

Traction ferroviaire

1^{ère} partie

Evolution des choix technologiques de ces 30 dernières années

Influence des composants de l'électronique de puissance sur les choix technologiques

S'il est un domaine à la pointe du progrès dans l'utilisation des technologies les plus avancées, dans le domaine de l'électrotechnique et de l'électronique de puissance, c'est bien le secteur de la traction ferroviaire.

En effet, les motrices (dont les motrices électriques) utilisées par la SNCF, ont toujours intégrées les dernières innovations de l'électronique, de l'électronique de puissance et des machines tournantes.

De plus, il faut savoir, que la durée de vie d'un matériel de traction dépasse les 35 ans. Ces machines parcourent allégrement les 5 millions de kilomètres avant d'être reformées. Il en découle des conditions de service de ce matériel relativement sévères. Les machines de traction subissent un service quasi continu et doivent être performantes et durables. Leur maintenance a, quant à elle, non seulement un coût important financièrement, mais également un coût dû à son immobilisation (il faut remplacer la motrice car la SNCF n'arrête pas ses activités frets ou voyageurs pendant ce temps de maintenance).

Il résulte de tout cela un cahier des charges complexe, lors de la commande de nouveau matériel. Les critères les plus importants sont :

- *La performance (qui doit être la plus élevée possible)*
- *Le coût de la maintenance*
- *Une conception qui ne risque pas de tomber rapidement en désuétude*
- *Le prix*

Un document de la direction du matériel de la SNCF, (le délicat problème des choix technologiques en matière de traction) nous donne une bonne synthèse sur l'évolution des technologies utilisées des années 1970 à 1990. Nous verrons par la suite comment les gros progrès de l'électronique de puissance (apparition et fiabilisation des GTO de forte puissance, puis enfin la généralisation de IGBT) a complètement changé le paysage de l'électrotechnique, et les modifications qui en ont découlé dans le secteur de la traction ferroviaire (Eurostar, motrice dernière génération type « Prima 6000 », ou encore les projets de motorisation du futur AGV – automoteur grande vitesse).

I - Apparition du thyristor

I-1 Introduction

La fin des années 60 a vu la mise en service des CC6500. Ces machines (récemment reformées en fin 2005 / début 2006) de forte puissance, étaient architecturées autour de moteurs à courant continu, sans système convertisseur à base de composants d'électronique de puissance. Elles circulaient sur le réseau 1500V DC. Au démarrage, le MCC était couplé en série. À pleine vitesse, c'était un couplage shunt qui était utilisé. La vitesse variait, en fonction des crans de traction (41 au total), qui jouaient sur le couplage et sur une mise en série d'éléments résistifs.

Inutile de dire que le rendement, en l'absence de convertisseur, était loin d'être optimal. Ce système, néanmoins, était fiable et somme tout performant, vis-à-vis des caractéristiques que l'on souhaitait atteindre à l'époque.

Cependant, avec l'arrivée des premiers composants (diodes et thyristors) de puissance, qui permettent de commuter des courants importants, et supportant des tensions inverses conséquentes, des motrices ont été équipées, à titre expérimental, de MCC pilotés par des hacheurs à thyristors. Ces essais ont abouti, à partir de 1973, à la mise en service de prototypes de forte puissance (supérieure à 4 MW).

Les résultats plus prometteurs, de ces engins expérimentaux, ont permis à la SNCF de s'orienter vers ce type de matériel. Ainsi, nombre de locomotives de puissance, à partir de cette date, ont été équipées de hacheurs à thyristors. Les formules bicourants (1.5kV DC et 25kV AC 50Hz) étant équipées, en amont du hacheur, d'un ensemble transformateur + redresseur type pont mixte.

On retrouve parmi les modèles conçus sur ce type d'architecture les BB15000 (à courant monophasé), BB7200 (à courant continu), BB22200 (bi courant), les TGV SE, les éléments automoteurs, type Z8100 (interconnexion RAPT/SNCF) ou Z2N (automoteur continu ou bicourant, à 2 niveaux).

Avant de détailler la structure électrique des chaînes de traction utilisées et leur principe de fonctionnement, nous pouvons noter les avantages qu'ont apporté l'utilisation des thyristors dans locomotive Électriques.

Ainsi, selon M. DUPUY (directeur du matériel de la SNCF), dans son avant propos à l'article « Les locomotives électriques BB 7200 et BB 22200 de la SNCF » (écrit par M. BOILEAU, ingénieur en chef à la direction du matériel et chef du département Constructions – traction électrique), les avancées significatives apportées par les thyristors portent sur les points suivants :

- Sur les engins à thyristors, la variation des grandeurs électriques permettant la bonne exploitation d'un train, passe principalement par une action sur les circuits électroniques de commande de gâchette, au lieu de la mise en mouvement d'appareils mécaniques (graduateur, contacteur). Les équipements deviennent statiques (convertisseurs statiques).
- Cela permet principalement la finesse et la continuité des réglages, la rapidité des actions et des protections, une meilleure fiabilité, une diminution des coûts d'entretien.
- On élimine les rhéostats de démarrage et de shuntage.
- Un système simplifié pour les motrices bicourants, qui avant l'avènement du thyristor n'avaient aucun matériel commun, en amont du moteur (avec l'obligation de juxtaposer 2 équipements – continu & monophasé – en cherchant un compromis entre performance/masse/encombrement).

I-2 Les locomotives à thyristors BB15000/BB7200/BB22200

Caractéristiques

Nombre de moteur : 2 (à courant continu d'environ 2.2 MW chacun)

Puissance en régime continu : 4.4 MW (à vitesse de définition) et 4.6 MW (à vitesse maxi)

Vitesse maximale : 180 km/h

Masse par essieu : 22.3 t (BB15000) ; 21.2 t (BB7200) ; 22.6t (BB22200)

Caractéristique « effort – vitesse » : Cf. figure suivante

Fig. 3 — Caractéristiques « Effort-Vitesse » en traction des locomotives BB 15000, BB 7200 et BB22200

(2 moteurs de traction TAB 666 - Roues mi-usées $\varnothing$ 1215 mm — Réduction : 1,659)

1: $F(I)$ Champ maximal 87 %

2: $F(I)$ Champ minimal

3: Régime continu

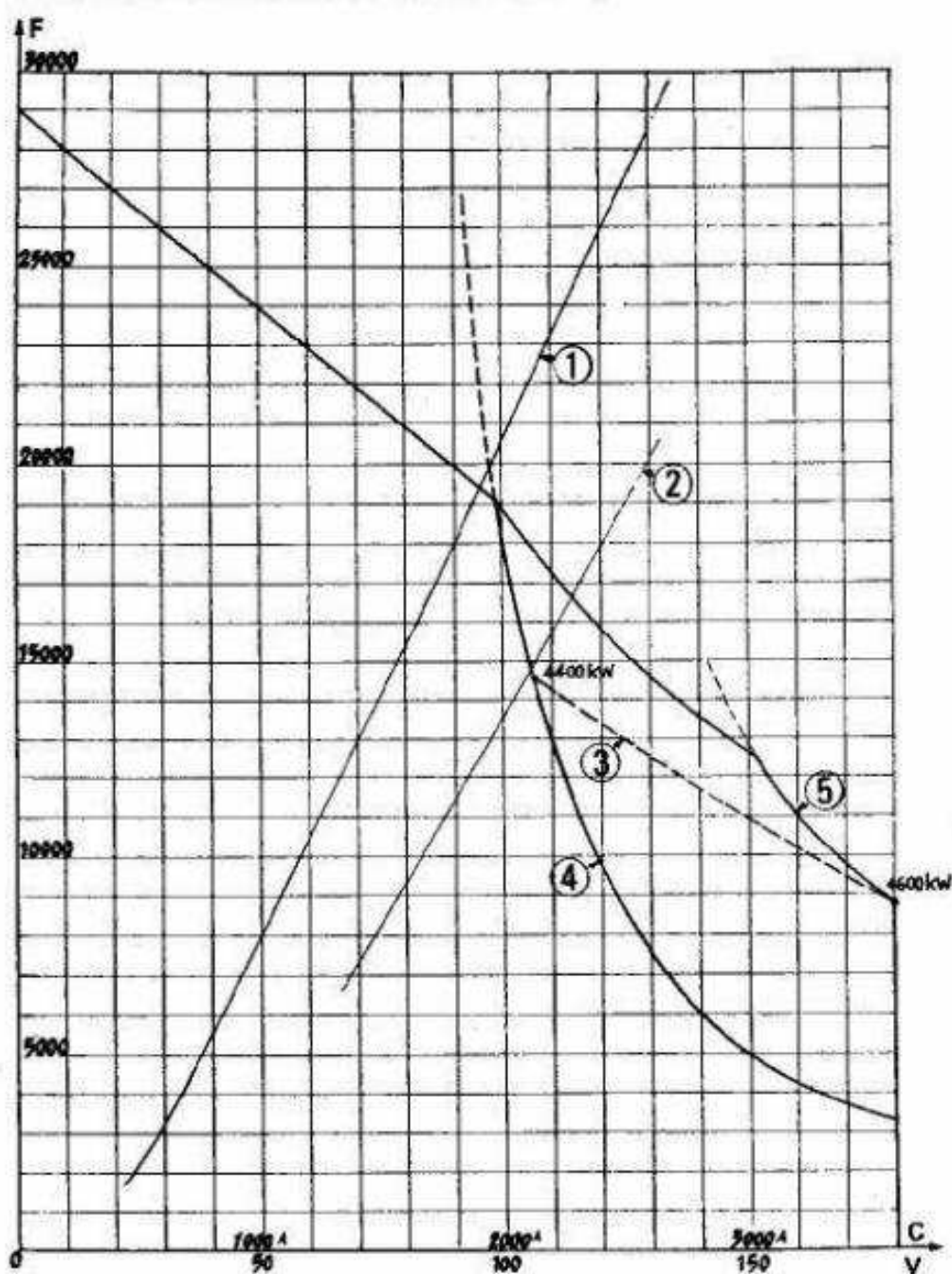
4: $F(V)$ Champ maximal - 87 % (en fin de réglage)

5: $F(V)$ Champ minimal

F : Effort total avec jantes (en daN)

V : Vitesse (en km/h) - Vitesse maximale 180 km/h

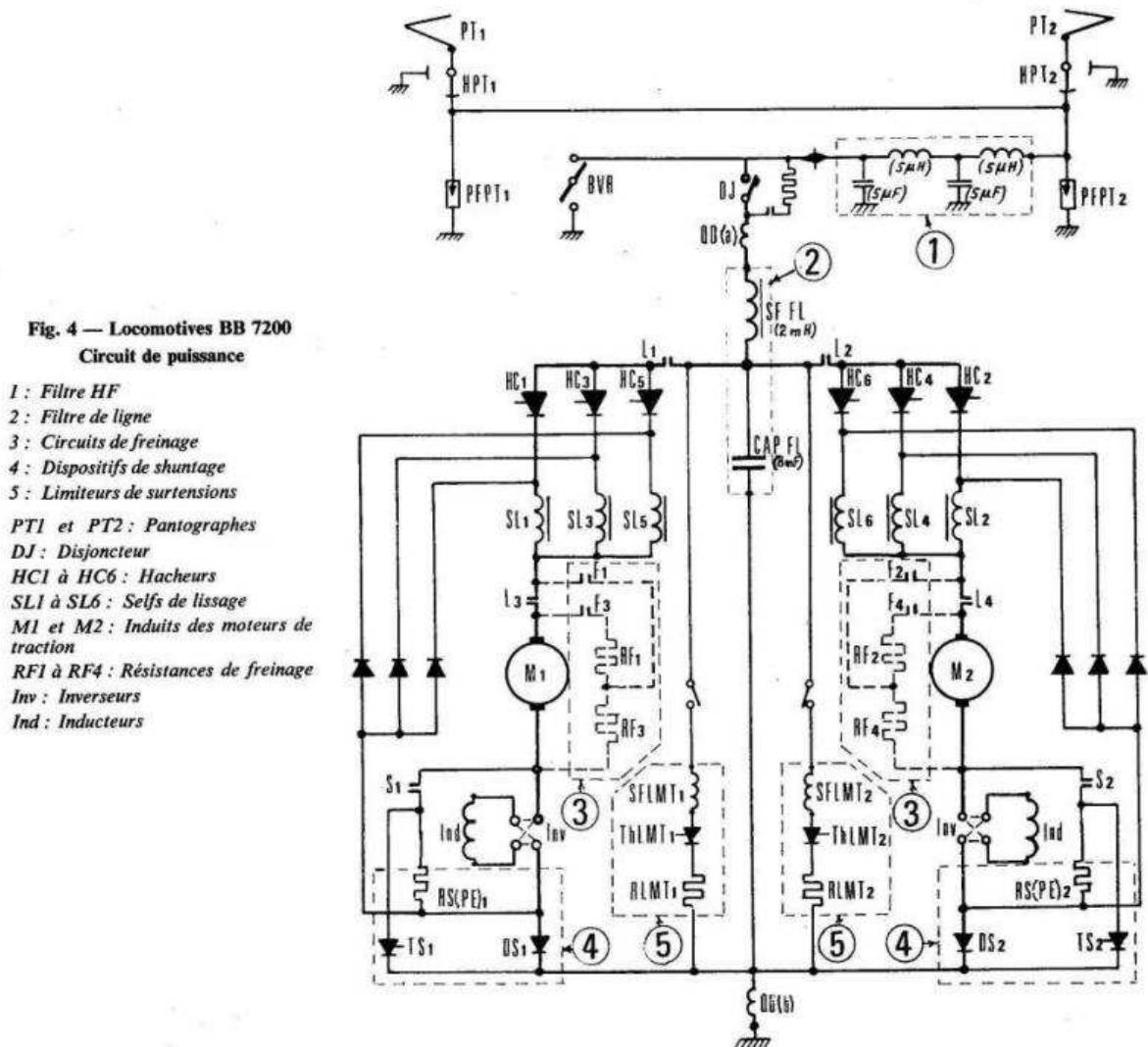
C : Intensité du courant par moteur (en A)



Avantages par rapport aux anciens systèmes

- réglage continu de la tension et du champs sur les moteurs de traction
- freinage électrique, avec réglage continu de l'effort
- freinage rhéostatique
- antipatinage rapide avec modification de l'angle de conduction des thyristors
- protection ultra rapide en cas de défaut dans les circuits de puissance pendant la traction, par blocage des thyristors

schéma du circuit de puissance de la BB7200



description

On retrouve sur ces engins :

- des hacheurs pour le réglage de la tension moteur
- des thyristors de dérivation pour le réglage du champ
- un système de freinage rhéostatique

En partant du pantographe, les principaux organes sont :

- un filtre HF constitué de 2 selfs à air de 5 μ H et de deux capacités de 5 μ F
- un disjoncteur principal ultra rapide
- un filtre passe bas comprenant une inductance de 2 mH et un bloc de capacité de 8 mF
- des contacteurs de ligne
- 6 hacheurs élémentaires à thyristors (cf. schéma et principe de fonctionnement ci après)
- un dispositif de shuntage
- le système de freinage rhéostatique
- 2 dispositifs de limitation de tension, composés d'un thyristor en série avec une résistance et une inductance

schéma d'un hacheur élémentaire

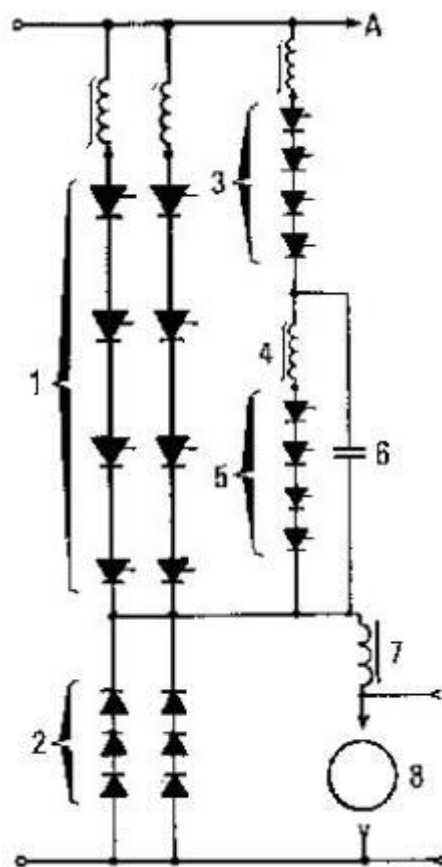


Fig. 5 — Schéma d'un hacheur élémentaire

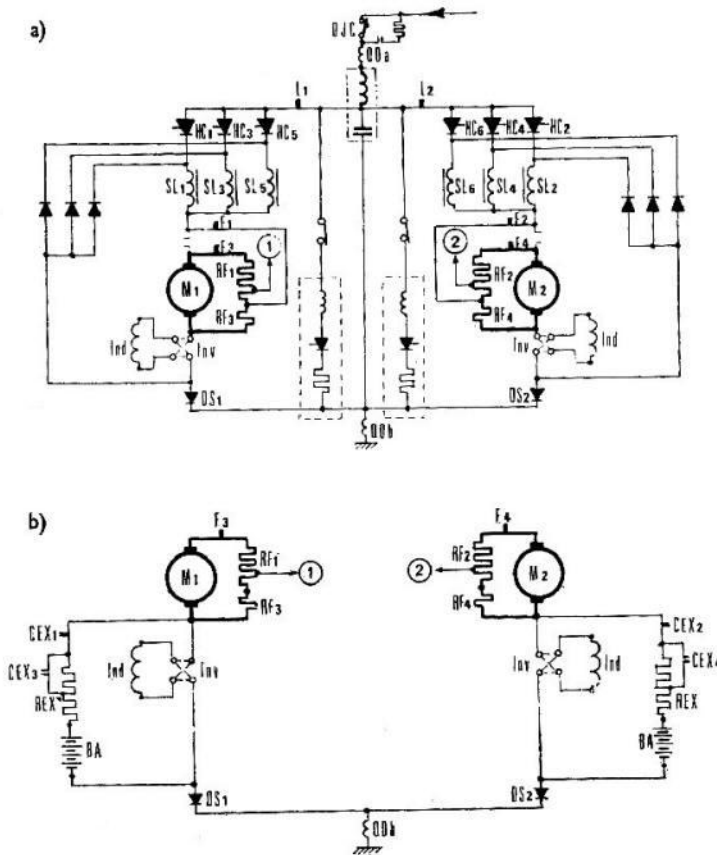
- 1 : Thyristors principaux
- 2 : Diodes de déversement
- 3 : Thyristors d'extinction
- 4 : Self d'inversion
- 5 : Thyristors d'inversion
- 6 : Capacité d'extinction
- 7 : Self de lissage
- 8 : Moteur de traction
- A : Vers les 2 autres hacheurs élémentaires

Un hacheur élémentaire (il y en a 6, qui sont pilotés à une fréquence de 300Hz, et qui fonctionnent de façon entrelacée – vue de la caténaire la fréquence de l'ensemble est donc de 1800 Hz ou de 900 Hz quand un seul des deux moteurs tractionne) comprend :

- des semi-conducteurs rapides (8 thyristors principaux et 4 d'inversion supportant une tension inverse de 1200V, un courant moyen de 400A, avec un temps de recouvrement de 25 μ s – 4 thyristors d'extinction, supportant eux 1400 V / 300 A avec un temps de recouvrement de 40 μ s – 6 diodes de déversement ou de roue libre, supportant 2500V en inverse, 400A avec un temps de recouvrement très faible de 2 μ s)
- 3 selfs de limitation des di/dt (2 en série avec les thyristors principaux et une dans le circuit d'extinction)

- une self de lissage en série avec le moteur
- une self d'inversion et une capacité d'extinction (cf. fonctionnement ci après)
- une sonde à effet Hall pour la mesure du courant

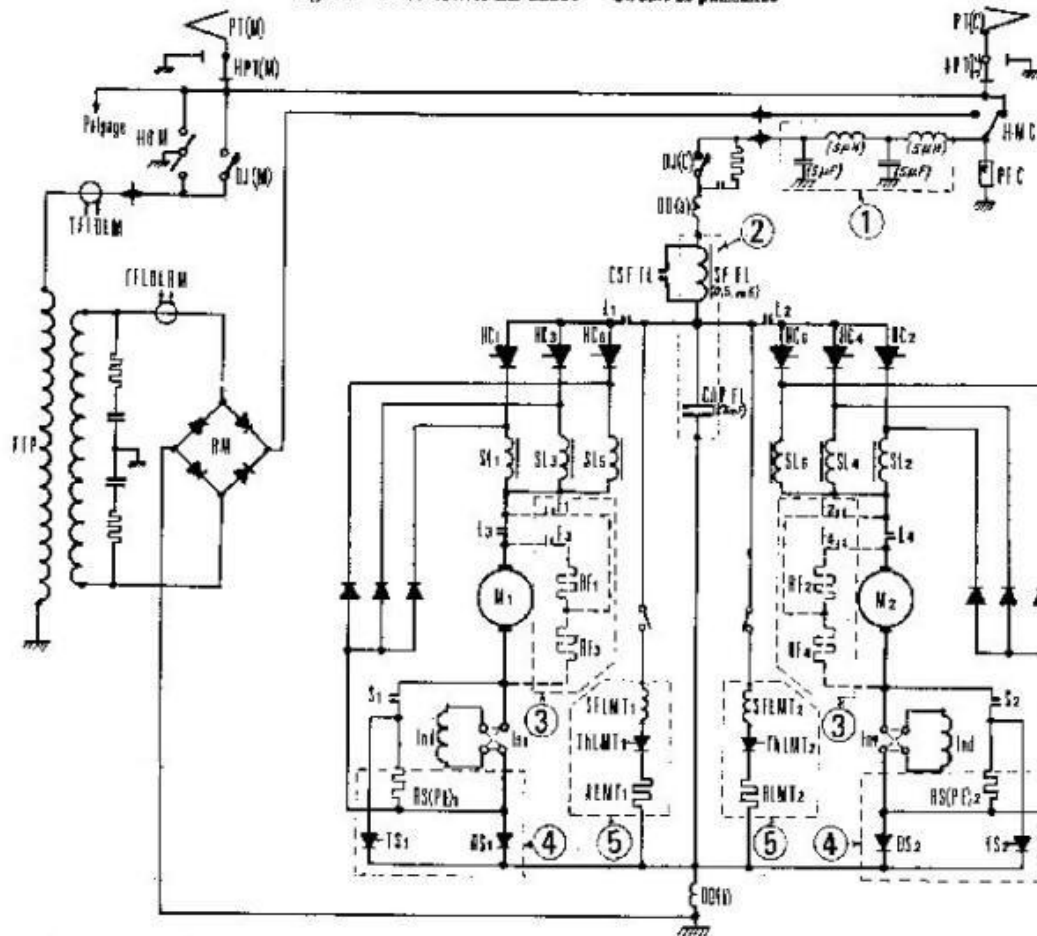
schéma du circuit de freinage



**Fig. 6 — Locomotives BB 7200 et BB 22200
Circuit de freinage**

a) : en freinage rhéostatique normal
b) : en freinage rhéostatique d'urgence
1 : vers Ventilateurs 1 et 3
2 : vers Ventilateurs 2 et 4

Fig. 12 — Locomotives BB 22200 — Circuit de puissance



1 : Filtre HF — 2 : Filtre de ligne — 3 : Circuits de freinage — 4 : Dispositifs de shuntage — 5 : Limiters de surtension — PT(M) et PT(C) : Pantographes — DJ(M) : Disjoncteur monophasé — DJ(C) : Disjoncteur « continu » — HMC : Commutateur « monophasé-continu » — TTP : Transformateur principal — RM : Redresseur principal — HCI à HC6 : Hacheurs — SL1 à CL6 : Selfs de lissage — M1 et M2 : Induits des moteurs de traction — RF1 à RF4 : Résistances de freinage — Inv : Inverseurs — Ind : Inducteurs — RS(PE) : Résistance de shuntage permanent

Cet engin reçoit, en plus par rapport à la BB7200, un transformateur principal, un redresseur principal (RM) composé en réalité de 40 diodes 2800V / 500A et la capacité (CAP FL) du filtre passe bas est portée à 28 mF au lieu de 8 sur la BB7200. Le reste est identique à ce qui est décrit précédemment pour la motrice à courant continu.

II - Les choix technologiques en 1984

II-1 Introduction

Lorsqu'il devient nécessaire de procéder à d'importantes commandes de matériel moteur, le problème qui se pose systématiquement est celui d'arrêter les choix techniques qui permettront de mettre en service un matériel qui soit :

- le plus performant possible,
- d'un faible coût de maintenance,
- d'une conception qui ne risque pas de tomber rapidement en désuétude,
- d'un prix le plus faible possible.

Pour guider ses choix, la SNCF dispose de résultats d'expérimentation d'engins prototypes, mais elle s'attache à reconduire chaque fois certains éléments dont le comportement est déjà bien maîtrisé.

En l'espace d'une dizaine d'années, la SNCF a été amenée à prendre de très importantes décisions en matière de conception d'engins moteurs et nous évoquerons ci-après deux étapes fondamentales dans ces choix techniques.

- le choix technique de 1973 qui a introduit le hacheur en traction à courant continu ou bicourant mais a reconduit le moteur à collecteur,
- le choix technique de 1984 qui a introduit le moteur sans collecteur (synchrone et asynchrone) alimentés par onduleur de courant en reconduisant l'alimentation, bien connue, par hacheur (ou ponts mixtes).

Les remarquables résultats des essais des engins expérimentaux à hacheurs de grande puissance déterminaient la Direction du Matériel de la SNCF à adopter ce type d'équipement pour Les futurs engins moteurs à construire.

La formule bicourant (1500 V courant continu, 25 kV 50 Hz) se déduisait immédiatement de celle à courant continu, par adjonction, en tête du schéma, d'un ensemble « transformateur redresseur (pont mixte) » délivrant une tension régulée constante aux bornes du filtre principal des hacheurs.

Les autres séries d'engins moteurs ont été construits suivant cette formule

- éléments automoteurs bicourant "Interconnexion SNCF RATP Z 8100, soit 370 automotrices de 1400 kW
- éléments automoteurs, à deux niveaux, à courant continu et bicourant, Z2N, soit 200 automotrices de 1400 kW
- rames automotrices TGV à V max. 270 km/h (104 rames bicourant et 7 rames tricourant (1))

II-2 Les engins prototypes

Après des expérimentations sur engins expérimentaux, diverses réalisations de prototypes à moteurs sans collecteur ont été lancées à partir de 1979, c'est-à-dire après l'étude et la mise en service des locomotives à hacheurs et des rames TGV Paris Sud-Est.

Les expérimentations, à la SNCF, en matière de traction à moteurs sans collecteur ont porté sur toutes les formules qu'il est possible d'envisager, à savoir

- moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de tension à thyristors,
- moteurs synchrones autopilotés alimentés par onduleurs de courant à thyristors,
- moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de courant à thyristors.

Rappelons très succinctement les particularités de chacune de ces formules :

Moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de tension à thyristors.

Dans ce cas, les onduleurs à thyristors à commutation forcée qui assurent le réglage, à la fois, de la tension et de la fréquence, fournissent un réseau de tensions triphasées d'amplitude et de fréquence variables qui permettent de régler la vitesse des moteurs asynchrones de traction.

Ces onduleurs à thyristors comportent des circuits oscillants (inductances, condensateurs, thyristors auxiliaires) à même d'assurer l'extinction des thyristors principaux.

Le freinage électrique de sécurité est difficile à obtenir.

Cette transmission a été appliquée à la locomotive prototype à courant monophasé BB 10003 d'une puissance de 5000 kW.

Moteurs synchrones autopilotés alimentés par onduleurs de courant à thyristors.

Le fonctionnement de ce type de moteur est tout à fait comparable à celui d'un moteur à courant continu dans lequel l'induit serait devenu fixe (stator) et l'inducteur tournant. Le réglage de la tension est assuré par ponts mixtes en monophasé et par hacheur en continu ou par la combinaison des deux en formule bicourant.

L'onduleur d'alimentation du moteur est constitué ici par six bras de simples thyristors. La commutation du courant d'un bras d'onduleur vers un autre bras se produit naturellement sous l'action des forces électromotrices du moteur.

Aux très basses vitesses, il est cependant nécessaire d'apporter une aide à la commutation ; mais les dispositifs sont très simples et de très faible masse.

Le fonctionnement du freinage électrique de sécurité ne pose, par contre, ici, aucun problème.

Cette transmission a été appliquée à la locomotive prototype à courant monophasé BB 10004 d'une puissance de 5600 kW.

Moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de courant à thyristors.

Dans cette chaîne de traction, comme dans le cas précédent, les fonctions "réglage de tension et réglage de fréquence" sont dissociées. Le réglage de tension est assuré comme dans les systèmes traditionnels par hacheur (ou pont mixte). La fréquence est réglée par l'onduleur de courant. Le moteur asynchrone n'étant pas capable d'assurer la commutation naturelle du courant, il faut lui adjoindre des auxiliaires d'assistance à la commutation (condensateurs, inductances, diodes) qui interviennent dans toute la gamme des vitesses de l'engin, contrairement à ce qui se passe avec la transmission synchrone. Néanmoins, malgré les inconvénients de masse qu'elle peut présenter, cette transmission reste beaucoup plus simple que la toute première (celle qui est à onduleurs de tension).

Dans ce cas encore, le freinage électrique de sécurité est difficile à obtenir.

Cette transmission a été appliquée à l'automoteur bicourant prototype à 2 niveaux Z 8895 de 1400 kW.

II-3 Résultats de ces expérimentations

Locomotive BB 10003 à courant monophasé.

5000 kW ; V max 160 km/h ; 35000 daN au démarrage, à 4 moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de tension à thyristors à modulation de largeur d'impulsion. Ces moteurs équipent un nouveau type de bogie bimoteur (CL93).

Le schéma de principe des circuits de puissance de cette locomotive et sa caractéristique « effort-vitesse » sont donnés ci-dessous.

Ce prototype a été mis au point pendant l'année 1985 au cours d'essais sur trains de voyageurs et sur trains de marchandises.

Toutefois, malgré

- un gain de masse d'environ 2,3 tonnes par bogie (bimoteur CL 93) par rapport au bogie classique des BB 15000 - 7200 - 22200,

- un gain de masse de 4 tonnes sur la masse des moteurs de traction ($2,6 \text{ t} \times 4 = 10,4 \text{ t}$ au lieu de $7,2 \text{ t} \times 2 = 14,4 \text{ t}$) toujours par rapport à la formule classique BB 15000 - 7200 - 22200,

l'importance de l'équipement électrique conduit, avec la conception de caisse actuelle, à une masse totale de locomotive de 91 tonnes. Certes, des gains de masse sont encore possibles grâce à de nouvelles conceptions de caisse et d'équipement électrique entre autres, en ce qui concerne les inductances de phase des moteurs.

Dans cette formule à moteurs asynchrones à onduleurs de tension à thyristors, l'équipement électrique est fort complexe (320 composants de puissance, 1400 kg de condensateurs, environ 2000 kg d'inductances) et il ne s'agit, encore, ici que d'une locomotive mono-courant.

La version bicourant, indispensable pour le service à la SNCF, apparaît, dans l'état actuel de la technique, impossible à réaliser dans la masse limite de 90 tonnes. Toutefois, les caractéristiques des nouveaux composants de puissance (thyristors à extinction par la gâchette, GTO), permettaient déjà d'envisager la réalisation d'onduleurs de tension de grande puissance avec de substantiels gains de masse par rapport aux onduleurs de tension à thyristors dont l'obsolescence se confirme.

La Société ALSTHOM proposa très rapidement la transformation de l'équipement à thyristors de la BB 10003 en équipement à GTO. Il devrait en résulter un gain de l'ordre de 5 tonnes sur la masse de la locomotive.

LOCOMOTIVE BB 10003

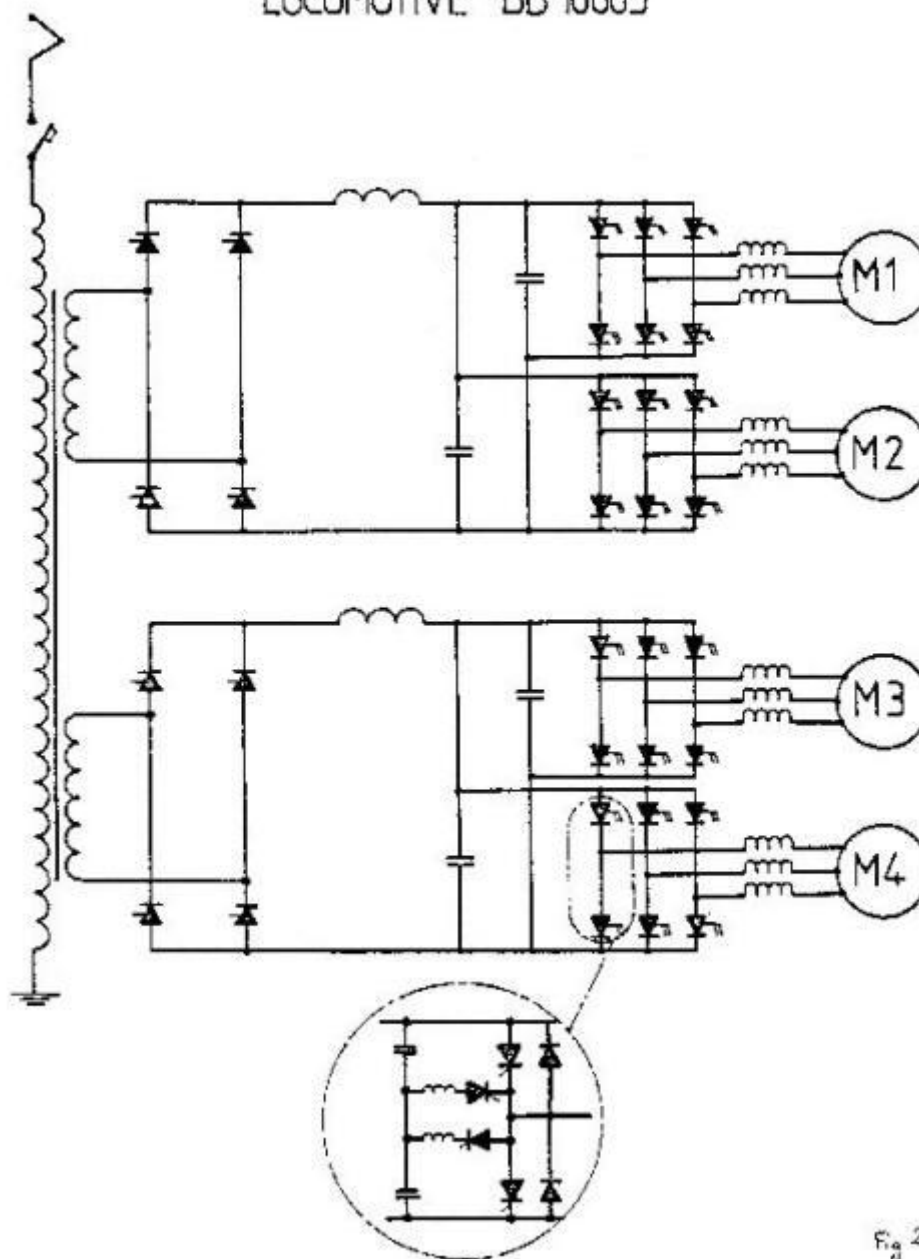


Fig. 2

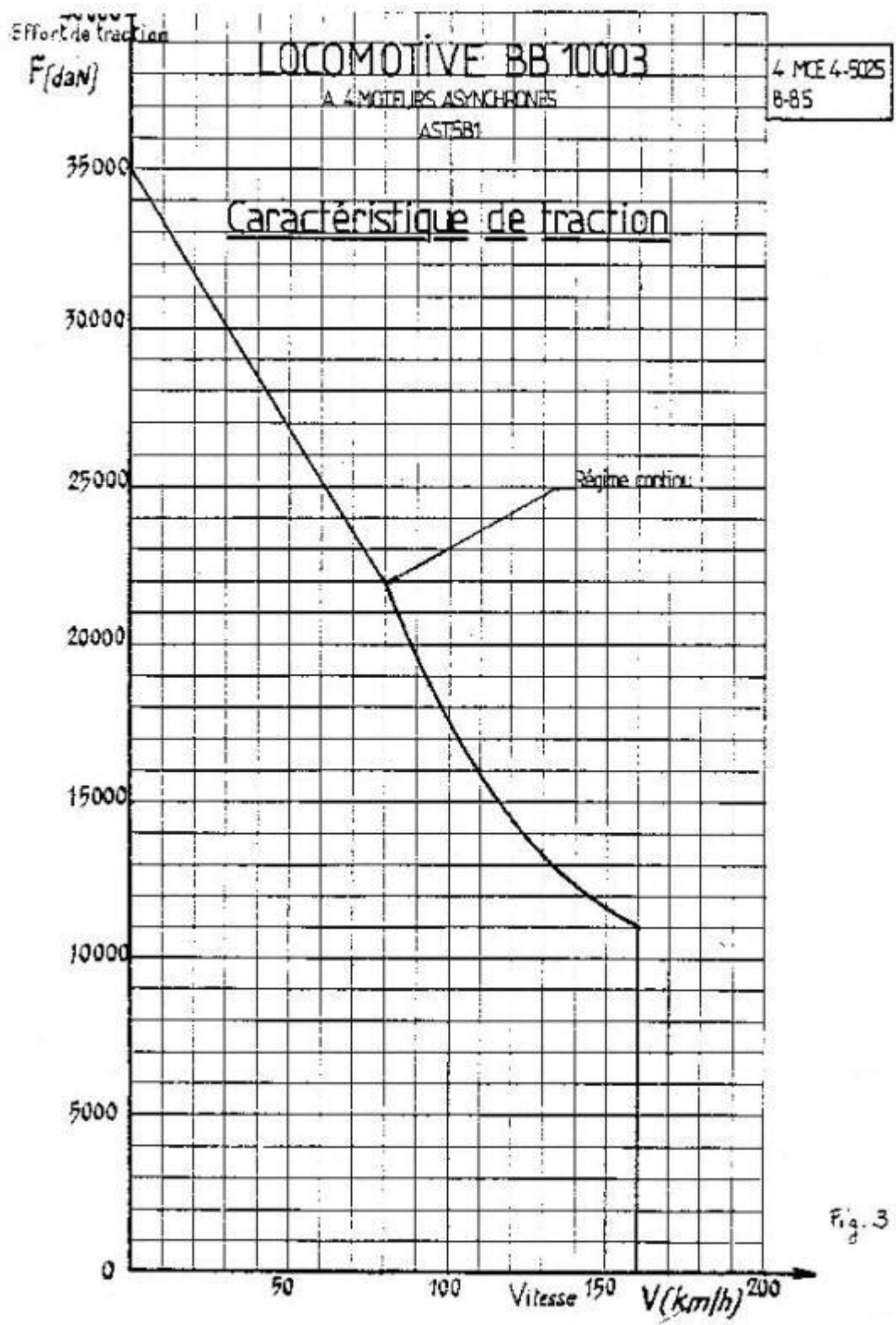
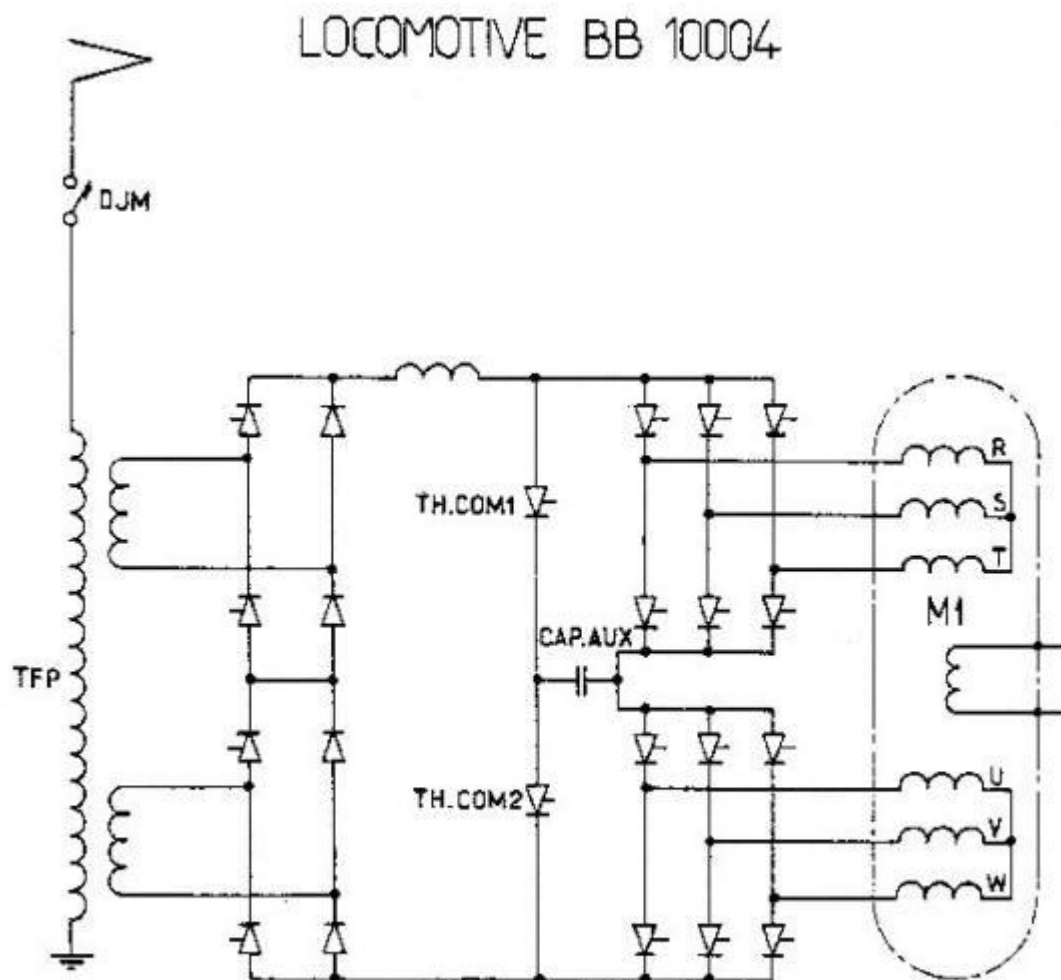
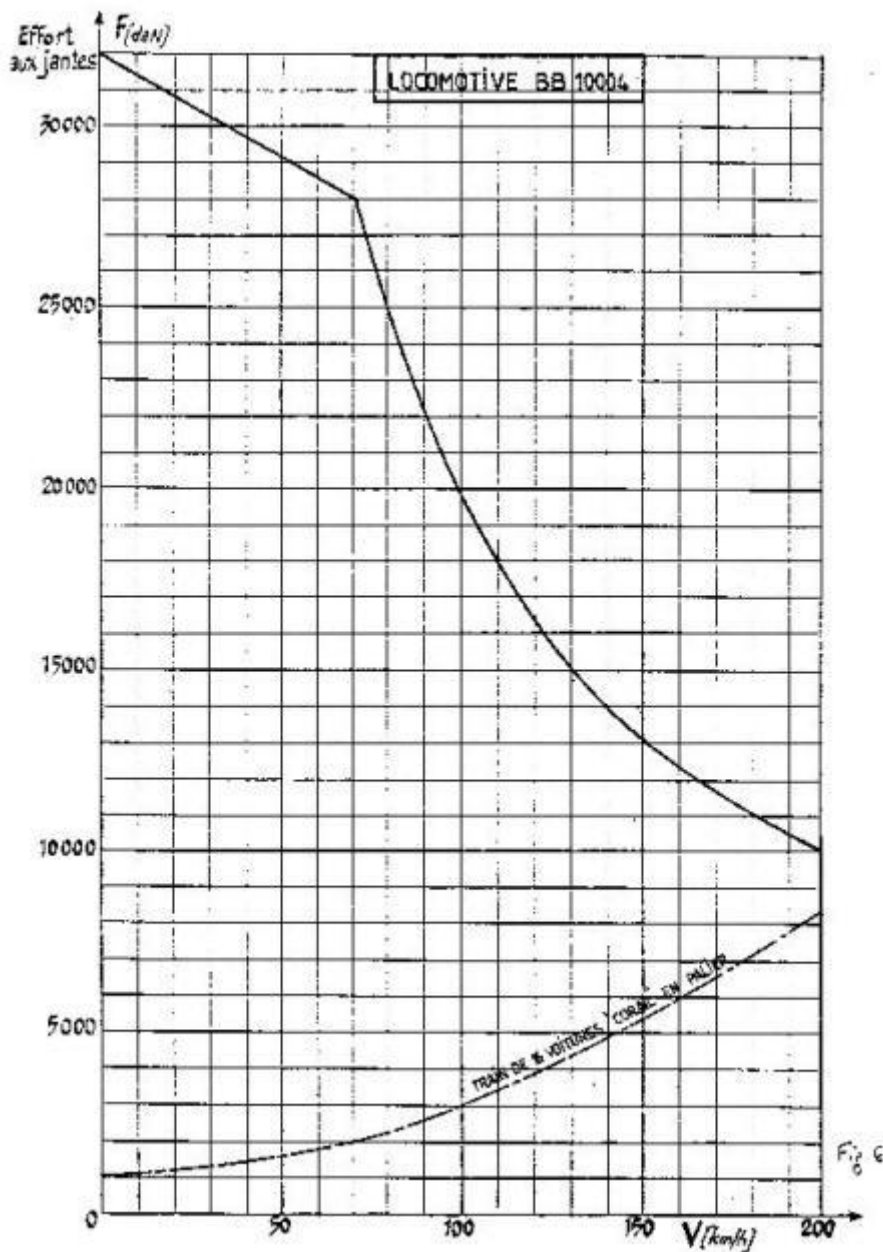


Fig. 3

Locomotive BB 10004 à courant monophasé

masse 84 tonnes ; 5600 kW ; Vmax 200 km/h ; 32000 daN au démarrage, à 2 moteurs synchrones autopilotés alimentés par onduleurs de courant et à bogies monomoteurs.





Le convertisseur d'alimentation du moteur est d'une extrême simplicité. Il ne fait intervenir que des thyristors aux performances très classiques. La masse des condensateurs auxiliaires, nécessaires pour assurer la commutation des onduleurs aux très faibles vitesses, ne dépasse pas 70 kg (pour l'ensemble de la locomotive).

La mise au point de cette locomotive a été très rapide et les résultats d'essais en ligne ont mis en évidence, dès 1982, de façon éclatante, les remarquables qualités de cette chaîne de traction. La réalisation d'engins bicourants de puissance (locomotives, motrices TGV) ne paraissait pas devoir poser de problème particulier.

Automotrice de banlieue Z2N 8895

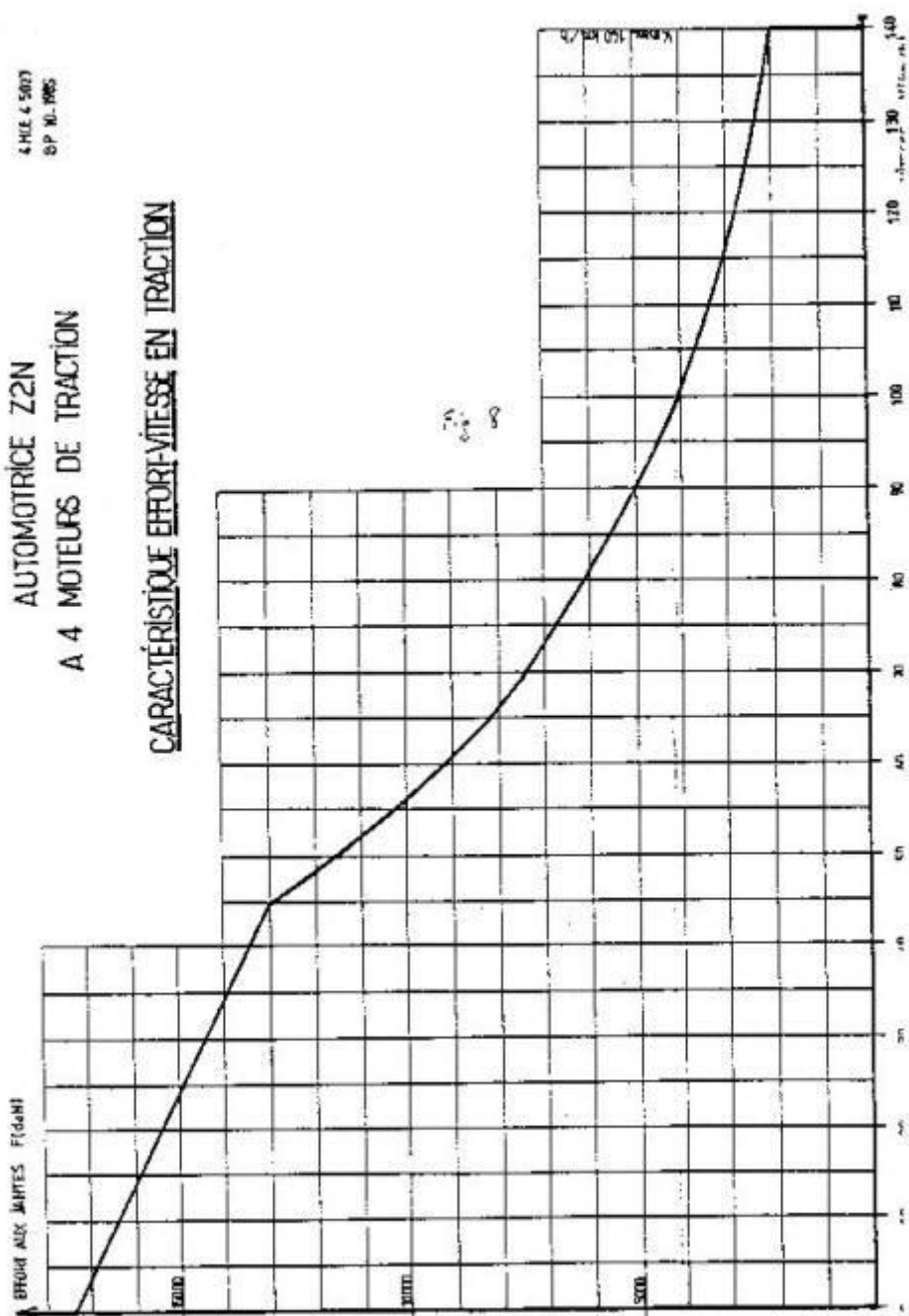
4 moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de courant (1400 kW, 140 km/h).

Ce prototype a été mis en service en mai 1985.

4 HIE 4 5027
 SP N. 1985

AUTOMOTRICE Z2N A 4 MOTEURS DE TRACTION

CARACTÉRISTIQUE EFFORT-VITESSE EN TRACTION



II-3 Les raisons des choix de la SNCF

Dès 1983 se posait, pour la SNCF, la question du choix de type de motorisation à retenir pour des engins moteurs dont les commandes devaient être notifiées à court terme. Il s'agissait

- d'une nouvelle série de locomotives bicourant (1,5 kV courant continu, 25 kV 50 Hz) de grande puissance de plus de 5000 kW aptes à tous servi ces les BB 26000.
- de la nouvelle génération de rames à très grande vitesse pour la des serte TGV Atlantique rames TGV-A.
- et des futures automotrices à deux niveaux Z2N.

Locomotives BB 26000

Pour la motorisation de cette série de locomotives les diverses formules possibles ont été examinées.

Tout d'abord, en raison de l'entière satisfaction que procure, en service, le bogie monomoteur des BB 15000 - 7200 - 22200, ce type de bogie a été maintenu.

Quant au choix de la technique de motorisation on est parvenu aux conclusions suivantes

- le moteur à collecteur ne pouvait pas être retenu. En effet, en raison du programme de traction à assurer trains de voyageurs à V_{max} 200 km/h, trains de marchandises lourds sans utilisation d'un changement de rapport d'engrenages, le volume et la masse du moteur de traction (environ 10 tonnes) rendaient ce projet de locomotive bicourant irréalisable.
- le moteur asynchrone alimenté par onduleur de tension était écarté pour des raisons de complexité et de masse d'équipement. La formule de la locomotive bicourant était irréalisable. De surcroît le freinage de sécurité (en l'absence de tension ligne) était très difficile à obtenir.
- le moteur synchrone autopiloté alimenté par onduleur de courant permettait par contre de concevoir dans la masse totale de 89 t une telle locomotive universelle bicourant avec la caractéristique $F(V)$ indiquée à la figure 9 (Puissance 6000 kW, équipuissance maintenue de 40 % de V_{max} à V_{max} , 32000 daN au démarrage).

Cette caractéristique constituait bien l'enveloppe de celles des 3 séries de locomotives actuellement utilisées à la SNCF pour assurer l'ensemble du service

BB 7200 et BB 22200, à V_{max} 160 km/h pour service mixte

BB 7200, à V_{max} 100 km/h pour service marchandises

BB 22200, à V_{max} 200 km/h pour trains rapides

L'obtention du freinage électrique de sécurité ne posait en outre aucun problème.

La version à moteur asynchrone alimenté par onduleur de courant avait été également prise en considération pour la réalisation de ce type de locomotive, mais, par rapport à la formule précédent il fallait compter un supplément de masse de 1,3 tonnes et le freinage électrique de sécurité était, ici encore, difficile à obtenir.

En définitive, la solution de motorisation synchrone a été retenue pour des raisons

- de masse,
- de simplicité d'équipement (la figure 10 fait apparaître l'évolution de la composition des équipements d'électronique de puissance),
- et de prix.

En effet, le supplément de prix de la locomotive BB 26000, bicourant, d'une puissance de 6000 kW à caractéristiques de service universel voyageurs-marchandises n'est que de quelques % du prix des locomotives BB 22200 à moteur à courant continu à collecteur. Outre un surcroît de puissance de pratiquement 40 % par rapport à celle de ces dernières, les BB 26000 offrent des dispositions nouvelles très appréciables

- groupes auxiliaires motoventilateurs à vitesse variable, motocompresseur, motopompes à huile à moteurs asynchrones triphasés alimentés par onduleurs de tension à transistors ou à GTO
- refroidissement par fluide bouillant (fréon R113) de l'ensemble des semi-conducteurs de puissance
- commande à microprocesseurs
- conjugaison complète du frein électrique et du frein pneumatique.

Deux engins de présérie BB 20011 et 20012 ont été utilisés pour la mise au point définitive de la chaîne de traction bicourant, de la commande à microprocesseur et des auxiliaires à moteurs asynchrones à vitesse variable. La BB 20012 est plus précisément destinée à la mise au point du nouveau système de freinage pneumatique avec conjugaison des freins électrique et pneumatique.

Motrices bicourant TGV-Atlantique

En 1982, les premières études des motrices des rames TGV Atlantique avaient été menées dans le cadre de la reconduction de la formule de motorisation du TGV-PSE mêmes moteurs à collecteur alimentés par ponts mixtes ou hacheurs à thyristors. Grâce au profil de la Ligne Nouvelle Atlantique, avec des rampes d'environ 15 ‰ seulement, contre 35 ‰ sur Paris-Sud-Est, il était possible de concevoir ces rames avec simplement 4 bogies moteurs (2 par motrice) et de porter leur composition de 8 à 10 remorques. La suppression d'un bloc moteur permettait l'installation, en motrice, du convertisseur des auxiliaires tout en respectant l'impératif de 17 tonnes par essieu. La totalité de l'espace des remorques se trouvait libérée pour l'installation des voyageurs.

Mais la puissance de ces motrices, environ 2200 kW, (soit 4400 kW pour la totalité de la rame) n'autorisait que des performances modestes. Il n'était pas possible d'atteindre, en palier, la vitesse de 270 km/h.

L'étude de l'application d'une transmission à moteurs synchrones autopilotés, entreprise fin 1983, montrait qu'il était déjà possible, toujours sans dépasser la charge de 17 tonnes par essieu, de conférer à chacune de ces motrices la puissance de $800 \text{ kW} \times 4 = 3200 \text{ kW}$ tout en conservant, en motrice, le hacheur abaisseur des auxiliaires et le dispositif de compensation des harmoniques et de relèvement du facteur de puissance (pratiquement égal à l'unité). La

vitesse maximale de 300 km/h pouvait dès lors être soutenue sans difficulté sur la ligne nouvelle Atlantique.

En outre, en raison des efforts permis au démarrage, la valeur maximale des rampes pouvait être relevée à 25 ‰, procurant ainsi de substantielles économies sur les travaux de génie civil.

Mais des études complémentaires ont permis de définir les moteurs de traction pour une puissance en régime continu de 1100 kW soit 4400 kW par motrice et 8800 kW pour la rame. Il faut souligner que l'on dispose d'une marge de sécurité très importante pour pratiquer l'effort de démarrage qui s'établit à environ 3 fois la valeur de l'effort au régime continu. En effet, au régime continu, l'échauffement du moteur (rotor et stator) ne dépasse pas 130°C alors que l'isolation aux résines sans solvant appliquée à ces moteurs autorise un échauffement de 250°C.

Il faut également mentionner ici une qualité supplémentaire de la transmission par moteurs synchrones. Grâce au dispositif de la commutation assistée d'une masse de 30 kg par équipement de bogie moteur, il est possible de développer dans la plage 0 - 60 km/h, un effort de traction environ 3 fois plus élevé que celui du régime continu avec des valeurs de courant à peine deux fois plus grandes.

La figure 11 met en évidence l'évolution des caractéristiques efforts-vitesses des rames TGV-A avec celle des diverses études de motorisation.

En définitive, malgré un tel accroissement de performances, la charge par essieu reste toujours inférieure à 17 tonnes.

Les éléments suivants permettent d'apprécier l'avantage apporté par la motorisation synchrone dans laquelle, à la place du moteur à collecteur, vient se substituer le moteur synchrone associé à son onduleur et à ses auxiliaires d'excitation et de commutation assistée.

Masse du moteur à courant continu TGV PSE (335 kW)	1560 kg	Masse du moteur synchrone TGV A (1100 kW)	1450 kg
		Masse de l'onduleur associé (enceinte fréon)	80 kg
		Masse du dispositif d'excitation	30 kg
		Masse du dispositif de commutation assistée	30 kg
Total	1560 kg	Total	1590 kg

Avec un supplément de masse de seulement 30 kg, il est ainsi possible, avec la transmission à moteurs synchrones, d'obtenir :

- une puissance double
- et des efforts de démarrage 1,70 fois plus élevés (à même $V_{\max}$ 300km/h) que ceux de la transmission à moteurs à collecteur.

Il a été toutefois procédé à une évaluation de l'application de moteurs asynchrones aux motrices TGV A

- Moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de tension à thyristors. Comme pour les locomotives, cette formule n'a pas été retenue pour des raisons de masse et de complexité.
- Moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de courant. Cette formule a été étudiée dans l'hypothèse d'une puissance de 3200 kW par motrice. Elle conduit à un supplément de masse de près d'une tonne par motrice par rapport à la formule à moteurs synchrones autopilotés.

Elle présente, en outre des difficultés pour la réalisation du freinage de sécurité absolument indispensable dans le cas présent en raison des vitesses pratiquées.

Enfin, élément capital à souligner, le prix de la motorisation synchrone des motrices TGV-A est pratiquement égal à celui de la motorisation à moteur à courant continu PSE bien qu'elle offre une puissance 40 % plus élevée et des dispositions nouvelles très appréciables.

Automotrices de banlieue Cas des automotrices de banlieue bicourant Z2N à deux niveaux

Les éléments automoteurs à deux niveaux Z2N à courant continu et bicourant sont équipés jusqu'ici de moteur à courant continu à col lecteur alimentés par hacheur. Cet équipement confère à ces automotrices de banlieue d'excellentes performances.

Mais le succès de l'expérimentation de l'automotrice Z2N 8895 a conduit à mener une réflexion sur le type de motorisation à appliquer aux commandes futures de ce type de matériel.

L'application de moteurs sans collecteur sur les automotrices Z2N ne fait pas intervenir les mêmes motivations que celles qui ont conduit à la conception des locomotives BB 26000 et des automotrices TGV-A. Dans ces deux applications, l'utilisation de moteurs sans collecteur était un impératif absolu pour obtenir les performances souhaitées tant en traction qu'en freinage électrique.

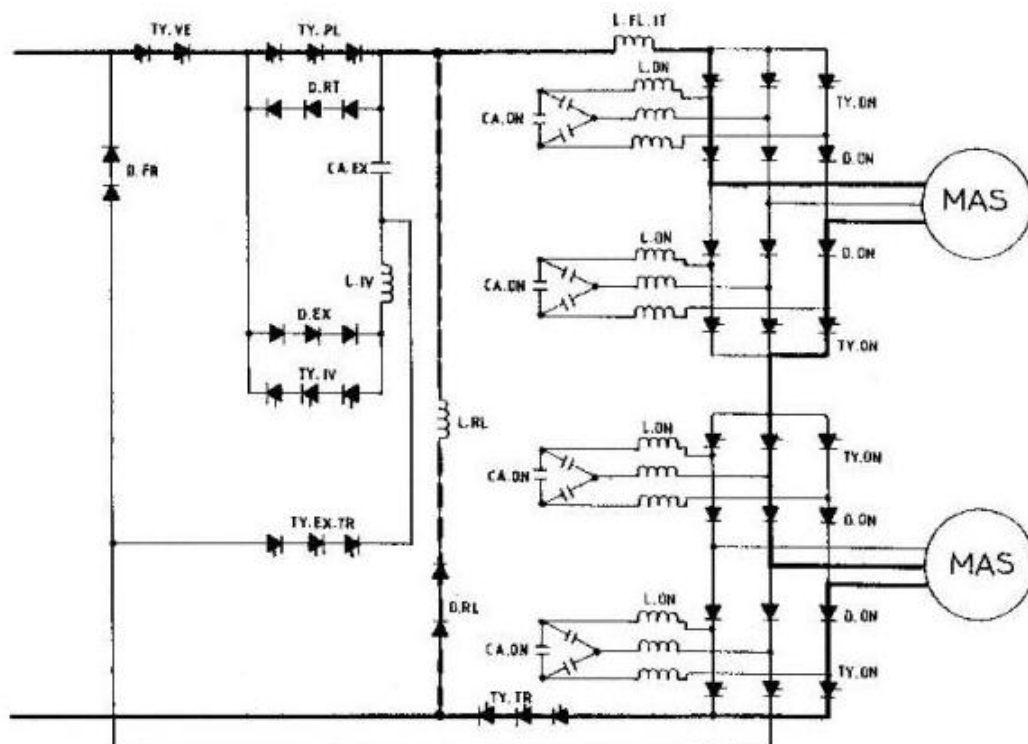
Dans le cas présent, les performances à assurer par la transmission à moteur sans collecteur ne sont pas plus ambitieuses que celles des automotrices actuellement en service.

Par contre, à puissance égale et pour une même définition de cette puissance, une transmission à moteur asynchrone à onduleur de courant apporte, par rapport à la formule à moteurs à collecteur, un gain de masse appréciable.

Cela est particulièrement intéressant dans la conception de l'automotrice Z2N. Il permet d'abandonner certaines technologies onéreuses (telles que transformateur et inductances cl H refroidies, huile silicone, etc...) qu'il avait été indispensable d'adopter pour éviter de dépasser la masse maximale par essieu de l'automotrice dans la variante bicourant.

En outre, comme pour les locomotives BB 26000 et comme pour les automotrices TGV A les nouvelles motrices Z2N présentent des avantages complémentaires :

- Fig. 12



La transmission par moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de tension n'a pas été retenue en raison de sa complexité, de sa masse et des contraintes d'entretien imposées par des moteurs couplés en parallèle sur un même onduleur de tension par équipement de bogie moteur.

Quant à la formule à moteurs synchrones autopilotés, elle posait le problème du redimensionnement du convertisseur des auxiliaires. Celui-ci doit, en effet, dans ce cas, fournir la puissance d'excitation en plus de la puissance des auxiliaires classiques (ventilation de l'équipement, ventilation de la caisse, charge de batterie, alimentation du groupe motocompresseur). Ce redimensionnement conduisait à une nouvelle étude de convertisseur d'où des suppléments d'étude et des modifications dans l'équipement électrique de l'automotrice.

Enfin l'aspect sécurité du freinage électrique ne s'imposait absolument pas pour des automotrices de banlieue dont la vitesse maximale ne dépasse pas 140 km/h et pour lesquelles le seul freinage pneumatique suffit à assurer les distances d'arrêt sans apporter de contraintes thermiques excessives aux roues des motrices.

D'ailleurs, dans tous les cas où la tension ligne est présente, le freinage électrique par récupération suffit à assurer le freinage des motrices sans faire intervenir le freinage pneumatique. Et, en service banlieue, la récupération d'énergie est pratiquement toujours possible en raison de la présence en ligne de consommateurs (autres circulations fonctionnant en traction).

Pour l'ensemble de ces raisons et à la suite des excellents résultats des essais en ligne de la Z2N 8895, la SNCF commandé une série d'éléments automoteurs Z2N dont les motrices sont équipées de moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de courant (136 motrices).

III – La révolution des IGBT et les évolutions suivantes

Dans un second article, nous verrons la révolution qu'a engendré l'apparition des IGBT, bien plus fiables que les GTO. La standardisation des structures électrotechnique des motrices de traction (par exemple de la gamme Prima d'Alsthom), avec en tête, les redresseurs à commande MLI, fonctionnant aussi en hacheur élévateur (en courant alternatif, le redresseur MLI permet d'avoir un facteur de puissance très proche de 1, et en courant continu, le secondaire du transformateur est utilisé pour stocker l'énergie, le convertisseur d'entrée fonctionnant alors en hacheur). Ensuite on retrouve le bus continu, qui dans certains cas n'a même plus besoin d'être filtré, suivi d'un onduleur et d'une machine Asynchrone.

Dans les projets d'Alsthom, on retrouve également, pour répondre aux prochains appels d'offre de la SNCF, des automotrices à grande vitesse (apte à un service commercial à 350 km/h) à motorisation repartie. Ces automotrices utiliseront certainement de nouveaux moteurs synchrones de forte puissance, à aimants permanents, dont la conception a été rendue possible avec les progrès réalisés ces dernières années dans le secteur des aimants permanents.

Toutes ces évolutions seront traitées prochainement dans un nouvel article.