

# Le TGV POS

## I Introduction

En juin 2007, la SNVF a mis en service la relation TGV Paris / Strasbourg, avec des possibilités de desservir, au-delà des frontières françaises, les villes de Munich, Francfort, Zurich et Luxembourg.

La pénétration sur les réseaux allemand et suisse oblige de concevoir des rames tri-tension comportant en plus des tensions 25kV 50Hz et 1500V continu, la tension spécifique de l'Allemagne et de la Suisse : le 15kV 16,7Hz.

La vitesse commerciale sur le parcours français sera de 320km/h et sur les L.G.V. allemandes de 300km/h. Ainsi le TGV reliera Paris à Francfort en 3h45 au lieu de 6h15. Pour mettre en œuvre ces nouveaux flux de trafic et satisfaire ses exigences commerciales, la SNCF a besoin de 15 rames internationales appelées TGV POS (**P**aris **O**st **F**rankreich **S**üd **D**eutschland).

L'opérateur ferroviaire a fait l'inventaire de ses possibilités. Il évalue en premier lieu les performances des rames dont il dispose. Il tente de limiter les évolutions qui sont toujours une somme de risques pour son projet.

Apte à 300km/h sur nos L.G.V. (Lignes à Grande Vitesse), le TGV PBKA (Thlys) n'a pas été conçu pour circuler à 300km/h sur les nouvelles L.G.V. allemandes.

Sous une alimentation 15kV 16,7Hz, la puissance à la jante est limitée à 460kW par essieu moteur, soit 3680kW à la jante pour l'ensemble de la rame. Cette valeur est identique à celle nécessaire à l'exploitation de nos TGV, à 220km/h, sous 1500V continu. La rame PBKA actuelle, bien que fournissant des performances très honorables, ne garantissait pas sur la partie allemande le temps de parcours souhaité. Il était donc indispensable d'augmenter la puissance de la rame en alimentation 15kV 16,7Hz.

Une évolution du schéma de puissance des motrices a été envisagé : une formule procurant, en alimentation 15kV 16,7HZ, une puissance à la jante de l'ordre de 850kW à 860kW par essieu moteur.

L'avantage de cette solution envisagée en était sa simplicité apparente car elle ne modifiait pas la motorisation mise en œuvre sur nos TGV. En alimentation 15kV 16,7Hz, elle ne faisait qu'augmenter la tension de 1500V à 3000V sur le filtre principal de la motrice, qui est déjà dimensionné pour travailler sous l'alimentation à tension continue 3kV du réseau belge

Cependant, sous 15kV, l'alimentation des blocs moteurs et des auxiliaires de la motrice est fournie par l'enroulement auxiliaire du transformateur principal dimensionné à cet effet et associé à un pont mixte Thyristor – Diode contrôlé pour fournir sur le filtre principal une tension de 1500V . Pour la motrice PBKA\*, il suffisait tout simplement de doubler cette installation.

Mais la mise en œuvre de cette solution conduit à une perte des performances en matière de rendement, et de facteur de puissance, avec une augmentation considérable de la masse du transformateur principal et des selfs de filtrage exigées par la fréquence spéciale 16,7Hz des réseaux allemand et suisse.

Les contraintes liées à l'exploitation commerciale en Allemagne avec de nombreuses séquences de ralentissement « cassant » la vitesse de croisière et imposant également de nombreuses « reprises » rendaient la faisabilité de la motrice très difficile en terme de masse.

## **II Les choix techniques de la motorisation du TGV POS**

Les possibilités actuelles offertes par la mise en œuvre des structures utilisant des modules I.G.B.T., les études déjà réalisées relatives et le retour d'expérience de l'exploitation de la locomotive fret (BB27000) délivrant une puissance de 1,1MW par essieu moteur ont convaincu la SNCF de s'orienter vers la conception d'une nouvelle motorisation pour le TGV POS. Toutes les motrices actuellement construites par Alstom utilisent ces modules (Gamme PRIMA, mais aussi motrice de tramway, etc...)

La chaîne de traction étudiée pour la nouvelle motorisation du TGV POS, dérive des développements déjà réalisés sur des projets de locomotives et d'automotrices. La figure 1 (cf page ci après) présente de manière synthétique l'architecture du schéma de puissance.

**RAME TGV POS  
SCHEMA DE PUISSANCE DE LA MOTRICE**

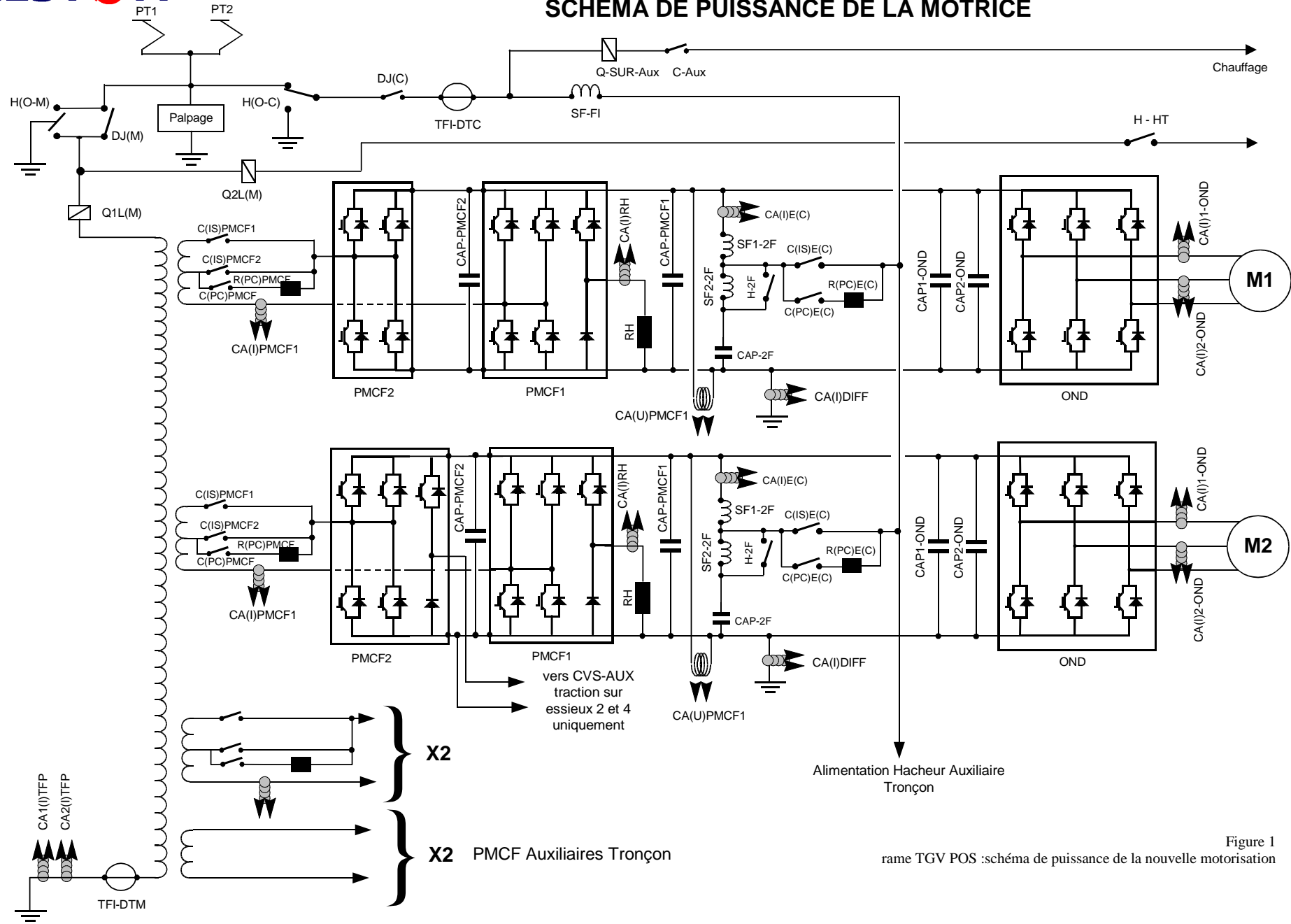


Figure 1  
rame TGV POS :schéma de puissance de la nouvelle motorisation

La motrice du TGV POS est constituée de 4 ensembles « essieux moteurs » regroupés au sein de deux blocs moteurs (un par bogie). Chacun des blocs moteurs dispose de ses auxiliaires. Les équipements auxiliaires communs destinés en particulier à l'alimentation du tronçon sont regroupés au sein du « bloc commun ».

Pour tous les systèmes d'alimentation, la chaîne de traction de chacun des essieux moteurs est constituée, **d'un « bus » de tension continue** alimentant un onduleur associé à son moteur de traction.

Dans le cas des alimentations à courant monophasé, chacun des « bus » est alimenté respectivement par un enroulement du transformateur principal associé à **un convertisseur 4 cadrans appelé « Pont Monophasé à Commutation Forcée » (P.M.C.F.)**.

Une simple commutation, sur les enroulements secondaires du transformateur, permet d'adapter la tension d'alimentation des P.M.C.F. en fonction de la tension d'alimentation 25kV ou 15kV.

Chacun des convertisseurs d'entrée P.M.C.F. est associé à un filtre destiné à limiter l'ondulation de tension sur le bus continu engendrée par le redressement. En alimentation 25kV 50Hz le filtre est accordé à 100Hz (2 fois 50Hz), en alimentation 15kV 16,7Hz le filtre est accordé à 33Hz.

Le convertisseur d'entrée P.M.C.F., dont l'un des rôles essentiels consiste à contrôler le déphasage (Grace à une commande MLI appropriée) entre la tension caténaire et le courant de traction afin de régler le facteur de puissance au voisinage de l'unité, possède la topologie d'un onduleur monophasé.

Le facteur de puissance est défini par le produit du facteur de forme par le facteur de déplacement «  $\cos\phi$  ». Plus il est voisin de 1, plus la forme du courant de traction est sinusoïdale et plus le «  $\cos\phi$  » est lui aussi proche de 1, plus la consommation du train est « propre »

Cette propriété lui permet de fonctionner dans les 4 cadrans du plan « tension courant ». Il joue le rôle d'un redresseur monophasé en autorisant le transfert d'énergie de la caténaire vers le groupe onduleur-moteur de traction : la tension et le courant sont positifs et se situent dans le premier cadran. Il joue également le rôle d'onduleur en permettant à l'énergie produite par le moteur en freinage dynamique d'être renvoyée à la caténaire : la tension est positive le courant lui est négatif (sens conventionnel), ils se situent dans le quatrième cadran.

Cette réversibilité parfaite, en alimentation à courant monophasé, offre la possibilité de mettre en œuvre sur la motrice POS le freinage par récupération d'énergie.

Les circuits auxiliaires des blocs moteurs représentés sur la figure 2 sont alimentés, à partir du bus de tension continu des essieux 2 et 4 respectivement par un hacheur abaisseur et par deux onduleurs triphasés de 50kVA.

Chacun des blocs moteurs se partage l'alimentation des pompes à huile et des moto-ventilateurs du transformateur principal. Ils alimentent en redondance le moto-ventilateur du bloc commun.

**TGV POS ASYNCHRONE  
SCHEMAS AUXILIAIRES MOTRICE**

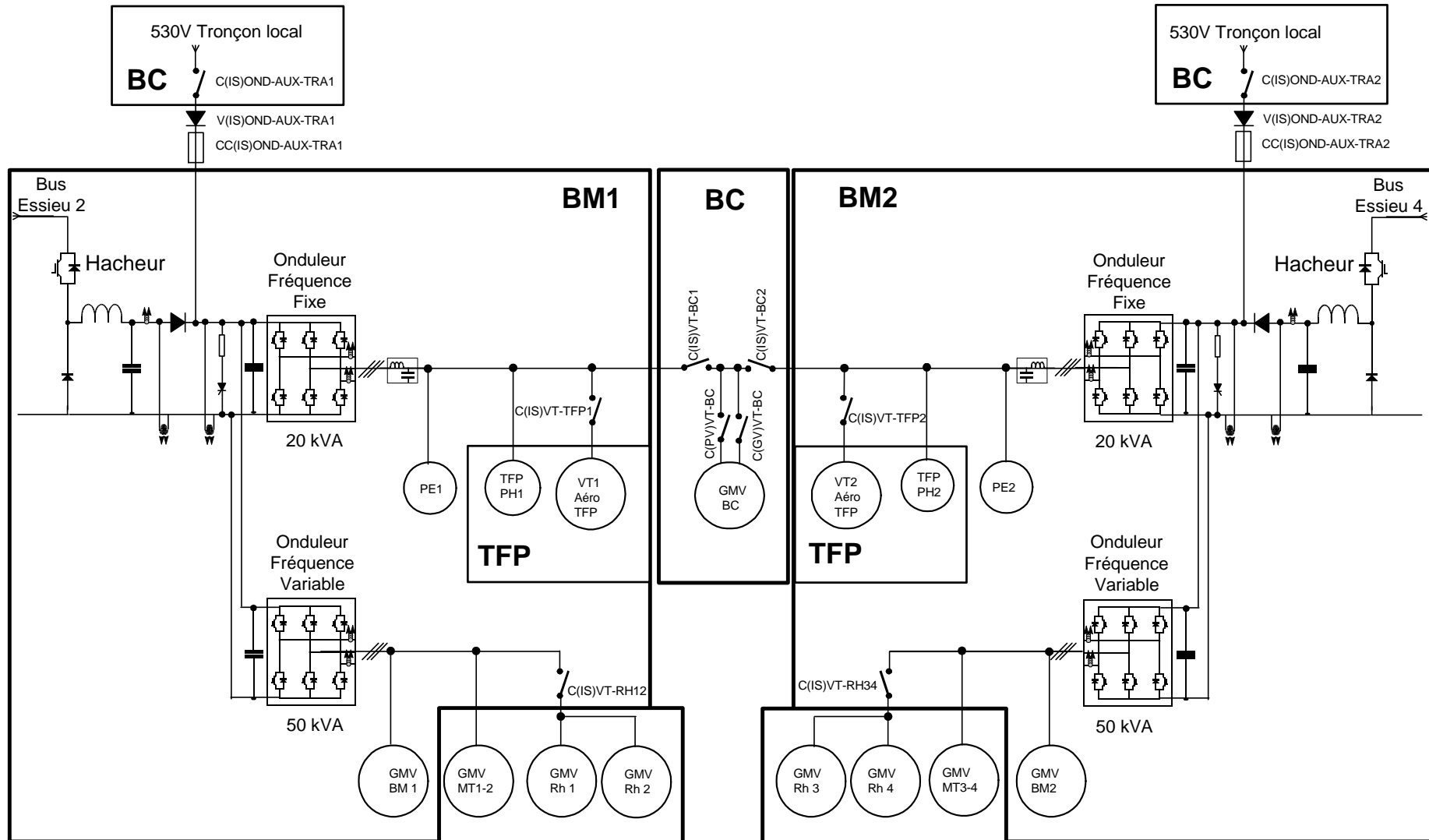


figure 2 : schéma de puissance des auxiliaires de la motrice

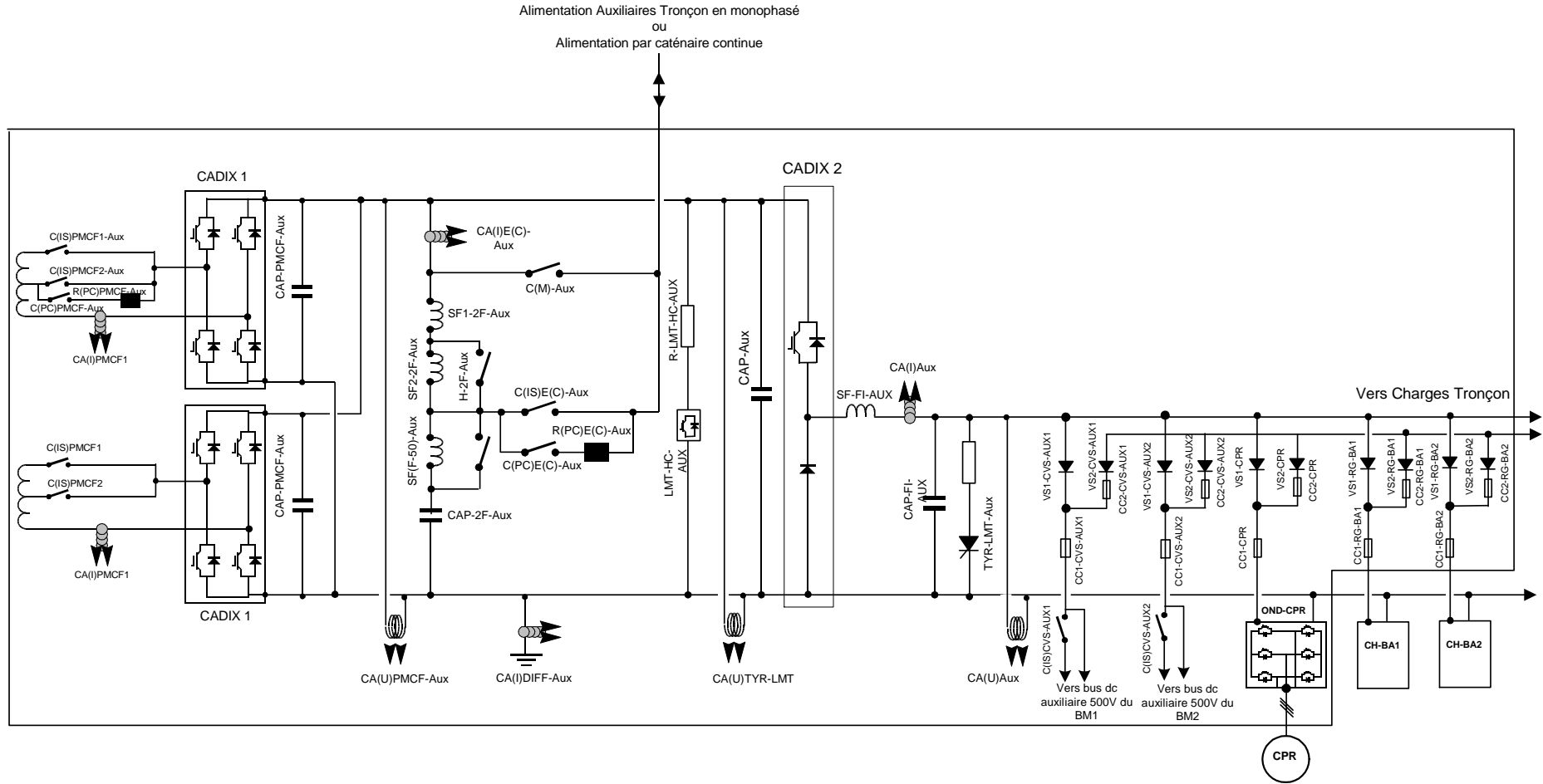
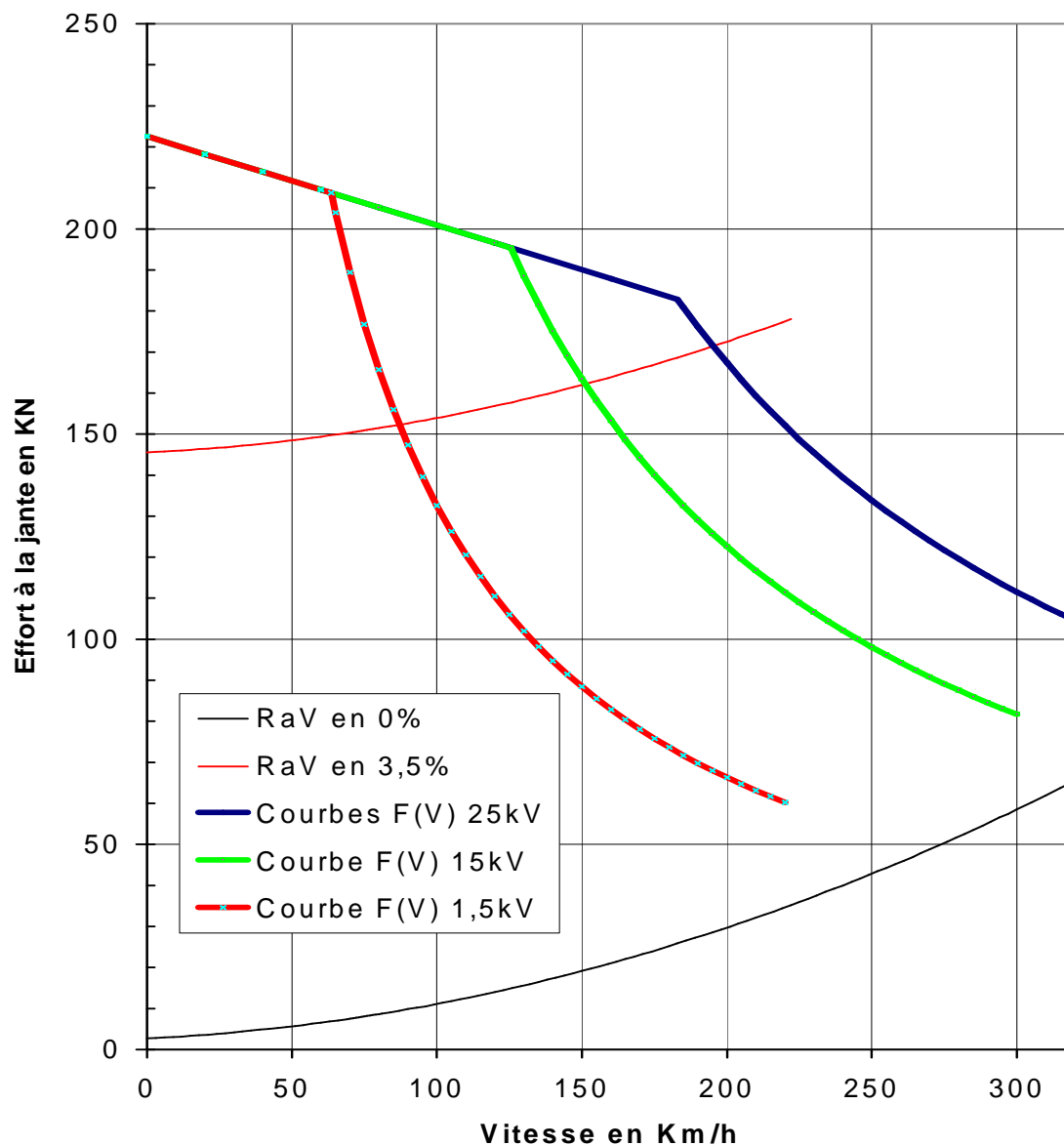


figure 3 : Schémas de puissance des convertisseurs auxiliaires pour l'alimentation du tronçon.

L'alimentation des circuits de chauffage et de tous les équipements auxiliaires destinés au confort des voyageurs : la climatisation, l'éclairage et la restauration, la charge des batteries, la fourniture d'air comprimé etc..., est réalisée soit par un dispositif mettant en œuvre 2 P.M.C.F. (figure 3). Un hacheur abaisseur, connecté au bus 1500V, fournit du 530V.

### III Principales caractéristiques de la motorisation du POS

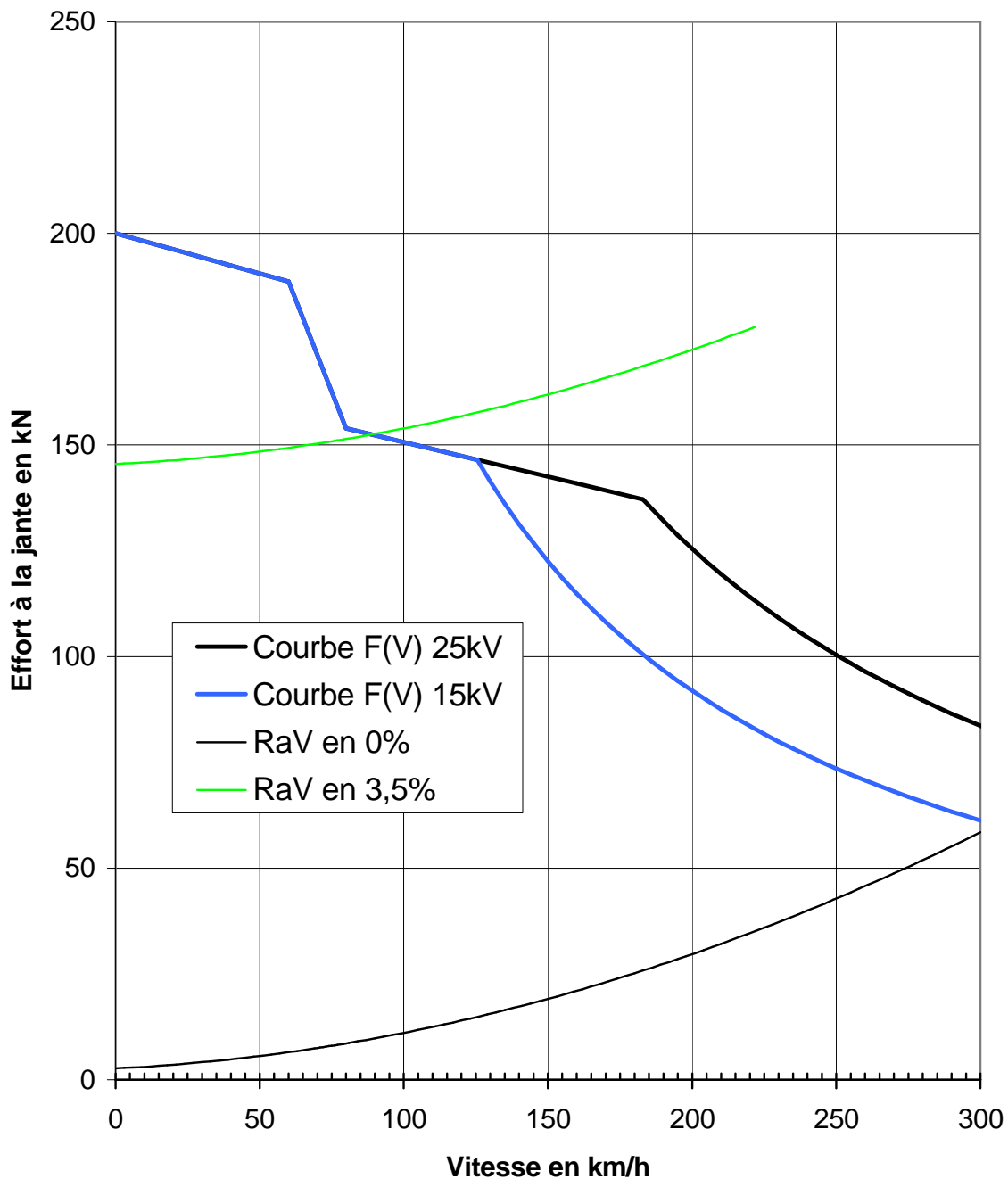
Les figures données ci-dessous représentent les caractéristiques « effort-vitesse »  $F(V)$ , en traction



Caractéristiques Effort-Vitesse  
« F(V) » en alimentation 25kV 50Hz, 15kV 16,7Hz et 1500V continu

Sous caténaire 25kV 50Hz, l'augmentation de la vitesse a porté la puissance de 1100 à 1160kW à la jante par essieu moteur. Sous caténaire 15kV 16,7Hz, la puissance à la jante par essieu moteur a été définie à 850kW.

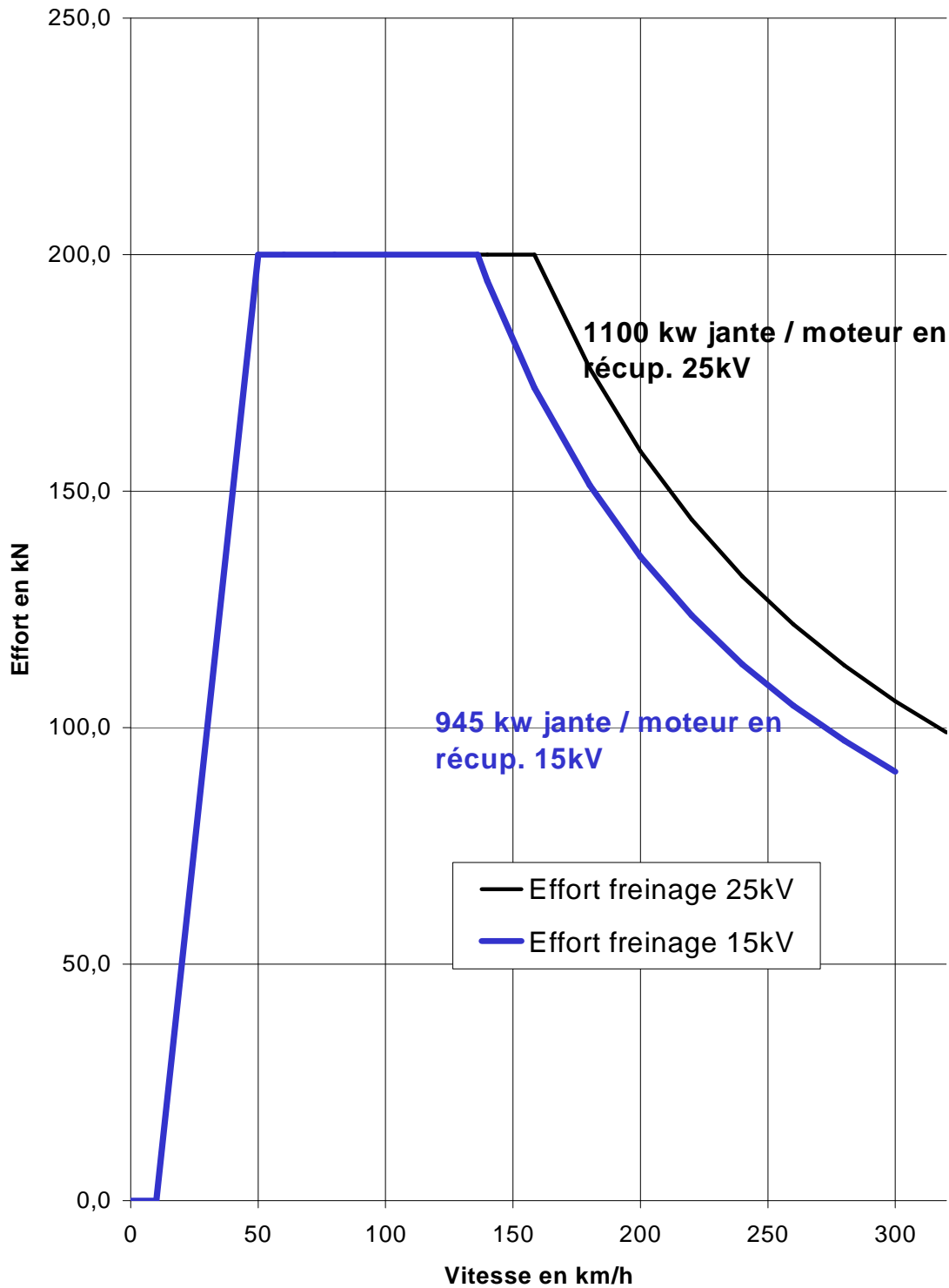
Sous caténaire 1500V continu, les caractéristiques de la nouvelle motorisation du POS sont similaires à celles des TGV Réseau et PBKA de la SNCF : la puissance développée sur un essieu moteur reste de 460kW à la jante.



Caractéristiques Effort-Vitesse  
en alimentation 25kV 50Hz, et 15 kV 16,7Hz  
en configuration 3 blocs moteurs en service, montrant le mode « booster » entre 0 et 70km/h.



Les caractéristiques « effort-vitesse »  $F(V)$  en freinage dynamique, à récupération d'énergie ou rhéostatique, sont données ci-dessous :



Courbes  $F(V)$   
Freinage en récupération d'énergie sous 25kV 50Hz et 15kV 16,7Hz

### Facteur de puissance et efficacité énergétique

Aux améliorations de performance de cette chaîne de traction, il faut rajouter celle concernant le rendement et la qualité du courant absorbé ou renvoyé à la caténaire. Cette qualité du courant est caractérisée par le facteur de puissance et le facteur de forme. En effet, en traction et en freinage par récupération la mise en œuvre des P.M.C.F. permet de consommer ou de restituer à la caténaire **un courant quasiment sinusoïdal** d'une part et en phase d'autre part avec la tension.

De plus la récupération d'énergie pendant les phases de freinage sur un parcours type « Paris Munich » permet une économie de la consommation d'électricité estimée à environ 5%.

### Principales caractéristique de la nouvelle motorisation :

Tensions d'alimentation	25kV 50Hz		15kV 16,7Hz	1500V continu
	L.G.V.	classique		
Vitesse commerciale (km/h)	320	220	300	220
Puissance à la jante par essieu moteur (kW)	1160	900	850	460
Puissance totale à la jante pour la rame POS (kW)	9280	7200	6800	3680
Effort total au démarrage pour la rame (kN)	220	220	220	220
Effort total au démarrage pour la rame avec 3BM en service (booster)	200	200	200	200
Freinage par récupération d'énergie : puissance à la jante par essieu (kW)	1100	1100	1100	interdit
Freinage par récupération d'énergie : effort total maximal à la jante (kN)	200	200	200	interdit
Freinage rhéostatique : puissance à la jante (kW)	945	945	945	945
Freinage rhéostatique : effort total maximal à la jante (kN)	200	200	200	200
Facteur de puissance en alimentation à courant monophasé : $\lambda$	$\approx 1$	$\approx 1$	$\approx 1$	-
Intensité psophométrée en alimentation à courant monophasé : IPSO (A)	2	2	1,5	-
Rendement estimé	0,87	0,87	0,85	0,90

## IV Les principaux éléments de la motorisation

### Ensemble transformateur et inductances

L'ensemble transformateur et inductances regroupent le transformateur principal (TFP) abaisseur de tension et les inductances de filtre d'entrée, de filtre pour le hacheur des auxiliaires, et des filtres accordés à 100 Hz et à 33 Hz.

Ces bobinages sont implantés dans la même cuve. L'avantage d'une telle construction favorise la mise en commun du dispositif de refroidissement : l'huile, les pompes, les échangeurs, et permet d'optimiser la mise en œuvre des redondances : deux moto-pompes et deux aéro-réfrigérants indépendants. L'huile de refroidissement est une huile silicone et la cuve est en aluminium ; ainsi la masse de l'ensemble transformateur et inductances est de 9200 kg.

Le transformateur est composé :

- d'un enroulement primaire qui peut être alimenté soit en 25kV soit en 15kV ;
- de 4 enroulements secondaires avec prise intermédiaire pour le 15kV destinés à alimenter les convertisseurs de traction à raison d'un enroulement par essieu ;
- de 2 enroulements secondaires avec prise intermédiaire pour le 15kV destinés à alimenter les convertisseurs de production de l'énergie auxiliaire du tronçon.

Le circuit magnétique à colonnes, est constitué de tôles magnétiques laminées à froid à grain orientés. Les enroulements primaires et secondaires sont bobinés concentriquement sur chacune des colonnes. Les conducteurs sont constitués de cuivre.

Pour réduire les pertes ohmiques et les pertes supplémentaires par courants de Foucault, les conducteurs des enroulements secondaires sont réalisés en plusieurs fils élémentaires continûment transposés . Cette technique utilisant du câble transposé permet de minimiser les courants de circulation entre fil élémentaire. Chaque fil élémentaire embrasse ainsi le même flux de fuite sur une spire moyenne.

L'ensemble inductances est composé de :

- 4 inductances de filtrage 100Hz, une par essieu ;
- 4 inductances de filtrage 33Hz une par essieu ;
- une self de filtre d'entrée pour le fonctionnement sous caténaire 1500V ;
- une self de filtrage pour le hacheur auxiliaire.

Les bobines d'inductance sont réalisées en galettes connectées en série parallèle. Sans noyau, elles sont entourées d'un manteau magnétique qui canalise les lignes de flux et maximise la valeur de self.

### Caractéristique électriques

Le tableau suivant donne les caractéristiques essentielles du transformateur principal et des inductances .

#### Transformateur principal

	Puissance assignée en kVA	Intensité primaire assignée en A	Tension secondaire assignée en V	Tension auxiliaire assignée en V	Fréquence assignée en Hz
Sous alimentation 25 kV	4830	193	1000	950	50
Sous alimentation 15 kV	3882	259	930	950	16,7

#### Inductances

	Inductance de filtre d'entrée SF FI	Inductance de lissage SF FI aux	Inductance 2F SF FI 100	Inductance 2F SF FI 33
Self inductance en mH	4,3	4	0,5	4
Courant efficace en A	1750	785	530	405

## Electronique de puissance

Le schéma de puissance fait apparaître, pour chacun des essieux, les 3 fonctions caractérisant la chaîne de traction de la motrice POS :

- l'onduleur de traction composé de ses 6 interrupteurs de puissance nécessaires à la création de la tension triphasée d'alimentation des moteurs de traction ;
- le P.M.C.F. constitué par 4 interrupteurs de puissance capables de redresser le courant monophasé pris sur un secondaire du transformateur principal et « d'onduler » le courant continu disponible sur le bus de tension pendant les séquences de freinage par récupération. Chacun des interrupteurs de puissance est constitué de 2 modules I.G.B.T. connectés en parallèle.
- le hacheur rhéostatique, constitué respectivement, d'un module I.G.B.T. et d'un module diode de décharge ou « roue libre ».

Les auxiliaires du bloc moteur sont alimentés par un hacheur identique au hacheur rhéostatique. Il est connecté au bus de tension des essieux 2 et 4.

Les interrupteurs de puissance sont en fait des modules I.G.B.T. tous identiques : ils constituent les « briques » de base pour la construction des schémas de puissance modernes. Ces mêmes « briques » sont également utilisées sur toutes nos chaînes de traction récentes : locomotive fret (BB27000, BB37000, gamme PRIMA) bien sûr, mais également TER2N, Z20900, ZTER, TER2N NG.

## Le moteur de traction :

Chaque bogie moteur est équipé de deux moteurs asynchrones à cage. Ils disposent de trois paires de pôles et sont à ventilation forcée. Leur vitesse de rotation est de 3800 tr/min correspondant à la vitesse de 320 km/h (roues mi-usées), et à la puissance nominale de 1200 kW. Leur masse unitaire est de 1350 kg ce qui représente un gain de 200 kg par rapport au moteur synchrone équivalent exploité à 1100 kW. La figure proposée en annexe montre une illustration du nouveau moteur de traction.

Type :	Asynchrone à cage
Puissance nominale :	1200 kW
Couple de démarrage :	6450 Nm
Couple de démarrage en mode booster :	7690Nm
Courant de démarrage :	690 Aeff
Vitesse à 320 km/h (roues mi-usées) :	3800 tr/min
Tension entre phases à 320 km/h (roues mi-usées) :	1390 Veff
Fréquence stator à 320 km/h (roues mi-usées) :	192 Hz
Rendement :	95%.
Masse :	1350 kg
Ventilation :	Forcée, axiale, 1,25 m <sup>3</sup> /s
Isolation :	Classe 200
Arrangement mécanique:	Flasque moto-réducteur intégré
Fixation :	Sous caisse

L'intérêt d'un tel moteur, par rapport à son équivalent synchrone qui la majeure partie de la flotte des TGV de la SNCF, réside essentiellement dans **la grande simplicité de fabrication du rotor à cage**, et dans **la suppression du système bagues-balais**, permettant d'obtenir, à puissance équivalente, un moteur plus .

## **V Les auxiliaires**

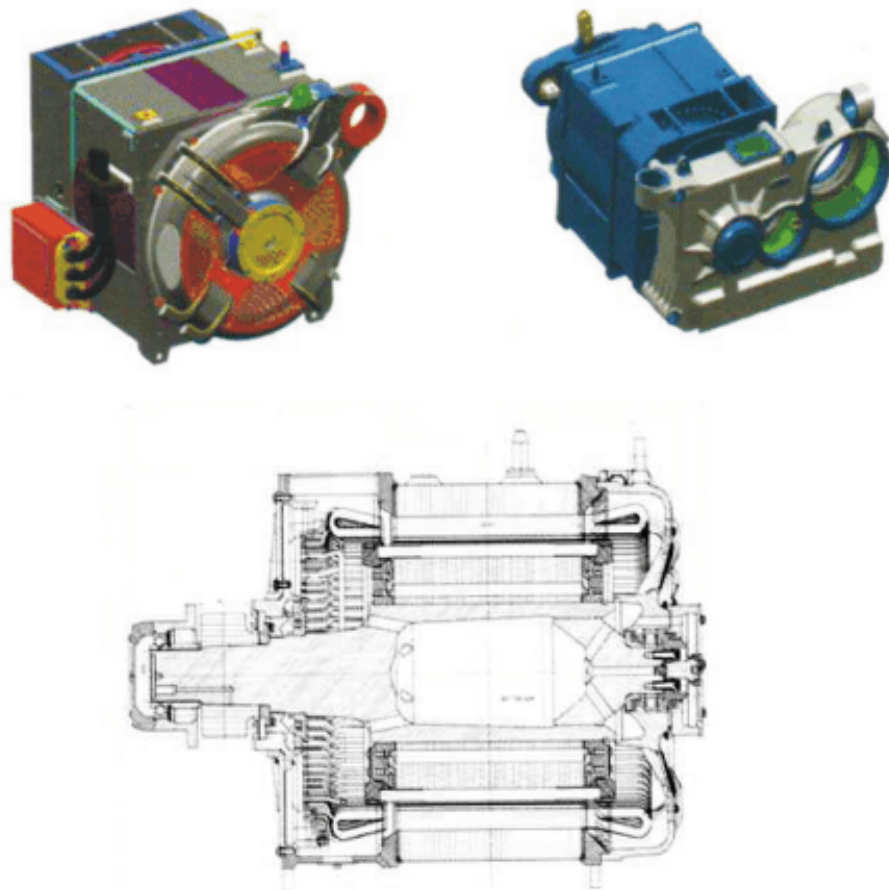
La fourniture d'énergie « domestique » destinée au tronçon reste similaire à celle des rames TGV. Un hacheur abaisseur, situé dans le bloc commun, fournit le « 500V » d'alimentation d'une des 2 lignes de distribution du tronçon. Toutes les charges sont connectées sur ces lignes par un « OU » à diode offrant ainsi une redondance active de la fourniture d'énergie. Ce hacheur abaisseur est constitué par un ensemble de 2 modules I.G.B.T. et de 2 modules diode de « roue libre » connectés en parallèle.

## **VI Conclusion :**

La mise en œuvre et la maîtrise des modules I.G.B.T. est une avancée technique importante pour la conception des nouvelles chaînes de traction ferroviaires. Elle permet, à performances équivalentes, de réaliser des équipements de puissance modulaires offrant des gains de masse et de volume à des coûts compétitifs. Ainsi la SNCF et l'industriel ALSTOM, forts de leurs retours d'expérience ont jugé opportun de faire bénéficier le TGV POS de ce nouvel apport technologique.

## **VII Bibliographie :**

Réalisé à partir des documents de M. DURUCHAT



**Fig : 19 Images du moteur et du réducteur et dessin en coupe du moteur**

La carcasse magnétique du stator est formée d'un empilage de tôles découpées d'une seule pièce et pré-isolées par phosphatation. Cet empilage est serré entre deux caissons d'extrémité. La solidarisation de l'ensemble de la carcasse est assurée par des barreaux longitudinaux soudés en bout sur les plaques terminales et en long sur toute la longueur du circuit magnétique.

Après soudage, la carcasse est entièrement recuite pour stabilisation et suppression des contraintes internes. Le bobinage du stator, de type ondulé, est constitué de sections de bobines toutes identiques. Après mise en place des sections dans les encoches, les développantes sont solidarisées par laçage en corde de verre. Les encoches sont fermées par des clavettes de verre époxy. La carcasse complètement bobinée est imprégnée sous vide et pression par une résine silicone sans solvant, tolérant un échauffement en service de 200K ; c'est une isolation appelée « classe 200 ».

Le circuit magnétique du rotor, constitué de tôles pré-isolées, est monté directement sur l'arbre et serré entre deux plateaux d'extrémité. La cage d'écuréuil est en cuivre au chrome-zirconium dont les caractéristiques mécaniques sont garanties à haute température. Les barres rectangulaires sont montées sans serrage dans les encoches et solidarisées en extrémité avec les anneaux de court-circuit par brasure à haute température. L'arbre est creux afin de réduire la masse.

La particularité constructive inspirée des moto-réducteurs de la BB 36000, est l'intégration « moteur-réducteur » qui optimise la position des paliers. Le roulement côté pignon d'entraînement est positionné dans le réducteur, afin de minimiser les efforts de flexion dans l'arbre du moteur. L'ensemble moto-réducteur est fixé sous la caisse de la motrice.