

# LOCOMOTIVES DE MANŒUVRES A MÉTADYNE

par M. R. CANDÉ,

Sous-Ingénieur du Service électrique (Traction) de la Région du Sud-Ouest  
de la Société Nationale des Chemins de Fer Français.

*Jusqu'à ces dernières années, il n'avait pas été construit en France de locomotives électriques à 1500 volts spécialement étudiées pour le service des manœuvres. On utilisait dans ce cas de simples locomotives de marchandises à démarrage rhéostatique, pourvues d'un rapport d'engrenages approprié.*

*L'ancien réseau PO, qui disposait de 13 locomotives BB provenant de son parc à 600 volts, devenues inutilisables à la suite du changement de tension, les a fait transformer en locomotives de manœuvres à 1500 volts. Les moteurs à 600 volts qui ont été conservés sont alimentés sous tension variable par un groupe convertisseur à un seul collecteur alimenté sous 1500 volts et qui supprime l'emploi des résistances de démarrage.*

*C'est l'équipement de ces machines qui est décrit ci-après.*

L'électrification de la ligne de Paris à Vierzon, en courant continu à 1500 volts, ayant été décidée en 1921, dès cette époque s'était posée la question de l'utilisation du matériel à 600 volts <sup>(1)</sup> servant à l'exploitation du tronçon Paris-Juvisy.

On avait envisagé notamment l'installation sur les locomotives BB de la série E1 à E13 d'un groupe convertisseur 1500/600 V permettant de les alimenter à 1500 volts. Toutes les solutions proposées alors par les constructeurs, qui conduisaient à modifier profondément la partie méca-

nique de ces machines par suite du poids très élevé du groupe convertisseur, avaient dû être écartées parce que d'un prix trop élevé.

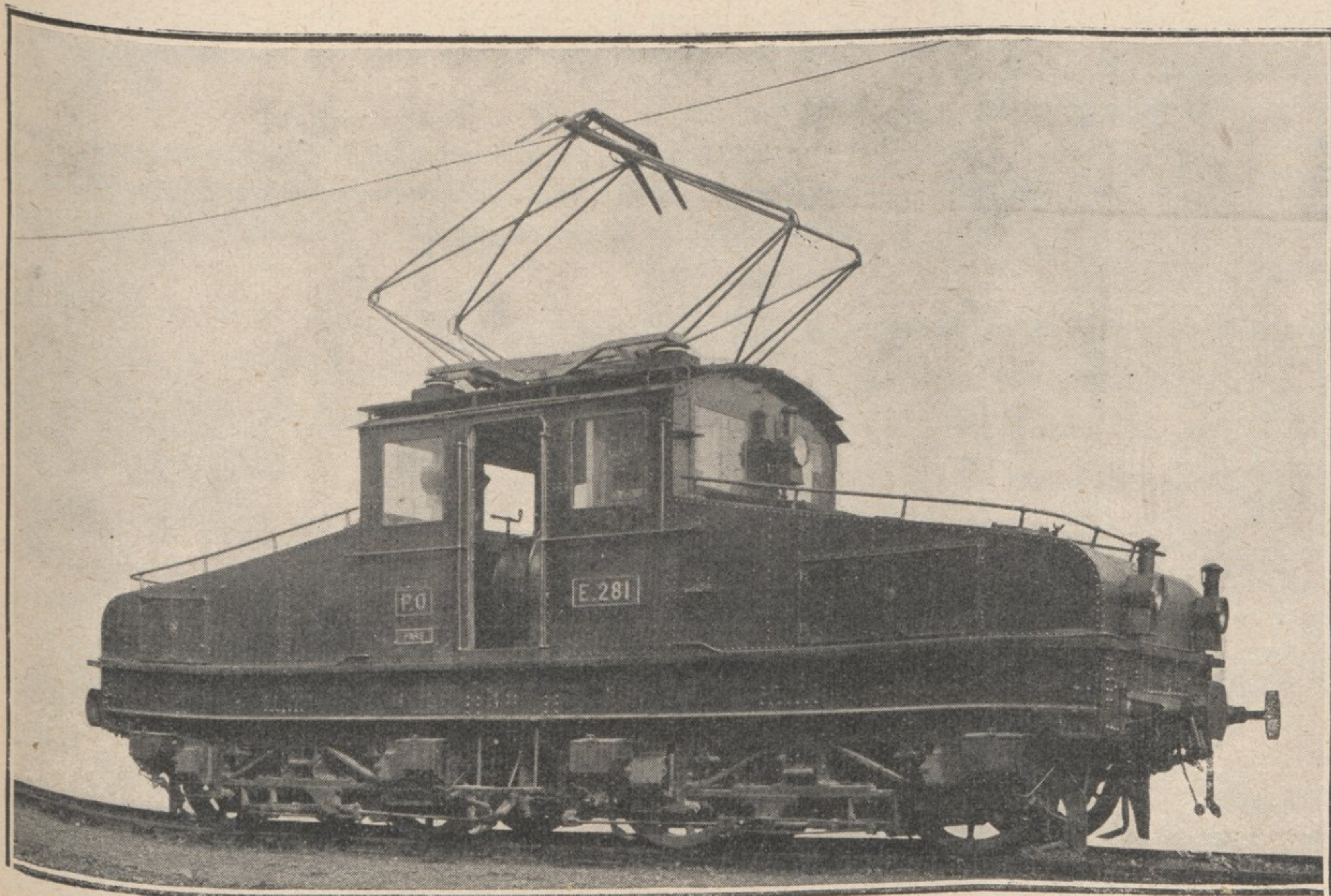
En 1926, la Compagnie Thomson-Houston ayant présenté les premiers groupes convertisseurs dits "métadynes", qui semblaient correspondre exactement à l'adaptation envisagée tout en réalisant des avantages marqués, notamment en ce qui concerne le poids, par rapport aux solutions classiques qui nous avaient été proposées antérieurement, le réseau lui a passé commande dès 1927 d'un équipement d'essai pour la transformation de la locomotive E3 en machine de manœuvres à 1500 volts.

(1) Le parc des machines à courant continu 600 volts de la Cie d'Orléans utilisées sur la ligne Paris-Juvisy comprenait alors :  
13 locomotives BB (dont 8 à 1 cabine de manœuvre et 5 à 2 cabines) (Fig. 1 et 2) 5 locomotives ID1 à commande par bielles et 7 automotrices.

La construction de cette première "métadyne" a donné lieu à de nombreux tâtonnements, ainsi qu'à une mise au point assez longue et si le résultat

Une commande a donc été passée en 1932 pour la modification des 13 machines à 600 V de ce type, étant spécifié toutefois que 2 locomotives seraient tout d'abord équipées et essayées avant que la construction de série ne soit entreprise.

Figure 1. — Locomotive à métadyne à 1 cabine.



Les essais de ces dernières machines mises en service à la fin de 1933, ayant été concluants, les 11 autres locomotives ont été ensuite modifiées.

Avant de décrire les appareils constituant l'ensemble de l'équipement de ces machines, nous allons indiquer brièvement le principe de fonction-

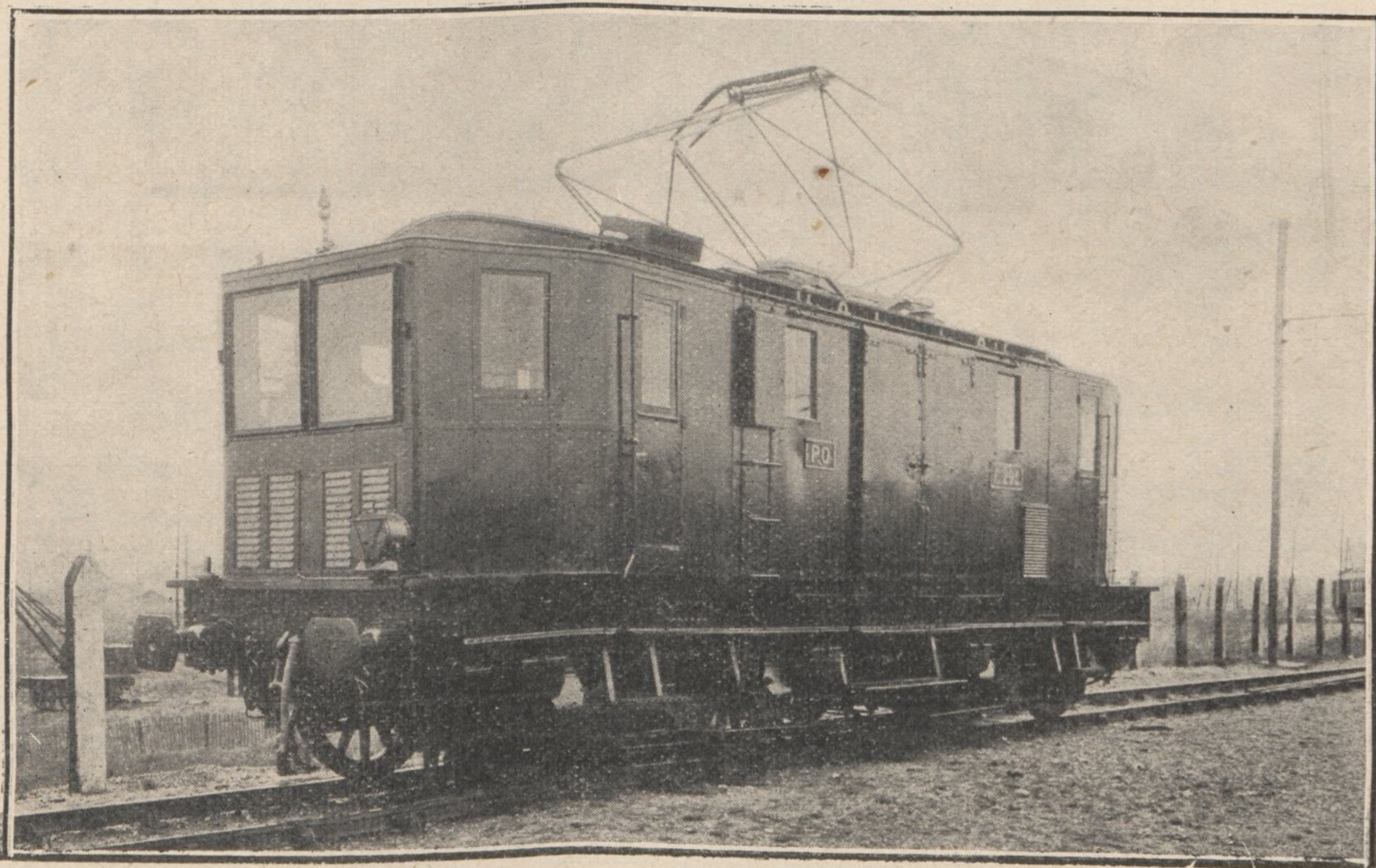
nement du groupe transformateur d'énergie dit "métadyne", qui constitue la particularité de ce système.

final n'a pas été entièrement satisfaisant pour des raisons de construction, du moins les essais permirent-ils de constater que, moyennant certaines

modifications dans l'établissement des métadynes, cette solution était de nature à répondre entièrement aux desiderata envisagés.

Elle permettait en effet, sans qu'il soit nécessaire de modifier les moteurs de traction ni la partie mécanique, de réutiliser ces machines dans les meilleures conditions, et de les doter en outre d'un système économique du réglage de la vitesse et du freinage électrique par récupération.

Figure 2. — Locomotive à métadyne à 2 cabines.



### Principe de fonctionnement du groupe convertisseur "Métadyne"

Schématiquement, la métadyne est constituée par un induit de dynamo tournant à l'intérieur d'une carcasse magnétique qui, théoriquement, pourrait ne comporter aucun pôle inducteur (Fig.3).

Sur le collecteur appuient deux lignes de balais :

- la ligne de balais dits primaires comporte : des balais (a) reliés à la ligne de contact à 1500 volts et (c) reliés à la terre ;
- la ligne de balais dits secondaires, perpendiculaire à la précédente, comporte des balais (b) et (d) réunis entre eux par un circuit extérieur.

même un flux de réaction d'induit  $\Phi_2$  (Fig. 3c) dirigé suivant  $bd$ , lequel induit entre les balais primaires une force contre électromotrice :

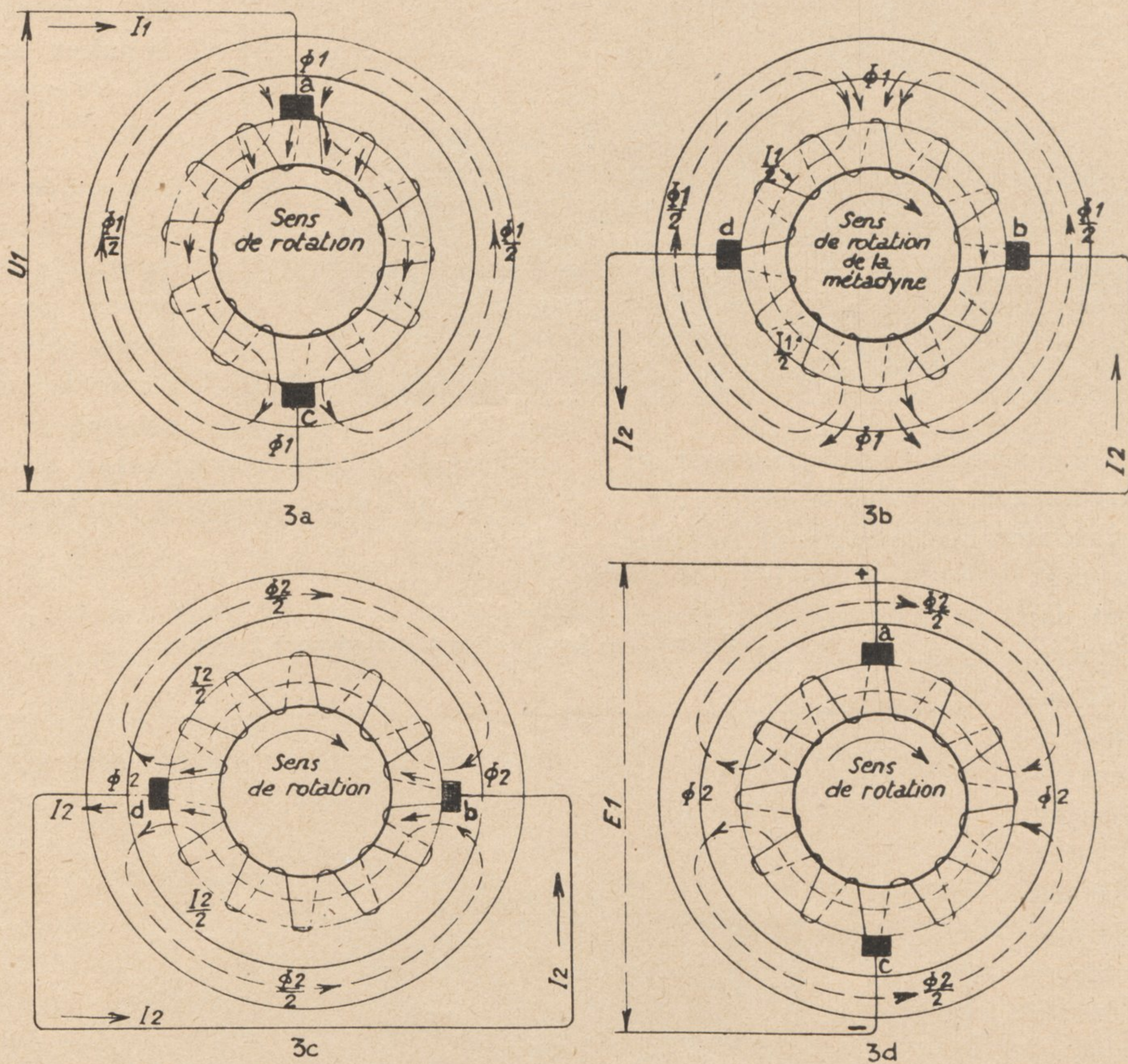
$$E_1 = K' N \Phi_2 = K N I_2$$

qui limite le courant  $I_1$  (Fig. 3d).

A l'état d'équilibre, on trouve que  $E_1 I_1 = E_2 I_2$ , ce qui montre, qu'aux pertes près, la puissance électrique primaire ( $U_1 I_1$ ) est entièrement transformée en puissance électrique secondaire ( $U_2 I_2$ ) et qu'il n'existe aucun couple mécanique sur l'arbre.

En négligeant la chute ohmique, si on alimente une telle machine tournant à vitesse constante sous une tension primaire constante  $U_1$ , le flux secondaire  $\Phi_2$  et le courant secondaire

Figure 3. — Principe de fonctionnement de la Métadyne.



Si l'on suppose (Fig. 3 a) qu'un courant  $I_1$  circule des balais (a) vers les balais (c), celui-ci va produire un flux de réaction d'induit  $\Phi_1$  parallèle à la ligne  $ac$  qui va se former dans la carcasse entourant l'induit. Si l'induit tourne à la vitesse  $N$ , ce flux, qui reste fixe dans l'espace, crée dans les conducteurs une force électromotrice :

$$E_2 = K' N \Phi_1 = K N I_1 \text{ (circuit non saturé)}$$

qui provoque à son tour entre les balais (d) et (b) la circulation d'un courant secondaire  $I_2$  (Fig. 3b). Le courant  $I_2$  crée lui-

$I_2$  restent également constants ; la machine transforme donc une distribution à tension constante en une distribution à intensité constante et ceci quelle que soit la position des balais secondaires  $b$  et  $d$ .

On voit d'après ce qui précède que cette machine est réversible, puisqu'une inversion de la tension secondaire  $U_2$  provenant du circuit de débit  $bd$ , provoque en définitive l'inversion du courant  $I_1$ . Elle peut donc alors recevoir de l'énergie électrique de son circuit secondaire, ce qui lui permet de marcher en récupération.

Son fonctionnement est stable, car si nous supposons que le courant  $I_1$  a tendance à augmenter, il en sera de même de  $\Phi_1$ ,  $E_2$ ,  $I_2$  du flux  $\Phi_2$  et de la force contre électromotrice  $E_1$ , qui s'oppose finalement à l'augmentation de  $I_1$ . Il en est de même si le courant  $I_2$  vient à diminuer, ce qui tend à faire croître  $E_2$  et à maintenir le courant  $I_2$  à sa valeur primitive. Le même raisonnement permettrait de constater que la marche en récupération est également stable.

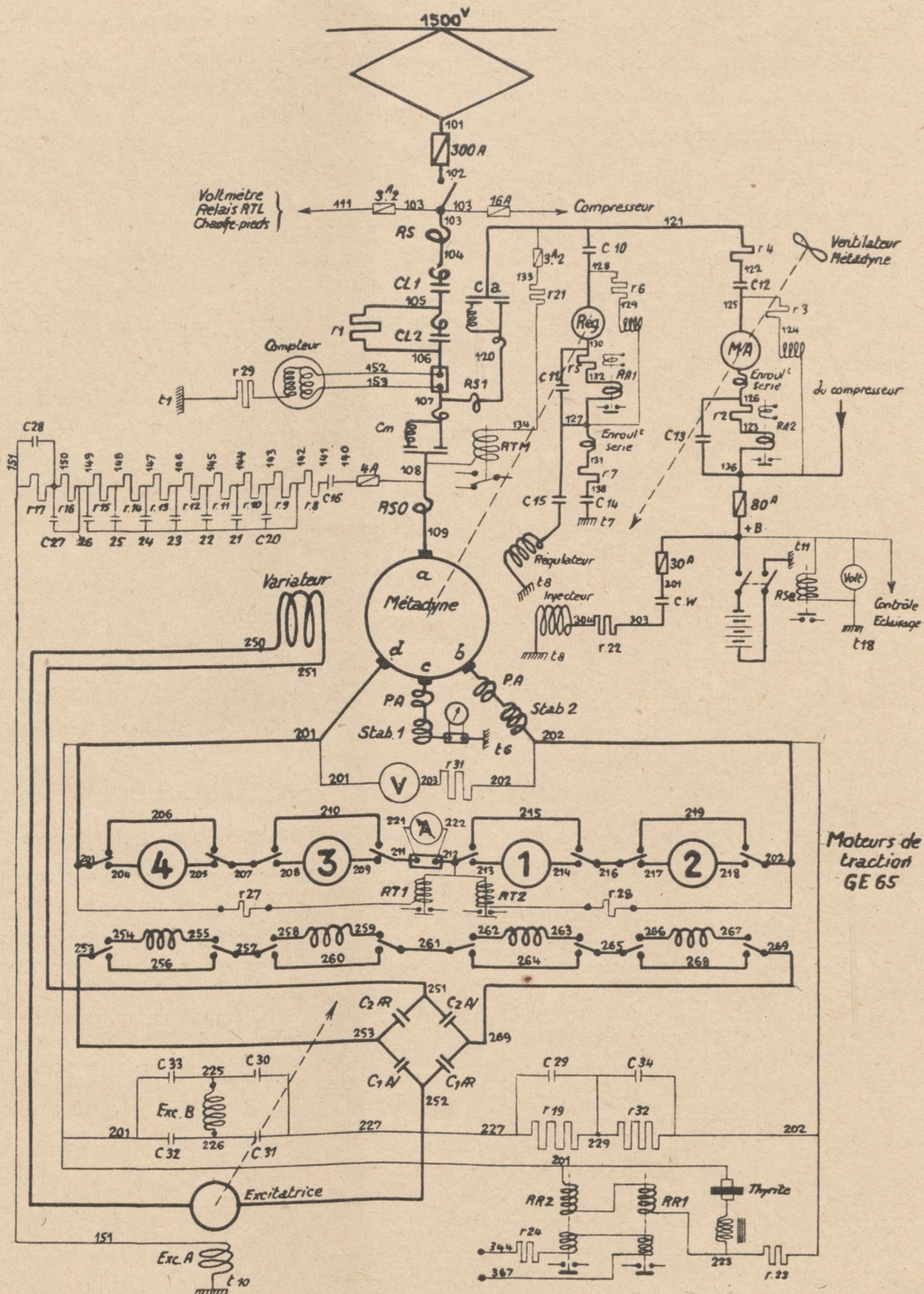
En fait, la métadyne est une machine bien plus compliquée que ne le laisserait supposer ce qui précède, car il faut :

- 1° pouvoir lancer le rotor à sa vitesse de régime,
  - 2° coupler la machine à la ligne sans à coup,
  - 3° maintenir cette vitesse aussi constante que possible lorsque la charge varie,
  - 4° faire varier le débit dans le circuit secondaire suivant certaines lois, pour obtenir la caractéristique de fonctionnement désirée pour les moteurs de traction,
  - 5° réaliser une bonne commutation des différentes lignes de balais.
- On indiquera par la suite par quels moyens on est arrivé à réaliser toutes ces conditions.

Un pantographe d'un type utilisé déjà sur nos autres machines.

Un coupe-circuit principal à soufflage magnétique avec fusible de 300 ampères.

Figure 4. — Circuits principaux à 1500 volts et 600 volts.



**Description de l'équipement des locomotives transformées**

Le circuit principal à 1500 volts représenté sur la figure 4 comprend :

**Un sectionneur**

Deux contacteurs de ligne  $CL_1$  et  $CL_2$  à commande électro-pneumatique, remplissant le rôle de disjoncteur principal. En cas de fonctionnement de

l'un des appareils de protection, le contacteur  $CL_2$  coupe et introduit dans le circuit une résistance qui limite le courant à 800 A environ. Le contacteur  $CL_1$  interrompt ensuite le circuit.

**Un groupe convertisseur** (visible sur la Fig. 5) constituant la partie fondamentale de l'équipement.

En fait celui-ci est divisé, pour la commodité de la construction, en deux groupes indépendants :

le groupe d'excitation, qui comprend un moteur, une excitatrice et un ventilateur,

la métadyne et sa régulatrice.

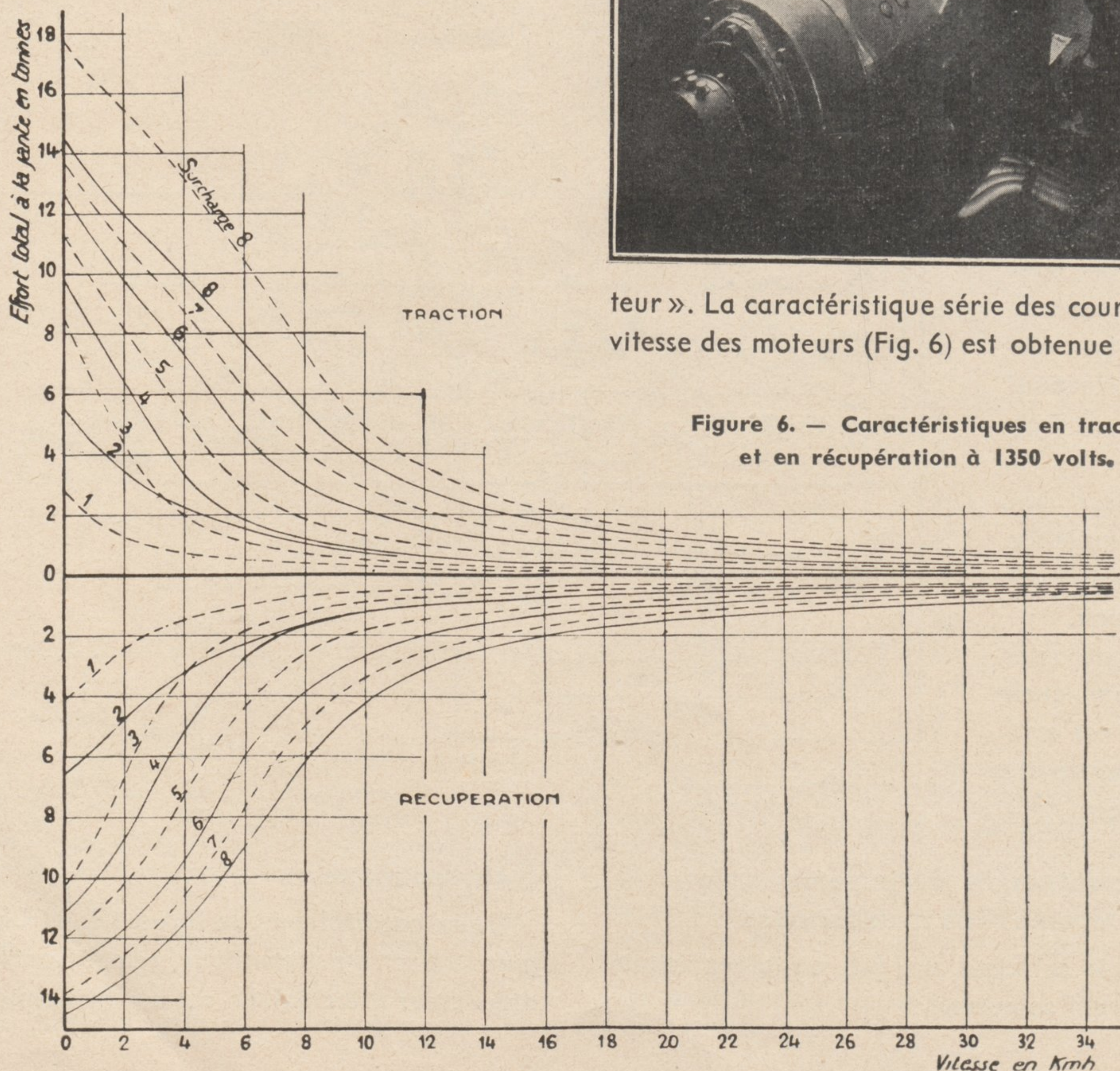
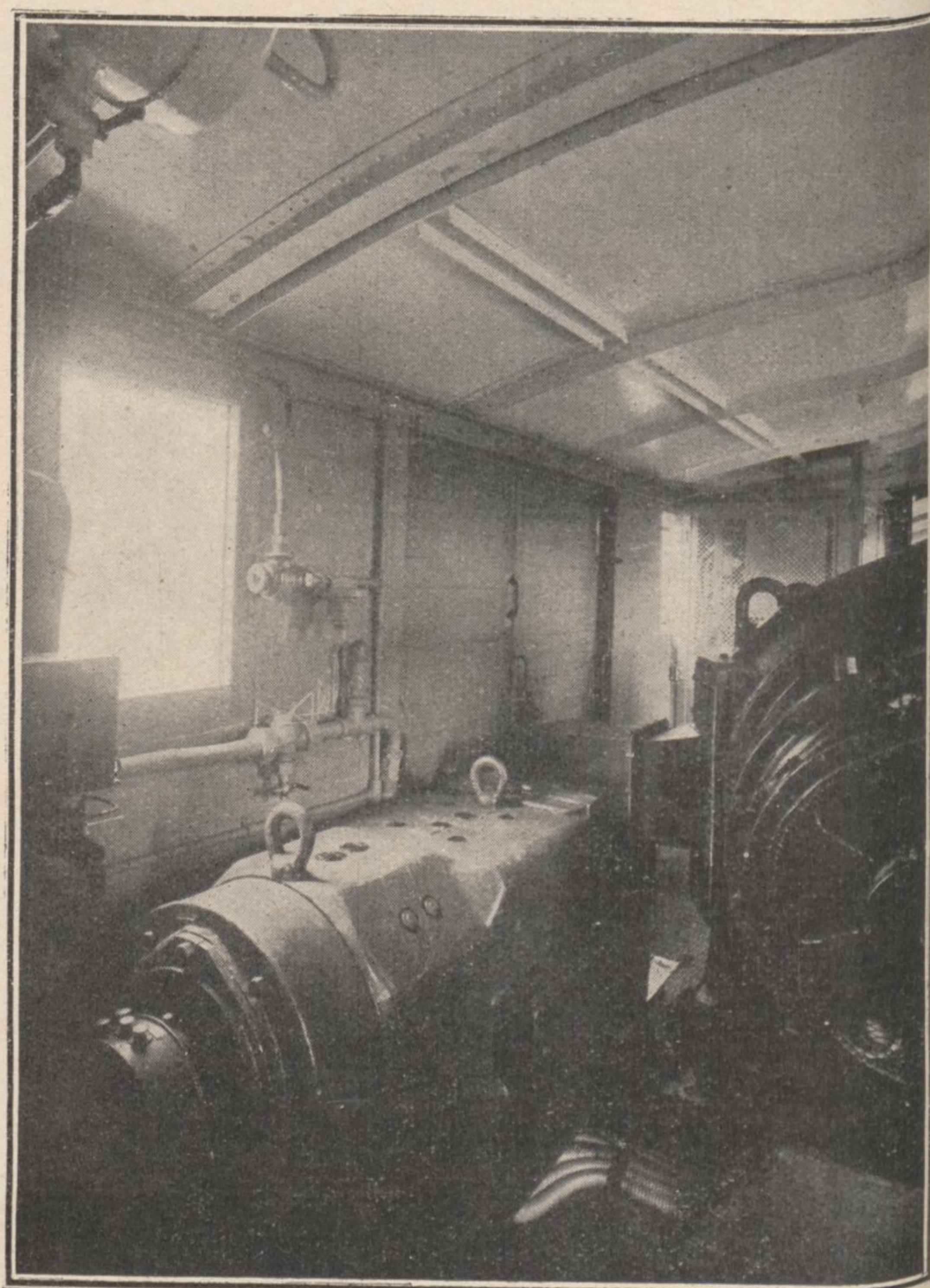
**a) Groupe d'excitation :**

**Le moteur** de ce groupe est une machine à 1 500 volts bipolaire, à excitation compound, dont le démarrage s'effectue automatiquement en deux temps.

**L'excitatrice** est tétrapolaire, sa puissance continue de 5,4 kW correspond à 36 volts 150 ampères à 2 000 tours/minute. Elle alimente d'une part les inducteurs des moteurs connectés tous en

série, et, par, l'intermédiaire des enroulements « variateurs » de la métadyne, elle contrôle le courant des induits, ce qui réalise la relation nécessaire entre les courants « induit » et « induc-

Figure 5. — Disposition des groupes dans une locomotive à 2 cabines.



teur ». La caractéristique série des courbes Effort vitesse des moteurs (Fig. 6) est obtenue automati-

Figure 6. — Caractéristiques en traction et en récupération à 1350 volts.

quement par la combinaison des deux excitations que possède cette machine.

Une excitation magnétisante A alimentée à 1 500 V et qui varie suivant la position du contrôleur de manœuvre.

de 2 300 tours/mn protège le groupe contre tout risque d'emballement.

b) **Le groupe convertisseur comprend :**

**La régulatrice**, alimentée à 1 500 volts et dont la puissance continue est de 17,7 kW. Elle sert à

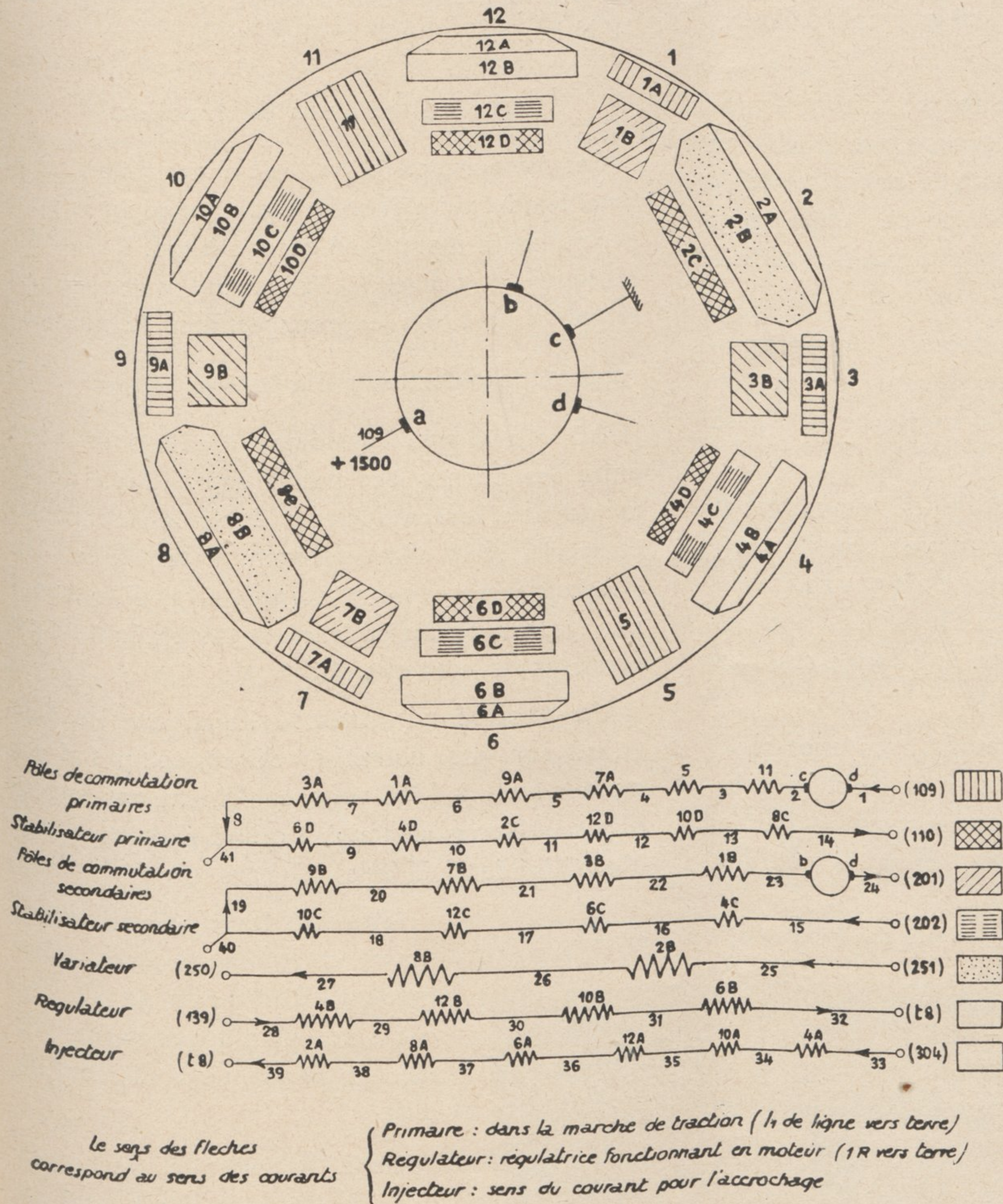
lancer la métadyne à sa vitesse normale et permet de maintenir cette vitesse constante.

C'est une machine tétrapolaire, à excitation compound, mais l'excitation série n'est utilisée qu'au démarrage. Celui-ci s'exécute automatiquement en deux temps.

**La "Métadyne"** proprement dite, alimentée à 1 500 volts, fournit le courant aux induits des moteurs de traction sous une tension variable, qui peut atteindre 1 000 volts environ. Elle a une puissance secondaire continue de 105 kW correspondant à 870 volts, 120 ampères à 995 tours/mn. Elle comprend, ainsi que le montre la figure 7 :

1° Un rotor à bobinage bipolaire à un seul collecteur et deux lignes de balais.

Figure 7. — Schéma du bobinage de la Métadyne.



Une excitation constamment démagnétisante B dérivée aux balais secondaires de la métadyne et dont l'action est proportionnelle à la tension secondaire.

**Le ventilateur** d'un débit de 80 m<sup>3</sup> à la minute fournit l'air nécessaire au refroidissement de la métadyne.

Un interrupteur à force centrifuge monté en bout de l'arbre commun et réglé pour la vitesse

Les balais primaires *a* et *c*, placés sur un diamètre, sont reliés respectivement à la ligne à 1 500 volts et à la terre. Les balais secondaires *b* et *d*, calés symétriquement par rapport à *ac* et faisant entre eux un angle de 110° seulement, alimentent les quatre induits des moteurs de traction connectés en série. Cette disposition dite en "trident" a été choisie afin d'alimenter ces induits à une tension suffisante, sans dépasser toutefois la tension de 600 volts par rapport à la masse pour laquelle leur isolement a été prévu. En effet, dans le cas d'un seul collecteur, la tension recueillie entre des balais tels que *b* et *d*, et qui résulte de la composition des deux tensions primaire et secondaire, varie suivant la position de ces balais;

il en est de même d'ailleurs de la tension entre les balais et la masse. Il a donc fallu, puisque le montage en "croix", dans lequel les deux lignes de balais sont perpendiculaires l'une par rapport à l'autre, présentait l'inconvénient de soumettre les isolants à une tension supérieure à 600 volts, rapprocher judicieusement les balais *b* et *d* pour satisfaire à la condition imposée.

2° Un stator, composé d'une carcasse magnétique à 12 pôles saillants comportant différents enroulements :

Les enroulements "injecteurs", alimentés au moment du démarrage du groupe par la batterie de contrôle, élèvent la tension au primaire de la métadyne à une valeur voisine de 1 500 volts, pour permettre de coupler cette machine sans à coup sur le réseau.

Les enroulements "régulateurs", montés en série avec la régulatrice, combinent leur action avec celle-ci pour maintenir constante la vitesse du groupe métadyne.

Les enroulements "stabilisateurs" primaires et secondaires, qui agissent en traction comme compoundage du primaire et anticompoundage du secondaire et dont la fonction s'inverse en récupération, assurent à la machine une bonne stabilité de marche en régime variable.

Les enroulements "variateurs", montés en série avec les inducteurs des moteurs de traction, produisent un champ variable, qui se combine avec le champ secondaire pour faire varier le courant

dans les induits et permettre de régler ainsi la marche de la locomotive.

Les enroulements de "commutation" primaires et secondaires assurent une commutation sans étincelles de la métadyne.

Un interrupteur centrifuge, monté en bout d'arbre, entre en action lorsque la vitesse dépasse 1 300 tours.

#### Quatre moteurs de traction

Ces moteurs, primitivement à excitation série, fonctionnent maintenant à excitation séparée pour permettre la marche en récupération. Ils ont été réutilisés sans aucun changement autre que le remplacement des engrenages, dont le nouveau

rapport de réduction a été porté à  $\frac{71}{14} = 50,7$ .

Leurs induits sont constamment réunis en série entre les bornes des balais secondaires de la métadyne et leurs inducteurs, également connectés en série, sont alimentés par l'excitatrice. Un interrupteur inverseur tétrapolaire d'isolement par moteur, permet d'isoler le cas échéant un ou plusieurs moteurs avariés.

Un groupe compresseur, d'un modèle déjà utilisé sur nos autres machines, comprend un moteur série à 1 500 volts, entraînant par engrenages un compresseur à 2 cylindres horizontaux d'un débit de 1 265 litres à 7 hpz.

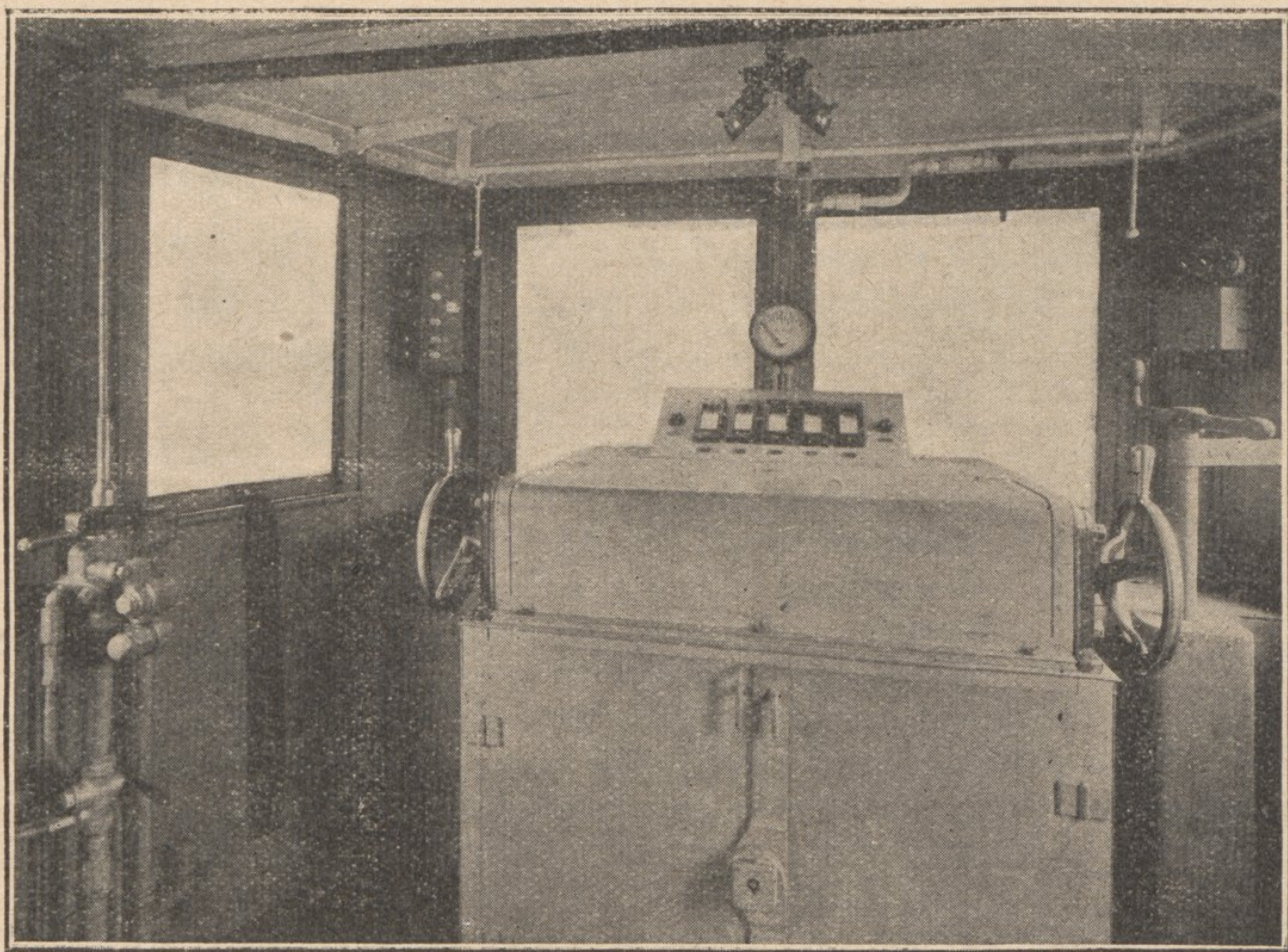
Une batterie d'accumulateurs au cadmium nickel comportant 48 éléments de 72 ampères heures, alimente les circuits de contrôle et l'enroulement injecteur.

Cette batterie est rechargée par le courant traversant les moteurs du groupe d'excitation et du compresseur.

Un contrôleur de manœuvre par cabine de conduite.

Celui-ci comporte de part et d'autre de la position zéro, 9 positions : 1 position A d'accrochage de la métadyne et 8 positions numérotées de 1 à 8, sur lesquelles on règle la valeur de

Figure 8. — Poste de conduite des locomotives à 2 cabines.



l'excitation A de l'excitatrice. Chaque contrôleur n'est pourvu que d'un seul tambour placé horizontalement et terminé à chacune de ses extrémités par un volant. Le robinet de frein à air étant également à commande double, on dispose ainsi, en face de chaque fenêtre latérale de la cabine, de tous les organes de commande indispensables pour assurer la marche continue de la machine sans cesser d'observer les signaux à main dans les voies les plus sinueuses (Fig. 8). Une manette amovible permet de verrouiller le contrôleur à sa position zéro.

**Une boîte de boutons poussoirs** par cabine, alimentée par l'interrupteur de contrôle comportant 5 interrupteurs : démarrage métadyne — démarrage excitatrice — surcharge — compresseur « automatique » — compresseur « direct ».

Le bouton de surcharge muni d'un ressort de rappel sert à augmenter l'excitation de l'excitatrice pour obtenir l'effort de traction maximum.

**L'équipement électrique** est complété par :

— des contacteurs à commande électromagnétique, à l'exception des contacteurs principaux, qui sont électropneumatiques.

— des relais de démarrage des groupes, d'accrochage automatique de la métadyne sur le réseau, de récupération (pour assurer dans tous les cas à l'excitation B son action démagnétisante).

— des relais de tension agissant en cas : de baisse de tension du réseau, de surtension aux bornes des moteurs (patinage) et d'élévation de la tension aux bornes de la batterie (rupture interne).

— des relais de surcharge ; du circuit principal du circuits primaire de la métadyne et des moteurs des groupes.

— des appareils de mesure, voltmètres et ampèremètres des circuits primaires et secondaires de la métadyne, voltmètre de batterie et compteur d'énergie.

**Poids.** — Avant transformation, le poids total des locomotives était de 50 t pour les machines à une cabine et de 55 t pour celles à deux cabines ; après transformation, ces poids sont passés respectivement à 60 et 64 tonnes.

Dans ce poids, les 4 moteurs à 600 volts et leurs engrenages entrent pour 17 tonnes et le reste de l'équipement électrique pour 12 tonnes, se répar-

tissant en : 7 tonnes pour le groupe métadyne, 1,4 t pour le groupe d'excitation, 3,6 t pour l'appareillage et le câblage.

**Verrouillages de sécurité.** — Tous les appareils à haute tension sont placés derrière des panneaux fermant à clé, de même les collecteurs à 1 500 volts des machines qui ne sont pas placées derrière ces panneaux sont protégés par des tôles munies des mêmes serrures de verrouillage. La clé unique de ces différentes serrures est solidaire du robinet de commande du pantographe et ne peut être retirée que si cet appareil est abaissé ; inversement, celui-ci ne peut être levé que si la clé est en place. Par ailleurs, en ouvrant ce robinet, on coupe l'interrupteur de contrôle pour éviter d'abaisser le pantographe en charge.

#### **Conduite des locomotives à métadyne.**

Après avoir procédé aux opérations habituelles relatives à la levée du pantographe, au remplissage des réservoirs d'air, à la manœuvre des interrupteurs de batterie et de contrôle, on provoque le démarrage de la régulatrice et du groupe d'excitation par la seule fermeture des deux interrupteurs correspondants.

Lorsque la métadyne a atteint sa vitesse de régime, ce qui demande environ une minute, elle se couple automatiquement avec le réseau dès que l'on pousse le volant du contrôleur sur l'une des deux positions A. On peut ensuite ramener le volant au zéro, l'accrochage ne sera supprimé que par le fonctionnement d'un des relais ou l'ouverture des interrupteurs des groupes.

Pour faire avancer la locomotive, il suffit alors de pousser le volant du contrôleur sur les crans correspondant au sens de marche désiré. Pour démarrer dans le sens opposé, on manœuvre le volant dans l'autre sens. Le changement du sens de marche des moteurs est obtenu en changeant le sens du courant dans leurs inducteurs.

Si la locomotive roule et qu'on manœuvre le volant dans le sens opposé à la marche, on amorce la récupération et l'effort de retenue est gradué par le déplacement du volant sur les crans.

Si la machine s'arrête sans qu'on ait ramené le volant au zéro, elle repart immédiatement, en sens inverse.

On voit ainsi que la conduite de la machine en



traction et récupération est très simple, puisqu'elle s'obtient par la manœuvre d'un seul volant.

S'il y a une courte interruption pendant la manœuvre, on peut, pour réduire les pertes à vide, arrêter le groupe d'excitation, la métadyne continue alors à tourner, entraînée par la régulatrice.

Si le stationnement prévu est d'une certaine durée, on arrête les deux groupes.

### Résultats obtenus.

Ces machines sont spécialement affectées aux manœuvres dans les chantiers de formation, les gares et embranchements ; elles peuvent également être utilisées pour les manœuvres aux buttes de triage, mais leur poids adhérent relativement faible limite leur emploi aux rames légères.

Leur vitesse de marche atteint 50 km/h H. L. P, 20 km/h avec une charge de 500 tonnes ;

L'effort de traction à la jante qu'elles sont susceptibles de développer au démarrage peut atteindre 12 tonnes et exceptionnellement 18 t par l'emploi de l'interrupteur de surcharge.

Bien que la présence de deux groupes tournants leur occasionne des pertes d'énergie, ces machines procurent une économie de courant très appréciable par rapport aux machines à contrôle rhéostatique de série qu'elles ont remplacées au service des manœuvres. L'alimentation des moteurs de traction à tension variable supprime en effet complètement la perte d'énergie dans les résistances de démarrage, qui est d'autant plus importante que les démarrages sont plus fréquents et que la marche à très faible vitesse conduit à fonctionner sur des crans de résistance. On a pu relever en faveur des machines à métadyne, par

comparaison avec des machines BB à marchandises à démarrage rhéostatique utilisées aux manœuvres, des économies d'énergie de 29% au service des manœuvres et de 36% au service du triage. Il va de soi que cette économie aurait été moins sensible si l'on avait eu affaire à des machines à démarrage rhéostatique spécialement établies pour ce service.

L'emploi du freinage électrique, outre qu'il rend leur conduite plus facile, confère encore à ces machines les avantages bien connus de ce mode de freinage du point de vue de la diminution de l'usure des bandages et des sabots de frein, qui est si importante pour les machines spécialisées à ce service.

Enfin, leur puissance relativement faible paraît bien adaptée à leur emploi, si l'on tient compte qu'elles ont satisfait très largement à l'essai imposé consistant à remorquer pendant deux heures un train de 500 t constitué de voitures à voyageurs avec un démarrage suivi d'une marche d'une durée globale de deux minutes alternant avec un arrêt de 30 secondes.

En définitive, les équipements à métadyne, qui sont susceptibles d'applications très diverses, — et qui ont été installés en particulier en ce qui concerne la traction sur une soixantaine d'automotrices du métropolitain de Londres où ils réalisent le démarrage sans résistance et le freinage par récupération jusqu'à l'arrêt —, nous ont donné dans cette première application entière satisfaction. Leur emploi nous a permis, pour une dépense globale de 500 000 francs environ par machine, de remettre en service 13 locomotives pratiquement sans valeur, alors que les locomotives neuves qui auraient été nécessaires auraient coûté plus du double.