

NOTE

SUR

L'ÉLECTRIFICATION DE LA LIGNE DES GIOVI

Par M. Pietro VEROLE,

INGÉNIEUR, CHÉF DE LA DIVISION DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE
AUX CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT ITALIEN.



(Pl. III à V).

Le moment est venu de donner quelques renseignements pratiques à l'égard de cette importante électrification qu'on doit à l'heureuse initiative de M. le Commandeur Riccardo Bianchi, Directeur Général des Chemins de fer de l'Etat italien, qui en a aussi tracé le projet détaillé.

On sait que cette électrification a eu pour but d'accroître la capacité de la circulation, dans la direction du Nord, de la ligne à double voie, connue généralement sous le nom de ligne des Giovi, qui traversant les Apennins, met en communication Gênes avec Milan et Turin. Cette capacité était devenue insuffisante, bien qu'une ligne voisine aussi à double voie relie Sampierdarena à Ronco, et cela à cause du développement toujours croissant du trafic dans le port de Gênes, d'où les marchandises doivent être dirigées en majeure partie vers le Nord.

Comme on peut le voir sur le profil et le plan (fig. 1 *bis* et 2) le tronçon de Pontedecimo à Busalla de cette ligne constitue un étranglement ayant de longues et très fortes déclivités, de 28 à 35 ‰ à découvert et de 29 ‰ en tunnel, ainsi que des courbes et contre courbes de 400 et 500 mètres de rayon.

La déclivité moyenne qui en résulte en prenant en considération soit les pentes, soit les courbes, est de 26,5 ‰.

On s'est proposé d'y faire circuler dans le sens ascendant, soit des trains voyageurs, soit des trains de marchandises, en général du poids utile de 380-400 tonnes, à la vitesse de 45 kilomètres-heure, à des intervalles de 15 minutes et même de 10 minutes, afin d'y donner passage chaque jour normalement à 56 et exceptionnellement à 84 trains pendant 20 heures, avec un coefficient d'utilisation de 70 %, ce qui correspond à une circulation journalière respectivement de 1092 et de 1638 voitures ou wagons du poids moyen de 20 tonnes. Dans le sens opposé on a projeté d'y faire circuler le même nombre de trains voyageurs à la même vitesse ainsi que, à cette même vitesse et à une vitesse moindre, des trains de marchandises moins nombreux, constitués en majorité par des wagons vides qui doivent se réapprovisionner au port de Gênes.

Fig. 1 bis. — PROFIL EN LONG (suite).

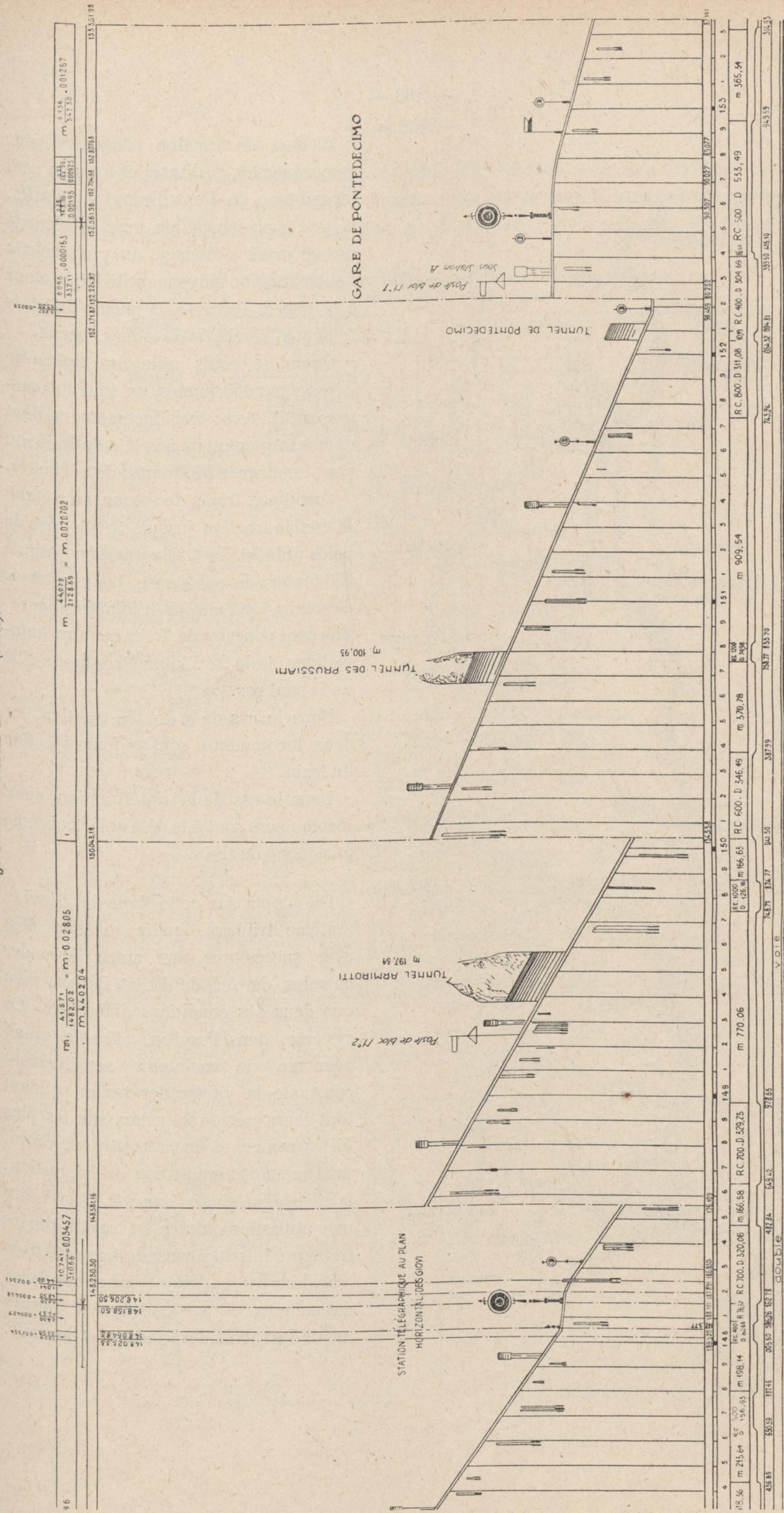
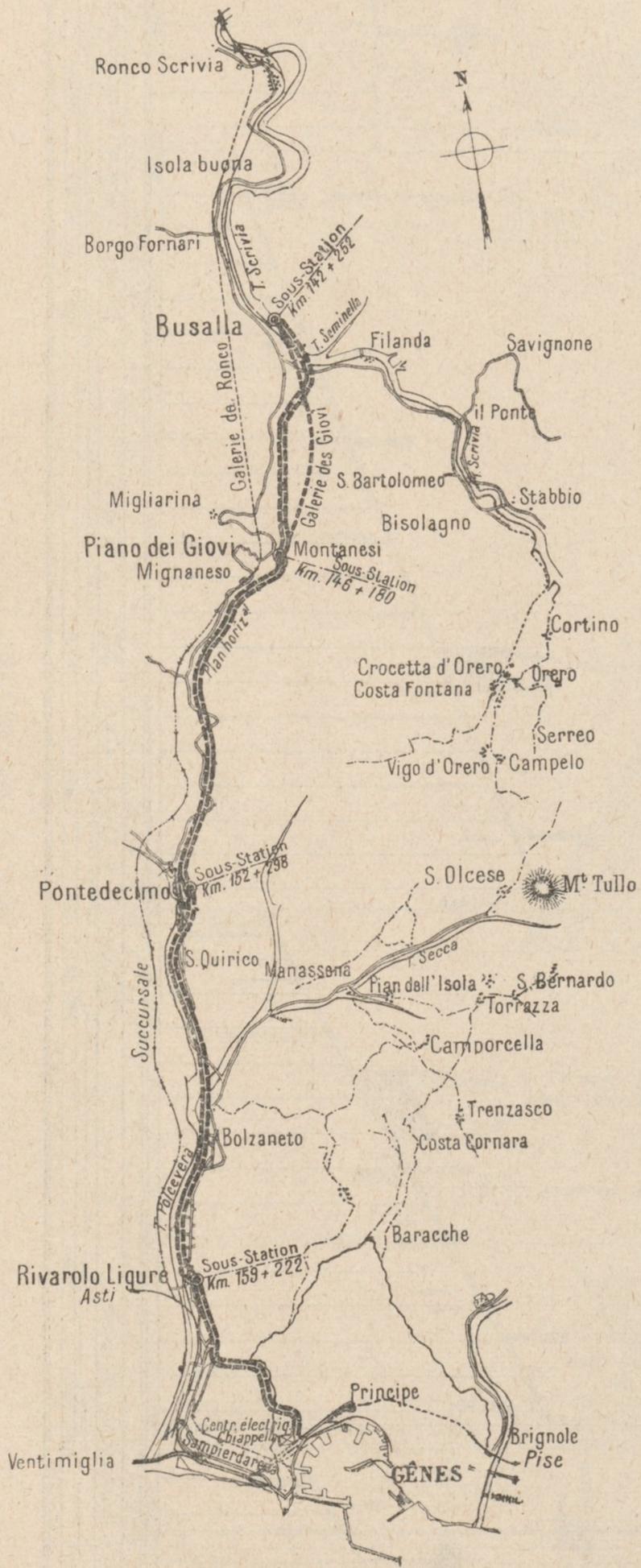


Fig. 2. — TRACÉ.



L'effort de traction nécessaire pour remorquer les susdits trains avec un seul locomoteur de Pontedecimo à Busalla, n'étant pas compatible avec la sécurité des appareils d'attelage, on y a admis la double traction moyennant un locomoteur à la tête et l'autre à la queue, du poids total et adhérent de 60 tonnes chacun.

Quand le poids utile des trains ne dépasse pas 195 tonnes, un seul locomoteur suffit. Avec trois locomoteurs, dont deux à la queue et un à la tête du train, on peut remorquer 540 tonnes de véhicules.

Quant aux trains de retour, on a établi la double traction jusqu'à 380 tonnes de poids utile et la triple traction jusqu'à 650 tonnes de poids utile. Leurs vitesses de régime est de 45 kilomètres-heure, s'ils sont pourvus de frein continu automatique et de 22,5 kilomètres-heure s'ils ne le sont pas.

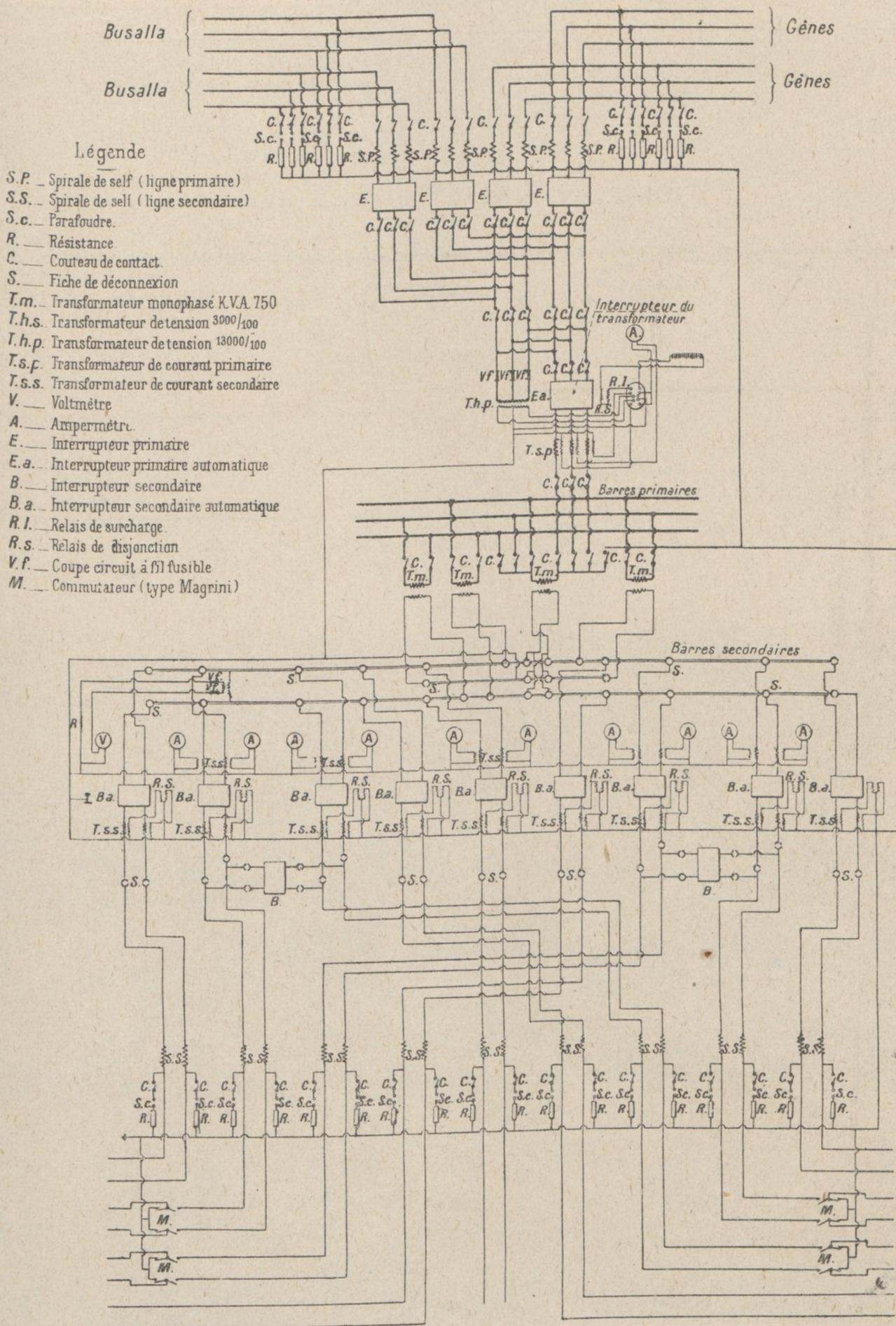
Dans le cas de la double traction, les deux locomoteurs sont toujours à la tête du train.

Dans le cas de la triple traction, deux locomoteurs sont à la tête et le troisième à la queue du train.

On adopta sur cette ligne des Giovi le système triphasé, qu'on exploite déjà avec succès sur une autre ligne des chemins de fer de l'Etat italien, bien que dans des conditions différentes. Ce système, dans l'espèce, offre le grand avantage de maintenir sensiblement constante la vitesse des trains pendant tout leurs parcours, même sur les plus fortes rampes et de permettre en outre, sans aucune complication ou suggestion, la *récupération de l'énergie*, c'est-à-dire une utilisation efficace du travail que les trains produisent, à cause de la gravité, dans leur descente, en évitant l'usage des freins mécaniques et par conséquent l'usure rapide des sabots, des bandages et des rails.

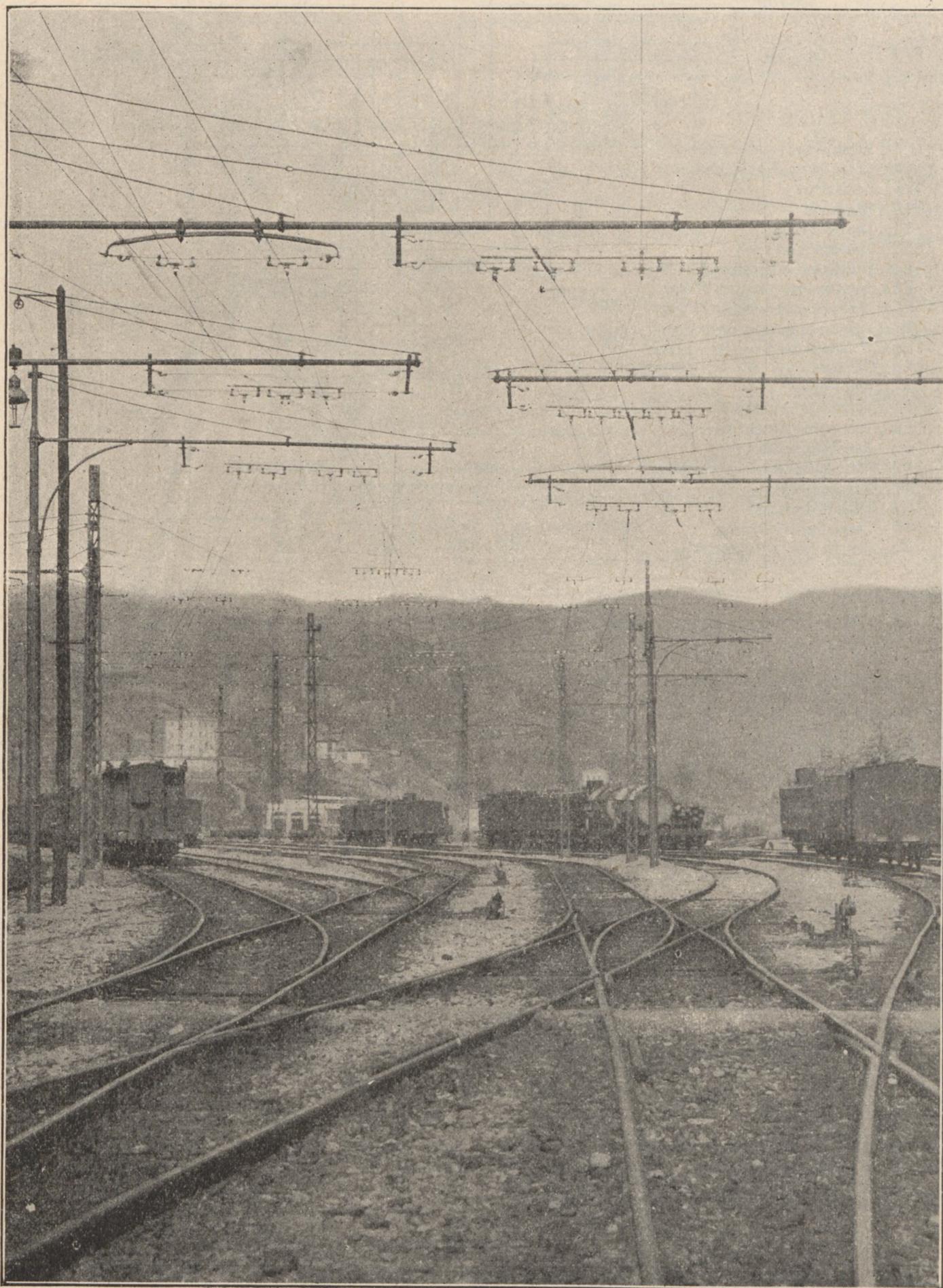
L'usine centrale génératrice de l'énergie électrique (Pl. III et IV et Fig. 2) a été établie à Gênes où il est facile de recevoir directement le combustible par la mer. Elle comprend maintenant deux groupes turbo-alternateurs, dont l'un est de réserve, de la puissance économique de

Fig. 3. — SOUS-STATION DE PONTEDECIMO (Schéma des connexions).



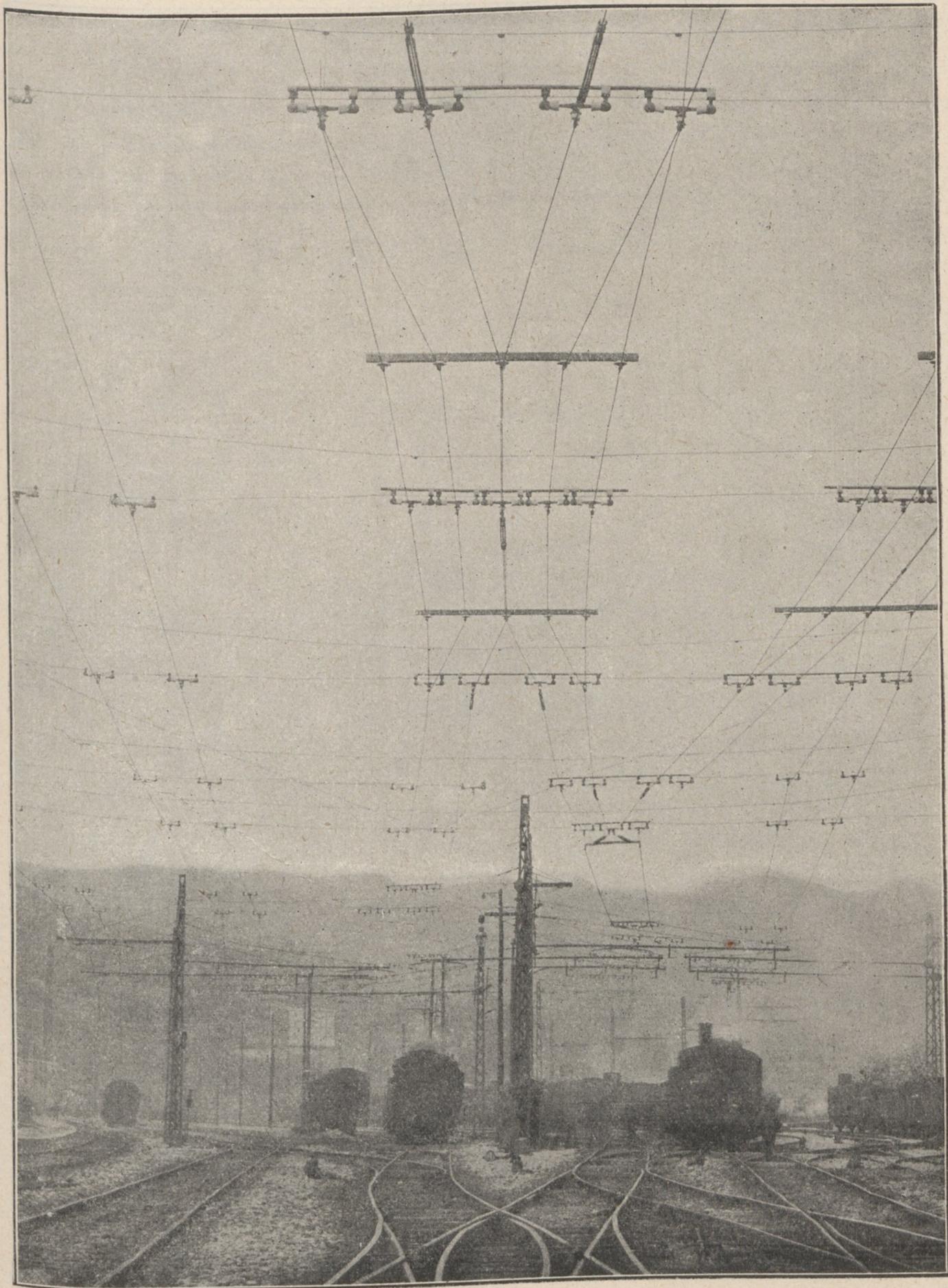
5.000 kilowatts et de celle maxima de 10.000 kilowatts, qui produisent le courant triphasé primaire à la tension composée de 14.000-14.500 volts et à la fréquence de 15 cycles complets à la seconde.

Fig. 4. — DISPOSITION DES CONDUCTEURS AÉRIENS DANS LES BIFURCATIONS ET CROISEMENTS DE LA GARE DE BUSALLA.



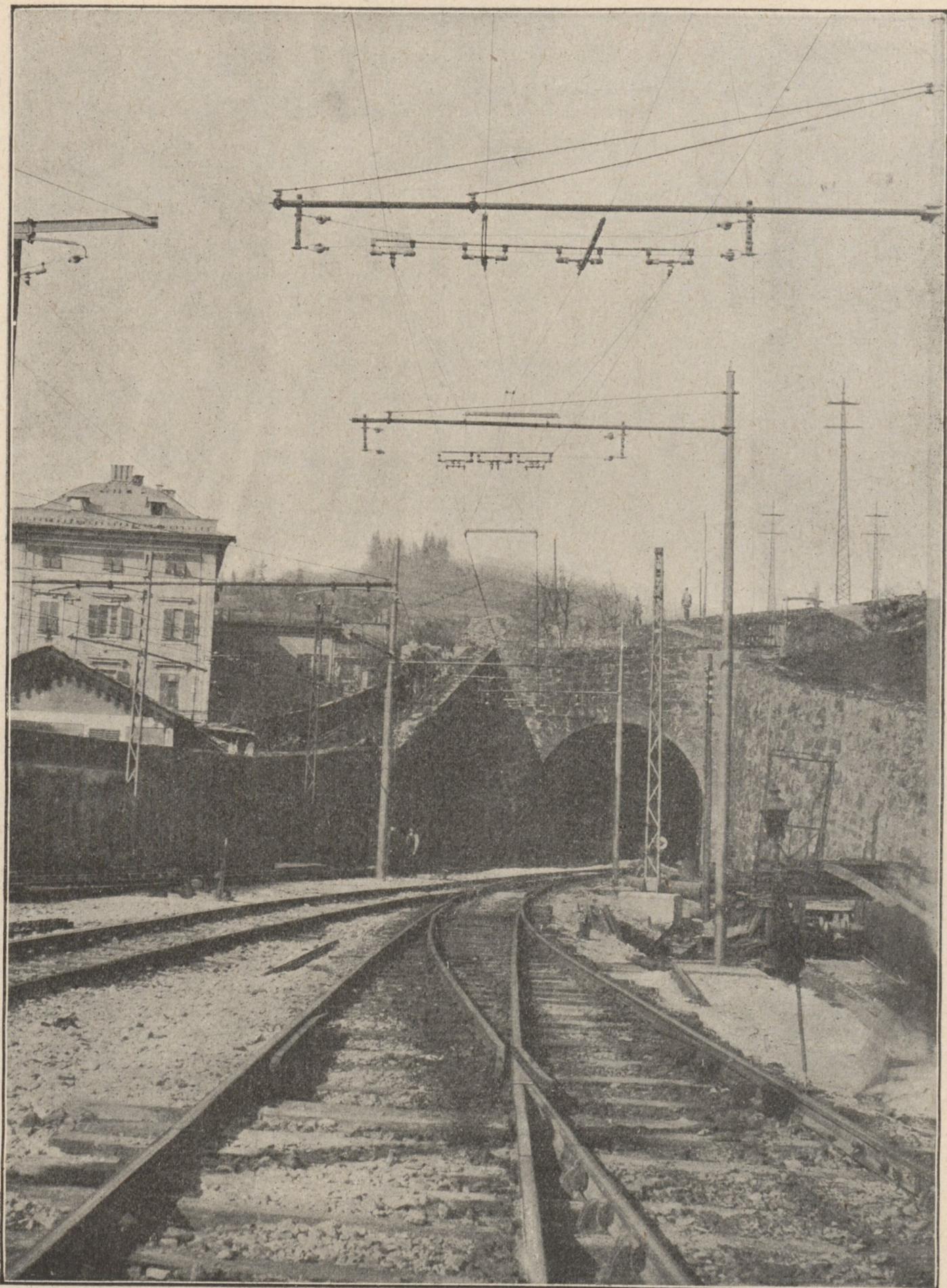
Ces groupes (Pl. IV.) fonctionnent très régulièrement, et grâce au fort entrefer (42^{mm}) entre les rotors et les stators des alternateurs, supportent très bien les à-coups dus aux forts et

Fig. 5. — AIGUILLAGE TRIPLE DANS LA GARE DE BUSALLA.



rapides changements de charge exigés par l'exploitation et peuvent résister aux court-circuits qui quelquefois se produisent accidentellement sur les lignes primaires et secondaires.

Fig. 6. — BIFURCATION DANS LA GARE DE PONTEDECIMO.

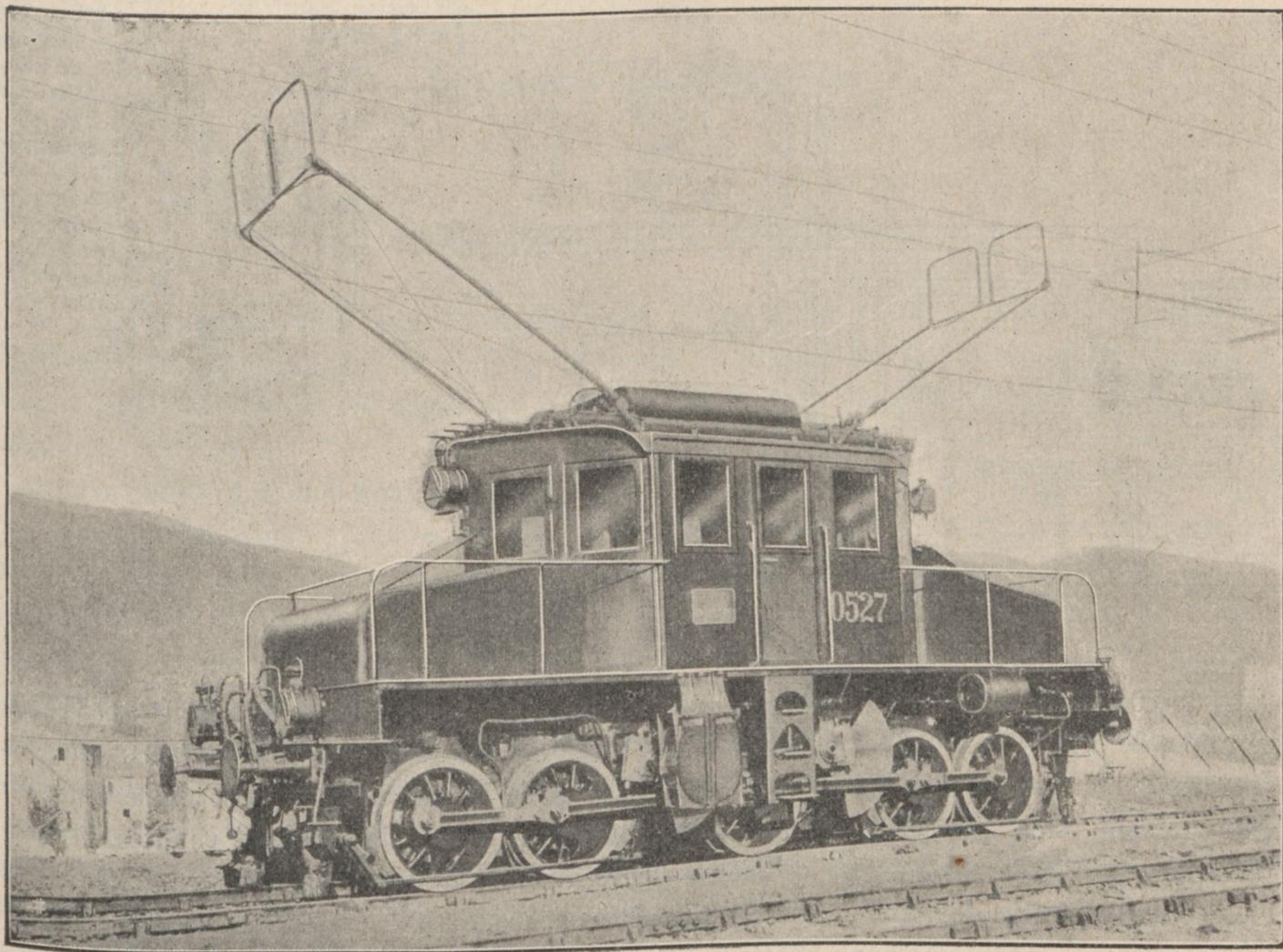


Le courant triphasé primaire fourni par l'usine centrale est envoyé au moyen de deux lignes indépendantes à quatre sous-stations de transformation situées l'une à Busalla, l'autre à Montanesi et la troisième à Pontedecimo (Fig. 3), pour produire dans le circuit secondaire ou de contact avec les locomoteurs, un courant triphasé à la tension composée de 2.700-3000 volts au point de prise des locomoteurs.

Le circuit secondaire est constitué pour chaque voie de quatre fils aériens (deux par phase) et des rails réunis en parallèle (Fig. 4, 5 et 6).

Les locomotives électriques (Pl. V et fig. 7 et 8), sont à cinq essieux moteurs commandés par des bielles et manivelles et sont pourvues de deux moteurs qui peuvent se disposer en cascade et en parallèle. Avec la première disposition, elles marchent à la vitesse synchrone

Fig. 7. — LOCOMOTIVE ÉLECTRIQUE.



de régime de 22,5 kilomètres-heure et avec la seconde, à celle de 45 kilomètres-heure. Toutefois, on emploie la première disposition seulement pour démarrer et afin d'éviter toute chance d'accident pendant la descente de chaque train qui ne peut être commandé par les freins continus à air.

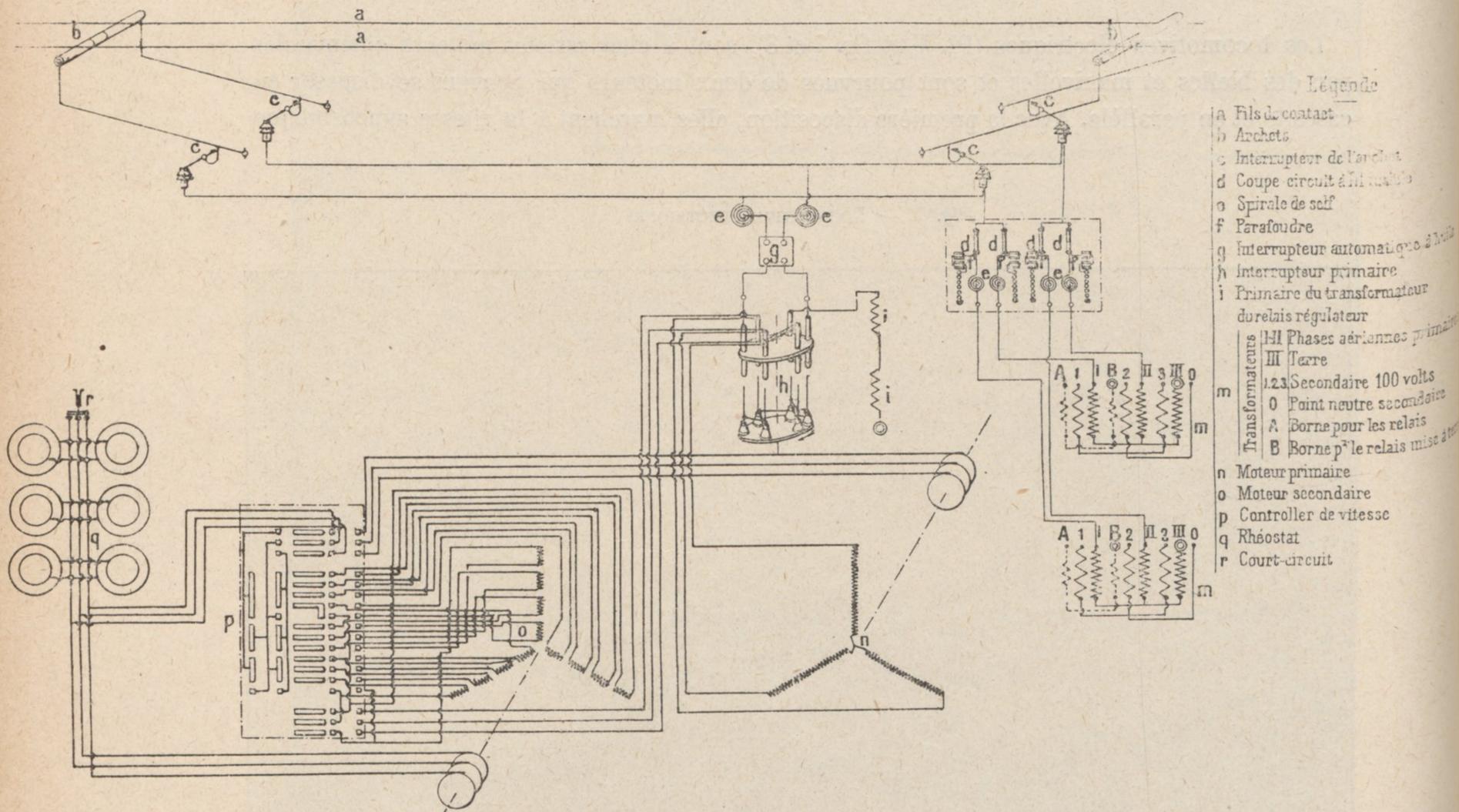
Le démarrage s'obtient en intercalant dans le circuit des rotors un rhéostat liquide.

Après avoir démarré avec la disposition en cascade, de 0 à 22,5 kilomètres-heure, pour passer à la vitesse de 45 kilomètres-heure, on met hors circuit les locomoteurs pendant le temps

nécessaire à établir la disposition en parallèle. Toutefois, il est possible aussi de démarrer directement de 0 à 45 kilomètres-heure.

Ces locomoteurs se sont montrés capables d'un très rude travail ; ayant attelé deux entre eux, choisis au hasard, à un train de 380 tonnes et 21 wagons, ils ont accompli, pendant le

Fig. 8. — SCHÉMA DE TRACTION DES LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES.



délai de 20 heures, 16 courses d'aller à 45 kilomètres-heure et 16 courses de retour avec récupération de l'énergie à 22,5 kilomètres-heure entre Pontedecimo et Busalla, sans que les bobines de leurs moteurs se soient chauffées au-dessus de 70° centigrades sur la température de l'air ambiant, bien que pendant la dernière course, ceux-ci n'aient pas été ventilés. Il est à remarquer que la descente à 22,5 kilomètres-heure a pour résultat de chauffer les moteurs des locomotives bien plus fort que celle à 45 kilomètres-heure.

En outre, un seul locomoteur a effectué, en remorquant un train de 400 tonnes et 22 véhicules dans la gare de Busalla, trente démarrages consécutifs de 0 à 22,5 kilomètres-heure avec des intervalles de deux minutes, sans aucune fatigue et sans se chauffer sensiblement. Le temps employé pour chaque démarrage a été d'une minute, les trente démarrages ayant été exécutés dans une heure et demie. On y a transformé en vapeur 56 kilogrammes de l'eau du rhéostat qui en contenait 600 kilogrammes, et la température des autres 504 kilogrammes s'y est haussée de 34° à 80° centigrades.

L'énergie dépensée dans le rhéostat a été naturellement plus grande que celle de 58.300 calories environ qui correspondent à la vaporisation des 56 kilogrammes d'eau et à l'augmentation de la

température des autres 504 kilogrammes d'eau, attendu qu'une partie, qu'il n'est pas possible de mesurer directement, de la chaleur générée dans le rhéostat s'est transmise par irradiation et convection à l'extérieur. Selon nos calculs, la perte d'énergie dans le rhéostat pendant les trente démarrages a été de 78 kilowatt-heure environ, tandis que le locomoteur en a absorbé 233.

De plus, de longs trains en double traction comprenant 21 wagons, du poids brut de 500 tonnes, ont démarré facilement de 0 à 45 kilomètres-heure sur la rampe du 35 p. ‰, en y employant de 180 à 200 secondes (v. Fig. 9).

Enfin, avec la double traction, on a fait circuler de Pontedecimo à Busalla, à la vitesse synchrone de 45 kilomètres-heure, des trains du poids utile de 450 tonnes.

La puissance des locomotives dont on parle est très élevée, celles-ci pouvant, d'après ce qu'on vient de dire, développer 2.000 chevaux pendant une heure et, pour un bref délai, même 2.600 chevaux au crochet d'attelage.

Leur puissance spécifique, c'est-à-dire celle rapportée à la tonne de leurs poids, est donc de :

$$\frac{2.000}{60} = 33,3 \text{ chevaux pendant une heure}$$

et de :

$$\frac{2.600}{60} = 46,6 \text{ chevaux pendant quelques minutes.}$$

On a pu constater que leur adhérence aussi a une haute valeur ; ils ont développé au démarrage un effort moteur de plus de 12 tonnes à la jante des roues, ce qui correspond à un coefficient d'adhérence supérieur à $1/5$, même quand les rails n'étaient pas dans des conditions favorables.

Dans le cas de la double traction, la charge entre la locomotive de tête et celle de queue se partage automatiquement presque en proportions égales, ainsi que l'indiquent les diagrammes (fig. 10), relevés avec des wattmètres enregistreurs placés sur les locomotives, bien que la commande de l'une ne soit aucunement liée à celle de l'autre. Pour démarrer régulièrement, une simple entente entre les agents chargés de la conduite des deux locomoteurs, suffit comme dans la traction à vapeur.

Aussi, dans le cas de la triple traction avec deux locomoteurs à la queue et un locomoteur à la tête du train, la charge se répartit également sur les trois locomoteurs.

Alors que, à cause de la différente usure, les bandages des locomoteurs attelés à un même train n'auront plus le même diamètre, la répartition de la charge changerait, on pourra la corriger et employer néanmoins la traction multiple en plaçant une résistance convenable dans le circuit des rotors.

L'inspection des diagrammes (Fig 9 et 10) relatifs au démarrage d'un train en simple et en double traction sur la rampe du 35 p. ‰ nous fait voir que les plus grandes valeurs des puissances absorbées par les locomoteurs pendant les démarrages, ne sont pas de beaucoup supérieures à celles des puissances qui correspondent aux marches de régime sur la même rampe, ce qui est très avantageux au point de vue de la puissance à donner à l'usine centrale génératrice de l'énergie.

La consommation de l'énergie pendant le démarrage d'un train en simple traction du poids total de 250 tonnes de 0 à 45 kilomètres-heure sur la rampe du 35 p. ‰ a été de 59,4 kilowatt-

Fig. 9. — DIAGRAMME DE DÉMARRAGE D'UN TRAIN EN SIMPLE TRACTION SUR LA RAMPE DE 35⁰⁰/₁₀₀
 Poids des wagons 190^T
 — du locomoteur 60^T
 Accélération pendant la { 1^{re} phase... 0^m,082 p. seconde.
 2^e phase... 0^m,063 p. seconde.
 Total..... 250^T

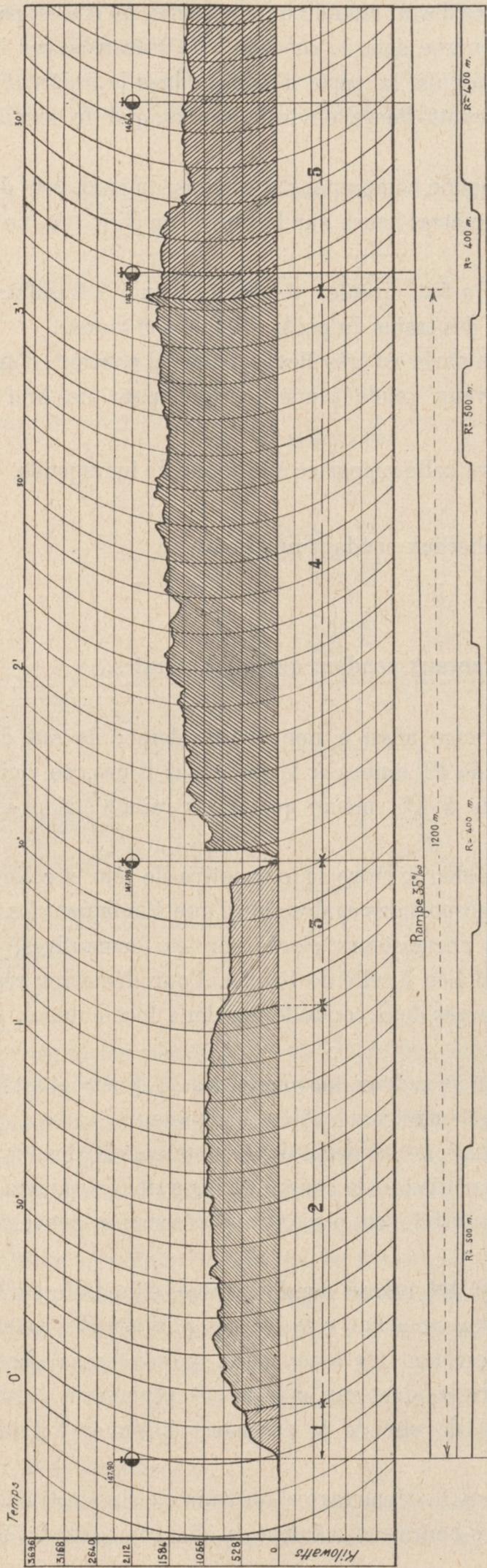
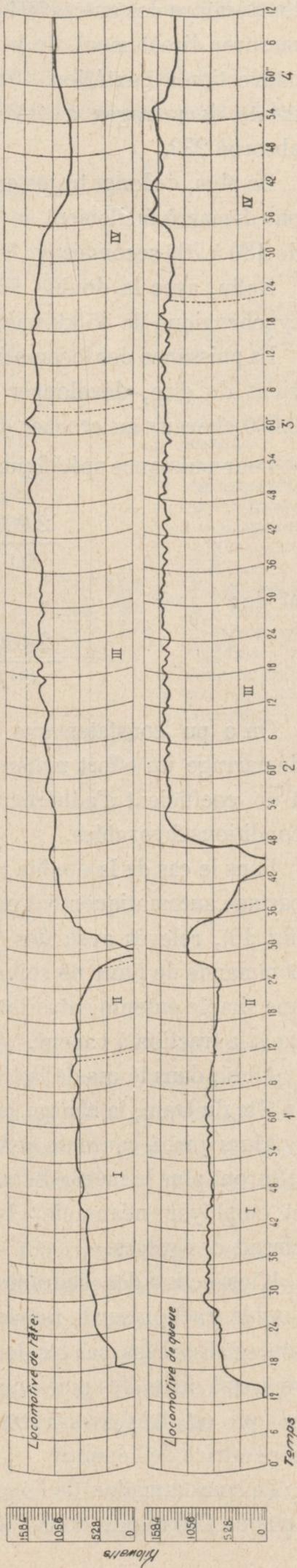


Fig. 10. — DÉMARRAGE EN DOUBLE TRACTION.

Train de 499 tonnes - 16 wagons - 32 essieux - 2 locomotives - démarrage sur le 35⁰⁰/₁₀₀



heures aux archets du locomoteur (fig. 9). De cette énergie, 15,4 kilowatt-heures ont été dissipés dans le rhéostat liquide de la locomotive, en y produisant 13.050 calories, tandis que les autres kilowatt-heures ont été employés en raison de 40 pour faire parcourir au train 1.200 mètres en 195 minutes secondes sur la rampe du 35 p. ‰ et en raison de 6 pour y donner une force vive, partiellement récupérable pendant le parcours après le démarrage.

En démarrant de 0 à 45 kilomètres-heure sur la rampe du 35 p. ‰, un train en double traction du poids total de 499 tonnes avec 16 wagons, a employé 191 secondes et a pris aux archets 44 kilowatt-heures environ pour le locomoteur de tête et 55 kilowatt-heures pour le locomoteur de queue, c'est-à-dire en total 99 kilowatt-heures (Fig. 10). De ceux-ci, presque 30 ont été dissipés dans les rhéostats des locomotives.

En palier rectiligne, le même train démarre de 0 à 45 kilomètres-heure en 40 secondes environ, en parcourant presque 250 mètres et en captant aux archets 22 kilowatt-heures, dont 7 sont transformés en chaleur dans les rhéostats des locomoteurs.

Un train en simple traction du poids total de 250 tonnes emploie pour démarrer en palier de 0 à 45 kilomètres-heure, presque le même temps que le susdit train en double traction, et parcourt environ le même espace en consommant la moitié de l'énergie.

On voit donc que, quel que soit le prix auquel on peut avoir les kilowatt-heures, pour l'exploitation d'une ligne avec la traction électrique, la dépense à laquelle donne lieu la perte rhéostatique d'énergie à cause des démarrages est peu importante.

Il est à remarquer que la consommation de l'énergie électrique au tableau de distribution de l'usine centrale, quand le service des trains est assez intensif (Fig. 11 et 12) est de 584 kilowatt-heures pour chaque train du poids total de 500 tonnes (380 tonnes de wagons et 120 tonnes de locomoteurs) sur le parcours de Pontedecimo à Busalla à la vitesse synchrone de 45 kilomètres-heure.

La différence de niveau entre Pontedecimo et Busalla étant de 270 mètres, on en déduit que le travail théorique correspondant à la remorque d'un tel train entre ces deux points est de

$$270 \times 500.000 = 135.000.000 \text{ kilogrammètres}$$

ou de

$$\frac{135.000.000}{75 \times 1,36 \times 3600} = 340 \text{ kilowatt-heures.}$$

Le rendement du train, c'est-à-dire le rapport du travail correspondant à son effet utile, à la dépense, est donc de :

$$\frac{340}{584} = 58 \text{ p. } \% \text{ environ}$$

Il s'en suit que 42 p. % de l'énergie produite à l'usine centrale est perdue soit dans les lignes primaires et secondaires et dans les transformateurs statistiques, soit dans les moteurs et les rhéostats des locomoteurs, soit enfin à cause de la résistance au roulement du train et de l'action des freins.

Fig. 11. — USINE CENTRALE THERMOÉLECTRIQUE DE GÈNES.

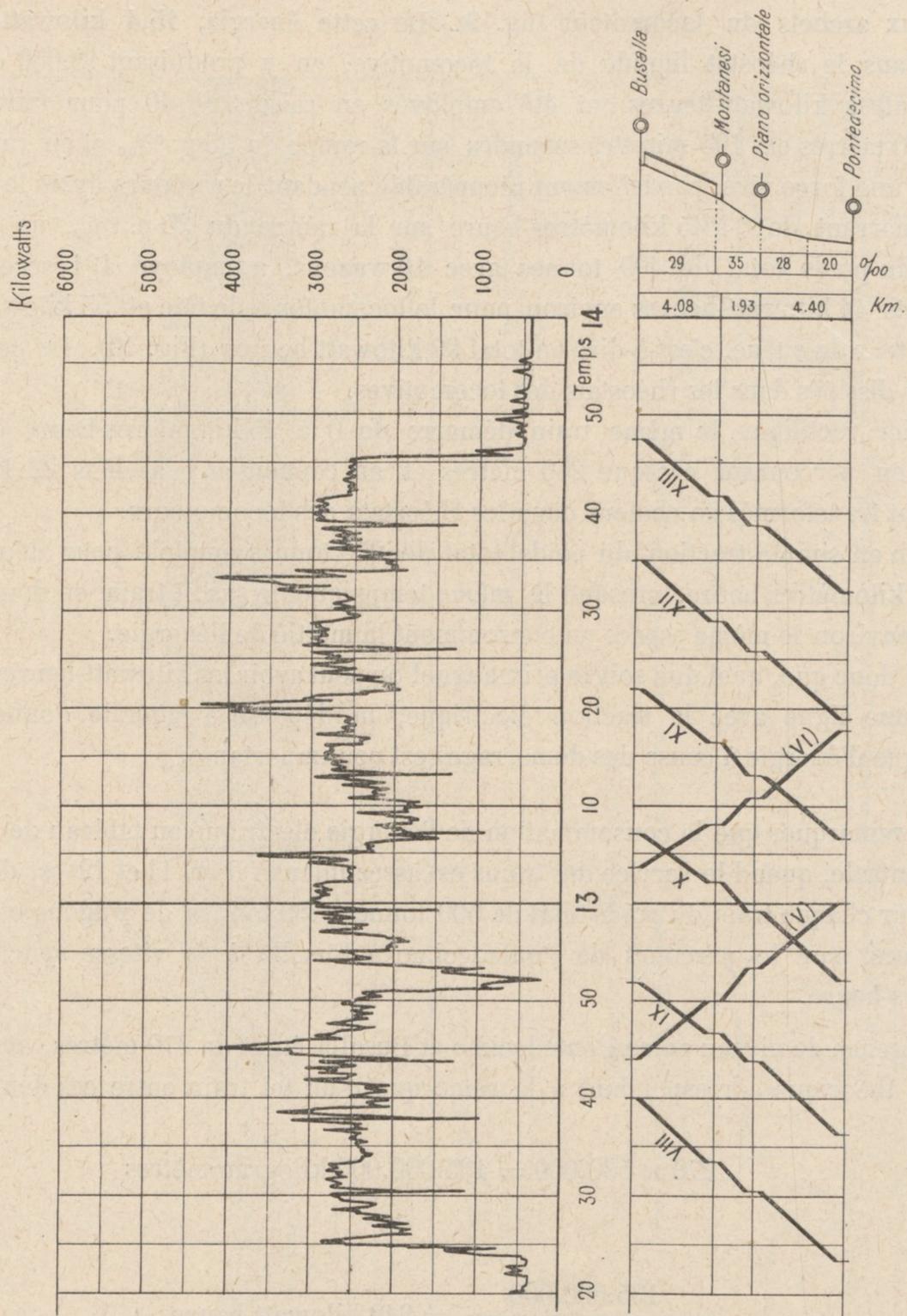
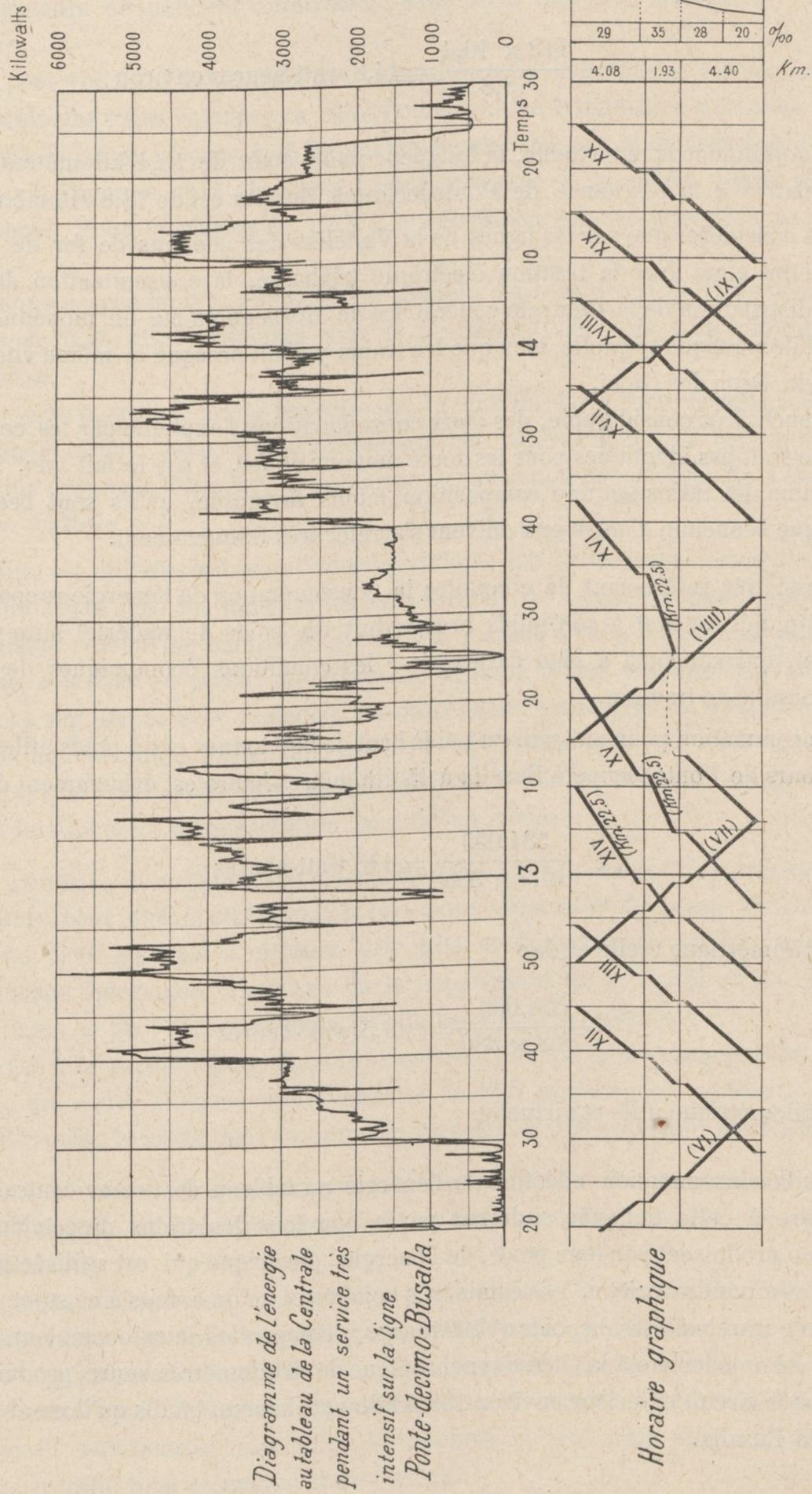


Diagramme de l'énergie ou tableau de la
Centrale pendant un service intensif
sur la ligne Pontedecimo-Busalla

Horaire graphique

Fig. 12. — USINE CENTRALE THERMOÉLECTRIQUE DE GÈNES.



La consommation totale d'énergie est de :

$$\frac{584.000}{10,4 \times 500} = 112 \text{ watt-heures}$$

pour l'unité de trafic, pour la tonne-kilométrique réelle, elle est de :

$$\frac{112 \times 10,4}{78,8} = 14,8 \text{ watt-heures environ}$$

pour la tonne-kilométrique virtuelle, la longueur réelle étant de 10,4 kilomètres, la longueur virtuelle relative à la résistance de Pontedecimo à Busalla est de 78,8 kilomètres.

Or il faut considérer que sur les lignes de la Valteline des chemins de fer de l'Etat italien, exploitées elles aussi avec la traction électrique triphasée, la consommation de l'énergie au tableau de distribution de la Centrale génératrice de Morbegno a été en moyenne de 30 watts par tonne-kilométrique virtuelle, bien que les trains y aient presque la même vitesse moyenne de ceux de la ligne des Giovi.

La différence, très considérable, des deux consommations s'explique par les conditions de la voie, qui ne sont pas identiques pour les deux chemins de fer, et par le fait que, sur les lignes de la Valteline, les trains ont une composition moins favorable, qu'ils sont beaucoup moins lourds, et que beaucoup d'entre-eux doivent s'arrêter très fréquemment.

Il est aussi très intéressant de connaître la consommation de l'énergie rapportée au poids, *utile* du train, qui est égal à son poids brut réduit du poids du matériel auto-moteur. C'est elle en effet, qui concourt à bien caractériser les conditions économiques de l'exploitation propre à l'organe de traction.

Cette consommation pour un train du poids brut de 500 tonnes et du poids utile de 380 tonnes sur le parcours de Pontedecimo à Busalla à 45 kilomètres-heure est évidemment de :

$$\frac{584.000}{10,4 \times 380} = 148 \text{ watt-heures}$$

par tonne-kilométrique réelle et de :

$$\frac{584.000}{78,8 \times 380} = 19,5 \text{ watt-heures}$$

par tonne-kilométrique utile et virtuelle.

Toutefois la consommation effective de l'énergie au tableau de l'usine centrale génératrice est inférieure à celle indiquée ci-dessus parce que tous les trains descendant de Busalla Pontedecimo produisent par leur poids, de l'énergie électrique qui est utilisée plus ou moins bien dans le circuit extérieur. Les essais très nombreux qu'on a faits à ce sujet ont démontré qu'un train de marchandises du poids de 500 tonnes, y compris les deux locomoteurs de tête, allant de Busalla à Pontedecimo à la vitesse synchrone de 45 kilomètres-heure, produit et verse aux archets dans le circuit extérieur environ 188,5 kilowatt-heures, tandis qu'il en absorbe 23,5 au démarrage à Busalla.

Ce sont donc :

$$188,5 - 23,5 = 165 \text{ kilowatt-heures}$$

que ce train donne gratuitement à la ligne.

Les trains voyageurs en donnent relativement plus parce que leur résistance à la circulation est moindre.

En général on peut conclure qu'un train de composition telle que chaque locomoteur doive développer à la jante des roues motrices un effort compris entre 4 tonnes et 8 tonnes pendant le parcours de Busalla à Pontedecimo à 45 kilomètres-heure, donne par différence à la ligne de contact 35 p. % de l'énergie qu'il absorberait pour parcourir à la même vitesse le même trajet en sens inverse. Pour la vitesse de 22,5 kilomètres-heure la récupération se réduit à 30 p. %.

Pour chaque tonne descendante la récupération possible pour les trains de forte composition est en moyenne de 0,35 kilowatt-heures pour la grande vitesse et de 0,28 kilowatt-heures pour la petite vitesse.

L'utilisation de cette énergie gratuite produite par la gravité varie naturellement selon les conditions de l'exploitation ; mais même maintenant que celle-ci n'est pas très intense, elle représente déjà une économie d'environ 15 p. % sur la consommation totale de l'énergie au tableau de l'usine centrale.

L'énergie gratuite est utilisée, soit pour éviter ou réduire les pertes sous forme de chaleur pendant la marche à vide dans les lignes et les sous-stations de transformation statiques, soit pour faire fonctionner comme moteurs, aussi pendant la marche à vide, les groupes générateurs de l'usine centrale, soit enfin en faveur des trains ascendants toutes les fois que ceux-ci se trouvent en marche simultanée avec quelque train descendant. Le surplus est dissipé en chaleur dans un rhéostat liquide automatique dont est pourvue l'usine centrale. Mais même cette énergie dissipée est très avantageuse parce qu'elle concourt à rendre superflu l'usage des freins mécaniques, très funeste pour la conservation du matériel roulant.

L'exploitation exclusive avec la traction électrique de la ligne dont nous nous occupons date de trop peu de temps pour que la statistique puisse nous permettre d'évaluer exactement en argent, l'économie dans les frais d'entretien des rails et du matériel roulant par suite de l'abolition du freinage mécanique, ainsi que de la suppression de la fumée et de la vapeur d'échappement ; mais on peut déjà en déduire qu'elle est très remarquable.

En résumé, grâce à la récupération, la consommation d'énergie pour chaque unité de trafic utile et virtuelle, qui a été indiquée précédemment de 19,5 watt-heures, se trouve réduite à environ 16,8 watt-heures, et on obtient en outre de très importants avantages indirects.

Mais il faut encore remarquer que chaque train descendant de Busalla à Pontedecimo ne coûte rien sous le rapport de l'énergie parce qu'il en donne, comme on a vu, bien plus qu'il n'en prend au démarrage.

Cela signifie que la récupération, qui a déjà produit, dans la proportion indiquée, une économie d'énergie pour les trains circulant de Pontedecimo à Busalla, aura aussi pour résultat de rendre égal à zéro la longueur virtuelle de la même ligne en sens inverse.

On peut donc conclure que la tonne kilométrique utile et virtuelle exige la même consommation d'environ 17 watt-heures, soit qu'on la rapporte au seul trafic total ascendant, soit qu'on la rapporte au trafic total ascendant et descendant.

A présent qu'on connaît quelle est la consommation de l'énergie au tableau de l'usine centrale génératrice pour chaque unité de trafic utile et virtuelle de Pontedecimo à Busalla, consommation qui est influencée aussi par la distance de l'usine centrale aux lieux d'utilisation de l'énergie, par la tension des lignes primaires et par leurs impédances ainsi que par l'impédance des lignes secondaires et par le rendement des sous-stations de transformation, il est tout naturel de se demander, quelle est, pour la même unité de trafic, l'énergie effectivement absorbée aux archets de prise de courant, par les locomoteurs, qui sont caractérisés par la tension de 3.000 — 2.700 volts et la fréquence de 15 périodes complets à la seconde, et par le rhéostat démarreur liquide, afin de se former une idée de leur rendement industriel indépendamment des moyens avec lesquels on leur distribue l'énergie de l'usine centrale génératrice.

C'est pour cela que, en nous servant des indications fournies par les watt-mètres indicateurs placés sur les locomoteurs, nous avons tracé le diagramme démonstratif représenté par la

Fig. 13. — DIAGRAMME DE L'ÉNERGIE D'UN TRAIN SUR LE PARCOURS DE PONTEDECIMO A BUSALLA
Poids du train 500 tonnes (300 tonnes de véhicules et 20 tonnes de locomoteur)
Vitesse synchronique : 45 kilomètres-heure.

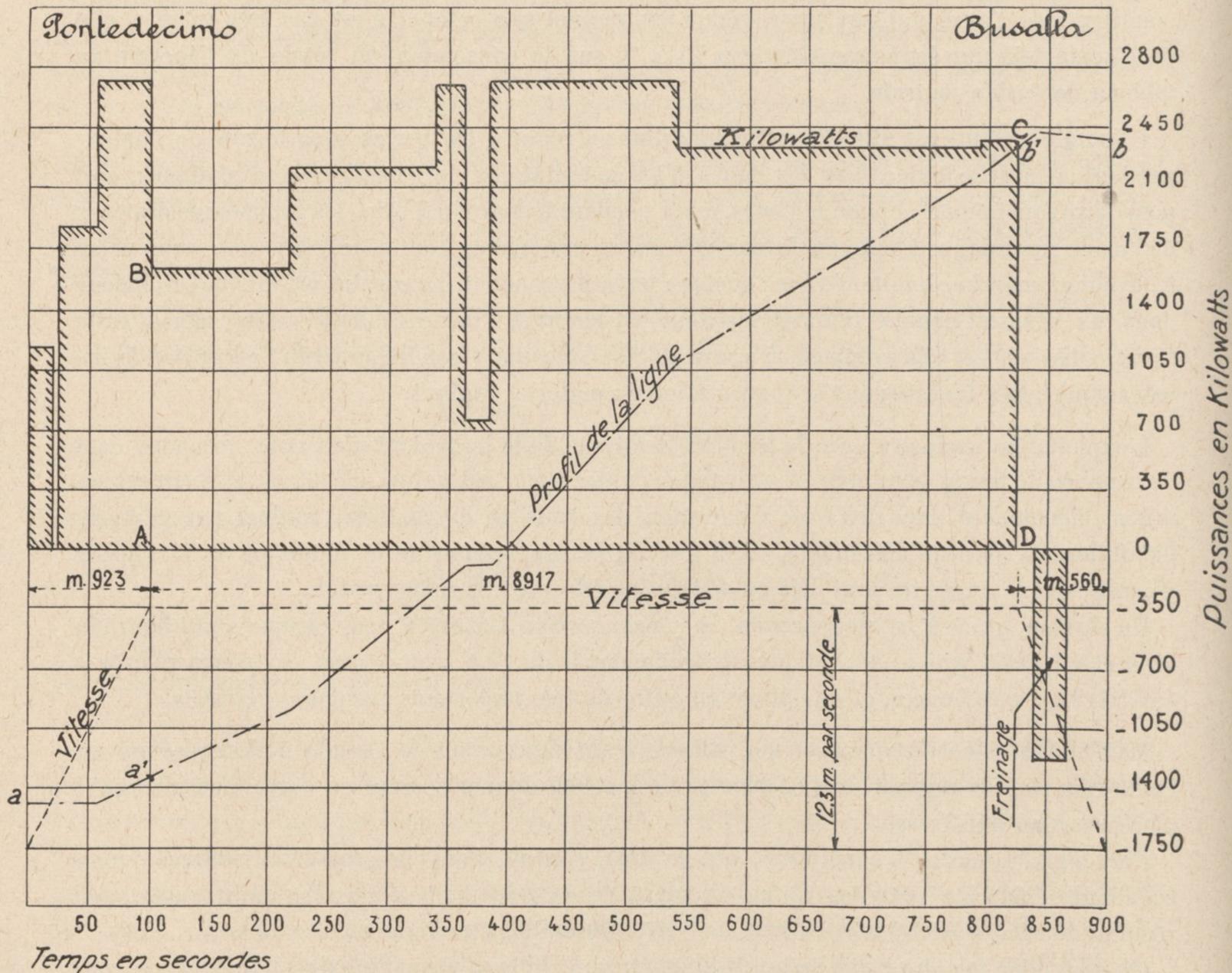


Figure 13, sur laquelle sont indiquées les puissances électriques captées aux archets de contact en correspondance à chaque déclivité de la voie, y compris les résistances opposées par les

courbes, par un train en double traction du poids brut de 500 tonnes pendant un parcours complet, sans arrêts, de Pontedecimo à Busalla, à la vitesse de synchronisme de 45 kilomètres-heure.

Ce diagramme qui nous donne aussi des renseignements sur le démarrage et le freinage, nous montre que le train dans les dites conditions capte à la ligne de contact 470 kilowatt-heures environ.

Il en résulte que la consommation d'énergie aux archets des locomoteurs pour chaque tonne-kilométrique utile et virtuelle est de :

$$\frac{470.000}{380 \times 78,8} = 15,7 \text{ watt-heures ;}$$

dont on déduit que toute l'énergie produite à l'usine centrale

$$\frac{19,5 - 15,7}{19,5} = 19,5 \% \text{ environ}$$

est dépensée soit pendant la marche à vide, soit dans le réseau de distribution jusqu'aux archets des locomoteurs.

Le reste est dépensé dans le travail de propulsion des trains, dans les services auxiliaires des locomoteurs et dans le freinage.

C'est à retenir que des 15,7 watt-heures captés à la ligne de contact par chaque tonne-kilométrique utile et virtuelle, une fraction, plus ou moins grande selon la densité du trafic dans les deux sens, est fournie gratuitement.

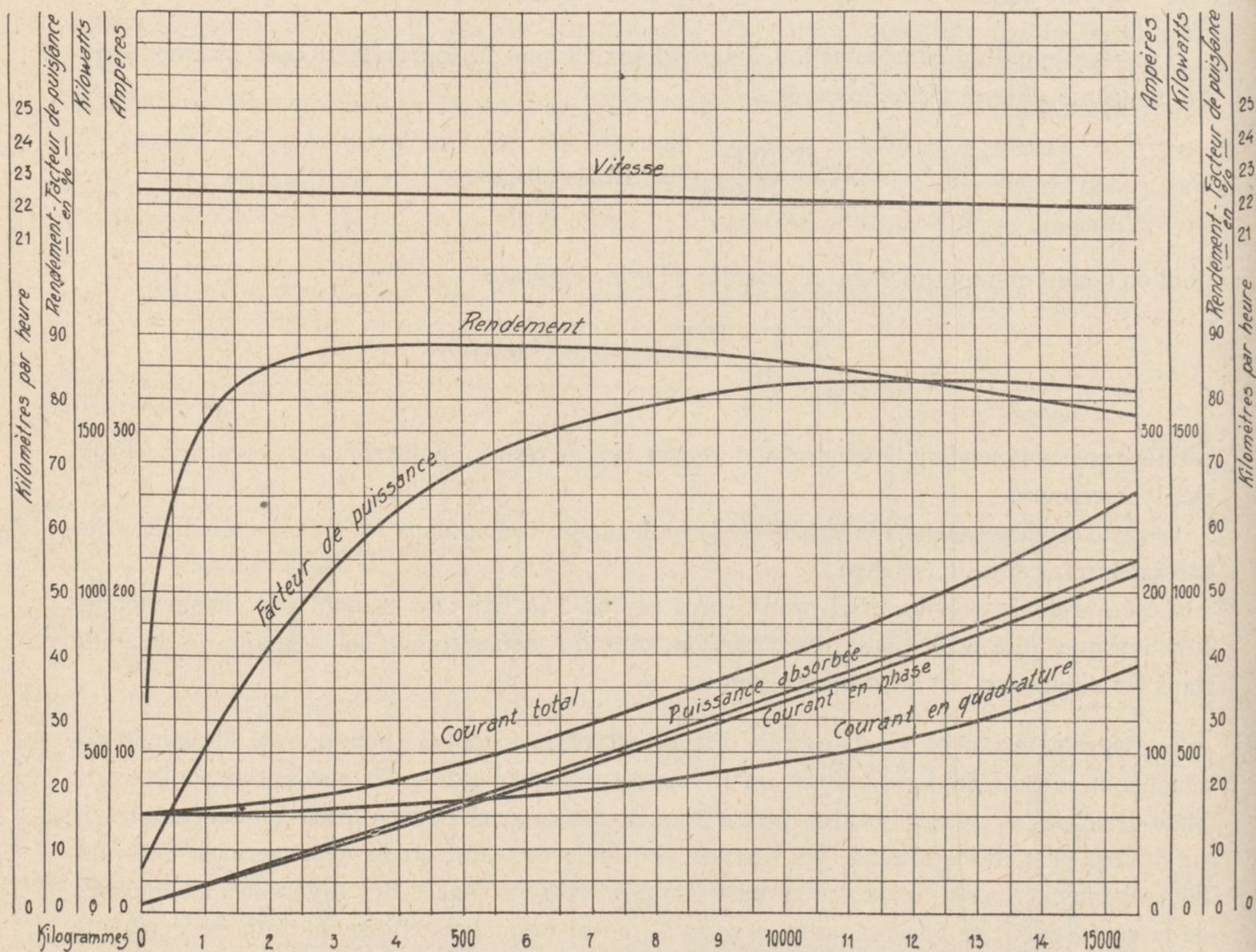
Le diagramme dont on vient de parler (Fig. 13) est très instructif et il nous permet de connaître le rendement effectif des locomoteurs, ou le rapport entre l'énergie qu'ils rendent disponible à la jante des roues et celle qu'ils absorbent à leurs points de contact avec le circuit secondaire. Il suffit à cet effet de déterminer les travaux résistants du train, qu'on exprimera en kilowatt-heures, dans le cas où les locomoteurs ne sont pas actifs, à l'égard des différentes inclinaisons de la voie à partir du point a' jusqu'au point b' , entre lesquels la vitesse du train est constante et égale à 44,3 kilomètres-heure, et les déduire des kilowatt-heures indiquées par le diagramme pour chaque inclinaison de la voie. Les différences rapportées aux secondes représenteraient les puissances dissipées dans les moteurs, disposés en parallèle, dans les organes de transmission du mouvement des moteurs aux essieux accouplés, sous les charges relatives aux pentes indiquées, conjointement à celles utilisées pour les services auxiliaires des locomoteurs. Ces puissances, rapportées aux puissances totales données par le diagramme, exprimeraient les rendements des locomoteurs au crochet d'attelage.

Mais en considérant que pendant le parcours de a' à b' , seulement pour un très petit trajet, les moteurs sont sujets à une faible charge, et que leurs autres charges ont des valeurs auxquelles correspond le même rendement, ce qui se déduit des caractéristiques des moteurs (Fig. 14 à 17), on peut rapidement déterminer la valeur suffisamment exacte du rendement des locomoteurs en divisant les kilowatt-heures correspondants au travail résistant total du train relatif au passage de a' à b' à la vitesse de 44,5 kilomètres-heure, par l'énergie électrique représentée par la surface du diagramme A B C D. (Fig. 13).

Des essais assez nombreux ont démontré que la résistance spécifique globale du train à la

circulation est de 3,86 kilogrammes, quand les moteurs ne fonctionnent pas et que le susdit rapport est de 92 % environ, c'est à dire que le rendement de chaque locomotive est de 92 %.

Fig. 14. — CARACTÉRISTIQUE DES DEUX MOTEURS EN CASCADE D'UNE LOCOMOTIVE (moteurs fonctionnant réellement comme moteurs).



Le rendement des moteurs en dérivation dans les mêmes conditions de charge, selon leurs caractéristiques, étant en moyenne de 0,95 %, on en déduit que 3 % de l'énergie captée par le train est employée soit pour faire marcher sous charge et non à vide les bielles d'accouplement des moteurs aux essieux, soit dans les services auxiliaires des locomotives.

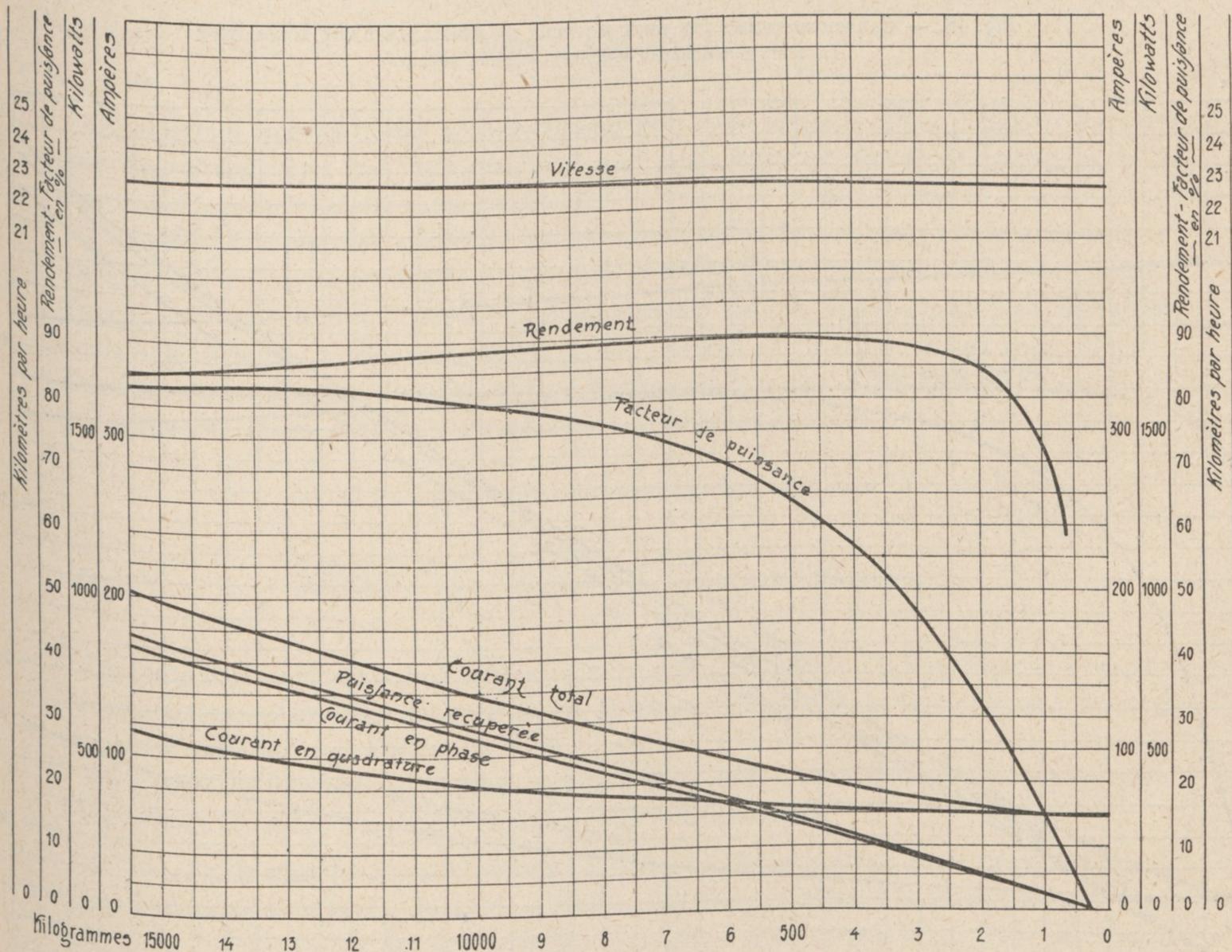
Réciproquement le même diagramme donne la possibilité de trouver la résistance à la circulation du train, y compris celle opposée par les bielles quand elles transmettent les efforts des moteurs aux essieux des locomotives, ce que ne peuvent donner ni le wagon dynamomètre, ni l'ergomètre.

Pour cela il faut déduire de la surface du diagramme (fig. 13) comprise entre les ordonnées AB et CD, celle qui représente l'énergie dissipée à raison de 5 % dans les moteurs ainsi que celle dépensée pour les services auxiliaires des locomotives, c'est-à-dire pour comprimer l'air nécessaire à la commande des appareils de manœuvre, de sécurité et de signalisation, ainsi qu'au

freinage, pour le fonctionnement des ventilateurs rafraîchissants des moteurs et pour l'éclairage.

Il faut en outre déterminer la déclivité moyenne, y compris celle qui exprime la résistance des courbes les points *a'* et *b'* du profil de la ligne. Cette déclivité est de 28,96‰.

Fig. 15. — CARACTÉRISTIQUES DES DEUX MOTEURS EN CASCADE D'UNE LOCOMOTIVE (moteurs fonctionnant comme générateurs).



Le même diagramme montre que sur le parcours de *a'* jusqu'à *b'*, le train a capté à la ligne de contact 422,8 kilowatt-heures, dont 399,6 ont été dépensées dans le travail mécanique, la traction proprement dite, en y employant 725 secondes. En appelant R la résistance spécifique en kilogrammes à la circulation du train, on peut établir la relation suivante :

$$500 (R + 28,96) \frac{44.300}{3600} 725 = 399,6 \times 75 \times 1,36 \times 3600 ;$$

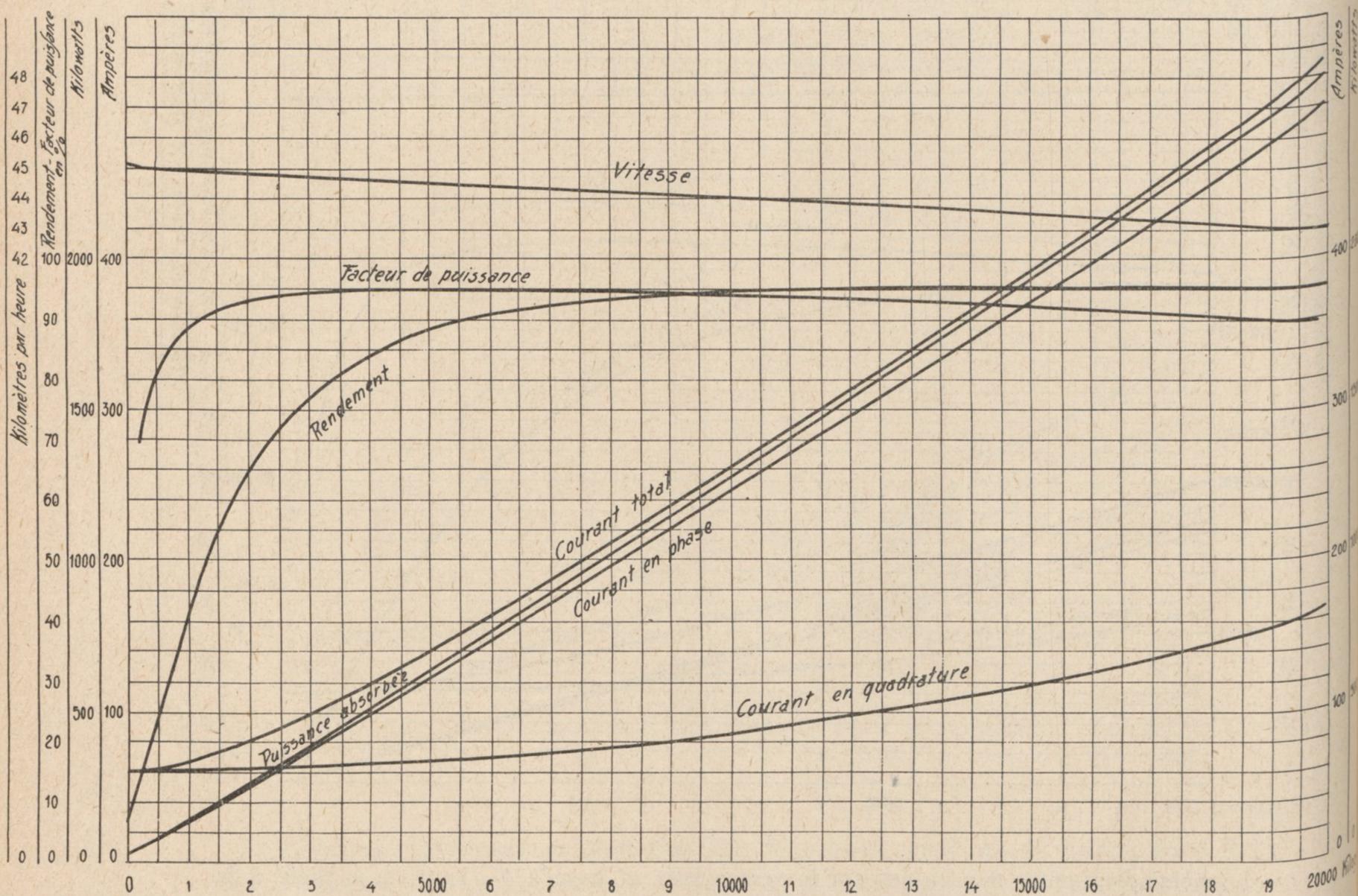
de laquelle on déduit $R = 3,95$ kilogrammes environ.

Ce résultat ne surprend pas quand on considère que le train en double traction auquel il se rapporte, était constitué par des wagons fermés, complètement chargés et tout à fait identiques.

Nous ajoutons qu'un train de 156,5, tonnes de wagons fermés et complètement chargés, remorqué par une des susdites locomotives électriques à la vitesse synchronique de 45 kilomètres-heure, a présenté pendant un parcours de 1.050 mètres la résistance globale (train et locomotive active) de 4 kilogrammes par tonne.

Avec l'aide du même diagramme on peut aussi déduire la longueur virtuelle, au point de vue de la résistance ou du travail mécanique, de la ligne de Pontedecimo à Busalla.

Fig. 16. — CARACTÉRISTIQUES DES DEUX MOTEURS EN PARALLÈLE D'UNE LOCOMOTIVE (moteurs fonctionnant réellement comme moteurs).



On sait en effet que la résistance spécifique globale, avec locomotives actives, à la circulation des trains électriques de composition normale (380 tonnes de véhicules et 120 tonnes de locomotives) entre a' et b' à la vitesse synchronique de 45 kilomètres-heure est de 3,95 kilogrammes, tandis que leur résistance spécifique totale dans la direction de a' envers b' est de

$$28,96 + 3,95 = 32,91 \text{ kilogrammes.}$$

En augmentant ces deux résistances unitaires de la résistance qui correspond à la consommation d'énergie pour les services auxiliaires des locomoteurs, on obtiendra les valeurs de

5,97 kilogrammes et de 33,07 kilogrammes qui, dans leur rapport $\frac{33,07}{3,97} = 8,55$, exprimeront le coefficient avec lequel il faudrait multiplier la longueur effective de la ligne a' à b' pour obtenir la longueur d'un chemin idéal horizontal et rectiligne équivalente à la ligne $a' b'$ relativement à la dépense de l'énergie, en admettant que le rendement des moteurs des locomotives soit le même dans les deux cas.

La longueur virtuelle entre a' et b' sera donc égale à

$$8,917 \times 8,32 = 74,2.$$

En admettant que les trains parcourent sur cette ligne idéale la même longueur de 560^m avant de s'arrêter après que les locomotives sont mises hors circuit, il ne reste plus qu'à trouver la longueur virtuelle entre a et a' .

A cet effet il faut rappeler, ce qu'on a dit auparavant, qu'un train de composition normale pour démarrer sur un chemin horizontal et rectiligne de 0 à 45 kilomètres-heure capte aux conducteurs de contact 22 kilowatt-heures en parcourant 250 mètres. Mais comme pour démarrer sur la voie réelle de Pontedecimo et se porter jusqu'au point a' , ce même train absorbe 47,2 kilowatt-heures, on déduit que, en ligne horizontale et droite, il pourrait parcourir outre les susdits 250 mètres, ceux qui correspondent à la consommation de

$$47,2 - 22 = 25,2 \text{ kilowatt-heures, c'est-à-dire}$$

$$\frac{0,95 \times 25,2 \times 1,36 \times 75 \times 3.600}{500 \times 3,97} = 4.428,32 \text{ mètres.}$$

On peut donc conclure que la longueur virtuelle entre Pontedecimo et Busalla, sous le rapport des résistances, est de 78,84 kilomètres. La longueur virtuelle de la ligne en sens inverse, comme on a dit, est égale à zéro.

On a cru utile de mettre en évidence la signification de la longueur virtuelle dont on a fait usage afin qu'on puisse l'appliquer et l'interpréter judicieusement.

On a vu que la consommation de l'énergie électrique à l'usine centrale génératrice par chaque tonne kilométrique utile et virtuelle dans les deux sens est d'environ 17 kilowatt-heures. Mais quel est le prix de revient de cette énergie? A ce sujet nous dirons avant tout que l'usine centrale a coûté 1.200.000 francs pour les bâtiments et francs 2.000.000 pour la batterie des chaudières à vapeur, les 2 groupes turbo-alternateurs, les condenseurs, un groupe auxiliaire d'excitation, les tableaux de distribution, etc. Mais cette usine centrale peut alimenter bien d'autres lignes que celle des Giovi. En effet, elle peut donner à son tableau des pointes de 10.000 kilowatts, tandis qu'au Giovi, avec la plus grande densité de trafic admissible, les pointes ne dépassent pas 5.500 kilowatts au susdit tableau (Fig. 11 et 12).

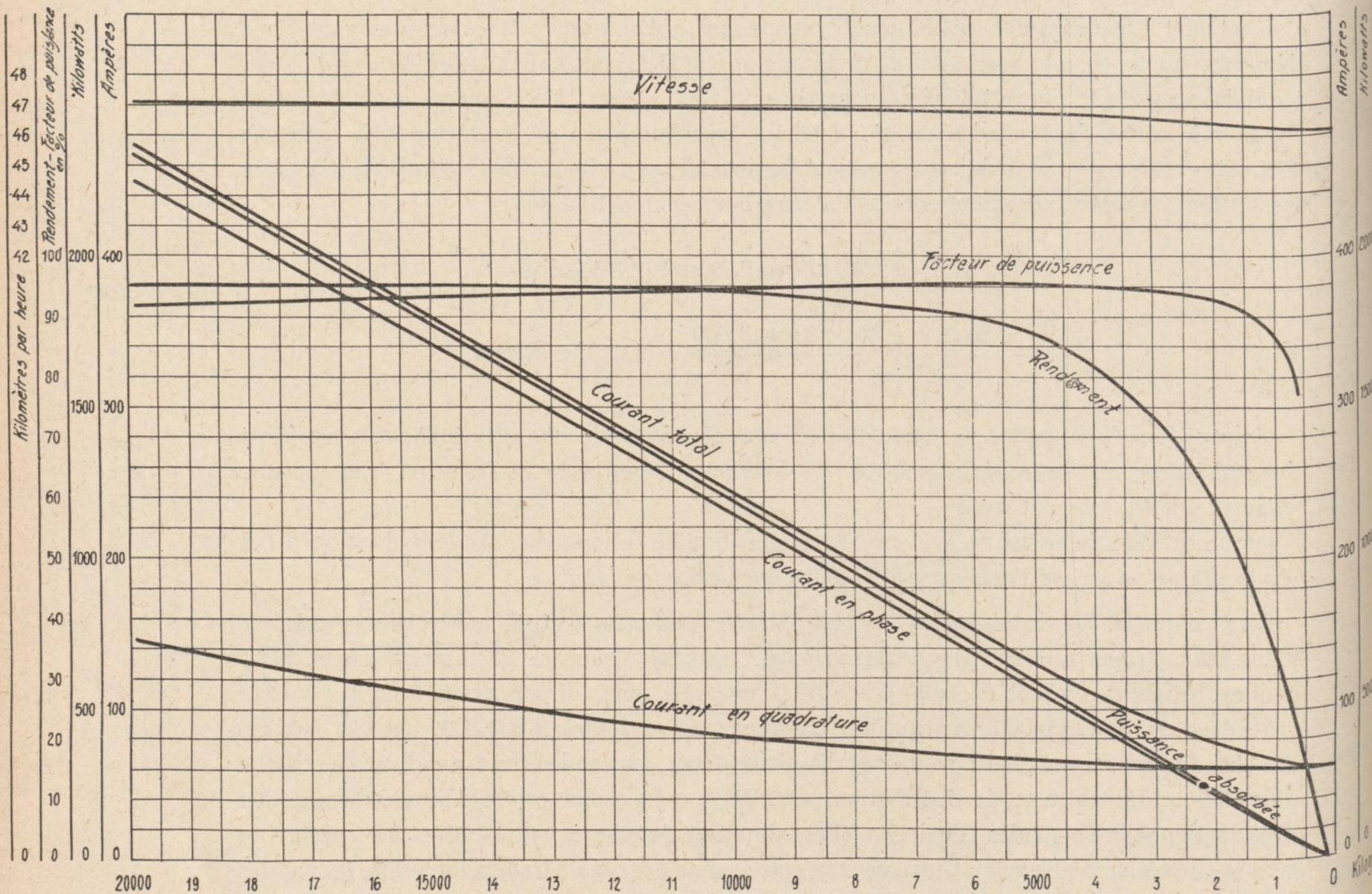
De plus on peut y placer d'autres batteries de chaudières et d'autres groupes turbo-alternateurs de manière à doubler sa puissance sans accroître proportionnellement les frais d'installation. Enfin, l'Administration des Chemins de fer de l'Etat italien a stipulé des marchés par lesquels elle pourra avoir prochainement l'énergie électrique produite par des chutes d'eau à un prix variable, selon l'importance de la consommation et qu'en moyenne on peut évaluer à 4 centimes le kilowatt-heure au tableau de l'usine centrale thermo-électrique de Gênes. En y

ajoutant les frais dépendants de cette usine qui jouera le rôle de réserve et d'intégrateur, le prix du kilowatt-heure sera d'environ 5 centimes.

Il n'est pas encore possible de dire quel sera exactement la dépense globale de traction pour l'unité de trafic utile et virtuelle.

Pour la calculer, il faut ajouter au coût de l'énergie, la dépense pour l'amortissement et l'entretien des lignes primaires et secondaires, des sous-stations de transformation et du matériel automoteur, ainsi que les frais pour le personnel de traction. Or les lignes primaires et secondaires et les sous-stations de transformation ont coûté 2.300.000 francs, et les locomoteurs (au nombre de 15) 2.100.000 francs.

Fig. 17. — CARACTÉRISTIQUES DES DEUX MOTEURS EN PARALLÈLE D'UNE LOCOMOTIVE (moteurs fonctionnant comme générateurs).



D'après ces renseignements, pour un mouvement journalier de 21.840 tonnes utiles ascendantes et de 11.000 tonnes descendantes, avec l'expérience acquise dans l'exploitation des deux autres chemins de fer électriques de l'État italien, on peut conclure que les frais de traction de la tonne-kilométrique utile et virtuelle sur la ligne Pontedecimo-Busalla sera, tout compris, de 0 fr 006 environ.

L'électrification de la ligne de Busalla à Pontedecimo, que nous avons traitée ici en vue du caractère tout à fait spécial de cette ligne, a été bientôt suivie par celle de la ligne qui relie Pontedecimo à la Gare de triage du Campasso, où on forme des trains de marchandises avec les wagons provenant du port de Gênes. Maintenant, les trains de marchandises vont directement, avec la traction électrique, dans les deux sens, de Campasso à Busalla. En outre, l'électrification du tronçon de Pontedecimo à Sampierdarena est presque achevée, on l'étendra jusqu'à la Gare de Gênes-Principe, il sera spécialement utilisé par les trains de voyageurs. En vue des avantages que la traction électrique apporte à l'exploitation des tunnels, on a aussi décidé d'électrifier très prochainement la ligne succursale des Giovi qui passe dans un tunnel de 8 kilomètres de longueur, et en suite la ligne de Gênes à Spezia où les tunnels, s'ils ne sont pas très longs, sont très nombreux et assujettissants.

Ajoutons que les installations pour l'exploitation à traction électrique du tunnel du Mont-Cenis sont presque achevées et que dans quelques mois, celle-ci se substituera à la traction à vapeur, qui à cause de l'augmentation du trafic, est devenue gênante et même dangereuse. Elles seront rapidement prolongées jusqu'à Bussoleno pour accroître la capacité de la ligne, en particulier sur le tronçon de Solbertrand à Bussoleno qui est à simple voie et présente la déclivité de 27 à 30 p. ‰.

De plus la ligne de Lecco à Milan est en cours d'électrification et on y verra bientôt circuler des trains très rapides qui faciliteront les communications entre la capitale de la Lombardie et la Valteline.

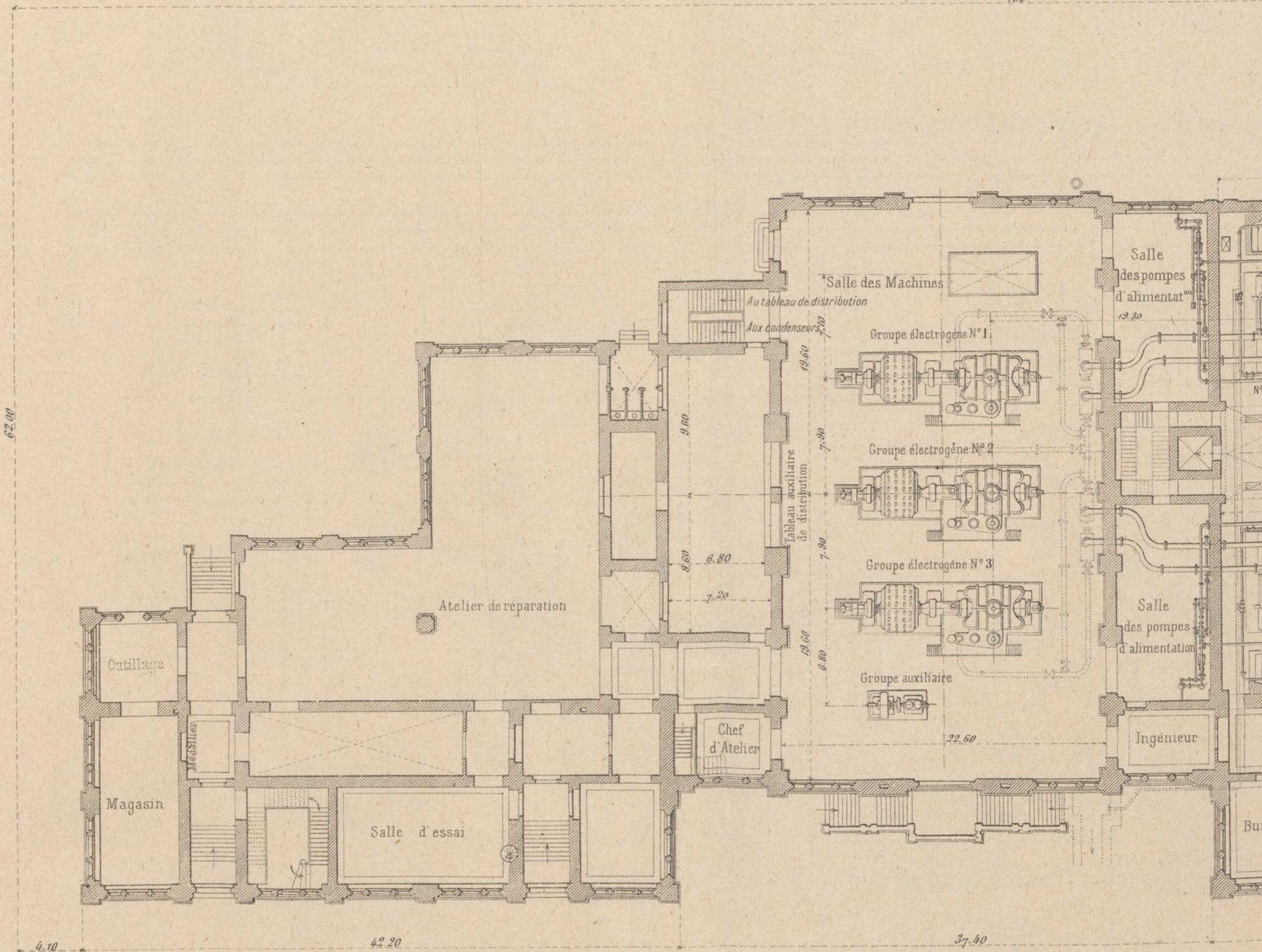
Enfin, on électrifiera dans deux années la ligne de Turin à Pignerol, afin que cette dernière ville puisse devenir, comme elle en a toutes les qualités requises, une villégiature de la première.

Les résultats très satisfaisants, à tout point de vue, de l'exploitation à traction électrique de la ligne des Giovi, nous donnent l'assurance que l'électrification ne tardera pas à s'étendre à bien d'autres lignes à trafic très intense, et que les grandes vitesses, que désormais l'électro-traction a rendues possibles sur les fortes rampes, ainsi que la récupération de l'énergie, qu'on obtient comme avec une corde invisible qui relierait les trains ascendants avec ceux descendants, ouvriront même un nouvel horizon à la conception des grands chemins de fer de montagne.

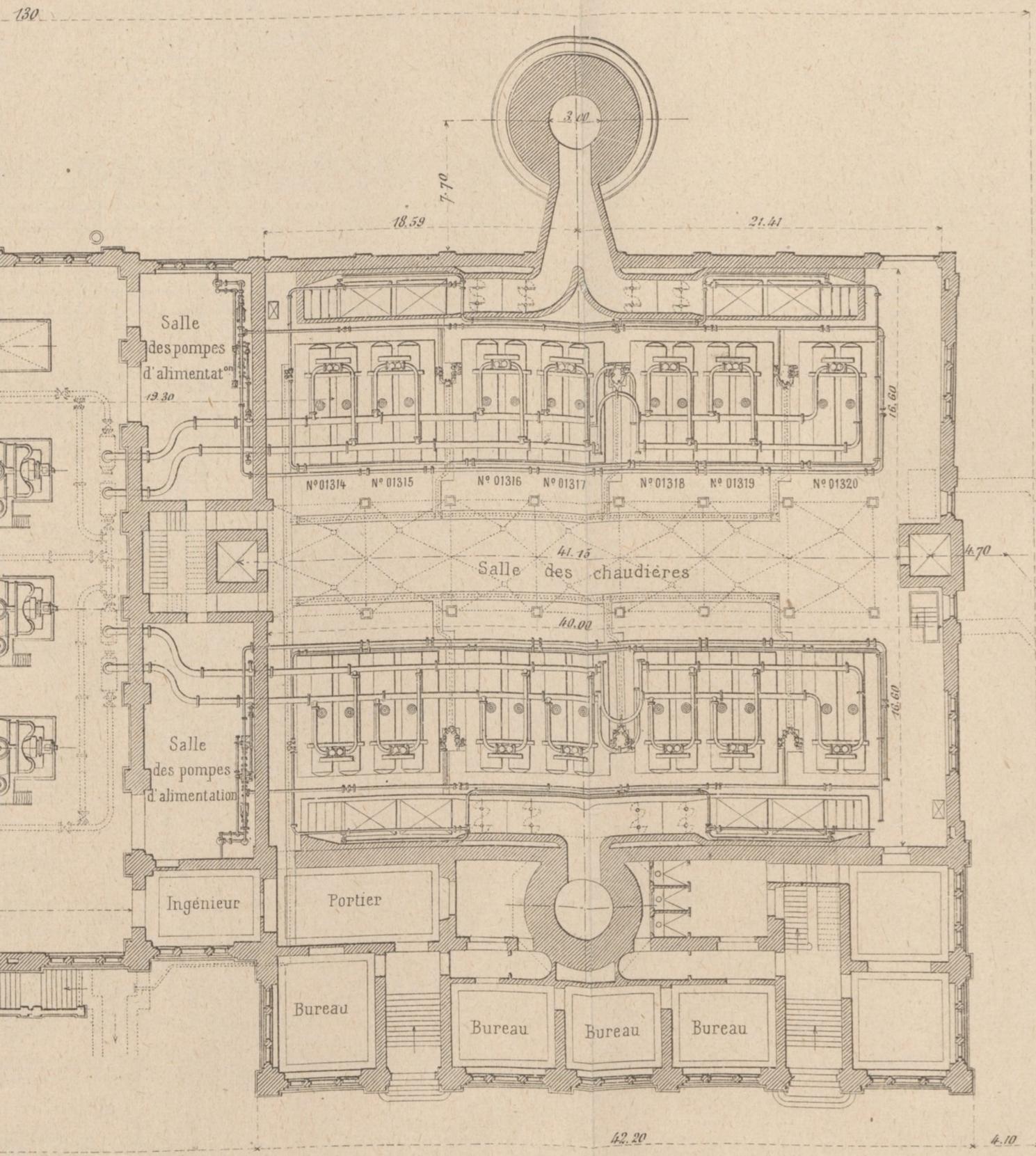
USINE CENTRALE DE GÈNES

Plan

130

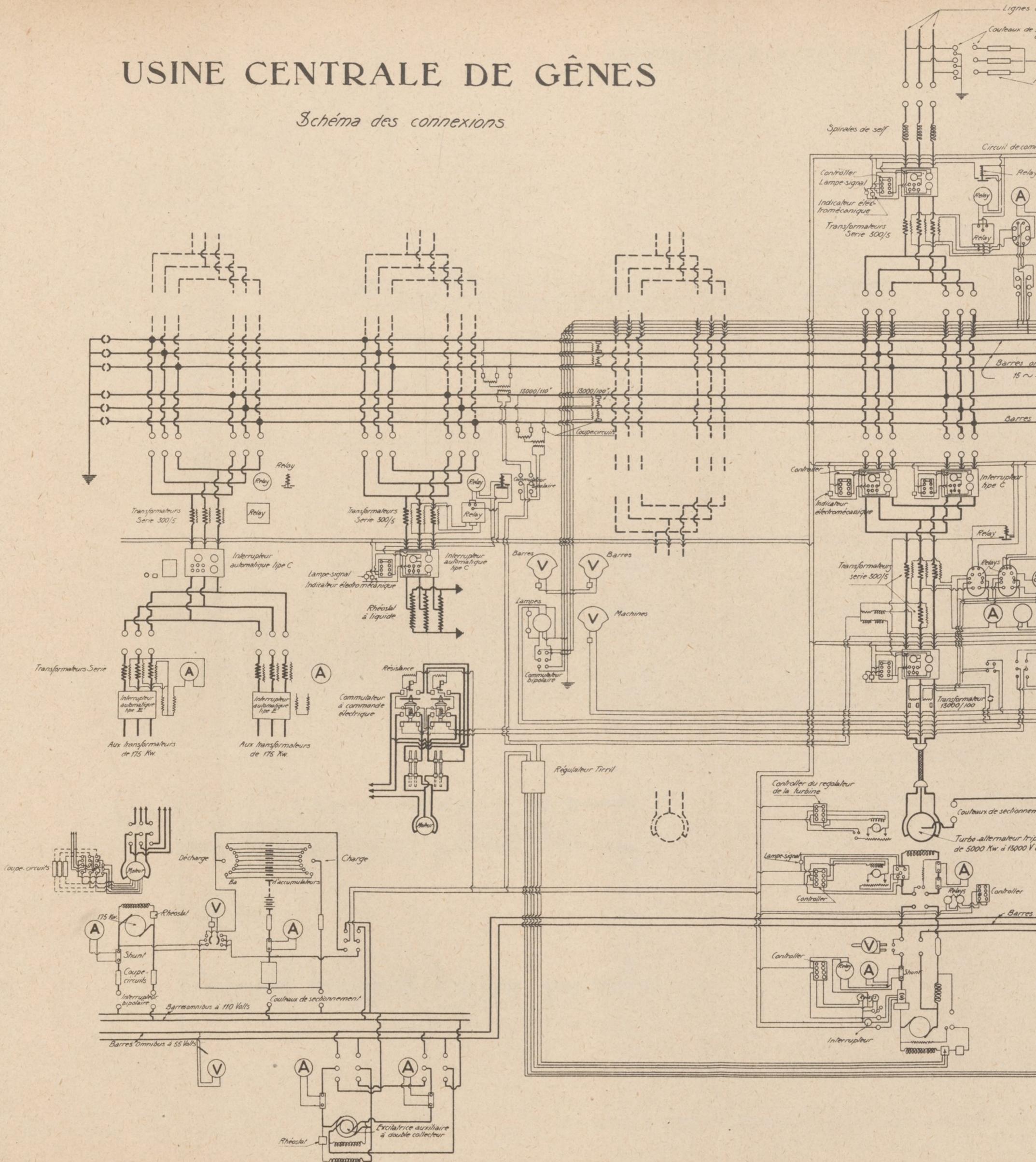


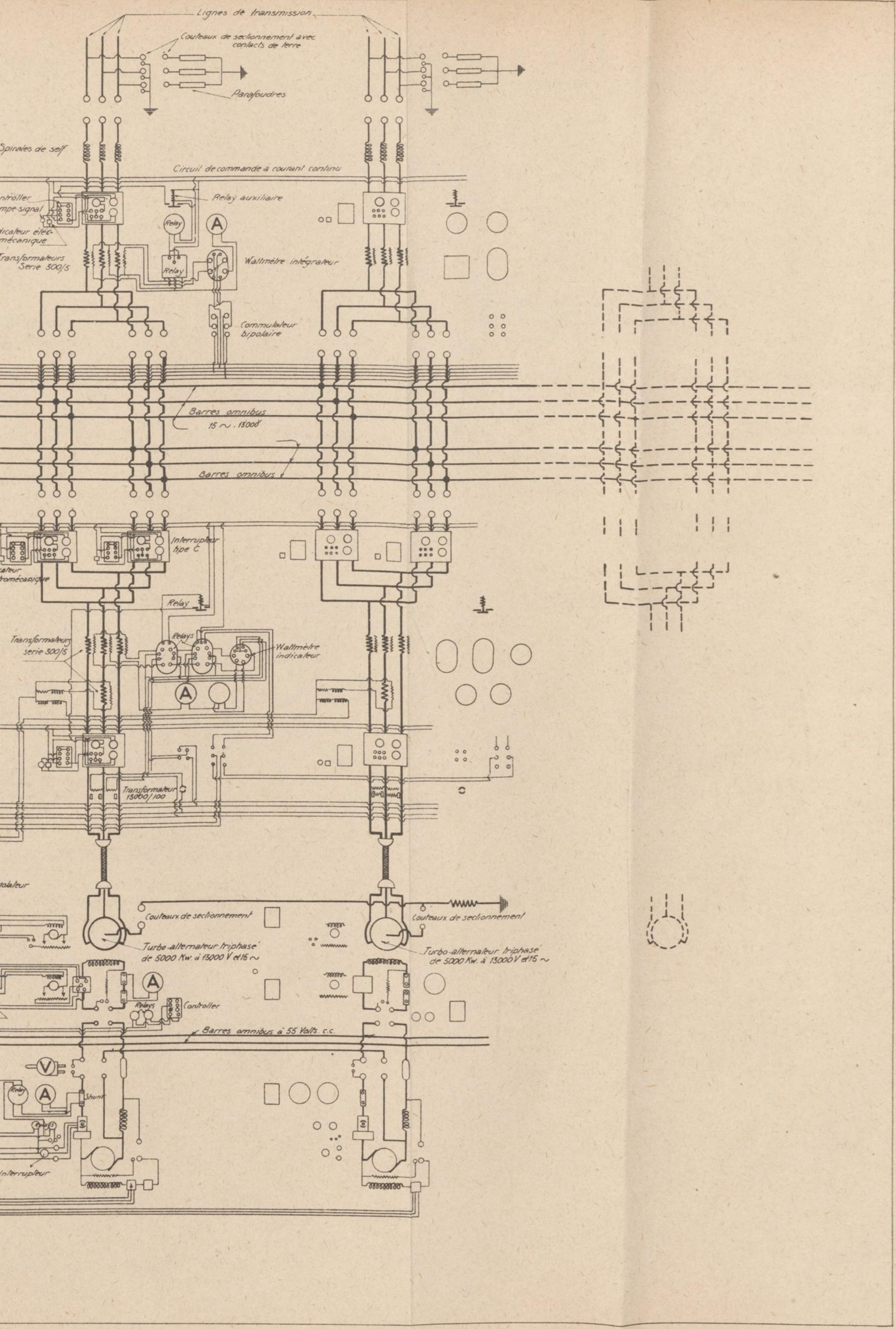
E DE GÈNES



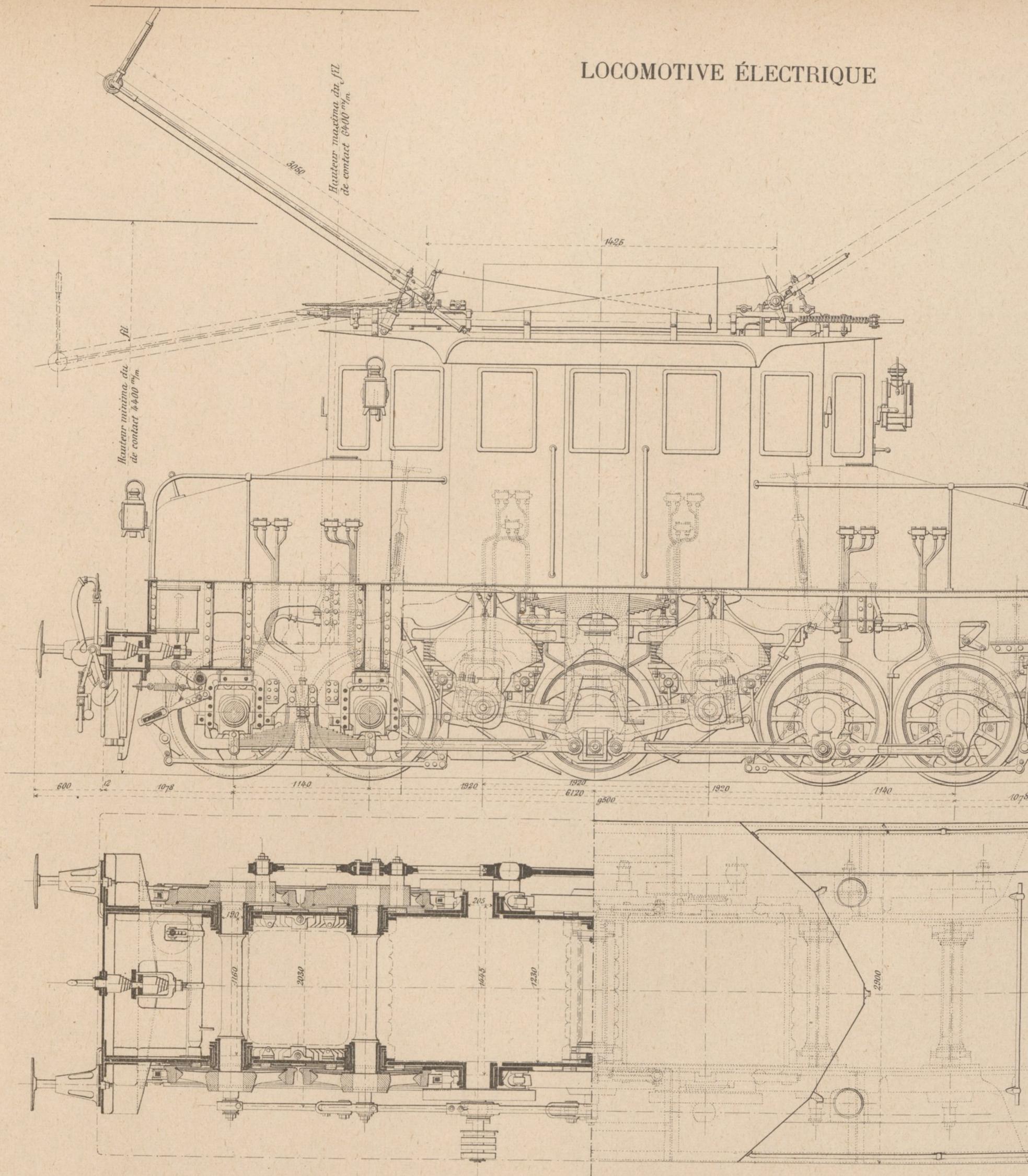
USINE CENTRALE DE GÈNES

Schéma des connexions

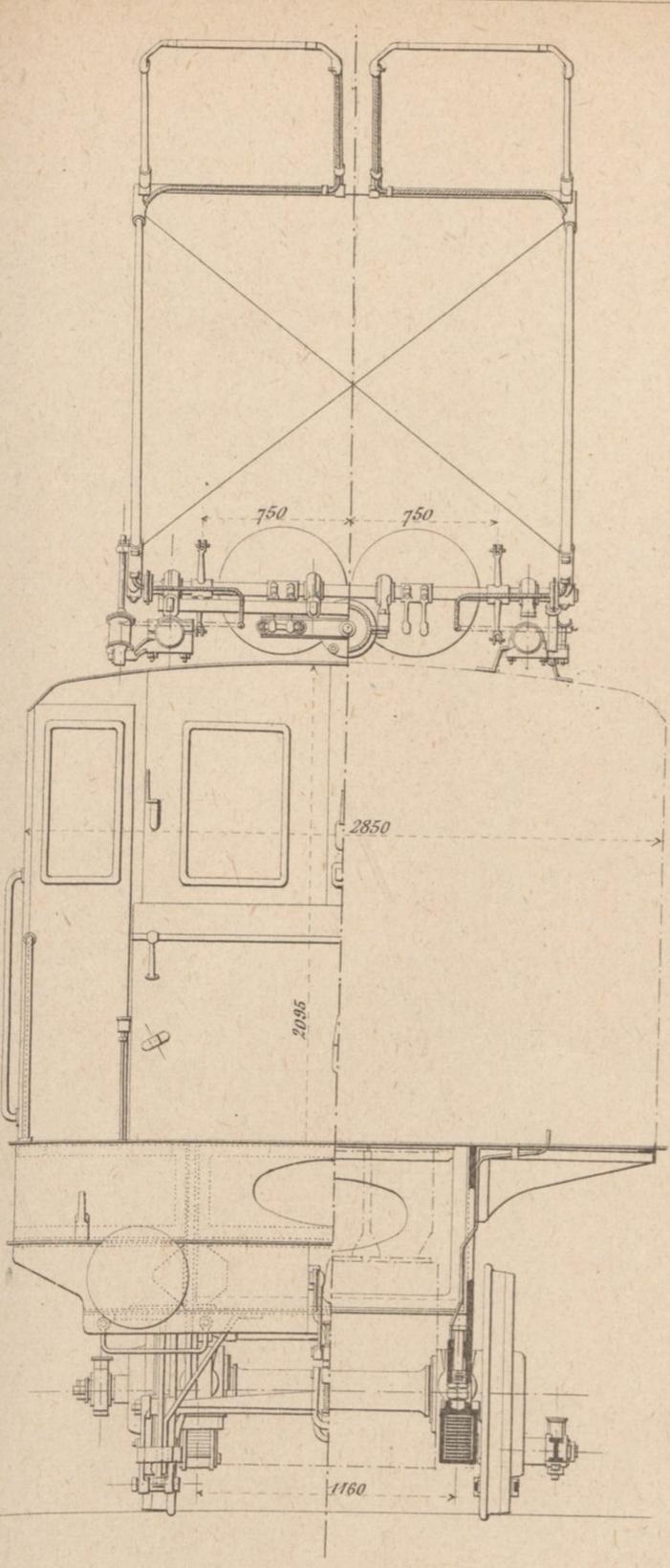
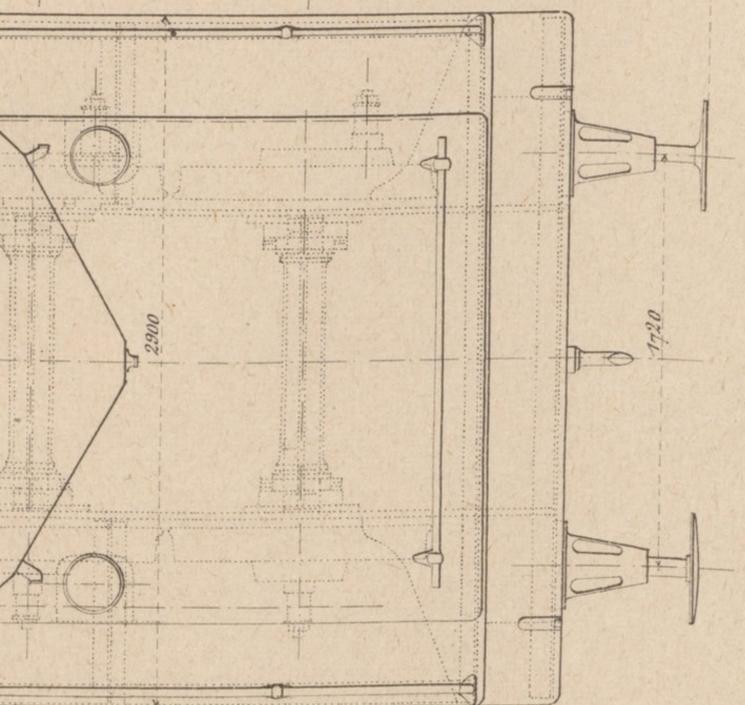
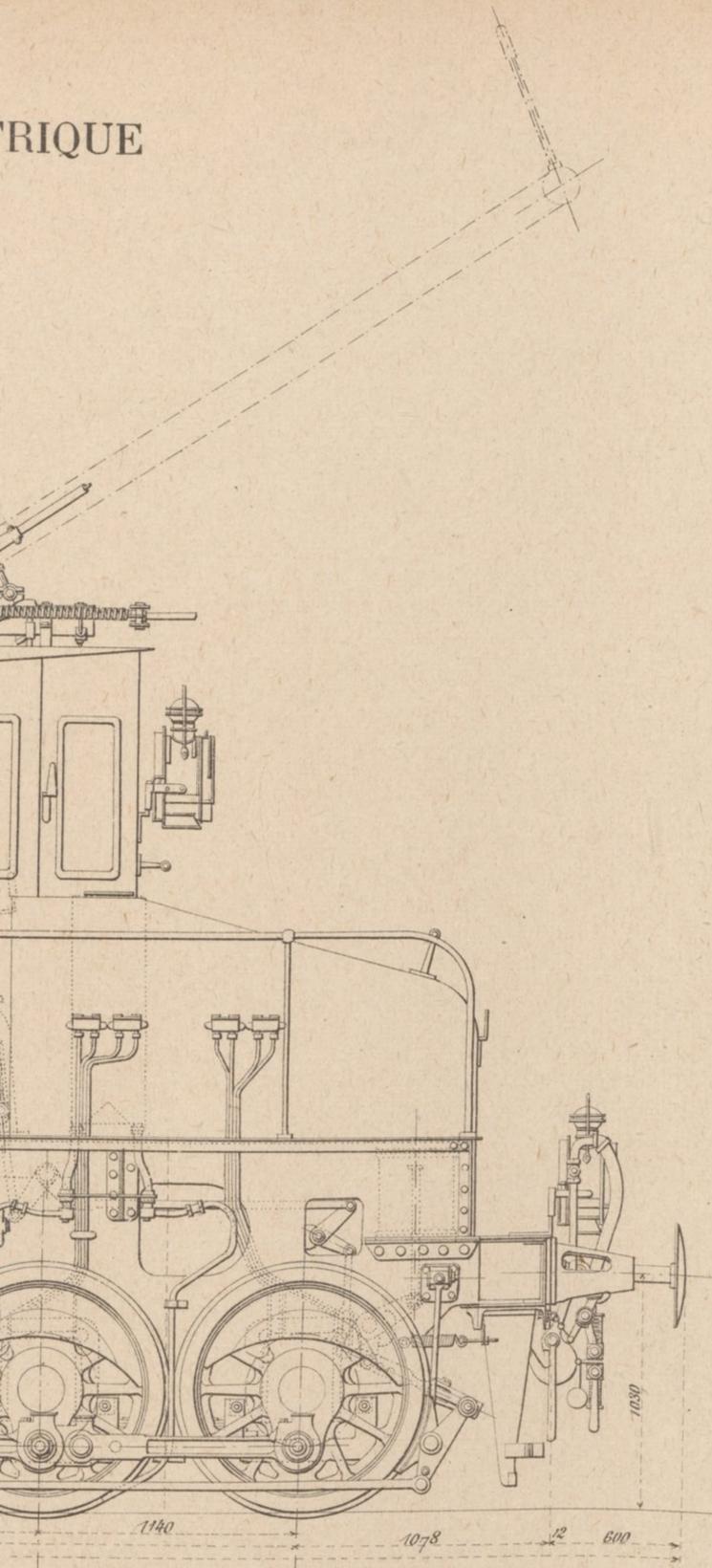




LOCOMOTIVE ÉLECTRIQUE



RIQUE



Légende.

Diamètre des roues	1070 ^{m/m}
» du cercle des manivelles	500 ^{m/m}
Longueur entre les buttoirs	9500 ^{m/m}
Distance entre les essieux extrêmes	6120 ^{m/m}
Poids total en service	60000 Kg.
Poids adhérent	60000 Kg.
Courant	Triphasé
Tension aux fils de contact	3000 volts
Fréquence	15 périodes
Puissance horaire des deux moteurs	1000 chevaux
Vitesse	22,5 et 45 Km. heure
Effort de traction à la jante des roues	12000 Kg.