

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Bulletin technique de la Suisse romande |
| Band: | 32 (1906) |
| Heft: | 20 |
| Artikel: | L'énergie nécessaire pour l'exploitation électrique des Chemins de fer suisses |
| Autor: | Wyssling |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-25591 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

échelles correspondantes, les points $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, on fait en sorte que les droites $\alpha\beta$ et $\gamma\delta$ se coupent sur \mathcal{A} . On peut d'une infinité de manières satisfaire à cette condition.

Chaque fois qu'elle sera vérifiée et quelle que soit d'ailleurs la solution particulière que l'on aura considérée, la figure A sera toujours abaque de l'équation B.

Ce fait fondamental s'établit facilement.

Par un point quelconque O , de la droite \mathcal{A} que nous prenons comme axe Oy , menons une droite quelconque. Ce sera Ox . Admettons, si l'on veut, que la direction positive de Oy soit orientée dans le même sens que la direction positive des supports. Laissons arbitraire celle de Ox . Dans ce cas, les échelles étant placées comme nous l'avons dit, leurs points initiaux auront des ordonnées k'_i auxquelles correspondent des valeurs bien déterminées h'_i .

Une relation telle que (4), dans laquelle on fera $h_i = h'_i$, ($i = 1, 2, 3, 4$), sera toujours vérifiée chaque fois que sur leurs échelles respectives on fixera des points $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, tels que les droites $\alpha\beta$ et $\gamma\delta$ se coupent sur \mathcal{A} . Mais les équations (5) se trouvent satisfaites par les l_i et les valeurs de a, b, c et d . La nouvelle relation sera, par conséquent, équivalente à la suivante :

$$(10) \quad \alpha^m \beta^n = \frac{h'^p_3 h'^q_4}{h'^m_1 h'^n_2} \gamma^p \delta^q.$$

Comme la relation B se trouve vérifiée par le système particulier de valeurs $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, que nous avons considéré, et qu'il en est de même de l'équation (10), on aura forcément :

$$\frac{h'^p_3 h'^q_4}{h'^m_1 h'^n_2} = C.$$

La relation (10), correspondant à l'abaque A, est donc identique à la relation B. A est donc abaque de B, ce que nous voulions démontrer.

D'une manière générale, nous venons d'établir qu'à toute équation telle que B, correspond une infinité d'abaques tels que A, dans lesquels, modules et rapports des distances des supports à \mathcal{A} , doivent être choisis conformément aux équations (7) et (9).

Un abaque particulier s'obtient en considérant une solution particulière de B et en plaçant les points $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ correspondants, sur deux droites $\alpha\beta, \gamma\delta$, astreintes à la seule condition de se couper sur \mathcal{A} .

Pour construire un abaque de l'équation B, il n'est donc pas nécessaire de faire intervenir un système de coordonnées. Inutile, par conséquent, de déterminer la position de chaque échelle sur son support, en fixant les points initiaux. Une solution particulière de B suffit⁴. Ce fait est important, car il peut très bien se faire qu'aucune des valeurs $\alpha = \beta = \gamma = \delta = 1$, correspondant aux points initiaux, n'intervienne *pratiquement* dans la résolution de B. Il peut arriver aussi, que seules quelques-unes d'entre elles doivent être prises en considération. Seuls, par conséquent,

⁴ Il sera bon, pratiquement, de placer les échelles en tenant compte de deux solutions au moins de l'équation B. Ceci, dans le but d'éviter des erreurs semblables à celles qui résulteraient, par exemple, d'une mauvaise intersection de $\alpha\beta$ et $\gamma\delta$ sur \mathcal{A} .

les fragments d'échelles qui correspondent aux intervalles naturels de variation des inconnues, entrent en ligne de compte, dans la construction d'un abaque relatif à B.

Quelques remarques sont nécessaires encore. D'après (9), trois des modules restent arbitraires. Trois des échelles aussi peuvent être placées à volonté le long de leurs supports. Les relations (7) ne donnent que la valeur des rapports $\frac{a}{b}$ et $\frac{c}{d}$, de sorte que les distances a, b, c, d , ne sont pas non plus entièrement déterminées. On utilisera toutes ces circonstances en vue d'une bonne disposition d'abaque. Généralement l'un des modules aura la valeur 1. L'échelle correspondante est alors dans l'abaque l'échelle type à laquelle se comparent les autres.

Constatons enfin que la relation (9) admet comme solution le système

$$l_1 = m, \quad l_2 = n, \quad l_3 = p, \quad l_4 = q,$$

auquel correspond, comme conséquence de (7),

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} = -1.$$

A l'équation B on peut donc toujours faire correspondre un abaque, dans lequel les modules des échelles sont respectivement égaux aux exposants des variables correspondantes. Deux paires de droites parallèles et symétriques par rapport à \mathcal{A} deviennent dans ce cas respectivement supports des échelles (α) et (β) d'une part, (γ) et (δ) d'autre part.

(A suivre).

L'énergie nécessaire pour l'exploitation électrique des Chemins de fer suisses.

Communication de la Commission suisse d'études pour la traction électrique des chemins de fer¹.

Par M. le Secrétaire général Prof.-Dr WYSSLING.

Le programme adopté en mai 1904 pour les études de la Commission a, comme premier objet principal, la *détermination de l'énergie nécessaire* pour l'exploitation électrique des chemins de fer suisses. L'importance de l'électrification des chemins de fer de notre pays ne réside pas en réalité et avant tout dans l'utilisation de certains avantages, de nature purement technique, que l'on prête à la traction électrique, et qui, dans beaucoup d'endroits, ont déterminé l'introduction de ce mode de traction (comme par exemple la possibilité d'atteindre de plus grandes vitesses, la faculté d'augmenter le trafic, l'absence de fumée, etc.); la raison principale pour la Suisse est plutôt d'ordre économique, puisqu'elle est celle de l'utilisation des forces hydrauliques du pays au lieu de l'importation de charbons étrangers.

Les premières questions à résoudre sont par conséquent : Quelle est l'énergie nécessaire ? Celle-ci peut-elle se trouver dans le pays ? En présence des affirmations pessimistes

¹ Traduit du texte allemand par les soins de la Rédaction du *Bulletin technique*.

énoncées ces années dernières sur la quantité d'énergie hydraulique disponible, cette question s'imposait non seulement aux personnes peu au courant de ce sujet, mais encore aux techniciens, qui ne pouvaient pas la résoudre *a priori*, toutes les forces hydrauliques n'étant pas propres à être utilisées pour la traction.

Pour l'évaluation de la quantité d'énergie nécessaire, il y a lieu de considérer que celle-ci dépend dans une certaine mesure du système électro-mécanique adopté. A un plus haut degré encore, l'énergie nécessaire dépend des nécessités purement techniques de l'exploitation.

On a pu cependant obtenir une idée d'ensemble suffisante de cette première question en rapportant la dépense d'énergie à celle qui est nécessaire aux roues motrices des trains, dépense qui n'est fonction que dans une faible mesure du système électro-mécanique adopté. Pour ce qui concerne le service d'exploitation, il sera probablement nécessaire, surtout pour la jonction avec les lignes étrangères, de conserver tout d'abord avec la traction électrique les habitudes actuelles de la traction à la vapeur, celle par exemple qui consiste à faire circuler des trains relativement lourds et peu nombreux, habitude qui devra probablement être conservée longtemps encore. Si l'on se base par conséquent sur les conditions d'exploitation actuelles, on obtient à coup sûr la quantité maximum d'énergie qui pourra être exigée par la traction électrique.

La Commission partit de cette base et détermina les exigences auxquelles la traction électrique devait suffire au point de vue de l'exploitation technique des chemins de fer. Puis elle chargea une sous-commission, composée d'électriques et d'ingénieurs de nos grandes lignes, de l'étude complète de la question. A son tour, la sous-commission posa les principes à suivre dans ce travail et confia l'exécution des calculs et des études partielles à M. l'ingénieur L. Thormann, dont de temps à autre elle discuta les conclusions.

Le présent rapport suit dans ses grandes lignes le rapport détaillé de M. Thormann.

Nous allons exposer maintenant les données fondamentales de notre travail.

Résistance au roulement (coefficient de traction).

Cette résistance, dans laquelle nous comprenons l'ensemble des forces qui s'opposent au mouvement uniforme d'un train en palier, se compose :

a/ du frottement de roulement et parfois de glissement des roues sur les rails, y compris l'effort absorbé par le passage des surélévations que les rails peuvent offrir du fait de corps étrangers, de leur flexion propre, etc. ;

b/ du frottement des essieux dans leurs boîtes ;

c/ du frottement des bandages sur les rails dans les courbes ;

d/ de la résistance de l'air sur les surfaces frontales des véhicules et du frottement de l'air en général contre ceux-ci.

Les trois premières quantités sont seules proportionnelles aux masses en mouvement. La résistance de l'air par contre ne peut être donnée que d'après des résultats

d'expériences ; elle est en outre, comme on sait, dépendante de la composition du train.

Voici les expériences qui ont été prises en considération :

1^o Les essais de la Société pour la traction électrique faits en 1902-03 près de Zossen, résumés par la formule :

$$\lambda = 0,0052 V^2 F \text{ en kg. par tonne,}$$

V étant exprimé en km. à l'heure et la surface frontale du train, *F*, en mètres carrés.

2^o Les essais de Davis sur la ligne Buffalo-Lockport (*Street Railway Journal*, 1902) qui ont donné :

$$\lambda = 0,0076 V^2 F \text{ en kg. par tonne,}$$

le coefficient de frottement des essieux valant 3 kg. par tonne et celui de frottement sur les rails 0,04 *V* environ (en kg. par tonne).

3^o Les essais de Barbier sur le Chemin de fer du Nord (*Revue des Chemins de fer*, 1898), d'où il résulte qu'un train de 14 voitures à deux essieux, pesant 160 tonnes, subit une résistance totale au roulement de

$$1,6 - 0,023 V - 0,00046 V^2 \text{ kg. par tonne.}$$

Il y a lieu de remarquer que, dans ces derniers essais, la résistance de l'air sur la surface frontale de la locomotive fut déterminée théoriquement d'après la formule

$$\lambda = 0,0077 V^2 F.$$

Cette dernière valeur est trop élevée d'après les essais très précis de Zossen ; comme la formule de Barbier a été établie en déduisant cette valeur de la résistance de l'air, λ , de celle donnée directement par les essais, il s'en suit que les résistances au roulement des essais de Barbier sont plus grandes que cet auteur ne l'indique. En corrigeant la courbe de Barbier (qui représente la résistance totale en palier et en alignement droit en fonction de la vitesse) conformément à la remarque qui précède, elle ne diffère plus beaucoup de celle que l'on peut déduire des expériences de Zossen pour une composition de trains analogue à celle indiquée par Barbier.

4^o Une formule déjà ancienne, donnée par Clark, fournit des résultats analogues. En résumé, la résistance totale au roulement en kg. par tonne pour un train de 14 voitures à deux essieux, du poids de 160 tonnes, est :

| A la vitesse de | D'après Barbier (formule corrigée) | D'après les essais de Zossen | D'après Clark de Zossen |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 0 km. à l'heure | 1,5 | 1,2 | 2,3 |
| 50 " | 4,4 | 3,9 | 4,4 |
| 100 " | 11,0 | 10,4 | 10,2 |

D'autres compositions de trains donnent naturellement des résultats quelque peu différents ; c'est le cas en particulier pour des wagons à bogies, pour lesquels la résistance est sensiblement plus faible.

Il va sans dire que la détermination des résistances au roulement de chaque train en particulier ne pouvait pas être entreprise dans la présente étude. C'est pourquoi la courbe donnant la résistance en kg. par tonne, obtenue par les essais de Barbier pour des trains de 14 voitures, et cor-

rigée comme il est dit ci-dessus, fut prise comme base des recherches qui vont suivre. Les résultats obtenus seront évidemment plus élevés que la réalité, vu l'emploi toujours plus fréquent de voitures à bogies.

Le calcul aurait été cependant trop imprécis si l'on avait adopté simplement la moyenne des résistances au roulement correspondant à la vitesse moyenne des express, des omnibus et des trains de marchandises, car les diverses valeurs de cette résistance contribuent à des taux différents à l'établissement de cette moyenne ; c'est pourquoi on a calculé pour une région assez étendue (1^{er} arrondissement des Chemins de fer fédéraux) le travail nécessaire pour le roulement de chacune des trois catégories de trains, en admettant pour ces trains des vitesses d'environ 5 km. plus faibles que les vitesses maximum autorisées. Le travail total de roulement fut ensuite réduit à la tonne-kilomètre ; il en résulte une valeur moyenne de la résistance de 4,3 kg. par tonne. Les express ont des valeurs qui varient entre 5,0 et 6,8 (exceptionnellement 4,5), les trains omnibus entre 4,5 et 5 (exceptionnellement 3) ; les trains de marchandises et les trains facultatifs entre 3 et 3,2.

Pour la résistance dans les courbes, on prit comme base la formule universellement adoptée donnée par Röckl (*Organ*, 1881) :

$$W_e = \frac{650}{R-55} \text{ kg. par tonne ;}$$

R représente le rayon de la courbe en mètres. Il résulte d'une enquête que l'on peut adopter un rayon moyen de 1500 mètres environ pour les Chemins de fer fédéraux et de 970 mètres pour le Gothard, ce qui donnerait des résistances en courbe de 0,5 et 0,7 kg. par tonne.

En adoptant la dernière de ces valeurs la résistance totale moyenne atteint $4,3 + 0,7$, soit 5 kg. par tonne.

Sur la proposition des ingénieurs des chemins de fer, pour augmenter encore la sécurité de cette évaluation, le calcul a été fait avec 6 kg. par tonne, afin de tenir compte de circonstances plus défavorables que celles des essais.

Comme, dans la présente étude, on s'est toujours basé sur les données les moins favorables, il est permis d'affirmer que les résultats obtenus représentent très largement l'énergie nécessaire pour les lignes à voie normale, et que les besoins réels seront en tous cas plutôt inférieurs.

Pour les chemins de fer à voie étroite, on a adopté une résistance totale au roulement de 10 kg. par tonne, valeur qui est sans doute aussi trop élevée.

Si nous nous sommes étendus sur la façon dont ont été calculées les résistances au roulement, c'est dans l'intention de montrer par cet exemple particulier que les calculs n'ont pas été faits d'une façon superficielle, mais qu'au contraire ils ont été exécutés aussi exactement que possible et cela souvent à grand peine.

Travail de démarrage. Travail de freinage.

Théoriquement, le travail fourni à un train au démarrage pour l'amener à sa vitesse maximum peut de nouveau être utilisé pour vaincre le frottement de roulement en supprimant la force motrice bien avant le prochain arrêt.

La pesanteur peut aussi servir à fournir le travail de démarrage quand ce dernier se produit sur une pente.

La pratique montre que ce n'est que lorsque l'arrêt doit se faire sur des rampes d'environ 20 %, et plus, que l'on peut laisser le train s'arrêter de lui-même, si l'on ne veut pas que le temps d'arrêt et le chemin parcouru pendant le ralentissement soient trop grands ; de même, ce n'est que sur des pentes de même inclinaison que l'on peut utiliser pratiquement la pesanteur pour le démarrage aux vitesses usuelles (jusqu'à 100 km. à l'heure). C'est pourquoi le calcul de l'énergie nécessaire au démarrage a été fait dans la supposition que le travail nécessaire au démarrage de tous les trains prévus à l'horaire doit être fourni entièrement par le courant électrique, sans aucune déduction pour les démarrages en pente ou les arrêts en rampe.

Les valeurs ainsi calculées ont été augmentées encore de 30 % pour les omnibus et les trains de marchandises et de 110 % pour les express, afin de tenir compte de l'énergie nécessaire aux variations de vitesse pendant le trajet et aux démarrages imprévus près des signaux ou sur les tronçons en réparation. Ces adjonctions comprennent, en outre, l'énergie nécessaire à l'accélération des masses tournantes du train, énergie qui ne représente d'ailleurs que quelques % du travail nécessaire au démarrage.

Les poids de trains qui ont servi aux calculs ont été déterminés de la façon suivante :

Pour les Chemins de fer fédéraux, le bureau de l'exploitation a fourni les tableaux de charges de tous les trains ; parmi ceux-ci, on a choisi les tableaux relatifs au mois d'août 1903 pour les trains express et omnibus, et ceux du mois d'octobre 1903 pour les trains de marchandises ; en effet, les trains les plus lourds de la première catégorie marchent ordinairement en août, tandis que les trains de marchandises sont les plus chargés en octobre (il arrive cependant qu'en août ces derniers ne sont guère plus légers).

En juxtaposant ces deux valeurs maximum on a la valeur la plus élevée possible du trafic de 1903. Les charges de train réellement observées furent déterminées pour chaque tronçon des quatre arrondissements des Chemins de fer fédéraux et cela de la façon suivante : pour chaque numéro de train, on fit la moyenne de toutes les charges de chacun des trains de ce numéro, puis la moyenne des charges de tous les numéros de trains donna celle de la catégorie correspondante (express, omnibus et marchandises) sur chaque tronçon.

On procéda de la même façon pour les charges *maxima* de chaque numéro et on tira enfin de tous les numéros d'une catégorie « la charge maximum moyenne » de la catégorie et du tronçon correspondant.

On ajouta ensuite à ces charges de trains, les poids des locomotives. Pour cela on admis un coefficient d'adhérence de $\frac{1}{7}$ au minimum et l'on détermina pour la rampe maximum du tronçon correspondant le poids nécessaire à ajouter. Ce poids correspond assez exactement à celui des locomotives actuelles (sans tender ni approvisionnements). Dans la traction par locomotives électriques, ce poids ré-

présenterait celui de ces locomotives elles-mêmes, auquel cas les poids totaux des trains resteraient les mêmes. Dans la traction par automotrices, le poids supplémentaire de l'équipement électrique peut différer un peu du poids des locomotives, mais sans que les résultats soient influencés d'une façon notable par cette différence. Les poids de trains ainsi obtenus furent arrondis, par excès.

On admet en outre que ces poids sont les mêmes dans les deux sens de marche ; si cette supposition n'est pas tout à fait exacte, les différences qui en résultent disparaissent en raison de l'influence prépondérante que la résistance au roulement a sur les Chemins de fer fédéraux.

Pour le Gothard, les charges moyennes et maximum ont été indiquées par la Direction de cette ligne ; on en a déduit les poids des locomotives, puis ajouté les poids d'adhérence nécessaires, déterminés comme ci-dessus. Ici encore il a été admis dans le calcul que les charges dans les deux sens de marche étaient les mêmes.

Le trafic des *autres chemins de fer suisses* à traction à vapeur (à voie normale et à voie étroite) ne s'élève qu'à environ 8% de celui des Chemins de fer fédéraux et du Gothard réunis ; c'est pourquoi on s'est contenté de méthodes exigeant moins de temps et moins de calculs : il a suffi de comparer la statistique fédérale des chemins de fer pour 1902 avec les charges réelles des trains des Chemins de fer fédéraux et du Gothard pour reconnaître que les *poids moyens* indiqués par la statistique doivent être augmentés de 30 à 40% pour obtenir les poids d'août et d'octobre. Cette addition de 30 à 40% fut faite au poids moyen indiqué par la statistique, afin d'obtenir les poids de train pour les mois les plus chargés.

Le tableau qui suit contient un résumé de tous les calculs.

Les poids des trains *d'hiver* sont beaucoup plus faibles sur toutes les lignes des Chemins de fer fédéraux. Ils varient entre 70 et 85% de ceux des mois les plus chargés (août pour les express, octobre pour les trains de marchandises).

Horaires.

C'est *l'horaire d'été 1904* pour les jours ouvrables (y compris les trains périodiques) qui fut pris comme base des calculs, et cela comme étant la période la plus chargée qui fut connue au début des études.

Afin de tenir compte de l'accroissement du trafic dû aux marchandises, on ajouta les trains de marchandises facultatifs qui circulèrent réellement en octobre 1903, et cela d'après les tableaux de charge des Chemins de fer fédéraux et les communications de l'Administration du Gothard. Comme, sur cette dernière ligne, le nombre des trains se dirigeant vers le Sud s'est trouvé plus grand que celui des trains marchant en sens inverse, chacun des sens de marche a été traité séparément.

En outre, les calculs ont aussi été faits pour un *jour d'hiver* et cela d'après l'horaire d'hiver 1903-04 ; pour les Chemins de fer fédéraux on choisit les trains réellement expédiés en 1904 ; pour le Gothard et quelques autres lignes, on se borna à une réduction proportionnelle des charges des trains d'été.

Ces bases établies, on put procéder au *calcul de l'énergie nécessaire*. Il y a lieu de considérer :

A. *L'énergie nécessaire* pour le trafic pendant un temps donné, désignée par le nom « *d'énergie totale* » ou « *effective* » (ou même d'une façon incorrecte par « *puissance totale* » ou « *puissance annuelle* »).

B. *La puissance nécessaire* au trafic à un certain moment, désignée parfois sous le nom de « *puissance instantanée* » (ou d'une façon incorrecte par « *force momentanée* »).

La connaissance de l'*énergie* est nécessaire pour la détermination de la quantité totale d'eau annuelle et pour celle de la puissance moyenne des usines génératrices ; il est en outre nécessaire de connaître les valeurs *maxima* de la *puissance*, afin de déterminer les dimensions des installations pour la production du courant et celles des lignes d'alimentation (du canal d'aménée de l'eau jusqu'au fil de ligne), ainsi que pour la détermination de la capacité nécessaire aux appareils d'accumulation électrique ou hydraulique.

Calcul de l'énergie nécessaire.

Le travail nécessaire, *par tonne de poids brut*, pour gravir les rampes et vaincre la résistance au roulement se calcule de la façon suivante :

Si le travail dépensé pour l'ascension des rampes pouvait être récupéré au retour, à la descente, on aurait comme travail nécessaire à un voyage d'aller et de retour $2l\rho$, en appelant l la longueur de la ligne en mètres et ρ la résistance totale au roulement, en kilogrammes par tonne.

Il y a lieu de remarquer qu'en pratique, dans tous les cas où la pente en % est plus grande que la résistance au roulement exprimée en kilogrammes par tonne, la force superflue est détruite par le freinage, se perd par conséquent, et doit être remplacée lorsque le train se meut en sens inverse.

Si l'on désigne par l_1 la longueur des tronçons sur lesquels ce cas se produit et par h_1 la somme des différences de niveau en montées et en descentes pour ces mêmes tronçons, ces deux quantités étant exprimées en mètres, cette énergie perdue se monte à $1000h_1 - \rho l_1$, en kilogrammètres.

Il y aura donc à dépenser pour l'ascension des rampes et la résistance au roulement un travail de

$$A_\rho + h = 2\rho l + 1000h_1 - \rho l_1 \quad (\text{en kilogrammètres})$$

pour un trajet d'aller et de retour.

C'est d'après cette formule que ce travail a été calculé par *tonne transportée*, en se basant sur les longueurs l , l_1 et h_1 données par les profils en long. Dans tous les cas où l'aller et le retour de trains isolés devaient être calculés séparément, une formule analogue a été employée. L'énergie rendue libre pendant les descentes (qui est ordinairement détruite par le freinage, mais qui, par des dispositions spéciales, pourrait être récupérée), dont l'importance est toute spéciale pour la traction électrique, est exprimée par la formule

$$A_r = 1000h_1 - \rho l_1 \quad (\text{en kilogrammètres par tonne}).$$

| Lignes | Variations dans le mois le plus chargé: | | | | | Données admises dans le calcul |
|---|--|-------------------------------|---------------------------------|---|---|---------------------------------------|
| | <i>des charges des trains.</i> | | <i>du poids adhérent.</i> | | | |
| Moyennes | Moyennes des charges maximum. | Maxima absolu. | Adhérence (suivant les rampes). | Charges moyennes (ont servi pour le calcul de l'énergie). | Charges maximum (ont servi pour le calcul de la puissance maximum). | |
| A. Pour les C. F. F. : | | | | | | |
| a) <i>Express.</i> | | | | | | |
| 1. Sur parcours à forte charge (peu nombreux) | 220—250 | 270—320 | 320—480 | 50—80 | 300—350 | 400 |
| 2. Sur parcours à charge moyenne (très nombreux) | 100—240 | 170—290 | 230—480 | 40—60 | 180—300 | 300 |
| 3. Sur parcours à charge peu importante (peu nombreux) | 80—110 | 100—160 | 110—260 | 20—60 | 120—180 | 150—200 |
| b) <i>Omnibus.</i> | | | | | | |
| 1. Sur parcours à forte charge (peu nombreux) | 160—180 (209) ¹ | 240—270 (380) ¹ | 340—480 (514) ¹ | 40—60 (45) ¹ | 200—250 (350) ¹ | 350 (450) ¹ |
| 2. Sur parcours à charge moyenne (très nombreux) | 80—210 | 150—270 | 200—380 | 25—40 | 120—200 | 200—250 |
| 3. Sur parcours à charge peu importante (peu nombreux) | 50—100 (40) | 80—120 (50) | 80—230 (50) | 20—40 (25) | 70—120 (65) | 150 (75) |
| c) <i>Trains de marchandises.</i> | | | | | | |
| 1. Sur parcours à forte charge (assez nombr ^x) | 270—420 (500) | 420—550 (700) | 500—900 (900) | 50—90 (50) | 350—450 (550) | 600 (750) |
| 2. Sur parcours à charge moyenne (très nombreux) | 210—350 | 290—450 | 360—740 | 40—70 | 275—400 | 450 |
| 3. Sur parcours à charge peu importante (peu nombreux) | 40—180 | 50—300 | 50—350 | 20—60 | 65—300 | 75—300 |
| B. Pour le Gothard : | | | | | | |
| a) <i>Express.</i> | | | | | | |
| 1. Sur presque toute la ligne | 200—220 | 280—350 | — | 50—75 | 300 | 400 |
| 2. Sur quelques tronçons très courts | 100—110 | 180—200 | — | 30—40 | 150 | 200—300 |
| b) <i>Trains omnibus.</i> | | | | | | |
| Sur toute la ligne, sauf un tronçon accessoire | 120—180 | 240—350 | — | 35—65 | 200 (250) | 350 |
| c) <i>Trains de marchandises.</i> | | | | | | |
| 1. Sur parcours à forte charge (peu nombreux) | 350—380 | 500 | — | 60 | 450 | 700 |
| 2. Sur les autres parcours, sauf un tronçon accessoire | 270—350 | 330—370 | — | 40—95 | 450 | 500 |
| C. Pour les autres lignes à voie normale : | | | | | | |
| a) <i>Express</i> | — | — | — | — | 120—175 | 250 |
| b) <i>Trains omnibus</i> (en général) | — | — | — | — | 100—175 | 150—250 |
| c) » Quelques cas particuliers | — | — | — | — | 25—80 | 40—110 |
| d) <i>Trains de marchandises</i> (en général) | — | — | — | — | 100—150 | 150—250 |
| D. Pour les voies étroites à vapeur (toutes catégories de trains). | | | | | | |
| 1. Chemins de fer rhétiens | — | — | — | — | 120 | 150—300 |
| 2. Autres lignes | — | — | — | — | 40—80 | 80—150 |

¹ Les chiffres entre parenthèses se rapportent à quelques cas exceptionnels.

Elle a été déterminée dans chaque cas particulier.

Quant au travail d'accélération qui s'ajoute au travail de déplacement du train, nous renvoyons à ce qui a été dit plus haut.

Les manœuvres dans les gares exigent en outre un travail supplémentaire qui a été calculé pour toutes les gares où stationnent des locomotives de manœuvre. (Les manœuvres dans les gares qui n'ont pas de locomotives spéciales pour ce service sont de si peu d'importance qu'elles peuvent être négligées en tenant compte des différentes approximations par excès que nous avons faites).

Le nombre des locomotives de manœuvre et leur nombre d'heures de service journalier sont connus ; en se basant sur le fait d'expérience qu'une heure de manœuvre représente environ 6 km., exigeant chacun environ 10 kg. de charbon, on détermina la dépense totale de combustible de ces machines ; en admettant, en outre, une consommation de 2 kg. de charbon pour chaque cheval-heure fourni, on put finalement calculer le nombre total de chevaux-heures exigés par ce service. Comme en somme ce service ne représente qu'une faible partie de l'énergie totale mise en jeu, ce procédé approximatif est amplement suffisant.

Le chauffage et l'éclairage des trains, qui ne rentrent qu'en partie dans l'énergie à fournir par les locomotives actuelles, devront, au contraire, être complètement fournis par le courant dans le cas de la traction électrique. Pour le calcul de la dépense, on s'est basé sur le nombre des places de voyageurs. Ce nombre a pu être déterminé avec une approximation suffisante d'après le nombre et le poids des véhicules, en admettant d'une part avec la statistique des chemins de fer que la tare des wagons s'élève à $\frac{1}{4}$ de tonne par place de voyageur et, d'autre part, en se basant sur le fait d'expérience que le nombre des places est exprimé par la moitié du poids du train ; chaque tonne de train peut donc être comptée pour deux places de voyageurs. C'est naturellement les poids des *trains d'hiver* qui ont servi de base au calcul.

Pour le chauffage, on peut admettre une puissance dépendante de 0,156 kw. par place, d'après les expériences faites sur le chemin de fer électrique de Fribourg à Morat, sur lequel 7,5 kw. suffisent pour des wagons de 48 places. En admettant que le temps de marche des appareils de chauffage dure 7 heures par jour, ce qui est la moitié du temps total de travail d'un wagon, on déduit que, pour chaque place, il est nécessaire de fournir par jour, une énergie de

$$\frac{0,156 \times 7}{0,736} = 1,48 \text{ cheval-heure},$$

soit en chiffres ronds 1,5 cheval-heure.

Pour l'éclairage, on s'est basé sur une intensité de 2 bougies par place, ce qui est plus que la moyenne actuelle, et ce qui représente pour les lampes ordinaires une puissance de 7 watts ; comme, en outre, les Chemins de fer fédéraux accusent un rendement moyen de 0,3 pour cet éclairage, il s'en suit que chaque place exige une puissance de

$$\frac{0,007}{0,3 \times 0,736} = 0,031 \text{ chev.-heures}$$

ce qui représente, pour un éclairage de 8 heures par jour, un travail de

$$0,031 \times 8 = \text{environ } 0,25 \text{ chev.-heures.}$$

Les résultats de tous les calculs d'énergie sont consignés dans une suite de tableaux, qui indiquent pour chacun des tronçons d'une même ligne, différents comme nature d'exploitation, la longueur du parcours, le poids moyen des trains et le nombre des trains de chaque catégorie, les tonnes transportées, le travail à dépenser par tonne et par course, le travail éventuellement disponible en pente, le nombre des démarriages et le travail total de roulement qui en résulte par tonne-kilomètre. Pour donner une idée de la minutie de ce travail, disons que la ligne Genève-Berne a été partagée en tronçons comme suit : Genève-Morges, Morges-Lausanne, Lausanne-Palézieux, Palézieux-Romont, Romont-Fribourg, Fribourg-Berne.

Nous donnons dans le tableau suivant un résumé des résultats obtenus (voir page 238).

Il en résulte pour l'énergie nécessaire en un jour d'été, pour l'ensemble des chemins de fer suisses à vapeur, l'énergie étant mesurée à la jante des roues motrices, les nombres suivants : pour la traction conformément à l'horaire environ 1 150 000 chevaux-heures (les Chemins de fer fédéraux et les lignes exploitées par eux forment les $\frac{2}{3}$ de ce nombre, les Chemins de fer fédéraux et le Gothard ensemble les 90% de ce nombre) ; il y a eu lieu d'ajouter pour les manœuvres dans les gares environ 50 000 chevaux-heures, ce qui porte l'énergie nécessaire à 1 200 000 chevaux-heures.

En été, le chauffage est nul, l'éclairage insignifiant.

* * *

Énonçons ici quelques considérations suggérées par ces résultats :

En admettant un système d'exploitation qui ne permette aucune récupération d'énergie dans les descentes, nous avons donc à fournir chaque jour 1 200 000 chevaux-heures aux jantes des roues motrices. Quant au travail à fournir journalièrement par les stations centrales, il dépend du système adopté et de son rendement. Ce système ne peut pas encore être déterminé pour le moment, mais l'on peut prévoir cependant qu'il doit être possible, même avec le système le moins avantageux, d'obtenir un rendement total moyen de 45% entre le travail utilisable aux jantes et l'énergie fournie par les turbines des stations primaires. Calculons avec 40% seulement. Il nous semble que ce rendement tient largement compte des pertes qui se produisent dans le système à courant alternatif à triple transformation (élévation de la tension dans la station centrale, abaissement de la tension aux fils du trolley et nouvel abaissement dans la voiture motrice), ou dans le système triphasé avec transformation en continu et batteries d'accumulateurs. Les turbines devront donc fournir journalièrement 3 000 000 de chevaux-heures.

En négligeant, pour le moment, les réserves hydrauliques à constituer pendant les différentes saisons de l'année,

**Données relatives à l'énergie nécessaire pour les chemins de fer exploités à la vapeur
en Suisse, en un jour ouvrable d'été.**

| Réseaux : | Kilomètres-trains | Tonnes-kilomètres | <i>Energie en chevaux-heures à la jante des roues motrices.</i> | | | | |
|---|-------------------|-------------------|---|----------------------------|-------------------|-----------|---------------------|
| | | | Pour les rampes et la résistance au roulement | A récupérer éventuellement | Pour le démarrage | Total | Par tonne-kilomètre |
| C. F. F., arrondissement I | 20 978 | 6 023 400 | 160 265 | (28 260) | 59 725 | 219 990 | 0,0365 |
| » » II | 21 252 | 6 337 300 | 181 980 | (47 374) | 57 170 | 239 150 | 0,0376 |
| » » III | 27 121 | 7 627 600 | 190 570 | (21 500) | 87 615 | 278 185 | 0,0377 |
| » » IV | 12 190 | 3 355 500 | 85 870 | (10 985) | 38 920 | 124 790 | 0,0372 |
| C. F. F. et lignes exploitées par les C. F. F. Total | 81 541 | 23 343 800 | 618 685 | (108 119) | 243 430 | 862 115 | 0,0370 |
| Gothard | 12 830 | 4 550 400 | 158 180 | (57 044) | 17 475 | 175 680 | 0,0386 |
| Lignes secondaires à voie normale | 11 755 | 1 392 490 | 50 505 | (19 613) | 15 230 | 65 735 | 0,0472 |
| Voies étroites à vapeur Total | 7 635 | 749 880 | 45 325 | (16 826) | 4 040 | 49 365 | 0,0658 |
| Total général des lignes à vapeur | 113 761 | 30 036 570 | 872 695 | (201 602) | 280 175 | 1 152 895 | 0,0384 |
| Détail des voies étroites à vapeur : | | | | | | | |
| Chemins de fer rhétiens | 3 174 | 367 400 | 20 195 | (6 601) | 2 250 | 22 450 | 0,061 |
| Ligne du Brünig | 1 185 | 151 900 | 10 895 | (4 340) | 1 035 | 11 930 | 0,078 |
| Autres lignes | 3 276 | 230 880 | 14 235 | (5 885) | 755 | 14 985 | 0,065 |
| <i>Energie supplémentaire journalière pour le service des manœuvres dans les gares.</i> | | | | | | | |
| C. F. F. | — | — | — | — | — | 41 800 | — |
| Gothard | — | — | — | — | — | 2 340 | — |
| Lignes secondaires à voie normale | — | — | — | — | — | 750 | — |
| Lignes à voie étroite (chemins de fer rhétiens) | — | — | — | — | — | 300 | — |
| | | | | | Total | 45 190 | |

et en considérant la dépense de l'été comme la plus forte de celles qui peuvent se produire, ces 3 000 000 de chevaux-heures exigeraient une puissance continue de 125 000 chevaux pendant 24 heures par jour.

Il semble que les forces hydrauliques actuellement disponibles en Suisse dépassent ces 125 000 chevaux. L'un des plus récents projets étudiés serait capable à lui seul de fournir le $\frac{4}{5}$ de cette puissance. Mais il ne faut pas oublier que les forces hydrauliques ne sont pas réparties dans notre pays de façon à être toutes à proximité des lieux d'utilisation et qu'en outre, comme on le verra encore plus en détail dans les pages qui suivent, toutes les forces hydrauliques ne conviennent pas à la traction électrique ; en outre, les chutes proches de la frontière ne semblent pas pro-

pres à être utilisées pour le service des chemins de fer. Il n'est donc pas superflu de chercher les moyens de réduire la puissance nécessaire. En particulier l'étude de la question de la récupération de l'énergie dans les descentes s'impose.

(A suivre).