

Institut Royal Colonial Belge

SECTION
DES SCIENCES TECHNIQUES

Mémoires. — Collection in-8°.
Tome X, fasc. 1.

Koninklijk Belgisch Koloniaal Instituut

SECTIE
VOOR TECHNISCHE WETENSCHAPPEN

Verhandelingen. — Verzameling
in-8°. Boek X, afl. 1.

Électrification partielle du chemin de fer du Bas-Congo au Katanga

PAR

G. GILLON

PROFESSEUR ÉMÉRITE À L'UNIVERSITÉ DE LOUVAIN,
MEMBRE DE L'INSTITUT ROYAL COLONIAL BELGE



Avenue Marnix, 25
BRUXELLES

Marnixlaan, 25
BRUSSEL

1953

PRIX : F 90
PRIJS :





CARTE POSTALE — BRIEFKAART

Affran-
chissement
Fran-
kering

INSTITUT ROYAL COLONIAL BELGE

25, Avenue Marnix,

BRUXELLES

(Belgique).

<i>NOM (en capitales) :</i> <i>NAAM (in hoofdletters) :</i>		473.3	10.1	
<hr/> <hr/>				
<i>ADRESSE :</i> <i>ADRES :</i> <i>VILLE :</i> <i>STAD :</i>		<i>No</i> <i>Nr</i>		
		<i>PAYS :</i> <i>LAND :</i>		

Prière de vouloir bien compléter et retourner le présent accusé de réception, à moins que vous ne désiriez pas recevoir les publications ultérieures.

L'Institut Royal Colonial Belge recevra avec gratitude toute publication que vous voudrez bien lui adresser en échange, à savoir :

Gelieve ons dit ontvangstbewijs, ingevuld, terug te laten geworden, tenzij U de latere publicaties niet verlangt.

Het Koninklijk Belgisch Koloniaal Instituut zal met dank alle in ruil aangeboden publicaties ontvangen, te weten :

<hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>

Électrification partielle
du chemin de fer du Bas-Congo
au Katanga

PAR

G. GILLON

PROFESSEUR ÉMÉRITE À L'UNIVERSITÉ DE LOUVAIN,
MEMBRE DE L'INSTITUT ROYAL COLONIAL BELGE

Mémoire présenté à la séance du 29 mai 1953.

Électrification partielle du chemin de fer du Bas-Congo au Katanga

Électrification partielle des lignes de la C^{ie} du Bas-Congo au Katanga.

Le 20 octobre 1952 eut lieu l'inauguration de la mise à l'électricité d'une première partie des lignes du B. C. K., celle s'étendant de Jadotville à Tenke, soit sur une distance de 105 km. La figure 1 montre la situation de cette section dans une région où les lignes de transport de force électriques sont nombreuses et puissantes.

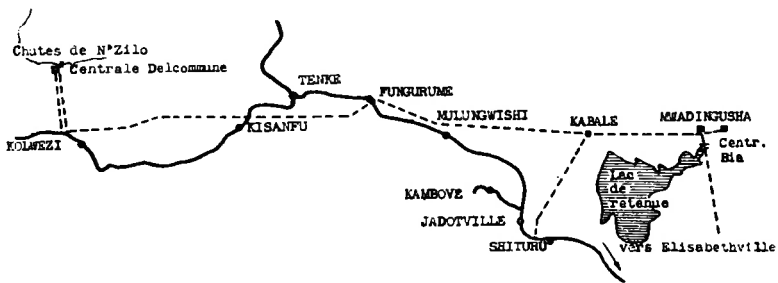


Fig. 1. — Chemin de fer Jadotville-Tenke.

Caractéristiques de la ligne du B. C. K.

- Ligne à simple voie ;
- Écartement des rails : 1,067 m. Courbes de 200 m de rayon minimum ;
- Longueur : 3 sections de 35 km environ chacune ;
- Charge admissible par essieu : 18,5 tonnes.

Il y existe une section de 30 km de longueur en rampe continue de 12,5 pour mille, où la vitesse doit atteindre 45 km à l'heure pour des trains de 550 tonnes et où deux locomotives, couplées en double traction, doivent imprimer la même vitesse à des trains de 1.000 tonnes. Ces conditions ont déterminé la puissance unihoraire des locomotives du type B.-B. ⁽¹⁾ qui a été choisi.

Choix du système de traction.

Le B. C. K. utilisait auparavant des locomotives à vapeur, alimentées généralement au bois. Ce combustible revient actuellement cher et tend à augmenter de prix en comparaison du prix auquel les centrales de l'Union Minière pourraient fournir le courant, attendu que ses lignes à 110.000 volts passent à proximité de la ligne du chemin de fer.

On aurait pu aussi remplacer les locomotives à vapeur par des locomotives Diesel-électriques qui se sont implantées aux États-Unis, durant ces 20 dernières années, avec un grand succès. Mais l'huile lourde, transportée au Katanga, revient également cher et impose à l'exploitation certains aléas, surtout en période troublée (menaces de guerre).

Après un examen approfondi de tous les éléments du problème au sujet desquels il possède des précisions suffisantes, le B. C. K. a décidé et réalisé l'électrification partielle de ses lignes.

Électrification.

Pour celle-ci, vu les grandes distances qu'il faut envisager pour l'avenir, il importait de distribuer l'énergie aux lignes de traction à un potentiel très élevé, ce qui

⁽¹⁾ B, deuxième lettre de l'alphabet, indique que chaque bogie a deux essieux.

écarte d'emblée l'adoption de courant continu, même à 3.000 V.

En courant alternatif monophasé, plusieurs lignes à 20.000 V ont donné entière satisfaction, et le B. C. K. a adopté 22.000 V pour la tension des caténaires au départ de la sous-station.

Un transformateur statique monté sur chaque locomotive, produit au secondaire une tension réglable entre 200 et 500 V. A cet effet, le secondaire de l'appareil porte de nombreuses prises auxquelles des contacteurs permettent de raccorder les circuits de traction, leur appliquant ainsi une tension graduellement croissante, qui facilite grandement le démarrage et le réglage de vitesse des trains.

Alors que jusqu'ici on avait généralement utilisé pour l'alimentation en monophasé des courants à basse périodicité, 25 ou 16 2/3 périodes, le B. C. K. a eu recours pour l'électrification de ses lignes à du courant alternatif à la fréquence industrielle de 50 périodes. Si cette périodicité a conduit anciennement à des échecs, il est certain que de grands progrès ont été faits dans cette direction, qui ont permis au B. C. K. d'estimer que, dans certaines conditions, le courant alternatif monophasé à 50 périodes pouvait donner pleine satisfaction (1).

On estime généralement que le courant continu à la tension de 600 V, p. ex., est le meilleur courant de traction, aussi certains sont partisans d'équiper les locomotives d'un groupe comportant un moteur à courant alternatif monophasé à 50 périodes, actionnant une généra-

(1) De 1920 à 1940, de grands progrès avaient été faits en Allemagne et en Amérique pour les moteurs de faible fréquence allant jusque 25 périodes, progrès donnant une augmentation de puissance et une diminution de poids.

Déjà, en 1940, sur la ligne Munich-Berlin circulaient des locomotives à 4 moteurs de 500 CV en courant à 16 2/3 périodes, à *adhérence* totale. En 1948, 2 locomotives de 2.500 CV circulaient sur les lignes du Pennsylvania à New-York. Pour les deux cas ci-dessus, deux unités pouvaient être réunies formant ainsi des locomotives de 5.000 CV.

trice de courant continu à tension réglable, combinant ainsi les avantages des deux systèmes de courants. Malheureusement les groupes sont lourds, coûteux et d'un rendement médiocre.

Enfin, un troisième système redresse, sur la locomotive même, le courant, de façon à le rendre *semblable à du courant continu*. Ce redressement peut être obtenu par un appareil entièrement statique, relativement léger et de bon rendement. Ses partisans revendiquent que ce système, en atténuant les défauts du précédent, réalise un *progrès sensible pour la traction électrique des chemins de fer*.

Divers systèmes d'alimentation des locomotives électriques sont donc possibles, de sorte qu'après avoir décidé le remplacement de la vapeur par l'électricité, il faut faire choix entre :

a) Le système à courant continu, à 1.500 ou 3.000 V (France — Italie — Belgique) ;

b) Le courant alternatif monophasé à 50 périodes, avec des moteurs de traction utilisant ce même courant (moteurs directs) ;

c) Le même courant à 50 périodes, mais transformé sur la locomotive en courant continu ou triphasé, ou en courant redressé, avant son introduction dans les moteurs de traction.

Le choix du système dépend surtout des conditions d'exploitation et principalement de l'importance du trafic.

Celui sur lequel le B. C. K. s'est basé pour le choix de la locomotive est 160. 10⁶ tonnes km brutes par an. Il correspond à 6 à 7 trains de 500 tonnes dans chaque sens par jour ouvrable. Le B. C. K. a choisi pour les locomotives destinées à réaliser ce trafic un type B.-B., répondant aux conditions ci-après.

Rappelons d'abord les *caractéristiques de la ligne de chemin de fer* :

Ligne à simple voie. — Écartement des rails : 1,067 m ;

Longueur électrifiée actuellement : 105 km ;

Courbes de rayon minimum : 200 m. Rampe maximum 12,5 pour mille.

Conditions d'exploitation.

Charge par essieu : 18,5 tonnes ;

Vitesse, en rampe de 12,5 ‰, 45 km/h ; vitesse maximum : 70 km/h ;

Poids des trains de voyageurs : 450 tonnes ;

Poids des trains de marchandises : 550 tonnes ;

En double traction, à 45 km/h : 1.000 tonnes.

L'existence sur la ligne d'une section de 30 km de longueur en rampe continue de 12,5 ‰ a fixé le choix de la puissance unihoraire des locomotives.

Comme il a déjà été dit, cette puissance doit permettre le remorquage d'un train de 550 tonnes, à la vitesse de 45 km/h, en rampe de 12,5 ‰.

La préférence accordée par le B. C. K. à l'électricité plutôt qu'à la vapeur a été justifiée par un calcul de rentabilité, tandis que les résultats obtenus avec une locomotive réalisant ces conditions ont été établis par un abaque.

Rentabilité.

On peut comparer à ce point de vue, l'exploitation à vapeur avec celle électrique à courant alternatif, à 50 périodes, ou celle au courant continu 3.000 V, mais il est admis généralement que le courant continu à 3.000 V n'est économique que pour des trafics importants avec des trains assez légers et très nombreux (Bruxelles-Anvers, par exemple) et que la locomotive à groupe

transformateur convient surtout pour les gros trafics à trains lourds. Nous ne retiendrons donc ci-après que les deux premiers systèmes, celui à vapeur et celui à courant alternatif monophasé à 50 périodes.

Pour établir les frais d'exploitation, on prendra comme critère (variable indépendante) le trafic en tonnes km brutes par an.

Désignons par V les dépenses annuelles totales pour l'exploitation vapeur ;

Par E celles pour l'exploitation au courant alternatif, 22 kV, 50 Hz ;

Par P le prix du stère de bois, rendu tender ;

Par ϕ le prix du kWh à l'entrée H. T. des sous-stations ;

Par k le rapport entre le trafic considéré et celui de référence.

Les frais de l'exploitation à vapeur comportent un terme variable avec le trafic et avec le prix du stère de bois ; ce terme sera désigné par aPk et représentera la somme payée annuellement pour le bois consommé. Les autres frais de l'exploitation à vapeur (personnel, intérêts, amortissement, entretien des locomotives) sont supposés proportionnels au trafic et exprimés par bk ; quant aux frais indépendants du trafic, qui sont peu importants ici, on les désignera par c . Le total des frais d'exploitation par la vapeur est donc : --

$$V = aPk + bk + c.$$

Pour le service électrique, il faut tenir compte de la quantité d'énergie consommée et du prix du kWh, soit une somme représentée par $a'.\phi.k$. Les dépenses pour intérêts, amortissement et renouvellement du matériel de traction sont encore admises proportionnelles au trafic et représentées par $b'k$. On y ajoutera un terme c' pour tenir compte des frais fixes, intérêts et amortissements des capitaux pour les lignes et sous-stations,

ce terme c' étant ici beaucoup plus important. On aura ainsi pour le service électrique, la formule :

$$E = a' \cdot pk + b'k + c'.$$

La relation $E - V = 0$ est celle qui fixe le choix entre les deux systèmes. Si $E > V$, la vapeur est à préférer à l'électricité ; pour $E = V$ les deux systèmes se valent.

Se basant sur son expérience avec le service vapeur et sur des offres pour les installations électriques et pour la fourniture de l'énergie électrique, le B. C. K. a admis pour établir les frais totaux des 2 systèmes comparés, les deux équations ci-après.

$$V = (0,12 Pk + 14 k + 0,5) 10^6 \quad (1)$$

$$E = (5,52 pk + 7,2 k + 9,25) 10^6 \quad (2)$$

Retranchant (1) de (2) on a :

$$E - V = [5,52 pk - (6,8 k + 0,12 Pk) + 8,75] 10^6 \quad (1)$$

La relation $E - V = 0$ donne l'égalité des frais d'exploitation des 2 systèmes vapeur et courant alternatif monophasé à 50 périodes.

$$\text{On en tire : } 5,52 pk = (6,8 + 0,12 P)k - 8,75 \quad (2)$$

Divisant par $5,52 k$ on obtient :

$$p = 1,22 + 0,0217 P - 1,59/k \quad (3)$$

Introduisant dans (3) successivement les valeurs $P = 60, 50$ et 40 , on a les formules :

$$p = 2,51 - 1,59/k \quad (4)$$

$$p = 2,3 - 1,59/k \quad (5)$$

$$p = 2,15 - 1,59/k \quad (6).$$

Attribuant à k successivement les valeurs : 1, 1,5, 2 et 2,5 on obtient le tableau ci-après qui permet de tracer la figure 2.

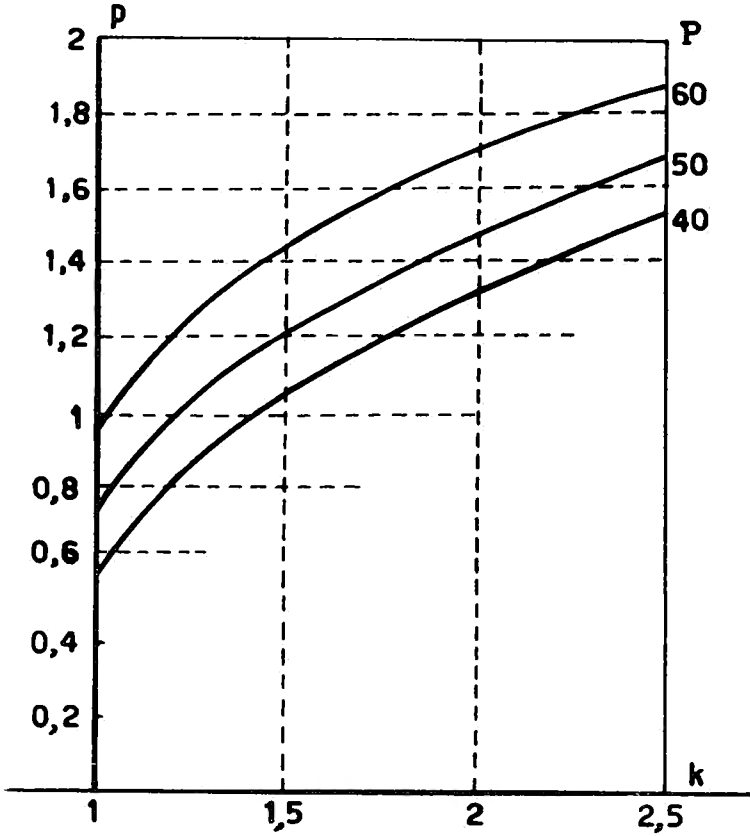


Fig. 2. — Prix du kWh en fonction de k et P.

TABLEAU I.

k	$P=60(4)$	$50(5)$	$40(6)$	$1,59/k$
1	0,94	0,71	0,56	1,59
1,5	1,45	1,24	1,09	1,06
2	1,72	1,50	1,36	0,79
2,5	1,87	1,67	1,51	0,64

Ce tableau donne la valeur de p pour $V = E$.

Ainsi pour $P = 60$, $k = 2$ et $p = 1,72$ (1) donne :

$V = 0,12 \times 120 + 28,5 = 42,9$ millions de frais pour l'exploitation à vapeur. On obtient par (2)

$$E = 5,52 \times 3,44 + 14,4 + 9,25 = 18,95 + 28,65 = 42,6 \text{ millions.}$$

$$V - E \cong 0.$$

Si le prix de l'électricité est moindre, 1 F, par exemple, par kWh, V aura même valeur 42,6 tandis que

$$E = 5,52 \times 2 + 14,4 + 9,25 = 34,69 \text{ millions}$$

$$V - E = 9,9 \text{ millions d'économies.}$$

Description des installations.

La figure 3 montre, schématiquement, l'ensemble des installations qu'exige une électrification en courant alternatif monophasé. On distingue ici :

A) *Les installations fixes.* Dans le cas qui nous occupe, les centrales et les lignes à haute tension amenant le courant aux sous-stations ne sont pas à la charge du client.

Les installations fixes comprennent donc seulement :

1° Les sous-stations de fourniture de l'énergie en courant monophasé;

2° Les ateliers et magasins pour entretien et réparation du matériel;

3° Les lignes de distribution du courant aux locomotives, gares, parcs et ateliers;

4° Un câble téléphonique et de manœuvres posé tout le long de la ligne électrifiée.

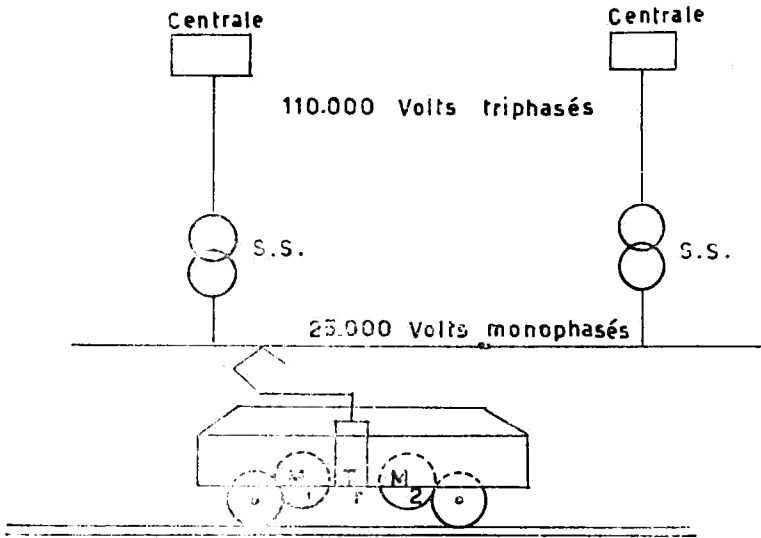


Fig. 3. — Alimentation triphasé-monophasé.

B) *Le matériel roulant.* — *Locomotives de traction ou de manœuvres.* Huit locomotives assurent normalement le service pour les 105 km électrifiés actuellement.

Nous ne nous arrêterons pas à la description des lignes à 110.000 V mises sous tension vers 1927 et qui, malgré les nombreux orages que comporte la région, ont assuré un service très satisfaisant. Elles sont du reste d'un type moderne, munies sur toute leur longueur de deux fils de garde et d'un contrepoids réunissant les bases des supports.

A. — INSTALLATIONS FIXES.

La partie électrifiée jusqu'ici s'étend de Jadotville à Tenke; la figure 1 en montre la situation géographique. Commenant à 120 km d'Élisabethville, elle s'arrête à une centaine de km de Kolwezi, centre minier très important.

Le tronçon Tenke-Kolwezi, à trafic le plus chargé,

est du reste compris dans le plan d'électrification actuel et peut-être aussi celui de Jadotville-Élisabethville, moins chargé cependant. La partie électrifiée des lignes du B. C. K. aurait ainsi 300 km de longueur sur les 2.500 km que ce chemin de fer comporte au total.

La partie électrifiée Jadotville-Tenke a été divisée en 3 sections de 35 km environ chacune, celles :

Jadotville — Mulungwishi,
 Mulungwishi — Fungurume, et
 Fungurume — Tenke.

C'est sur cette dernière section que se trouve la rampe de 12,5 ‰, de 30 km de longueur.

Équilibrage des charges.

Les 3 sections sont raccordées sur des phases différentes de la ligne triphasée à 110.000 V de façon à réduire au minimum le déséquilibre provenant de l'alimentation des locomotives en monophasé. Il faudrait toutefois, à cet effet, qu'une même charge existât au même moment, dans chacune des trois sections. Ceci ne se produira que rarement. Mais vu que la charge imposée par l'alimentation du chemin de fer est faible vis-à-vis de celle due aux installations de l'Union Minière et à la consommation régionale, on pense pouvoir se contenter d'un équilibrage approximatif. L'expérience, en cours depuis une année, semble confirmer cette opinion. On compte que le tronçon électrifié actuellement consommera environ 13.000.000 kWh par an, alors que la production des centrales en service en 1952 à l'Union Minière a atteint 660 millions de kWh (rapport $13/660 = 2\%$), mais atteindra 1.000 millions de kWh en 1957.

Il y a lieu de remarquer du reste que l'effet d'un déséquilibre de phases se produit en raison des puissances apparentes et non en fonction de la consommation d'énergie.

Postes de Fungurume et Shituru.

La ligne actuellement en service est alimentée en deux points à Fungurume et Shituru, où sont montés les transformateurs de puissance. La sous-station de Shituru a deux transformateurs, dont un est de réserve, mais elle en comptera un troisième quand la section vers Élisabethville sera en service. La sous-station de Fungurume comporte actuellement déjà 3 appareils, desservant les deux sections voisines. Chaque transformateur a une puissance de 6.000 kVa abaissant à 22.000 V entre phases la tension reçue sous 110.000 V triphasés.

La figure 4 montre schématiquement l'appareillage de cette sous-station. À gauche, l'arrivée du 110.000 V, avec un disjoncteur D placé entre 2 jeux de sectionneurs. Sur les barres omnibus, trois départs en monophasé raccordent les 3 transformateurs par l'intermédiaire de disjoncteurs et de sectionneurs. Un parafoudre est placé sur les barres à 110.000 V, un autre sur chaque départ à 22.000 V. Le transformateur tenu en réserve est pourvu du même appareillage que les autres, afin qu'il puisse entrer en service immédiatement, sans aucun montage ou déplacement d'appareils, en cas d'incident dans l'une ou l'autre section. La figure 5 montre la sous-station de Fungurume.

L'appareillage des sous-stations est porté par des charpentes en poutrelles à larges ailes, l'isolement étant assuré par des chaînes et des colonnes d'isolateurs. Les jeux de barres sont établis en câbles de 95 mm² de section (figure 5). L'appareillage (à 110.000 V et à 25.000 V) est du type pour extérieur. Les disjoncteurs sont à faible quantité d'huile.

Une double protection contre les orages est assurée :

1° Par un réseau de câbles de garde au-dessus de toute la sous-station ;

2° Par un certain nombre de parafoudres modernes, à résistances semi-conductrices.

Contre les surcharges de courant, il est prévu des relais de surintensité, à temps indépendant, mais cependant sélectifs, afin de réduire à un minimum le nombre des déclenchements.

L'équipement à 25.000 V n'est pas à maximum de courant, mais muni d'un dispositif de réenclenchement automatique, avec tests préalables, réglables en nombre

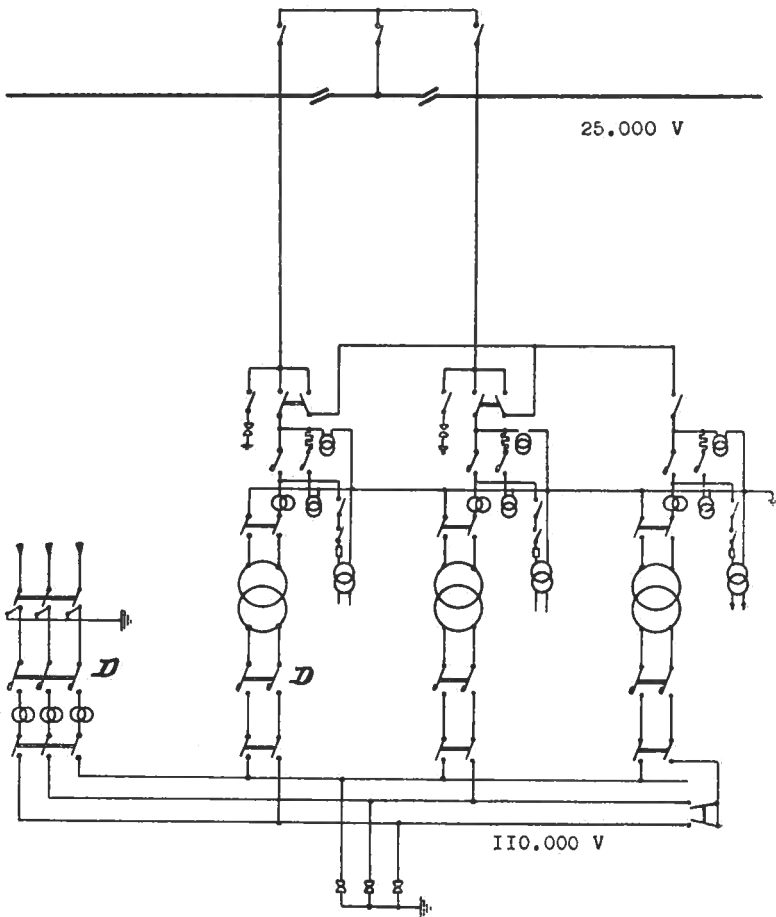


FIG. 4. — Sous-station de Fungurume.

et en espacement. Si le disjoncteur auxiliaire continue à déclencher, indiquant que le défaut persiste, le dispositif est bloqué et le défaut signalé au poste répartiteur de Métalkat. Les précautions habituelles ont été prises contre le danger d'incendie : murs coupe-feu, cuvettes ou fossés de récolte de l'huile, en partie remplis de pierraille.

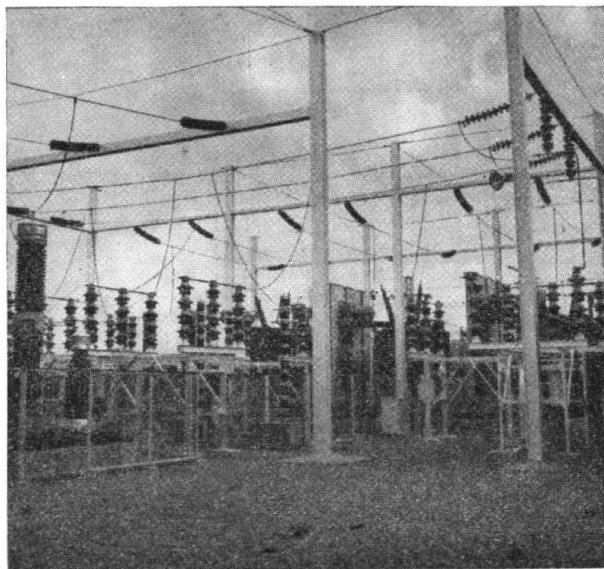


FIG. 5. — Sous-station de Fungurume.

Postes de sectionnement.

A chaque gare, il a été prévu un poste de sectionnement qui permet d'isoler une section défectueuse en maintenant le service ailleurs. Une trentaine de ces postes seront en service sur la ligne définitive.

Lignes caténaïres.

Le courant est amené aux locomotives par des lignes

caténaïres qui se composent d'un fil de contact en cuivre rainuré, de 107 mm^2 de section (fig. 6), et qui, disposé à peu

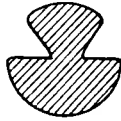


FIG. 6. — Fil de contact rainuré.

près horizontalement, reste en contact avec l'archet du pantographe de la locomotive. Un câble porteur en bronze de 84 mm^2 de section, supporte le fil de contact par l'intermédiaire de pendules en fil de bronze (fig. 7 et 8).

Deux types de caténaïres ont été utilisés ; celui polygonal dont le câble porteur et le fil de contact sont toujours dans un même plan vertical, le fil de contact y étant pourvu d'antibalançants, et la caténaire inclinée, dont le fil de contact, dans les courbes, suit sensiblement l'axe de la voie. La figure 9 en montre une projection horizontale en courbe, tandis que la figure 10 en montre une photo.

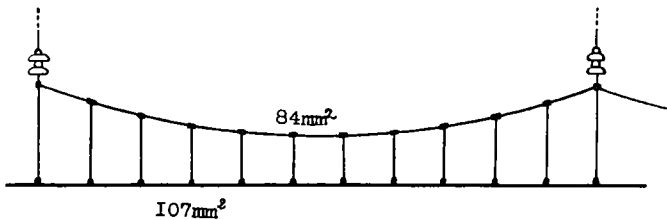


FIG. 7. — Caténaire droite.

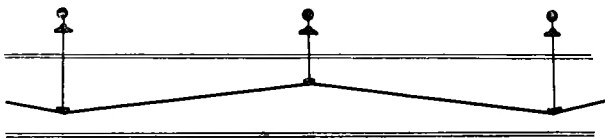


FIG. 8. — Caténaire droite. Projection horizontale.

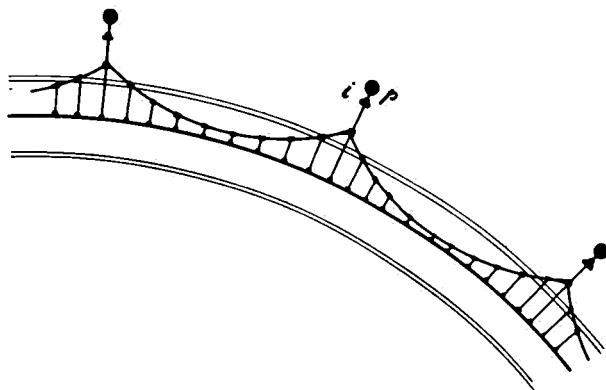


FIG. 9. — Caténaire inclinée. Projection horizontale.

Les variations de température et de tension du fil de contact sont compensées par des appareils à contrepoids.

Les distances entre supports varient de 40 à 60 m. Les caténaires ont à résister au vent et à l'entraînement par l'archet de la locomotive. L'établissement de ces lignes est délicat et demande une main-d'œuvre expérimentée. Dans les gares, l'existence de nombreux aiguillages en complique la constitution et la pose.

Poteaux.

On a adopté de façon générale, comme support des caténaires, des poutrelles Grey, qui se sont montrées économiques. Dans les gares, on a eu recours à des portiques rigides ou souples. La figure 11 est relative à la plantation d'un support.

Fondations des poteaux.

Trois types de fondations ont été utilisés :

1° Les fondations cylindriques de 2 m de profondeur, 0,55 m de diamètre, exécutées par une machine à forer montée sur un wagon ; 40 % des fondations ont été exé-

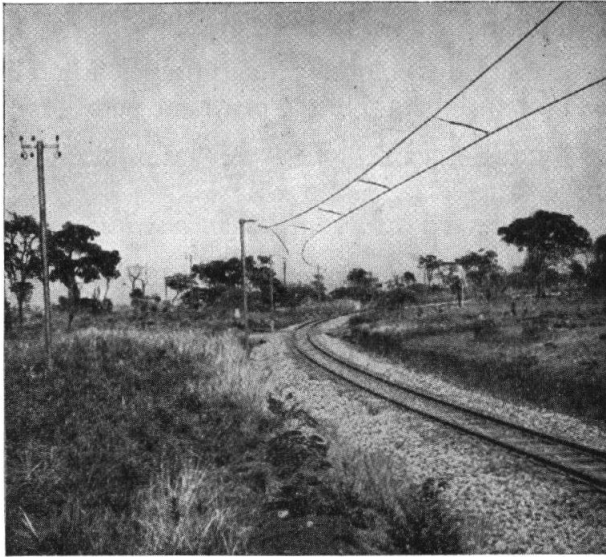


FIG. 10. — Voie et ligne caténaire.

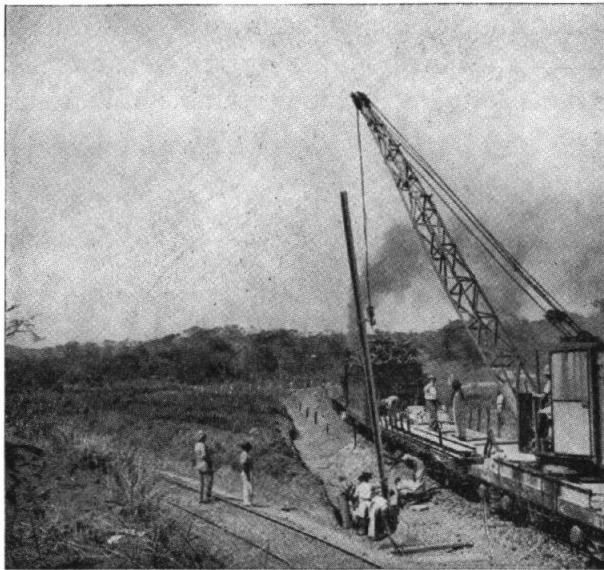


FIG. 11. — Plantation d'un support.

cutées par cet appareil. Le temps moyen d'exécution est de 7 minutes par fondation ;

2° Les fondations blocs, plus difficiles à réaliser, et réservées aux supports d'angle et de croisements ;

3° Les fondations à semelles pour les mauvais terrains.

Exécution des fouilles mécaniques.

Le bétonnage et le levage ont été réalisés au moyen de wagons spécialement équipés à cet effet, à une cadence d'un km de voie par jour de sortie.

L'entretien des caténaires et des sous-stations qui n'ont pas de transformateur de traction sera confié à des équipes mobiles spécialement formées pour ce travail.

Câble pour téléphonie et manœuvres diverses.

Pour éviter de troubler les communications téléphoniques dans le voisinage de la ligne de chemin de fer et pour pouvoir commander à distance certains appareils ou transmettre des signaux, il a fallu mettre sous terre le réseau téléphonique primitivement aérien et disposer dans le même câble certains conducteurs tenus en réserve.

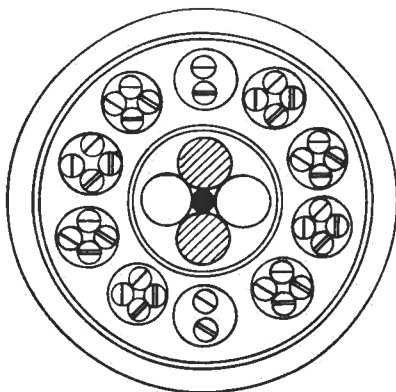


FIG. 12. — Câble téléphonique.

L'exploitation à 50 périodes, avec de forts courants à basse tension, expose les circuits à de fortes inductions électro-magnétiques dont l'effet sera réduit par la mise sous câble. La figure 12 montre une coupe sur le câble utilisé par la B. C. K.

Il comporte deux paires de 2 mm, 8 quarts EC, I, 35 et 2 paires en réserve. Le câble reste cependant soumis à certaines influences qui induisent parfois jusque 2.000 V dans les conducteurs du câble et auxquels il a donc fallu imposer un isolement élevé. Enfin, il a été tenu compte, pour choisir la section des conducteurs, de la longueur maximum de la ligne électrifiée, c'est-à-dire de la distance entre Élisabethville et Kolwezi.

Le câble est placé sous la voie, à un mètre de profondeur. Ce câble de 300 km de longueur, avec sa pose et ses accessoires, impose déjà une dépense considérable.

Courant absorbé.

Le courant absorbé par un moteur se compose de plusieurs pointes au démarrage suivi d'un courant de régime d'une durée plus grande. En freinage, le courant est constant. La figure 13 montre le genre de diagramme du courant probable. Puisqu'il n'y a qu'une voie, on ne doit compter que sur un seul tracteur par section, soit 100 à 150 ampères sous 22.000 V. L'intensité est donc assez faible, grâce à la tension élevée de la caténaire. Cependant la chute de tension en ligne d'alimentation et pour le retour du courant à la sous-station, sera déjà de l'ordre de 3.000 V sans doute. Car le rail qui sert au retour présente une résistance inductive au passage du courant alternatif. Il est vrai qu'une partie du courant de retour passera par le sol, surtout si celui-ci est humide.

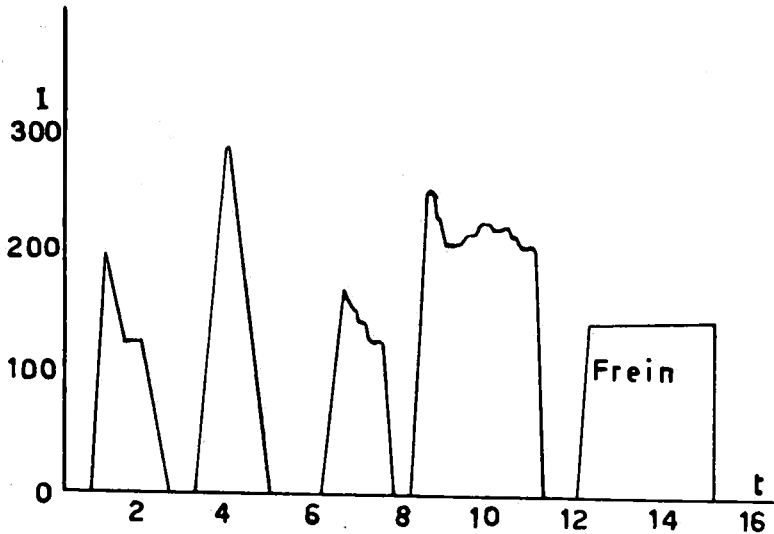


Fig. 13. — Diagramme du courant d'une course.

Certaines exploitations utilisent, pour réduire la chute de retour, des transformateurs suceurs. Le B. C. K. n'en a pas prévu l'emploi jusqu'ici.

Remarquons qu'une chute de tension n'agit que sur la vitesse de régime qui s'en trouve diminuée, mais qu'elle n'empêche pas un bon démarrage.

Fourniture du courant.

L'énergie électrique est fournie aux sous-stations du chemin de fer par les centrales hydro-électriques de l'Union Minière et de la Sogefor et notamment celles du tableau ci-après (figure 14) :

Centrale Franqui	chutes de la Lufira	65.000
Centrale Bia	chutes de la Lufira	80.000
Centrale Delcommune	chute de N'zilo	120.000
Centrale Le Marinel	chute du Lualaba	200.000
	Total kVa	<u>465.000</u>

Les trois premières centrales sont en service. On compte sur l'achèvement de la quatrième en 1957.

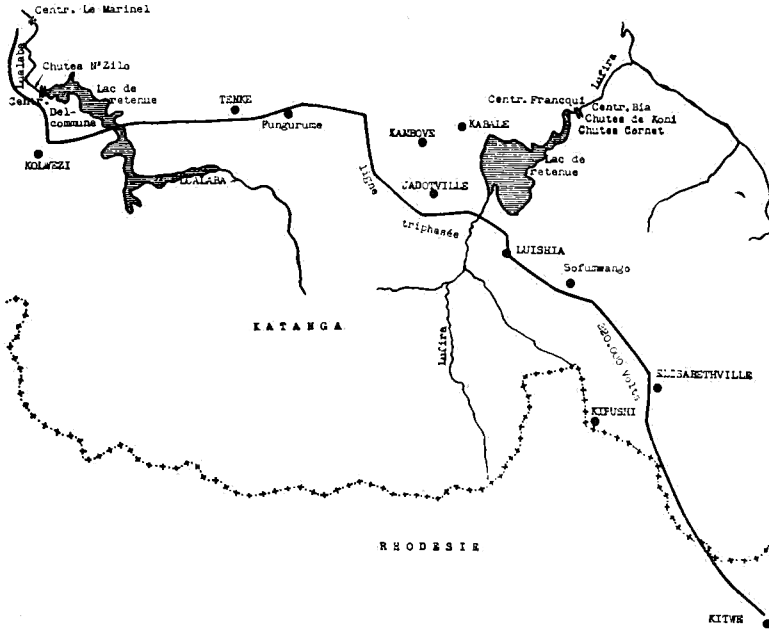


FIG. 14. — Ligne triphasée, 220.000 volts vers la Rhodésie.

L'aménagement complet du Lualaba, au nord de Kolwezi, donnerait 600.000 kW avec 3.500 millions de kWh.

Les 4 centrales forment deux groupes actuellement réunis par une ligne triphasée à 110 kV d'une longueur de 200 km. Cette ligne alimente les postes de Shituru et de Fungurume et les usines de Métalkat. Mais l'Union Minière a en voie de réalisation une ligne triphasée à 220.000 V partant de la centrale Le Marinel et transportant l'énergie électrique jusqu'à Kitwe, grand centre minier de la Rhodésie du Nord, ce en vue d'une fourniture là-bas à partir de 1957. C'est vers cette époque aussi que l'U. M. mettra de nouvelles mines en exploitation qui nécessiteront un important supplément de puissance. La figure 14 montre le chemin suivi par cette nouvelle artère de 500 km de longueur. Passant le long de la ligne du B. C. K. à Métalkat, Kolwezi, Jadot-

ville, Élisabethville, elle pourra fournir, dans des conditions satisfaisantes, l'énergie électrique, non seulement au chemin de fer, mais à l'industrie régionale qui se développe avec une très grande rapidité.

B) MATÉRIEL DE TRACTION.

Quand les installations en cours d'exécution seront achevées, la ligne électrifiée comptera 300 km de longueur entre Élisabethville et Kolwezi. Elle sera desservie par 12 locomotives, 8 suffisant actuellement; 4 tracteurs nouveaux, identiques à ceux déjà fournis, ont été commandés.

Pour déterminer les caractéristiques du type de locomotive actuel, le B. C. K. a établi un abaque basé sur les conditions d'exploitation déjà citées.

Ligne à simple voie, écartement 1,067 m ;

Charge par essieu : 18,5 tonnes ;

Rampe continue de 30 km de longueur à 12,5 ‰, où des trains de 550 tonnes doivent atteindre une vitesse de 45 km à l'heure.

Le B. C. K. a choisi un type de locomotive B.-B.

Le tableau A et la figure *a* pl. I donnent les données de base pour cinq vitesses horaires, soit les valeurs expérimentales du coefficient d'adhérence μ_h , l'effort résistant z_p par essieu de locomotive, et l'effort résistant z_x par tonne de charge remorquée et par essieu de locomotive.

TABLEAU A.

V	μ_h	Z_x	Z_p
30	0,164	2,22	4,25
35	0,159	2,34	4,48
40	0,155	2,46	4,72
45	0,152	2,60	4,97
50	0,149	2,75	5,28

Calcul de l'abaque.

1. PUISSANCE UNIHORAIRE EN FONCTION DE LA CHARGE PAR ESSIEU.

Soient Z l'effort de traction unihoraire en kg par essieu ;

Wm la puissance en CV à l'arbre du moteur par essieu ;

V la vitesse en km/h ;

P la charge en tonnes par essieu ;

μ le coefficient d'adhérence en tonnes ;

ρ le rendement de la transmission, pris égal à 0,97.

$$\text{On a : } Wm = \frac{ZV}{\rho} \text{ en kgm/s} = \frac{1000P \cdot \mu \cdot V \cdot 1000}{\rho \cdot 75 \times 3.600} = 3,82 P\mu V \text{ en CV.} \quad (1)$$

μ est variable avec la vitesse et l'état du rail (sec ou humide). Nous prendrons les valeurs pour rail humide.

La valeur de μ est indiquée à la figure *a* pl. I ou au tableau A, en fonction de la vitesse V km/h valeurs obtenues par l'expérience.

Puissance unihoraire. À chaque valeur de V correspond une valeur de μ (tableau A). Pour une vitesse donnée μV est constant.

On a donc : $P = kWm$, équation qui représente une famille de droites passant par l'origine.

Au tableau I on a considéré 4 vitesses et 4 valeurs de P . Les valeurs inscrites dans les colonnes sont les produits :

$$3,82 P\mu V.$$

TABLEAU I.

V	Wm			
	35	40	45	50
$3,82 \times \mu V$	21,25	23,7	26,15	28,45
$P = 20$	425	474	523	569
16	340	379,2	418,4	455,2
12	255	284,4	313,8	341,4
8	170	189,6	209,2	227,6
$\mu_h =$	0,159	0,155	0,152	0,149

Portant P en ordonnées et Wm en abscisses à gauche, on obtient les droites de la figure *b*. pl. I.

2. CHARGE REMORQUÉE EN FONCTION DE LA CHARGE P PAR ESSIEU.

Soit, outre les quantités définies sous 1 :

- i la déclivité en mm par m ;
- x la charge remorquée en tonnes par essieu ;
- Zp la résistance en kg au roulement de la locomotive ;
- Zx la résistance en kg au roulement de la charge remorquée.

La condition de roulement (régime) est :

$$1000 \mu P = \{ (Zx + i) X + (Zp + i)P \} \quad (1)$$

On prend conventionnellement au démarrage (arrachage)

$$\mu = 0,25, \quad Zx = 12 \text{ kg/t} \quad \text{et} \quad Zp = 15 \text{ kg/t.}$$

$$\text{D'où :} \quad 250 P = (12 + i) X + (15 + i)P \quad (2)$$

Comme $i = 12,5$ on a :

$$222,5 P = 24,5 X \quad \text{ou} \quad P = 0,11 X.$$

$$\text{De (1) on tire d'autre part :} \quad \frac{X}{P} = \frac{1000\mu - (Zp + 12,5)}{Zx + 12,5} \quad (3)$$

Pour une valeur de P , le tableau A donne les valeurs correspondantes de μ , Zp et Zx d'où, par (3), la valeur $\frac{X}{P}$ et les valeurs inscrites à la seconde ligne du tableau II. Les lignes suivantes sont obtenues par $\frac{X}{P} \times P$.

D'où les droites de la figure *c*. pl. I.

TABLEAU II.

	X				
	50	45	40	35	30
$\frac{X}{P}$	8,606	8,907	9,21	9,57	9,95
P = 20	172,1	178,1	184,2	191,4	199,0
16	138,1	142,5	147,4	153,1	159,2
12	103,8	106,9	110,5	114,8	119,4
8	68,9	71,25	73,68	76,6	79,6
μ	0,149	0,152	0,155	0,159	0,164

Pour chaque valeur de P on a diverses valeurs de V. Il existe une valeur de V qui permet de démarrer le train sur la rampe prévue et de remorquer la charge à la vitesse prévue. Pour toute autre valeur de V, l'une des deux possibilités fera défaut (démarrage ou remorquage).

3. ACCÉLÉRATION AU DÉMARRAGE EN FONCTION DE X.

Soient, outre les notations précédentes :

m la masse d'inertie du train, locomotive comprise ;

j l'accélération en cm par sec² ;

F l'effort accélérateur en kg.

On a : $F = m.j$.

Si Z_{tot} désigne l'effort de traction total développé (par essieu loco) et Z_{tract} l'effort nécessaire à la remorque de la charge (par essieu loco), la force accélératrice vaut :

$$F = Z_{tot} - Z_{tract}.$$

Comme Z_{tract} est l'effort résistant total au roulement de la charge et de la locomotive, on a :

$$Z_{tract} = X.Z_x + P.Z_p + i(P + X).$$

Or Z_{tot} est limité par l'adhérence de la locomotive et ne peut dépasser $1000\mu P$.

Si $\mu = 0,25$ au démarrage,

$$Z_{tot} = 1.000\mu P = 250 P.$$

On aura à cet instant :

$$F = 250P - X.Z_x - P.Z_p - I(P + X).$$

Si, tout de suite après le départ, $Z_x = 1,5$ et $Z_p = 3,75$,

$$F = 246,25P - 1,5 X - i(P + X).$$

Pour calculer la masse m , on majore de 10 % celle résultant du poids, ce pour tenir compte des masses tournantes.

$$\text{On a ainsi : } m = \frac{1100(P + X)}{9,81} = 112 (P + X).$$

$$\text{D'où : } j = \frac{F}{m} = \frac{246,25 P - 1,5 X}{112 (P + X)} - \frac{i}{112}. \quad (1)$$

Pour une valeur déterminée de i et de P , l'équation (1) représente une hyperbole avec asymptotes parallèles aux axes. Elle donne l'accélération en fonction de X (figure *d*). On a tracé sur cette figure, 3 courbes respectivement pour $P = 16$, 18, et 20 avec $X = 100$, 150, et 200.

Ces opérations donnent le tableau III ci-dessous et la figure *d*, pl. I.

TABLEAU III.

X	γ		
	P = 16	18	20
100	0,18m/sec ²	0,218	0,243
150	0,088	0,112	0,135
200	0,038	0,057	0,076

ABAQUE.

L'ensemble des figures *a*, *b*, *c* et *d* disposées comme le montre la planche I, constitue l'*abaque* de la locomotive choisie.

On constate, en y suivant le trait interrompu, qu'une locomotive de 420 CV par essieu peut, à du 45 km/h et en rampe de 12,5 ‰ avec une adhérence $\mu = 0,15$, remorquer une charge de 143 tonnes par essieu de locomotive, à condition de peser 16 tonnes par essieu et qu'on se contente d'une accélération au démarrage de 9,4 cm/sec². La charge totale remorquable sera donc de 572 tonnes. La machine satisfait ainsi aux conditions imposées.

DESCRIPTION DU MATÉRIEL DE TRACTION.

Locomotive.

La C^{ie} a choisi un type de locomotive B.-B. pouvant, comme il a été dit plus haut, remorquer des trains de 550 tonnes à la vitesse de 45 km/h en rampe de 12,5 ‰.

En voici les caractéristiques principales :

Dimensions :	Longueur totale	15,07 m
	Largeur totale	3,04 m
	Empattement du bogie	2,50 m
	Hauteur totale	4,25 m.
Poids :	Partie mécanique	38,5 tonnes
	Partie électrique	35,5 tonnes
	Poids total	74,0 tonnes
	Charge par essieu	18,5 tonnes.

La locomotive comporte 4 essieux, logés chacun dans un arbre creux et 4 groupes de 2 moteurs, enveloppés par paire d'une même carcasse formant bâti et attaquant les 4 arbres creux.

Ceux-ci sont situés à la partie inférieure du bâti dans quatre intervalles laissés entre les groupes de moteurs (figure 15). L'arbre creux transmet son couple à l'essieu par l'intermédiaire d'éléments élastiques, attaquant la roue voisine.

L'autre extrémité de l'arbre creux porte un épanouissement assurant de la même façon l'entraînement de l'autre roue. Les bogies du type monobloc sont formés de tôles et plats soudés et comprennent deux longerons soudés en T reliés par une traverse centrale en caisson et par deux traverses de tête.

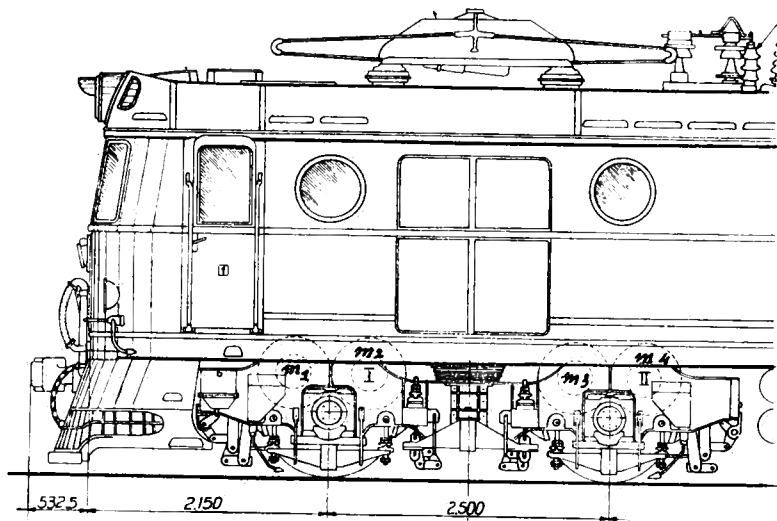


FIG. 15. --- Schéma d'une demi-locomotive.

Les moteurs électriques du type double reposent sur le chassis chacun par trois points d'appui, deux sur la traverse centrale et un sur la traverse de tête.

La figure 16 est une photographie de la locomotive. On y voit, outre un des pantographes en contact avec la caténaire, les portes d'accès des 2 cabines, celles de ventilation et quelques fenêtres. La figure 15 est un schéma

d'une moitié de la locomotive montrant à la partie inférieure un des deux bogies avec les deux arbres creux et quatre moteurs.

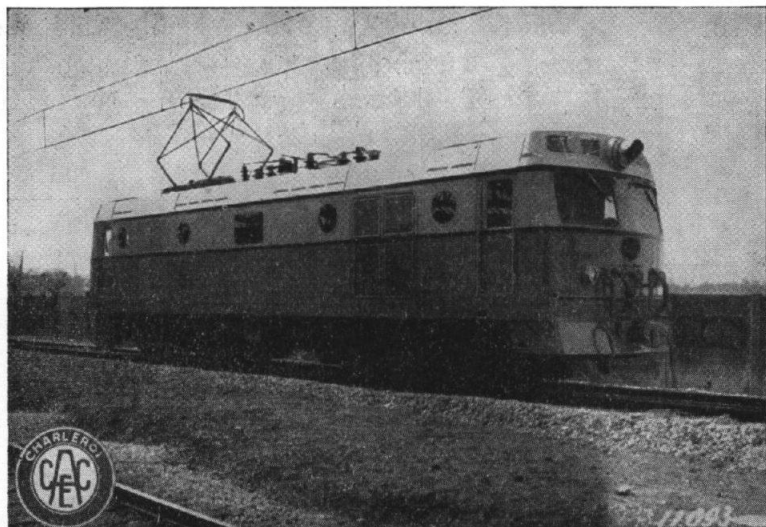


FIG. 16. — Locomotive B-B.

Au milieu de la figure, sous le pivot de la caisse, des plaques de caoutchouc et des ressorts en spirale, comprimés par des biellettes, assurent l'élasticité de l'ensemble.

Transformateurs.

Chaque locomotive est pourvue d'un transformateur statique conçu pour un service de traction et qui applique aux moteurs une tension croissante en gradins : 23.000 V à 250 jusque 500 V.

A cet effet, le secondaire porte un certain nombre de prises (6 à la figure 17); des contacteurs leur correspondent. La figure 17 est un schéma de principe pour le démarrage de moteurs série à courant alternatif. Quand on ferme le contacteur 6, on établit le circuit $06L_2mO$. Comme L

présente une assez forte réactance, le courant dans les moteurs est faible, mais cependant suffisant pour assurer le démarrage. Si on ferme 5, le courant passe également dans L_1 ; les deux courants agissent alors en sens inverse sur un même noyau en métal magnétique de sorte que la réactance des deux bobines disparaît. Le courant

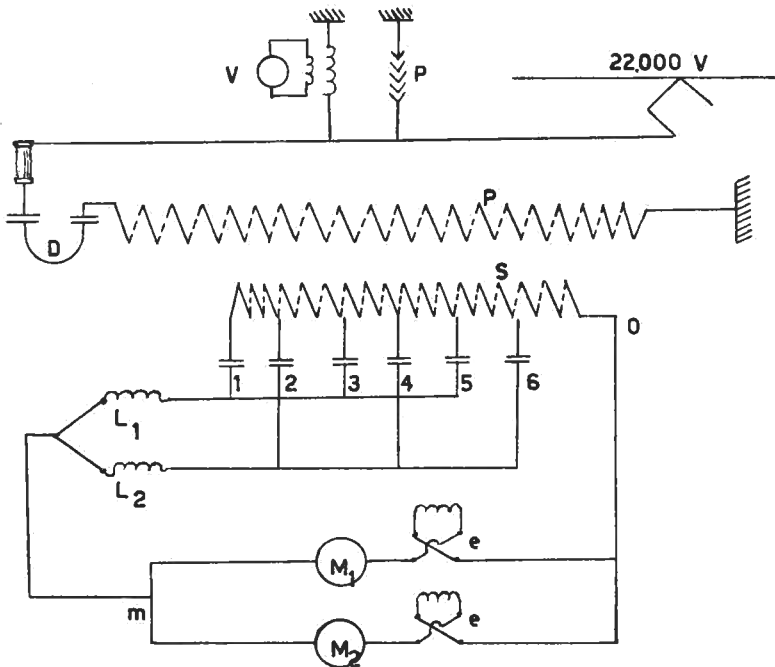


FIG. 17. — Schéma pour le démarrage.

qui traverse les moteurs augmente, la vitesse croît. On ouvre ensuite 6 et on ferme 4, d'où un nouvel accroissement du courant et de la vitesse, et ainsi de suite.

Si on actionne le démarreur jusqu'au contacteur 1, on applique la tension maximum aux moteurs et on obtient la vitesse de régime la plus forte. En arrêtant la manœuvre sur un cran intermédiaire, 3 par exemple, on établira une vitesse de régime moindre. D'où le réglage de la vitesse.

Pour les locomotives du B. C. K. le nombre de contacteurs est fort élevé et le démarrage ou le réglage de vitesse s'opèrent avec une grande douceur.

Le transformateur est refroidi par une circulation d'huile obtenue par un groupe moto-pompe muni d'un réfrigérant. Le groupe, la pompe et le réfrigérant forment un ensemble compact descendu dans la cuve par une ouverture prévue dans le toit. La locomotive a donc 8 moteurs prévus pour 240 V et 850 A à 50 périodes, leur vitesse normale étant 1580 T/m, celle maximum 2230 t/m (70 km/h).

Diamètre des roues neuves	1.150 mm ;
Nombre de locomotives en service actuellement	8.

Les deux moteurs d'un bloc sont toujours connectés en série.

Les porte-balais sont montés sur un curseur. Pour avoir accès aux balais, il suffit, après déblocage, d'agir sur un petit pignon qui amène successivement les diverses lignes de balais (10 par moteur) en regard de la trappe de visite, ce qui facilite l'entretien.

Circuits divers.

a) CIRCUITS À HAUTE TENSION.

Le courant est pris à la ligne au moyen d'un des deux pantographes commandés mécaniquement de l'intérieur de la locomotive. Aux barres, disposées sur des isolateurs portés par la toiture, sont raccordés un parafoudre p et la borne haute tension du transformateur (figure 17). Le circuit à haute tension passe par les contacts d'un disjoncteur D situé sur la toiture. Il alimente aussi un transformateur de tension qui indique la différence de potentiel appliquée à la locomotive.

b) CIRCUIT DE TRACTION.

Après avoir parcouru l'enroulement à haute tension du transformateur, le courant retourne aux rails par la masse de la voiture. Le courant de traction, induit au secondaire du transformateur, traverse les moteurs réunis en 4 groupes de 2 et la locomotive démarre progressivement comme il a été dit plus haut. Des transformateurs de courant alimentent un relais d'accélération et les ampèremètres des moteurs de traction.

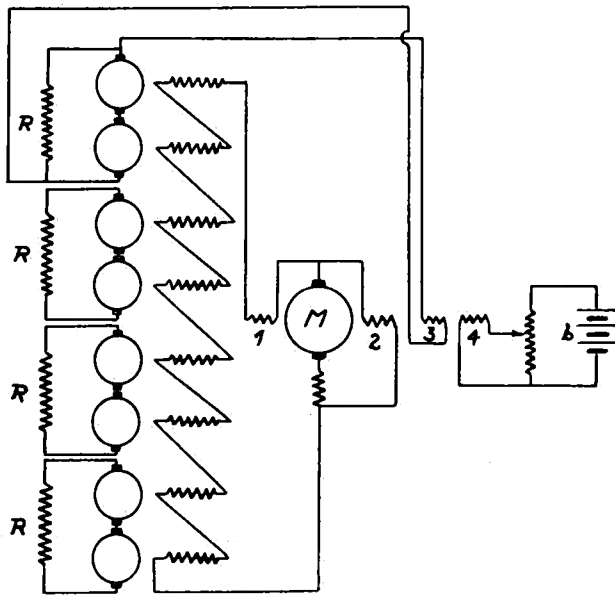


FIG. 18. — Schéma pour le freinage.

c) CIRCUIT DE FREINAGE RHÉOSTATIQUE.

Pour le freinage, les connexions sont modifiées par l'intermédiaire d'un commutateur électropneumatique, chaque groupe de 2 moteurs débitant sur une résistance spéciale R (fig. 18). Les inducteurs connectés tous en série sont alimentés par une excitatrice qui possède 4 enroulements inducteurs et dont l'action combinée main-

tient à peu près constante la puissance produite pour chacun des crans de freinage et réalise donc une certaine gamme de vitesses.

d) CIRCUITS DES SERVICES AUXILIAIRES.

Ceux-ci comportent :

2 groupes moteur-ventilateur pour les moteurs de traction ;

1 groupe moteur-compresseur d'air ;

2 groupes moteur-pompe à vide, pour le frein à vide ;

1 groupe moteur-ventilateur pour le réfrigérant du transformateur ;

1 groupe excitatrice pour le freinage rhéostatique.

Tous les moteurs sont à rotor en cage d'écurieil, à stator mis en service par des contacteurs. Ils sont protégés par des fusibles ou des disjoncteurs à maxima.

e) CIRCUITS D'ASSERVISSEMENT.

La commande des circuits de traction et de freinage se fait à l'aide d'un manipulateur à deux manettes :

— une manette amovible pour l'inversion du sens de marche (3 positions AV-0-AR) ;

— une manette principale à 16 positions : une de 0 et 15 positions de démarrage ;

— une position de freinage. La manette principale a un dispositif d'homme mort (main constamment pressée sur la manette). Le conducteur peut, au moyen d'une manette spéciale, choisir une accélération automatique (minimum, moyenne ou supérieure). Il peut de même, par la manette de freinage, choisir pour celui-ci une valeur minimum, moyenne ou supérieure.

f) COMMANDE AUTOMATIQUE DU DÉMARRAGE.

Il se fait par une boîte à deux rangées d'interrupteurs : une première, verrouillée par une clef amovible, permet la commande des pantographes, du disjoncteur, des ventilateurs des pompes à huile et à vide et du compres-

seur ; la seconde rangée commande les phares, plafonniers, etc... Sur la table du bord sont installés les appareils de mesure et des lampes de signalisation.

g) COMMANDE DU FREINAGE.

Le freinage est commandé par deux manettes, celle supérieure pour le frein de la locomotive et l'autre pour le frein à vide (charge remorquée). L'asservissement de ce dernier se fait par un manipulateur spécial pouvant occuper cinq positions :

- Position I : isolé ;
 II : desserrage (frein à vide relâché) ;
 III : marche ;
 IV : neutre, le frein est prêt à être appliqué ;
 V : urgence ; conduite générale du frein à l'atmosphère ; les essieux de la locomotive sont sablés.

h) COMMANDE MULTIPLE.

Deux locomotives peuvent être accouplées et commandées du poste de tête. Les courants d'asservissement se transmettent d'une locomotive à l'autre au moyen d'un câble contenant de nombreux fils. La disposition de ces conducteurs est telle, dans les boîtes d'accouplement, que les ordres transmis du poste de conduite s'effectuent simultanément sur les deux locomotives et que ceux dépendant du sens de marche soient toujours concordants.

Nous arrivons maintenant à l'organe principal de la locomotive.

Moteurs monophasés à 50 périodes.

ÉLÉMENTS DU MOTEUR.

En principe, le moteur à courant alternatif monophasé est identique au moteur à courant continu. Il comporte :

- 1° L'inducteur S traversé par le courant absorbé (fig. 19) ;
- 2° L'induit (rotor) où passe le même courant ;
- 3° L'enroulement des pôles auxiliaires qui doit faciliter la commutation ;
- 4° Un enroulement de compensation destiné à combattre le flux transversal, mais on y a renoncé pour les moteurs du B. C. K.

DIAGRAMME DES TENSIONS (fig. 20).

Désignons par E_1 la différence de potentiel appliquée au moteur. Le courant produit le flux Φ , qui crée dans l'induit en rotation une force contre-électromotrice E_a ,

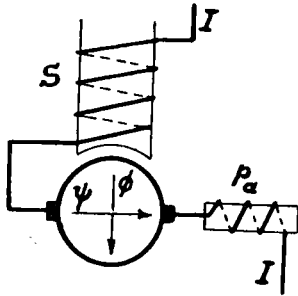


FIG. 19. — Éléments du moteur.

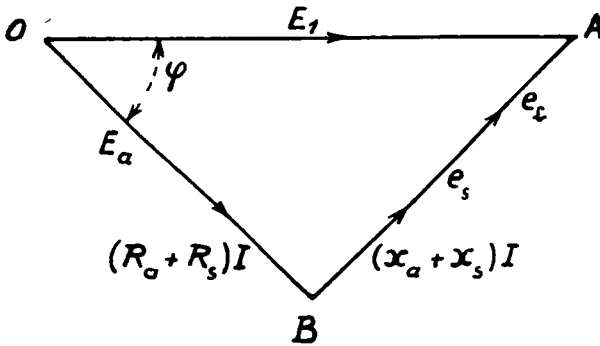


FIG. 20. — Diagramme des tensions.

proportionnelle à Φ , ainsi qu'à la vitesse : $E_a = K \cdot \Phi \cdot N (1 - \gamma)$; γ est le glissement par rapport à la vitesse synchrone N , celle-ci dépendant de la fréquence du courant et du nombre de paires de pôles du moteur. Dans notre cas : $2p = 10$ (5 paires de pôles) et $f = 50$, de sorte que la vitesse synchrone est $3.000/5 = 600$ t/m. Si le moteur tourne à cette vitesse, $\gamma = 0$. Pour 1.200 tours/m, $\gamma = -1$ et $E_a = 2k\Phi N$.

Il y a en outre à tenir compte de la chute ohmique dans l'inducteur, dans l'induit et ses balais et dans l'enroulement des pôles auxiliaires, cette chute étant en phase avec le courant absorbé. Pour les moteurs modernes $E_a = 160$ V. On comptera $OB = 200$ V en ajoutant à E_a les chutes ohmiques.

Enfin, on notera les chutes inductives dans les réactances de fuite de l'inducteur et de l'induit et celles créées par l'oscillation du flux Φ dans l'inducteur et du flux Ψ dans l'induit. On obtient ainsi la fig. 20, où les chutes inductives sont normales au courant absorbé et où φ représente l'angle de déphasage du courant sur la tension appliquée.

COUPLES.

Le couple moteur résulte de l'action du flux Φ sur le courant absorbé. Comme le flux Φ change de sens avec le courant, le couple reste toujours de même sens. Mais il est pulsatoire, à la fréquence $2f$. Au démarrage et aux régimes à faible vitesse, φ est élevé et voisin de 80° , $\cos \varphi$ est très faible; le couple également.

L'oscillation du couple n'a pas grande influence sur l'effort de traction. Cependant on a parfois constaté pour des moteurs monophasés à $16 \frac{2}{3}$ périodes, au démarrage, une tendance à vibration précédant la rotation proprement dite (durée très faible). C'est sans doute la raison pour laquelle on munit généralement ces moteurs d'un accouplement flexible ou d'un dispositif à ressorts

hélicoïdaux, pareil dispositif est également utilisé pour les moteurs du B. C. K.

COMMUTATION.

Quand le balai recouvre deux lames du collecteur, il met en court-circuit une spire de l'enroulement du rotor

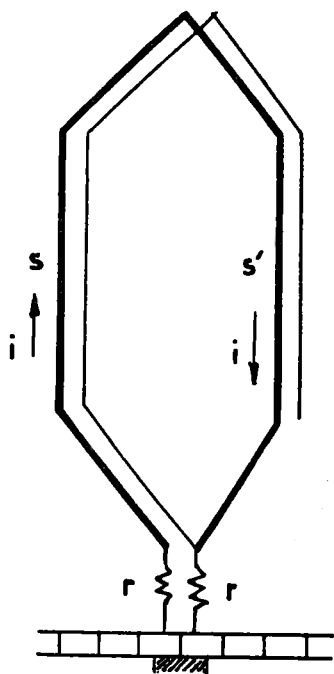


FIG. 21.

(fig. 21). A ce moment, l'oscillation du flux Φ produit dans la spire (S — S') une f.é.m., dite de transformation, qui crée un fort courant passant sous le balai et y produisant des étincelles. Une bonne commutation demande la compensation de cette f.é.m. Ceci s'obtient grâce à une deuxième f.é.m. due à la rotation de la spire dans le flux du pôle de commutation, qui est opposée à la première et dont on peut régler la phase en shuntant par une résistance appropriée l'enroulement du pôle de commuta-

tion (fig. 22). Ceci donne un bon résultat, mais seulement pour une vitesse suffisamment élevée. Cette deuxième f.é.m. étant nulle à l'arrêt, les étincelles seront à craindre à ce moment. Pour les réduire, il faut diminuer le nombre de spires entre deux lames voisines du collecteur, multiplier le nombre de pôles (ce qui affaiblit le flux par pôle), introduire une résistance dans le circuit en commutation, éviter enfin les surcharges qui imposent de faibles vitesses de régime et des démarrages lents. Ces conditions sont réalisées dans une large mesure pour les moteurs du B. C. K. et donneront sans doute pour la commutation un résultat satisfaisant.

La figure 21 montre la spire mise en court-circuit par le passage sous le balai des lames du collecteur. Dans cette figure, on a introduit une résistance r dans le circuit de la bobine $SS'rr$.

Ajoutons cependant que, pour réaliser des moteurs plus puissants, les A. C. E. C. proposent de shunter les pôles auxiliaires à la fois par une résistance et par une capacité réglable (fig. 23), ce qui doit permettre une commutation correcte à diverses vitesses. Cette disposition, ajoutée aux moyens cités plus haut, doit donner pour la ligne Valenciennes-Thionville des moteurs monophasés à collecteur qui, sous 235 V avec 3.200 ampères (500 kw) et à la vitesse de 680 t/min développeront un effort à la jante de 3.390 kg.

RENDEMENT.

Les flux étant alternatifs, des pertes par hystérésis et courants de Foucault se produisent à la fois dans les tôles du stator et du rotor.

Les balais sont nombreux. On compte 10 tiges porte-balais par moteur et trois blocs par tige. L'usure est rapide, environ six fois celle pour un moteur à courant continu. Ces balais occasionnent d'assez fortes pertes par

frottements et courants de Foucault. Les chutes ohmiques sont relativement fortes.

Les diverses causes ci-dessus provoquent une diminution de rendement du moteur à courant alternatif

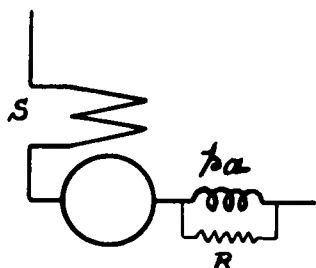


FIG. 22. — Moteur série avec enroulement du pôle auxiliaire shunté par une résistance.

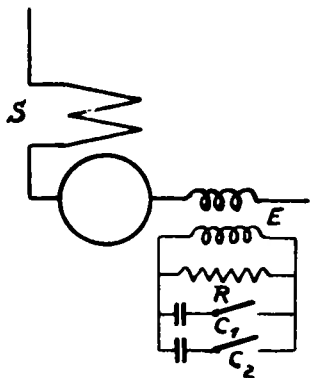


FIG. 23. — Moteur série avec enroulement du pôle auxiliaire shunté par résistance et capacité réglable.

50 périodes. Pour ceux du B. C. K., on pourra admettre un rendement de 84 % en pleine charge, alors qu'on pourrait compter sur 91 % en courant continu, étant donné surtout que, dans le cas actuel, deux moteurs de 210 CV pourraient être remplacés par un moteur de 400 CV.

COURBES CARACTÉRISTIQUES.

La fig. 24 montre les courbes caractéristiques du moteur ; (vitesse, couple, rendement) toutes trois en fonction du courant absorbé.

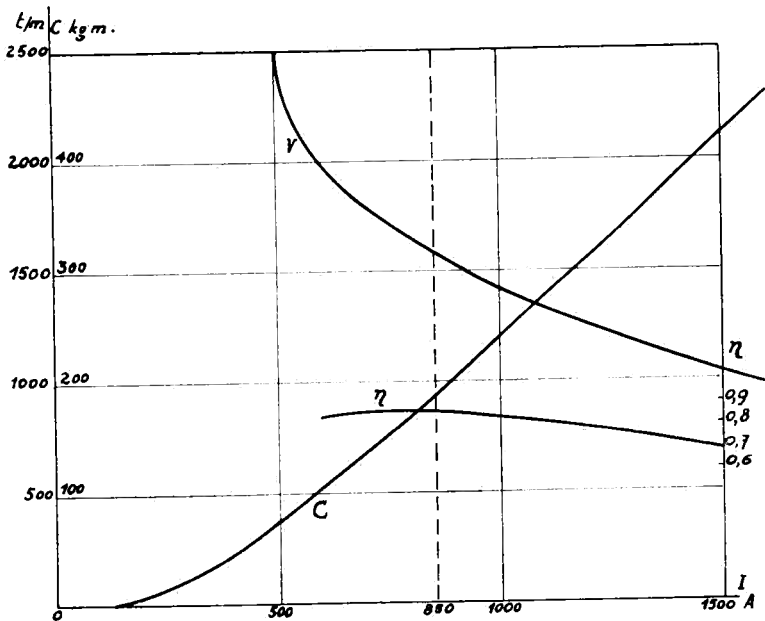


FIG. 24. — Courbes caractéristiques du moteur.

FACTEUR DE PUISSANCE.

Par suite des diverses chutes de tension inductives, le $\cos \phi$ est très mauvais au démarrage, mais approche de l'unité pour les vitesses élevées, E_u étant alors plus fort. La présence de ces chutes réduit en outre le courant absorbé à l'arrêt et, par suite, le couple au démarrage.

D'après ce qui précède, on serait tenté de conclure que le système proposé, monophasé à 50 périodes, n'est pas très avantageux et que le risque d'une mauvaise commutation ne semble pas devoir être payé. Mais

pour apprécier l'ensemble de ce système de traction, il importe de tenir compte de deux avantages marquants.

Le transport de l'énergie se faisant à haute tension (22 kV), les pertes en ligne seront réduites et le capital dépensé pour les installations fixes sera plus faible que pour le courant continu (réduction de 25 à 30 %). En outre, le système utilisant un transformateur sur chaque locomotive, permet d'opérer le démarrage ou le réglage de vitesse, en agissant sur la tension appliquée aux moteurs et évite ainsi toute perte d'énergie dans les rhéostats qu'exige l'alimentation à tension constante, en courant continu.

Les propriétés énumérées ci-dessus, jointes à un prix moindre des installations fixes, constituent des avantages tels que l'on peut admettre un rendement moindre des moteurs et équiper un atelier de réparation et d'entretien des moteurs, capable de les maintenir convenablement en service. *Pour apprécier ces frais, il faudra toutefois se baser sur les résultats d'un certain nombre d'années d'exploitation.* Il est vrai qu'on peut citer dans le cas actuel, comme conditions favorables à des frais plus minimes, la puissance relativement faible des moteurs et le nombre assez réduit des démarrages. On avait estimé jadis que le seul remède à la plupart des défauts signalés était la réduction de la fréquence et c'est ainsi que les chemins de fer électrifiés en courant alternatif, vers 1920, l'ont tous été à basse périodicité, 25 ou 16 2/3 périodes. *Il a donc fallu produire le courant de traction dans des centrales spéciales ou transformer le courant à fréquence industrielle en courant à basse périodicité et cela, à l'aide de groupes moteur-générateurs, défaut très grave au point de vue économique.*

Néanmoins, les essais n'ont pas manqué pour l'utilisation directe du 50 périodes (Hölenenthal en Allemagne), redresseur en Amérique et en Allemagne, alternatif

monophasé à 50 périodes à Aix-les-Bains et pour Valenciennes-Thionville et au Virginian Railway groupes moteur-générateurs sur les locomotives, et groupe de Kando en Autriche.

On ne peut affirmer que ces essais aient conduit l'un des systèmes discutés à un plein succès ; *ils ont au plus établi dans quelles conditions tel système fournit la meilleure solution*. Et c'est ainsi que le B. C. K., dont les trains sont de 600 tonnes au plus, a adopté la solution à moteurs directs, tandis que pour la ligne Valenciennes-Thionville, la Société Nationale des Chemins de fer Français (S. N. C. F.) a préconisé l'emploi de divers types de locomotives d'après les services à assurer. Elle a, en effet, remis en août 1952, la commande ci-après, dont le matériel est à fournir en 1954.

1° 15 locomotives à moteurs directs, semblables à ceux du B. C. K. Machines destinées aux trains à voyageurs ;

2° 65 locomotives à groupe mono-continu, pour trains de 1.350 tonnes ;

3° 20 locomotives à groupe mono-triphasé pour trains de 1.750 tonnes (charbons, produits métallurgiques) ;

4° 5 locomotives à redresseurs ignitrons (2.000 CV), avec des moteurs à courant continu (pour essais).

La composition de cette commande montre, de la part de ceux qui, après les essais d'Aix-les-Bains, ont eu à se prononcer, une confiance plus grande dans les locomotives à groupe convertisseur, dont les éléments sont de construction courante et éprouvée.

Mais on peut certes estimer que, pour les conditions présentées par l'exploitation du B. C. K., un résultat pratique très satisfaisant sera obtenu, ce que l'expérience actuelle semble confirmer.

Exploitation.

La ligne de Jadotville à Tenke a été mise sous tension en août 1952. Le trafic a été assuré électriquement à partir d'octobre 1952. Au premier mai 1953, les 8 locomotives comptaient ensemble un parcours de 430.000 km.

Actuellement, soit 10 mois après l'inauguration, 6 locomotives assurent le service complet, parcourant 20.000 km par mois. La C^{ie} se déclare très satisfaite de leur comportement, ainsi que de l'état des collecteurs, ce après bientôt un an de service.

Cependant les expériences futures du Valenciennes-Thionville et celles des locomotives du Pennsylvania avec redresseur ignitron seront suivies avec intérêt par tous ceux que préoccupe cette question encore discutée aujourd'hui.

Aussi croyons-nous utile de donner en annexe, au sujet de ces locomotives très puissantes, quelques détails et des indications concernant les résultats déjà atteints et les espoirs de leurs partisans (Annexes I et II).

Juin 1953.

ANNEXE I. — Locomotive à groupe convertisseur mono-continu.

La ligne Valenciennes-Thionville comporte environ 350 km de voies principales doubles qui seront électrifiées en premier lieu (figure 25). Elle sera desservie par 7 sous-stations.

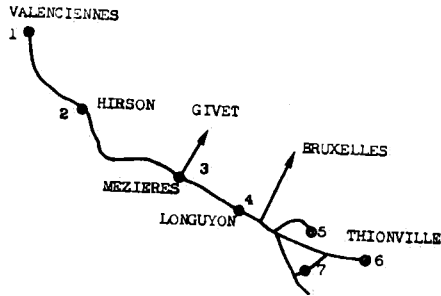


FIG. 25. — Chemin de fer Valenciennes-Thionville.

Par suite du poids du groupe, on prendra des locomotives C. C. à 6 essieux et 6 moteurs. Le matériel de ce type de machines comporte :

Un disjoncteur à haute tension, commandé de la cabine ;

Un transformateur statique (25.000/700 V)-2.800 kVA ;

Un moteur synchrone actionnant, à 1.500 t/m, 2 génératrices de courant continu 750 V, 875 ampères ;

Une excitatrice pour ces deux machines. Une excitatrice pour les moteurs de traction. Le moteur synchrone peut développer 3.000 CV, sans risque de décrocher, même si la tension appliquée tombe à 19.000 V.

Facteur de puissance : 0,97.

Les génératrices sont à excitation réglable, suffisante pour produire 700 V en alimentant trois moteurs en quantité. Elles sont du type à puissance limitée.

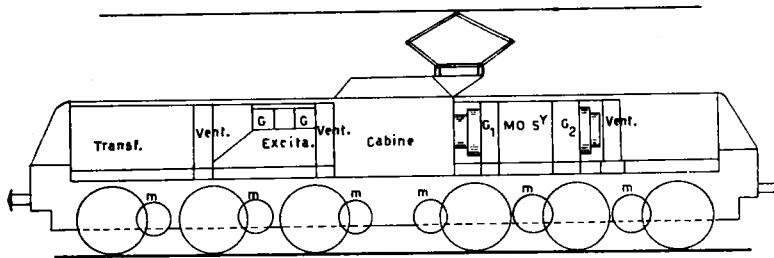


FIG. 26. — Locomotive mono-continue du V. T.

LÉGENDE.

- Transf. — Transformateur statique.
 Vent. — Ventilateurs.
 G — Excitatrices.
 Cabine — Cabine de commande et de surveillance des appareils de mesure.
 G₁M.G. — Groupe de transformation du courant à 50 périodes en courant continu.
 m — Moteurs de traction.

L'ensemble comporte en outre :

Pour la mise en marche et le réglage de vitesse, un groupe composé d'un moteur asynchrone, alimenté sous 380 V par une prise spéciale du transformateur et une génératrice de courant continu produisant 250 V et servant à l'excitation des génératrices principales ;

Une excitatrice à 2 enroulements pour l'excitation séparée des moteurs de traction. Ceux-ci ont un enroulement série et un enroulement séparé (excitation indépendante). Ils sont à ventilation forcée développant chacun, sous 600 V et 550 ampères, à 1.000 t/m, un effort à la jante de 3.800 kg.

Longueur de la machine : 19 m. Poids total : 120 tonnes.

La figure 26 montre schématiquement la disposition des 6 moteurs, du transformateur T_r, du groupe transformateur rotatif et de la cabine de commande.

Pour déterminer le nombre de machines à commander de chaque type pour le Valenciennes-Thionville, on s'est basé sur les conditions suivantes :

Pour les trains lourds, les machines doivent pouvoir démarrer et remorquer 1.500 tonnes en rampe de 10 ‰ ou 2.400 tonnes en rampe de 6 ‰. Le type C. C. a été préféré pour sa meilleure adhérence. Sur des machines de 120 tonnes, on peut monter des groupes convertis-

seurs tournants, alimentant les moteurs à courant continu, d'où un bon facteur de puissance et un freinage facile.

Le démarrage progressif évite d'autre part le patinage.

Pour les trains à voyageurs et ceux à marchandises en service accéléré, on a retenu les moteurs directs après l'expérience acquise sur les lignes d'Aix-les-Bains et en plate-forme. Les types à groupes ont été adoptés pour les trains lourds. Enfin, quelques machines à redresseurs ignitrons doivent permettre de vérifier expérimentalement ce que l'on peut en obtenir. Il a ainsi été établi qu'il fallait commander 105 tracteurs électriques pour libérer 301 locomotives à vapeur.

Ces machines commandées en août 1952 doivent être fournies en août 1954. Ci-dessous quelques-unes de leurs caractéristiques.

	Locomotives à moteurs directs	Locom. à redresseurs	Machines à groupes	
			mono-continu	mono-triphasé
Type	B.-B.	B.-B.	C. C.	C. C.
Nombre	15	5	65	20
Puissance	2.700 C. V.	3.100 C. V.	2.500 C. V.	3.500 C. V.
Rendement	0,75	0,86	0,75	0,75
cos	0,76	0,87	0,95	0,95

Des prototypes des moteurs ont subi avec succès des essais variés très sévères.

ANNEXE II. — Locomotive à redresseurs à ignitron.

Deux locomotives à redresseur ignitron ont été fournies en juillet 1952 à la Pennsylvania Rail-Road marquant, peut-être, un tournant dans l'électrification des chemins de fer.

Précédemment déjà, en 1913, un redresseur ignitron avait été monté sur une voiture du New-York — New-Haven et alimenté sous 11.000 V, en monophasé, 25 périodes. Cette voiture a été retirée du service après un parcours de 22.000 milles. Le redresseur n'était pas au point pour ce service. C'était un appareil à plusieurs anodes dans un même récipient, muni d'une pompe pour le maintien du vide. Des difficultés ont été éprouvées concernant celui-ci et par suite d'une production fréquente d'arcs en retour. La guerre de 1914-18 a suspendu les essais.

Le perfectionnement de l'ignitron en 1932, et de multiples applications de cet appareil redresseur pendant la guerre 1940-45, notamment pour la production d'aluminium et de magnésium, ont fait entrevoir la possibilité de construire une locomotive à redresseur ignitron présentant plusieurs avantages sur celle essayée précédemment.

- 1) Transport de la puissance à haute tension (25 kV) et à fréquence industrielle 50 ou 60 périodes ;
- 2) Réglage facile de la vitesse et de la puissance ;
- 3) Efforts de traction élevés ;
- 4) Appareillage accessoire standardisé.

En 1948, la Pennsylvania a repris les essais abandonnés en 1916. Cette fois, le fonctionnement de l'ignitron, qui était actuellement du type à un récipient par anode, fut à ce point satisfaisant qu'en 1951, après deux ans de service, l'automotrice avait parcouru 200.000 km avec les mêmes ignitrons et sans incidents électriques.

Une locomotive plus puissante fut construite et comparée à une autre à moteurs, à 25 périodes et à une troisième du type Diesel-électrique.

La figure 27 montre les courbes des efforts de traction en fonction

de la vitesse de ces trois machines, qui sont à peu près du même ordre de puissance. Les efforts y sont exprimés en milliers de livres.

D'après cette figure, la locomotive monophasée (courbe B) prime les autres pour les grandes vitesses, mais celle à ignitron (courbe C) est meilleure jusqu'à la vitesse de 40 milles à l'heure et surtout au démarrage. Celui-ci et le réglage de vitesse s'obtiennent en augmentant progressivement la tension aux bornes des moteurs qui sont toujours

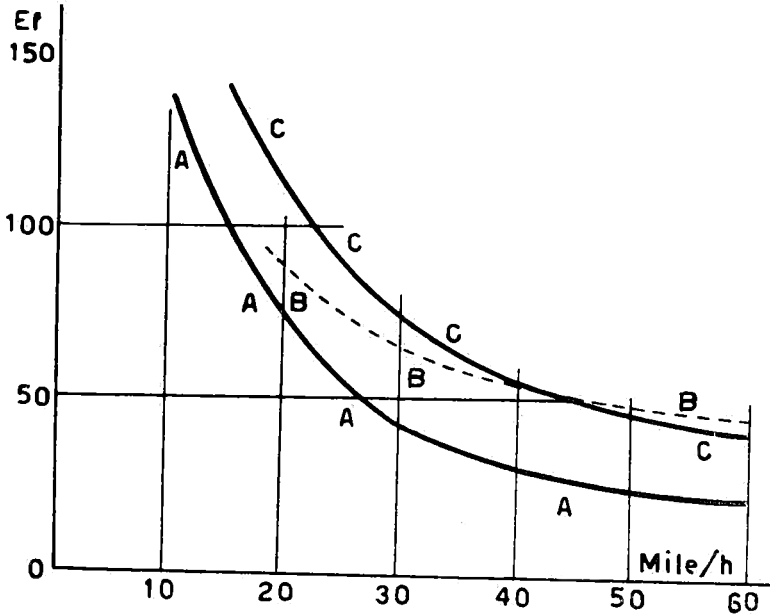


FIG. 27. — A. Diesel. — B. Monophasé. — C. Ignitron.

connectés en parallèle. On utilise le freinage dynamique, les inducteurs étant alors alimentés par deux ignitrons séparés, et les induits débitant sur des résistances réglables. Les douze moteurs de la locomotive, un par essieu, sont de 500 HP chacun.

Les ignitrons sont du type à onde pleine. Une réactance uniformise le courant produit, qui est continu à $\pm 15\%$. Par suite de ce qu'il n'y a qu'une anode par récipient, le courant, en cas d'arc en retour est assez faible pour qu'il s'éteigne au premier passage par zéro. La protection contre les surcharges de courant est obtenue en court-circuitant le dispositif d'allumage de l'ignitron, ce qui donne l'extinction en une demi-période, alors qu'un disjoncteur d'anode demande trois fois plus de temps pour ouvrir le circuit.

La figure 28 montre le schéma de principe d'un tracteur à redresseur ignitron. A part les tubes ignitrons T, le matériel mis en œuvre est semblable à celui de la locomotive à 50 périodes. Il comporte un transformateur statique abaissant la tension de 11.000 V à 400-500-600 V. Son secondaire comporte toutefois deux parties AC et CB, afin d'utiliser les deux demi-ondes du courant alternatif.

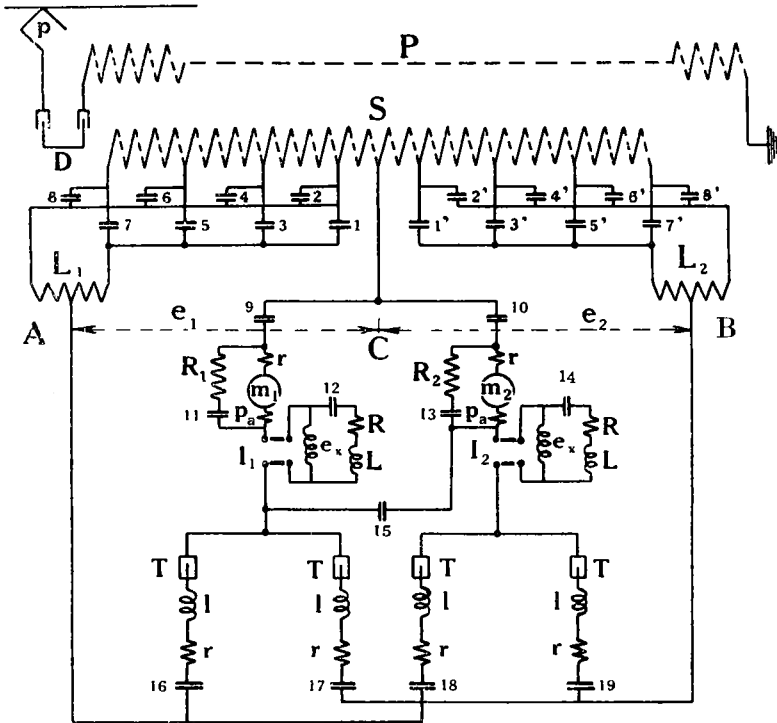


FIG. 28. — Éléments et connexions de la locomotive à redresseur ignitron.

La légende définit le rôle des appareils accessoires.

- N^{os} 1 à 19 contacteurs ;
- L₁, L₂ selfs de graduation de la tension appliquée ;
- R résistance de shuntage de l'induit ;
- R-L shunt inductif de l'excitation série ;
- p_a pôle auxiliaire ;
- r relais à maximum du moteur ;
- I₁ et I₂ inverseurs du sens de marche ;

- m_1 et m_2 induits des moteurs ;
 T tubes ignitrons ;
 l réactance d'anode ;
 r relai à maximum d'anode.

Voici quelques-unes des performances de ces appareils. En novembre 1952, une première locomotive fut mise en service sur les lignes de la Pennsylvania. Elle a remorqué sur la rampe de Smithville (34 km de rampe à 0,288 %) un train de 162 wagons de charbon, à 38,6 km à l'heure.

Un deuxième engin identique fut livré au début de janvier 1953. Les deux machines ont parcouru au total en trois mois 60.000 milles, dans le dur service des trains de marchandises entre Harrisbourg et la côte Est, sans qu'il se soit produit d'arc en retour dans les récipients d'ignitrons.

Le démarrage des trains lourds est doux et progressif.

Un train composé de 162 wagons de charbon, charge réelle 13.500 tonnes, a parcouru la distance de 209 km à la vitesse moyenne de 42 km à l'heure.

Ci-après le tableau comparant un essai de trois locomotives dont deux à courant monophasé 25 périodes et la troisième à courant redressé par ignitron.

ESSAI EN LIGNE D'ENOLA À MORRISVILLE (130 MILLES, RAILS SECS).

Type de courant	A1 25	A1 25	Redressé
Puissance continue à la jante	4.600 HP	3.750 HP	6.000 HP
Vitesse maximum (milles/h)	37,4	26,8	63
Poids total (livres)	400.000	394.000	741.000
Poids adhérent	200.000	229.000	741.000
Nombre de wagons	76	80	162
Tonnes réelles	4.375	4.568	13.600
Durée du trajet	3 h 28 m	4 h 50 m	4 h 20 m
Vitesse moyenne (milles/h)	37,4	26,8	30,8
Tonnes milles brutes	569.000	593.000	1.735.000
Tonnes par heure de traction	164.000	123.000	400.000

Bibliographie.

1. Journées d'information sur la traction électrique par courant alternatif monophasé, 50 périodes [Annecy, 12 au 15 octobre 1951] (R. G. E., novembre 1951, 419-430).
2. PATIN, P., La traction électrique (L. Eyrolles, Paris, 1952) 1 vol. de 275 p., nombreuses figures.
3. *Revue générale des chemins de fer français* [R. G. C. F. F.] (janvier 1953). — Projet : Valenciennes — Thionville.
4. L'électrification des chemins de fer (*Sciences et Industrie*, juin 1953). — Numéro spécial sur les chemins de fer français à courant continu et à courant alternatif 50 périodes ; beau volume ; nombreuses illustrations.
5. *Bulletin du Congrès des chemins de fer* [Revue B. C. C. F.]. — Cette revue publie depuis plusieurs années six numéros par an sur la traction électrique des chemins de fer, contenant des articles intéressants et actuels sur les projets d'électrification décidés ou en cours d'exécution.
6. *Bulletin des A. C. E. C.* (Charleroi). — Conférences données au Portugal en 1952 : (1) par A. BASTIN Ing., directeur de Traction et électricité Bruxelles ; (2) par J. DESPAUX (Étude détaillée des moteurs monophasés à 50 périodes du B. C. K.).
7. Die Elektrische Zugförderung bei der Deutschen Bundesbahnen (*Verband Deutscher Ingenieure*, février 1953).
8. *Revue des A. C. E. C.* (4, 1952). — Renseignements intéressants sur le matériel fourni par les A. C. E. C. pour la ligne Jadotville-Tenke (B. C. K.), au Congo.
9. WITTAKER et HUTCHINSON. Les locomotives à ignitrons donnent un excellent service (*Bulletin du B. C. C. F.*, mai 1953).
10. Sous-station à ignitrons scellés [une description assez complète des ignitrons pour sous-stations]. — Brochure spéciale de Geco, 1952 p. 34.
11. Ignitron Locomotive de Westinghouse (photo) 11.000 volts, 25 périodes, 6.000 ch. (en 2 parties), E. E. p. 24 (janvier 1953).

12. MULLER, P. (Prof. Ing.). Die Elektrischen Vollbahnen und das 50 Perioden System (G. Siemens Verlags Buchhandlung, Berlin, 1948).
13. Locomotives à groupe transformateur de 6.800 ch., pour le Virginian Ry. 16 moteurs — 16 Essieux. Effort de traction 162.000 livres. Maximum au démarrage 260.000 livres (*General Electric Review*, janvier 1948, p. 38).
14. Exposition de Munich 1953. Die Bundesbahn. Die Bundesbahn und ihre Industrie [2 brochures décrivant le matériel exposé et donnant une idée de la situation des chemins de fer Allemands, lignes électrifiées, remises en bon état de service].
15. WITTAKER et HUTCHINSON, Pennsylvania Railroad Ignitron Rectified Locomotive (*Electrical Engineering*, mai 1952). --- Description détaillée de la locomotive à ignitron de 5.000 ch.

TABLE DES MATIÈRES

Électrification partielle des lignes du B. C. K.	3
Caractéristiques de la ligne	3
Choix du système de traction	4
Électrification	4
Conditions d'exploitation	7
Rentabilité	7
Description des installations	11
A. Installations fixes	12
Équilibrage des charges	13
Postes de Fungurume et de Shituru	14
Postes de sectionnement	16
Lignes caténaies	16
Supports-fouilles-exécution	18
Câble pour téléphonie et manœuvres	20
Courant absorbé	21
Fourniture du courant	22
B. Matériel de traction	24
Calcul par un abaque des caractéristiques de la locomotive choisie	25
Description du matériel de traction	29
Locomotives	29
Transformateurs	31
Circuits divers	33
<i>a)</i> A haute tension	33
<i>b)</i> Circuit de traction	34
<i>c)</i> Circuit de freinage	34
<i>d)</i> Circuit des services auxiliaires	35
<i>e)</i> Circuits d'asservissement	35
<i>f)</i> Commande automatique du démarrage	35
<i>g)</i> Commande du freinage	36
<i>h)</i> Commande en multiple	36

Moteurs monophasés à 50 périodes	36
Éléments du moteur	36
Diagramme des tensions	37
Couples	38
Commutation	39
Rendement	40
Courbes caractéristiques	42
Facteur de puissance. Conclusion	42
Exploitation. — Premiers résultats	45
ANNEXE I.	
Ligne Valenciennes-Thionville.	
Locomotive à groupe mono-continu	46
ANNEXE II.	
Locomotive à redresseur ignitron.	
Résultats d'essais	49

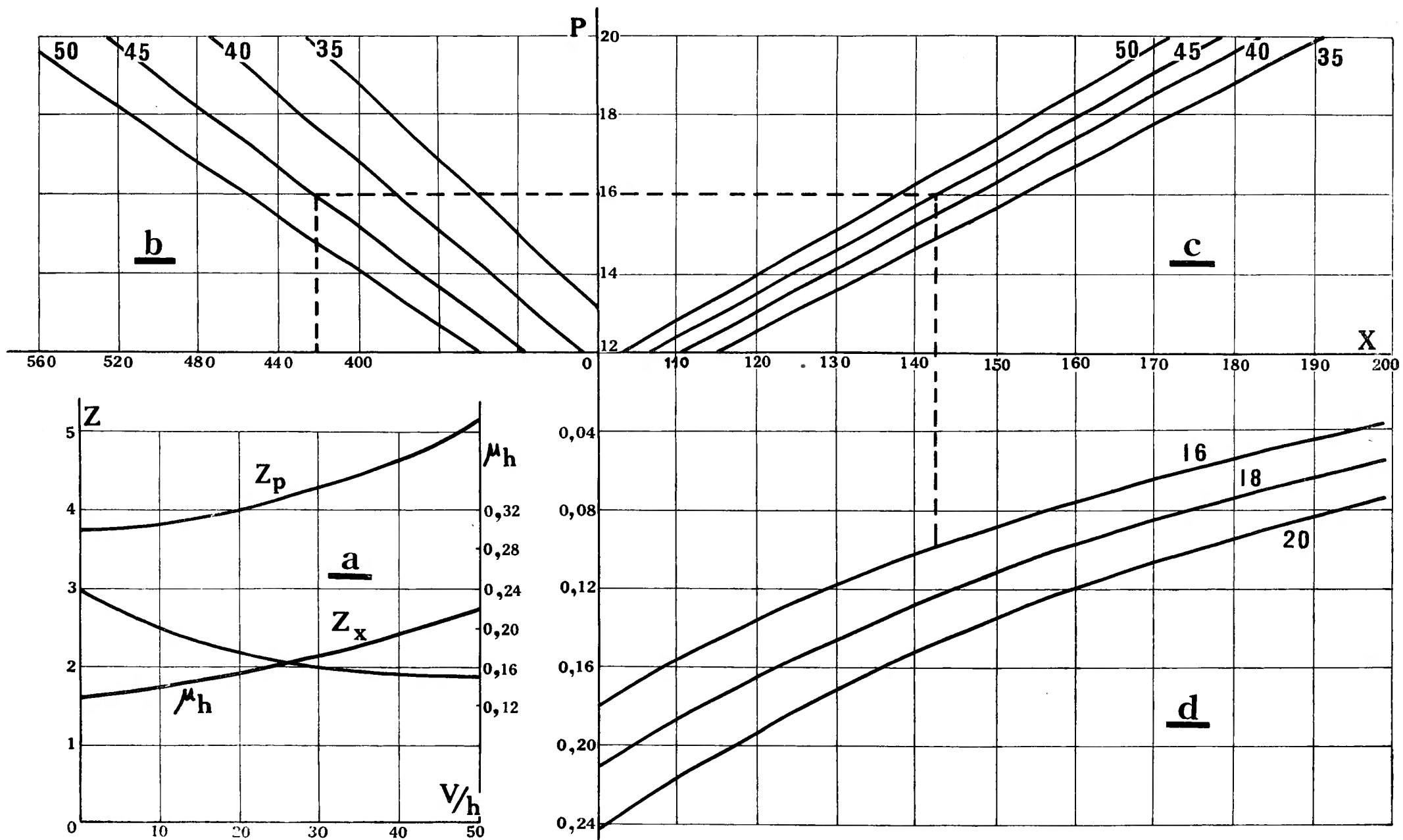


PLANCHE I. — Abaque pour la détermination des caractéristiques de la locomotive.



