

rateur spécial qui revient plus cher qu'une machine normale. Mais, comme le choix d'une faible fréquence ne s'impose que pour de très grosses unités (cinq périodes pour 1.000 chevaux) qui justifient l'installation d'un générateur spécial, l'augmentation du prix d'achat n'intervient que pour majorer les frais d'amortissement, ce qui ne doit pas entrer en considération, vu le débit énorme de ces fours. Cependant, il serait désirable de pouvoir brancher le primaire d'un four sur un réseau à fréquence normale, surtout pour les petits fours destinés à des usages spéciaux, comme la fonderie de bronze.

Dans ce sens, Röchling-Rodenhauser a réalisé un progrès considérable en ajoutant au four Kjellin un dispositif de chauffage par résistances. D'une part, le canal en forme de huit enveloppant les deux noyaux, cela permet de réduire la section du bain et d'augmenter sa résistance ohmique. Même avec des chargements de grandeurs croissantes, il n'est pas utile d'augmenter dans la même proportion la section des deux boucles du canal de fusion, l'augmentation de volume se reportant principalement sur le foyer central. D'autre part, le facteur de puissance est encore augmenté par le fait qu'une part du courant secondaire circule dans les résistances de chauffage du foyer central. Ces fours peuvent être alimentés à la fréquence 50, même s'ils atteignent des dimensions très notables, et pour les plus grandes unités, il n'est pas nécessaire de dépasser la fréquence encore usuelle de vingt-cinq périodes.

(A suivre.)

L'ÉLECTRIFICATION DE NOS RÉSEAUX FERRÉS

Nous avons indiqué à nos lecteurs les efforts faits en vue de remplacer, avec toutes les chances de succès possible, la traction à vapeur par la traction électrique sur nos voies ferrées. Nous avons annoncé le départ d'une mission d'étude, sous la direction de M. MAUDUIT, Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy, pour l'Amérique et nous avons promis de publier le résultat de l'enquête de cette mission : un compte rendu sommaire a été adressé au Ministre des Travaux publics et publié dans le Journ. Offic. du 13 août 1919. Nous le reproduisons ci-dessous in-extenso.

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS, DES TRANSPORTS
ET DE LA MARINE MARCHANDE
COMPTE RENDU SOMMAIRE

adressé au Ministre des Travaux publics par la mission envoyée en Amérique pour l'étude de l'électrification des grands réseaux de chemins de fer.

Le ministre des Travaux publics a institué, par arrêté du 14 novembre 1918, au sein du Conseil supérieur des Travaux publics, un comité d'études chargé d'examiner les projets présentés par les réseaux de Paris-Lyon-Méditerranée, d'Orléans et du Midi, pour l'électrification de 10.000 kilomètres environ de lignes de leurs réseaux.

Ce comité, composé de techniciens les plus qualifiés de l'administration et des réseaux de chemins de fer, a cru devoir proposer au ministre d'envoyer aux États-Unis une mission d'ingénieurs spécialistes, chargée de recueillir toutes les informations relatives aux progrès récents de la traction électrique.

1°. — ORGANISATION ET COMPOSITION DE LA MISSION

Cette mission comprenait treize membres, savoir :

Commandant d'Adglards et professeur A. Mauduit, de la Faculté des Sciences de Nancy, attaché à la direction des chemins de fer, délégués du ministère des travaux publics et des transports ;

MM. Pomey, ingénieur en chef des postes et des télégraphes et Lecorbeiller, ingénieur, délégués de l'administration des postes et des télégraphes ;

MM. Debray, inspecteur principal, et Barillot, inspecteur, délégués des chemins de fer de l'État ;

M. Sabouret, ingénieur en chef adjoint à la direction ;

MM. Balling, ingénieur principal au service de la voie et Parodi, ingénieur, chef du service électrique, délégués de la compagnie des chemins de fer d'Orléans ;

MM. Japiot, ingénieur en chef du matériel et Ferrand, ingénieur au service central du matériel, délégués de la compagnie Paris-Lyon-Méditerranée ;

MM. Bachellery, ingénieur en chef adjoint à la direction, et Leboucher, ingénieur principal à la traction, délégués de la compagnie des chemins de fer du Midi.

La plupart des membres de la mission sont partis le 15 avril pour l'Amérique et sont rentrés à Paris, le 22 juillet 1919.

2°. — ITINÉRAIRE ET TRAVAUX DE LA MISSION

Arrivés à New-York, le 25 avril, nous avons pris contact avec les représentants des diverses usines de construction et compagnies de chemins de fer et visité les chemins de fer électrifiés suivants :

New-York central, courant continu à 600 volts, 3° rail ;

New-York New-Haven and Hartford, monophasé à 11.000 volts, 25 périodes ;

Pensylvania railroad et Long Island R. R. continu 600 volts, 3° rail ;

Chemins de fer de banlieue, assurant cependant un trafic appréciable de marchandises.

Nous avons également visité un certain nombre de centrales électriques puissantes à vapeur, de la Interborough Transit C° et de la Edison Power C° à New-York, ainsi que les centrales du Niagara (hydrauliques) et de Buffalo (à vapeur).

Du 8 au 10 mai, visite des ateliers de la General Electric Company (G. E. C°) à Schenectady (N. Y.) et discussion avec les principaux ingénieurs de cette société, sur les questions concernant l'électrification des chemins de fer, en général, et notamment l'électrification en courant continu à haute tension (3.000 volts) du Chicago Milwaukee Saint-Paul (710 kilomètres en fonctionnement), exécutée par cette société.

Du 11 au 25 mai, visite des installations suivantes

Electrification du Norfolk and Western railway, en courant monotriphasé, à 11.000 volts-25 périodes, de Bluefield à Vivian (Virginie).

Electrification du Pensylvania railroad, en monophasé 11.000 volts, 25 périodes, de Philadelphie à Paoli.

Chemin de fer électrique Baltimore-Washington-Annapolis, en courant continu 1.200 volts (interurbain).

Ateliers de construction de locomotives Baldwin à Philadelphie.

Ateliers de réparation et de construction du Pensylvania railroad à Altona.

Du 25 au 28 mai, visite des ateliers de la société de construction Westinghouse electric and manufacturing company,

à Pittsburg, et discussion avec les ingénieurs sur l'électrification en général et notamment sur les systèmes monophasés et monotriphasés installés par cette société, et sur les nouvelles locomotives à courant continu 3.000 volts, destinées à l'extension de la portion électrifiée du Chicago Milwaukee Saint-Paul.

Du 29 mai au 4 juin, visites diverses :

Ateliers de construction de locomotives électriques de la General Electric C^o, à Erié.

Sous-stations automatiques de tramways à 600 volts continus, modèle Westinghouse et modèle Général Electric C^o.

Chemin de fer électrique de Chicago Lake Shore and South Bend, monophasé à 6.000 volts, 25 périodes.

Du 5 au 14 juin, étude approfondie du Chicago Milwaukee Saint-Paul railway, section en exploitation de Harlowton à Avery, 710 kilomètres (Montagnes Rocheuses), section en cours d'installation de Othello à Tacoma et Seattle 360 kilomètres (Montagnes des Cascades), le tout en courant continu à 3.000 volts ; ateliers de réparation et dépôt à Deer-Lodge (Montana).

Visite de trois centrales hydrauliques de la Montana Power company, qui fournit le courant, sous forme triphasée à 100.000 volts et 60 périodes, au chemin de fer électrique ci-dessus : usine de Rainbow, 35.000 kw., usine de Great-Falls, 48.000 kw. usine de Holter, 48.000 kw., toutes les trois sur le Missouri.

La mission s'est disloquée à Seattle, le 15 juin, et quelques-uns des membres ont continué leur travail en visitant encore quelques chemins de fer électriques et un certain nombre d'installations de distribution d'énergie à très haut voltage, en vue de recueillir les renseignements nécessaires aux futures organisations en France.

Ont été ainsi successivement étudiées, les installations ci-dessous :

Central California traction company, ligne de Stockton à Sacramento (72 kilom.) en Californie, équipée avec 3^e rail renversé sous 1.200 volts continus,, unique exemple américain de l'application du 3^e rail à une tension aussi élevée.

Réseau du Pacific electric railway, tramways suburbains et interurbains aux environs de Los-Angeles à 600 volts et 1.200 volts continus.

Puget sound light and power company, centrale hydraulique de la White river, près de Seattle (Washington). 48.000 kilowatts, 55.000 volts, chute 130 mètres.

Utah power and light company : sous-station principale d'arrivée à Salt Lake City (Utah), sous-station extérieure à 120.000 volts, 25.000 kilowatts avec régulation par moteurs synchrones surexcités (à l'intérieur d'un petit bâtiment spécial.

Great Western power C^o, de San-Francisco (Californie) : usine hydraulique à Las-Plumas (Californie), sur la Teather river, chute 138 mètres, 65.000 kw. 115.000 volts ; ligne double, sur pylônes uniques, de 246 kilomètres ; sous-station d'arrivée à Oakland.

Pacific gas and electric company, à San-Francisco, usine à vapeur avec chaudières chauffées à l'huile, 57.000 kw.

Southern California Edison company de Los-Angeles : deux usines hydrauliques voisines, à Big-Creek, dans la Sierra-Nevada, de chacune 28.000 kw., 600 mètres de chute, voltage : 150.000 à 160.000 volts ; deux lignes en aluminium et acier, sur pylônes séparés de 400 kilomètres de longueur ; sous-station d'arrivée à Eagle-Rock, près de Los-Angeles, à 150.000 volts. avec régulation par moteurs synchrones.

3°. — RENSEIGNEMENTS PRINCIPAUX RECUEILLIS AU COURS DE LA MISSION

Indépendamment du rôle général de la mission, consistant à recueillir tous documents utiles sur l'électrification des chemins de fer et sur la distribution de l'énergie électrique à haute tension, le but principal de cette mission était de rechercher, en totalisant les renseignements fournis par l'étude des chemins de fer électriques suisses et italiens, d'une part, et américains, d'autre part, s'il existait un système de traction électrique pour grandes lignes nettement supérieur aux autres et susceptible d'être adopté, à l'exclusion des autres, par toutes les différentes compagnies intéressées, pour les électrifications projetées dans le centre et le sud de la France.

Des quatre systèmes de traction électrique de grandes lignes, actuellement en fonctionnement dans le monde, savoir : *monophasé*, *triphassé*, *monotriphasé* et *continu à haute tension*, le *triphassé* avait pu déjà être étudié en détail en Italie où il est employé en grand, tandis qu'il n'est utilisé d'une façon appréciable en aucune autre contrée, et le *monophasé* avait été examiné également en fonctionnement en France sur les chemins de fer du Midi et en Suisse à la compagnie du Loetochberg, et, en projet, près des chemins de fer fédéraux suisses qui ont adopté ce système pour l'électrification progressive de tout leur réseau, électrification actuellement à l'étude et même en cours d'exécution pour le chemin de fer du Gothard.

Seuls, le *monotriphasé* et le *continu à haute tension* n'existent qu'en Amérique et devaient faire l'objet principal des travaux de la mission. En même temps, l'examen des installations américaines en monophasé (à 25 périodes, alors que les installations analogues françaises sont à 16 périodes) permettraient de compléter l'étude du monophasé.

Les renseignements de toute nature recueillis en Amérique feront l'objet d'un rapport détaillé de M. Mauduit, rapport qui sera terminé au courant de ce mois et sera soumis à la sous-commission technique dès le début d'octobre, pour servir de base à la discussion d'une proposition tendant à faire choix d'un système de traction unique pour les différentes compagnies, suivant une formule à établir par cette sous-commission avec approbation du comité tout entier.

Le but de ce compte rendu sommaire est de donner seulement les résultats les plus importants et les impressions principales qui se dégagent de l'expérience américaine, avec les conclusions personnelles du rapporteur : les documents ont été recueillis par tous les membres de la mission, tantôt simultanément, tantôt séparément, mais les opinions émises dans cette note, bien qu'elles soient en général l'écho des impressions générales de la mission, sont des opinions personnelles et n'engagent que le rapporteur, tant qu'elles n'auront pas été approuvées par la sous-commission technique, en présence de tous les membres de la mission, appelés devant cette commission pour les compléter et les discuter.

4°. — ELECTRIFICATION EN MONOPHASÉ

Les principales lignes équipées en monophasé (à 25 périodes et 11.000 volts) sont le New-York, New-Haven and Hartford railroad et le Pennsylvania railroad (Philadelphie à Paoli). Bien que ces lignes soient des lignes de banlieue, elles sont intéressantes à étudier, parce que le système de traction employé est applicable aux grandes lignes et analogue à celui du Midi français, sauf la fréquence ; 25 périodes au lieu de 16.

New-York, New-Haven and Hartford railroad (102 kilomètres de route électrifiée).

L'électrification de ce réseau a été déterminée par l'ordre de l'Etat de New-York ; elle comprend une partie en courant continu à 600 volts avec 3° rail renversé, sur un tronçon commun avec le New-York central railroad, au départ de New-York.

La partie extérieure est en monophasé à 11.000 volts, avec fil aérien de contact. La nécessité de fonctionner, soit en continu 600 volts, soit en monophasé 11.000 volts, complique beaucoup l'équipement des locomotives qui doivent pénétrer dans la ville de New-York.

Le trafic est important et le fonctionnement technique convenable, après qu'on a eu à surmonter beaucoup de difficultés dans les premières années. Ces difficultés ont surtout consisté dans la lutte contre les accidents dus aux courts-circuits survenant fréquemment sur la ligne de contact ou sur les feeders d'alimentation, et contre les perturbations provoquées dans les lignes télégraphiques et téléphoniques voisines, appartenant, soit au réseau, soit à des compagnies différentes.

On est arrivé à résoudre les problèmes ainsi posés, mais au prix d'organisations complexes, délicates et onéreuses d'installation et d'entretien. Les lignes téléphoniques ont été mises en câbles sous plomb et enterrées ; la distribution du courant a été faite sous 22.000 volts, au moyen de 30 auto-transformateurs compensateurs répartis sur les 102 kilomètres de route, pour diminuer la chute de tension trop élevée dans les lignes, et réduire les influences sur les lignes télégraphiques et téléphoniques : ce dispositif remplace les transformateurs-suceurs du Midi français, avec l'avantage supplémentaire de la réduction de la chute de tension.

Le parc comprend 103 locomotives et 26 automotrices ; les frais d'entretien sont relativement élevés et le personnel des ateliers de réparation assez nombreux.

Les moteurs monophasés sont délicats et demandent une surveillance du collecteur assez soignée.

Pensylvania Railroad (lignes de Philadelphie à Paoli, 32 km. à 4 voies, et de North Philadelphia à Chesnut Hill, 20 km. à 2 voies).

Le parc ne comprend que des automotrices, pas de locomotives et le service est du type banlieue à gros trafic.

Le fonctionnement technique est bon, les moteurs n'étant pas assujettis à fonctionner à la fois sur courant continu et courant monophasé, sont d'un type plus moderne, avec meilleure commutation.

Des précautions spéciales sont prises contre les courts-circuits, et la lutte contre les influences sur les lignes télégraphiques et téléphoniques a été résolue d'une façon suffisante par la mise de ces lignes en câbles sous plomb enterrés ; l'emploi de transformateurs d'alimentation rapprochés (5 pour 52 km. de route) et de transformateurs-suceurs intercalés dans la voie à des distances très courtes en certains endroits (de l'ordre du kilomètre).

En marche normale, le fonctionnement des lignes de signalisation est suffisant, mais les courts-circuits, assez rares d'ailleurs, produisent des perturbations importantes : un dispositif enregistreur très intéressant, branché sur un fil témoin placé dans un câble, permet de contrôler à chaque moment le voltage perturbateur induit dans les lignes télégraphiques et téléphoniques.

Les installations de traction américaine en courant monophasé, spécialement à cause de la fréquence élevée adoptée (25 périodes par seconde au lieu de 16 périodes en Europe),

fréquence qui a été imposée par les conditions locales pour utiliser directement les nombreux réseaux de distribution à cette fréquence, et de l'emploi de moteurs souvent un peu moins bons que ceux que nous avons rencontrés au Midi et en Suisse, représentent un stade plutôt moins perfectionné que les installations similaires d'Europe.

Toutefois, la lutte contre les perturbations dans les lignes téléphoniques et télégraphiques y a été poussée à un degré de perfection considérable, et il y aurait certainement lieu d'en tenir le plus grand compte, si l'on adoptait, en France, ce système de traction. D'autre part, les lignes de contact à suspension caténaire sont d'une exécution remarquable.

Si nous totalisons maintenant l'expérience de France, de Suisse et d'Amérique, nous sommes amenés à conclure que le système monophasé est loin d'être au point et présente encore un certain nombre de problèmes, insuffisamment résolus dans la pratique actuelle, notamment la réalisation d'un moteur susceptible de rester suffisamment longtemps sous courant sans tourner, pour pouvoir démarrer des trains lourds dans des rampes importantes et celle du freinage électrique avec récupération.

De plus, il conduit à des complications importantes pour la protection des circuits téléphoniques voisins, ce qui augmente notablement les frais d'installation, qui, sans cette considération, seraient inférieurs nettement à ceux qu'occasionnent les systèmes triphasés et continu à haute tension.

Les dépenses d'entretien du matériel tracteur se sont toujours montrées plus élevées que dans ces deux systèmes et les moteurs sont moins robustes et susceptibles de moindres surcharges.

5°. — ELECTRIFICATION EN MONOTRIPHASÉ

Dans le système *monotriphasé*, que les Américains appellent « *splitphase* », le courant est fourni au fil de contact, unique comme dans le monophasé avec retour par les rails, sous forme *monophasée*, mais il est transformé sur la locomotive, au moyen d'un convertisseur spécial, en *courants triphasés*, et les moteurs, utilisés sur cette dernière, sont des *moteurs d'induction triphasés*.

Le but de cette disposition est de profiter à la fois du fil de contact unique du système monophasé (alors que le triphasé italien nécessite deux fils de contact aériens, en plus du rail servant de retour) et du moteur d'induction triphasé, robuste et économique, susceptible de rester sous courant sans tourner pendant plusieurs minutes et d'assurer ainsi le démarrage des trains les plus lourds, ce qu'on n'a pu, jusqu'ici, obtenir avec le moteur monophasé ordinaire à collecteur.

Il n'existe, à l'heure actuelle, qu'une ligne fonctionnant avec ce système : c'est la ligne de Bluefield à Vivian, du Norfolk and Western Railway, dans les montagnes Apalachiennes, en Virginie et Ouest-Virginie, sur une longueur de 48 kilomètres, avec voie double ou triple, nombreuses courbes et rampes atteignant 20 millimètres par mètre.

Une locomotive électrique y remorque des trains de 3.000 tonnes, principalement chargés de charbon, à la vitesse de 22 kilomètres 50 à l'heure, avec machine de renfort en queue, pour les rampes dépassant 15 millimètres par mètre.

Ces locomotives sont souples et robustes, mais leur fonctionnement présente divers défauts mécaniques et électriques qui n'ont pu être corrigés jusqu'ici d'une façon suffisante et font que cette installation ne peut être considérée encore que comme en période d'essai et que les dépenses d'entretien du matériel tracteur sont plus élevées que dans les autres systèmes.

Au point de vue mécanique, la transmission du mouvement des moteurs aux essieux, qui se fait par faux essieu et

bielles horizontales, occasionne une usure rapide des coussinets et même une dislocation du châssis ou des ruptures de bielles, par suite des efforts énormes développés lors des déplacements verticaux du châssis.

Au point de vue électrique, les principaux inconvénients sont les suivants :

Le triphasé produit par le convertisseur actuel n'est pas parfaitement symétrique et les phases ne sont pas parcourues par des courants égaux ; d'autre part, les rotors des moteurs étant fermés sur des rhéostats liquides différents, les charges ne sont jamais également réparties entre les moteurs, avec des écarts souvent considérables. Il est bien prévu un réglage de ces charges à la portée du mécanicien, mais ce dernier, très occupé, n'assure pratiquement qu'un équilibrage très imparfait et les moteurs, souvent surmenés, se détériorent assez rapidement.

Le facteur de puissance est très bas, par suite de la présence du convertisseur d'induction qui ajoute ses dépenses d'aimantation à celle des moteurs.

Pour remédier à ces divers défauts, sauf celui de la répartition de charge entre les moteurs, le constructeur étudie en ce moment l'utilisation d'un convertisseur synchrone, à bon facteur de puissance et à triphasé plus symétrique, mais il n'a pas encore été fait d'application pratique de ce nouvel appareil pour lequel on peut craindre une grande instabilité en présence des à-coups dans la ligne de contact.

Par suite des nombreuses réparations en cours et du manque de locomotives électriques du fait de la guerre, l'exploitation du tronçon Bluefield-Vivian utilise encore de nombreuses locomotives à vapeur.

Le Pennsylvania Railroad étudie, de son côté, une application du monotriphasé à la ligne à quatre voies d'Altoona à Johnstown, sur la ligne de Philadelphie à Chicago. Une locomotive d'essai est en cours d'expérimentation, mais aucune installation fixe n'est commencée sur la voie.

En résumé, le *monotriphasé*, dont le principe semblait, à première vue très intéressant et qui pouvait apporter une aide efficace au *monophasé* par l'emploi de *locomotives* ou *automotrices* en *monophasé direct* pour les *trains rapides ou légers*, et de *locomotives monotriphasées* pour les *trains lourds et lents*, toutes ces locomotives étant alimentées par le même fil de contact en courant monophasé, s'est trouvé présenter en pratique de nombreux défauts qui n'ont pu être encore corrigés, et font que ce système n'a pas répondu aux espérances qu'il avait fait naître.

6°. — ELECTRIFICATION EN CONTINU A HAUTE TENSION

Depuis longtemps déjà, le courant continu à 600 volts est utilisé d'une façon « standard », pour la traction électrique urbaine et suburbaine, soit avec fil aérien pour les tramways, soit avec 3° rail pour les chemins de fer de banlieue (ligne des Invalides à Versailles et de Paris à Juvisy, Métropolitain).

Aux Etats-Unis, la plupart des lignes interurbaines fonctionnent en courant continu à 1.200 volts, avec fil aérien ; un nombre important de ces lignes sont de véritables chemins de fer, avec trafic de marchandises et de voyageurs, atteignant des vitesses de 60 à 80 kilomètres à l'heure ; beaucoup d'entre elles, équipées originellement en monophasé à des tensions comprises entre 3.000 volts et 6.000 volts, ont été transformées en continu 1.200 volts. Le matériel correspondant à ce voltage est maintenant aussi *standardisé* que celui des tramways à 600 volts.

Encouragés par l'excellent fonctionnement de ces installations à 1.200 volts, les Américains ont essayé, avec plein succès, d'élever la tension continue à 2.400 volts et ont

équipé ainsi la ligne minière de Butte à Anaconda du Butte Anaconda and Pacific Railway (Etat de Montana), 53 kilomètres à voie unique ; ensuite a été exécutée à 3.000 volts, la plus grande électrification du monde, de Harlowton à Avery, 710 kilomètres, à simple voie, à travers les montagnes Rocheuses et la région de Missoula, sur le Chicago Milwaukee and Saint-Paul Railway.

L'électrification d'un second tronçon de 360 kilomètres, entre Othello et Tacoma-Seattle, jusqu'au Pacifique, est en cours d'exécution et fonctionnera avant la fin de l'année, et celle de la portion comprise entre Avery et Othello, environ de la même longueur, est dès maintenant décidée.

Nous avons étudié avec un soin particulier cette installation du Chicago Milwaukee and Saint-Paul ; et tous les membres de la mission ont été unanimes à reconnaître que cette électrification, de beaucoup la plus importante du monde, était en même temps très supérieure à toutes les autres, par l'excellence de son fonctionnement technique, à tous les points de vue.

L'énergie électrique est fournie par la Montana Power Company, sous forme de courants triphasés à 100.000 volts, et transformée en courant continu à 3.000 volts, dans des sous-stations rotatives, comprenant des moteurs générateurs, qui sont constitués par un moteur synchrone et deux dynamos à courant continu, montées sur le même arbre et accouplées électriquement en série, de façon à produire chacune 1.500 volts seulement sur son collecteur.

Ces sous-stations sont la partie la plus délicate et la plus onéreuse de ce système de traction ; mais elles sont au nombre de quatorze seulement pour 710 kilomètres (environ tous les 50 kilomètres) et ont un fonctionnement excellent. Elles nécessitent seulement chacune un personnel de trois hommes) un chef et deux aides pour une marche permanente, avec une puissance de 4.000 ou 6.000 kilowatts. Par l'emploi de dispositifs protecteurs sur les collecteurs, et d'interrupteurs extra-rapides dans le circuit général, on est arrivé à supprimer les accidents résultant du phénomène le plus redoutable avec le courant continu : le coup de feu au collecteur (appelé souvent flash ou flache), en cas de court-circuit.

L'excellente mise au point de l'organisation de ces sous-stations est pour beaucoup dans le succès obtenu par le courant continu à haute tension.

A la tension relativement faible de 3.000 volts sur la ligne de contact (au lieu de 11.000 à 15.000 volts, pour le monophasé) correspond une grande intensité de courant à capter pour la traction des trains lourds. L'expérience a montré qu'avec un fil de contact double, et un archet pantographe à double sabot et quadruple contact, on capte facilement 1.500 à 2.000 ampères à la vitesse de 80 à 96 kilomètres à l'heure, et 4.000 ampère à la vitesse de 25 kilomètres à l'heure, ce qui est plus que suffisant pour les trains les plus lourds et les puissances les plus grandes.

Les locomotives sont d'une grande facilité de conduite et d'un fonctionnement parfait, le moteur série à courant continu étant d'ailleurs le moteur idéal pour la traction, comme l'a depuis longtemps montré l'expérience, de tramways et chemins de fer électriques de banlieue. Elles sont pourvues d'un freinage électrique avec récupération, merveilleusement réglable, qui assure la marche la plus souple dans les descentes et occasionne une économie importante de courant et surtout de bandages et de sabots de frein. Un seul bobineur, avec un aide, assure l'entretien des 336 moteurs des 42 locomotives en service ; l'ancien dépôt de locomotives à vapeur de Deer Lodge, correspondant à 360 kilomètres de

lignes, a suffi largement pour l'installation du dépôt des locomotives électriques et des ateliers de réparation, pour la longueur totale électrifiée, soit 710 kilomètres.

Une seule locomotive remorque les trains de voyageurs de 900 à 1.000 tonnes américains (1) même dans les rampes de 20 millimètres par mètre ; les trains de marchandises de 2.800 tonnes américaines sont traînés par une seule locomotive dans les rampes de 10 millimètres (l'effort de traction est alors de 32,8 tonnes métriques) et par deux locomotives pour les pentes supérieures. Le poids remorqué moyen par train de marchandises est d'environ 1.900 tonnes américaines. Dans les trains comportant deux locomotives, la seconde machine est placée au milieu du train et non à la queue ; il faut d'ailleurs remarquer que la dérive n'est pas à craindre en Amérique, tous les trains de marchandises, comme ceux de voyageurs, étant munis du frein automatique à air comprimé, sur tous les wagons.

Un avantage considérable du système de traction à courant continu est qu'il ne semble apporter que des perturbations insignifiantes aux lignes télégraphiques et téléphoniques ; nous avons pu nous rendre compte qu'on téléphonait fort bien sur les lignes de service du chemin de fer placées tout le long de la voie en fil aérien, sans appareil de protection.

Un appareil télégraphique imprimeur multiplex, faisant le service entre Spokane et Helena à travers un circuit à retour par la terre, détourné spécialement pour nous, de façon à emprunter un fil placé sur les poteaux du chemin de fer électrique sur une longueur de 270 kilomètres, a fonctionné parfaitement pendant huit jours, sans même être troublé par trois courts-circuits francs faits intentionnellement, entre le fil de contact et le rail, sur le trajet du fil télégraphique.

Malgré la perte d'énergie due à la transformation du courant triphasé en courant continu dans des sous-stations rotatives tournant d'une façon permanente, quelle que soit la charge, alors que le nombre journalier de trains est assez réduit, savoir : deux trains de voyageurs et trois à quatre trains de marchandises dans chaque sens, le rendement de la traction est bon, 27 watt-heures par tonne métrique-kilomètre remorquée, ce qui correspond à un rendement global de 50 p. 100 depuis l'énergie achetée au producteur jusqu'au crochet d'attelage.

7°. — CONCLUSIONS RELATIVES AU CHOIX D'UN SYSTÈME DE TRACTION ÉLECTRIQUE

Devant les résultats remarquables obtenus par le Chicago Milwaukee Saint-Paul, en courant continu à 3.000 volts, le rapporteur n'hésite pas à conclure formellement en faveur de l'adoption de ce système, qu'il estime être actuellement le seul véritablement au point, pour la traction électrique des grandes lignes.

Il est possible qu'avec le monophasé qui présente, à première vue, l'avantage de se prêter à une grande variété de combinaisons, on arrive un jour à un fonctionnement satisfaisant, mais il est hors de doute que la pratique actuelle est loin de cet état désirable de mise au point.

Le courant continu présente l'inconvénient d'être un peu plus onéreux de première installation, à cause des sous-stations rotatives destinées à transformer le courant triphasé à 50 périodes généralement produit dans les centrales ; toutefois, il faut remarquer que, pour bénéficier d'une économie à cet égard avec le monophasé, il faut engendrer directement ce courant monophasé à faible fréquence (16 périodes) au moyen de groupes électrogènes spéciaux, faute de quoi, si l'on veut utiliser le courant produit normalement par les

centrales (triphase à 50 périodes), il faut recourir à la transformation rotative aussi bien avec le monophasé qu'avec le continu. A ce point de vue, le courant continu offre l'avantage de se prêter à l'utilisation du courant de n'importe quelle centrale, dans les mêmes conditions.

En ce qui concerne la dépense d'exploitation, des calculs complets et précis faits par les services techniques des compagnies pourront seuls établir la comparaison entre les divers systèmes ; le rapporteur estime toutefois que l'écart ne sera pas considérable et n'aura pas à entrer en ligne de compte pour le choix du système.

L'absence presque complète de perturbations sur les lignes téléphoniques et télégraphiques constitue, pour le courant continu, une supériorité très considérable sur les autres systèmes.

Nous n'avons pas parlé du triphasé qui n'a en Amérique qu'une application locale insignifiante ; malgré certains avantages obtenus par les Italiens, nous sommes d'avis de le rejeter, spécialement par suite de la complication et du prix élevé d'installation et d'entretien de ses deux grandes lignes de contact.

8°. — CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES SUR LA TRACTION ÉLECTRIQUE

Au point de vue économique, les documents que nous rapportons d'Amérique sont beaucoup moins complets et moins précis que les renseignements techniques.

D'autre part, il est nécessaire, pour conclure de l'expérience américaine à l'avenir économique de la traction électrique européenne, de faire subir aux chiffres des modifications considérables, à cause des deux principales constantes qui différencient l'exploitation américaine de l'exploitation européenne :

1° En Amérique, l'attelage employé a une résistance à la rupture d'environ 135 tonnes, et on peut admettre des efforts de traction allant jusqu'à 40 tonnes ; en Europe, les attelages sont de deux modèles, dont les résistances à la rupture sont respectivement 35 et 55 tonnes, et les efforts de traction admis sont limités à 10 tonnes (exceptionnellement 12 à 15 tonnes, en Suisse) ;

2° En Amérique, tous les wagons de voyageurs et de marchandises sont munis du frein à air comprimé.

Il résulte de là qu'on emploie en Amérique des locomotives deux à trois fois plus puissantes, des trains de marchandises deux à trois fois plus longs et plus lourds qu'en Europe, et que le personnel de conduite des trains de marchandises est relativement beaucoup moins nombreux, ce qui modifie complètement les dépenses d'exploitation.

Des calculs précis faits par les compagnies et surtout les résultats des premières électrifications exécutées et la considération des prix exacts du charbon, pourront seuls permettre de savoir dans quelles conditions la traction électrique sera plus économique que la traction à vapeur ; on sait déjà, d'ailleurs, que l'économie sera surtout sensible sur les lignes à grandes déclivités et à grand trafic et il est probable que pour beaucoup de lignes s'écartant par trop de ces conditions, la traction électrique sera plus onéreuse que la traction à vapeur.

Toutefois, la nécessité, de plus en plus importante, d'économiser le charbon et les grands avantages accessoires bien connus de l'électrification rendent nécessaire l'exécution la plus rapide possible des premiers travaux en vue de l'électrification progressive des lignes les plus intéressantes de nos réseaux du P. O., du P.-L.-M. et du Midi.

A. MAUDUIT,

Professeur d'Electrotechnique à l'Université de Nancy.