

LE CHEMIN DE FER ÉLECTRIQUE DE BERTHOUD A THOUNE

Par M. MAUGUIN,

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES,
SOUS-CHEF DE BUREAU A LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE.



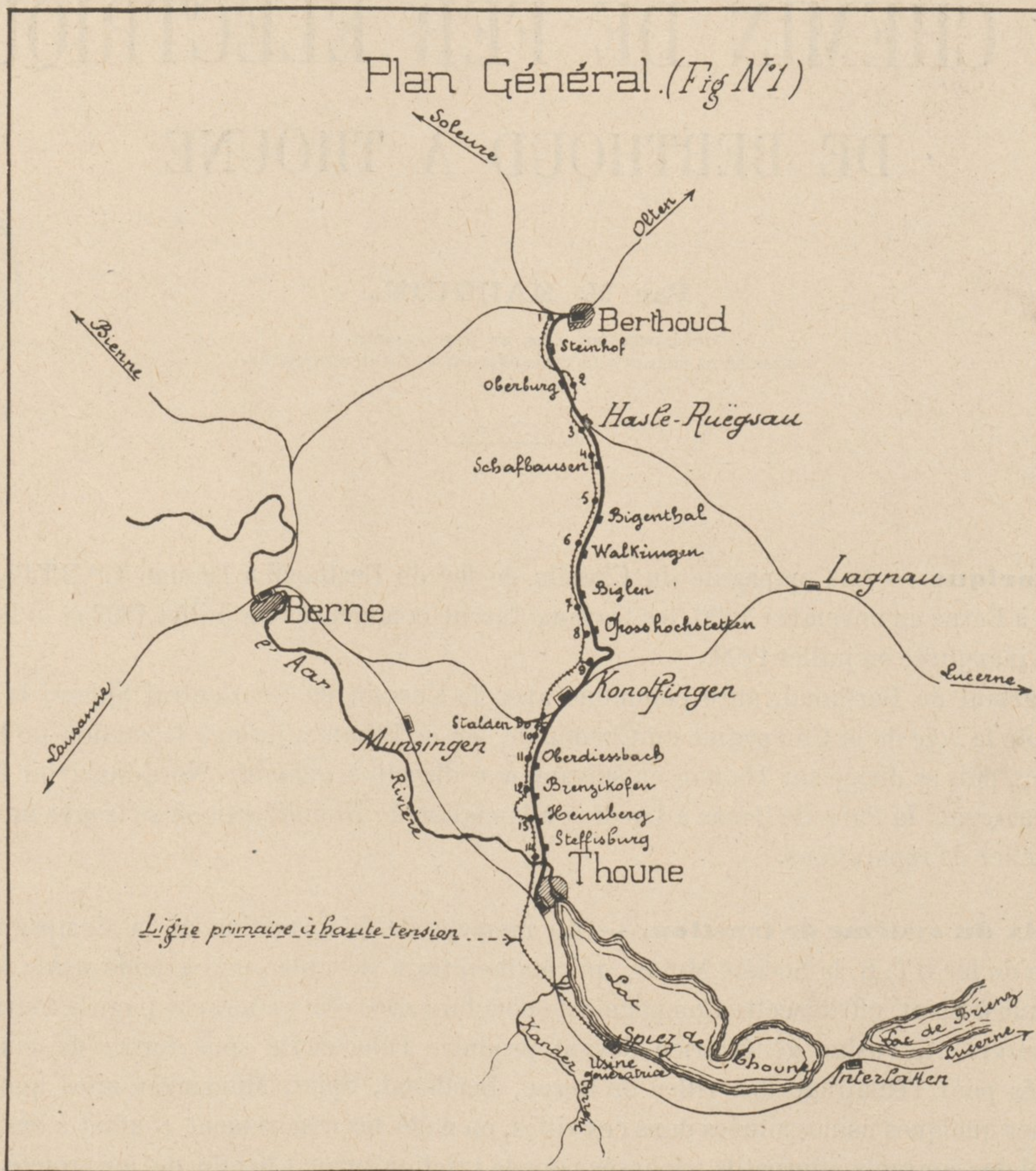
Historique. — La Compagnie du Chemin de fer de Berthoud à Thoune (C^{ie} BTB), a été fondée à Berne en novembre 1896, les travaux furent commencés en juillet 1897 et la ligne a pu être inaugurée en juillet 1899.

En partant de Berthoud, gare commune avec le Chemin de fer Central Suisse, la ligne emprunte la voie de la Compagnie du Chemin de fer de l'Emme, jusqu'à la station de Hasle-Rüegsau, puis se dirige sur Thoune en suivant une direction générale Nord-Sud (voir Fig. 1) et en traversant la ligne de Berne à Lucerne à la station de Konolfingen où se trouve un dépôt avec atelier de réparations.

Choix du système de traction. — Au moment de la formation de la Compagnie du Chemin de fer B. T. B, la Société Motor, qui était en train de créer une grande usine hydro-électrique à Spiez, offrit à cette Compagnie de conclure avec elle un marché pour la fourniture de l'énergie et, l'usine génératrice devant produire l'électricité sous forme de courants triphasés pour l'éclairage des villes de Berne, Berthoud, Spiez, Munsingen ainsi que pour actionner quelques usines situées dans ces villes, on a été nécessairement conduit à examiner l'emploi des courants alternatifs triphasés pour la traction sur le Chemin de fer projeté. Dans l'avant-projet qui fut établi à cette époque, il a été fait une étude comparative entre la traction à vapeur et la traction électrique ; dans le premier cas, la dépense annuelle de charbon a été évaluée à 52.000 fr. pour 5 trains par jour dans chaque sens, plus une dépense d'environ 10.000 fr. par train supplémentaire ; tandis qu'avec la traction électrique, on a pu prévoir 10 trains par jour dans les deux sens pour la même dépense. La traction électrique a donc été adoptée et elle le fut sous la forme préconisée par MM. Brown Boveri et C^{ie}, constructeurs électriciens à Baden, qui proposèrent d'alimenter directement les moteurs des véhicules avec du courant triphasé.

Actuellement le courant alternatif est envoyé de l'usine de la Kander près Spiez sur les bords du lac de Thoune (Fig. 1), sous forme triphasée à la tension de 16.000 volts, par une ligne primaire de transport qui est établie le long du Chemin de fer mais en dehors des emprises, ce courant primaire est transformé de 16.000 en courant secondaire à 750 volts par

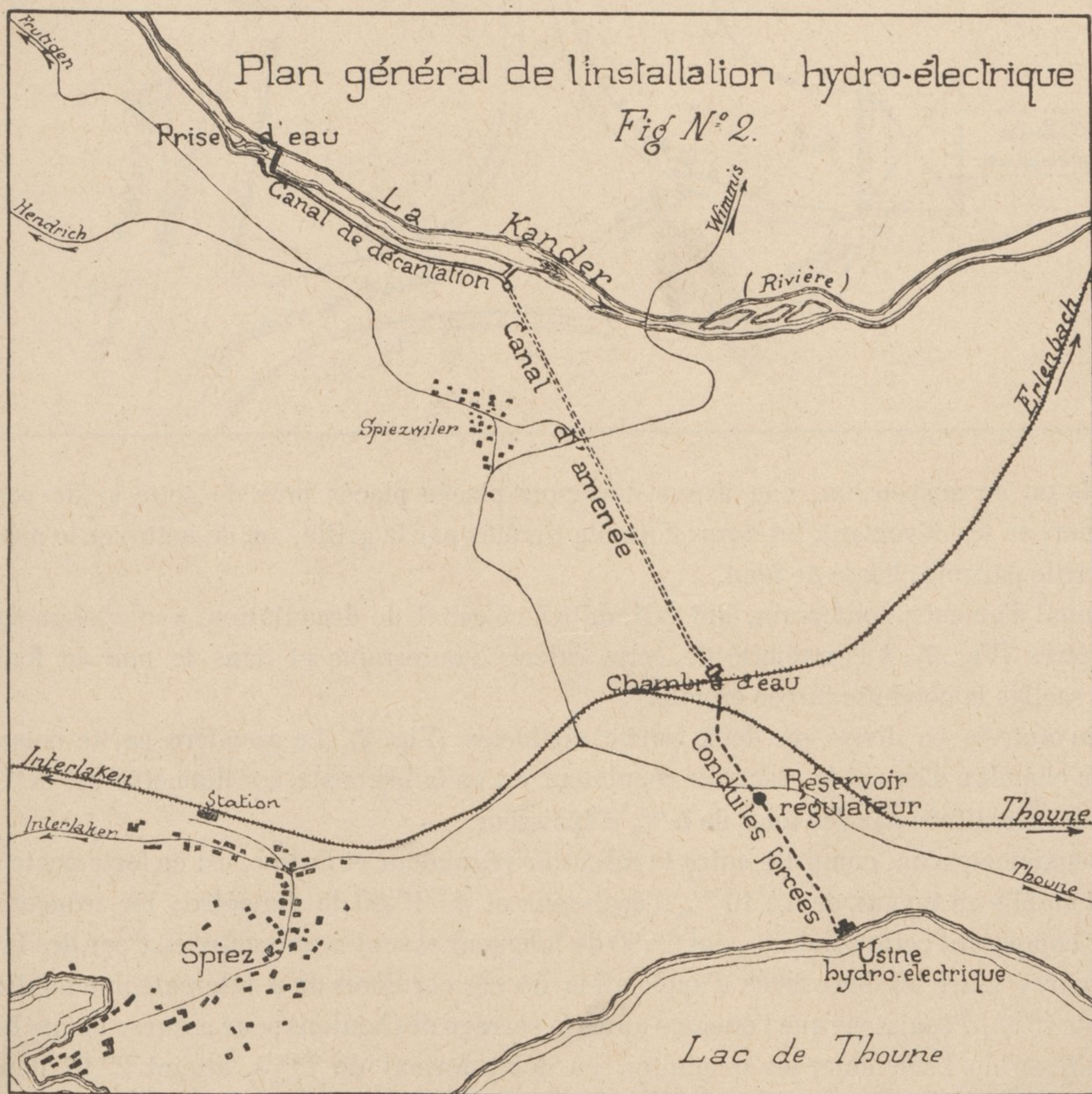
un certain nombre de postes de transformateurs, et envoyé à cette dernière tension pour être utilisé directement pour la traction.



Avantages du courant alternatif. — La distribution de l'énergie par courants alternatifs polyphasés, prend chaque jour une extension plus grande, car la distribution de ces courants à haut potentiel se fait plus économiquement que celle des courants continus, de plus les étincelles de contact sont plus faibles avec le courant alternatif et par suite l'usure est moindre, il y a aussi à considérer la facilité avec laquelle le courant alternatif à haute tension se transforme en un autre à tension plus basse pour alimenter les moteurs et les lampes ; une transformation analogue est bien possible avec les courants continus, mais il faut employer des commutatrices rotatives qu'on ne peut abandonner sans surveillance ; tandis que les transformateurs de courants alternatifs sont au contraire des appareils fixes qu'il suffit de visiter de temps en temps et qui ont un rendement plus élevé que les commutatrices à cause précisément de la fixité des organes qui les constituent et de l'absence de surfaces de frottement.

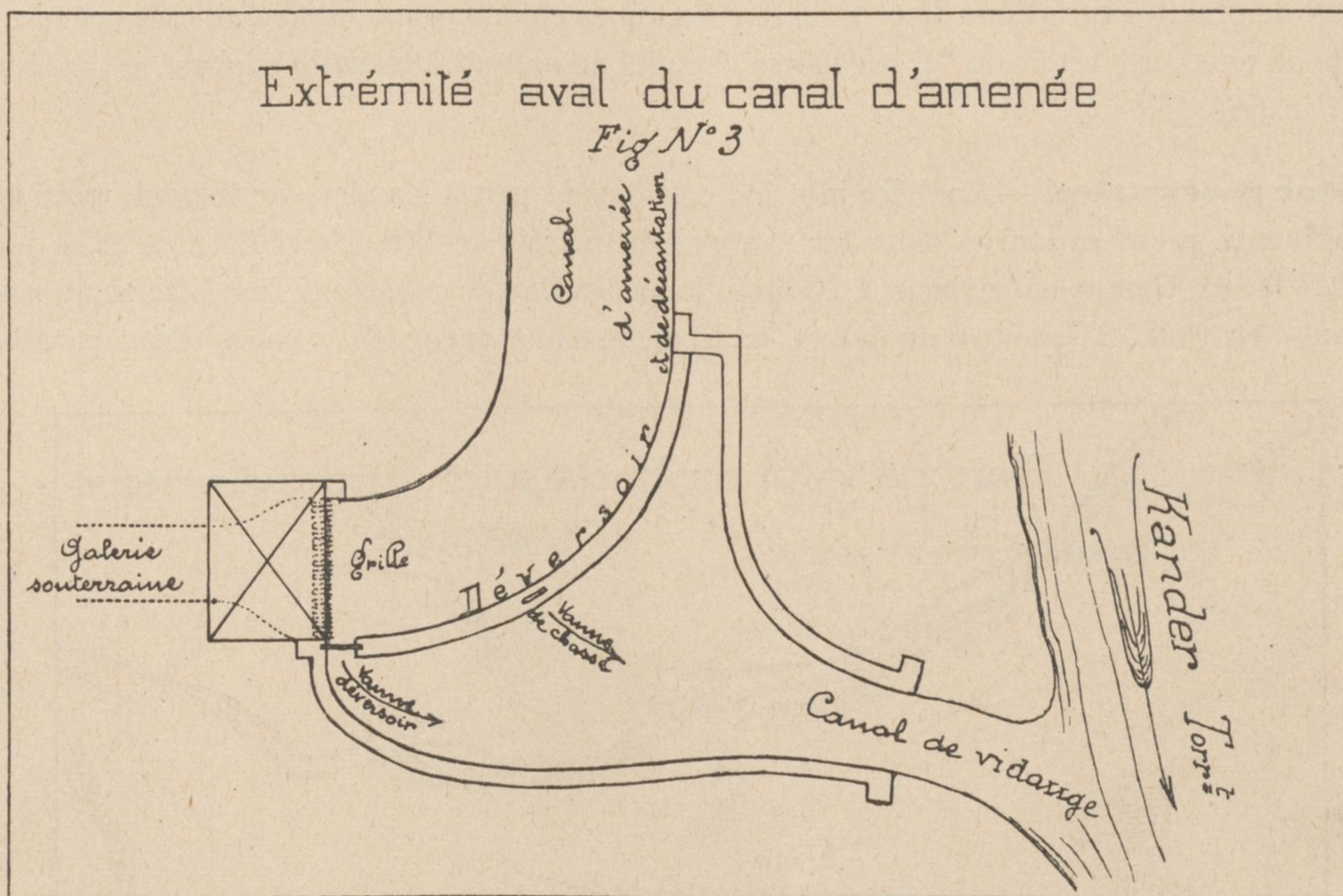
Quant aux moteurs triphasés, ils se comportent aujourd'hui aussi bien que ceux qui sont alimentés par un courant continu, même au démarrage ; de plus, ces moteurs triphasés ayant une vitesse presque constante, on ne peut dépasser cette vitesse dans les pentes. Mais l'invariabilité de cette vitesse oblige à construire le moteur, de façon qu'il soit capable de remorquer la charge maximum prévue sur la plus forte rampe à la vitesse de régime ; par suite, la puissance de ce moteur est plus grande que celle qui correspond au travail moyen. C'est le seul inconvénient grave qui rend l'application de ces moteurs triphasés, difficile sur les lignes offrant de grandes variations dans les déclivités, mais comme dans le cas qui nous occupe, la rampe la plus forte est de 25 m/m par mètre l'emploi du moteur alternatif triphasé est parfaitement justifié.

Usine génératrice. — La force motrice est fournie par la Kander, ce torrent, ainsi que ses affluents, prend sa source dans les glaciers du massif de l'Oberland Bernois et se jette dans le lac de Thoune entre Spiez et Thoune. La dérivation de ce torrent s'est faite en un point distant d'environ 5 kilomètres du delta (Fig. 2) et dans une partie de ce cours d'eau parallèle



à la rive du lac, ce qui a permis de réduire la longueur de la canalisation ; la chute brute est de 69 mètres. L'eau dérivée de la Kander pénètre dans un canal d'amenée à ciel ouvert, d'une

longueur de 678 mètres, qui sert de chambre de décantation; ce canal a un débit maximum de 9 mètres cubes par seconde et la vitesse moyenne de l'eau est de 0^m,40 par seconde. A l'extrémité de ce canal d'amenée découvert, on a placé un déversoir circulaire pour l'évacuation des corps flottants (Fig. 3); au milieu de ce déversoir se trouve une vanne de vidange qui permet de débarrasser le fond du canal de ses dépôts. Avant de pénétrer dans la galerie souterraine d'amenée, l'eau est tamisée par une grille inclinée à 60° environ qui sert à arrêter les corps



flottants ou en suspension, une vanne déversoir placée placée près de cette grille permet d'évacuer, en les déversant, les corps flottants arrêtés par la grille, ou de nettoyer le pied de cette grille par une chasse de fond.

Le canal d'amenée souterrain, qui fait suite à ce canal de décantation, a une longueur de 857 mètres (Fig. 2); à l'extrémité de cette galerie souterraine et dans le mur du fond se trouve scellée la conduite forcée en tôle.

La tuyauterie se divise en deux parties distinctes (Fig. 2). La première partie comprise entre la chambre d'eau et le réservoir régulateur est en faible pente, son diamètre est de 1^m,80 et elle est constituée par des tôles de 5 ^m/_m d'épaisseur.

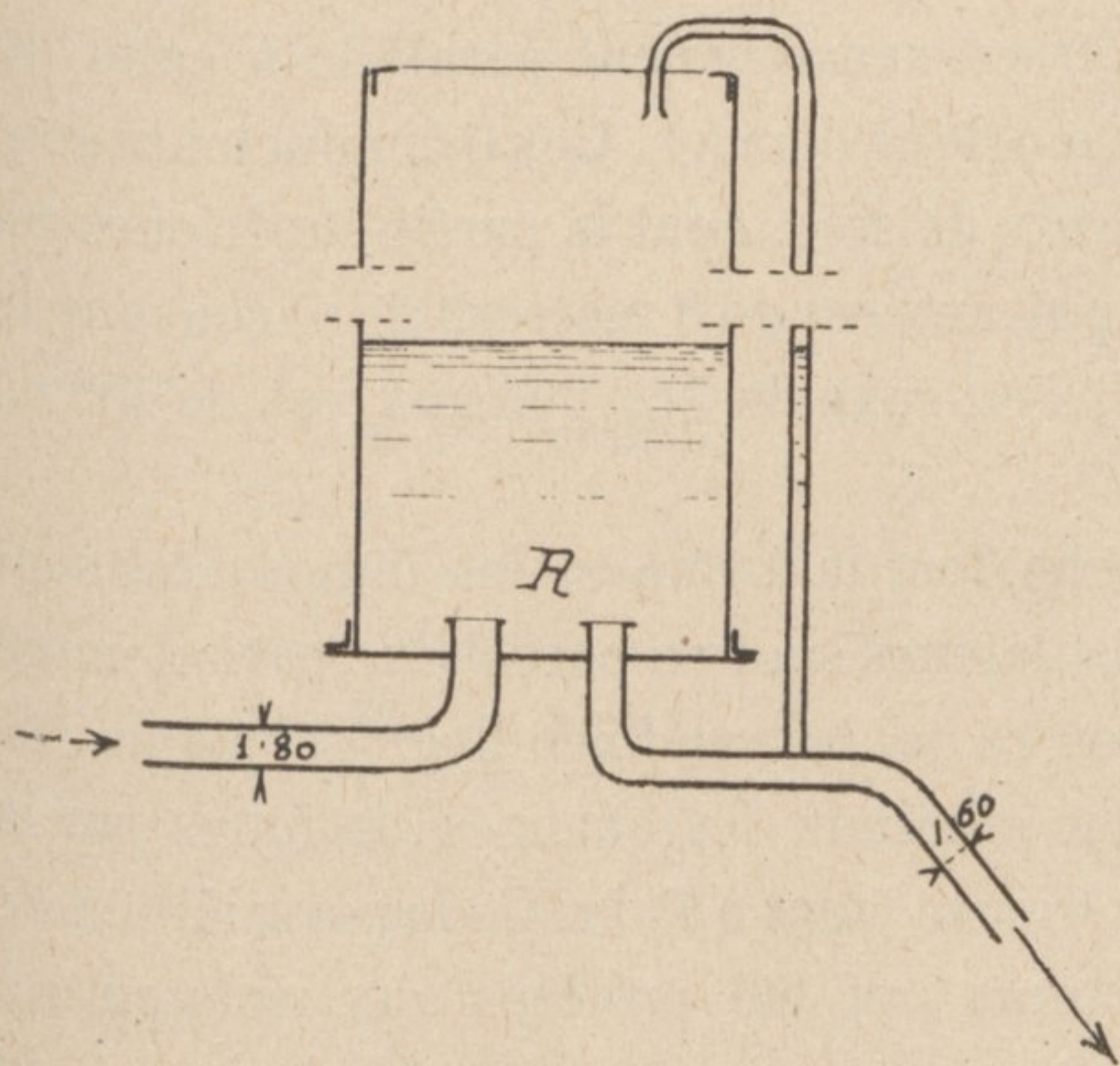
La deuxième partie, comprise entre le réservoir régulateur et l'usine, est en forte pente (46°) elle est établie en tuyaux de 6 à 10 ^m/_m d'épaisseur et de 1^m,60 de diamètre; les tronçons de tuyaux composant cette conduite, ont 6^m,50 de longueur et sont réunis entre eux par des brides en cornières, entre les deux faces d'application de ces cornières on a intercalé une feuille de plomb de 10 ^m/_m d'épaisseur que l'on mate après le serrage des boulons pour assurer l'étanchéité.

La vitesse de l'eau dans les conduites, en débit normal de 7^m³,5, atteint 2^m,97 dans la conduite de 1^m,80 et de 3^m,75 dans celle de 1^m,60. Primitivement ces deux conduites de diamètres différents, étaient réunies par un tuyau tronconique de raccordement, mais les secousses dues aux variations brusques de débit, donnaient lieu en ce point de changement de

penne, à des soulèvements. Pour y remédier on a enlevé le tuyau tronconique, qui a été remplacé par un réservoir servant de régulateur de pression ; les coups de bélier se font sentir dans ce réservoir (Fig. 4) et depuis lors la conduite n'a plus eu de soubresauts.

Réservoir régulateur

Fig. N° 4



Par le tuyau en forte pente, l'eau arrive sous pression à l'usine génératrice.

Cette usine est bâtie sur le bord du lac de Thoune elle se compose 1° d'un grand hall de 50 mètres de longueur sur 15 mètres de large où se trouve installée toute la machinerie 2° d'un petit bâtiment à 2 étages accolé au hall où l'on a établi l'atelier de réparations et les transformateurs de courant.

Actuellement la force motrice est fournie par 4 groupes moteurs (turbines et alternateurs).

Les turbines motrices sont du système Girard à hydropneumatisation, à axe horizontal et à admission partielle ; elles ont été construites pour une chute normale de 65 mètres, dont 5,50 comme chute aspirée et un débit de 1300 litres à la seconde.

Elles développent dans ces conditions une puissance de 900 chevaux, en tenant compte d'un rendement de 80 % et font 300 tours par minute. Ces turbines peuvent être isolées de la conduite d'alimentation à l'aide de vannes d'arrêt et elles sont pourvues de régulateurs automatiques qui permettent de ne laisser se produire de variations dans le nombre de tours et la pression qu'en une mesure assez restreinte ; ces turbines sont en outre pourvues d'appareils enregistreurs de pression et de vide permettant constamment de lire la pression existante.

Les alternateurs sont accouplés directement aux turbines ; leur force est de 660 kw, ils fournissent un courant triphasé à une tension de 4000 volts mesurée aux bornes et la fréquence de ce courant, en périodes par seconde, est de 40 ; la vitesse de rotation de ces alternateurs est de 300 tours.

Le courant à 4000 volts est élevé à la tension de 1600 au moyen de transformateurs installés dans l'annexe. Ces transformateurs sont à noyaux verticaux et, étant donné leur très haut potentiel, on les a isolés avec le plus grand soin, de plus ils sont plongés dans l'huile, cette dernière substance a l'avantage d'empêcher l'humidité de s'introduire dans les isolants ; avant de plonger le transformateur dans ce liquide, il a été bien séché et l'huile a été chauffée pour évacuer l'air et l'eau.

L'usine de la Kander fournit actuellement non seulement la force nécessaire à la Compagnie des chemins de fer BTB mais aussi le courant triphasé que lui louent les villes de Berne, Berthoud, Munsingen et Spiez pour l'éclairage et la force. Ces réseaux représentent un total de 100 kil. de lignes et une longueur de 600 kil. de fils de cuivre d'un poids de 1000 tonnes.

Nous ne nous occuperons ici que de la ligne du Chemin de fer.

Canalisation primaire. — La canalisation primaire du chemin de fer est aérienne, elle a une longueur de 48 km. et représente un poids de cuivre de 27 tonnes. Cette canalisation est

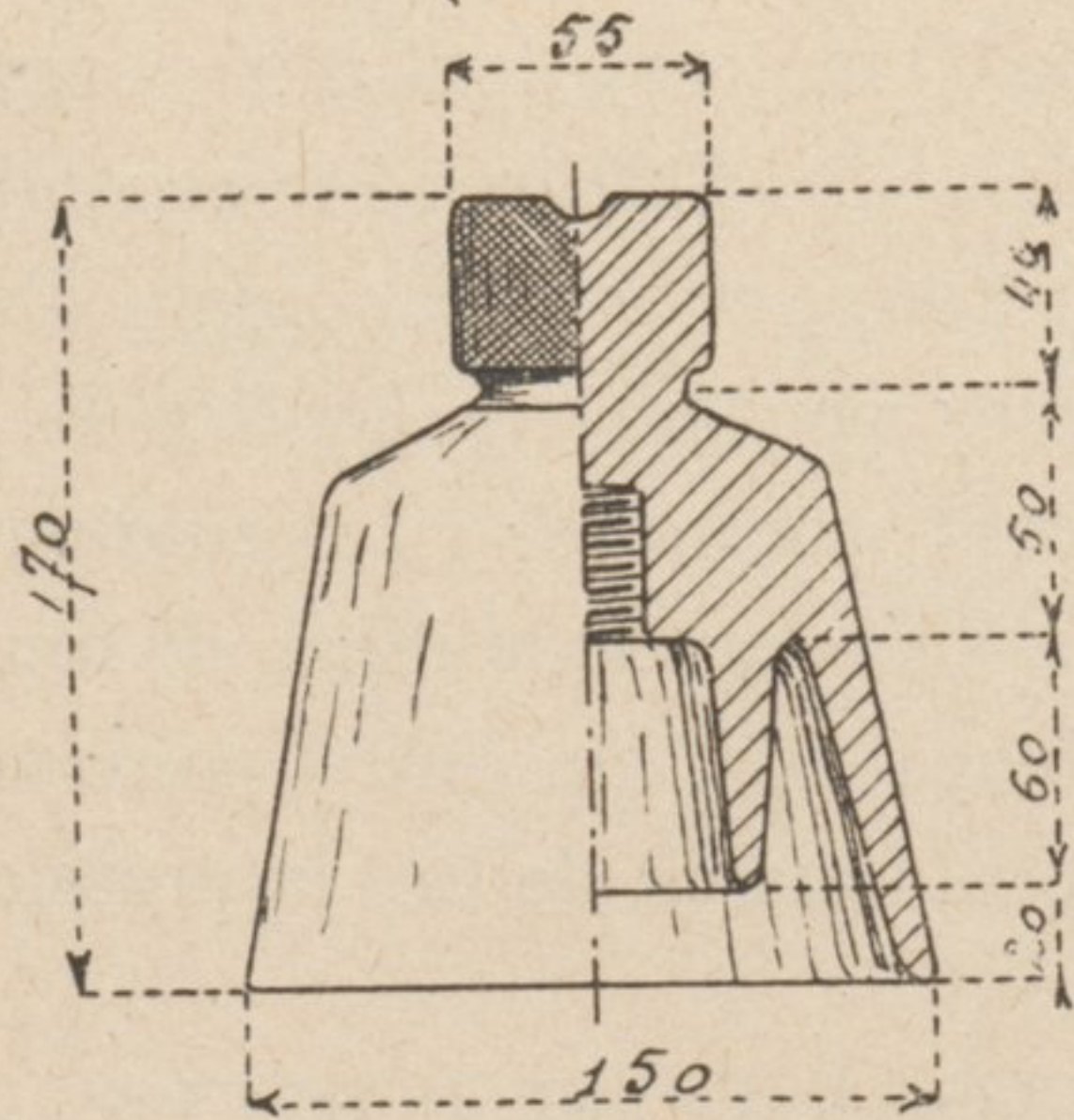
constituée par 3 conducteurs de cuivre de 5 m/m de diamètre, dimension constante d'un bout à l'autre du réseau primaire. Au départ de l'usine de la Kander et jusqu'à Thoune, ces trois conducteurs sont supportés par des pylones métalliques fondés sur des massifs de béton, ces supports ont été installés d'une façon robuste car ils soutiennent également 8 autres conducteurs destinés à distribuer le courant dans les villes nommées précédemment. Près de Thoune, les 3 conducteurs primaires du chemin de fer ainsi que ceux destinés à la ville de Berthoud, se détachent du réseau primaire général pour suivre un tracé sensiblement parallèle à celui du chemin de fer et aussi près que possible de la plateforme de ce dernier. Ces 6 conducteurs sont soutenus par des poteaux en sapin imprégnés de chlorure de zinc, dont la partie supérieure est protégée par un capuchon en zinc. La hauteur de ces poteaux est de 8 mètres, de façon que le fil le plus bas n'est jamais à moins de 6 mètres du sol, l'entraxe de ces poteaux est de 45 m en moyenne et ne dépasse jamais 50 mètres.

Chaque fil est attaché sur un isolateur à double cloche dont la forme et les dimensions sont données Fig. 5. Ces isolateurs sont en porcelaine parfaitement vitrifiée par la cuisson ce qui les rend peu hygrosco-piques, de plus la double cloche diminue les chances de fuites par la surface, la cloche intérieure étant à l'abri de la poussière et de l'humidité. Ces isolateurs ont été préférés aux isolateurs à l'huile qui demandent un certain entretien. Étant donnée la tension élevée (16.000 volts) du courant primaire, la partie supérieure des isolateurs a été colorée en rouge pour avertir du danger qu'il y a d'approcher de cette installation.

Détails d'un isolateur

Echelle de 0,20 p.m.

Fig N° 5



Le réseau primaire possède un interrupteur placé environ au milieu de la canalisation, cette dernière peut donc être divisée en 2 sections en cas de réparations.

Outre les parafoudres disposés au commencement de la ligne primaire et à la fin ainsi qu'aux stations transformatrices, on a prévu, tous les 5 poteaux, un parafoudre du type dit à antennes.

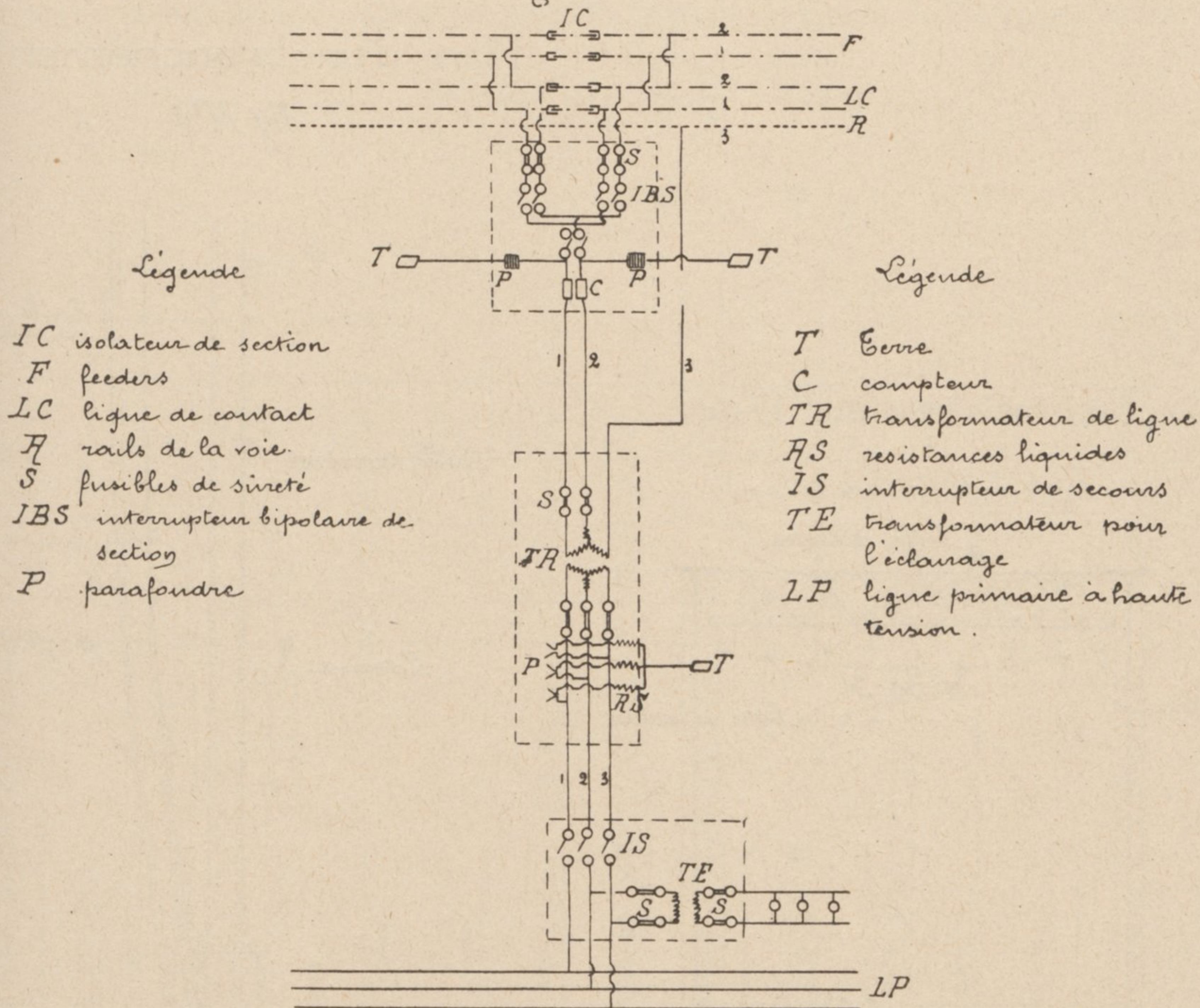
Le raccordement des conducteurs primaires avec les transformateurs se fait directement sans interposition de fusibles ou d'interrupteurs. Les conducteurs de raccordement sont assez courts, puisque la ligne primaire est établie aussi près que possible de la plateforme ; la longueur la plus grande de ces conducteurs est de 750 m entre Konolfingen et Grosshochstetten car en cet endroit l'état des lieux a obligé la ligne primaire à s'écarter du chemin de fer.

Le rendement de la canalisation primaire est de 95 %.

Stations transformatrices. — Pour l'établissement des stations transformatrices, on a été guidé par les considérations suivantes : 1° Sans multiplier les stations, ces dernières ont dû cependant être suffisamment rapprochées afin que la perte de tension entre chacune de ces stations ne soit pas trop grande. 2° Au point de vue de la surveillance il y a intérêt à placer les transformateurs le plus près possible des gares. Ces 2 considérations ont conduit à créer 14 stations transformatrices (Fig. 1) comprenant chacune un transformateur triphasé de 450 kw abaissant la tension primaire de 16.000 à 750 volts et divers appareils accessoires (Fig. 6) entre autres un compteur destiné à mesurer l'énergie dépensée dans chaque section.

Schéma d'une station transformatrice

Fig. N° 6



Ligne de contact. — La ligne de contact est constituée par 2 fils aériens en cuivre de 8 m/m de diamètre, supportés par des poteaux en sapin, par l'intermédiaire de fils d'acier transversaux de 6 m/m de diamètre, ces derniers sont munis de tendeurs spéciaux permettant un déplacement latéral de $0^{\text{m}}30$ ce qui facilite la pose des fils de contact et permet de les placer dans une direction convenable. La distance des supports est de 35^{m} environ cette distance est moindre dans les courbes et au droit des passages à niveau. Au passage du pont métallique tubulaire sur l'Aar, le système tendeur transversal est attaché aux goussets réunissant les montants au contreventement supérieur du pont, ces attaches sont placées sous les deux montants (Fig. 7).

Aux branchements, MM. Brown, Boveri et Cie ont adopté un système de croisement aérien représenté en plan (Fig. 8). Le double archet d'avant étant relié électriquement avec celui d'arrière, il suffit qu'une seule de ces paires d'archets soit en contact normal avec les conducteurs ; c'est ce qui a toujours lieu, puisque le courant n'est interrompu sur la ligne de contact que sur une longueur inférieure à la distance qui sépare les paires d'archets. L'expérience a démontré que ce dispositif ne donnait lieu à aucune difficulté soit pour arrêter le train sous le croisement, soit pour repartir ou changer le sens de la marche des véhicules.

Les 40 kilomètres de voie courante, plus les 6 kilomètres de voie d'évitement, ont nécessité,

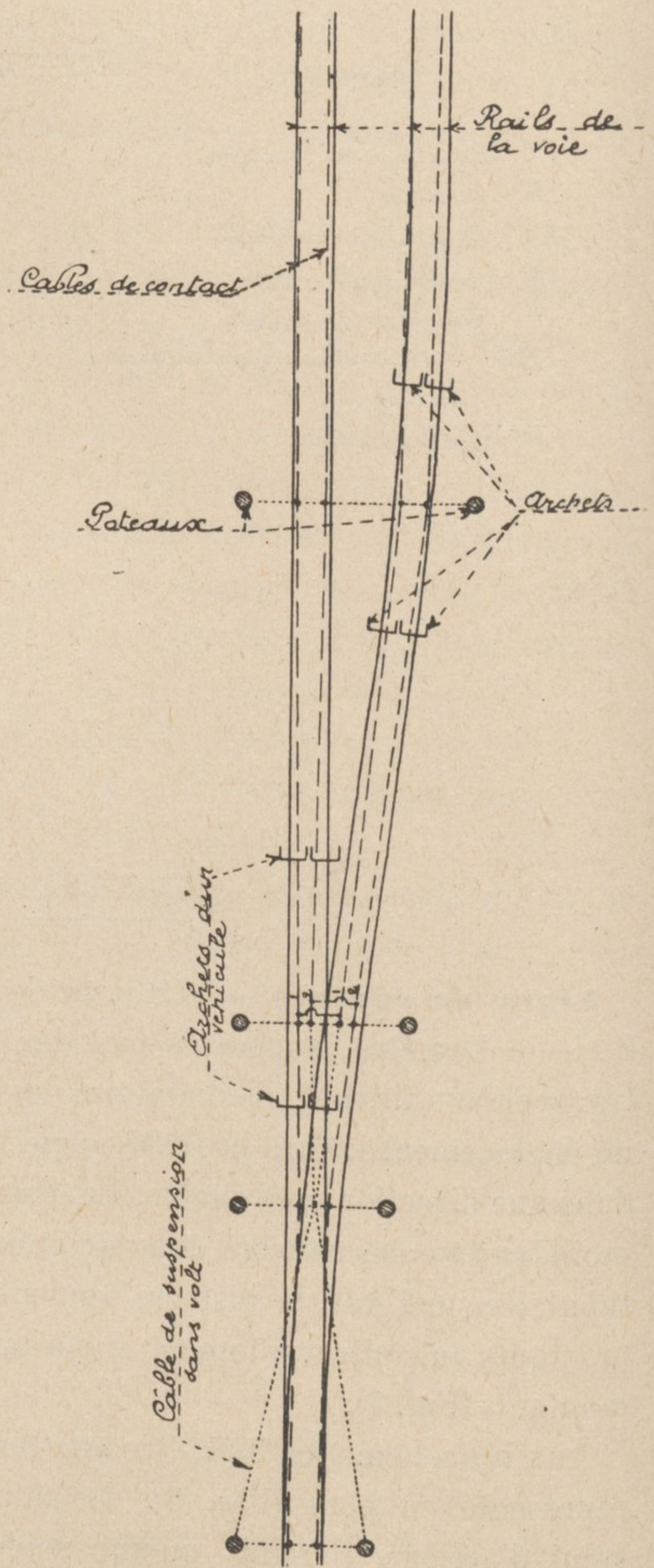
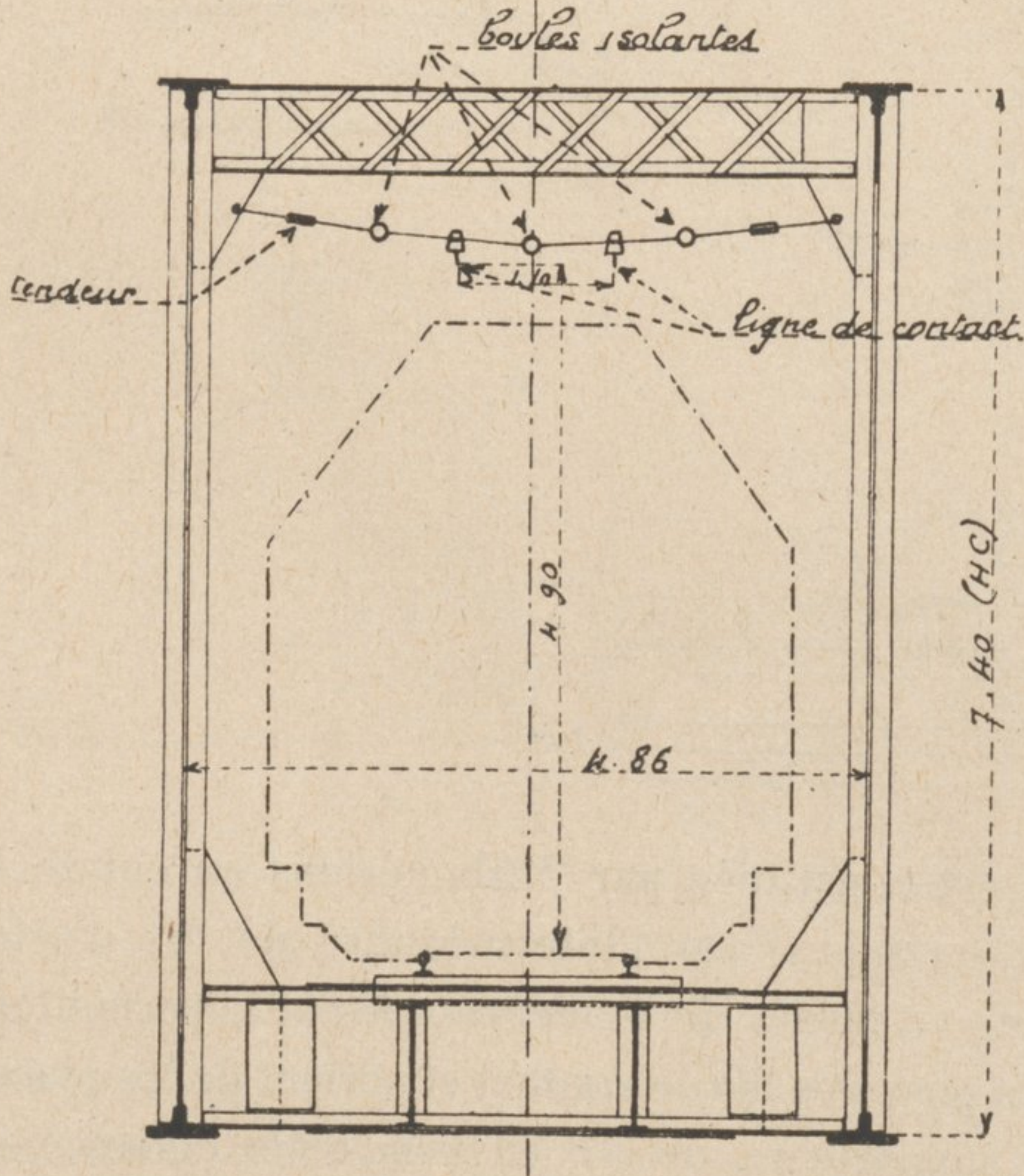
pour l'établissement de leur ligne de contact, 40.000 kg. de cuivre; le rendement de cette ligne en comprenant celui des postes de transformation est de 85 %, l'intensité du courant étant de 750 volts.

Plan d'un branchement

Fig N° 8

Pont métallique sur l'Aar

Fig N° 7 (Echelle de 901 p.m.)

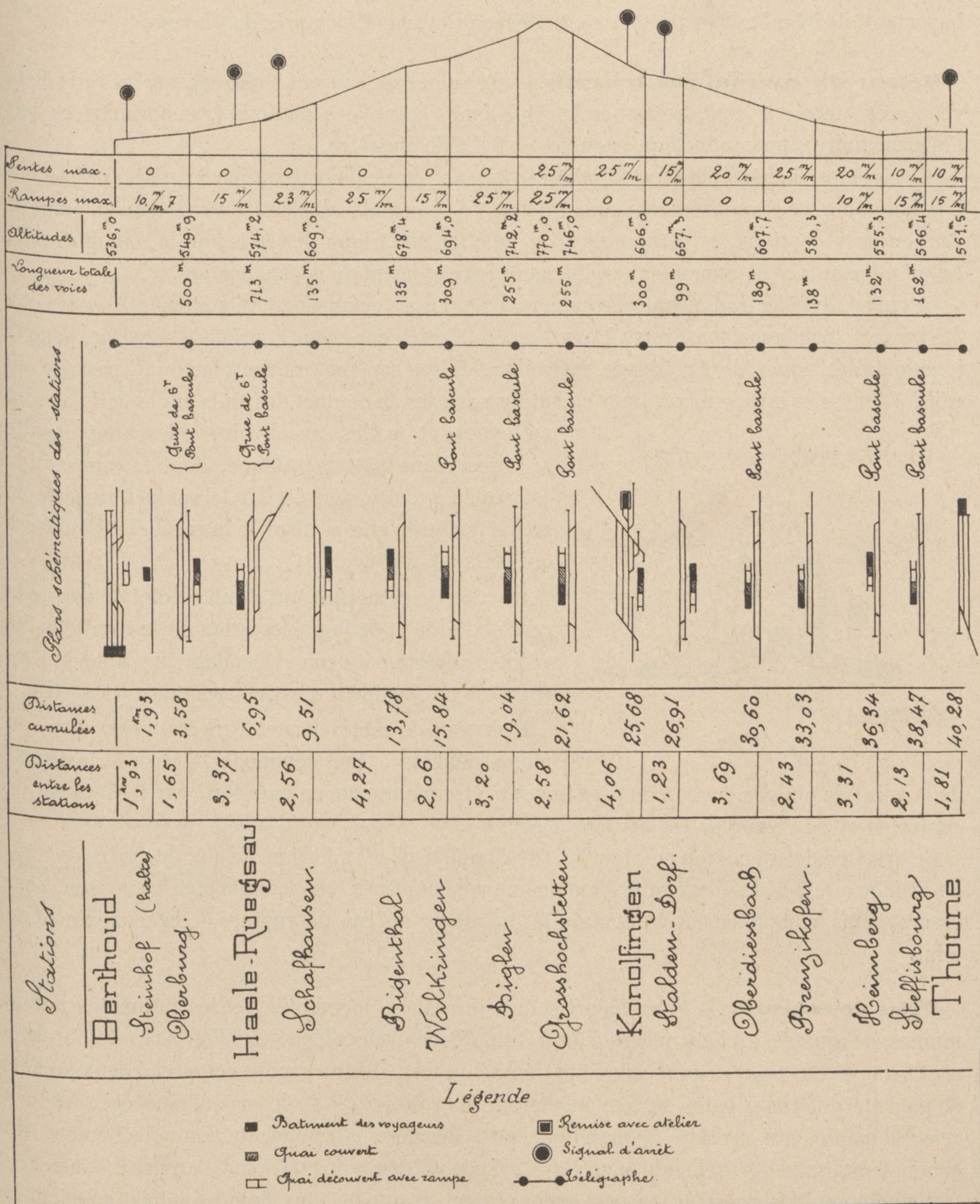


Voie. — Ce chemin de fer est à voie normale et unique qui est constituée à l'aide de rails Vignole, en acier, de 12 mètres de long et pesant 36 kg. le mètre courant. Les rails sont posés sur des traverses en bois ou sur des traverses en fer; ces dernières sont placées dans les fortes rampes et dans les courbes, elles représentent environ le 1/3 du nombre total des traverses. La voie posée sur traverses en bois pèse 145 kg. le mètre courant, celle posée sur

traverses en fer pèse 137 kg. Sur les ponts métalliques, qui sont dépourvus de platelage, la voie est posée sur des traverses en bois, dont le nombre est double de celui de la voie courante; de plus, on a placé des contre-rails pour éviter les déraillements.

Le rayon minimum des courbes est de 250^m; la pente maximum de 25^m/m par mètre, il y a

Profil en long Fig N° 9



quinze stations de voyageurs qui sont toutes établies en palier sur une longueur de 200 mètres au moins, les autres données relatives à cette ligne, sont indiquées sur le profil en long (Fig. 9). La longueur totale des voies est de 50 kil. 900, le nombre de croisements simples de 65 et celui des croisements doubles de 4.

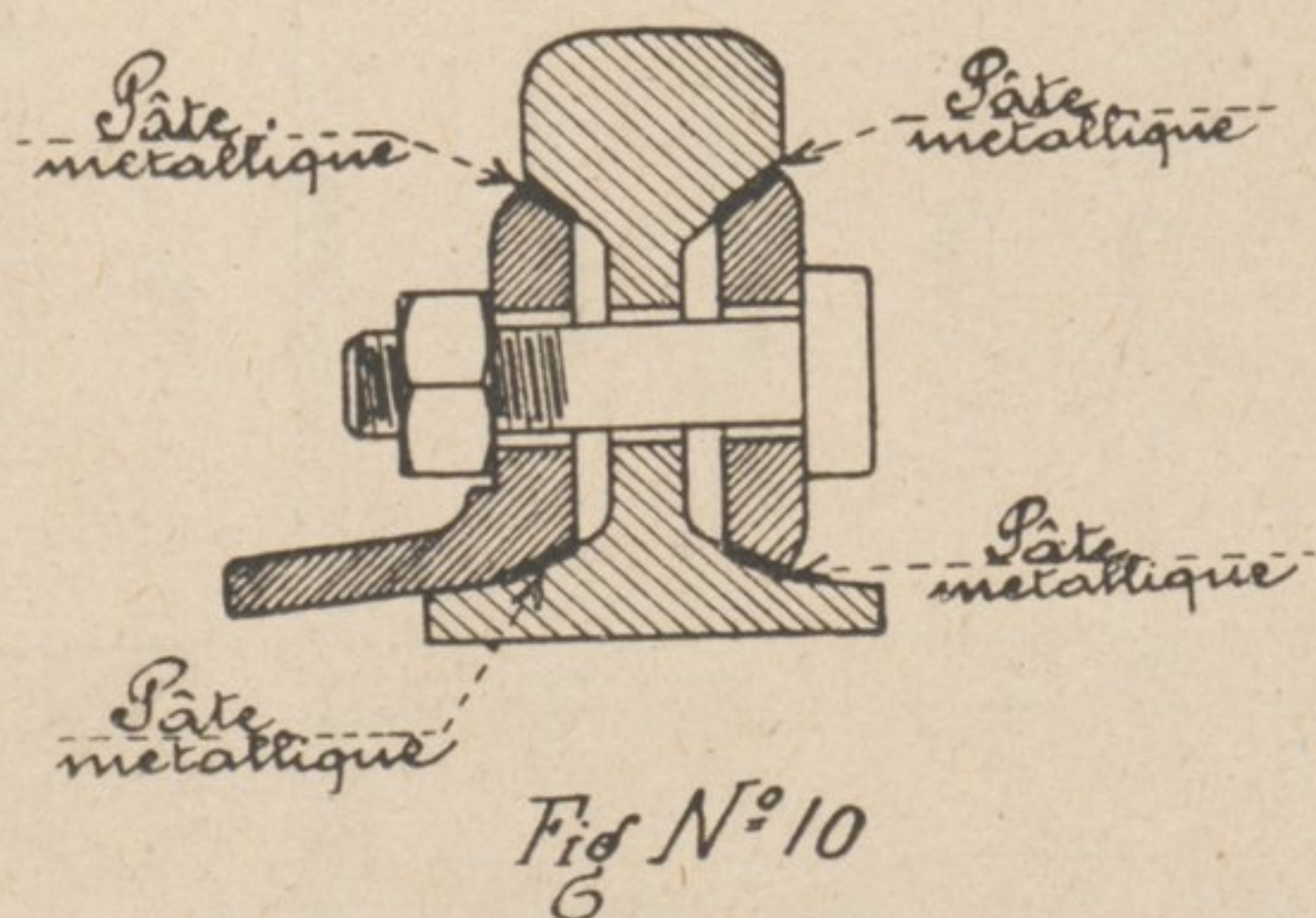
Les ouvrages d'art sont peu nombreux, deux souterrains de 100 mètres de longueur chacun et un de 150 mètres, n'ayant présenté aucune difficulté de construction; il existe aussi plusieurs ponts métalliques de 1 et 2 mètres d'ouverture, il n'y a qu'un seul viaduc métallique important, de 57 mètres de portée, à grandes mailles, sur l'Aar, près de Thoune.

Retour du courant par les rails. — Le retour du courant s'effectue par les rails de la voie, ces derniers sont reliés à la troisième borne des stations transformatrices par l'intermédiaire d'un conducteur de cuivre de 8^m/_m de diamètre..

Bien que les phénomènes électrolytiques, dûs au retour du courant par les rails, présentent infiniment moins d'inconvénients quand il s'agit de courants alternatifs que lorsqu'on emploie des courants continus, on a apporté à la jonction électrique des rails tout le soin désirable, ce qui a l'avantage d'augmenter sensiblement le rendement de la canalisation.

La connexion électrique en usage dans le cas qui nous occupe, est relativement récente et a été brevetée par la maison Brown-Boveri et Cie. Cette connexion consiste à se servir, pour la jonction électrique, de l'éclissage mécanique lui-même, en rendant facile le passage du rail à l'éclisse et inversement. Dans ce but les surfaces de contact des rails et des éclisses sont

Connexion des rails



nettoyées et polies avec soin, elles sont ensuite enduites d'une pâte métallique, dont la composition est restée secrète, qui établit le contact parfait, en même temps qu'elle protège de la rouille les surfaces qui en sont recouvertes.

L'action de cette pâte, au double point de vue de la conductibilité et de la préservation de la rouille, a été vérifiée expérimentalement pendant une année et les résultats ont justifié toutes les espérances (Fig. 10).

L'absence de câbles connecteurs à attaches plus ou moins délicates, rend commode la pose et la dépose

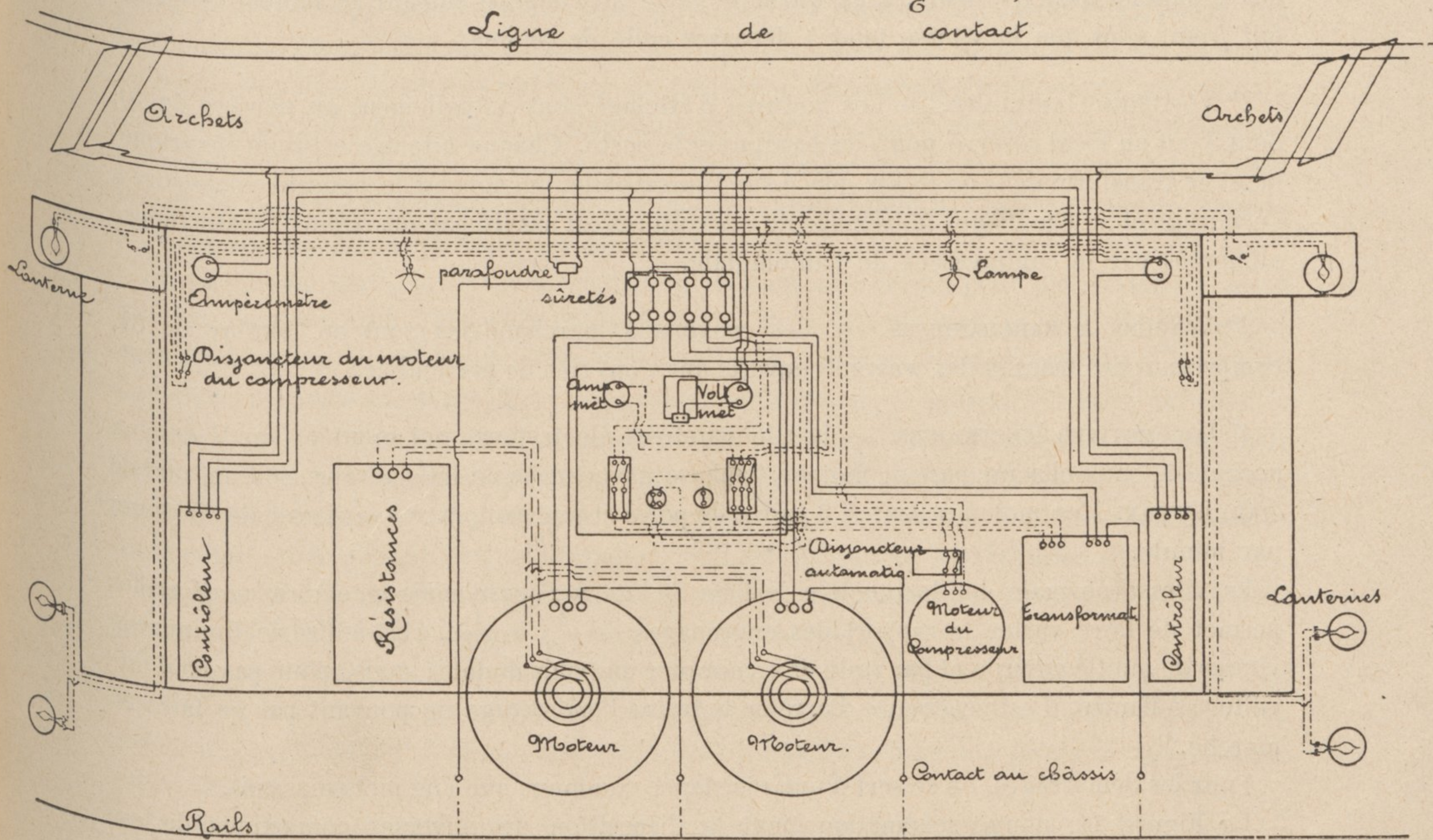
de la voie; de plus, la connexion peut toujours être maintenue en bon état, car il est facile de contrôler et de resserrer les boulons d'éclisses.

Ce système de connexion aux joints a été complété par l'addition de fils de cuivre de 8^m/_m de diamètre reliant les deux rails d'une même voie et placés tous les 100 mètres environ, pour assurer plus complètement la continuité du retour en cas de rupture de la connexion d'un joint.

Prise de courant. — Pour la prise de courant, les locomotives et les automotrices sont munies de quatre archets placés sur le toit de ces véhicules (Voir Fig. 11). Ces archets sont groupés deux par deux à chaque extrémité du toit, chaque groupe comprend deux archets de polarité différente calés sur un même axe de rotation. Pour le cas qui nous occupe, on a rejeté l'emploi du trolley à molette, cette dernière s'échappant assez facilement du conducteur, quand le véhicule marche à grande vitesse; on a adopté l'archet à contact de frottement, qui ne présente pas cet inconvénient et qui de plus prend automatiquement la

position convenable, lors des changements de sens dans la marche. Chaque archet est constitué par un tube d'acier formant un cadre rectangulaire, raidi par des fils d'acier disposés suivant les diagonales du rectangle, sur l'axe de rotation se trouve un ressort spirale qui se bande et applique l'archet sur le conducteur de contact, quelle que soit le sens de la marche du véhicule. La partie de l'archet qui frotte sur le fil est formée d'un tube métallique à section triangulaire, pour changer la face de contact, il suffit de faire tourner ce tube de 120 degrés; chacun de ces tubes peut parcourir environ 4,000 km., sans avoir besoin d'être changé.

Schéma des connexions dans
une locomotive (Fig. N° 11)
Ligne de contact



Matériel roulant. — L'ensemble du matériel roulant se compose actuellement du matériel suivant :

- 6 wagons automobiles ;
- 10 voitures d'attelage ;
- 61 wagons à marchandises ;
- 2 locomotives électriques ;
- 1 locomotive à vapeur de secours.

1° WAGONS AUTOMOBILES. — Les wagons automobiles contiennent 66 places assises, dont 16 de 2^e classe et 50 de 3^e classe, chaque véhicule est monté sur deux bogies distants de 9^m,50 d'axe en axe et dont l'écartement des essieux est de 2^m,20. Sur chaque essieu est calé un moteur asynchrone de 60 chevaux, soit une puissance totale de 240 chevaux par véhicule.

Ces moteurs sont à quatre paires de pôles et tournent avec une vitesse de 600 tours par minute, ils transmettent la force à l'essieu au moyen d'une transmission par engrenages, dont le coefficient de réduction est de $1/3$.

Le poids de chaque automobile est de 32 tonnes, dont 10 tonnes $1/2$ pour l'équipement électrique; ces voitures peuvent remorquer 20 tonnes à la vitesse de 36 kilomètres à l'heure, sur une rampe de 25 m/m par mètre.

Chaque automobile est munie d'un transformateur de 18 kw. abaissant la tension de 750 à 100 volts; cet appareil fournit le courant nécessaire au chauffage et à l'éclairage du véhicule, ainsi qu'au moteur spécial de quatre chevaux qui actionne le compresseur du frein Westinghouse, dont chaque véhicule est muni.

En dehors du frein à air, il y a un freinage à vis actionnant 16 sabots et manœuvrable des des 2 plateformes; d'ailleurs, ainsi qu'on le verra au chapitre suivant, le moteur lui-même fait frein, sitôt que la vitesse tend à dépasser celle de régime.

2° VOITURES D'ATTELAGE. — Les voitures d'attelage sont actuellement au nombre de 10, dont 3 ont un local réservé pour les bagages et la poste. Chaque attelage est relié électriquement au transformateur de 18 kw. placé sur l'automobile, qui fournit le courant nécessaire à l'éclairage et au chauffage; le freinage de ces voitures est assuré par des freins Westinghouse alimentés par le compresseur de l'automobile.

3° WAGONS A MARCHANDISES. — Les wagons à marchandises sont au nombre de 61, comprenant des trucs et des wagons couverts qui n'ont rien de particulier.

4° LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES. — Les locomotives électriques sont montées sur 2 essieux accouplés, mus chacun par un moteur triphasé asynchrone de 150 chevaux, soit un total de 300 chevaux. Ces moteurs sont à 8 paires de pôles et tournent avec une vitesse de 300 tours par minute.

La vitesse normale des locomotives est de 36 km. à l'heure mais un embrayage à griffes permet de faire varier le rapport des engrenages de $\frac{1}{1.88}$ à $\frac{1}{3.72}$, c'est-à-dire de diminuer la vitesse de moitié environ et par suite de remorquer un poids double; mais, pour passer d'une voiture à l'autre, il est nécessaire d'arrêter le train, l'embrayage ne pouvant pas se faire en marche.

Pour les démarrages, on se sert d'une résistance commune que l'on met en circuit.

La Figure 11, donne schématiquement la disposition des diverses connexions de ces locomotives.

Tous les appareils de manœuvre sont en double, de sorte que, les locomotives, ainsi que les automobiles, sont manœuvrables des 2 plateformes et par suite n'ont pas besoin d'être retournées quand on change le sens de la marche.

Ces locomotives possèdent un moteur de 4 chevaux qui actionne le compresseur du frein Westinghouse; en plus de ce frein à air, les locomotives peuvent être freinées à la main. Le courant nécessaire au chauffage et à l'éclairage de ces véhicules, est fourni par un transformateur de 10 kw. abaissant la tension du courant secondaire de 750 à 100 volts.

Les données principales des locomotives sont les suivantes :

Écartement des essieux.....	3 ^m ,14
Longueur entre tampons.....	7 ^m ,80

Diamètres des roues motrices.....	1 ^m ,23
Poids total = poids adhérent	29 ^t ,600
Poids de l'équipement électrique	10 ^t ,000
Poids d'un moteur	4 ^t ,000

5° LOCOMOTIVE A VAPEUR. — Le dépôt de Konolfingen contient en réserve une machine à vapeur de secours, à laquelle on peut recourir en cas d'accident; cette locomotive a surtout été utilisée pendant la période de tâtonnements du début de l'exploitation, aujourd'hui il est rare qu'on ait besoin de la sortir.

Moteurs. — Les locomotives et les automobiles sont munis de moteurs asynchrones, le seul type utilisable à l'heure actuelle pour la traction par courants triphasés, ceux placés sur les locomotives tournent à une vitesse de 300 tours par minute et ceux placés sur les automobiles tournent à une vitesse de 600 tours, la fréquence du courant qui alimente ces moteurs étant de 40 périodes par seconde. Les moteurs asynchrones sont composés comme les moteurs à courant continu, d'un inducteur fixe et d'un induit mobile qui transmet l'énergie à l'essieu moteur au moyen d'engrenages, chaque moteur est enfermé dans une caisse en fonte, laquelle présente des regards permettant de visiter les paliers.

En marche normale, la vitesse de ce moteur est constante même pour des variations assez grandes dans le profil, car d'après la formule $V = \frac{n}{p}$ dans laquelle n la fréquence des pulsations et $2p$ le nombre de pôles inducteurs sont constants, il en résulte que V la vitesse du moteur est aussi constante. Pour faire varier cette vitesse, il suffirait de faire varier p le nombre de pôles, ce moyen est d'une construction trop compliquée, aussi a-t-on préféré, pour passer la vitesse o à la vitesse normale, intercaler des résistances dans les circuits induits; après le démarrage, on supprime ces résistances progressivement à mesure que la vitesse augmente; cette dernière devient normale quand les résistances sont réduites à zéro.

On vient de voir qu'en théorie, la vitesse du véhicule est constante, pratiquement elle l'est presque et égale 36 km. à l'heure, quelle que soit la charge.

Le jeu entre l'induit et l'inducteur n'est que de $1/2$ m/m, ce qui est nécessaire pour le bon rendement du moteur et pour avoir un fort couple au démarrage, mais la faiblesse de ce jeu est un inconvénient, car à la moindre usure dans les paliers, il peut se produire des contacts entre l'inducteur et l'induit.

Les moteurs ont été calculés pour donner leur maximum de puissance (60 chevaux pour les automobiles et 150 chevaux pour les locomotives) sous une tension de 750 volts.

Aux essais, on a fait développer à ces moteurs une force supplémentaire d'environ 40 % sous la tension de 750 volts; cette surcharge fut très bien supportée par ces appareils. Il en résulte qu'un train normal peut, en cas d'accident survenu à un moteur, continuer sa course avec trois moteurs seulement en rampe de 25 m/m; ce qui est intéressant pour un service public, et même deux moteurs suffiraient dans les rampes faibles ou sur les paliers.

Le tableau suivant donne le rendement des moteurs et de leurs transmissions.

<i>Moteur de 60 ch. (pour automobile)</i>		<i>Moteur de 150 ch. (pour locomotive).</i>	
Pour 1/3 de la charge.....	71 %	Pour 1/3 de la charge.....	68 %
2/3 »	78 %	2/3 »	76 %
En pleine charge.....	85 %	En pleine charge.....	82 %

Chauffage et éclairage. — Le chauffage des voitures est obtenu au moyen de petits radiateurs de $1/2$ kilowatt, dont la température propre peut s'élever jusqu'à 300° centigrades, sous l'influence d'un courant de 100 volts. Chaque radiateur est composé de 6 éléments formés chacun d'une simple spirale en fil de fer enroulée en hélice autour d'un tube en porcelaine pour éviter que les spires ne viennent en contact les unes avec les autres par suite des vibrations ; ces 3 éléments sont enfermés dans une gaine cylindrique en tôle perforée.

Pour ce chauffage, on a compté 3 kilowatts $1/2$ de dépense environ, pour 33 places assises ; soit 7 kw. pour un véhicule de 66 places, qui contient 14 chaufferettes.

L'éclairage des voitures est obtenu au moyen de lampes à incandescence alimentées par le même courant que les chaufferettes.

Le chauffage des bâtiments de voyageurs est obtenu au moyen des mêmes éléments. Quant à l'éclairage il est assuré dans chaque station par 18 lampes à incandescence au moins, à Burgdorf il y a en plus quelques lampes à arc pour l'éclairage de la gare des marchandises. Le courant nécessaire à toutes ces lampes est à la tension de 150 volts il est obtenu à l'aide de transformateurs recevant le courant de la ligne à haute tension pour les gares de Berthoud et de Konolfingen et de la ligne de contact dans les autres stations. Dans ce dernier cas, le couplage ayant lieu sur le circuit des moteurs, les démarrages des trains produisent une baisse très notable de la lumière et de la chaleur, mais, afin de ne pas augmenter les frais de premier établissement, on a préféré passer sur cet inconvénient en renonçant à aller chercher le courant primaire qui est quelquefois loin des stations.

Dépôt de Konolfingen. — La station de Konolfingen possède une remise à véhicules avec un atelier de réparations.

Dans la remise on a ménagé des fosses pour la visite ; l'atelier contient l'outillage nécessaire à la réparation et au remontage des pièces des véhicules en service, cet atelier est mis en mouvement par un petit moteur à courant triphasé, des transformateurs peuvent donner le courant sous 750 ou 100 volts pour les essais des moteurs ou des appareils de chauffage et d'éclairage.

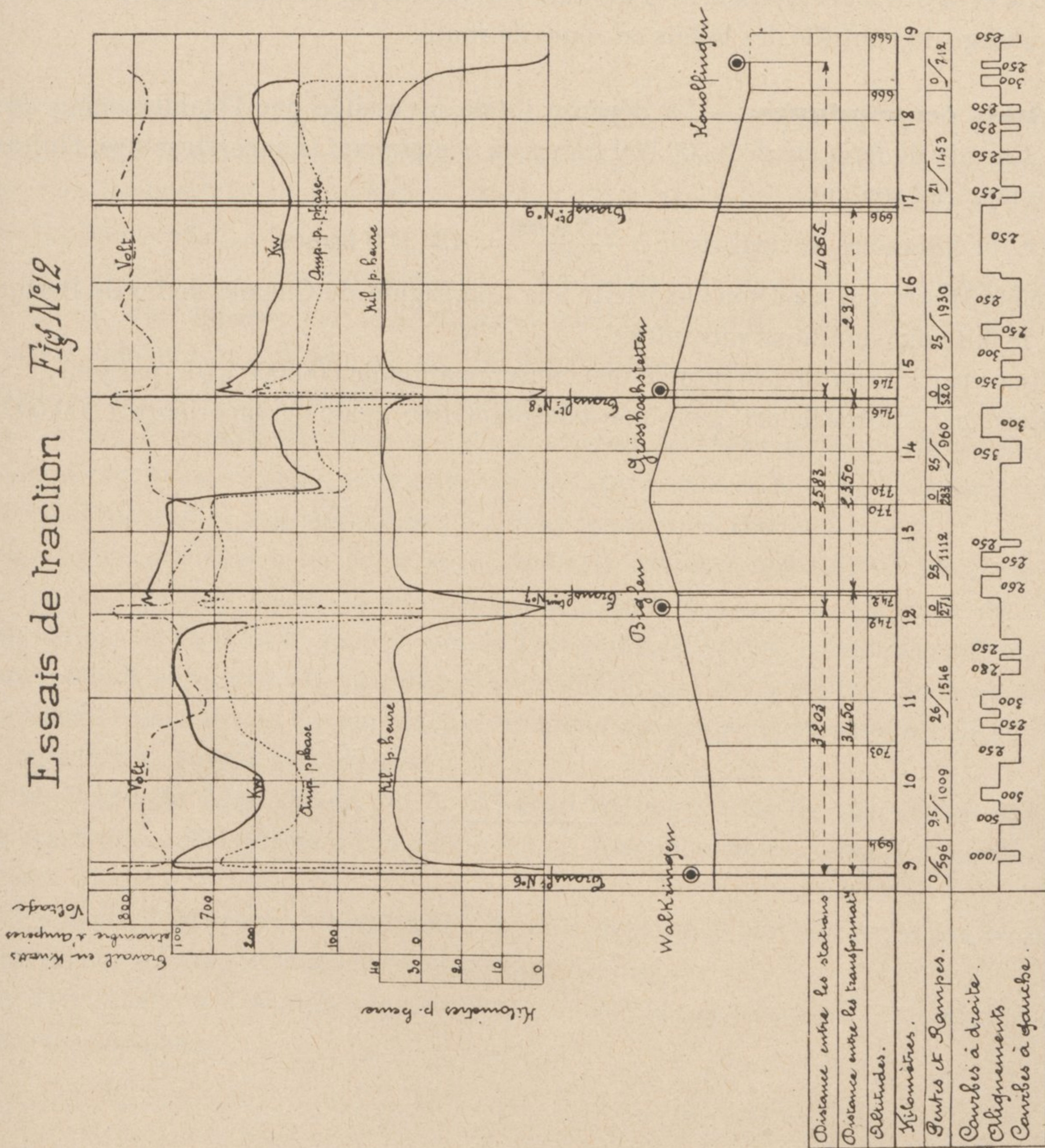
Résultats aux essais. — Avant la mise en exploitation de cette ligne, il a été procédé à des essais de traction, de démarrage et d'arrêts dans les différents cas défavorables qui peuvent se présenter.

La Fig. 12, donne les résultats d'essais à la traction obtenus avec un train d'épreuve comprenant un automobile et 2 attelages d'un poids total de 55 tonnes, ce train allant de Walkringen à Konolfingen. Les courbes obtenues au moyen d'appareils enregistreurs, montrent bien les variations du voltage, du débit et du travail dépensé dans les différents cas du profil ; quant à la vitesse, on voit parfaitement qu'elle est pratiquement constante et égale à 38 km. à l'heure et que le temps de démarrage est relativement court.

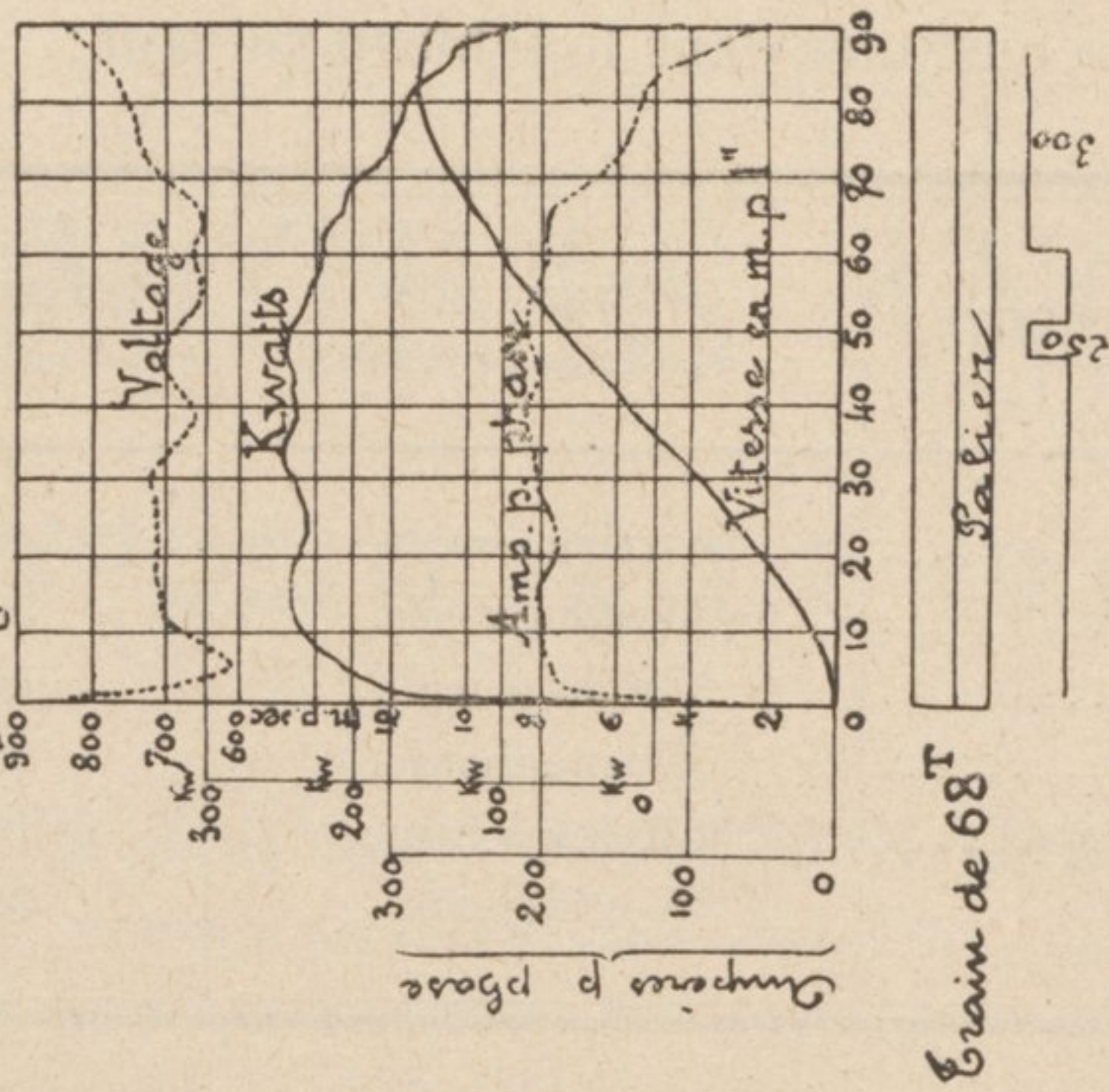
D'autres essais de traction ont eu lieu sur les mêmes déclivités avec un train d'épreuve d'un poids total de 102 tonnes, comprenant 2 automobiles et 3 attelages ; ces essais ont eu le même succès que les précédents.

On a procédé ensuite à des essais de démarrages à simple traction avec des surcharges de 32, 55 et 68 tonnes ; ce sont les résultats obtenus dans ce dernier cas qui sont donnés par la Fig. 13 et qui montrent qu'au démarrage les moteurs à courants triphasés se comportent aussi bien que ceux alimentés par un courant continu.

Essais de traction Fig N°12



Essais de traction Fig N°13



Il a été fait aussi des essais d'arrêt au frein dans les pentes maxima de 25^m/_m par mètre ; les résultats de ces essais sont consignés dans le tableau suivant :

COMPOSITION DU TRAIN D'ÉPREUVE	DÉSIGNATION des freins employés	VITESSE DU TRAIN avant l'usage des freins	DISTANCE PARCOURUE depuis le début de l'action du frein
2 automobiles + 1 attelage.....	2 freins à main.	40 kil.	122 mètres.
2 automobiles + 1 attelage.....	Westinghouse.	38 »	61 »
2 automobiles + 2 attelages.....	2 freins à main.	40 »	125 »
2 automobiles + 2 attelages.....	Westinghouse.	38 »	77 »
1 locomotive + 100 ^{T.} de remorque.....	4 freins à main.	18 »	80 »
1 d° + 50 ^{T.} d°.....	Westinghouse.	36 »	90 »

Exploitation. — Le nombre des trains journaliers est de 10 montants et 10 descendants. Chaque train de voyageurs se compose, suivant l'affluence, d'une voiture automobile ou d'un automobile et un attelage. L'ensemble d'un train est conduit par un mécanicien et un conducteur de train chargé du contrôle des billets en cours de route.

Résultats économiques. — La dépense totale nécessitée par l'établissement de cette ligne de Chemin de fer a été de 5.500.000 francs en comprenant la superstructure, l'infrastructure et le matériel roulant.

Le prix du kilomètre revient donc à $\frac{5.500.000}{41} = 134.000$ francs.

La Société Motor, qui vend son électricité à la Compagnie du Chemin de fer de Berthoud Thoune, le fait aux conditions suivantes :

6 centimes par kilowattheure jusqu'à une consommation de 600.000 kwh. par jour,

5 centimes par kilowattheure pour une consommation égale ou supérieure à 600.000 kwh. par jour.