,098	4.169	605.033	0,116	0,00426	0,00025	0,00051	
13. Intérêt de la valeur des installations fixes (3) .....	1.500.000	2,754	10.457	1.489.543	0,286	0,01050	0,00061	0,00126	
14. Renouvellement des installations fixes (4) .....	630.000	1,152	4.374	625.626	0,120	0,00441	0,00026	0,00053	
15. Annuités versées à des tiers pour intérêt et amortissement des installations fixes .....	641.696	1,098	4.169	637.527	0,122	0,00449	0,00026	0,00054	
16. Dépenses générales de personnel (assurances, secours, gratifications, service médical, etc.) à la charge de l'exercice .....	908.852	1,185	4.500	904.352	0,173	0,00637	0,00037	0,00076	
TOTAL des dépenses ordinaires, complémentaires et accessoires .....	14.821.814	20,958	79.577	14.742.237	2,827	0,10389	0,00607	0,01246	

(1) C'est à dire toutes les lignes électrifiées de ces deux régions de la ligne de Turin-Pignerole sur laquelle le Service a été effectué partie électriquement et partie à vapeur. Le Service électrique a été partiellement effectué, dans une mesure d'ailleurs très limitée, avec des automotrices.

(2) Amortissement en 30 ans pour les Services de route, en 40 ans pour les Services de manœuvre au taux de 5% des 88% de la valeur d'achat : les 12% restant représentant la valeur des vieilles matières correspondantes. La valeur d'achat du matériel roulant est de 23.560.000 liras. Pour l'amortissement, il a été appliqué le taux de  $0,0151 \times 0,88 = 0,0132$  au total pour les Services de route et de manœuvre.

(3) Au taux de 5%.

(4) Amortissement en 25 ans au taux de 5% en négligeant la valeur des vieilles matières. Valeur des installations fixes 30.000.000 liras. Coefficient d'amortissement 0,0210





**DONNÉES DE L'EXERCICE 1917-1918.**

	PAR ANNÉE					Turin Pignerole	Groupe Ligure et Mont-Cenis	TOTAL des lignes électrifiées	Lignes à écartement normal exploitées à vapeur	(4)
	Varesine inclus Varèse J. Cérésio	Monza Lecco Valtellina	Groupe Ligure	Mont-Cenis Modane Bussoleno	Turin Pignerole					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>c + d</i>	<i>a + b + c + d + e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	
Milliers de locomotives kms (automotrices comprises) .....	1.337	796	3.895	1.320	77	5.215	7.425	113.264	—	
Manœuvre (6 kms. à l'heure) (1) .....	34	20	9	14	—	23	77	7.424	—	
TOTAL .....	1.371	816	3.904	1.334	77	5.238	7.502	120.688	—	
Milliers de locomotives kms. (locomotives comprises) .....	1.563	975	7.964	3.315	88	11.279	13.905	140.016	—	
Rapport entre le parcours virtuel et le parcours réel (en service) .....	1,17	1,23	2,04	2,51	1,15	2,163	1,873	1,236	—	
Millions de tonnes kms réelles remorquées .....	140,7	151,8	955,2	227,2	14,1	1.182,4	1.489	34.536	—	
Millions de tonnes kms virtuelles remorquées .....	166,4	181,8	1.920,1	505,7	16,2	2.425,8	2.790,2	41.449	—	
Rapports des tonnes kms virtuelles aux tonnes kms réelles .....	1,18	1,20	2,01	2,24	1,15	2,051	1,873	1,200	<i>p</i>	
Poids moyen remorqué kms virtuelles .....	107,7	186,8	241,1	152,5	183,5	215,1	200,5	296	—	
Longueur de la ligne .....	73	143	141	60	37	201	454	13.187	—	
Locomotives kms annuelles (en service) par km. de ligne .....	18.310	5.570	27.620	22.000	2.080	25.940	16.350	10.620	—	
Milliers de tonnes kms réelles remorquées par km. de ligne .....	1.930	1.060	6.770	3.780	381	5.880	3.280	2.620	<i>q</i>	
Milliers de tonnes kms virtuelles .....	2.280	1.270	13.600	8.430	437	12.070	6.150	3.140	<i>r</i>	
Consommation totale annuelle d'énergie en kwbs (2) .....	8.490.000	8.730.000	53.760.000	12.640.000	730.000	66.400.000	84.350.000	—	<i>s</i>	
Kwhs par kilomètre de ligne (2) .....	116.300	61.000	381.300	210.700	19.700	330.300	185.800	—	<i>t</i>	
Whs par tonne kilomètre virtuelle remorquée (2) .....	51	48	28	25	45	27,4	30,2	—	<i>u</i>	
Consommation de charbon. (Les données pour les lignes électrifiées représentent les économies réellement calculées au taux des consommations par unité de trafic obtenues sur les mêmes lignes quand elles étaient exploitées à vapeur) T.	11.650	11.640	118.340	32.870	1.000	151.210	175.500	(3)	<i>v</i>	
Idem par km. de ligne .....	160	81	840	548	27	702	387	168(3)	<i>x</i>	
Consommation de charbon en grammes par tonne km. virtuelle remorquée .....	70	64	61,6	65	62	62,3	63	53,4(3)	<i>z</i>	

(1) Dans les colonnes des lignes électrifiées sont indiquées seulement les manœuvres exécutées avec locomotives électriques. Dans les stations extrêmes et dans d'autres stations importantes des mêmes lignes on a également exécuté des manœuvres avec des locomotives à vapeur ; ces dernières sont comprises dans la colonne relative à l'exploitation à vapeur.

(2) Energie mesurée à la sortie des sous-stations.

(3) Ces données se rapportent à la consommation réelle des combustibles pendant l'année 1917-1918, sur les lignes exploitées à vapeur et pour le seul service de route (manœuvres non comprises). On néglige la consommation pour les manœuvres pour faire une comparaison plus exacte avec les lignes électrifiées, étant donné que les manœuvres exécutées électriquement jusqu'à présent sont relativement peu importantes, alors que les manœuvres exécutées à vapeur dans les stations des lignes électrifiées sont comme il est indiqué dans la note 1 et comprises dans les indications de la colonne f.

(4) Pour le groupe de lignes de 4.500 kms compris dans le programme d'électrification, on peut attribuer les valeurs ci-dessous indiquées : *p* = 4,50 *q* = 3,300 *r* = 5,000 *s* = 675.000,000 *t* = 150.000 *u* = 30 *v* = 1.237.500 *x* = 275 *z* = 55.

## QUATRIÈME PARTIE

## SYSTÈME A COURANT CONTINU HAUTE TENSION

Le système à courant continu haute tension est considéré à tort comme un système nouveau. Il n'est que l'aboutissement naturel des systèmes ordinaires de traction à courant continu dans lesquels le voltage normal d'alimentation a été élevé au fur et à mesure du perfectionnement de la construction des moteurs et des appareils de commande.

La tension par collecteur s'est progressivement élevée de 500 à 600 volts, puis de 750 à 1.000, à 1.200, à 1.500 volts. C'est cette dernière tension qui paraît constituer actuellement la limite maximum compatible avec un fonctionnement régulier.

En groupant par deux en série de pareils moteurs, on arrive à des tensions en ligne de 2.000 à 2.400 et 3.000 volts. Il ne paraît pas impossible d'aller plus loin, et des essais ont été effectués à la tension de 3.750 volts, d'autres vont être entrepris à 4.000 volts, mais la nécessité d'un pareil effort n'apparaît pas actuellement, au moins en Europe où des trafics intensifs analogues à ceux réalisés en Amérique avec des trains de 3.000 à 6.000 tonnes se succédant à intervalles rapprochés n'existent pas.

Des moteurs à toutes tensions de 600 à 1.500 volts ont été réalisés aussi bien en Europe qu'en Amérique et il existe notamment en France une petite ligne Rambach-Maizières-Sainte-Marie aux Chênes (Alsace-Lorraine) d'une quinzaine de kilomètres construite en 1906 par la Société Siemens Schuckert et utilisant une tension normale de service de 2.000 volts (1.000 volts par collecteur).

Les craintes conçues par les constructeurs sur la possibilité de maintenir pratiquement l'isolement du matériel pour des tensions plus élevées, ont donné naissance au système d'alimentation à trois fils permettant, tout en réalisant les avantages d'une distribution à 2.400 volts ou à 3.000 volts, d'isoler le matériel électrique par rapport à la masse pour une tension moitié. Ce système de distribution à 3 fils a été employé depuis longtemps, notamment en France sur les lignes de Saint-Georges de Commiers à la Mure ( $\pm 1.200$  volts) équipées par la Société Thury, et en Autriche sur les chemins de fer de Vienne ( $\pm 1.500$  volts) équipés par la Société Krisik.

Cette disposition, qui a l'avantage de réduire à zéro le courant passant normalement par les voies de roulement et de supprimer par suite tout effet d'électrolyse (1), a l'inconvénient d'exiger l'installation de deux lignes de contact isolées du sol. Malgré cette apparente complication, l'emploi d'une distribution à 3 fils n'est pas à rejeter *à priori*.

C'est en Amérique, où le problème de l'isolement des appareils électriques a été le plus et le mieux étudié, que l'on a tenté, pour la première fois d'une façon étendue, l'emploi d'une tension supérieure à 1.500 volts entre ligne de contact unique et sol. La General Electric Co a essayé et mis au point avec un succès complet d'abord la tension de 2.400 volts sur le « Butte Anaconda Railway » puis celle de 3.000 volts sur le « Chicago-Milwaukee-Saint-Paul. »

---

(1) C'est pour cette raison que le chemin de fer du Nord-Sud de Paris a été ainsi équipé avec 2 lignes de prise de courant ; l'une le 3<sup>e</sup> rail à - 600 volts et l'autre, le trolley aérien, à + 600 volts.

En Angleterre, la Société Dick Kerr avait entrepris en 1912 des essais à 3.750 volts sur la ligne expérimentale de Bury à Holcombe Brook, appartenant au Lancashire et Yorkshire Railway, avec une locomotive comprenant 4 moteurs de 250 HP, à 1.800 volts par collecteur ; bien que ces essais aient été satisfaisants, en ce qui concerne le matériel roulant, la ligne en question est définitivement alimentée à 1.200 volts, et son prolongement sur Manchester réalisé en utilisant un 3<sup>e</sup> rail à 1.200 volts. La Société Brown Boveri est en train d'équiper en Italie une ligne à 4.000 volts entre Turin et Lanzo.

Pour ces tensions d'alimentation, il semble *à priori* que l'on puisse utiliser aussi bien une ligne de contact aérienne qu'un troisième rail, ce dernier type de conducteur présentant *à priori* l'avantage de permettre la captation normale d'une intensité de courant plus élevée.

L'expérience a montré, et c'est là au fond le fait capital mis en lumière par les Américains, qu'avec une ligne aérienne à suspension caténaire comportant deux fils de contact à points d'attache alternés, on pouvait recueillir sans usure et sans étincelle nuisible :

environ 4.000 ampères à 25 kmh. ;  
» 3.000 » à 50 »  
» 2.000 » à 100 »

Ce résultat peut être obtenu avec des pantographes simples portant deux barres transversales de contact en cuivre légèrement graissées appuyant sur les lignes avec une pression d'environ 15 kgs. Les intensités indiquées ci-dessus sont très supérieures à celles nécessaires pour alimenter les tracteurs les plus puissants à 3.000 volts et même à 1.500 volts. La ligne aérienne ne présente donc plus le vice rédhibitoire qui lui faisait préférer *à priori* le 3<sup>e</sup> rail et actuellement elle jouit aux États-Unis d'une faveur complète aussi bien auprès des constructeurs qu'auprès de la plupart des exploitants.

D'ailleurs, les essais effectués par la General Electric Co avec un 3<sup>e</sup> rail à 2.400 volts ont montré que de fortes surtensions se produisaient, du fait de l'impédance du rail, au moment de la coupure du courant des tracteurs quand la distance entre sous-stations est trop grande.

Sur le Michigan Central où cet écartement atteignait 80 kilomètres, on a constaté des surtensions de l'ordre de 3.600 volts, le voltage maximum total dépassant 6.000 volts. Par l'emploi de déchargeurs électrolytiques on peut, moyennant une perte d'énergie très appréciable, supprimer localement cet effet, mais il n'en existe pas moins ; il est très préjudiciable à la conservation des moteurs de traction dans lesquels s'amorcent fréquemment des « flashes » (arcs jaillissant entre balais et masse ou entre balais),

Par l'emploi de feeders et par un sectionnement judicieux du 3<sup>e</sup> rail, on arriverait certainement à remédier à ce défaut, mais aucune installation de ce genre n'a été réalisée jusqu'à présent et la ligne du Michigan Central a été transformée en ligne à 1.200 volts par addition d'une sous-station intermédiaire.

**Matériel roulant.** — Les quelques observations que nous venons de présenter permettent de fixer quelles sont *actuellement* les limitations d'emploi direct de la haute tension sur les locomotives et automotrices à courant continu.

Quel que soit le voltage employé au-dessus de 1.500 volts, on doit faire fonctionner au moins deux moteurs constamment en série ; cette disposition ne présente aucun inconvénient si les moteurs correspondants sont reliés mécaniquement ; s'ils sont montés sur des roues indépen-

dantes, il peut se produire, au moment d'un patinage, une augmentation de tension assez importante aux bornes d'un moteur pour provoquer un " flash " au collecteur.

Le même fait peut se produire au moment d'un changement brusque du régime d'excitation, notamment pendant la récupération.

Les locomotives du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul ne sont pas exemptes de ce défaut (1) et dans les premiers mois d'exploitation, il se produisait 1 à 2 « flashes » par jour. Ces « flashes » ne produisent pas, jusqu'à présent, d'effet destructeur dangereux, sans doute à cause du parfait fonctionnement des appareils de sécurité.

Pour atténuer cette tendance à l'amorçage d'arcs, il faut réduire le voltage entre lames du collecteur. Comme on ne peut, dans l'emplacement disponible, augmenter le diamètre du collecteur et le nombre des lames, les constructeurs ont été amenés, dans les machines nouvelles, construites pour le Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, à augmenter le nombre des collecteurs placés en série, de manière à réduire ainsi le voltage aux bornes de chacun d'eux. Les locomotives à voyageurs de la G. E. C<sup>o</sup> comprennent 12 moteurs bipolaires à 1.000 volts du type « Gearless » (sans engrenages) attaquant directement 12 essieux mécaniquement indépendants ; les moteurs forment 4 groupes de moteurs couplés électriquement par trois en série.

Les locomotives Westinghouse comprennent 12 moteurs tétrapolaires à 750 volts, attaquant par l'intermédiaire d'engrenages 6 essieux mécaniquement indépendants ; les pignons des deux moteurs jumelés (twin motor) correspondant à un même essieu, sont en prise avec une même roue d'engrenages.

Cette multiplication des collecteurs est possible pour une locomotive, elle ne l'est pas pour une automotrice sur laquelle il est difficile de placer plus de 4 moteurs ; si on veut avoir au moins deux vitesses de marche économique par la combinaison série parallèle, on est ramené à une tension 1.200-1.500 volts par collecteur pour deux moteurs seulement placés en série.

Il n'existe encore, ni en Europe ni en Amérique, d'automotrices fonctionnant en service courant à 2.400 ou 3.000 volts, en dehors de celles construites par la Société Dick Kerr pour la ligne d'Holcombe-Brook à Bury. Les voitures que la G. E. C<sup>o</sup> équipe pour le Canadian Northern Railway (Tunnel de Montréal) sont excessivement lourdes et coûteuses : elles pèsent 72 tonnes pour une puissance globale de 500 chevaux seulement (4 moteurs de 125 chevaux), et le prix de la partie électrique est supérieur de 50 % environ à celui d'un équipement à 1.500 volts de même puissance.

**Réglage de la vitesse. — Récupération.** — Le réglage de la vitesse est effectué économiquement avec les machines électriques à courant continu en utilisant différents couplages des moteurs et en changeant le rapport des ampères-tours induits et inducteurs (shuntage des inducteurs ou renforcement du champ).

---

(1) Nous estimons personnellement, qu'il nous soit permis de l'indiquer ici, que pour obtenir un fonctionnement absolument sûr d'une locomotive électrique, il faut l'équiper uniquement avec *des moteurs* susceptibles de supporter le voltage total de la ligne *quand la disposition mécanique est telle que la pleine tension peut être appliquée à chacun d'eux même temporairement*. Autrement dit, avec des moteurs à 1.500 volts non accouplés mécaniquement, on ne peut avoir une sécurité absolue de marche que sur un réseau à 1.500 volts.

Les difficultés de construction qu'entraîne pour un moteur à 1.500 volts la condition de pouvoir fonctionner temporairement à un voltage presque double ne sont pas négligeables. Des précautions spéciales doivent être prises et leur efficacité contrôlée par des essais de réception spéciaux.

Par les couplages série parallèle on peut obtenir :

avec 4 groupes de moteurs les vitesses  $V$ ,  $\frac{V}{2}$  et  $\frac{V}{4}$   
» 2 » » »  $V$  et  $\frac{V}{2}$

Par shuntage des inducteurs ou par renforcement du champ, on peut faire passer dans les enroulements d'excitation un courant  $\lambda I$  proportionnel au courant  $I$  de l'induit, le coefficient  $\lambda$  devant être au moins égal à  $1/2$  pour des raisons de commutation. Quand  $\lambda$  est supérieur à l'unité (1), le courant  $\lambda I$  doit être limité aux valeurs correspondant à la saturation du fer ou à un échauffement excessif des inducteurs.

Ces dispositifs de réglage de la vitesse sont applicables aussi bien pendant la marche en moteur, que pendant la marche en récupération ; ils ont pour objet d'obtenir un même effort de traction à différentes vitesses de marche économiques.

Ce même résultat pourrait être obtenu très simplement, mais en acceptant une perte d'énergie considérable, en insérant des résistances variables dans le circuit des moteurs fonctionnant en récepteurs ou en générateurs. Le démarrage sur résistance comme le freinage sur résistance sont des procédés excessivement sûrs et simples de réglage et ils sont employés exclusivement sur les tramways malgré leur mauvais rendement.

Pour la traction sur chemin de fer, il fallait mettre au point un système économique permettant la variation presque continue de la vitesse par variation du rapport des intensités dans le champ et dans l'induit : c'est ce qui a été fait par la General Electric Co pour le Chicago-Milwaukee-Saint-Paul avec un plein succès ; la G. E. Co utilise une excitatrice spéciale et des appareils de contrôle encore un peu compliqués, mais d'un fonctionnement satisfaisant. La solution de ce problème délicat de la récupération est un fait capital au point de vue du développement de la traction électrique à courant continu, car elle entraîne une conséquence fort importante, celle du réglage continu de la vitesse pendant la marche en moteur ; la G. E. Co n'a pas disposé ses machines de manière à utiliser la réversibilité du système de contrôle, mais il y a lieu de penser que dans un avenir rapproché, quand les appareils de récupération auront été simplifiés et mis entièrement au point, on pourra employer un dispositif unique pour le réglage progressif de la vitesse en marche normale et en récupération. La machine électrique à courant continu possédera alors une souplesse de marche aussi grande que les machines à vapeur.

Dans les locomotives de la General Electric Co, les seules qui fonctionnent actuellement sur la ligne du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, l'excitation variable est fournie par un « dynamotor » dont la génératrice est parcourue par le courant total de traction.

En agissant sur un « contrôleur » spécial de récupération, le mécanicien règle le courant d'excitation de l'excitatrice et fait varier à volonté le champ inducteur des moteurs et par suite le couple retardateur.

En pratique, pendant la marche en récupération, les locomotives ne débitent guère plus de la moitié du courant qu'elles absorbent pendant la marche en moteur pour les valeurs des

---

(1) On peut faire passer dans des inducteurs placés en série le courant de plusieurs moteurs reliés en parallèle.

pentes existant sur la ligne du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul (15 à 20 millimètres par mètre) du fait des résistances dues à l'air et au roulement. On dispose donc, pendant la marche en récupération, d'une puissance surabondante. C'est ce qui permet de prévoir l'emploi prochain d'un ou plusieurs moteurs de traction d'une locomotive pour le réglage de l'excitation des autres.

Le mécanicien a d'ailleurs la faculté de mettre hors circuit une moitié de sa locomotive pour assurer une meilleure utilisation des appareils. Pour les raisons indiquées ci-dessus, il possède encore, en général, une adhérence suffisante.

Pendant la marche en récupération, les coups de feu au collecteur, les « flashes » sont à craindre, surtout quand les machines travaillent à grande vitesse, à faible excitation ; en principe, il ne faut pas que le courant, dans le champ, tombe au-dessous d'une certaine valeur minimum (50<sup>a</sup> dans les machines du C. M. S. P.) ou au-dessous de la moitié du courant d'induit. Un relai de « surtension » branché aux bornes des moteurs a pour objet de réduire automatiquement l'excitation de l'excitatrice quand le courant débité en ligne est débité à une tension dépassant 3.800 volts.

Ces quelques indications générales montrent que, bien que le fonctionnement des tracteurs soit satisfaisant, la récupération (1) n'est réalisée qu'en compliquant beaucoup les machines et en y ajoutant des appareils délicats. La G. E. C<sup>o</sup> et la Westinghouse ont essayé de simplifier l'appareillage en supprimant le moteur de 3.000 volts commandant l'excitatrice, moteur dont la construction est particulièrement difficile et dont l'entretien doit être effectué très méticuleusement. L'excitation est fournie dans les machines Westinghouse par une dynamo commandée par un des essieux porteurs, dans les machines Général Electric C<sup>o</sup> nouvelles par un ou plusieurs moteurs de traction ; ces derniers dispositifs n'ont pas encore été jusqu'à présent sanctionnés par l'expérience courante, mais ils paraissent devoir donner d'excellents résultats.

**Dépenses d'entretien.** — Le parc de locomotives du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul comprend actuellement 44 machines :

2	machines de manœuvre ;
30	» à marchandises ;
12	» à voyageurs.

Les 42 dernières locomotives sont munies d'équipement de 8 moteurs GE 153 à 1.500 volts représentant une puissance globale de 3.600 chevaux au régime unihoraire et 3.200 HP en marche continue ; les machines à voyageurs et à marchandises ne diffèrent les unes des autres que par le rapport d'engrenages qui est de 2,45 pour les premières (vitesse maximum de marche 100 kmh.) et de 4,56 pour les secondes (vitesse maximum de marche 50 à 55 kmh.).

---

(1) Il y a lieu de remarquer qu'au point de vue de la sécurité, la récupération est inférieure au freinage sur résistance : en cas de saut de disjoncteur dans les sous-stations, par exemple, le freinage est brusquement supprimé, et il faut, pour le remplacer, utiliser le frein à air. Avec le matériel à marchandises européen, non muni du frein à air, il faudra prévoir un dispositif spécial d'appel au frein, attirant instantanément l'attention des gardes-freins sur le danger couru.

Pour l'exercice 1917-1918, les dépenses d'entretien des machines sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

	MARCHANDISES	VOYAGEURS
Nombre de machines .....	30	12
Dépense totale en dollars .....	\$ 140.550	\$ 109.658
Dépense par locomotive par an et en \$ .....	\$ 4.800	\$ 9.100
En francs (dollar compté à 6 fr.) .....	Fr. 29.000	Fr. 55.000
Dépense par 1.000 tonnes mile .....	\$ 0,0525	\$ 0,2454
Dépense par 1.000 tonnes kilomètre (dollar compté à 6 fr.) .....	Fr. 0,0217	Fr. 0,102

A titre de comparaison, nous indiquerons que les dépenses par 1.000 tonnes miles des machines à 3.000 volts du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul sont plus que doubles de celles des machines à 650 volts du New-York Central.

La différence entre les frais d'entretien des machines à voyageurs et à marchandises tient presque uniquement aux dépenses de réparations des chaudières à vapeur, utilisées pour le chauffage des trains de voyageurs.

**Matériel fixe.** — Dans le système à courant continu haute tension, on peut utiliser pour le transport d'énergie n'importe quelle forme de courant primaire et par suite le courant industriel triphasé 50 périodes pourra être employé sans difficulté. C'est l'une des différences les plus nettes entre le système de traction et les systèmes à courant alternatif mono ou triphasé.

La transformation de l'énergie à haute tension en courant continu de traction est effectuée par des groupes moteurs-générateurs pour les tensions supérieures à 1.500 volts et par des commutatrices pour les tensions de 1.500 volts et au-dessous.

Au Chicago-Milwaukee-Saint-Paul pour l'exploitation d'environ 700 kilomètres de ligne à la tension de 3.000 volts, il existe 14 sous-stations présentant entre elles un écartement moyen de 50 km. (32 miles). La puissance globale installée dans les sous-stations est d'environ 59.500 kw ; la puissance totale demandée au réseau ne dépasse pas 28.000 kw. dans les conditions actuelles de trafic, grâce à un dispositif spécial (1) :

L'utilisation du matériel des sous-stations est donc d'environ 2.500 heures.

10 sous-stations comprennent 2 groupes moteurs-générateurs de 2.000 kw.

3 » » 3 » » 1.500 kw.

1 » comprend 3 » » 2.000 kw.

(1) Pour obtenir une utilisation aussi grande que possible de la puissance « abonnée » fournie par la Montana Power Co, le Chicago-Milwaukee-Saint-Paul a fait installer un appareil totalisateur de la charge des différentes sous-stations : un régulateur automatique actionné par un courant proportionnel au courant total provoque une réduction générale de la tension en ligne quand la puissance totale demandée par le réseau de traction atteint une limite fixée à l'avance ; cette réduction de voltage entraîne une diminution correspondante de la charge. Par une étude judicieuse des horaires et grâce à ce réglage automatique, le Chicago-Milwaukee-Saint-Paul Railway obtient actuellement une utilisation de 5.200 heures de la puissance abonnée de 28.000 kw.

Ces groupes sont capables de fournir leur puissance nominale d'une façon continue :

50 % de surcharge pendant 2 heures
et 200 % » » 5 minutes.

Cette installation est prévue de manière à ce qu'un train de 2.500 tonnes absorbant 1.000 kw pendant la marche et environ 4.000 kw. pendant la montée des rampes de 2 ‰ puisse être alimenté par un seul des groupes de 1.500 kw des sous-stations travaillant à 175 % de surcharge. Pendant la descente des pentes en récupération, le train renvoie environ 2.600 kw dans le trolley et l'excitation du moteur synchrone des groupes moteurs-générateurs est prévue de manière que quelles que soient les conditions de marche, le courant alternatif haute tension absorbé ou débité par les sous-stations soit très sensiblement en phase avec la tension.

Les génératrices à courant continu sont construites avec un soin particulier et toutes les dispositions ont été prises pour leur assurer une capacité de surcharge considérable ; elles comportent en plus du champ inducteur proprement dit en enroulement de compensation distribué dans des encoches de manière à annuler presque entièrement l'inertie électrique de la machine. Malgré ces dispositions, on ne saurait demander aux générateurs à 1.500 volts de supporter directement un court-circuit franc sans amorçage d'arcs entre balais ou entre balais et masse (flash). Pour éviter la formation de ces flashes qui paraissent dus à la superposition d'une série d'arcs élémentaires jaillissant entre deux lames successives du collecteur, il semble nécessaire de couper le courant avant que ces petits arcs aient eu le temps d'établir par convection la jonction d'un balai à l'autre, c'est-à-dire, dans un temps plus court que celui nécessaire pour qu'une lame du collecteur ait tourné d'un intervalle polaire : ce temps est précisément égal à une demi-période : pour du courant à 60 périodes, environ 0<sup>s</sup>,008 ; pour du courant à 50 périodes 0<sup>s</sup>,010, pour du courant à 25 périodes 0<sup>s</sup>,020.

Cette conception un peu théorique de la formation des flashes a été vérifiée par l'expérience quand la General-Electric Co est parvenue à mettre au point des disjoncteurs à action ultra-rapide ; avec ces appareils, on peut couper le courant de court-circuit en 7 millièmes de seconde environ, l'amorçage d'arc est évité et le débit en ligne limité à environ 8.000 ampères (court-circuit franc près de la sous-station).

Ces quelques chiffres permettent de se rendre compte de la rapidité avec laquelle croît l'intensité du courant débité en ligne : elle est de l'ordre de 1 million d'ampères par seconde ; aussi, malgré l'emploi des disjoncteurs ultra-rapides, la surcharge imposée aux machines peut-elle encore atteindre 6 à 8 fois la charge normale.

Cette lutte contre les effets du court-circuit est excessivement intéressante et instructive ; elle a été conduite par des ingénieurs américains avec méthode et ingéniosité, et là aussi, ils ont remporté un plein succès.

Les dispositifs qu'ils ont imaginés et mis au point ne constituent probablement pas la solution définitive du problème, mais ils forment un ensemble parfaitement cohérent, d'un fonctionnement sûr.

Caractéristiques de quelques machines à courant continu haute tension

	NOMBRE des moteurs	PUISSANCE		EFFORT DE TRACTION au régime		POIDS		LONGUEUR totale mètres	HAUTEUR centre de gravité mètres
		uni- horaire	continue	unihoraire	continu	adhé- rent	total		
				kilos	kilos	tonnes	tonnes		
Butte Anaconda 2.400 volts	4 moteurs	1.280	1.090	13.600	11.350	68	68	11,22	»
Chicago Milwaukee- Saint-Paul 3.000 volts Locomotives à engrenages	8 moteurs	3.616	3.168	38.500	32.200	205	260	34	»
Chicago Milwaukee-Saint-Paul 3.000 volts Locomotives Gearless (voyageurs)	12 moteurs	3.240	2.760	21.000	19.000	206	240	23,30	1,45
Chicago Milwaukee-Saint-Paul 3.000 volts Westinghouse Moteurs jumelés à engrenages.	6 moteurs doubles	4.000	3.120	40.000	22.200	150	242	27,50	1,60

**Résultats généraux d'exploitation.** — Les résultats d'exploitation du Chicago Milwaukee-Saint-Paul semblent être favorables au point de vue financier puisque la Direction du réseau a décidé d'étendre à la section d'Othello à Seattle (environ 300 km) le système de traction à courant continu 3.000 volts, expérimenté sur les sections d'Avery à Harlowton (environ 700 km).

Nous ne possédons pas actuellement de résultats comparatifs complets d'exploitation électrique et à vapeur sur les sections électrifiées, néanmoins, nous devons à l'obligeance de M. Byran, Federal Manager du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, les quelques renseignements suivants qui donnent une idée de la situation résultant de l'électrification :

I. — COMPARAISON ENTRE DES DÉPENSES BRUTES DE TRACTION  
SUR LA DIVISION DES MONTAGNES ROCHEUSES  
EXPLOITÉE A VAPEUR EN 1915 ET ÉLECTRIQUEMENT EN 1916.

Dépenses par 100 tonnes kilomètres

MOIS	VAPEUR 1915		ÉLECTRICITÉ 1916	
	Marchandises	Voyageurs	Marchandises	Voyageurs
Août.....	0,2829	0,4378	0,2135	0,3819
Septembre.....	0,3207	0,4485	0,2247	0,3803
Octobre.....	0,2691	0,4403	0,2246	0,3619
Décembre.....	0,2911	0,4618	0,2190	0,3810

(Dollar compté à 6 fr.).

II. — DÉPENSES D'EXPLOITATION DE LA LIGNE D'AVERY A SEATTLE  
DU 1<sup>er</sup> JANVIER AU 31 MAI 1918.

	ÉLECTRICITÉ		VAPEUR	
	DIVISION DES		DIVISION DES	
	Montagnes Rocheuses	Missoula	Idaho	Columbia
Longueur de ligne.....	364 km.	344 km.	340 km.	325 km.
Longueur de voie.....	490 km.	505 km.	400 km.	402 km.
Tonnes kilomètres remorquées par kilom. de ligne.	1.913.141	1.537.328	994.209	1.418.692
Trains kilomètres par kilomètre de ligne :				
Marchandises.....	1.024	817	638	975
Voyageurs.....	541	482	493	463
TOTAL.....	1.565	1.299	1.131	1.439
Trains de marchandises. Tonnage moyen.....	1.866 T	1.881 T	1.558 T	1.454 T
Nombre moyen de wagons par train.....	47.42	50.41	36.07	35.94
Dépenses totales d'exploitation en francs.....	6.492.000 fr.	5.731.000 fr.	4.330.000 fr.	5.215.000 fr.
Intérêt pendant 5 mois du capital engagé (installations fixes appartenant au Chemin de fer).....	459.931,20	513.640,50	»	»
Dépense par 100 tonnes kilomètre remorquées :				
Marchandises.....	0 fr. 674	0 fr. 670	0 fr. 856	0 fr. 819
Dépense par voiture kilomètre voyageurs :	1 fr. 05	1 fr. 125	1 fr. 087	1 fr. 162

Dollar compté à 6 fr.

Il y a lieu de noter qu'à l'économie de combustible résultant directement de la substitution de la traction électrique à la traction à vapeur s'ajoute l'économie de charbon et d'huile réalisée par la suppression des trains de combustible destinés à l'alimentation des dépôts, prises d'eau, etc.

Le mouvement de matériel correspondant dépassait 30 millions de tonnes miles pour le charbon et 60 millions de tonnes miles pour l'huile en 1917, les dépenses correspondantes s'élevaient à près de 170.000 dollars.

**Influence sur les lignes télégraphiques et téléphoniques.** — Les lignes de traction à courant continu exercent nécessairement des actions inductrices sur les circuits voisins à courant faible ; mais ces actions sont peu importantes comparées à celles résultant de l'emploi du courant alternatif.

Bien que la théorie et l'expérience soient d'accord à ce sujet, il était toutefois nécessaire d'étudier de très près l'effet produit par les démarrages des trains et les court-circuits. Pour élucider entièrement la question au point de vue pratique, il a été procédé à des essais directs le long des voies du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul tant sur les lignes télégraphiques que sur les lignes téléphoniques.

Dans les circuits téléphoniques à deux fils, on constate l'existence d'un son musical très prononcé, n'empêchant pas la transmission, dû aux harmoniques de denture des génératrices, (harmonique 22 de la tension primaire). Ce bruit parasite pourra être aisément diminué, peut-être annulé, par une construction appropriée des dynamos ; il a pu être très notablement diminué par l'installation de shunts résonants accordés pour la fréquence du courant parasite.

En ce qui concerne l'action sur les induits télégraphiques à retour par la terre, il a été constaté qu'aucun trouble sérieux ne se produisait même sur des appareils imprimants d'une sensibilité analogue à celle de nos appareils Baudot. Deux télégraphes "multiplex" de la Western Union, montés en Duplex l'un à Helena, l'autre à Spokane, ont été reliés par une ligne d'environ 400 km. suivant sur une longueur de 270 km. les voies électrifiées du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, de Saltèse à Garrison. Aucun dispositif spécial de protection n'étant placé sur ce circuit, on a pu assurer pendant huit jours consécutifs un service aussi satisfaisant que sur une ligne ordinaire éloignée de tout circuit électrique.

Le démarrage des trains lourds, les court-circuits volontairement provoqués entre sous-stations n'ont apporté aucune gêne à l'exploitation télégraphique.

**Conclusion.** — Il semble bien que dans l'état actuel de l'industrie électrique, le système de traction par courant continu à haute tension soit le seul dont on puisse préconiser l'adoption en France.

Ce système fournit une solution complète et satisfaisante de tous les problèmes de la grande traction, tant au point de vue de la construction des lignes qu'à celui des machines, et on peut envisager sans aucune crainte son application étendue à nos lignes européennes. Pour la remorque de trains moins lourds et plus nombreux que ceux du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, nous pourrions nous contenter d'ailleurs d'une tension moins élevée.

Au point de vue financier, ce système donne également tout apaisement dans tous les cas où l'intensité du trafic est suffisante pour justifier un changement du mode actuel de traction car il permet l'utilisation de l'énergie produite par les centrales industrielles au minimum de prix. Il permet d'effectuer des installations qui ne sont certes pas plus coûteuses que celles entraînées par les systèmes à courant alternatif, si on tient compte des dépenses assez mal déterminées qu'entraîne la protection contre les troubles sur les lignes télégraphiques et téléphoniques.

Les dépenses d'entretien et de réparation des différentes parties du système paraissent être dans leur ensemble plus faibles que pour les autres modes de traction et à ce point de vue tous les renseignements recueillis sont absolument concordants.

En ce qui concerne enfin la réalisation même de l'électrification, il semble aussi que ce soit le système qui présente le moins d'aléa puisque toutes les Sociétés Américaines et européennes sont familiarisées avec la construction du matériel à courant continu, à moyenne et à haute tension.

Aucun obstacle sérieux ne s'oppose donc, au point de vue technique, à l'essor de l'électrification et il faut espérer que l'exécution des vastes programmes préparés par les Compagnies, pourra être poussée assez activement pour que ces grands travaux puissent produire sur notre situation économique tout l'effet qu'on en attend.