ÉLECTRICITÉ

L'électrification des Chemins de fer Suisses et Italiens⁽¹⁾

par M. TRUFFAT, Ingénieur au Service des Grandes Forces Hydrauliques du Sud-Est.

MESSIEURS,

M. le Directeur de l'Institut Polytechnique a pensé, et je lui en reste très reconnaissant, que quelques mots pourraient vous intéresser, où je résumerais les conclusions du voyage que j'ai fait au début de l'année en Suisse et en Italie, pour y étudier la traction électrique.

Aujourd'hui, je laisserai de côté, autant que possible, les détails d'exécution qui nous encombreraient, pour pouvoir vous résumer plus clairement les questions fondamentales qui se posent à propos de l'électrification d'un grand réseau et les très diverses solutions qu'y ont données la Suisse et l'Italie.

L'analyse des résultats obtenus peut être fort instructive

Pour discuter l'avantage financier qui peut résulter de l'électrification d'une ligne ou d'un réseau, le procédé est simple à énoncer : établir des bilans comparables dans l'hypothèse de la traction à vapeur, et dans celle de la traction électrique, et mettre les chiffres en balance ; mais il est difficile à mettre en pratique, vous le comprenez et je n'insisterai pas, sur la difficulté, que vous connaissez bien, d'établir des bilans sérieux, puisqu'elle est encore accrue dans ce cas par la nécessité de le faire sur des bases hypothétiques.

Cependant cette comparaison doit être faite, puisqu'elle seule décide, en définitive, si l'on a raison ou non, d'électrifier. Les chemins de fer fédéraux suisses (en abrégé C. F. F.) ont présenté

pour la France ; car avec l'Amérique, et par suite de raisons que nous passerons en revue plus loin, ces deux nations nous ont précédés et marchent d'un bon pas dans la voie de l'électrification des chemins de fer, où notre pays s'engage plus timidement.

I.

FAUT-IL ÉLECTRIFIER ?

ET SUR QUELLES LIGNES DE PRÉFÉRENCE ?

Telle est évidemment la première question qui se pose ; et pour y répondre, il faut envisager les diverses raisons qui peuvent pousser une nation à électrifier ses chemins de fer. De toutes, la raison financière est en général la plus importante, mais souvent aussi d'autres considérations doivent intervenir : commodités du trafic, indépendance nationale, etc... ; nous les passerons en revue tout à l'heure.

(1) Conférence faite, le 21 mars 1927, aux élèves et anciens élèves de l'Institut Polytechnique de Grenoble.

à la Conférence mondiale de l'énergie (Bâle 1926) l'étude économique qu'un de leurs très distingués ingénieurs, M. Jobin, a faite dans ce sens. Je vais l'analyser dans ses grandes lignes.

Les calculs sont menés en supposant que le réseau se trouve dans l'état où il est prévu à la fin de 1928, c'est-à-dire avec 1.566 km. de voies électrifiées sur 2.874 km. de voies ferrées, soit près de 55 %. Diverses valeurs ont été choisies *a priori* pour le trafic, égales ou inférieures à la valeur de 1913, dernière année normale. Il y a, en effet, une double raison pour penser que la densité du trafic augmentera sur le réseau électrifié : d'abord parce que, normalement, le trafic va en augmentant, et ensuite parce que, sur les lignes électrifiées, où le prix de revient de la tonne kilométrique en sus se trouve abaissé, comme nous le verrons plus loin, le trafic est attiré aux dépens des voies concurrentes. Dans l'impossibilité de fixer exactement le trafic en 1928, les bilans ont été assis en donnant *a priori* à ce trafic inconnu diverses valeurs : 80%, 100%, 120%, 140% du trafic de 1913, ce dernier étant égal à 6,80 milliards de tonnes-km. remorquées.

Je passe sur les diverses évaluations du bilan des C. F. F. pour arriver immédiatement à l'analyse de la balance finale :

« Coût de l'exploitation électrique par rapport à l'exploitation à vapeur. »

1^o AUGMENTATION DES DÉPENSES ANNUELLES DU FAIT DE L'ÉLECTRIFICATION

a) *Coût de l'énergie électrique fournie par les sous-stations.* — Cette énergie est loin d'être proportionnelle au trafic. Au contraire, les C. F. F. produisant eux-mêmes leur énergie, leurs frais, comme pour tous les producteurs d'énergie hydro-électrique, sont composés en majeure partie de frais fixes.

Les 16 millions $\frac{1}{2}$ qui représentent le prix des kwh., correspondant au trafic de 1913, peuvent se ventiler ainsi : une somme constante de 14 millions correspondant aux charges du capital de premier établissement de 235 millions de francs. Les 2 millions et demi, qui restent, représentent les frais susceptibles de varier proportionnellement au trafic.

b) *Frais d'exploitation de l'équipement électrique.* — Nous trouvons ici une charge fixe de 12,1 millions de francs.

c) *Surplus des frais d'exploitation du matériel roulant électrique par rapport au matériel roulant à vapeur.* — Là se trouve la comparaison la plus délicate peut-être de tout le bilan ; mais elle intervient assez peu. On peut la résumer ainsi : les locomotives électriques sont moins nombreuses pour assurer un trafic donné que les locomotives à vapeur, mais elles coûtent plus cher d'achat et d'entretien. Pour les matériels suisses, ces différences se compensent à peu près exactement, et de leur comparaison il y a à retenir seulement que, tout compte fait, au point de vue des dépenses de matériel roulant, la vapeur et l'électricité se serrent de près.

2^o ECONOMIES RÉALISABLES PAR SUITE DE L'ÉLECTRIFICATION

a) *Economies de charbon.* — Là va intervenir la deuxième incon- nue principale de la comparaison des tractions à vapeur et élec- trique : c'est le prix du charbon ; la première étant, je vous le

Comparaison économique de la traction électrique et de la traction à vapeur pour le réseau des chemins de fer fédéraux

Données générales concernant le trafic et l'énergie du réseau des CFF qui sera électrifié fin 1928.				
Réseau électrifié en km.....				
1566				
	80 %	100 %	120 %	140 %
Trafic en fonction du trafic de 1913.....	5,45	6,80	8,15	9,50
Trafic en milliards de tonnes-kilomètres remorquées.....	7,60	9,5	11,40	13,30
Trafic en milliards de tonnes-kilomètres, locomotives comprises.....				
Energie fournie aux bornes des génératrices des usines des CFF en millions de kWh.....	260	330	390	430
Energie fournie par des usines n'appartenant pas aux CFF en millions de kWh	20	20	20	60
Energie débitée par les sous-stations en millions de kWh.....	252	315	378	441
Energie débitée par les sous-stations en moyenne par jour et par km électrifié en kWh	440	550	660	770
Quantités de charbon de 7500 calories économisées en mille tonnes par an	380 à 400	475 à 500	570 à 600	665 à 700
Charbon économisé en moyenne par jour et par km électrifié, en kg. .	665 à 700	830 à 875	1000 à 1050	1170 à 1225
Matériel roulant : locomotives et automotrices électriques nécessaires..	308	385	462	539
Locomotives à vapeur remplacées.....	400 à 480	500 à 600	600 à 720	700 à 840
Capital engagé (sans le renchérissement de guerre).				
	millions de fr.	millions de fr.	millions de fr.	millions de fr.
Coût des usines, lignes de transport et sous-stations des CFF, état définitif	235	235	235	235
Coût de l'équipement des lignes, y compris les modifications apportées aux installations existantes.....	180	180	180	180
Coût du matériel roulant électrique, y compris les frais d'installation du chauffage électrique dans les wagons.....	152	190	228	266
Total	567	605	643	681
Coût des locomotives à vapeur éliminées (sur la base d'un prix de 50 à 70 % supérieur aux prix d'avant guerre).....	96	120	144	168
Coût de l'exploitation électrique par rapport à l'exploitation à vapeur				
	millions de fr.	millions de fr.	millions de fr.	millions de fr.
Augmentation des dépenses annuelles du fait de l'électrification.	Coût de l'énergie électrique fournie par les sous-stations	16,0	16,5	17,0
	Frais d'exploitation de l'équipement des lignes..	12,1	12,1	12,1
	Surplus des frais d'exploitation du matériel roulant électrique par rapport au matériel roulant à vapeur.....	0,6 à 1,5	0,7 à 1,8	0,8 à 2,1
	Augmentation totale des dépenses	28,7 à 29,6	29,3 à 30,4	29,9 à 31,2
Economies réalisables par suite de l'électrification.	soit en chiffre rond.....	29	30	31
	Economie de charbon, au prix de fr. 42. — 1 ^{re} tonne à la frontière (= fr. 52. — sur tender)	16,0 à 16,8	20 à 21	24 à 25,2
	Economie de frais de transport et de manutention du charbon à raison de fr. 10. — par tonne.	3,8 à 4,0	4,7 à 5,0	5,7 à 6,0
	Economies de personnel de traction, des trains et de dépôt	3,6 à 5,2	4,5 à 6,5	5,4 à 7,8
	Economies diverses d'eau, d'entretien de la voie et des wagons	1	1	1
	Total des économies réalisables.....	24,3 à 26,9	30,2 à 33,3	36,2 à 40,1
soit en chiffre rond.....				
	26	32	38	44

rappelle, le trafic pour lequel nous nous sommes donné *a priori* diverses valeurs. Pour chacune, nous pouvons évaluer combien de tonnes de charbon seront remplacées par des kwh., l'économie qui en résultera variera avec le prix du charbon livré sur tender, et une étude pour être complète est obligée d'établir des bilans correspondant aux divers cours du charbon, en même temps qu'aux diverses valeurs du trafic. Un moyen classique de grouper les résultats est de déterminer pour un trafic donné, ce que l'on appelle le prix équivalent du charbon, qui marque le cours limite de part et d'autre duquel le remplacement par l'énergie électrique est avantageux ou ne l'est pas.

Les C. F. F. ont évalué leur économie de combustible pour des prix du charbon sur tender variant de 6 fr. en 6 fr. depuis 28 fr. la tonne jusqu'à 64 fr. A l'inverse de ce qui se passe pour l'énergie électrique, qui comporte une grande part de frais fixes, la dépense

c) *Economies diverses.* — Un million, dû principalement à la suppression de la consommation d'eau et de la fumée.

La comparaison est très clairement résumée dans le graphique ci-contre, qui représente, en fonction du trafic : d'une part, le total des économies (gros trait continu), d'autre part, le total des dépenses (gros trait pointillé) énumérés dans ce tableau.

La série des courbes, trait fin pointillé, représente les économies évaluées pour divers prix du charbon sur tender.

Les C. F. F. ont également tracé les courbes, trait fin continu, représentant leurs dépenses dans le cas où ils achèteraient leur énergie à différents prix.

Sur ce graphique, je ferai simplement la remarque suivante. Considérez les courbes en gros trait. L'une, qui représente les frais de la traction électrique, est presque horizontale; elle est caractéristique d'une industrie où les frais de premier établissement sont considérables par rapport aux charges proportionnelles à la production. L'autre, qui représente les dépenses qui seraient entraînées par la traction à vapeur, est au contraire à peu près en proportion de la production. L'électricité réalise donc dans les transports un progrès de même nature que celui

Les économies réalisables grâce à l'électrification des C. F. F. sont indiquées par le pointillé gras BCFF qui correspond à la série des chiffres 26, 32, 38, 44 du tableau. Les pointillés B₁₈, B₂₄, B₃₀, etc., donnent les économies réalisables avec des prix de charbon de fr. 18, 24, 30, etc., franco à la frontière.

en charbon serait exactement proportionnelle au trafic. Calculée pour le trafic de 1913 sur un prix de 42 fr. pour le charbon sur tender, elle est égale à 25 millions environ de francs suisses.

b) *Economies de personnel.* — Moins d'hommes sont en effet nécessaires pour assurer le service du transport sur un réseau électrifié, car la vitesse moyenne étant plus grande, les parcours du personnel « roulant » peuvent être augmentés; d'autre part, le matériel électrique exige moins de personnel pour son entretien.

que la vapeur avait réalisé par rapport au roulage. Tout à l'avantage de la production en grand, il se résume ainsi :

Augmentation des frais de premier établissement, mais en revanche, diminution du prix de revient de la tonne kilométrique en sus.

Un autre avantage, qui peut être très important dans certains cas, se trouve réalisé par la meilleure utilisation de la voie ferrée elle-même, par suite de l'augmentation de la vitesse moyenne. Celle-ci est due d'ailleurs moins à l'augmentation de la vitesse maximum en palier que de la vitesse minimum en rampe, qui est accrue dans des proportions considérables. Ainsi sur la ligne du Gothard, pour une pente de 26 pour 1000, la locomotive à vapeur la plus lourde et la plus moderne ne pouvait remorquer qu'un train de 300 tonnes à la vitesse de 25 km. à l'heure, alors que les locomotives électriques tirent sur la même rampe 430 tonnes à la vitesse de 35 km. Les gains sur l'horaire réalisés par la traction électrique seront donc particulièrement importants sur les lignes à fortes pentes.

Un exemple que je trouve impressionnant en sera donné par la ligne italienne Benevento-Foggia. La seule transformation

faite sur cette ligne à simple voie sera l'électrification et l'on compte que le trafic en sera presque instantanément doublé. Les conditions économiques exigeraient qu'il le soit déjà, mais avec la traction à vapeur, la ligne est saturée par 4.000 tonnes de trafic dans un sens et dans l'autre, et le surplus, de 3.000 tonnes, doit s'écouler par d'autres lignes plus longues et plus chères. Aussi est-il tout à fait naturel de penser que dès qu'elle sera électrifiée, cette ligne travaillera de nouveau jusqu'à sa saturation. Le profil étant très accidenté, les gains sur l'horaire seront importants et l'on pourra voir quelle sera l'augmentation de trafic qui résultera de l'électrification seule.

Nous venons d'examiner les considérations financières qui peuvent pousser à l'électrification, mais il y en a souvent aussi d'autres bien différentes.

Ce sont parfois d'impérieuses nécessités d'indépendance nationale. Elles ont été mises en nette évidence, plus encore que chez

ayant trait au tourisme. Inutile d'insister sur ces points bien connus.

D'autres fois, pour des services ayant le caractère de service de ville ou de banlieue, les locomotives à vapeur ne sauraient être tolérées comme dans les métropolitains et dans les lignes de banlieue des grands centres habités.

Il faut remarquer à ce propos que l'électrification des tronçons situés dans les villes, des gares terminus, peut tirer un avantage de l'augmentation de la valeur même de la propriété aux abords des gares électrifiées. Un immeuble près d'une gare électrifiée a plus de valeur que près d'une gare équipée à la vapeur. On conçoit que dans certains cas, cet avantage puisse être considérable pour la collectivité.

Donc, pour établir s'il y a intérêt ou non à électrifier une ligne ou un système de lignes, il faut examiner tout un ensemble de circonstances et de nécessités variables suivant les cas et d'une

nous, en Suisse et en Italie, pendant la dernière guerre, et pendant la période d'après-guerre de la pénurie européenne du charbon. Alors se sont montrés les embarras cruels où peut se trouver une nation qui ne trouve pas chez elle l'énergie, de quelque nature qu'elle soit, nécessaire à ses transports. Une telle nation se trouve paralysée, sa vie économique arrêtée, précisément dans des circonstances d'une gravité exceptionnelle où elle aurait besoin de la plus grande liberté de ses mouvements. Un exemple entre mille : même en encrassant ses locomotives avec le chauffage au bois ou au charbon de qualité inférieure, la Suisse fut obligée pendant 6 mois, du 2 décembre 1918 au 7 juillet 1919, de suspendre le transport des voyageurs les dimanches et les jours fériés.

Ce sont parfois des considérations sur la gêne, fort grave, causée par la fumée, surtout dans les lignes ayant la plus grande partie de leurs parcours en tunnel, ou encore des considérations

nation à l'autre ; il serait évidemment absurde de croire qu'il est possible de résoudre ces questions au moyen de formules ou de règles.

Il semble toutefois qu'un bon moyen de résumer l'ensemble de la question est de citer la liste de préférence que dresse Mister Budd, président de la Great Northern Railway Company, pour l'électrification des diverses lignes du réseau américain. Il classe, par ordre d'urgence :

a) Les lignes de montagne en rampe très forte, où l'énergie hydro-électrique est à bon marché ;

b) Les tronçons et gares terminus, pour les avantages contingents locaux que l'on peut obtenir, parmi lesquels il faut mettre l'augmentation de la valeur même de la propriété aux abords, augmentation qui, malheureusement, est difficilement récupérable par les chemins de fer eux-mêmes ;

c) Les tronçons de ligne qui sont très fatigués par le trafic, ou qui sont à la limite de leur capacité dans les conditions actuelles de leurs installations, ce qui rendrait nécessaire, par conséquent, un plus fort développement de la plateforme et de ses dépendances que l'électrification peut retarder ou même éviter ;

d) Enfin les lignes de montagne avec trafic lourd, surtout pour les transports de charbon, celui-ci offrant une condition de facteur de charge constant et élevé.

Les raisons qui poussaient à l'électrification sont particulièrement puissantes en Suisse et en Italie ; en effet, le charbon de qualité y manque à peu près totalement, alors que l'énergie électrique peut être produite sur place et à bon marché par des centrales hydrauliques ou même thermiques à combustibles inférieurs. Il faut ajouter pour toute la Suisse et pour la partie électrifiée ou à électrifier de l'Italie, que les profils sont à pente particulièrement forte et les tunnels spécialement nombreux.

Barrage de l'Usine d'Anversa

Aussi ne devons-nous pas nous étonner de trouver ces deux pays à la tête de l'électrification des chemins de fer.

En Suisse, un programme élaboré en 1918 prévoyait l'électrification en trois étapes de 10 ans, de tout le réseau des chemins de fer fédéraux. Ce programme d'électrification complète a été modifié, pour être réalisé plus rapidement. L'étape en cours de

réalisation doit se terminer en 1928 ; elle prévoit que 55,5% des 2.968 kilomètres à voie normale seront électrifiés et ce pourcentage représentera les trois quarts environ du trafic, total grâce à un choix judicieux des lignes à électrifier. Quant aux chemins de fer à voie étroite, la proportion des lignes électrifiées atteindra 88,5% de la longueur totale de 1.225 km. Ce sont les pourcentages de traction électrique les plus élevés du monde et de beaucoup.

L'Italie compte également avoir électrifié, en 1928, 1.600 km. de voies, longueur à peu près égale à celle qu'aura transformée la Suisse à la même époque.

Les premières lignes électrifiées furent les lignes de montagne Varesine-Valtelline. Puis vint l'électrification des lignes du Giovi : rampes très fortes, longs tunnels : électrification qui augmenta dans des proportions considérables les débouchés du port de Gènes. Après le ralentissement dû à la guerre, l'électrification a repris sa marche normale, s'attaquant encore de préférence aux lignes de montagne à fort trafic. A l'heure actuelle, les 5,4% du réseau italien sont électrifiés et ils entrent pour une proportion de 10,9% dans le trafic total. Ceci, grâce à un choix remarquable des lignes à électrifier en premier lieu.

Mais ces statistiques sont un peu ennuyeuses et je préfère grouper d'un mot les efforts de la France, de la Suisse et de l'Italie. Grâce à ces pays, l'Europe aura bientôt des parcours de chemins de fer internationaux Culoz-Gênes, Livourne et Zurich-Simplon-Gênes-Livourne qui pourront faire pendant à l'artère électrique transcontinentale américaine de Chicago à Milwaukee-Saint-Paul et Seattle sur le Pacifique, dont les deux sections déjà électrifiées, celle de la Côte et celle des Montagnes Rocheuses ont un développement de 330 et 710 km. environ respectivement.

II.

QUELS SYSTÈMES FAUT-IL ADOPTER, POUR L'UTILISATION, LE TRANSPORT, LA PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DESTINÉE A LA TRACTION ?

Nous abordons là le côté purement technique du problème. Qu'on ne croit d'ailleurs que ce soit avec la prétention de le résoudre.

En résumé, le cycle de l'énergie électrique destinée à la traction est le suivant : cette énergie est produite et transportée, toujours sous la forme alternative, jusqu'à une sous-station où elle change le plus souvent soit de nature, soit de fréquence ; de cette sous-station, elle est envoyée par la ligne de contact jusqu'au locomoteur, sous une des trois formes : continue, monophasée ou triphasée basse fréquence.

L'énergie ne subit donc de changement de nature ou de fréquence que dans la sous-station entre la ligne de transport et la ligne de contact ; partout ailleurs, elle ne subit que des changements de tension. Cette sous-station divise donc le réseau en deux parties où la nature de l'énergie peut être différente.

Je ne citerai que pour mémoire le système où le changement de nature de l'énergie se fait sur le locomoteur même, qui reçoit du monophasé et le transforme en continu pour les moteurs de traction. Ce système étudié au laboratoire, n'a encore fait l'objet d'aucune application réellement industrielle.

Sauf ce cas exceptionnel, le problème technique peut donc se diviser en deux :

1° Quelle forme d'énergie, la plus commode pour le transport

à petite distance et l'utilisation par les moteurs, choisirons-nous pour les lignes de contact et les locomoteurs ?

2^o Quelle forme, la plus commode pour la production et le transport à grande distance, choisirons-nous pour les usines et les lignes de transport ?

Aujourd'hui, je me contenterai de quelques mots sur la question du locomoteur et de la ligne de contact. Elle est fort complexe ; en effet les systèmes sont nombreux ; même en nous bornant aux systèmes effectivement en service, nous trouvons : le continu à 3.000 v. à 1.500 v. à 750 v. ; le monophasé ou le triphasé basse fréquence haute tension ; le triphasé à fréquence industrielle ; et j'en passe, tel le monotriphasé. Tous ont leurs avantages et leurs inconvénients techniques ; et à l'heure actuelle le choix que l'on en fait semble varier essentiellement suivant les cas particuliers. Ainsi, en Amérique, dans la ligne Chicago-

pêche pas d'ailleurs de penser qu'il ne manque qu'une légère amélioration à son moteur pour faire du monophasé le triomphateur des installations nouvelles.

De l'étude technique, que je ne ferai pas des divers locomoteurs et de leurs lignes de contact, je ne vous dirai que la conclusion suivante parce qu'elle influe sur la question suivante de la production de l'énergie : « La traction électrique a besoin d'un courant spécial, autre que le courant industriel qui est le triphasé d'environ 50 périodes. » Le courant de traction est soit le continu, soit le monophasé ou le triphasé basse fréquence (16 périodes $2/3$ en Europe).

A cette règle générale, il y a cependant une exception sur la ligne Rome-Sulmona en cours d'électrification, le système employé est le système triphasé, fréquence industrielle (45 périodes). Les autres caractéristiques de la ligne, qui présentent quelque intérêt sont les suivantes : la tension de la ligne de con-

Milwaukee-Saint-Paul, le continu paraissait si merveilleux que pour lui la France abandonna le monophasé et voici qu'aujourd'hui le Virginian Railway reprend en Amérique ce même monophasé. Si la Suisse est tout à fait satisfaite de son réseau monophasé, c'est peut-être que les trains n'y sont ni très lourds ni très rapides ; et l'Italie n'a pas voulu choisir entre le triphasé et le continu, qu'elle a décidé de garder tous deux, l'un au nord, l'autre au sud.

De fait, si les avantages et les inconvénients inhérents à chaque système sont parfaitement connus qualitativement, ni l'expérience ni le raisonnement n'ont pu les chiffrer pour les comparer. Avec la technique actuelle, les divers systèmes sont si proches les uns des autres que leur comparaison *a priori* est certainement illusoire. Si l'on regarde ce qui se passe dans l'ensemble du monde, on peut voir que le triphasé est stationnaire, le continu en progrès, le monophasé en recul, mais cette constatation ne m'em-

tact atteint 10.000 volts. La longueur de la ligne est de 150 km. Il n'y a que quatre sous-stations à une distance moyenne de 40 km., distance qui n'a pu être atteinte que parce que la tension dans la ligne de contact est exceptionnellement élevée. La ligne primaire à 60.000 volts sera alimentée en partie par la centrale d'Etat d'Anversa en construction, en partie par des centrales privées. Dans cette tentative, le point particulièrement intéressant sera la manière dont se comporteront les moteurs triphasés de traction sous cette fréquence de 45. Des essais déjà faits sur la portion Rome-Tivoli n'avaient pas fait ressortir de résultats réellement satisfaisants. Des perfectionnements ont été apportés aux locomoteurs. Attendons que l'expérience en précise la valeur.

Sauf dans ce cas spécial de l'utilisation directe du courant industriel sans autre changement qu'un abaissement de tension à la sous-station, la production du courant de traction doit se

soumettre à l'une des deux sujétions suivantes : soit produire et transporter l'énergie sous la nature et la fréquence spéciales à la traction ; soit produire et transporter l'énergie sous la forme industrielle, mais transformer dans les sous-stations sa nature ou sa fréquence.

Entre les deux systèmes actuellement employés, il est d'ailleurs un cas où le doute n'est pas possible. Dans la traction par courant continu, on ne peut songer à transporter sous cette forme sur de grandes distances les quantités d'énergie nécessaires. On les transportera donc sous la forme triphasée ordinaire. Dans ce cas la question est tranchée, le changement de nature du courant est indispensable.

La question ne se pose donc que pour les modes de transports à traction alternative. Voyons quels seraient les résultats que donnerait l'application intégrale de l'une ou l'autre solution.

Dans la première conception de la production et du transport spéciaux aux chemins de fer, leur réseau constituerait un tout à soi bien distinct et presque isolé du réseau général à caractéristiques industrielles.

A l'opposé de cette conception schématique, se place l'autre conception, non moins schématique, où les systèmes de consommation d'énergie des chemins de fer s'insèrent dans le système général de production et de transport de l'énergie électrique. Ce système se base sur la liaison entre eux du plus grand nombre possible de centres régionaux de production d'énergie et se charge de la distribution de cette énergie par des lignes de capacité appropriée, tracées rationnellement et construites avec tous les soins et toutes les précautions de l'art. On a donc ainsi un réseau unique, dont l'alimentation est assurée par plusieurs sources de production, placées à différents endroits, ayant des caractéristiques se complétant si possible aux diverses époques de l'année, et qui peut par conséquent offrir un coefficient de sécurité très élevé pour la régularité et la continuité des fournitures qui, en outre, s'effectuent même à un prix unitaire plus économique.

Ce réseau parfait n'existe pas. Il n'est esquissé qu'en Italie et c'est déjà un résultat magnifique de voir surtout dans l'Italie du Nord les mailles serrées des réseaux de distribution dont toutes les parties arrivent à être en relations entre elles et à se venir en aide, malgré même la difficulté, qui leur est particulière, de la différence des fréquences.

Entre ces deux schémas, du réseau spécial et du réseau commun, il y a évidemment place pour des solutions intermédiaires ; on les choisira en se guidant sur les principes suivants qui associent le choix de l'énergie utilisée dans le moteur et le choix de l'énergie produite à l'usine.

Si l'on veut prendre l'énergie directement au réseau commun régional, le système à courant alternatif triphasé, mais à fréquence industrielle, présente certainement les meilleures qualités de préférence. On peut placer après le courant continu haut potentiel, et enfin le courant alternatif haut potentiel et basse fréquence spéciale ferroviaire.

Si, au contraire, on peut produire dès la centrale même l'énergie ayant les caractéristiques spéciales ferroviaires, le système triphasé ou monophasé basse fréquence offre quelque avantage, même en regard du système à courant continu.

Ces directives relient entre elles les deux parties techniques du problème : production à l'usine, utilisation dans le loco-

teur. Mais le problème technique dans son ensemble est lié à la question purement économique que nous allons envisager en dernier lieu.

III.

LES COMPAGNIES DE CHEMINS DE FER ACHÈTERONT-ELLES OU PRODUIRONT-ELLES ELLES-MÊMES LEUR PRODUCTION ?

Il est facile de voir que la question de l'achat ou de la production directe doit être examinée en même temps que la forme sous laquelle l'énergie sera produite. En effet, les Compagnies auront plus d'intérêt à produire si elles veulent du courant spécial, plus d'intérêt à acheter si elles se contentent du courant ordinaire qu'elles transformeront. Les deux solutions cependant

Barrage de l'Usine d'Anversa

restent indépendantes et très souvent des compagnies de chemins de fer achètent du courant spécial qu'elles font fabriquer par des industriels spécialement pour elles, ou fabriquent du courant ordinaire qu'elles font transporter jusqu'aux sous-stations par des compagnies privées. L'Italie nous en donne les deux exemples.

En tout cas, pour cette question de l'achat ou de la production de l'énergie ferroviaire, une mise au point préalable est nécessaire. Malgré la campagne qui a été faite dans plusieurs pays et que l'on fait encore sur cette question, il faut observer que les

chemins de fer ne sont pas d'aussi gros clients que l'on se l'imagine quelquefois. Suivant les pays, leurs besoins varient entre 3% et 10% des disponibilités du marché local de l'énergie. Voici à l'appui de cette affirmation quelques pourcentages :

En *Belgique*, les chemins de fer consomment 5,5% de l'énergie totale consommée dans le pays ;

Aux *Etats-Unis d'Amérique*, 10% (y compris les services électriques de ville et de banlieue) ;

En *Italie* 4% ;

En *Suède* 3% ;

En *France*, la proportion est bien moindre encore.

Seule la *Suisse* consomme pour ses chemins de fer 17% de ses kwh., et nous avons là l'exemple typique d'un pays qui a électrifié les trois-quarts de son trafic.

En outre, les quantités en pour cent d'énergie électrique, nécessaires pour la traction électrique des chemins de fer, ne sont pas toutes produites en entier directement par les sociétés ou admi-

Barrage de l'Usine d'Anversa

nistrations qui exploitent les voies ferrées. Souvent, au contraire, elles l'achètent en grandes parties aux sociétés ou administrations de production, ou de transport d'énergie industrielle, de façon qu'il semble évident que l'importance de la question dont il s'agit soit très limitée, lorsqu'on l'examine seulement du côté quantitatif absolu. La solution qui sera choisie, soit achat, soit production, par les chemins de fer eux-mêmes, de l'énergie qui leur sera nécessaire, n'aura qu'une influence assez faible sur le marché de l'énergie. Ainsi ramené à sa juste proportion, nous pouvons examiner plus calmement le choix à faire qui se ramène à une simple question d'intérêt financier.

M. Ralph Budd, président de la Great Northern Railway Company ne veut pas s'embarrasser d'autres considérations : Si l'industrie veut s'assurer la fourniture de l'énergie nécessaire pour l'électrification des voies ferrées, elle doit, et elle peut le faire, en l'offrant à un prix de tout avantage pour l'administration des chemins de fer, c'est-à-dire si bas que la production directe ne soit pas plus avantageuse pour celle-ci. On ne peut cependant pas appuyer *a priori* une thèse de préférence absolue pour la production et la fourniture, exclusivement de la part de l'industrie, à des prix qui n'assureraient pas ensuite les avantages en question. En faisant ainsi, il pourrait arriver en effet que les chemins de fer n'ayant pas prévu la possibilité de produire eux-mêmes, fussent obligés de payer ensuite l'énergie à un prix plus haut que celui auquel ils pourraient se la fournir. Par conséquent, ils favoriseraient, sans plus, la possibilité d'une hausse du prix de l'énergie qui leur est nécessaire.

Sur cette question de la production ou de l'achat, les solutions qu'ont adoptées les chemins de fer suisses et italiens sont très instructives dans leur diversité.

Le réseau suisse réalise exactement le schéma du réseau en vase clos, à caractéristiques spéciales, propriété du chemin de fer.

Une décision du Conseil d'Administration datant de 1913 a décidé que la production d'énergie devait être assurée par les chemins de fer eux-mêmes, cette solution ayant paru seule susceptible d'assurer le maintien de l'exploitation dans toutes les circonstances et d'avoir la certitude que les besoins futurs seraient couverts.

Deux groupes d'usines ont été équipés, et même suréquipés, de manière à pouvoir faire face aux pointes qui pour certaines heures, peuvent correspondre à une demande deux fois et demie plus grande que la demande moyenne annuelle.

Le premier groupe est le groupe du Gothard qui comprend l'usine d'Amsteg, au fil de l'eau, et l'usine de Ritom, une usine d'accumulation qui ne marche qu'en été pour compléter Amsteg.

Le second groupe est le groupe du Valais ; il comprend les deux usines de Barberine et de Vernayaz, Barberine est l'usine d'accumulation. Vernayaz sera mise en service vers le milieu de 1927.

Le premier groupe peut fournir 193 millions de kwh. pris aux usines qui correspondrait à une puissance constante de 34.000 chevaux. Pour le second, ces chiffres sont de 230 millions de kwh., soit 42.000 chevaux de puissance constante. Les deux groupes peuvent donc fournir 423 millions de kwh. pris aux usines.

Les usines sont prévues avec une marge de 30% sur le trafic moyen correspondant à une demande annuelle de 350 millions de kwh. On peut donc faire face à une augmentation soit du trafic, soit de la longueur des lignes électrifiées. Le suréquipement des usines permettra facilement de faire face à des pointes de 200% de majoration sur la puissance moyenne. L'énergie en excédent et dont l'offre subira nécessairement de grandes variations sera vendue dans la mesure du possible à l'industrie privée. Pour cela, un groupe triphasé en liaison avec la Société suisse de transport d'énergie est monté à l'usine d'Amsteg. Une génératrice industrielle, reliée à un groupe monophasé, sera, dans le même but, montée à Vernayaz. Ce sont là les seuls points de contact avec le réseau industriel.

Au contraire, les chemins de fer italiens se rapprochent du schéma opposé au schéma suisse. Pas d'usines de production appartenant aux chemins de fer, énergie achetée aux réseaux

industriels de la région avec les caractéristiques ordinaires et transformée dans les sous-stations.

En fait, les chemins de fer italiens s'écartent notablement de ce schéma sur deux points :

1° Ils produisent et transportent eux-mêmes une partie de leur énergie. Dans l'état actuel des choses, sur 222.000.000 de kwh. environ qui sont employés chaque année pour la traction électrique des chemins de fer, le 25% est produit directement par des usines de l'Administration des chemins de fer ;

2° Ils demandent souvent à leurs fournisseurs du courant spécial à 16 périodes 2/3. C'est le cas le plus général dans l'Italie triphasiste du Nord.

Les chemins de fer italiens ont adopté le principe de l'union avec les sociétés privées de production et de transport ; ils s'en trouvent bien et ils continuent à prévoir leur alimentation future sur les mêmes bases, c'est-à-dire en grande partie par des fournitures provenant de sociétés particulières et pour un pourcentage de 25 % seulement, à l'aide d'installations leur appartenant.

Je regrette de ne pouvoir m'arrêter sur ces diverses installations hydro-électriques ; elles sont magnifiques et font preuve d'une technique fort avancée de la construction hydraulique et

électrique. Si nous en avons le temps, le barrage de l'usine d'Anversa nous apprendrait la technique d'une voûte au milieu d'un barrage gravité ordinaire pour diminuer le cube à l'endroit le plus profond ; l'aménagement du bassin du Reno et de la Limentra nous aurait montré, à Mollino del Pallone, les plus modernes dispositifs de réglage automatique. A propos du barrage de Pavana, nous aurions discuté du coût imprévu et cher d'un barrage à voûtes multiples en ciment armé, magnifique par ailleurs, et à Suviana, nous aurions cru trouver à la période des fondations un frère aîné, mais plus petit, de notre barrage du Chambon.

Malheureusement, ce serait sortir un peu du cadre de la traction électrique. Il faut nous limiter et passer à la conclusion.

Ce seront mes impressions non plus d'ingénieur, mais de voyageur. J'ai été reçu partout avec la cordialité la plus grande, qui était adressée à la France et à Grenoble en particulier. Notre ville est fort aimée des électriciens de partout. La dernière Exposition de la Houille Blanche y est pour beaucoup ; on est venu dans notre ville, et c'est assez pour qu'on se souvienne et d'elle et de ses habitants ; pour preuves, je n'en veux que la très agréable mission d'avoir été chargé par maints ingénieurs suisses et italiens de rapporter l'excellent souvenir qu'ils conservent à leurs relations de Grenoble. D'un côté et de l'autre des frontières, j'ai été très heureux d'avoir pu resserrer ces liens.