

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	65 (1974)
Heft:	5
Artikel:	Les engins moteurs à thyristors à la S.N.C.F.
Autor:	Cossié, A.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-915364

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 23.02.2026

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

Les engins moteurs à thyristors à la S.N.C.F

Par A. Cossié

Dans la première partie de l'article consacrée aux engins moteurs à courant monophasé, l'auteur rappelle les divers schémas de base utilisant des thyristors et assurant les fonctions fondamentales à savoir:

- le réglage de tension,
- le réglage du champ inducteur,
- le freinage,
- l'antipatinage.

Ces schémas se trouvent appliqués à la S.N.C.F. sur les séries d'engins indiqués ci-après:

36 Eléments automoteurs à 1 automotrice Z 6150 à Z 6185
(en service)

65 Locomotives BB 15001 à BB 15065 (en service et en cours de construction)

50 Eléments automoteurs à 2 automotrices Z 6401 à Z 6450
(en construction)

La deuxième partie de cet article, qui a trait aux engins moteurs à courant continu, indique les schémas de base des montages à thyristors qui permettent de remplir les fonctions fondamentales.

Le comportement de la locomotive à hacheurs devient alors similaire à celui d'une locomotive monophasée à thyristors.

Les essais qui ont eu lieu avec un ensemble expérimental à hacheurs de grande puissance (4400 kW), ont permis de résoudre tous les problèmes relatifs aux perturbations engendrées par de tels équipements.

La S.N.C.F. a commandé les séries suivantes d'engins moteurs à hacheurs:

80 Locomotives BB 7201 à BB 7280 à courant continu
(en construction)

120 Locomotives BB 22201 à BB 22320 bicourant (en construction)
(courant continu 1,5 kV et courant monophasé 25 kV/50 Hz)

Préliminaires

Au cours des dix dernières années, les applications des semi-conducteurs se sont multipliées sur les engins moteurs de la S.N.C.F.¹⁾.

En première étape, les ensembles à diodes silicium ont été montés soit de construction, soit en remplacement d'équipements à vapeur de mercure. Ces applications, qui conduisaient à une notable simplification des équipements (suppression de toute régulation thermique), ont permis de moderniser, aux moindres frais, la locomotive à redresseurs qui conservait, par ailleurs, son installation et ses appareillages traditionnels (réglage de tension par graduateur, etc).

Plus de 80 000 diodes sont ainsi en service sur les engins moteurs de la S.N.C.F.

Le nombre des composants des ensembles redresseurs a diminué considérablement avec l'évolution des caractéristiques qui sont passées:

- de 800 V à 2800 V en tension et
- de 200 A à 600 A en courant.

Actuellement, après une expérimentation couronnée de succès, les équipements à thyristors sont appliqués systématiquement, de construction, sur tous les engins tant à courant monophasé qu'à courant continu.

Ils apportent des solutions purement statiques aux problèmes jusque là résolus par des moyens électromécaniques, et grâce à la continuité de leur réglage, changent profondément la physionomie de l'engin moteur dans toutes les fonctions fondamentales, qu'il s'agisse du réglage de tension, de réglage du champ inducteur ou du freinage électrique.

¹⁾ Société Nationale des Chemins de Fer Français.

621.382.333.34 : 621.335.2(44)

Der erste Teil des Artikels ist den mit Einphasenstrom gespeisten Triebfahrzeugen gewidmet. Der Verfasser erwähnt die verschiedenen Grundschemas, bei denen Thyristoren für folgende fundamentale Funktionen verwendet werden:

- Spannungsregelung
- Regelung des Induktionsfeldes
- Bremsung
- Schleuderschutz

Diese Schemas werden bei der S.N.C.F. (Société nationale des chemins de fers français) auf folgenden Serien von Triebfahrzeugen angewendet:

36 Triebwageneinheiten mit 1 Triebwagen, Z6150 bis Z6185 (in Betrieb)

65 Lokomotiven BB15001 bis BB15065 (in Betrieb bzw. in Fertigung)

50 Triebwageneinheiten mit 2 Triebwagen, Z6401 bis Z6450 (in Fertigung)

Im zweiten Teil des Artikels, der den Gleichstrom-Triebfahrzeugen gewidmet ist, werden die Grundschemas der Thyristorenschaltung der Grundfunktionen behandelt.

Die Lokomotiven mit Choppersteuerung funktionieren somit ähnlich wie Einphasenstrom-Lokomotiven, die mit Thyristoren versehen sind.

Anhand von Versuchen, die mit einer Versuchseinheit mit Choppersteuerung von grosser Leistung (4400 kW) durchgeführt wurden, lassen sich alle Probleme lösen, die durch Störungseinflüsse einer solchen Ausrüstung entstehen könnten.

Die S.N.C.F. hat folgende Serien von Triebfahrzeugen mit Choppersteuerung bestellt:

80 Lokomotiven BB7201 bis BB7280 für Gleichstrom (in Fertigung)

120 Lokomotiven BB22201 bis BB22320 für Zweisystem (in Fertigung) (Gleichstrom 1,5 kV und Einphasenstrom 25 kV/50 Hz)

Engins à courant monophasé

Les schémas de base

Réglage de tension

On rappellera très brièvement que l'on dispose de 2 schémas (pont mixte et pont complet) pour obtenir le réglage de tension à partir de la tension secondaire fixe du transformateur principal.

Dans le réglage par pont mixte, seuls les bras Th₁ et Th₂ sont équipés de thyristors, alors que les deux autres bras sont équipés de diodes. La fig. 1 montre les allures de la tension et de l'intensité en divers points du circuit. La totalité du réglage est obtenue par variation de l'angle d'amorçage de 180 à 0°.

Ce schéma a l'avantage d'être économique, mais ne permet pas le fonctionnement en onduleur et ne peut assurer, de ce fait, le freinage par récupération.

Dans le réglage par pont complet, les quatre bras sont équipés de thyristors. La fig. 2 montre les allures des tensions et intensités en divers points du circuit. La totalité du réglage est théoriquement obtenue par variation de l'angle d'amorçage de 90 à 0°.

Ce montage est nettement plus coûteux que le montage en pont mixte, mais il présente l'avantage notable de pouvoir fonctionner en onduleur et de permettre ainsi le fonctionnement en récupération.

En raison du principe même de ces modes de réglage, la composante fondamentale de l'onde d'intensité se trouve décalée par rapport à la tension du réseau. Le facteur de puissance se trouve donc altéré. La fig. 3 montre les valeurs

comparées du facteur de puissance, en fonction de la vitesse de l'engin dans les divers modes de réglage de tension.

Par ailleurs, les formes d'onde de courant rencontrées dans les divers cas de réglage par thyristors sont, au cours des démarriages, génératrices d'harmoniques de courant dont la valeur est supérieure à celle obtenue avec un engin de même puissance équipé d'une commande par graduateur et de redresseurs à diodes.

Pour ces diverses raisons, il y a intérêt à ne régler par thyristors que des échelons de puissance réduite et l'artifice, couramment utilisé, consiste à monter en série plusieurs ponts commandés à thyristors.

En fait, pour éviter une complication excessive dans la construction des transformateurs principaux, une solution de compromis consiste à limiter à 1000 kW environ la puissance de chaque ensemble de réglage.

Le réglage de champ par thyristors

Le moteur série, couramment utilisé en traction, se prête de façon naturelle à un procédé remarquablement simple de réglage du champ inducteur. Il suffit, dans le schéma, de placer (fig. 4) l'inducteur à une extrémité du pont, côté re-

dressé, et de disposer, en dérivation sur l'inducteur, les thyristors Th_1 et Th_2 .

Par un décalage convenable de l'allumage de ces thyristors, il est ainsi possible de dériver le courant principal hors de l'inducteur. L'extinction des thyristors de shuntage se produit naturellement.

Le freinage électrique

Comme indiqué précédemment, l'utilisation d'un pont complet permet le freinage par récupération. Cette disposition présente l'avantage de ne nécessiter que fort peu d'équipement supplémentaire (pas de rhéostat de grande puissance). En outre, l'effort de freinage peut être maintenu jusqu'à l'arrêt complet.

L'antipatinage

La commande individuelle des moteurs de traction par ensembles à thyristors permet de réaliser, de façon statique, un antipatinage sélectif extrêmement efficace par réduction d'effort sur les seuls essieux qui patinent. Cette réduction est réglée, de façon continue, en fonction de l'importance du patinage de l'essieu.

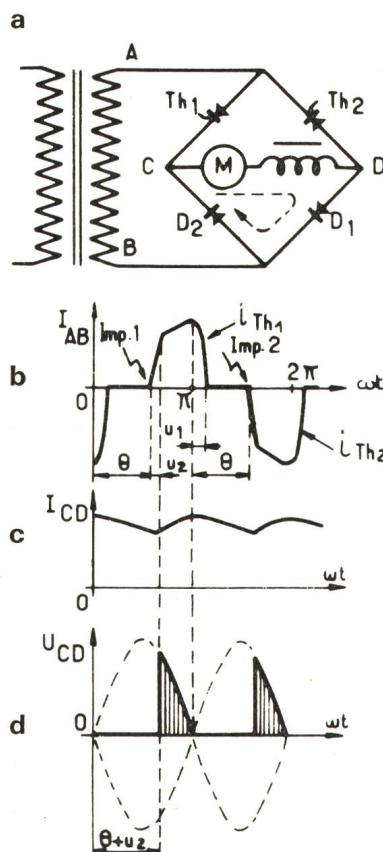


Fig. 1 Réglage de tension par pont mixte
(commande asymétrique)

- a Schéma
- b Courant dans le transformateur
- c Courant redressé (moteur)
- d Tension redressée
- Prolongation du courant moteur quand les thyristors sont bloqués
- Imp. Envoi d'impulsions aux thyristors
- θ Angle d'amorçage des thyristors
- u_1 et u_2 Angles de commutation

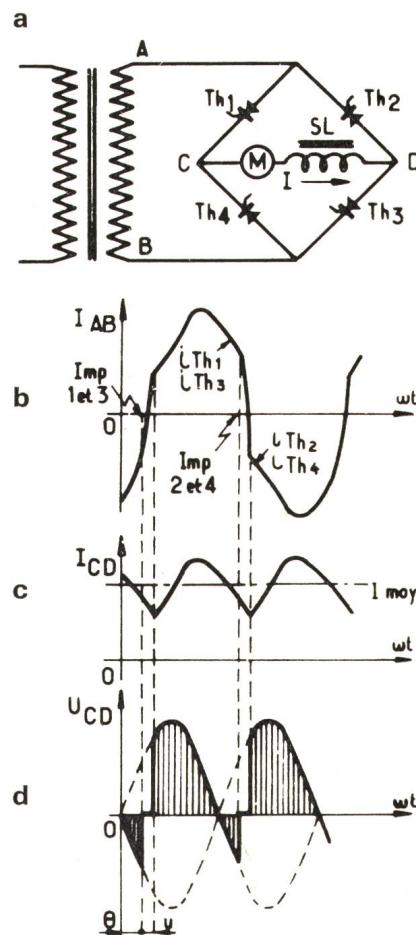


Fig. 2 Réglage de tension par pont totalement commandé
(commande symétrique)

- a Schéma
- b Courant dans le transformateur
- c Courant redressé (moteur)
- d Tension redressée
- Imp. Envoi des impulsions aux thyristors
- θ Angle d'amorçage des thyristors
- u Angle de commutation

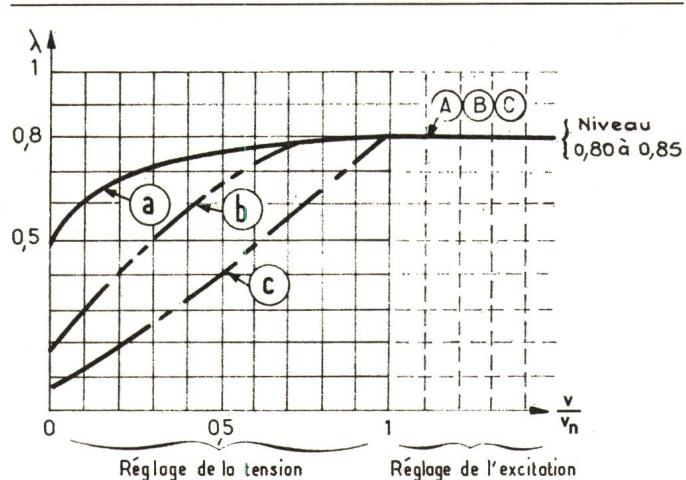


Fig. 3 Facteur de puissance d'une locomotive à redresseurs en fonction de la vitesse et selon le mode de réglage de tension utilisé

Courbe *a* Avec réglage par graduateur haute tension
 Courbe *b* Avec pont mixte
 Courbe *c* Avec pont totalement commandé

λ Facteur de puissance
 v Vitesse de la locomotive
 v_n Vitesse au régime nominal des moteurs (tension et intensité nominales, excitation maximale)

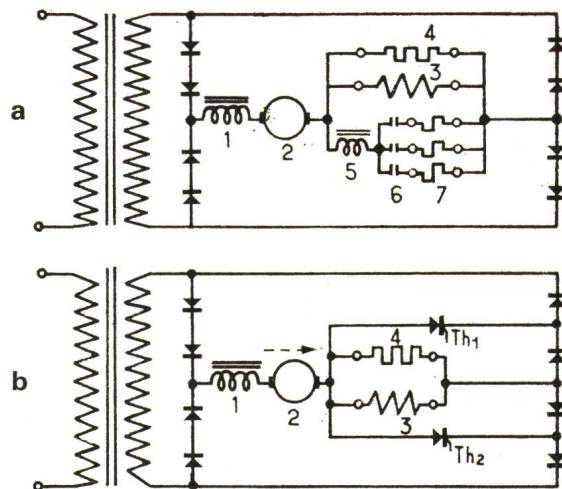
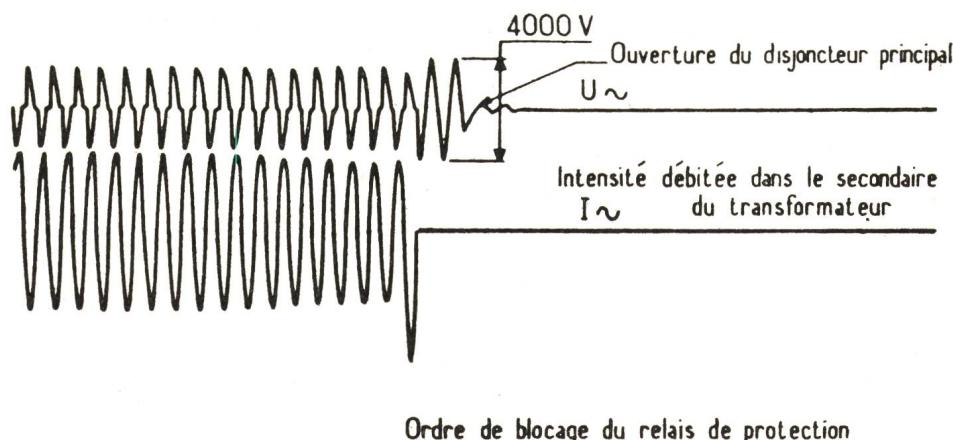


Fig. 4 Réduction de champ

- a* Par contacteurs et résistances: shuntage discontinu
- b* Par thyristors: shuntage continu
- 1 Self de lissage
- 2 Induit
- 3 Inducteur
- 4 Résistance de shuntage permanent
- 5 Shunt inductif
- 6 Contacteurs
- 7 Résistances de shuntage
- Th_1, Th_2 Thyristors de shuntage



Ordre de blocage du relais de protection

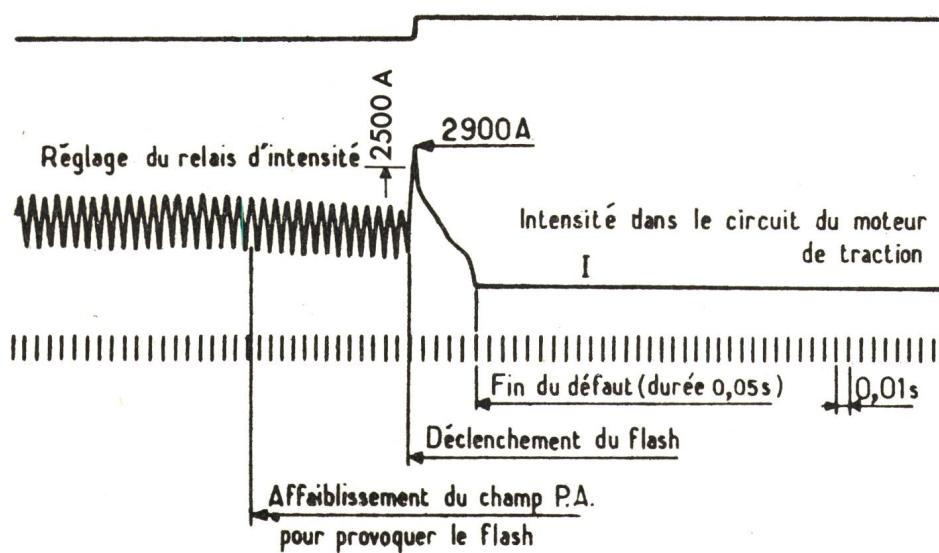


Fig. 5
 Moteur de traction alimenté par pont thyristors
 (Protection en cas de flash)
 Le déclenchement du relais électronique à maxima d'intensité (réglé à 2500 A) supprime l'allumage des thyristors.
 L'alimentation du défaut par la ligne dure au maximum une alternance (0,01 s)

La protection ultra-rapide

L'utilisation de relais de protection à fonctionnement ultra-rapide permet d'assurer le blocage immédiat des gâchettes des thyristors. L'interruption du débit du pont se produit donc à la fin de l'alternance correspondante. En monophasé 50 Hz, la protection des circuits de puissance est ainsi réalisée de façon très efficace (fig. 5).

Il faut noter qu'avec une protection traditionnelle par le disjoncteur haute tension, la coupure de l'alimentation nécessite un temps de 4 à 6/100 de seconde.

Les réalisations

Elles mettent en œuvre les divers schémas de base que l'on vient d'examiner.

Les automotrices Z 6150 à 6185 (fig. 6)

Cette série de 36 automotrices, d'une puissance nominale de 800 kW (1200 kW à la fin du démarrage), a été mise en service sur la banlieue Nord début 1971. Elle a constitué la première application généralisée des thyristors, car ils y assu-

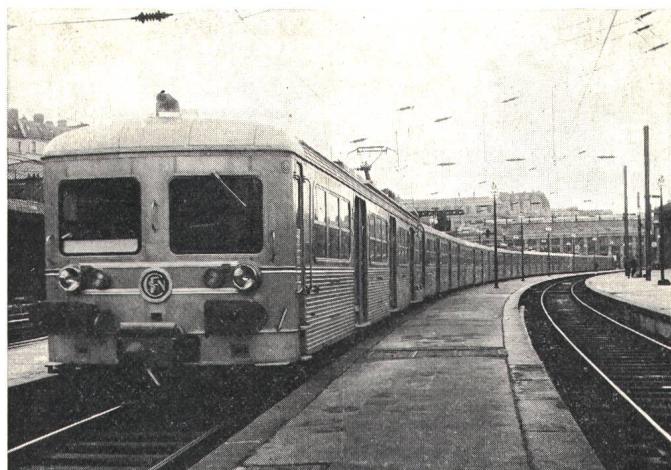


Fig. 6 Éléments automoteurs de banlieue
(Série Z 6150 à 6185)

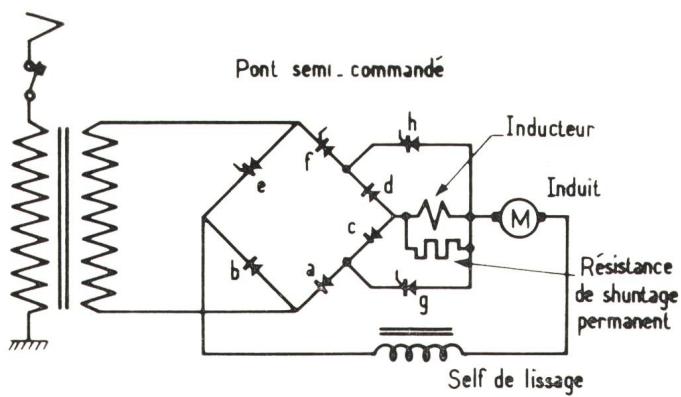


Fig. 7 Schéma de puissance des éléments
Automoteurs Z 6150 à 6185

Composition des bras de Pont:

- en *a* et *b*: 5 chaînes de chacune 3 diodes en série
- en *c*: 5 diodes en parallèle
- en *d*: 4 diodes en parallèles
- en *e* et *f* (réglage de tensions):
4 chaînes de chacune, 5 thyristors en série
- en *g* et *h* (shuntage): 3 thyristors en parallèle

rent toutes les fonctions de traction: réglage de tension et réglage de champ. Le schéma et la constitution de ces ensembles redresseurs sont donnés à la fig. 7.

Suivant une disposition adoptée par la S.N.C.F., pour les automotrices, les semi-conducteurs sont montés sur des châssis horizontaux installés sur toiture (fig. 8) et protégés, en partie supérieure, par un capot métallique. Une ventilation très efficace est assurée par le déplacement du véhicule.

Les dispositifs de commande des thyristors sont groupés dans une armoire installée dans l'automotrice. Les transformateurs d'impulsion associés, en blocs moulés, aux ensembles résistance-capacité sont montés au droit de chaque thyristor.

Les locomotives BB15001 à 15065 (fig. 9)

La livraison de cette série de locomotives, d'une puissance nominale de 4400 kW, a débuté en juillet 1971. Ces engins comportent deux moteurs de traction d'une puissance unitaire de 2200 kW (1500 V, 1550 A).

La fig. 10 donne le schéma de principe du circuit de puissance et la constitution des ensembles thyristors.

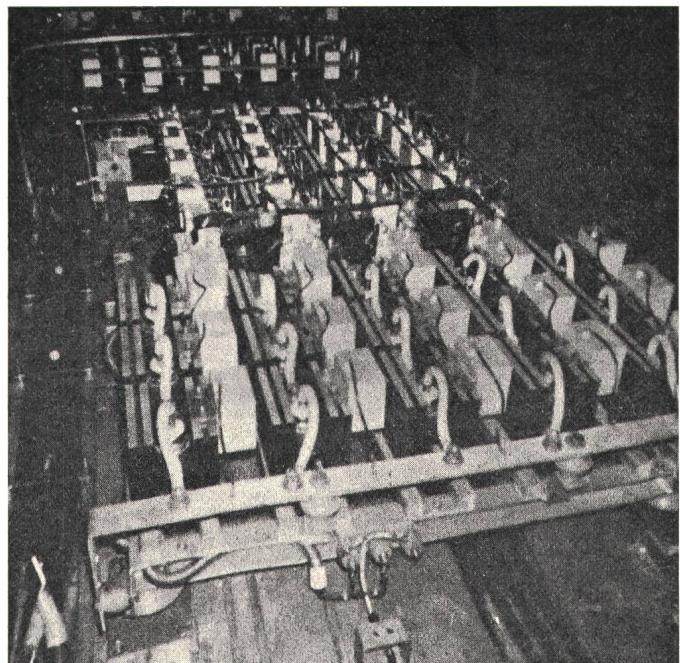


Fig. 8 Ensemble redresseur des éléments
Automoteurs Z 6150 à 6185
(installation sur toiture)



Fig. 9 Locomotive, Série BB 15001 à 15065

Pour les raisons indiquées précédemment, chaque moteur de traction est alimenté par deux ponts commandés montés en série. Pour assurer le freinage par récupération, le premier est un pont complet.

Les schémas, traction ou freinage, sont obtenus par le jeu d'un commutateur. L'excitation séparée en freinage est assurée à partir d'une prise d'un secondaire et réglée par l'un des ponts mixtes.

En traction, le réglage est obtenu par déblocages successifs des thyristors

- du pont complet,
- du pont mixte,
- du dispositif de réglage de champ.

L'enveloppe des caractéristiques effort-vitesse est indiquée à la fig. 11. On y remarque la loi de limitation de l'intensité assurée par la régulation d'intensité. La variation du réglage étant continue, tous les points du plan $F(V)$ ainsi défini sont utilisables.

En freinage, le pont d'excitation et les ponts onduleurs sont successivement débloqués et la fig. 12 donne l'enveloppe des caractéristiques effort-vitesse obtenues. Ici également, tous les points situés à l'intérieur de cette enveloppe sont utilisables.

Les dispositifs de commande permettent d'exploiter complètement toutes les ressources de ces modes de réglage et le conducteur peut choisir à sa guise le mode de conduite, soit manuel, soit à vitesse affichée.

En conduite manuelle, traction ou freinage, le conducteur fixe l'intensité qu'il veut obtenir et les circuits de la locomotive assurent automatiquement la régulation correspondante en respectant les limites indiquées sur les enveloppes effort-vitesse.

En conduite à vitesse affichée, le conducteur fixe d'une part la vitesse qu'il souhaite atteindre puis maintenir et, d'autre part, la valeur limite d'intensité. Les circuits de régulation assurent alors la mise en vitesse, la réduction convenable d'intensité à l'approche de la vitesse affichée, le réglage de l'intensité pour le maintien de la vitesse, le freinage par récupération entrant, si nécessaire, automatiquement en service.

Les fig. 13 et 14 donnent la vue du manipulateur de la locomotive ainsi que les schémas synoptiques de principe des divers modes de conduite.

Les procédés mis en œuvre, dans cette régulation, permettent d'obtenir une remarquable précision. Les variations de la vitesse, autour de la valeur de consigne, sont inappréciables ainsi que l'on peut le constater sur la photocopie d'une bande d'enregistreur (fig. 15).

Un tel résultat est obtenu avec un très petit nombre de fonctionnements d'appareillage et, à ce sujet, il est intéressant d'indiquer les relevés suivants. Sur une locomotive à équipement traditionnel (graduateur et redresseurs) assurant essentiellement la remorque de trains rapides, on compte environ 7 fonctionnements d'équipement au km. Sur une locomotive à thyristors tel que la BB 15000, assurant les mêmes services, on note seulement une manœuvre d'équipement tous les 40 km environ (commutation traction-freinage, marche sur l'erre) et par le jeu du blocage des thyristors, ces fonctionnements se produisent sans coupure de courant.

Par ailleurs, il convient d'indiquer que la mise en œuvre du frein sur la rame, entraîne, sur la locomotive, la substitution immédiate du freinage par récupération au freinage

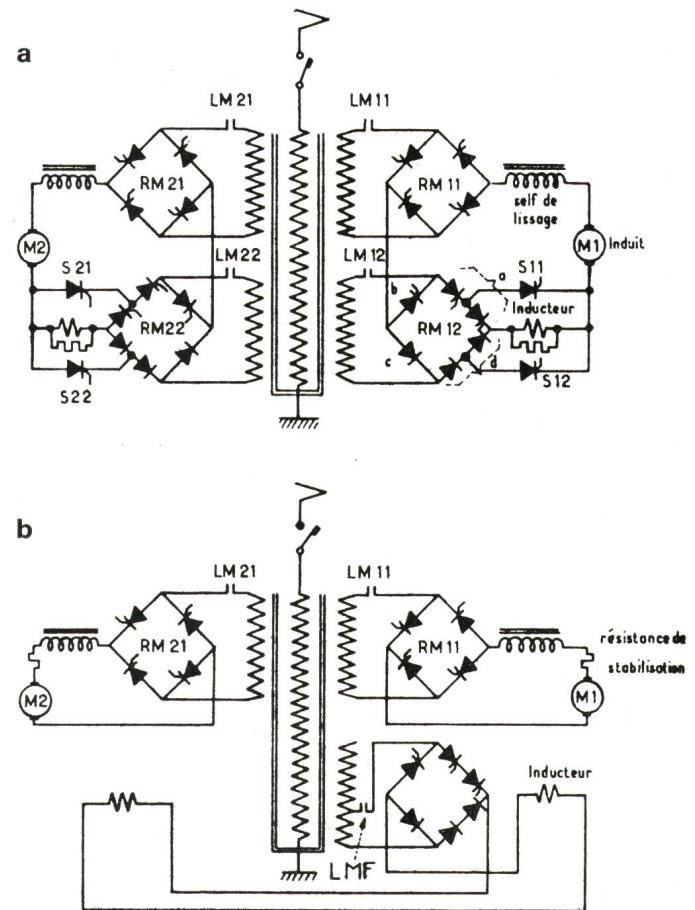


Fig. 10 Schéma de principe du circuit de puissance des BB 15000

a traction

b freinage par récupération

Constitution des ponts

RM 11-RM 21: Pour chaque bras 4 chaînes de chacune 2 thyristors

RM 12-RM 22: Bras a et b: 3 chaînes de chacune 2 thyristors
Bras c et d: 5 chaînes de chacune 2 diodes

S 11-S 12: Pour chaque dérivation

S 21-S 22: 2 thyristors en parallèle

pneumatique. La valeur de l'effort de freinage électrique est automatiquement réglée en fonction de la dépression dans la conduite générale. Toute contrainte sur les roues, soit thermique, soit mécanique, se trouve ainsi évitée.

Dans le cas exceptionnel de freinage d'urgence (dépression, dans la conduite générale, supérieure à 2 bars) un freinage rhéostatique, à fonctionnement indépendant de la caténaire, est automatiquement mis en action. Le rhéostat est constitué par les résistances de stabilisation. Ce freinage est alors superposé à une partie de freinage pneumatique.

Les éléments automoteurs Z 6401 à 6450
(Paris-St-Lazare à Versailles et St-Nom-la-Bretèche)

Le marché pour la fourniture de ces éléments a été notifié en 1973. Ces éléments sont constitués de 2 motrices encadrant 2 remorques. Chaque motrice est équipée de 4 moteurs de traction type EMW 510 identiques à ceux des automotrices Sud-Ouest Z 5300 (tension nominale 750 V, régime continu 415 A).

Le schéma de principe des circuits de puissance est donné à la fig. 16 et constitue, ici encore, une application générali-

Fig. 11
Caractéristiques $F(v)$ et $F(I)$ en traction
sous 25 kV, 50 Hz
Locomotives BB 15000

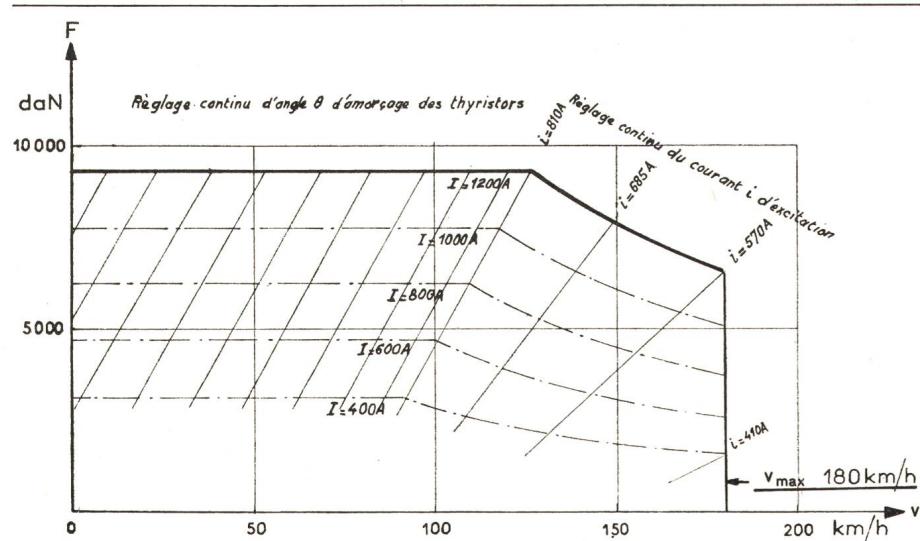
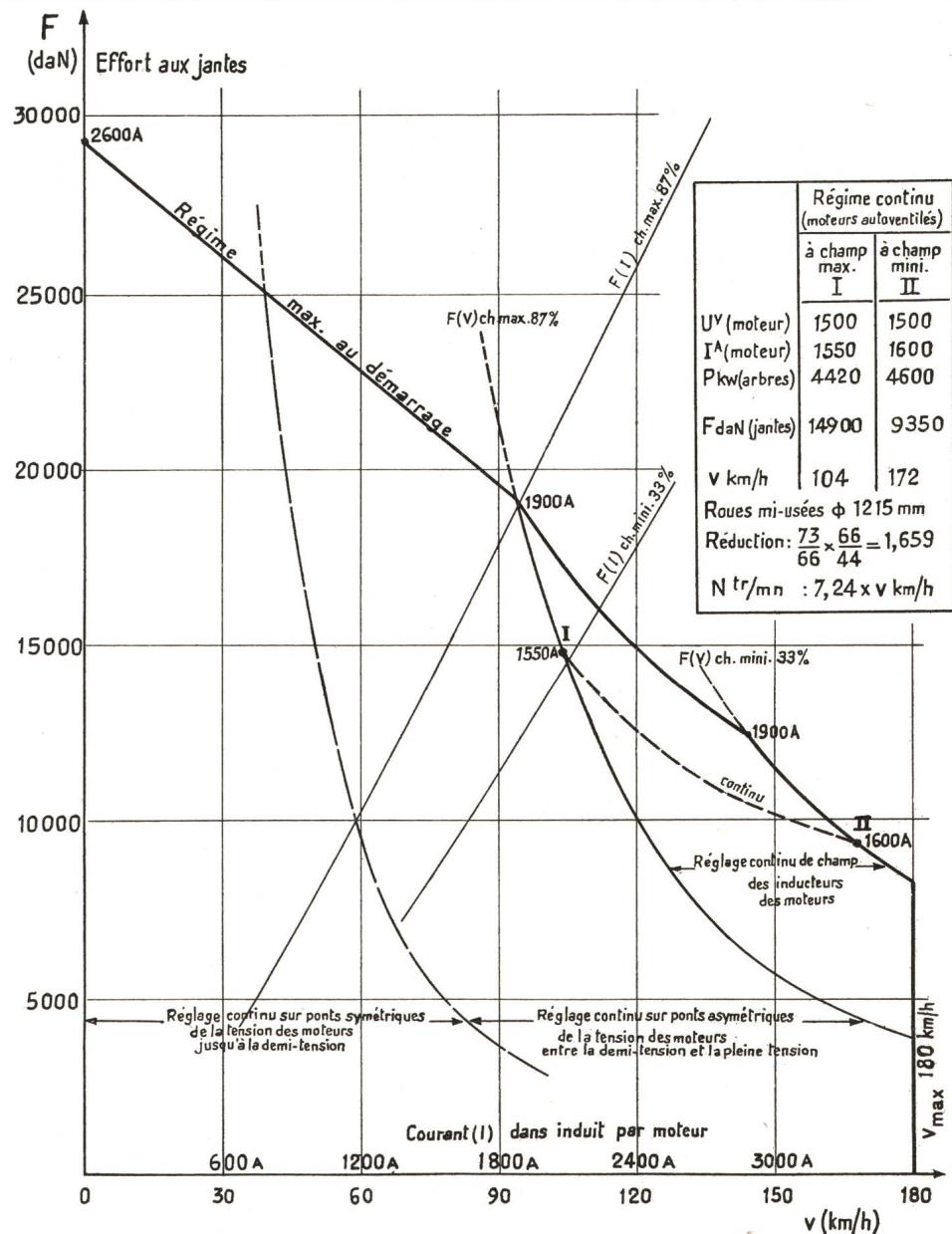


Fig. 12
Caractéristiques $F(v)$ en freinage par récupération
Freinage de maintien et freinage de service
Locomotives BB 15000

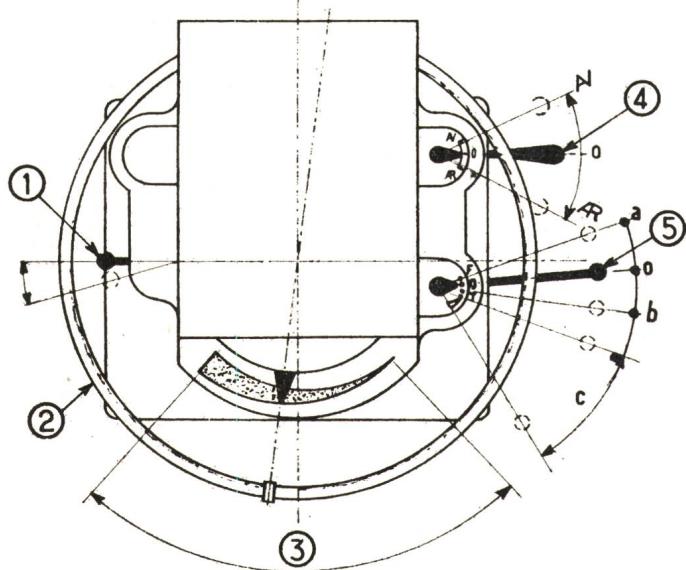


Fig. 13 Manipulateur des BB 15000

- 1 Manette de verrouillage du manipulateur
- 2 Volant du manipulateur
- 3 Plage d'affichage d'intensité du moteur
- 4 Manette d'inversion
- 5 Sélecteur de marche:
 - a Position freinage (commande manuelle)
 - b Position traction (commande manuelle)
 - c Commande de vitesse imposée

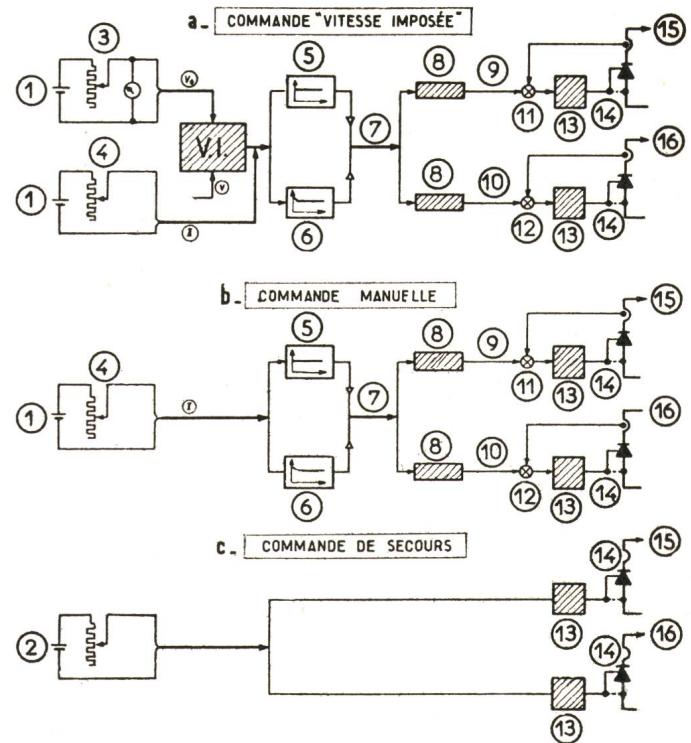


Fig. 14 Principe des circuits de commande

- | | |
|---|----------------------------|
| 1 Alimentation stabilisée | 8 Correction anti-patinage |
| 2 Batterie | 9 I référence moteur 1 |
| 3 Affichage de vitesse
(manette V. I.) | 10 I référence moteur 2 |
| 4 Affichage d'intensité
(volant du manipulateur) | 11 Mesure I moteur 1 |
| 5 Freinage | 12 Mesure I moteur 2 |
| 6 Traction | 13 Déphaseur-Allumeur |
| 7 Référence I générale | 14 Gachette |
| | 15 Moteur 1 |
| | 16 Moteur 2 |

sée de l'emploi des thyristors (réglage de tension, réglage de champ, freinage par récupération).

Chaque moteur de traction est alimenté par un secondaire qui lui est propre. Les exigences du fonctionnement en freinage par récupération nécessitent la présence de 4 ponts complets à thyristors.

Pour éviter toutefois, au démarrage, une altération trop importante du facteur de puissance, ces ponts présentent, en traction, un fonctionnement en ponts mixtes grâce à la mise en service d'un bras de diodes supplémentaire.

On remarque le réglage de champ par le schéma devenu traditionnel avec thyristors de dérivation.

En récupération, les bras de diodes sont déconnectés et chaque pont complet fonctionne en onduleur. L'excitation des moteurs est assurée grâce à un pont mixte spécial.

Sur ces automotrices (comme sur les locomotives BB 15 000) le conducteur peut, à volonté, utiliser soit la conduite manuelle à intensité affichée, soit la conduite à vitesse imposée avec limitation, à son gré, de l'intensité au démarrage.

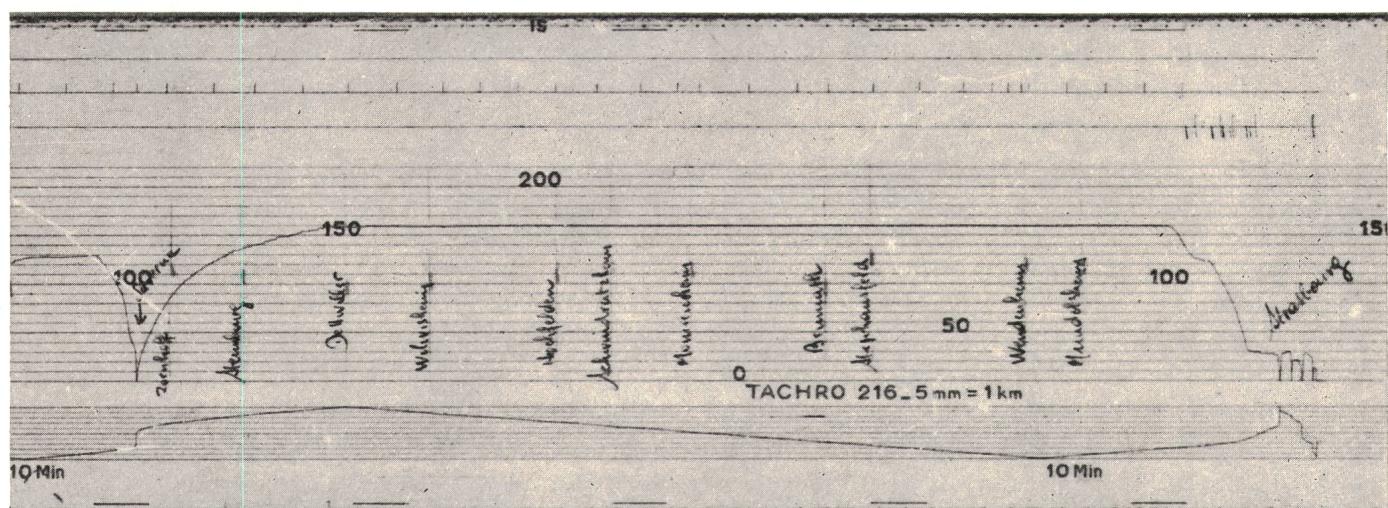


Fig. 15 Une bande d'enregistreur de vitesse de BB 15000

La loi adoptée pour la variation d'intensité permet d'assurer de bonnes conditions de confort. La valeur d'intensité élaborée par l'équipement de l'automotrice de tête sert de référence aux autres équipements. Localement, la limite d'intensité admissible est modifiée proportionnellement à la charge du véhicule. Ce réglage est obtenu à partir d'un manostat à action continue qui donne la valeur moyenne

$$\frac{P_1 + P_2}{2}$$

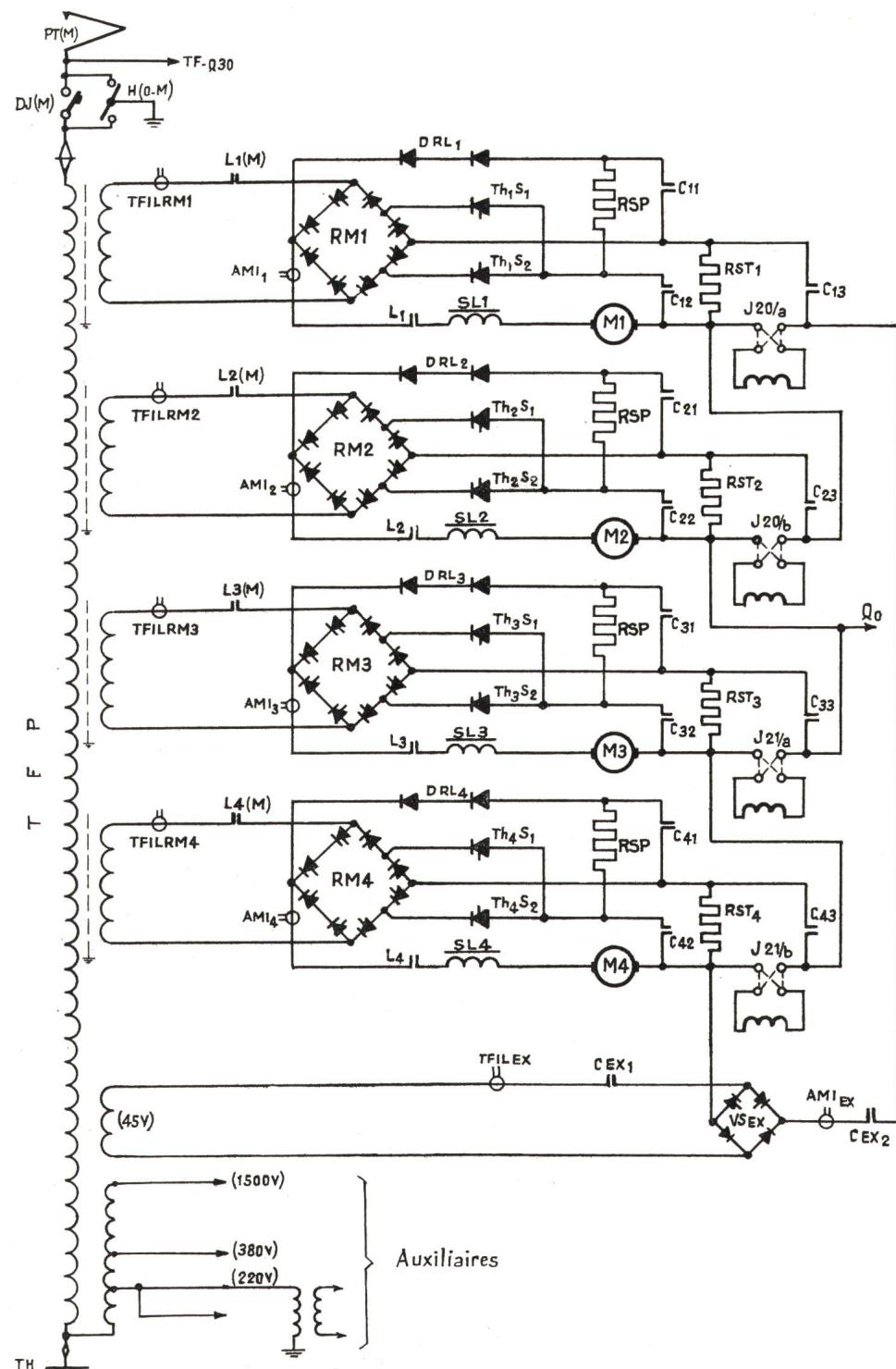
des pressions existant dans 2 coussins de suspension pneumatique situés diagonale sur l'automotrice.

Avant introduction dans le régulateur d'intensité, cette grandeur est, si nécessaire, corrigée par l'action du dispositif d'antipatinage.

Les caractéristiques «effort-vitesse» en traction sont données à la fig. 17.

Le freinage par récupération est systématiquement substitué, sur l'automotrice, au freinage pneumatique soit pour la régulation en vitesse imposée, soit pour les freinages d'arrêt ou de ralentissement.

L'effort maximal de freinage électrique est automatiquement réglé en fonction de la charge de l'automotrice par le



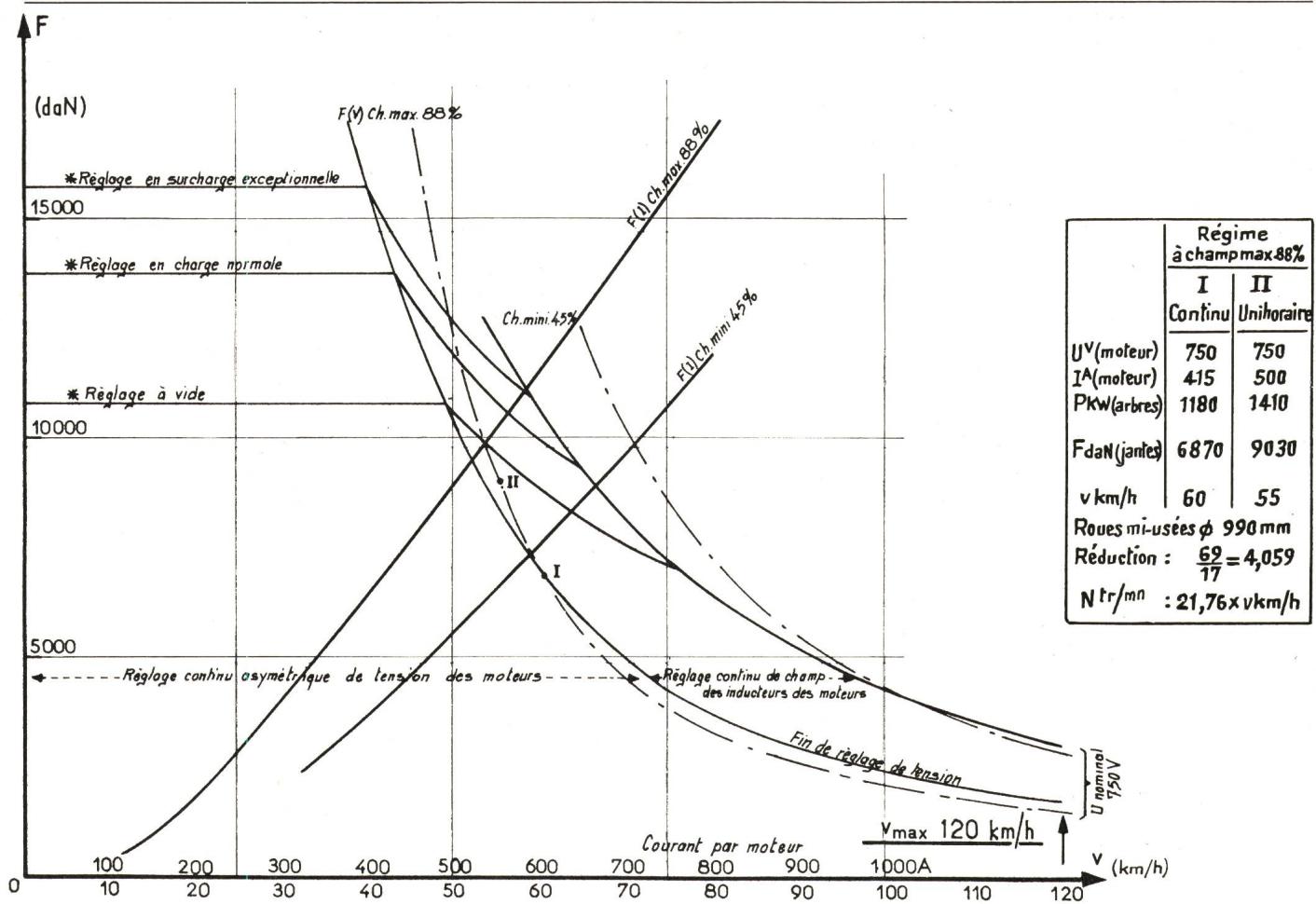


Fig. 17 Caractéristiques $F(v)$ traction sous 25 kV, 50 Hz de l'Automotrice Z 6400

Effort total aux jantes

Réglage correspondant à coefficient d'adhérence de 19 % environ

Résistance moteur (à 110 °C) $\begin{cases} \text{Ch 88\% : } 0,0656 \Omega \\ \text{Ch 45\% : } 0,0502 \Omega \end{cases}$

Vitesse d'emballement: 3525 tr/mm (162 km/h)

procédé décrit précédemment pour la marche en traction. Les caractéristiques effort-vitesse en freinage sont données à la fig. 18.

La remarquable efficacité du freinage électrique des motrices a permis de limiter, dans les cylindres à frein des re-

morques, la pression, à la valeur moitié de celle qui serait normalement pratiquée. La pleine pression n'est établie que dans les seuls cas de freinage d'urgence (dépression dans la conduite générale supérieure à 2 bars) ou de raté de freinage par récupération (manque de tension en ligne par exemple).

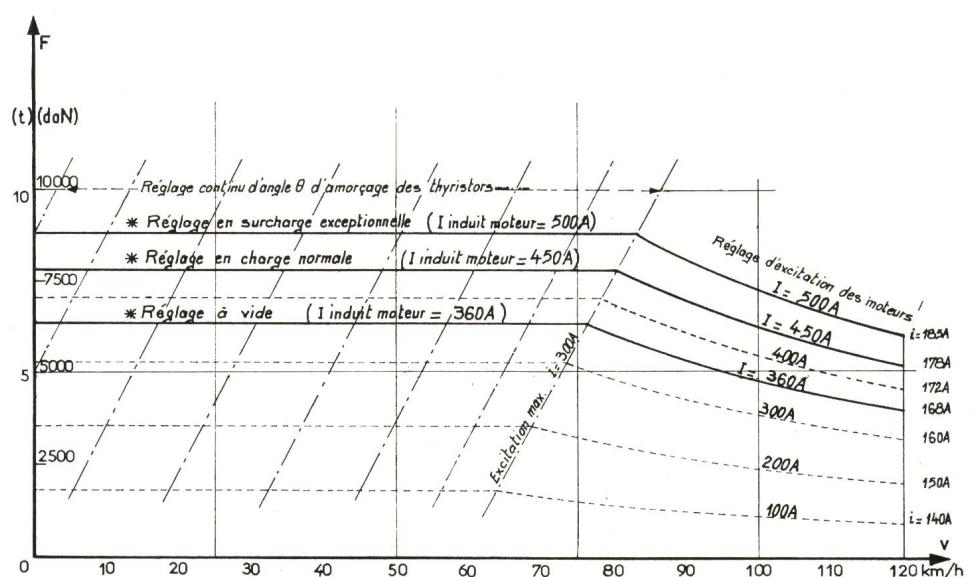


Fig. 18

Caractéristiques $F(v)$ freinage par récupération de l'Automotrice Z 6400

Effort de retenue aux jantes

v Vitesse

Réglage correspondant à coefficient d'adhérence de 11% environ

Engins à courant continu

Jusqu'à ces dernières années, les engins de traction à courant continu présentent, à de très rares exceptions près (locomotives de manœuvre à groupe tournant), le même schéma de principe. Le démarrage s'effectue par élimination de résistances, le réglage de la vitesse s'obtient d'une part, par couplage des moteurs de traction en série, série-parallèle ou parallèle et, d'autre part, par réglage du champ des moteurs de traction. La locomotive ou automotrice à courant continu a surtout évolué par ses composants (moteurs de traction, appareillage).

L'apparition de thyristors, de caractéristiques convenables, a permis de changer complètement la physionomie de la locomotive à courant continu et les avantages apportés sont même beaucoup plus substantiels que dans le cas de la traction à courant monophasé. Les radiationnels rhéostats de démarrage et dispositifs de changement de couplage n'existent plus. Les énormes appels d'intensité au démarrage disparaissent.

La locomotive présente alors un réglage de tension absolument continu et l'intensité captée en ligne varie proportionnellement à la puissance à la jante effectivement développée.

Ici encore, les montages à thyristors permettent d'assurer les diverses fonctions:

réglage de tension,
réglage de champ,
freinage électrique.

Les schémas de base

Le réglage de tension

Le schéma de principe du dispositif de réglage de tension que nous désignerons sous le nom de «hacheur» est donné à la fig. 19a. Il se compose essentiellement d'un thyristor (ou ensemble de thyristors) que l'on rend périodiquement conducteur et que l'on éteint, à point nommé, par un dispositif d'extinction (capacité auxiliaire dont le courant se substitue à celui débité par le thyristor ou l'ensemble des thyristors). Pendant les périodes d'extinction, l'énergie emmagasinée dans la self de lissage se déverse dans le moteur, la continuité du circuit étant alors assurée par la diode (appelée communément diode de «roue libre»). Mais la self de ligne risque de gêner le fonctionnement des hacheurs et, sans d'autres précautions, le courant pris à la caténaire aurait une forme hachée.

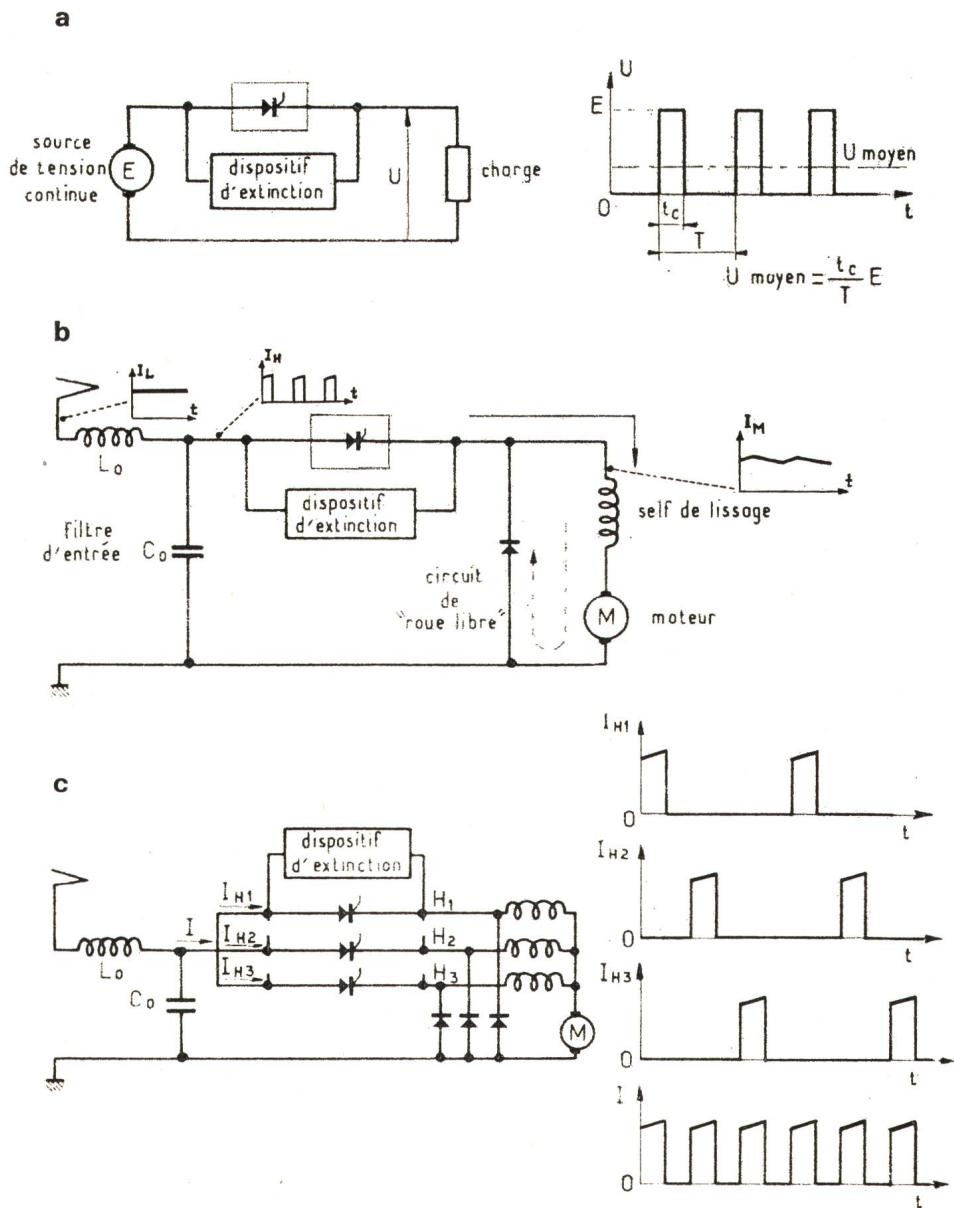


Fig. 19

Hacheurs

Schémas de principe

a Principe fondamental du hacheur

b Hacheur avec circuit de «roue libre» et filtre d'entrée

c Hacheurs entrelacés

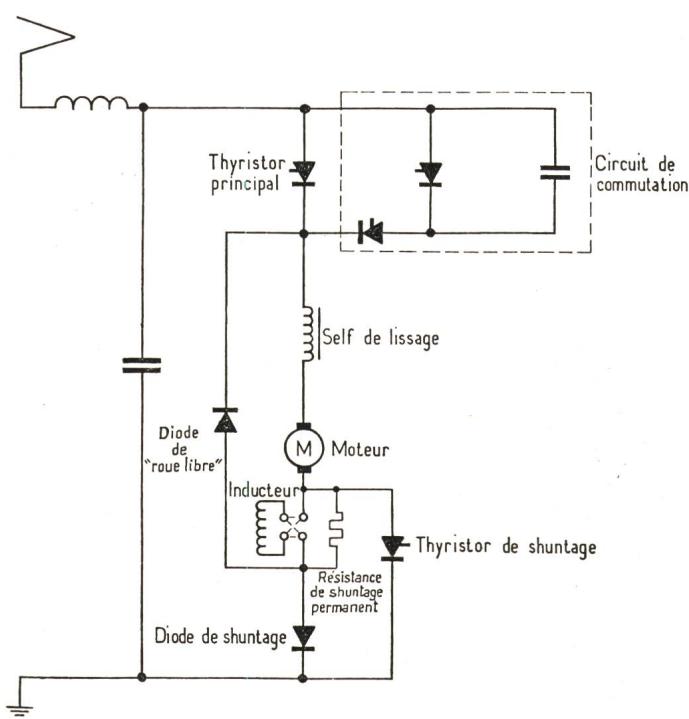


Fig. 20 Schéma du réglage de champ avec thyristors de dérivation avec un équipement à hacheur

Aussi est-il indispensable d'introduire, en amont du hacheur, un filtre self-capacité dont le rôle est de régulariser les ponctions d'énergie. Ainsi, l'intensité prélevée à la ligne est pratiquement continue. Sa valeur est la moyenne de l'intensité périodique absorbée par le hacheur et l'ensemble hacheur-filtre se comporte, en définitive, comme un transformateur à rapport variable (fig. 19b).

Le réglage de la tension moyenne délivrée par le hacheur peut être obtenu de deux manières différentes:

durée fixe des créneaux de tension et fréquence variable,
durée variable des créneaux de tension et fréquence fixe.

C'est ce deuxième mode de réglage que la S.N.C.F. a retenu pour les hacheurs de puissance connectés à la caténaire. En effet, l'adoption d'une fréquence fixe permet de prévoir, de façon certaine, la gamme des fréquences des harmoniques de courant et d'éviter la présence de certaines fréquences dangereuses pour les circuits de signalisation.

Le premier mode de réglage, à fréquence variable, peut être utilisé sans inconvénient pour des hacheurs auxiliaires de faible puissance.

Afin de réduire l'importance du filtre, on utilise, dans le cas de puissances importantes, l'artifice qui consiste à alimenter le moteur de traction par plusieurs hacheurs dont les fonctionnements sont décalés, dans le temps, les uns par rapport aux autres. Ce mode de fonctionnement est couramment désigné par le terme «entrelacement» et la fig. 19c donne le schéma correspondant. On y remarque que chaque hacheur élémentaire possède sa propre self de lissage et ses diodes de «roue libre».

Dans le cas de fonctionnement à fréquence fixe, le réglage continu du temps de conduction du hacheur permet d'obtenir la variation continue de la tension et on dispose ainsi d'une infinité de caractéristiques effort-vitesse.

Le comportement d'une locomotive à courant continu à hacheurs est ainsi similaire à celui d'une locomotive monophasée à thyristors.

Réglage de champ

Par un schéma directement dérivé de celui des locomotives monophasées à thyristors, il est possible d'obtenir très simplement le réglage continu du champ des moteurs de traction (fig. 20). Ce dispositif présente l'avantage de ne nécessiter aucun système d'extinction pour les thyristors de réglage de champ. En effet, ceux-ci s'éteignent naturellement, en même temps que les thyristors du hacheur principal.

Antipatinage

Chaque moteur étant alimenté par un ensemble de réglage de tension qui lui est propre, l'antipatinage, sur la totalité du plan effort-vitesse est obtenu par réduction rapide de l'intensité débitée par le hacheur correspondant au moteur qui patine. Cette réduction est dosée en fonction de l'importance du patinage.

Protection

En cas de défaut sur le moteur de traction, la protection intervient de façon ultra-rapide par extinction et blocage des hacheurs correspondants.

Freinage rhéostatique

Le freinage rhéostatique avec hacheur présente la propriété intéressante de permettre le réglage continu de la valeur apparente du rhéostat de freinage suivant la valeur du temps de conduction du hacheur (fig. 21a).

Freinage par récupération

Le freinage par récupération avec hacheur est possible, même avec moteurs à excitation série et le schéma de la

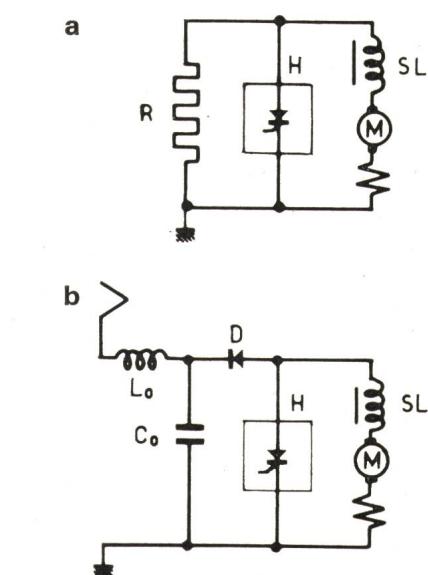


Fig. 21 Freinage électrique pratiqué au moyen d'un hacheur

Schémas de principe

a freinage rhéostatique

b freinage par récupération

M Moteur de traction

R Résistance de freinage

L_0, C_0 Filtre et entrée

SL Self de lissage

D Diodes utilisées comme diodes de «roue libre» en traction

H Hacheur

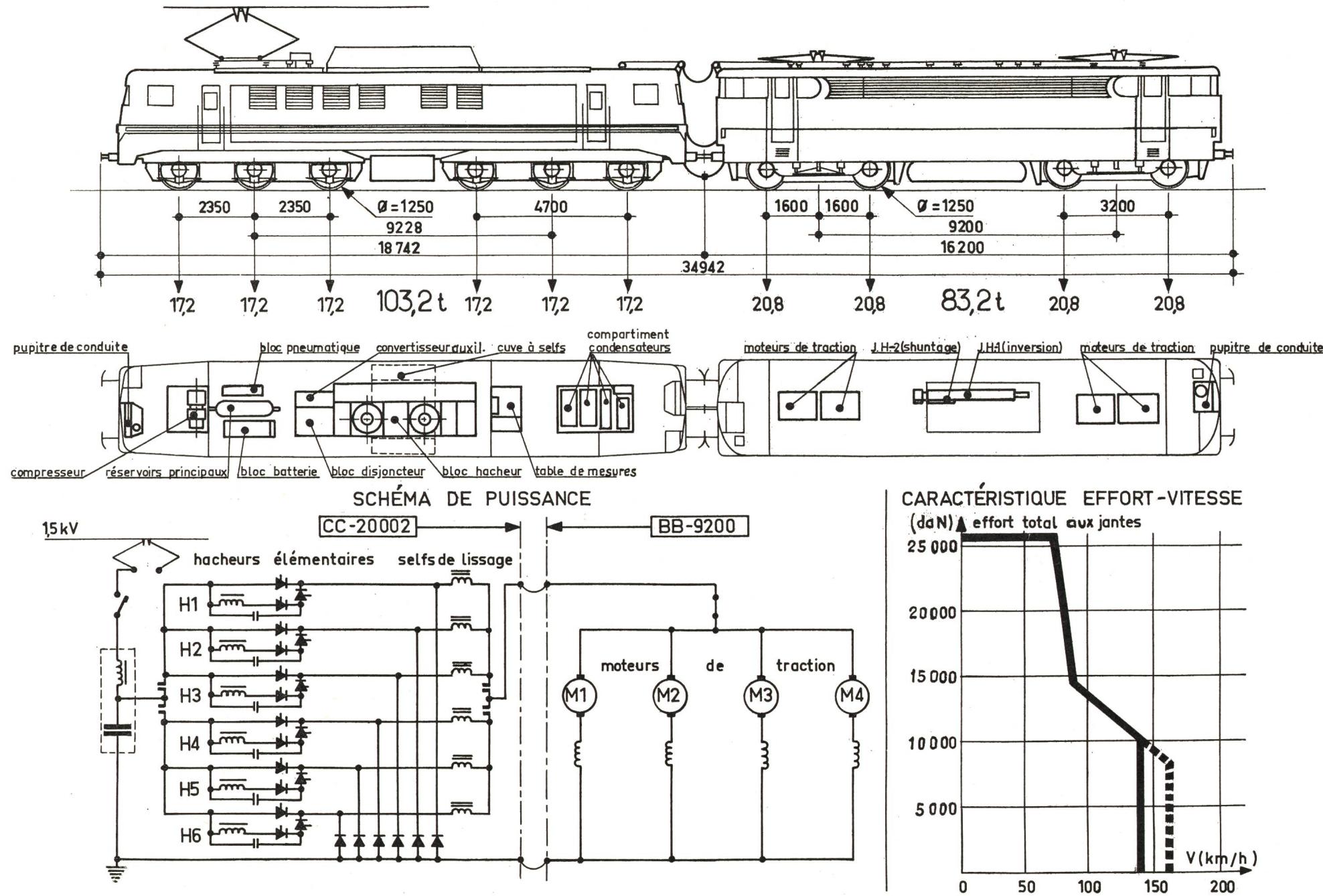


Fig. 22 Engin expérimental à hacheur de grande puissance 4400 kW

fig. 21b en donne le principe. L'ensemble moteur self est périodiquement court-circuité par le hacheur. Lors de l'extinction du hacheur, la f.e.m. de l'ensemble «moteur self» débite sur le réseau et la récupération a lieu pour des tensions de génératrice inférieures à la tension de ligne.

Les réalisations

Elles mettent en œuvre les divers schémas de base qui viennent d'être examinés.

Des réalisations expérimentales, de petite puissance, ont permis de se familiariser avec ce type de convertisseur. Puis ont été abordées, vers 1968, des expérimentations d'un niveau de plusieurs centaines de kW (400 à 600 kW) pour parvenir en 1970 à la réalisation d'un ensemble hacheur de très grande puissance (4400 kW régime continu, 5700 kW régime de démarrage).

L'ensemble CC 20002 et BB 9252

Pour l'expérimentation de ce hacheur, le plus puissant au monde, il fut décidé de constituer un engin purement générateur qui serait accouplé à une locomotive de puissance (BB 9200) sur laquelle le hacheur assurerait directement l'alimentation, sous tension variable, des 4 moteurs de traction couplés en parallèle. Le hacheur fut installé dans la caisse d'une ancienne locomotive (CC 20002) qui venait d'être retirée du service. La fig. 22 montre la vue générale de cet ensemble, son installation et le schéma de principe des circuits de puissance. Le hacheur était installé dans un bloc dont la fig. 23 donne une vue prise côté semi-conducteurs.

L'ensemble CC 20002 + BB 9252 a effectué de très nombreux essais en vue de vérifier si rien ne s'opposait, du point de vue des perturbations signalisation et télécommunications, à la mise en service d'une série de locomotives de puissance à hacheurs.

Ces essais se sont déroulés d'abord sur la ligne de Brétigny à Dourdan où ont été effectuées toutes les mesures préliminaires sur les circuits de voie. Les essais se sont ensuite poursuivis sur les sections de ligne: Les Aubrais-Vierzon, Vierzon-Limoges, Limoges-St-Sulpice et se sont terminés sur Tours-Angoulême fin mai 1972. La fig. 24 donne une vue de la rame d'essai dont la charge totale était de 780 t. Ces essais ont permis de vérifier que, pour éviter de façon certaine, toute perturbation de signalisation, il convenait d'utiliser, en marche normale, la fréquence $f = 300$ Hz pour le fonctionnement d'un hacheur élémentaire. Pour obtenir les faibles tensions de démarrage, seules les fréquences $f/27 - f/9 - f/3$ devaient être retenues.

Tous les problèmes concernant les perturbations sur les télécommunications ont été entièrement résolus.

Plus rien ne s'oppose donc à l'utilisation d'engins de puissance à hacheurs et la S.N.C.F., pour le renouvellement de son parc de locomotives à courant continu, s'est orientée vers cette formule en commandant en septembre 1973:

80 locomotives BB 7200 à courant continu
120 locomotives BB 22200 bicourant
(1,5 kV-, 25 kV~, -50 Hz)

Les locomotives BB 7201 à 7280 à courant continu

Ces locomotives à courant continu sont directement dérivées des locomotives BB 15000 dont elles possèdent la partie mécanique (bogies, caisse), et les moteurs de traction.

L'ensemble de réglage de tension est celui expérimenté sur la CC 20002 et le réglage de champ est obtenu de manière statique par thyristors de dérivation.

La récupération d'énergie sur le réseau n'étant plus systématiquement assurée en raison de la mise en service d'un nombre toujours croissant de sous-stations à redresseurs à diodes, le freinage électrique est du type rhéostatique avec excitation séparée des moteurs par le hacheur principal.

Comme sur la locomotive BB 15000, un freinage rhéostatique de secours, dont le fonctionnement est indépendant de la tension caténaire, est mis en service en cas de freinage d'urgence (dépression dans la conduite générale supérieure à 2 bar).

La fig. 25 donne le schéma de puissance de ces locomotives qui possèdent, par ailleurs, tous les modes de fonctionnement qui ont été décrits au sujet de la BB 15000:

conduite, à effort affiché, en traction et en freinage,
conduite en vitesse imposée, etc.

Dès le mois de mai 1974, le prototype BB 7003 de cette série, obtenu par la transformation de la BB 15007, sera mis en service.

La fig. 26 montre la disposition de l'appareillage de cette locomotive.

Les locomotives bicourant BB 22201 à 22320

La complexité des commutations à réaliser, pour passer du schéma d'une locomotive monophasée à thyristors à celui

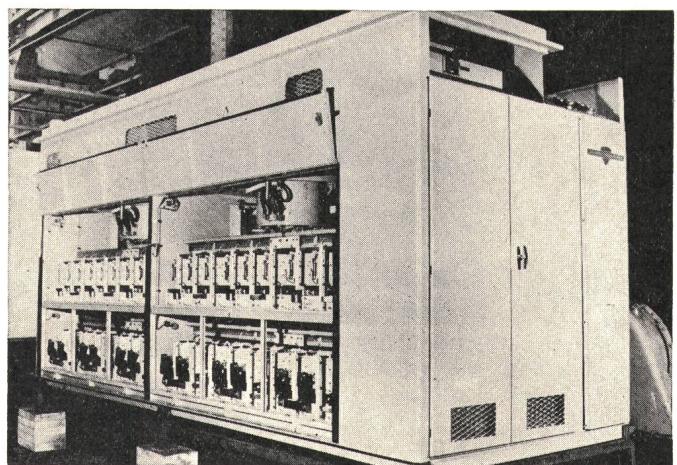


Fig. 23 Bloc hacheur de la CC 20002

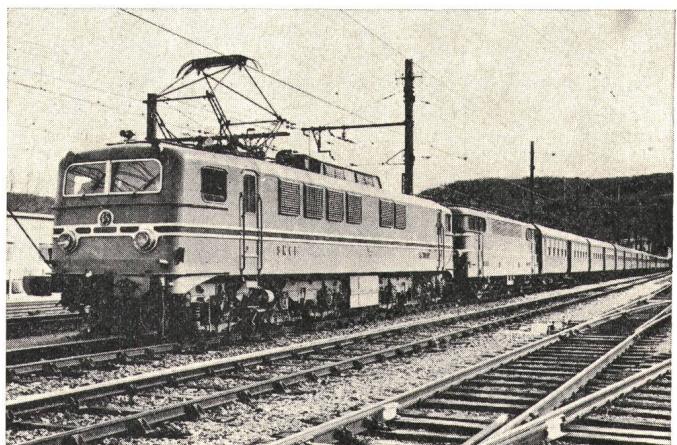


Fig. 24 Rame d'essai remorquée par l'ensemble expérimental CC 20002 et BB 9252

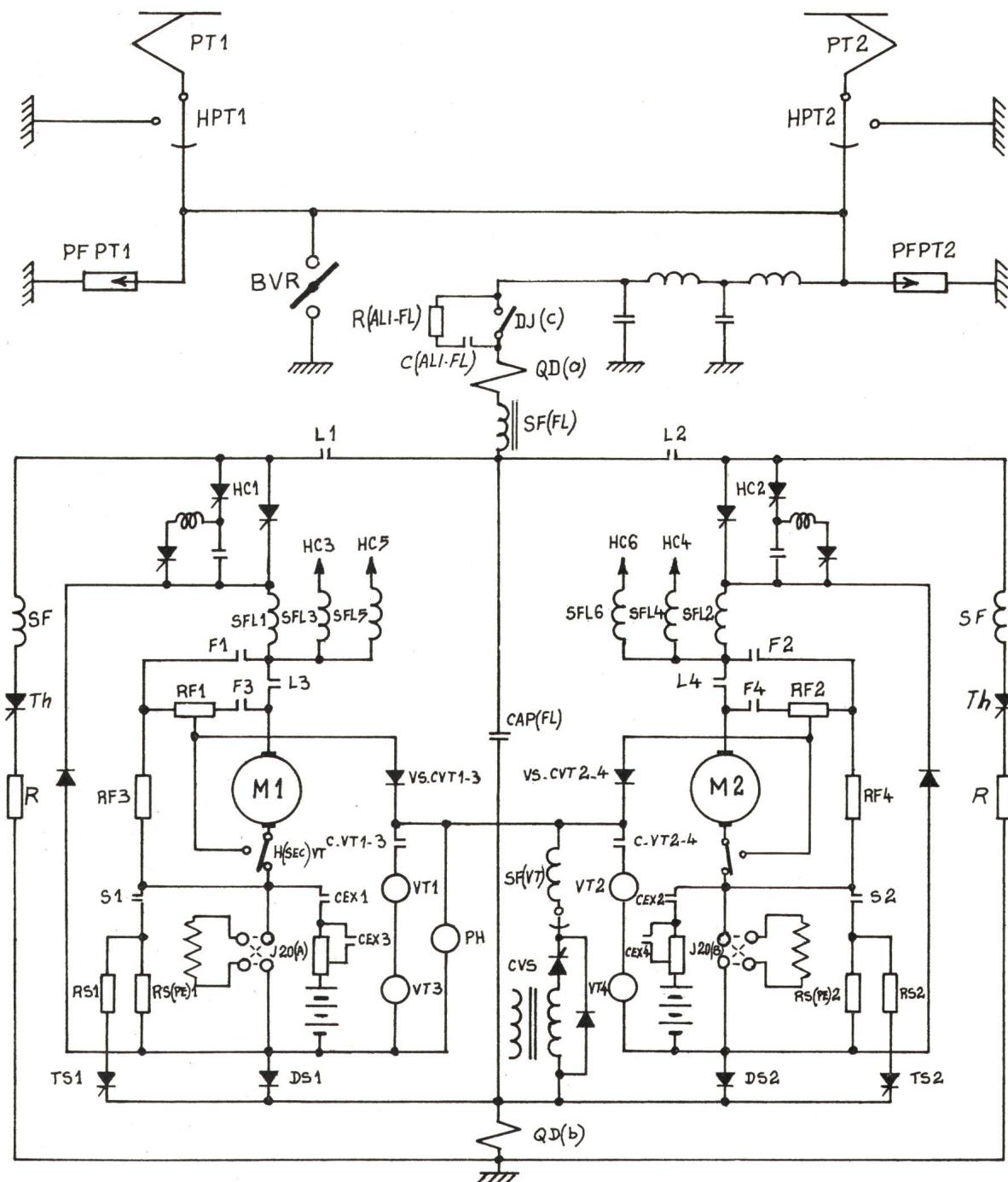


Fig. 25 Locomotives BB 7200 Schéma de puissance et auxiliaires

$DJ(c)$	Disjoncteur «continu»	$S1-S2$	Contacteurs de shuntage
$SF(Fl)$	Self du filtre de ligne	$TS1-TS2$	Thyristors de shuntage
$CAP(Fl)$	Capacité du filtre de ligne	$DS1-DS2$	Diodes de shuntage
$HC1$ à $HC6$	Hacheurs	$RF1-RF2$	Résistances de freinage
SF	Self du limiteur de tension	$RF3-RF4$	$RF3-RF4$
Th	Thyristor du limiteur de tension	$RS(PE) 1$	Résistances de shuntage permanent
R	Résistance du limiteur de tension	$RS(PE) 2$	$RS(PE) 2$
$SFL1-SFL2$		$RS1-RS2$	Résistances de shuntage
$SFL3-SFL4$	Selfs de lissage	$VT1-VT2$	Groupes ventilateurs
$SFL5-SFL6$		$VT3-VT4$	
$M1-M2$	Moteurs de traction	PH	Groupe moto-pompe à huile
$L1-L2-L3-L4$	Contacteurs de ligne	CVS	Convertisseur auxiliaire
$F1-F2-F3-F4$	Contacteurs de freinage		
$CEX1-CEX2$			
$CEX3-CEX4$	Contacteurs d'excitation des moteurs en freinage d'urgence		

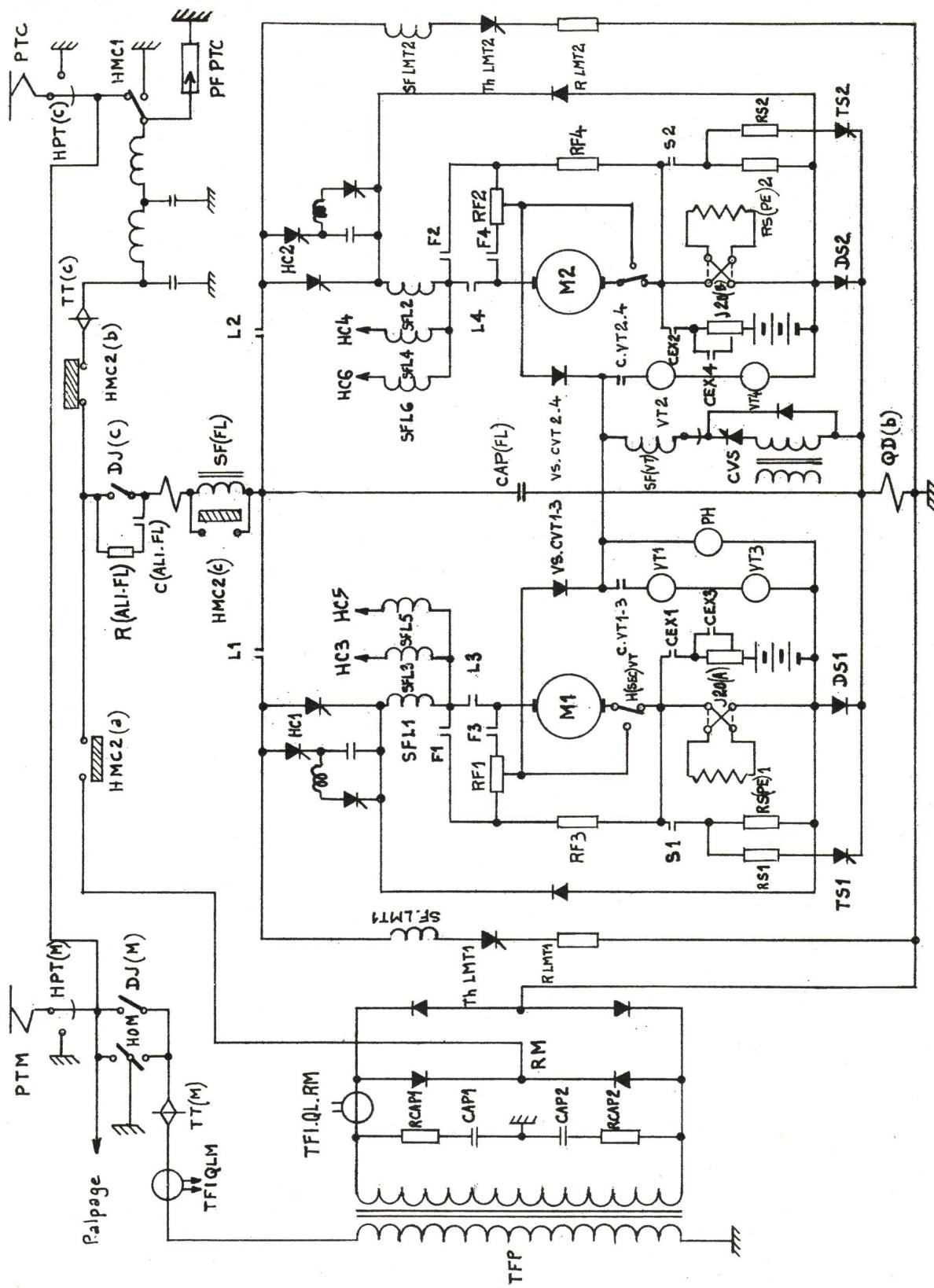


Fig. 27 Schéma de puissance et auxiliaires (BB 22200)

$DJ(M)$	Disjoncteur «monophasé»	$HMC1-2-3-4$	Commutateur «monophasé-continu»
$DJ(C)$	Disjoncteur «continu»	$F1-F2-F3-F4$	Contacteurs de freinage
TFP	Transformateur principal	$CEX1-CEX2$	Contacteurs d'excitation des moteurs
RM	Redresseur principal	$CEX3-CEX4$	en freinage d'urgence
$SF(Fl)$	Self du filtre de ligne	$TS1-TS2$	Thyristors de shuntage
$CAP(Fl)$	Capacité du filtre de ligne	$DS1-DS2$	Diodes de shuntage
$HC1$ à $HC6$	Hacheurs	$RF1-RF2-RF3-RF4$	Résistances de freinage
$SFL1-SFL2-SFL3$	Selfs du limiteur de tension	$RS(PE)1-RS(PE)2$	Résistances de shuntage permanent
$ThLMT1-ThLMT2$	Thyristors du limiteur de tension	$RS1-RS2$	Résistances de shuntage
$RLMT1-RLMT2$	Résistances du limiteur de tension	$S1-S2$	Contacteurs de shuntage
$SFL4-SFL5-SFL6$	Selfs de lissage	$VT1-VT2-VT3-VT4$	Groupes ventilateurs
$M1-M2$	Moteurs de traction	PH	Groupe moto-pompe à huile
$L1-L2-L3-L4$	Contacteurs de ligne	CVS	Convertisseur auxiliaire

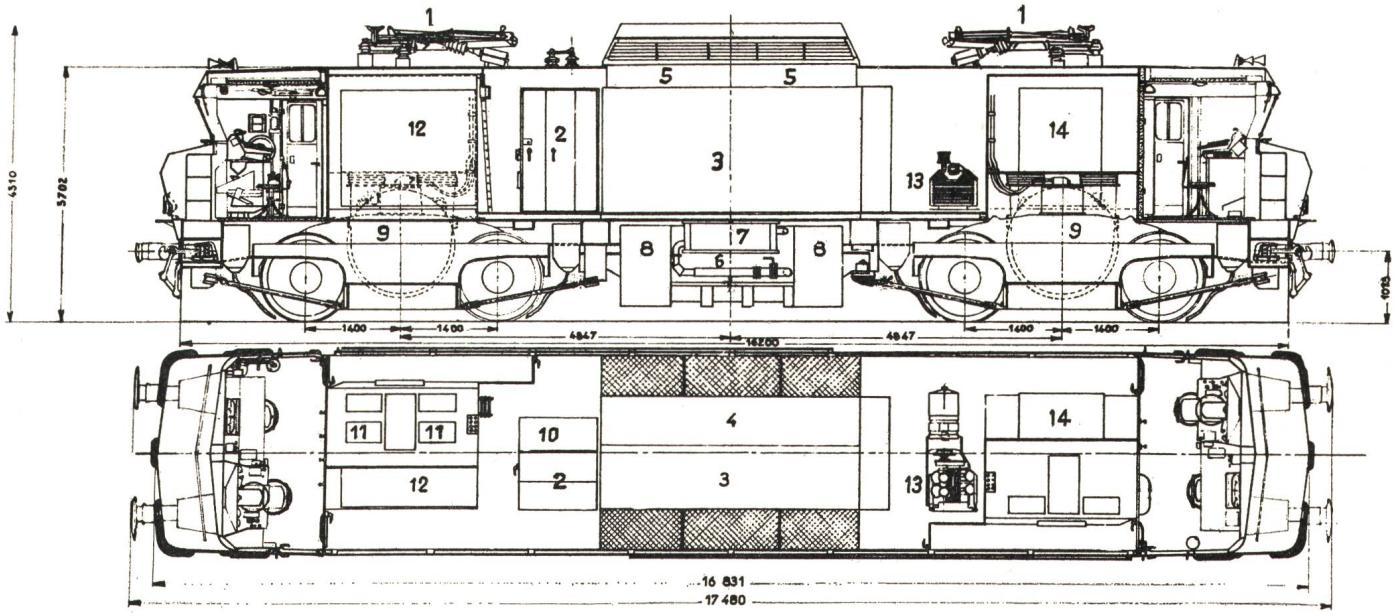


Fig. 26 Locomotive BB 7003 à courant continu Prototype de la série BB 7201 à 7280

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1 Pantographe | 6 Cuve à selfs |
| 2 Bloc disjoncteur | 7 Réfrigérant |
| 3 Hacheur principal | 8 Condensateurs du filtre |
| 4 Compartiment d'appareillage | 9 Moteurs de traction |
| 5 Résistances de freinage | 10 Convertisseur statique pour auxiliaires |

- | |
|-------------------------------------|
| 11 Transformateurs de convertisseur |
| 12 Bloc batterie |
| 13 Compresseur |
| 14 Bloc pneumatique |

d'une locomotive à hacheurs, a fait abandonner l'idée d'une telle conception, pour s'orienter vers un schéma dont la base est le hacheur précédemment décrit. Il est alimenté:

soit à partir de la caténaire sous courant continu 1500 V,
soit à partir d'un ensemble transformateur redresseur délivrant, en monophasé, une tension redressée de valeur fixe.

Ces locomotives sont donc directement dérivées de la locomotive BB 7200 décrite ci-dessus. Le transformateur principal est logé dans la même cuve que les selfs et le redresseur principal est installé dans le bloc du hacheur de puissance. La fig. 27 donne le schéma de puissance de cette locomotive.

Conclusions

Quel que soit le type d'engin moteur à courant continu, à courant monophasé ou bicourant, les thyristors permettent actuellement d'assurer tous les réglages de façon continue et entièrement statique.

Les automatismes, tel que le dispositif de vitesse imposée, qui peuvent dès lors être introduits à bord des engins mo-

teurs, apportent une aide très précieuse au conducteur. Par ailleurs, l'entretien de l'équipement se trouve notamment allégé, car le nombre de fonctionnements d'appareillage se trouve très notablement réduit.

Sous les divers systèmes de courant, l'alimentation par thyristors du traditionnel moteur à courant continu a ainsi changé profondément le comportement de l'engin. Une autre voie, qui peut être envisagée, consiste à utiliser un moteur asynchrone alimenté à fréquence variable à partir d'un onduleur. Mais en courant continu, il ne semble pas possible, avec les conditions imposées par nos actuels circuits de signalisation, d'admettre le fonctionnement de convertisseurs de grande puissance à fréquence variable. Par contre, rien ne s'oppose au développement de ce type de transmission en traction autonome (Diesel ou turbines à gaz).

Adresse de l'auteur:

A. Cossié, ingénieur principal, Département Constructions de la Direction du Matériel de la S.N.C.F., 15, rue Traversière, F-75571 Paris-Céde 12.