TRACTION ÉLECTRIQUE

Par la Houille Blanche ou par la Houille Noire, l'électrification générale de nos chemins de fer s'impose.

Par J. BOUDET, Ingénieur A. M., Membre de la Société des Ingénieurs civils de France
et de l'« Associazione Elettrotecnica Italiana » (Section de Turin).

Sous de nombreux rapports et pour de nombreuses gens, la guerre comporte tout à la fois, une foule de révélations et d'enseignements. Une des plus sérieuses parmi les premières est, à coup sûr, l'état d'infériorité dans lequel se maintiennent nos chemins de fer, cristallisés autour de la traction à vapeur. Il est notoire que, malgré le magnifique effort qu'ils ont soutenu pendant toute la durée de la tourmente, ils sont tombés bien bas à certains des moments les plus sombres de notre histoire, et en particulier en 1917-1918, alors que sonnait pour nous l'heure décisive de ce duel gigantesque.

Pour être juste, il faut bien reconnaître qu'à cette époque ils avaient à faire face, par une température rigoureuse, à un trafic démesurément accru par les circonstances ; il n'en est pas moins vrai que ces circonstances — même ont souligné de façon frappante l'infériorité des transports à vapeur, — (et cela non seulement en France, mais partout ailleurs, — on pourrait presque dire dans le monde entier), en particulier dans les services où ces derniers ont pu être mis en parallèle avec les transports électriques.

Il semble bien qu'il ne reste plus rien à dire pour établir la supériorité de ceux-ci, et que, depuis qu'on l'agite, la question a dû être épuisée.

Il est pourtant un côté qui nous paraît avoir été négligé dans la plupart des études qui l'ont abordé : nous voulons parler de la nécessité qu'il y a désormais, et ce pour des raisons à la fois techniques et économiques, à substituer à notre antique traction à vapeur, que nous étions trop habitués depuis un siècle, à considérer comme la caractéristique essentielle de toute idée de chemin de fer, le nouveau mode de traction, plus moderne, plus puissant, et surtout plus économique, parce que mieux adapté à l'irrégularité et à l'intermittence des efforts à fournir dans toute exploitation ferroviaire, *ceci quelle que soit la source à laquelle la traction électrique pourra demander son énergie.*

On a tellement répété au grand public que l'électrification des chemins de fer était fonction de l'aménagement de nos forces hydrauliques avec lequel elle paraît — du moins pour le moment — devoir marcher de pair, que le public — et avec lui encore, certains milieux techniques — croient volontiers que les deux choses sont inséparables et que seule la houille blanche est susceptible de permettre l'électrification de nos voies ferrées. La présente étude a pour objet principal de démontrer qu'il n'en est rien et que la houille noire, rationnellement consommée, peut et doit, au même titre que la houille blanche, concourir à l'électrification générale envisagée.

N'ayant encore, en France, que de minuscules sections de lignes électrifiées (et dans des conditions bien différentes) sur lesquelles peu ou point de statistiques sont établies, nous nous référerons, pour étayer ce qui va suivre, aux nombreuses statistiques américaines, récemment publiées au cours des discussions que la question a suscitées outre-Atlantique et, plus particulièrement encore,

à celles du « Chicago Milwaukee and St-Paul-Railway » : à côté de 660 milles de grandes lignes, complètement électrifiées depuis longtemps (1), cette Compagnie possède un vaste réseau exploité à la vapeur et ses statistiques comparatives entre les résultats obtenus avec les deux systèmes de traction sont, à cet égard, particulièrement intéressantes. Toutefois, il ne paraît pas inutile, auparavant, de résumer brièvement ici, — même si cela doit constituer, à certains points de vue, une répétition — les principaux avantages que la traction électrique, systématisée sur tous les réseaux, est susceptible d'apporter rapidement dans l'exploitation de nos chemins de fer.

I. — Rappel des avantages à attendre de l'électrification générale.

Aucun de ces avantages n'est négligeable ; tous représentent, par rapport à la traction à vapeur, des améliorations tangibles quand ce ne sont pas des progrès réels, parfois considérables ; néanmoins, il en est dont l'intervention isolée, pour appréciable qu'elle soit, ne saurait évidemment justifier, à elle seule, une transformation aussi profonde du système de traction. Parmi ceux-là nous citerons :

La suppression de toutes souillures et incommodations pour les voyageurs, en même temps que de toutes fumées — suppression aussi intéressante pour les voyageurs (et aussi pour le personnel des trains) que pour les habitants des environs des gares, particulièrement dans les villes, dont la salubrité se trouve de ce fait améliorée.

La suppression complète des étincelles, et, avec elles, de tout danger d'incendie, permettant la revalorisation des propriétés voisines du chemin de fer ;

La suppression à peu près complète des installations et des dépenses relatives à l'approvisionnement en eau des chaudières.

La suppression des tenders, plaques tournantes, fosses à piquer, etc... ;

La grande rapidité de mise en marche, avec un effort de traction très élevé ; l'influence, presque négligeable, du profil des lignes et des conditions climatiques sur l'exploitation ;

La possibilité de très grands parcours sans aucun besoin de ravitaillement ni de révision ;

Enfin, l'économie de personnel : un seul agent suffisant à la conduite des automotrices ; la diminution des risques d'accidents

(1) Y compris les 208 milles livrés au trafic électrique au printemps de 1921 (Nous rappelons que le mille anglais (terrestre) équivaut à 1,609 Km.)

dûs tant aux emballlements dans les descentes qu'à l'inobservation des signaux par le mécanicien : ce dernier, à peu près déchargé de tout travail ou effort manuel, pouvant se consacrer bien davantage à la surveillance de la voie ; et une possibilité de variations maxima, dans de très bonnes limites de rendement, de l'effort de traction et de la vitesse des convois.

A côté de ces avantages, d'ordre secondaire, malgré leur intérêt, — au moins pour l'objet de cette discussion, — il en est d'autres, dont la seule considération constitue, ainsi qu'on va l'établir, un facteur capital, voire décisif, en faveur de la généralisation de ce système de traction. Au nombre de ces derniers avantages, nous citerons :

Une notable réduction dans les dépenses d'exploitation, de par la réduction des poids morts (chaudières et tenders) — ainsi que dans celles d'entretien et surtout de réparations : chaque automotrice étant capable de fournir, en moyenne, un parcours annuel de plus de 80.000 kilomètres, alors que les locomotives à vapeur n'en fournissent qu'exceptionnellement une cinquantaine, sans passer par l'atelier (1) ;

Une considérable possibilité d'augmentation du trafic avec un mouvement de convois à peine accru, et d'ajournement — souvent même d'évitement — des dédoublements de voies et des élargissements de plateformes correspondants, si onéreux en pays de

montagnes comme aux abords des villes, dont, bien souvent, l'électrification, — malgré ses frais élevés de premier établissement — constitue l'unique solution possible.

Particulièrement éloquentes sont, à ce sujet, les résultats obtenus dès son électrification, sur la division des Montagnes Rocheuses du « Chicago-Milwaukee and St-Paul Rly », où la traction électrique a permis d'assurer le même trafic que la traction à vapeur, avec une réduction de 22,5 % sur le nombre des trains et de 24,5 % sur la durée des parcours, améliorant les conditions générales de l'exploitation au point que le trafic actuel, supérieur d'un tiers à celui de cette époque, est assuré en moins de 80 % du temps que n'en demandait, autrefois, la traction à vapeur pour un tonnage sensiblement moindre, ce qui représente une augmentation de plus de 50 % dans la capacité de la ligne, ajournant *sine die*, — et *ad vitam*, sans doute —, son dédoublement, envisagé bien longtemps avant l'électrification, et justifiant plusieurs fois la dépense engagée pour cette dernière (1) ;

En corrélation étroite avec cette dernière et très importante considération, la suppression de tous les transports inutiles, en charbon et en eau, nécessités par la traction à vapeur et dont l'importance, généralement trop peu soupçonnée, vient d'être mise en lumière par une étude approfondie, faite sur le « B et O. Rird », touchant les circonstances d'embouteillage de ses voies, sur la section comprise entre Grafton et Cumberland.

Il résulte, en effet, de cette étude très serrée, que le trafic du charbon de la Compagnie, transporté tant sur wagons que sur tenders, représentait plus de 11 % du trafic total, en tonnes-milles, passant sur ces lignes, ou, en autres termes, — pour employer une figure plus tangible — que un train sur 9 était régulièrement nécessaire pour assurer le transport du charbon brûlé par les locomotives ; alors qu'avec le programme d'électrification actuellement envisagé on compte non seulement assurer la liberté des trois voies congestionnées ; mais encore les rendre capables, dans l'avenir, d'un trafic accru d'au moins 80 % ;

Enfin, la suppression — particulièrement importante — de toute consommation à l'arrêt, en outre d'une considérable économie de combustible pendant la marche, considérations majeures dont le développement fait l'objet de deux paragraphes du chapitre suivant.

II. — Une centrale thermique fournissant à la traction électrique est beaucoup plus économique que les locomotives de la traction à vapeur.

C'est aujourd'hui un lieu commun de dire que la locomotive électrique est, par essence, anti-économique, mais on se rend mal compte, généralement, du véritable gaspillage de combustible inhérent à l'emploi de la vapeur pour la traction ferroviaire. La statistique ci-dessous, empruntée au rapport de M. Armstrong au Comité d'électrification de la Compagnie Générale électrique de Schenectady (2) le met en évidence, car il en ressort clairement que, pendant la seule année 1918, un quart de la totalité des combustibles fossiles extraits aux Etats-Unis a été consommé par les chemins de fer à vapeur.

(1) Sur la division électrifiée du « Ch. M. and St P. Rly », 42 automotrices électriques ont remplacé avec une capacité de transport et de réserve beaucoup plus grandes, 112 locomotives à vapeur.

(2) *Electric Rly. Jnl.*, T. 55, N. 8 (Déclarations de M. Armstrong, Président de l'Electrification Committee of the General Electric Company »).

TABLEAU I

Dépenses entretien-réparations des automotrices américaines

Eléments des Statistiques	Réseau du New-York Central					Réseau du Chicago-Milwaukee and St-Paul Rly.		
	1914	1915	1916	1917	1918	1916	1917	1918
Nombre d'automotrices en service.....	62	63	63	73	73	20	44	45
Tonnage unitaire moyen	118					290		
Dépenses par automotrice-mille.....	4,03	4,45	3,78	4,01	6,26	8,21	9,62	10,87

Par ailleurs, et en corrélation étroite avec ces statistiques, ajoutons qu'aux termes du rapport de 1917 de M. E. Furneau, à l'« American Rly Engineering Ass. », il résulte que les essais effectués tant sur les réseaux ci-dessus que sur le « Norfolk and Western » et sur le « Schenectady N. Y. » ont établi que l'effet d'impact des automotrices électriques sur le matériel roulant, très inférieur à celui des locomotives à vapeur, ne dépasse pas 30 % tant que les châssis sont de longueur inférieure ou égale à 8 mètres.

TABLEAU II

Production de combustibles et consommation ferroviaire
au U. S. A., en 1918

Production totale de charbons, toutes catégories, Tonnes.....	678.211.000*
Charbons consommés par les chemins de fer	163.000.000*
Combustibles liquides extraits dans le pays : Barrils.....	355.927.000
Combustibles liquides consommés par les chemins de fer : Barrils.....	45.700.000
Equivalence, à raison de 3,5 bls par tonne : Tonnes.....	13.600.000*
Consommation totale des chemins de fer. Tonnes.....	176.000.000*
Soit, en pourcentage du total.....	<u>24%</u>

PERTES EN STATION, INHÉRENTES A LA TRACTION A VAPEUR

Par ailleurs, dès 1910, des expériences serrées avaient été faites sur la section des Montagnes Rocheuses du Chicago Milwaukee and St-Paul Rly», pour déterminer la relation existant entre le travail effectif, fourni par les locomotives à vapeur en service sur cette section et leurs différentes consommations de combustibles.

Elles avaient permis d'établir qu'en travail effectif, sur cette ligne accidentée, les consommations s'élevaient, en moyenne, toutes pertes réduites, à :

- 39,86 lb. (soit 14,5 kgs) d'eau par CVh ;
- 5,06 lb. d'eau par lb. de charbon ;
- (soit 5,5 kgs par kg de charbon ;
- et 7,86 lb. de charbon (soit 2.850 kgs) par CVh ;

avec, comme pertes sèches, pour le parcours entier :

Ralentissement des feux en rotonde : 150 lb. de charbon à l'heure	54.500 kgs)
Nettoyage des feux au départ....	800 lb. — 290 kgs).
Parcours en descentes.....	950 lb. — 345 kgs)
Arrêts pour croisements, garages,	
etc	500 lb. — 182 kgs)

En ajoutant ces pertes en station aux 2.850 kgs par CVh indiqués ci-dessus, et en divisant la consommation totale de charbon en 24 heures par le travail effectif fourni dans le même temps, on trouve que ce travail a été obtenu au prix d'une consommation unitaire de 3,700 kgs de charbon par CVh effectif, fourni aux jantes.

La conclusion qui se dégage des résultats fournis par ces expériences est que les pertes en station augmentent de 30 % la consommation de charbon pendant la période de travail utile, ou, en autres termes, que **le tiers du combustible brûlé par les chemins de fer est complètement perdu.**

Comme complément aux essais précités, une statistique de 30 jours consécutifs fut tenue, de la consommation totale du charbon pour la section entière des Montagnes Rocheuses et du trafic total des machines-tenders et trains, ce dernier traduit en CVh.

Cette statistique permet de fixer à 10,53 lb. (3,820 kgs) le poids du combustible brûlé, par CVh aux jantes.

(*) Dans ce tableau, comme dans les suivants, les nombres expriment des tonnes anglaises, qui n'ont point été converties en tonnes métriques, en raison du peu de différence existant entre ces deux unités (+16 kgs).

Les deux valeurs ci-dessus étaient basées sur les constantes ci-après : 6 lb. (2,200 kgs) par tonne-train de résistance à toutes les vitesses, et 0,7 lb. (0,250 kgs) par tonne et par degré de courbe, déterminées par les essais dynamométriques aux wagons et considérées comme synthétisant le trafic général de la ligne.

En rapportant la moyenne des valeurs du charbon brûlé pendant les trajets d'épreuves et la statistique des 30 jours, par CVh, aux constantes électriques habituelles, on obtient les valeurs consignées au tableau ci-après :

TABLEAU III

Consommations unitaires de charbon avec la traction à vapeur :

Charbon, par CVh, aux jantes des roues motrices. lb	10,27	(3,730 kgs)
Charbon, par KWh, aux jantes des roues motrices	13,75	(5,000 kgs)
Consommation unitaire de charbon correspondant, sur la base d'un rendement de 55 %, à l'utilisation d'un KWh effectif,		
	<u>7,56</u>	<u>(2,750 kgs)</u>

C'est ce chiffre, souligné, de 7,56 lb. (2,750 kgs) de charbon brûlé sur les locomotives à vapeur pour obtenir, en trafic normal, un effort correspondant à 1 KWh fourni par une centrale électrique, qui est d'un intérêt capital pour cette discussion.

D'autre part, une comparaison entre la consommation du charbon de la « Butte Anaconda and Pacific Rly », avant et après son électrification, fait ressortir un poids de 7,17 lb. (3,100 kgs) brûlées précédemment sur les locomotives à vapeur, alors que, pour assurer désormais le même service, il suffit d'un KWh fourni par les sous-stations. Ces chiffres, comme on le voit, recourent de saisissante façon ceux ci-dessus, établis par un procédé entièrement différent.

ECONOMIES DE COMBUSTIBLE
RÉALISABLES PAR L'ÉLECTRIFICATION GÉNÉRALE

Si l'on tient compte de ce que le charbon utilisé lors de l'établissement de ces statistiques présentait un pouvoir calorifique quelque peu faible, on peut, à coup sûr, affirmer que les chemins de fer à vapeur consomment le charbon au taux véritablement effarant de 12,75 lb. (4,600 kgs) par KWh de travail utile mesuré aux jantes, ou 7 lb. (2,540 kgs) par KWh mesuré au wattmètre d'une centrale, et comprenant — pour la rigueur de la comparaison — les pertes en ligne et en conversion inhérentes à l'emploi de la traction électrique. Or, **il est notoire que le KWh peut-être produit, en centrale, par la combustion d'un poids de charbon n'excédant jamais 1,500 kgs** dans les usines anciennes, même démodées, et **descendant jusqu'à 0,800 kgs dans les nouvelles centrales** pourvues des derniers perfectionnements (Genevilliers)...

Il est, dès lors, facile d'évaluer l'économie considérable qui résulterait d'une électrification générale : elle ressort des tableaux ci-après, établis par M. Armstrong pour l'ensemble des chemins de fer des Etats-Unis (1).

(1) Toutes ces données sont rapportées à l'énergie distribuée, sous tension de 100.000 volts, par la « Montana Power Co », compte tenu des récupérations par freinage sur les pentes, et dont le total atteint 14 % de l'ensemble. Or, en raison du profil très accidenté de la partie électrifiée du Ch. M. and St-Paul » sur laquelle ont porté les statistiques, cette opération étant particulièrement rémunératrice, la consommation étalonnée, de 33,3 watts-heure par tonne-mille (soit 20 watts-heure par TK.), pour l'ensemble du trafic voyageurs-marchandises, doit certainement être augmentée pour la mettre en harmonie avec celle constatée sur des profils plus réguliers, et

TABLEAU IV

Statistique reconstitutive du charbon nécessaire aux chemins de fer des U. S. A., en 1918

Trafic assuré, en tonnes-milles. TM	1.215.400.000.000
soit, en tonnes-kilométriques Tk	1.987.200.000.000
Watts-heure, par tonne-mille.....	40
soit, par tonne kilométrique.....	24,5
Consommation totale pour l'ensemble du trafic..... KWh	48.700.000.000
Charbon nécessaire, à raison de 7 lb (soit 2.540 kgs) par KWh. T.	170.000.000

Comme on le voit, les résultats de ce tableau IV recourent sensiblement les statistiques données par le tableau II ci-dessus.

ce n'est point la surestimer que de la considérer comme égale, en chiffre rond, à 40 Wh (soit 24,5 Wh par TK).

Les expériences effectuées sur le parcours de Harlowtown à Three-Forks, et dont les résultats sont consignés dans les graphiques ci-contre, sont, à cet égard, particulièrement suggestifs.

Fig. 1

Graphiques comparatifs des consommations étalonnées avec les deux systèmes de traction, sur la section Harlowtown-Three forks de la ligne des Montagnes Rocheuses (Ch. M. and St Paul Rly).

Sur ce parcours, les locomotives à vapeur remorquaient des trains de 26 voitures, pesant 900 tonnes, et les automotrices électriques, des convois de 2.800 tonnes comportant jusqu'à 64 wagons, à des vitesses légèrement supérieures. Les diagrammes ci-dessus indiquent les consommations respectives pour chaque système de traction.

Sur les locomotives à vapeur, on brûlait du charbon à 6.600 calories environ par kilog. strictement pesé aux différentes stations d'approvisionnement, et, par ailleurs, la consommation des locos électriques qui utilisaient de l'énergie d'origine hydraulique était mesurée au moyen des appareils habituels placés sur chaque machine, dont les indications étaient ensuite rapportées à la consommation de la centrale, calculée sur la base d'une utilisation moyenne de 67 %, reconnue comme normale, et le chiffre de consommation transformé ensuite en poids de combustible, à raison de 1,130 kgs de charbon par KWh, représentant une bonne moyenne pour les centrales quelque peu modernes.

TABLEAU V

Economies de charbon possibles avec l'électrification (Chemins de fer des U. S. A.)

Total du trafic général ci-dessus : TM	1.215.400.000.000
(soit, en TK).....	1.987.200.000.000
Réduction due à l'électrification: TM	146.000.000.000
(soit, en TK).....	238.700.000.000
Trafic à vapeur, en TM..... TM	1.069.400.000.000
(soit, en TK).....	1.748.500.000.000
Consommation d'énergie (à 40 Wh par TM).....	KWh 42.776.000.000
(ou 24,5 par TK).....	
Charbon nécessaire à cette production d'énergie, sur la base de 2,5 lb (0 kg,900) par KWh.... Tonnes	53.500.000
Consommation totale de charbon sur les ch.de fer, étalonnée pour l'année 1918 (Tableau I)..... Tonnes	176.000.000

Economies réalisables par l'électrification

122.500.000

soit, en chiffre rond, 70 % de la consommation totale.

La déduction qui se dégage du rapprochement de ce dernier tableau avec ceux qui précèdent, et qui est soulignée au bas du tableau V, est qu'en cette année 1918, sur laquelle portent les statistiques de M. Armstrong, l'électrification générale des réseaux eût permis d'économiser plus des 2/3 de la consommation totale du pays, représentant en quantité 150 % des exportations anglaises d'avant-guerre, et près de deux fois et demi l'ensemble de la consommation française actuelle, toutes industries réunies.

Par application de ce résultat à nos propres chemins de fer français, on trouve que, sur les 8.300.000 tonnes de charbon consommées actuellement par leurs locomotives, plus de 5.500.000 tonnes, représentant, aux cours actuels, une valeur de près d'un demi-milliard de francs — pourraient être économisées sans aucun changement dans la nature de nos combustibles consommés actuellement, mais seulement dans le mode de consommation, et par la substitution, généralisée, de la traction électrique à l'antique traction à vapeur.

CRISE MONDIALE DE COMBUSTIBLES ET PROGRAMMES D'ÉLECTRIFICATION

Si l'on se reporte à l'année critique sur laquelle ont porté les statistiques qui précèdent, — tout comme on peut le faire, également, à ses suivantes, qui n'en diffèrent pas sensiblement, — il faut bien reconnaître que la situation mondiale, et, en particulier celle de la France (qui ne s'est guère améliorée depuis cette époque) contrastait, et contraste encore étrangement avec le gaspillage qui ressort des dites statistiques, et à côté duquel il nous faut, hélas ! faire état, — en outre d'une formidable dette de guerre supportée par une population amoindrie d'un douzième — des dévastations de nos plus industrielles régions du Nord et de l'Est et de la destruction systématique de leurs houillères, dont la production est tombée, de 40.000.000 de tonnes en 1913 à 20 millions seulement en 1920, obligeant à une importation de 25.500.000 tonnes, qui dépasse sensiblement celle d'avant-guerre, alors que la consommation a diminué...

Or, il est avéré que la restauration complète des mines détruites demandera encore six à huit années d'efforts, pendant lesquelles ces importations ne peuvent que s'accroître au fur et à mesure que notre consommation se rapprochera du chiffre d'avant-guerre (63.000.000 de tonnes), car le secours apporté

par le bassin de la Sarre (moins de 6 millions de tonnes) est un appoint bien minime, sinon négligeable (1).

La situation demande non des palliatifs, mais des remèdes énergiques. On s'en est pleinement rendu compte en haut lieu, et, depuis la fin de la guerre, nos chemins de fer ont un programme d'électrification qui commence — quoique bien lentement — à entrer dans la voie des réalisations. Mais ce programme, presque timide eu égard aux nécessités de l'heure, ne comporte encore qu'une partie vraiment trop restreinte de leurs grandes lignes (1/5^e environ) (2) choisies de préférence parmi celles des régions montagneuses, riches en houille blanche, mais généralement assez pauvres en trafic ferroviaire ; et ce choix même est bien de nature à accréditer l'assertion que nous voudrions contribuer à détruire, à savoir que l'idée d'électrification est inséparable de celle de « houille blanche ».

Par ailleurs, il faut bien reconnaître aussi que, sur la base de 400 kilomètres par an (qui n'ont point encore été atteints), l'électrification de cette seule partie des réseaux montagneux demandera plus de 20 ans, et qu'elle ne constitue, par cela même, qu'un remède partiel autant qu'à échéance lointaine. Cela suffit pour conclure qu'il est insuffisant et que, **dans les régions dépourvues de houille blanche** — qui, pour cette raison, ont été exclues du programme d'électrification élaboré — **la houille noire peut et doit être appelé à la remplacer**, contrairement à ce qu'on pense trop généralement, pour assurer une production rationnelle d'énergie, distribuée de la même façon que celle d'origine hydraulique, et qui sera encore, comme on vient de le voir, beaucoup plus économique que sa consommation directe sur les locomotives à vapeur, même des modèles les plus récents et les plus perfectionnés, dont le rendement maximum atteint péniblement 10 % de la puissance, qu'il est possible d'obtenir avec leur consommation de combustible (1).

(1) D'une façon générale, toutes les nations européennes de l'Ouest touchées par la guerre, sont logées à la même enseigne et se rendent pleinement compte, aujourd'hui, du danger qu'il y a pour la vie nationale, à demeurer tributaire de l'étranger en matière de combustibles.

Complètement dépourvue de combustibles fossiles, et obligée d'importer chaque année, ses 10 millions de tonnes de charbon, l'Italie nous a devancés sur la voie de l'électrification générale. Quoique en situation moins précaire, parce que plus rapprochée des centres de production et d'exportation allemands, la Suisse poursuit activement la réalisation d'un très vaste programme. La Belgique elle-même, dont les mines n'ont pas souffert de l'invasion, mais qui n'en sent pas moins impérieusement le besoin d'économiser ses réserves, a, elle aussi, son programme d'électrification. Enfin, il n'est pas jusqu'à la vieille Angleterre qui, bien que vivant de ses exportations de combustibles, ne songe, pour ses propres besoins, à une utilisation meilleure et plus rationnelle que celle fournie par les machines à vapeur actuelles, et il ne paraît point téméraire d'envisager qu'avant 10 ans elle ait réalisé beaucoup plus que ses alliées.

(2) En chiffres ronds, environ 8.200 kms, répartis comme suit :

Réseau du Midi, environ.....	3.000 kms
— P. O.....	3.000 —
— P. L. M.....	2.200 —
Total égal.....	<u>8.200 kms</u>

Soit environ le 1/5^e du réseau ferroviaire français.

(1) Les locomotives actuellement en service sur nos chemins de fer — au nombre de 13.000 — consomment annuellement — comme on vient de le voir — 8.300.000 tonnes de charbon, soit à peu près la consommation de l'agglomération parisienne (toutes industries réunies), représentant, environ (à 1 Kg par CVh effectif), 800.000 CV effectifs en marche régulière et continue pendant toute la durée de l'année.

C'est cette puissance qu'il suffirait de fournir aux machines si l'intensité du trafic était elle-même régulière et constante. Or, il est si loin d'en être ainsi, que la puissance totale *réelle* des locos sous pression en permanence dépasse, pour l'ensemble de nos réseaux, 10.000.000 de CV.

III. — Conditions de réalisation rationnelle de l'électrification ferroviaire générale.

BESOINS EN ÉNERGIE

De ce qui précède, on peut déduire approximativement une estimation de l'énergie qui serait nécessaire pour une électrification générale de nos réseaux ferrés ; elle n'est pas formidable.

En effet, si l'on se reporte aux statistiques qui précèdent, on peut, sur la base de 40 Wh par TM (soit 24,5 Wh par TK) estimer la consommation annuelle, probable, des automotrices, à :

KWh, environ.....	2.200.000.000
correspondant — avec un facteur de charge de	
100 % — à une puissance instantanée, aux	
jantes, de..... KWS.	250.000
soit, en centrale, avec un facteur de 50 %, KWS.	500.000
en chiffres ronds, par excès (1).	

Ce chiffre des besoins ferroviaires représente, à peu près, la puissance totale des usines hydrauliques, ou, si l'on préfère, environ la moitié de celle des usines thermiques équipées à ce jour en France. Sans tenir compte de celles projetées (2), — dont la construction ne sera un fait accompli que dans un avenir indéterminé et, à coup sûr, lointain, — si l'on considère que, avec les usines actuellement en cours de construction, et dont la puissance est prévue pour seulement 580.000 KWS (dont 220 d'origine thermique et 360 d'origine hydraulique), la France ne disposera, dans un avenir relativement prochain estimé à une quinzaine d'années, que de 2.250.000 KWS, alors que ses besoins, d'ici cette époque, semblent devoir atteindre sinon dépasser 3.500.000 KWS (3), il en ressort clairement :

D'une part, que **la seule « Houille Blanche » ne saurait suffire pour assurer — tout au moins rapidement — à la fois les besoins agricoles et industriels du pays et ceux, plus impérieux encore, de ses chemins de fer.**

D'autre part, que **ces derniers besoins, contrairement à ce qu'on imagine généralement, sont d'ordre secondaire, comparés aux premiers.**

Or, il est encore possible d'envisager une notable réduction de ces besoins ferroviaires, par l'amélioration du facteur de charge que nous avons estimé à 50 % dans ce qui précède, et qui paraît susceptible d'une augmentation aussi sensible qu'elle est désirable, si l'on envisage — ainsi qu'il est rationnel — le développement des réseaux interconnectés distribuant à la fois aux chemins de fer et à l'industrie par les mêmes lignes. A cet égard, du reste, il est intéressant de souligner les résultats déjà obtenus dans cette voie par le « Ch. M. aud St-Paul Rly » qui, avec des charges de pointes formidables, a néanmoins réussi à porter à près de 60 % — ainsi qu'il ressort du tableau ci-après — le facteur de charge de l'ensemble de sa zone électrifiée, par la seule installation de limiteurs indicateurs de puissance, avant laquelle installation, ce facteur s'établissait péniblement aux environs de 40 % (4).

(1) Dans son intéressante relation, dont les conclusions étayent du reste, la dissertation ci-dessus, M. Armstrong évalue à seulement 10.000.000 de KWS l'énergie nécessaire à une électrification générale des chemins de fer des Etats-Unis, soit seulement la moitié de la puissance équipée dans le pays, tant hydraulique que thermique, au cours des 30 dernières années. On se rend facilement compte que ces nécessités ne sont pas formidables.

(2) Pour environ 4.000.000 de KWS (dont 3.500.000 d'origine hydraulique et 500.000 d'origine thermique).

(3) Chiffres cités par M. Le Verrier, dans son remarquable rapport à la « Commission interministérielle pour la diffusion de l'énergie électrique dans les campagnes ».

(4) Ces installations feront l'objet d'une prochaine relation, à paraître dans ces colonnes.

TABLEAU VI

Facteurs de charge, en fonction de : charges de pointe, sur le
« Chicago-Milwaukee » (4)

Date des statistiques	Durée des pointes	Facteurs de charge correspondants
1919 Avril	6,4	59,3
Mai	4,6	56,1
Juin	1,6	55,5
Juillet	0,7	55,6
Août	4,1	54,7
Septembre..	9,5	58,8

Il est facile de se rendre compte qu'au point de vue commercial un facteur de charge égal ou supérieur à 60 % rend le chemin de fer électrique suffisamment intéressant pour permettre aux compagnies de distribution de lui consentir des tarifs spéciaux. *A fortiori*, lorsque pareille fourniture ferroviaire est combinée, sur les réseaux, avec celles d'éclairage et d'énergie industrielle, le facteur de charge de l'ensemble peut dépasser 70 %, et il devient évident que la distribution se présente dans des conditions de régularité très convenables pour envisager la production permanente qu'il est rationnel de demander à de grandes usines modernes, connectées sur l'ensemble d'un réseau, quels que soient, du reste, les moyens de production de l'énergie (2).

PRODUCTION HYDRAULIQUE ET PRODUCTION THERMIQUE CONJUGUÉES

À l'heure actuelle, avec un facteur de charge de 70 % correspondant à une utilisation continue de 6.000 heures par an, en admettant pour prix de revient du KWS disponible à l'usine, 2.500 à 3.000 francs — chiffres actuels — et 14 à 15 % de charges annuelles grevant l'exploitation, le prix de revient du KWh d'origine hydraulique s'établit aux environs de 0,07 à 0,08 fr.

(4) Les chiffres de ce tableau représentant non des maxima mais les moyennes d'observations serrées faites, à la traversée des Montagnes Rocheuses, pendant un semestre de trafic intensif, sur les 220 milles de lignes électrifiées alimentées par 7 sous-stations à contrôle synchronisé.

Il semble bien que le taux de 60 % soit encore susceptible d'augmentation sur les lignes à profil moins accidenté.

(2) Un exemple typique de la nécessité qu'il y a à améliorer les conditions générales de distribution, exemple emprunté au pays voisin dont il sera parlé plus loin, nous est fourni par l'alimentation du Chemin de fer des Alpes Bernoises, dont les caractéristiques sont résumées ci-après :

Consommation mensuelle moyenne, à raison de
17 heures effectives par jour KWh 540.180
Moyenne de 6 pointes de 15 minutes KWS 3.489
Facteur de charge, sur la base de 24 heures.... (%) 20,8

Semblables fluctuations dans la charge à demander au réseau soulignent de saisissante façon l'impérieuse nécessité qui s'impose, de la combiner avec d'autres charges, en particulier industrielles, de manière à maintenir le facteur de charge de l'ensemble du réseau aussi constant que possible et dans des conditions de travail convenables, ainsi qu'il est exposé ci-dessus.

Toutefois, en ce qui concerne les charges de pointes, le rapprochement de ces données avec celles du « Ch. M. and St-Paul Rly », dont nous avons fait état, est difficile ; le facteur de charge de 60 %, qui caractérise l'utilisation de l'énergie sur ce réseau, représentant le rapport de la moyenne à la pointe momentanée, alors que la charge de pointe du Loetschberg représente la moyenne de 6 pointes de 15 minutes, avec pointes momentanées beaucoup plus fortes.

chiffres que l'on peut considérer comme de faibles moyennes, sinon même comme des minima.

Par contre, le KWh d'origine thermique, produit dans de grandes centrales modernes (1), avec du charbon à 80 francs la tonne et une consommation de 0,800 Kg par KWh, coûte, en moyenne environ 13 centimes (dont une moitié représente le seul combustible et l'autre les charges de toute nature).

Si, d'ici une quinzaine d'années — marge d'avenir envisagée plus haut — le prix du charbon descend aux environs de 40 fr. la tonne (ce qui ne paraît pas impossible), le prix de revient du KWh d'origine thermique pourra descendre au-dessous de 0,10 fr. et, devenant, dès lors, aussi intéressant que son concurrent hydraulique, l'établissement de grandes centrales thermiques se présentera, pour les régions dépourvues de houille blanche mais pourvues de charbon ou le pouvant demander facilement à l'exportation directe (régions minières et littorales (2), dans des conditions particulièrement intéressantes et, en tout cas, suffisamment avantageuses (en particulier sur le carreau des mines, où l'on peut brûler des combustibles de qualité médiocre, donc peu marchands) pour concurrencer très largement, compte tenu des pertes, le prix du transport de l'énergie d'origine hydraulique amenée depuis ses régions de production, soit d'une distance susceptible de dépasser 500 kilomètres, distance à laquelle cette énergie a doublé de prix (3).

Toutefois, il semble bien logique d'admettre qu'une pareille baisse du charbon ne se produira point sans une baisse corrélative des autres matières de consommation et des matériaux de construction, peut-être même d'une légère réduction des salaires ; et alors, tout à la fois, le prix de construction des usines hydrauliques aussi bien que celui des lignes de transport, et avec eux les charges annuelles des aménagements, subiraient des réductions correspondantes. L'énergie d'origine hydraulique semble donc bien appelée à concurrencer toujours avantageusement celle d'origine thermique, au moins dans ses régions de production et leurs voisines immédiates ; mais, comme on vient de le voir, dès qu'il s'agira de la transporter à des distances excédant 2 à 300 kilomètres, rendu aux points d'utilisation, le KWh hydraulique reviendra à un prix au moins égal à son concurrent thermique.

Les deux ayant des rayons d'action ethnographiquement bien déterminés, ne sauraient donc se concurrencer ; mais peuvent et doivent être conjugués rationnellement du reste pour le plus

(1) Le prix de revient du KWS de puissance normale disponible, installé dans ces super-centrales, s'établit généralement aux environs de 800 francs, chiffre qui ne sera pas même atteint à Gemmevilliers, lorsque l'équipement sera complet.

(2) En attendant, pour ces dernières, l'industrialisation de la « Houille bleue », encore dans les langes...

(3) On compte, en effet, que l'énergie du Rhône, transportée à Paris, — soit sur 500 kilomètres environ, avec seulement 2 postes de transformation — reviendrait à 0 fr. 11 dans la capitale, si on la suppose à 0,06 sur lignes de départ. Envisagé dans de semblables conditions, c'est-à-dire avec deux postes, le transport de l'énergie de la Dordogne jusqu'à Nantes, sur 350 kilomètres, grèvera le prix à l'usine de 0,04 fr.

Et l'on peut déduire, grossièrement, du rapprochement de ces deux cas concrets, que les transports à T. H. T. envisagés dans les conditions les plus favorables, grèvent néanmoins le prix de revient du KWh d'environ 0,01 fr. par 100 Kms de ligne, et que lorsque le charbon sera descendu à 40 fr. la tonne, l'énergie d'origine thermique consommée dans sa région de production sera plus économique que celle d'origine hydraulique dès que cette dernière devra être transportée à plus de 4 à 500 kilomètres. Dès lors, l'opération peut demeurer avantageuse, même en brûlant du charbon de bonne qualité.

grand profit de la collectivité, dont les ressources seront ainsi utilisées au maximum (1).

STANDARDISATION DE LA FRÉQUENCE

Reprenant la question de l'interconnexion entre centrales productrices d'énergie, quelle qu'en soit la nature, hydraulique ou thermique, nous croyons devoir ajouter quelques mots en ce qui concerne la fréquence, dont la standardisation s'impose si l'on envisage dans un avenir prochain la constitution d'un ou de plusieurs vastes réseaux de distribution couvrant la totalité du pays et fournissant à la fois aux chemins de fer, à l'industrie et à l'agriculture.

A ce sujet, il convient de noter la tendance actuelle, d'ordre général, voire mondial, qui se précise en faveur de l'adoption d'une fréquence unique, supérieure à toutes celles en usage. En Amérique, les statistiques, tant publiques que privées (et parmi ces dernières, celles des ventes de la « G. E. C. ») attestent qu'au cours des dix dernières années, la fréquence de 60 périodes a remplacé, en de très nombreuses stations, de plus basses fréquences, — en particulier celles de 25 périodes à peu près intégralement — et qu'elle tend, de plus en plus, à devenir la fréquence-type (ou standard), sans gêner en aucune manière le développement de l'électrification ferroviaire. En Europe, par contre, bien que la tendance vers l'accroissement soit tout aussi caractérisée, et quoique la situation ne soit pas encore aussi nette qu'en Amérique, on paraît toutefois vouloir s'en tenir à 50 périodes comme standard.

Quel que soit le type auquel on s'arrête, il y a grand intérêt à en hâter la systématisation.

Un exemple typique des graves inconvénients que présente, à cet égard, la manque d'uniformité, nous est fourni par la Suisse, pays où l'électrification est déjà très développée, mais se heurte journellement à des conflits de fréquences et de distribution qui deviennent de jour en jour plus désagréables — quand ce n'est graves — et qu'éviterait complètement l'interconnexion (1), laquelle permettrait, en outre, à ce petit pays — au besoin, par une liaison avec ses voisins, ainsi qu'il vient d'être fait récemment, et qu'il sera prochainement fait, entre la Suède et le Danemark, une meilleure répartition des charges pour l'ensemble des besoins de la nation, et, partant, une utilisation beaucoup plus rationnelle de ses ressources nationales (2).

(1) C'est ce que traduit en chiffres le rapport, déjà cité, de M. Le Verrier, lorsqu'il dit « qu'on peut espérer, dans un avenir prochain » répartir sur tout le territoire, en des postes à 3.000—15.000 volts, « l'énergie électrique, à des prix pouvant varier, selon les régions et les distances de transport, entre 6 et 18 centimes pour l'énergie « d'origine hydraulique, 13 et 18 centimes pour celle d'origine « thermique »... (0,18 constitue bien, dans l'esprit de l'honorable rapporteur la limite à partir de laquelle la première cesse d'être plus économique que la seconde, compte tenu des transports à très grandes distances).

(1) Particulièrement éloquent, à ce sujet, est le cas du chemin de fer des Alpes Bernoises (Berne-Lötschberg-Simplon), qui est alimenté à 15 périodes, alors que, dans la même centrale, des groupes à 42 périodes fournissent à l'industrie locale, et que toute la région environnante est desservie par un réseau à 50 périodes, nullement relié aux précédents... situation compliquée autant qu'irrationalnelle pour tous les intéressés : compagnies, industries et particuliers, qui paient fort cher le maintien de ces trois fréquences, là où une seule suffirait à tous les besoins.

(2) Il semble bien, dans cet ordre d'idées, que la Suisse aurait

IV. — Conclusion.

En définitive, il résulte de ce qui précède :

Qu'en raison de l'acuité de la crise de combustibles qui étreint le monde entier, et du gaspillage de ces combustibles auquel nous assistons, avec la traction à vapeur, le remplacement de ce mode de traction, aujourd'hui suranné, s'impose d'urgence, et que l'électrification générale qui en doit marquer la disparition ne doit pas s'entendre seulement comme fonction du développement de l'utilisation de nos ressources hydrauliques, mais bien — et mieux encore — comme une des cellules du futur organisme que devra constituer, dans un avenir prochain, l'électrification générale du pays, bien comprise et réalisée rationnellement au moyen de centrales hydrauliques et thermiques interconnectées, alimentant un grand réseau national de distribution (Chambre des Députés, Délibération du 2 septembre 1919), dans le cadre de laquelle électrification générale rentrera logiquement l'électrification ferroviaire dont il vient d'être question, et dont la réalisation, avec la houille noire s'impose, au même titre qu'avec la houille blanche, puisque susceptible, ainsi qu'il vient d'être dit, de réduire de plus d'un quart nos importations de charbon actuelles.

Maintenant, pour bien mettre les choses au point, il ne paraît pas superflu d'ajouter que la dissertation qui précède n'envisage toutefois — comme électrification générale ferroviaire — que celle des lignes à grand trafic et à tracé tourmenté dont les résultats d'exploitation permettent d'envisager un amortissement relativement rapide des dépenses d'électrification.

Pour les autres lignes., dont la plupart sont d'une exploitation déficitaire — qu'elles soient, du reste, d'intérêt général ou d'intérêt local — la substitution de la traction électrique à la traction à vapeur ne saurait s'imposer (au moins avant très longtemps), en raison des dépenses nouvelles, énormes, que comporte l'électrification ; mais cela n'implique nullement que ce dernier mode de traction y doive être maintenu, bien au contraire, les moteurs Diesel étant susceptibles de fournir, pour ces petites exploitations, un nouveau système de traction aussi souple, pratique et économique (1) que particulièrement adapté aux besoins de ces lignes, pour lesquelles, avec l'interposition de la transmission électrique, ils semblent vraiment faits, quoique également applicables, du reste, aux exploitations de grandes lignes, toujours plus spécialement visées lorsqu'il s'agit d'électrification.

Intérêt à adopter, comme ses voisines, la fréquence-standard de 50 périodes, qui suffirait à tous ses besoins, mais nécessiterait cependant l'installation de stations de conversion nombreuses pour pouvoir subvenir aux besoins de la traction ferroviaire monophasée à 15 périodes. Encore n'est-il pas certain du tout que cette solution soit la meilleure en ce qui concerne la traction ; eu égard à l'orientation que prennent aujourd'hui le développement de la machinerie électrique et son perfectionnement en vue d'économies de courant toujours plus grandes, l'adoption des moteurs à courant continu, plus souples sous de plus hauts voltages aux trolleys, paraissant bien devoir être sensiblement plus économique que celle des monophasés actuellement en service.

(1) Voir, à ce sujet, notre étude sur « La Traction ferroviaire par locomotives Electro-Diesel », parue dans « La Vie Technique et Industrielle » (décembre 1922 à février 1923).