

TRACTION ÉLECTRIQUE AUX GRANDES VITESSES ET AUX GRANDES DISTANCES

(2^e Partie)

Considérations générales sur l'application de l'électricité à la traction des trains.

Le principe de la traction électrique sur les chemins de fer, s'il a été posé en France en même temps qu'en Amérique, a surtout fait l'objet d'essais en grand dans ce dernier pays. L'Allemagne et l'Angleterre ont suivi le mouvement d'assez loin, mais la première notamment, a promptement regagné le terrain perdu, comme le prouvent les tout récents essais de traction à grande vitesse sur la ligne Berlin-Zossen (1).

Ces tentatives ne peuvent se justifier que par une supériorité incontestable de la traction électrique sur la traction à vapeur. Résumons rapidement les principaux éléments de cette comparaison, en nous plaçant à dessein dans le cas d'usines centrales à vapeur.

Éléments de comparaison	Traction par locomotives à vapeur.	Traction électrique par locomotive ou automotrice avec usine centrale à vapeur.
Consommation de vapeur à l'arbre des moteurs par cheval-heure effectif.	Locomotive compound, 8 kilog ; en tenant compte du matériel existant, 9 à 10 kilog. ; au crochet du tender, 18 à 20 kil.	Moteurs de l'usine : 5,5 kilog. Moteurs de traction : 8 à 9 kilog.
Production de vapeur des chaudières par kilog. de charbon.	6,2	7,80
Rendement de la chaudière.	≤ 60 %	75 à 80 %
Rendement de la locomotive.	Baisse très sensiblement au-dessus de la puissance normale.	Presque constant.
Poids de la locomotive.	Excès de poids dû au tender : 25 à 50 % ; poids considérable de la chaudière mal utilisé pour l'adhérence (boggies porteurs).	Grande légèreté ; utilisation presque complète du poids pour l'adhérence.
Effort de traction en % du poids utile.	≤ 16 %	25 à 30 %
Résistance au roulement : valeur du coefficient (2).	Grands frottements : valeur double du coefficient de roulement d'un wagon remorqué à deux essieux.	Environ 1,4 fois le coefficient de roulement d'une remorque.
Poids par cheval utile.	100 à 110 kilog.	66 kilog. locomotive. 38 kilog. automotrice

(1) Voir *La Houille Blanche*, n° de novembre 1902 : P. PIERRON, Locomotive électrique à grande vitesse de la maison Siemens et Halske.

(2) On calcule généralement la résistance au roulement d'une tonne-train par la formule : $R_T = 1,5 + 0,001 V^2$, et la résistance d'une tonne-locomotive par la formule : $R_L = 4 \sqrt{a} + 0,002 V^2$ V étant la vitesse en km par heure et a le nombre des essieux couplés.

Autres avantages en faveur de la traction électrique.

Suppression des mouvements de lacet, de la fumée, du bruit, des flammèches et des escarilles. — Conservation des peintures, vernis et tapisseries des wagons. — Diminution des frais de personnel (entretien et conduite), de l'entretien du matériel roulant et des voies. — Puissance sensiblement indépendante de la vitesse (au contraire, dans une locomotive à vapeur, la puissance dépend du courant d'air créé par l'échappement rapide de la vapeur). — Conservation de fortes rampes sur les tracés, qui peuvent être abrégés. — Extrême simplicité de manœuvre. — Possibilité de réaliser un block-système automatique à grand rayon d'action, au moyen duquel un train pénétrant sur une section déterminée se voit supprimer le courant si cette section est déjà occupée par un autre.

Comparaison économique d'une installation de traction par locomotives à vapeur et d'une installation de traction électrique.

Proposons nous de chercher, dans un cas déterminé, les frais entraînés par une installation de traction par locomotives à vapeur et une installation de traction électrique. Le problème est d'une telle complexité que les considérations que nous allons développer ci-dessous, à titre d'application, ne doivent être considérées comme relatives qu'à une ligne de chemin de fer légère, à trafic peu important. Nous nous placerons donc à dessein dans les circonstances les plus défavorables, au point de vue de l'électricité, uniquement pour montrer que, même dans ce cas, elle permet de réaliser *parfois* une économie.

Dans une ligne à vapeur desservie par trains légers, la locomotive entraîne un accroissement de poids égal à celui de trois ou quatre wagons. Ce poids supplémentaire ne peut se justifier qu'autant que le train n'a à surmonter que des rampes inférieures ou égales à une certaine limite. Pour des rampes supérieures, l'électricité reprend tout son avantage.

Évaluation de la puissance nécessaire. — Soit à effectuer le déplacement d'un poids brut d'une tonne avec une vitesse de 15 km/h. Nous aurons ainsi, en considérant une section de ligne où la rampe est de x mm par mètre, et en supposant un effort de traction en palier de 12 kgs par tonne, à développer les puissances suivantes en chevaux : à la jante de la roue :

$$(12 + x) \left(\frac{15}{3,6} \cdot \frac{1}{75} \right)$$

à l'arbre du moteur :

$$(12 + x) \left(\frac{15}{3,6} \cdot \frac{1}{75} \right) \frac{1}{0,8} \cdot \frac{1}{0,8}$$

à l'arbre de la machine à vapeur de l'usine :

$$(12 + x) \left(\frac{15}{3,6} \cdot \frac{1}{75} \right) \frac{1}{0,8^3} \quad (1)$$

Nous avons supposé que le rendement des moteurs et de leurs engrenages, s'il y a lieu, était de 0,80 ; de même

pour le rendement cumulé des dynamos génératrices et de la canalisation.

Cherchons, dans le cas de la traction à vapeur, la puissance qu'il faut fournir au piston de la locomotive.

Pour cette détermination, on emploiera avec avantage la formule suivante dont l'on trouvera, dans tous les traités de machines à vapeur, la démonstration :

$$W = \frac{3,7}{0,8} \frac{15 (12 + x)}{1000 - 8 (12 + x)} \quad (2)$$

formule dans laquelle W représente la puissance en chevaux indiqués et x la rampe en mm. par mètres, cette puissance étant relative au déplacement d'une tonne sur le profil considéré à la vitesse de 15 km/h.

Pour développer le travail correspondant au transport d'une tonne à cette vitesse pendant une heure, on consommera une quantité de charbon qu'on peut évaluer comme suit :

Soit de la houille de première qualité dégageant 7300 calories par kilog.

On admettra un chiffre souvent vérifié par l'expérience, à savoir : une consommation de 2 kgs de charbon par cheval-heure sur la locomotive, et de 1,5 kgs pour une machine fixe. Le tableau I nous donne les consommations de charbon dans chaque cas.

Pour les déterminer, nous avons multiplié les travaux en chevaux-heures respectivement par 1,5 et 2 dans le cas de la traction électrique (machines fixes) et dans celui de la traction à vapeur (locomotives).

CONSOMMATION DE CHARBON EN KILOGRAMMES

TABEAU I

EXPLOITATION	Rampes en mm par mètre.					
	0	10	15	50	75	100
Par l'électricité.....	1 kg 95	3 kg 57	6 kg 60	10 kg 06	14 kg 14	18 kg 20
Par locomotive à vapeur.....	1 kg 84	3 kg 70	7 kg 29	17 kg 06	39 kg 30	149 kg 36

(Pour 15 tonnes-kilomètre en une heure sur rampe ci-contre).

FRAIS DE PREMIER ÉTABLISSEMENT

TABEAU II

EXPLOITATION	Rampes en mm par mètre.					
	0	10	25	50	75	100
Par l'électricité.....	1375 f 00	2337 f 50	3737 f 50	6075 f 00	8475 f 00	10845 f 00
Par la vapeur.....	141 f 68	284 f 90	561 f 33	1313 f 62	3030 f 72	11500 f 75

(Pour 15 tonnes-kilomètre en une heure sur rampe ci-contre).

Les valeurs numériques de ces travaux en chevaux-heures sont respectivement données par les formules (1) et (2).

Dans le dernier cas notamment, nous pourrions déterminer le poids qu'il est nécessaire de donner à la locomotive pour effectuer le travail imposé. Ce calcul se fera par la formule approchée :

$$P_{kgs} = \frac{8000 (12 + x)}{1000 - 8 (12 + x)}$$

pour un effort de traction de 12 kgs. par tonne en palier et, sur une rampe égale à x mm. par mètre. On évalue, en général, à 1 fr. 25 le kilog. le prix d'une locomotive à vapeur ordinaire, au moins de puissance moyenne, d'après les cours des métaux de ces dernières années. Le prix de la locomotive sera donc donnée par tonne (cette locomotive étant supposée pouvoir remorquer cette tonne à la vitesse de 15 km/h. sur une rampe de x mm. par mètre), par la formule :

$$S = \frac{8000 \times 1,25 (12 + x)}{1000 - 8 (12 + x)} \text{ francs}$$

ou :

$$S = \frac{10000 (12 + x)}{10000 - 8 (12 + x)} \text{ francs}$$

Le tableau II résume les frais de premier établissement entraînés par la traction électrique et la traction à vapeur pour une puissance donnée, correspondant dans chaque cas à la rampe de x mm. par mètre.

Enfin, nous avons comparé, dans les tableaux III et IV, les frais entraînés, soit par la traction électrique, soit par la traction à vapeur. Nous avons, dans les deux cas, fixé à 12 % du capital engagé les taux d'amortissement et d'intérêt.

De plus, nous avons supposé que le matériel roulant faisait, soit 10 heures, soit 20 heures de service par jour, et que le charbon coûtait, soit 15 fr., soit 25 fr. la tonne. Nous laisserons au lecteur le soin d'interpréter les enseignements déduits de ce tableau. Résumons ci-dessous les divers cas étudiés :

- A. 10 h. de service, charbon à 15 fr. la tonne.
- B. 10 h. de service, charbon à 25 fr. la tonne.
- C. 20 h. de service, charbon à 15 fr. la tonne.
- D. 20 h. de service, charbon à 25 fr. la tonne.

Résultats comparés d'exploitation par locomotives à vapeur et par locomotives électriques.

La traction par locomotives électriques à travers le tunnel de Baltimore a donné lieu à d'intéressants rapprochements

entre le coût des deux modes de traction (vapeur et électricité).

On n'a comparé qu'une locomotive électrique à plusieurs locomotives à vapeur.

En tenant compte du nombre de trains poussés, de leur poids moyen, de la longueur de la ligne, de la consommation d'énergie, enfin, des parcours à vide, la tonne kilomètre transportée dans le cas de locomotives électriques, au nombre de quatre ou six, fut de 25 % plus économique que par l'exploitation à vapeur.

Ces frais furent de 1,315 fr. par km-train pour une seule locomotive électrique en service. Ils s'abaissèrent à 0,865 fr. pour deux locomotives, à 0,715 fr. pour trois. La moyenne des frais entraînés par la traction à vapeur des trains de marchandises de plusieurs compagnies américaines ressort à 0,815 fr. par km-train.

Application de l'électricité à la traction des trains rapides.

Si tels sont les avantages de la traction électrique, quelles sont, d'autre part, les raisons d'une telle hésitation devant la transformation intégrale des réseaux ?

Cette transformation aurait, en effet, pour conséquence :

1° Des dépenses de premier établissement énormes, nécessitées par la création d'usines ou en nombre restreint, mais gigantesques, avec des transports de force à longue distance, ou de puissance moyenne, mais très nombreuses et très rapprochées.

2° Le non-amortissement de sommes considérables déjà consacrées depuis peu d'années par les compagnies à l'acquisition d'un matériel roulant spécial pour la traction à vapeur des rapides et au renforcement des voies.

En réalité, une seule solution avait été essayée jusqu'à ces derniers temps. C'est la traction par locomotives à accumulateurs. Ce n'est pas même une solution qu'ont offert les compagnies de chemins de fer, mais bien plutôt un appareil de démonstration des avantages de la traction électrique. Et encore ces avantages sont-ils masqués par la nécessité d'emporter un poids mort énorme, celui des accumulateurs, et les craintes que suggère toujours ce mode d'alimentation.

Seules, les considérations énoncées plus haut retardent l'avènement de la traction électrique des rapides par alimentation directe, qui est la seule solution réellement pratique.

Nous allons montrer ci-dessous que les chiffres auxquels elle conduit n'ont rien d'effrayant.

Les rapides réalisent couramment des vitesses de 100 kilomètres. Le Nord Français et les chemins de fer anglais, notamment, ont adopté un matériel tel que leurs voyageurs ne souffrent aucunement de ces vitesses jadis qualifiées d'inférieures.

Voyons dans quelles conditions l'électricité pourrait permettre de doubler presque cette vitesse.

Soit une vitesse moyenne de 160 km/h correspondant à une vitesse maxima de 190. Pour la réaliser, deux conditions sont nécessaires : 1° une puissance électrique convenable ;

TABLEAU III

EXPLOITATION PAR L'ÉLECTRICITÉ

		Intérêt et amortissement des capitaux engagés	Dépense de charbon (frs)	Total des frais d'exploitation (frs)
0 ‰	A	165 ^f 0000	106 ^f 7625	271 ^f 7625
	B		177,9375	342,9375
	C		213,5250	378,5250
	D		355,8750	520,8750
10 ‰	A	280 ^f 5000	195,4575	475,9575
	B		325,7425	606,2425
	C		390,9150	671,4150
	D		651,5250	932,0250
25 ‰	A	448 ^f 5000	361,3500	809,8500
	B		602,2500	1050,7500
	C		722,7000	1171,2000
	D		1204,5000	1653,0090
50 ‰	A	729 ^f 0000	550,7850	1279,7850
	B		917,9750	1646,9750
	C		1101,5700	1830,5700
	D		1835,9500	2564,9500
75 ‰	A	1017 ^f 4000	774,1650	1791,5650
	B		1290,2750	2307,6750
	C		1548,3300	2565,7300
	D		2580,5500	3597,9500
100 ‰	A	1301 ^f 4000	996,4500	2297,8500
	B		1660,7500	2962,1500
	C		1992,9000	3294,3000
	D		3321,5000	4622,9000

TABLEAU IV

EXPLOITATION PAR LOCOMOTIVES A VAPEUR

		Intérêt et amortissement des capitaux engagés	Dépense de charbon (frs)	Total des frais d'exploitation (frs)
0 ‰	A	17 ^f 0016	100 ^f 7400	117 ^f 7416
	B		167,9000	184,9016
	C		201,4800	218,4816
	D		353,3000	375,3016
10 ‰	A	34 ^f 1880	202,5750	236,7630
	B		337,6250	371,1880
	C		405,1500	439,3380
	D		675,2500	709,4380
25 ‰	A	67 ^f 3593	399,1275	466,4868
	B		665,2125	732,5718
	C		798,2550	865,6143
	D		1330,4250	1397,7843
50 ‰	A	157 ^f 6344	934,0350	1091,6094
	B		1556,7250	1714,3594
	C		1868,0700	2025,7044
	D		3113,4500	3477,1364
75 ‰	A	363 ^f 6864	2151,6750	2515,3590
	B		3586,1250	3949,8090
	C		4303,3500	4667,0364
	D		7172,2500	7535,9364
100 ‰	A	1380 ^f 0864	8174,1750	9554,2614
	B		13623,6250	15003,7114
	C		16348,3500	17728,4364
	D		27247,2500	28627,3364

2° une résistance mécanique suffisante des voies et du matériel.

Pour le second point, des essais de traction par locomotives à vapeur traînant, il est vrai, des trains extra légers, ont déjà fourni des vitesses de 160 km/h. La résistance proprement dite à la traction a été trouvée très diminuée. Quant à la résistance de l'air, elle est peu accrue. La loi de sa variation, proportionnelle au carré de la vitesse, admise pour les valeurs faibles de celle-ci, n'est plus acceptable pour les valeurs élevées. D'après Crosby, la résistance de l'air ne dépasse pas 50 kilogs par m² de surface de front, et la résistance à la traction 3,61 kilogs par tonne d'après les moyennes obtenues avec les locomotives à vapeur.

Pour un train de 140 tonnes, offrant 9 m² de surface de front, on aura un effort total d'environ 500 kgs à surmonter.

Dans ces conditions, il est facile de voir que notre train, à la vitesse de 160 km/h, dépensera en palier 570 chevaux à la jante, et à celle de 200 km/h, 735 chevaux.

En supposant que les rampes à surmonter ne dépassent pas 6 à 7‰ par mètre, nous aurons, comme puissance maxima à fournir à la jante, 1000 chevaux.

On a développé déjà une puissance au moins égale (ligne de Baltimore-Ohio).

Remarquons enfin qu'un rapide électrique de 140 tonnes, lancé à la vitesse de 200 kilomètres à l'heure, dont le poids est bien réparti sur toute la longueur, fatigue moins une voie donnée qu'un rapide à vapeur de 300 tonnes, marchant à 120 kilomètres, dont une fraction importante du poids est concentrée sur la locomotive, et qui subit en outre un mouvement de lacet extrêmement fâcheux.

Le freinage ne serait également pas plus difficile, dans l'hypothèse du train électrique considéré, qu'avec les rapides actuels, car si la diminution du poids ne suffisait pas à compenser l'augmentation de vitesse, au freinage mécanique pourrait s'ajouter l'effet du freinage électrique.

Soit le train lancé à 160 kilomètres. Le coefficient de frottement des sabots sur les roues étant de 0,1, supposons un poids de 2500 kgs reposant sur chaque roue, celles-ci étant au nombre de 20. Soit en outre l'effort résistant de l'air égal à 240 kgs et l'effort résistant de la voie égal à 1000 kgs. L'effort total de ralentissement sera donc :

$$250 + 1000 + 2500 \times 0,1 \times 20 = 6250 \text{ kgs.}$$

L'espace correspondant à l'arrêt complet du train en vitesse sera de 230 mètres.

L'énergie nécessaire à l'alimentation du train sera empruntée à une transmission de puissance électrique sous forme alternative à haute tension. Pour éviter le plus possible les pertes d'énergie, la propulsion du train devrait de préférence s'effectuer sans nécessiter de transformation du courant alternatif en courant continu. Ainsi donc, ou bien les moteurs à courants alternatifs de la locomotive seront établis directement à 2000-2500 volts, captant le courant après transformation dans des postes échelonnés sur la voie, ou bien, le courant pris par la voiture à haute tension, à 10000 volts par exemple, sera transformé dans des transformateurs portés par la voiture motrice elle-même.

Soient donc deux villes distantes de 160 kilomètres, et une station génératrice située au milieu de la voie, supposée droite, qui les joint. Admettons qu'il y ait simultanément 6 trains en ligne.

La ligne monophasée ou triphasée avec retour par les rails pourrait être constituée par deux fils de ligne de 90 mm² de section. Le véhicule moteur emportera avec lui des transformateurs-réducteurs, d'une puissance globale de 8000-10000 k.watts et pesant 8 à 10 tonnes.

Le système qui consisterait à disposer des transformateurs réducteurs tout le long de la voie, en nécessitant une canalisation secondaire à tension abaissée, entraînerait des frais considérables.

Il est certain que la traction alternative monophasée ne donne pas actuellement toute satisfaction, mais si elle est inférieure à la traction par courants polyphasés qui a donné récemment lieu à des essais très intéressants, elle aurait au moins d'immenses avantages sur la traction par accumulateurs électriques.

Partout où les transmissions économiques de puissance hydro-électrique sont impossibles, la solution d'avenir de la traction électrique pour rapides consiste donc dans l'installation d'usines électriques de 10.000 chevaux réparties tous les 150 à 200 kilomètres.

Pour terminer, il convient de préciser quelques points qui ont pu rester obscurs dans cette rapide esquisse des principes de la traction électrique à grande vitesse.

En admettant une puissance moyenne de 700 k.watts par train à la station d'une puissance de 6 à 7000 k.watts, le coût du k.watt-heure ne serait certainement pas supérieur à 0,0625, d'où 0,25 le kilomètre-train.

Admettons qu'au maximum les frais d'entretien de toute sorte doublent les frais d'exploitation. Nous aurons comme frais totaux 0,50 pour le kilomètre-train.

La voie coûterait (avec des rails de 45 à 50 kgs le mètre courant) 50.000 fr. le kilomètre. Ajoutons-y l'équipement électrique 15.000 fr., et, la quote part de la station centrale, 2.000.000 de fr., à répartir entre 150 kilomètres, soit 13.333 ou en gros 13.500 fr.; soit enfin 80.000 fr. environ le kilomètre de voie.

Les statistiques des chemins de fer à vapeur prouvent que les chiffres représentant le coût de premier établissement par kilomètre de voie sont très approximativement les mêmes que dans ce dernier cas.

ETUDE APPROXIMATIVE DES FRAIS ENTRAINÉS PAR LA TRANSFORMATION D'UN RÉSEAU

Nous venons d'indiquer les principales données qui pourraient servir de base à la transformation de réseaux à vapeur, ou à l'établissement de lignes électriques nouvelles.

Il est certain que les indications sommaires que nous venons de fournir seraient sans conclusion pratique, si nous ne cherchions à montrer dans quelles conditions industrielles peut être transformée, sur un réseau parcouru par des trains à grande vitesse, la traction à vapeur en traction électrique.

La construction de nouveaux réseaux électriques serait évidemment bien plus économique que celle de réseaux à vapeur correspondants.

Dans le cas d'une transformation, pour qu'elle soit légitimée au point de vue financier, il faut que les intérêts et amortissements supplémentaires à servir annuellement et entraînés par cette trans-

formation soient compensés, soit par des recettes supplémentaires, soit par des économies sur l'exploitation.

Ces dépenses sont évidemment considérables, mais nous espérons pouvoir montrer au lecteur que, somme toute, cette transformation ne serait pas une absurdité au point de vue économique.

Une étude complète a été faite dès 1896 (*Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, août 1896), par M. de Marchena.

Dans ce travail qui nous servira de guide, M. de Marchena suppose la création d'usines génératrices à vapeur. Les résultats qu'il a obtenus seraient de beaucoup meilleurs en supposant les canalisations alimentées par des usines hydro-électriques. Cependant les frais de premier établissement d'une puissante usine hydro-électrique ne sont sensiblement pas différents, par kilowatt installé, de ceux entraînés par la création d'une station à vapeur de même importance. L'économie considérable réalisée avec une puissance hydraulique sur la même puissance demandée aux moteurs à vapeur réside surtout dans la diminution des frais d'exploitation.

Ces frais de premier établissement peuvent se répartir ainsi :

- 1° Etablissement des lignes primaires et secondaires.
- 2° Etablissement des sous-stations.
- 3° Etablissement des usines centrales.
- 4° Matériel roulant.

Lignes primaires et secondaires.

Cette dépense variable avec le système adopté (10.000 à 25.000 fr. par kilomètre) pour la ligne de distribution d'énergie aux voitures peut être prise égale à 20.000 fr. en moyenne.

La ligne primaire ne coûterait pas plus de 2.000 francs par kilomètre.

Sous-stations.

Dans le cas de sous-stations de 1000 kilowatts, espacées de 30 kilomètres, il conviendrait de compter pour chacune d'elles, équipée avec transformateurs statiques et convertisseurs rotatifs, 200 francs par kilowatt installé, soit 20.000 francs, et pour une station de transformateurs fixes, 50 francs par kilowatt installé, soit 50.000 francs.

Usines génératrices.

L'expérience permet de prévoir sur un réseau actif une valeur de la charge maxima qui ne dépasse pas 2,5 fois celle de la charge moyenne. Les frais entraînés par les usines seraient de 500 francs par kilowatt installé.

La composition de l'une de ces usines de 4560 kilowatts serait par exemple la suivante :

3 unités de 1500 kilowatts entraînées par machines à vapeur, mises en place, avec accessoires.....	1.000.000 fr.
14 chaudières de 250 m ² de surface de chauffe.....	300.000 »
Pompes, tuyauteries, etc. Bâtiments, fondations, puits, réservoirs, etc.....	600.000 »
Tableau de distribution, transformateurs haute tension	200.000 »
Imprévus et divers.....	150.000 »
Total.....	2.500.000 fr.

Cette dépense correspond bien à 500 francs le kilowatt installé. M. Dusaugy a montré que dans une usine hydro-électrique de 4000 kilowatts, en calculant très largement les frais d'installation, le kilowatt installé ne revenait pas, aux arbres des turbines, à moins de 560 fr. (1)

Puissance nécessaire par kilomètre de voie.

M. de Marchena, dans l'étude déjà citée, a cherché à établir, d'après les chiffres fournis par la compagnie des chemins de fer du Midi, la puissance par kilomètre de voie à fournir par les stations centrales. De ces chiffres il résulte que l'effort en moyenne à exercer par train est de 750 kilos. Le rendement mesuré des jantes à la station pouvant être pris au moins égal à 0,60 et un kilowatt-heure

correspondant à environ 36000 kilogrammètres, nous aurons, en supposant successivement 7000, 10000 et 15000 kilomètres-train annuels par kilomètre de ligne, des consommations moyennes de puissance par kilomètre de ligne respectivement égales à 7, 10 et 15 kilowatts.

D'après ce que nous avons dit, ces dépenses correspondraient, non à 3.500 fr., à 5.000 fr. et à 7.500 fr., mais à ces chiffres multipliés par le rapport de la puissance maxima à la puissance moyenne, soit 2,5 environ. En réalité, au prix d'une transformation de courant coûteuse et de batteries-tampons convenables, on pourrait, comme on le sait, rendre la puissance moyenne sensiblement égale à la puissance maxima.

Un réseau de 200 kilomètres de voies nécessiterait donc, dans les trois cas considérés, des dépenses de premier établissement, pour station génératrice et appareillage électrique de ligne, égales respectivement à :

$$3500 \times 2,5 \times 200 = 1.750.000 \text{ fr.}$$

$$5000 \times 2,5 \times 200 = 2.500.000 \text{ fr.}$$

$$7500 \times 2,5 \times 200 = 3.750.000 \text{ fr.}$$

Matériel roulant.

On peut adopter, d'après les moyennes de statistiques fournies par les compagnies de chemins de fer électriques américaines, le chiffre de 80.000 kilomètres annuels comme parcours total d'un locomoteur.

Si nous prenons comme prix d'un locomoteur 50.000 fr., nous aurons comme dépense moyenne par an et par kilomètre de voie provenant du fait du matériel roulant :

Pour 7000 kilomètres-trains annuels :

$$\frac{50.000 \times 7.000}{80.000} = 4365 \text{ fr., soit environ } 4.400 \text{ fr.}$$

Pour 10000 kilomètres-trains annuels :

$$\frac{50.000 \times 10.000}{80.000} = 6250 \text{ fr., soit environ } 6.300 \text{ fr.}$$

Pour 15.000 kilomètres-trains annuels :

$$\frac{50.000 \times 15.000}{80.000} = 9375 \text{ fr., soit environ } 9.400 \text{ fr.}$$

Dépenses et charges annuelles totales par kilomètre de voie.

Récapitulons ces dépenses par kilomètre de voie et par an. Nous aurons :

Ligne primaire.....	2.000 fr.	à	2.000 fr.
Ligne secondaire.....	20.000 »	à	20.000 »
Sous-stations.....	1.200 »	à	4.500 »
	<u>23.200 fr.</u>		<u>26.500 fr.</u>
Matériel roulant.....	4.400. »		6.300 »
Station centrale.....	<u>3.500 »</u>		<u>5.000 »</u>
	7.900 fr.		11.300 fr.
			17.900 fr.

Soit donc au maximum 44.400 fr. et au minimum 31.100 fr. par kilomètre de voie pour un réseau de plusieurs milliers de kilomètres.

On voit, en réalité, combien sont faibles ces dépenses par rapport à celles de premier établissement d'un kilomètre de voie ferrée.

Calculons ces charges annuelles supplémentaires correspondantes. Le tableau ci-dessous résume les différents cas.

Trafic par kilomètre de ligne en kilomètres-train	Intérêt et amortissement annuel, à 6 %	Intérêt et amortissement par kilomètre-train.
7.000	19.860 fr.	0 ^f 281
10.000	21.720 fr.	0 ^f 217
15.000	25.480 fr.	0 ^f 169

Nous avons, dans cette étude, supposé l'intérêt et l'amortissement du capital engagé représentant un taux de 6 o/o par an.

(1) *Etude économique d'un transport d'énergie à grande distance.* par E. Dusaugy, ingénieur-directeur de la Société d'Énergie Electrique de Grenoble et Voiron, A. Gratier et Cie, éditeurs, Grenoble.

En réalité, ces chiffres peuvent le plus souvent constituer une limite supérieure comme le fait remarquer M. de Marchena dans son étude, les grandes compagnies de chemins de fer pouvant emprunter à 3 o/o et amortir sur un laps de temps supérieur à 50 ans.

Ces dépenses spéciales à la transformation d'un réseau ne représentent pas plus de 5 o/o en moyenne des recettes par kilomètre train et 10 o/o des frais totaux d'exploitation. Ces dépenses supplémentaires peuvent être compensées, soit par une diminution des frais d'exploitation, soit par une augmentation des recettes.

Augmentation des recettes

Examinons d'abord ce dernier point. Supposons que le trafic marchandises (en général 50 à 60 o/o des recettes totales) ne soit pas accru par le fait de la transformation, bien que celle-ci doive amener évidemment une amélioration dans la célérité des transports; il est permis, d'après l'expérience acquise, d'affirmer que les recettes-voyageurs, surtout sur les faibles parcours, qui sont, en réalité les plus rémunérateurs pour les compagnies, seraient certainement suffisantes pour compenser cet accroissement de 10 o/o dans les charges annuelles d'exploitation.

Diminution des frais d'exploitation.

Ces frais, dans une compagnie de chemins de fer, sont généralement répartis ainsi qu'il suit :

- 1° Eau et combustible;
- 2° Chauffeurs et mécaniciens;
- 3° Graissage, entretien et nettoyage des locomotives;
- 5° Amortissement du matériel et frais généraux divers.

On constate, d'après un grand nombre de statistiques, que sur une compagnie de chemins de fer d'importance moyenne, ces dépenses ressortent à 0 fr. 800 par kilomètre-train.

Cherchons à établir les dépenses correspondantes pour une exploitation par traction électrique.

En admettant un effort moyen de 750 à 800 kilogs comme nécessaire à la propulsion du train, il en résulterait une dépense de 3,5 kilowatt-heures par kilomètre-train, mesuré au tableau de la station génératrice.

On peut admettre une consommation moyenne de 1,5 kg. de combustible par k.watt-heure, et par exemple, pour une usine de 4500 k. watts brûlant du charbon à 24 francs et produisant annuellement 1500000 de k. watt-heures.

On peut évaluer comme suit ces dépenses :

	Dépense annuelle	Dépense par K.watt-heure
Combustible (22.500 tonnes à 24 fr.)....	540.000	0.0360
Personnel usine	65.000	0.0043
Graissage et entretien des machines	70.000	0.0047
Frais généraux divers.....	60.000	0.0040
	<u>735.000 fr.</u>	<u>0.0490 fr.</u>

Ce chiffre de 0,049 fr. que nous adopterons comme représentant les dépenses d'exploitation par kilowatt-heure est une valeur forcée à dessein. Celles-ci sont sensiblement plus faibles dès que l'on recourt à une puissance hydraulique ou même simplement si le charbon est moins coûteux. En réalité, dans la majorité des cas, cette dépense peut être prise égale à 0,040 fr.

Pour une sous-station équipée avec transformateurs rotatifs, fournissant 200000 de kwatt-heures par an, il convient de prévoir 15.000 francs pour frais de personnel, graissage, entretien et divers. Cette dépense ne dépasse pas 5.000 francs avec une sous-station uniquement composée de transformateurs.

Il en résulte que les dépenses totales par k.watt-heure produit au tableau des usines génératrices ne dépasseront donc pas en moyenne 0,045 fr. à 0,050 fr. d'où par kilomètre-train (3500 watt-heures), une dépense de 0,17 fr., d'où enfin une économie de 0,09 fr. par kilomètre-train sur les dépenses d'eau et de combustible nécessitées par les locomotives à vapeur. Nous avons déjà expliqué les raisons de cet écart au commencement de cet article.

Nous avons également insisté sur l'économie qu'il est possible de réaliser avec le personnel. Un wattman, au lieu de deux agents,

chauffeur et mécanicien, peut faire un minimum de 200 kilomètres par jour, tandis qu'un mécanicien de grandes lignes n'en fournit guère que la moitié. Il est facile de voir que la transformation du mode de traction permet de réaliser au moins une économie de 0 fr. 10 par kilomètre-train sur ces frais de personnel.

Quant à l'entretien du matériel roulant tracteur, les chiffres que l'on possède actuellement nous permettent de tabler sur une économie de 0 fr. 10 par kilomètre-train. En effet, les frais d'entretien pour les tracteurs électriques ne dépassent pas en moyenne 0 fr. 07 par kilomètre-train, c'est-à-dire 40 à 45 o/o du chiffre correspondant aux locomotives à vapeur.

Il ne sera pas non plus exagéré de compter par kilomètre-train, 0 fr. 01 pour l'économie d'entretien, nettoyage et graissage des wagons, dans le cas de la traction électrique.

Conclusions

Nous avons trouvé, comme économies à réaliser sur les frais d'exploitation, par kilomètre-train :

Production de force motrice.....	0,09 fr.
Personnel de conduite.....	0,10 »
Entretien et graissage des locomotives.....	0,10 »
Entretien et graissage des wagons.....	0,01 »
Total.....	<u>0,30 »</u>

Ajoutons-y pour mémoire une diminution importante dans la surveillance et l'entretien des voies (0,40 fr. avec les locomotives à vapeur par kilomètre-train) pour les raisons que nous avons indiquées en tête de cet article. Enfin la dépense d'entretien des lignes aériennes, 100 à 150 fr. par kilomètre de voie et par an, ne pourrait atténuer que dans de faibles limites les économies réalisées sur l'entretien des voies.

Nous pourrions donc conclure, comme M. de Marchena le faisait pressentir dès 1896, à la fin de son étude, en affirmant que la traction électrique à grande vitesse est financièrement possible dans l'état actuel de nos chemins de fer, et qu'elle apporterait certainement une économie dans l'exploitation et une augmentation des recettes. Les essais de traction électrique à grande vitesse, que nous allons maintenant exposer, nous montreront que ce mode de traction semble, dès aujourd'hui, également possible au point de vue technique.

(A suivre)

BARBILLION,
Ingénieur-Electricien,
Maitre de Conférences à l'Institut
Electrotechnique de Grenoble.

Les installations

de la

Société d'Energie Electrique

de Grenoble et Voiron

La Société d'Energie Electrique de Grenoble et Voiron a, en ce moment, l'exploitation de deux usines hydro-électriques, l'une qui lui appartient en propre, l'Usine d'Engins et l'autre qu'elle a affermée pour une durée de dix ans à MM. Carrière et Cie, l'Usine des Côtes de Sassenage.

Ces deux usines, branchées en parallèle sur une ligne de plus de 40 kilomètres, alimentent, à Grenoble et à Voiron, une grande quantité de moteurs synchrones et asynchrones pendant la journée, et y fournissent de la lumière le soir,