TGV POS

La motorisation du TGV POS

Dossier d'Alain Jeunesse et Michel Rollin

Autorisation de la Revue Générale des Chemins de Fer de publier ce dossier

RGCF de mars 2004

otorisation du TGV POS
TGV POS, définition du besoin
urquoi une nouvelle motorisation?
TGV PBKA
TGV «PBKA*»
s choix techniques de la motorisation du TGV POS
rchitecture de la nouvelle motorisation
Schéma de puissance de la motrice
l'architecture électronique de la motrice
-2-1 Le réseau TORNAD*
-2-2 Pourquoi conserver TORNAD*?
-2-3 Impact sur l'architecture électronique de la motrice
-2-4 Architecture de l'électronique de pilotage associée à la motorisation
principales caractéristiques de la motorisation du TGV POS
caractéristiques « effort-vitesse» F(V) en traction
caractéristiques « effort-vitesse» F(V) en freinage dynamique.
facteur de puissance et efficacité énergétique
l'intensité psophométrique (Ipso)
Principales caractéristiques de la nouvelle motorisation du TGV POS
le bilan masse de la motrice
s principaux éléments de la motorisation
Les équipements de toiture
L'ensemble transformateur et inductances
-2-1 Le transformateur
-2-2 L'ensemble inductances
-2-3 Caractéristiques générales
Le bloc moteur
-3-1 l'électronique de puissance
-3-2 La partie mécanique, le circuit d'eau, et le circuit aéraulique
-3-3 Le rhéostat
Le bloc commun
Le moteur de traction
Les auxiliaires
les électroniques de commande
sprit «gamme»
s étapes vers la mise en service
la conception
les réglages au banc en usine
la mise au point sur anneau d'essai et en ligne
l'admission technique
maintenance
nclusion et perspectives

1 le TGV POS, définition du besoin

La mise en service de la L.G.V. Est, prévue en juin 2007, offrira à notre clientèle depuis Paris de nouvelles relations à grande vitesse vers Strasbourg, Metz, 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, et Paris à Munich en 6h, procurant un gain de temps très appréciable par rapport au temps de parcours actuel qui est de 8h18mn. 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.
(POS: Paris-Ost-Frankreich Süd Deutschland)

La conception de ces nouvelles rames TGV doit en plus prendre en compte les exigences suivantes :

- Le maintien de la couplablilité avec les rames TGV Réseau, PBKA et Duplex de la SNCF, permettant des circulations en Unité Multiple (UM) offrant par exemple sur le territoire français des combinaisons TGV POS et TGV Réseau. Ceci impose de bâtir le système de gestion des fonctionnalités du train identique à celui des TGV existants. Ainsi le TGV POS bénéficiera du réseau informatique TORNAD* et des fonctionnalités qu'il supporte (le Système de Commande et de Contrôle Embarqué, le G.D.I., l'aide à la maintenance intégré) ; (GDI: **G**uide de **D**épannage **I**nformatisé).
- La limitation des frais d'étude et de développement conduisant à une composition similaire à celle d'un TGV classique: Motrice + 8 Remorques + Motrice, et à une structure de la motrice identique à celle d'une motrice DUPLEX en cours de construction.
- L'utilisation d'un tronçon composé de 8 remorques pris sur le parc des TGV Réseau de la SNCF ;
- L'aptitude à réaliser un temps de parcours Strasbourg Munich sans arrêt, 412km en 2h50mn, concurrentiel avec celui d'une rame ICE3 ;
- La limitation des risques en matière d'innovation en vue d'obtenir une « homologation » sur les réseaux de nos voisins allemands, suisses et luxembourgeois ;
- La prise en compte des nouvelles réglementations nationales et internationales relatives à l'interopérabilité (S.T.I.), à la certification « CE » et au respect de l'environnement. (STI: Spécification Techniques d'Interopérabilité mise en application en fin d'année 2002).

Le défi est de concevoir un train à grande vitesse dimensionné pour l'exploitation nationale dont la vitesse de croisière est de 320km/h sur de longues distances et adapté pour l'exploitation sur le réseau allemand, où les itinéraires comportent de nombreuses variations de vitesse et des arrêts fréquents, sous une alimentation 15kV 16,7Hz, conduisant inévitablement à une augmentation de masse du transformateur principal par rapport à celui d'une motrice TGV classique alimentée en 25kV 50Hz.

2 Pourquoi une nouvelle motorisation ?

Lorsque l'opérateur ferroviaire doit relever un tel défi, il s'empresse de faire 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. Tout naturellement cet inventaire commence par la rame TGV quadri tension qui assure le trafic entre Paris - Bruxelles – Köln (Cologne) - Amsterdam : le PBKA.

Le TGV PBKA

Apte à 300km/h sur nos L.G.V., le PBKA n'a pas été conçu pour circuler à 300km/h sur les nouvelles L.G.V. allemandes. Son exploitation en Allemagne est limitée aux parcours terminaux Aix la Chapelle Cologne (70km), et à son prolongement vers Düsseldorf et Dortmund, avec la possibilité de rouler à 250 km/h sur ligne à grande vitesse. 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.

Le TGV « PBKA* »

En cours d'étude, avec une évolution judicieuse du schéma de puissance des motrices PBKA, il a été envisagé une formule « PBKA » procurant, en alimentation 15kV 16,7HZ, une puissance à la jante de l'ordre de 850kW à 860kW par essieu moteur. Cette formule apporte également à la rame au delà de 120km/h un effort suffisant justifié par un profil de vitesse très tourmenté illustré plus loin par la figure 8. Il devenait alors possible d'exploiter le TGV POS sur le parcours allemand.

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. L'idée venait tout simplement des fondamentaux de l'électricité : pour un même dimensionnement en courant I, en doublant la tension U, la puissance P est doublée (P=UI). Enfin elle laissait intacte la partie puissance sous 25kV 50Hz. Le logiciel des blocs moteurs était simplement corrigé pour tenir compte du nouveau réglage de puissance sous 15kV. Les risques lors de la mise en service auraient donc été très faibles. Cette solution avait également l'avantage de limiter les investissements nécessaires au maintien opérationnel des rames : formation des services de la maintenance, mise en œuvre de nouveaux bancs de test, achat d'un stock de nouvelles pièces détachées, etc ...

Sous 15kV, l'alimentation des blocs moteurs et des auxiliaires de la motrice PBKA 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.

Afin de respecter les 17t à l'essieu exigées sur nos L.G.V. et imposées maintenant par les S.T.I., cette solution devait conduire entre autre, à déporter les deux batteries de chacune des motrices vers les remorques d'extrémité R1 et R8.

Les choix techniques de la motorisation du TGV POS

Il est clair que 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 PBKA très difficile en terme de masse.

Les possibilités actuelles offertes par la mise en œuvre des structures utilisant des modules I.G.B.T., les études déjà réalisées depuis 1998 relatives au « TGV Nouvelle Génération » 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.

L'opportunité a également été mise à profit pour faire évoluer la technologie et les logiciels des électroniques de pilotage des équipements de traction déjà très marquées par des obsolescences de nombreux composants électroniques et des outillages de développement des logiciels.

Les travaux menés par l'industriel, en collaboration avec l'opérateur ferroviaire, aboutissent à une nouvelle chaîne de traction modulaire à motorisation asynchrone. Cette nouvelle motorisation pourra être mise en œuvre sur des motrices dérivées des motrices commandées dans le cadre du marché PBKA. Elle répondra d'une part aux exigences des S.T.I. et à la réglementation européenne en termes,

- de masse ;
- de performance dynamique,
- de facteur de puissance,
- d'efficacité énergétique,
- d'accès aux infrastructures des réseaux français, allemand, suisse et luxembourgeois.

et d'autre part aux besoins de la SNCF en termes opérationnels relatifs:

- aux temps de parcours, en particulier sur les axes Paris - Francfort, Paris - Munich et Paris - Zurich,
- à la maintenabilité, à la fiabilité, et à la disponibilité au moins équivalente à celle de nos TGV,
- et à la couplabilité avec les TGV Réseau, Duplex et PBKA.

Elle conserve également l'ergonomie d'utilisation et les principes de sécurité en freinage déjà éprouvés sur l'ensemble des 377 rames TGV de la SNCF reprises aux inventaires de juillet 2003.

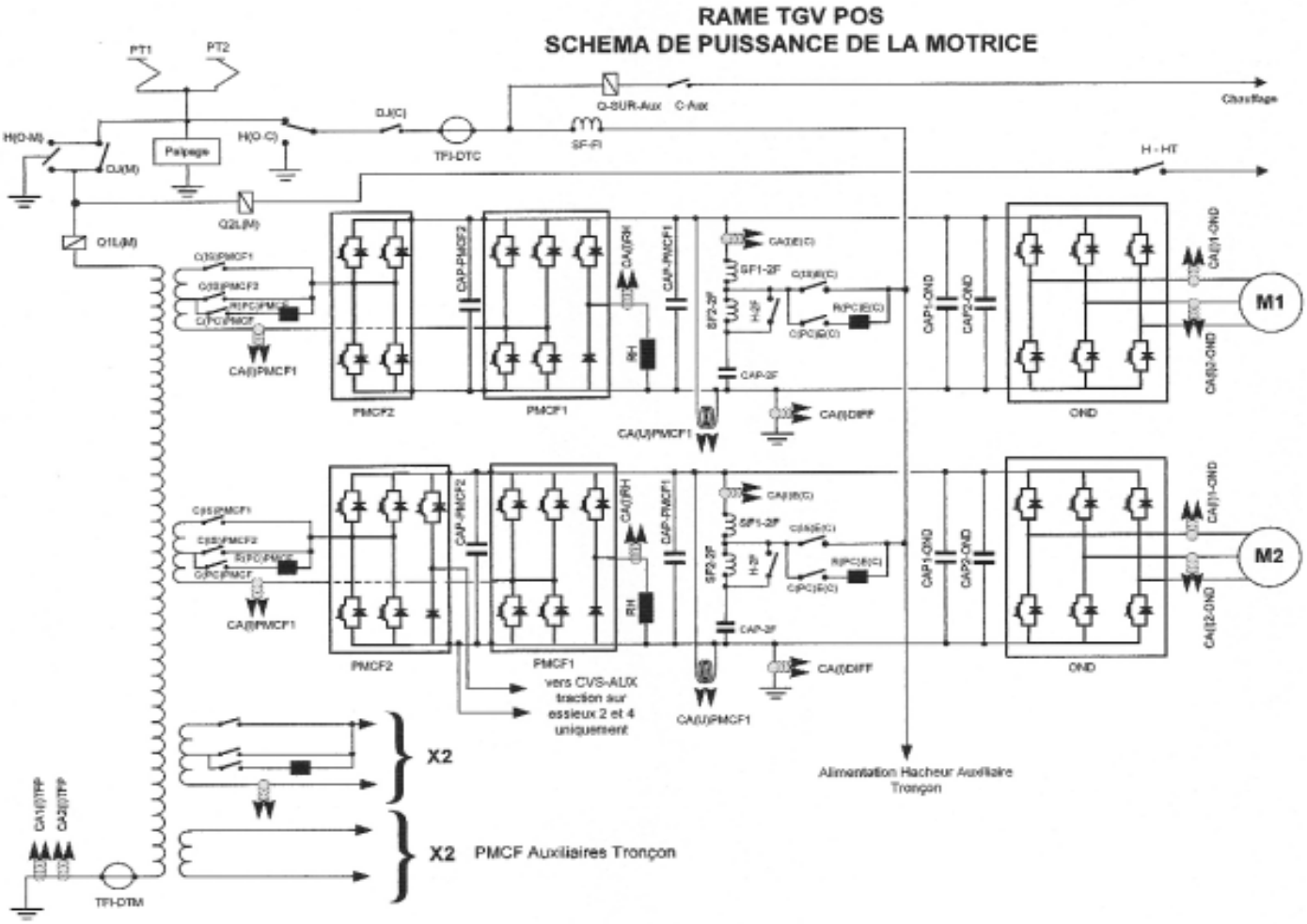
3 L'architecture de la nouvelle motorisation

3-1 Schéma de puissance de la motrice

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 présente de manière synthétique l'architecture du

schéma de puissance. La motrice POS est constituée de 4 ensembles « essieux moteurs » regroupés au sein de deux bloc 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 ».

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



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 de la France, du Luxembourg et de nos voisins allemands et suisses chacun des « bus » est alimenté respectivement par un enroulement du transformateur principal associé à un convertisseur 4 cadrans (ces convertisseurs sont aussi appelés « 4QS » chez nos voisins allemands et suisses) 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 dit « 2F » destiné à limiter l'ondulation de tension sur le bus continu engendrée par le redressement ; en alimentation 25kV 50Hz le filtre « 2F » 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 entre la tension caténaire et le courant de traction afin de régler le facteur de puissance *(le facteur de puissance λ est défini par le produit du facteur de forme par le facteur de déplacement « cos ϕ ». Plus λ est voisin de 1 plus la forme du courant de traction est sinusoïdale et plus et plus le cos ϕ est lui aussi proche de 1, plus la consommation du train est « propre »)* au voisinage de l'unité, possède la topologie d'un onduleur monophasé. 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.

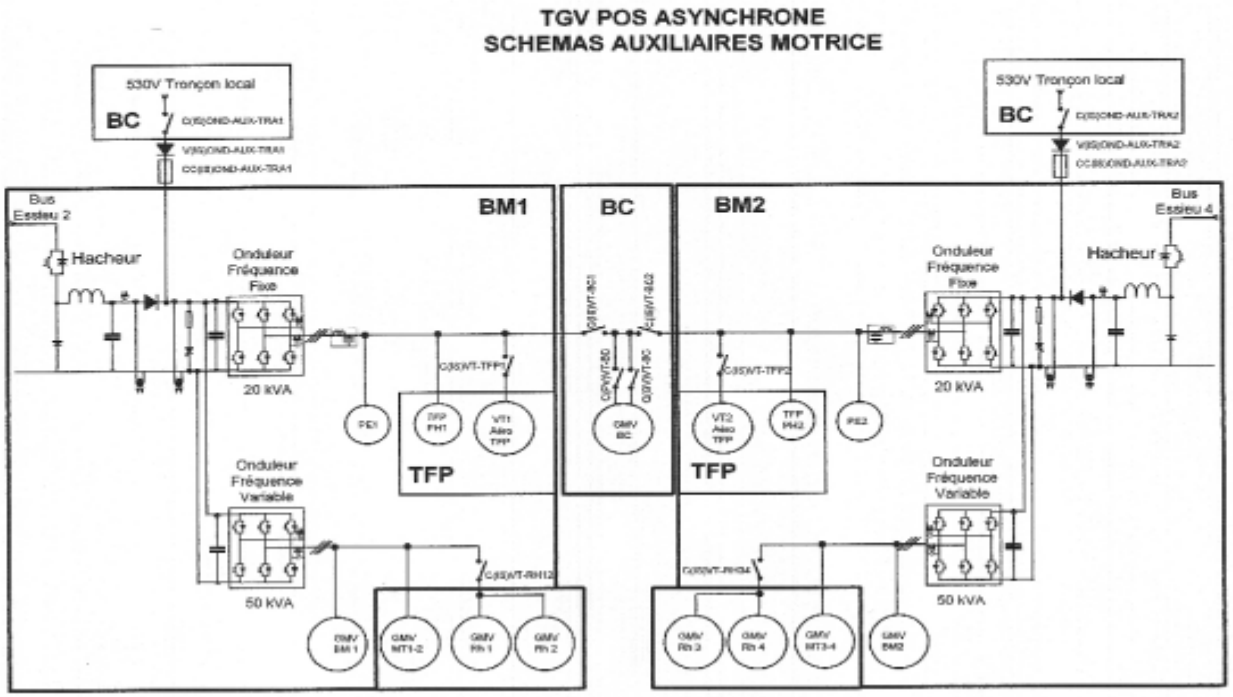
En alimentation à courant continu chacun des bus est connecté à la self de filtre principal par l'intermédiaire d'un contacteur d'isolement et d'un dispositif de pré-charge des capacités du bus de tension. La SNCF a bien entendu décidé de maintenir le schéma de traction en alimentation 1500V continu bien que les parcours sur les réseaux Est-européens soient purement en alimentation à courant monophasé. Ce choix permettra des prolongements de missions vers l'Ouest, le Sud Ouest et le Sud Est de la France.

Cette structure confère à la motrice TGV POS une indépendance de chaque essieu moteur pour toutes les alimentations ; les modes communs étant réduits aux organes les plus fiables : le transformateur en alimentation à courant monophasé, la self du filtre principal en alimentation à courant continu. Les dispositions de secours classiques, mises en œuvre sur tous les TGV lors d'une avarie sur l'un des circuits en amont du transformateur principal (pantographe, dispositif de palpage, disjoncteur, etc...), sont évidemment conservées et permettent d'alimenter la rame sans perte de performance et de confort pour les voyageurs. Ainsi la structure de la chaîne de traction offre une très grande disponibilité pour l'exploitation de la rame sur tous les types de parcours et d'alimentations.

Cette indépendance à l'essieu moteur pourra être exploitée, sur le TGV POS, selon des modalités en cours de définition. En effet, aujourd'hui, sur un TGV Réseau par exemple, une défaillance sur un équipement de puissance du bloc moteur conduit à la perte de l'effort de traction de 2 essieux moteurs et à un signalement approprié vers l'agent de conduite (lampe de signalisation au pupitre et action vers le G.D.I.). L'adoption de la nouvelle architecture de la chaîne de traction permet en cas de défaillance d'un organe de puissance, l'isolement d'un seul essieu moteur. Ainsi la perte d'effort de traction ne serait plus que de 1/8 de l'effort total dans le cas du TGV POS au lieu de 1/4 dans le cas des autres TGV. La démarche vers l'exploitation de cette opportunité est menée avec beaucoup de prudence compte tenu du souci d'intégration de cette nouvelle architecture qui ne doit pas conduire à une évolution du système informatique embarqué, nécessaire pour conserver la couplabilité entre rames TGV de différente nature.

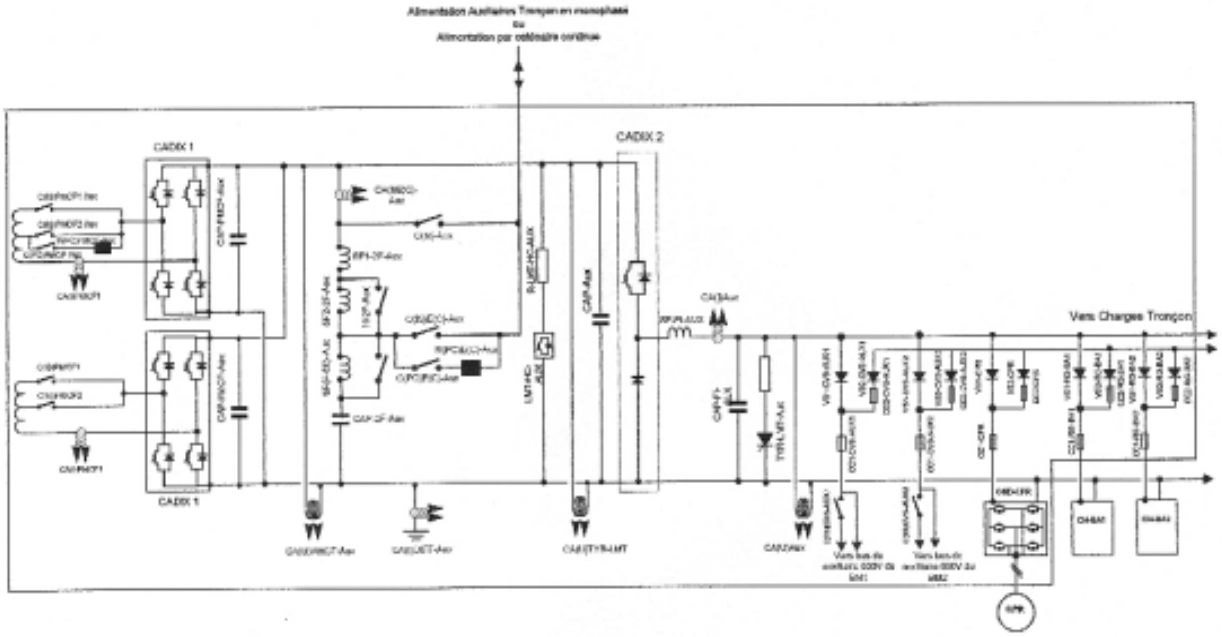
Les circuits auxiliaires des blocs moteurs représentés sur la figure 2 sont alimentés, à partir du bus de tension continu des essieux 2 et 4 respectivement par un hacheur abaisseur et par deux onduleurs triphasés de 50kVA. Chacun des blocs moteurs se partage l'alimentation des pompes à huile et des moto-ventilateurs du transformateur principal. Ils alimentent en redondance le moto-ventilateur du bloc commun.

Figure 2 : Schéma de puissance des auxiliaires de la motrice



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. en alimentation à courant monophasé, soit par une connexion à la self de filtre principal en alimentation à courant continu (figure 3). Les tensions fournies sont identiques à celles acceptées par le tronçon des TGV Réseau : 1500V pour les circuits de chauffage et 530V pour l'alimentation des circuits destinés aux auxiliaires. Ainsi connecté au bus 1500V un hacheur abaisseur fournit le 530V nécessaire au tronçon.

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



3-2 l'architecture électronique de la motrice

3-2-1 Le réseau TORNAD*

Depuis la mise en service commerciale en 1989 du TGV Atlantique, les TGV sont équipés d'un Système Informatique Embarqué (S.I.E.) véritable « colonne vertébrale » du système de gestion des fonctionnalités du train. Ce dernier permet l'échange d'informations entre les différents ordinateurs répartis dans la rame. Le S.I.E. est également le support de transmission des informations nécessaires à la réalisation des compositions en unité multiple (U.M.). Le réseau « TORNAD* » équipe toutes les rames TGV conçues dans la filiation des TGV Réseau : PBA, PBKA et TGV Duplex.

Les différents éléments qui composent le système informatique sont :

- sur chaque motrice, un calculateur baptisé Unité de Traitement Principal (U.T.P.) qui gère les commandes locales, les signalisations, l'aide à la conduite, le transfert des informations à destination du ou des U.T.P., et des autres calculateurs du train ;
- Sur chaque motrice, un calculateur nommé Unité de Traitement Auxiliaire (U.T.A.) assure, la redondance de l'U.T.P. ;
- Sur chaque remorque, un calculateur baptisé Unité de Traitement Remorque (U.T.R.) qui supporte la fonction « anti-enrayage » et qui accueille les périphériques dédiés en particulier au confort des voyageurs, aux afficheurs de destination, à l'afficheur pour l'agent de train ;
- Sur chaque motrice, deux calculateurs nommés Unité de Traitement bloc Moteur (U.T.M.) qui traitent toutes les fonctions de pilotage, le traitement des consignes et la surveillance du bloc moteur.

3-2-2 Pourquoi conserver TORNAD* ?

Une des exigences importantes du cahier des charges est la « couplabilité » des rames TGV POS avec la famille des TGV Réseau, PBA, PBKA et TGV Duplex. Une autre exigence qui n'est pas des moindres est la constitution des rames TGV POS avec un tronçon TGV Réseau existant qui lui est déjà équipé du réseau « TORNAD* ». La SNCF et l'industriel n'ont donc pas jugé opportun de faire évoluer le système informatique embarqué. En effet, développer un nouveau réseau informatique spécifique au TGV POS aurait entraîné l'étude et la réalisation d'une « passerelle » entre « TORNAD* » des rames actuelles et ce nouveau réseau qui aurait conduit à une longue période de validation et de tests de non-régression.

3-2-3 Impact sur l'architecture électronique de la motrice

Le TGV POS sera donc équipé d'un réseau informatique identique à celui des TGV Réseau. Donc le coupleur des blocs moteurs au S.I.E. doit être lui aussi identique à celui du TGV Réseau. Ainsi la carte « CRV5 » qui supporte la liaison série de type RS 485 sera réutilisée. Cette carte sera implantée dans un tiroir qui assure en quelque sorte la « passerelle » entre « TORNAD* » et le bloc moteur. Ce tiroir est appelé « TORNAD*/LS485 ».

Dans ce contexte, les modifications du logiciel S.I.E. sont donc aussi à éviter. Cette contrainte très forte a un impact direct sur l'architecture et sur le fonctionnel de l'électronique d'interface entre le bloc moteur et le S.I.E. :

- Le tiroir « TORNAD*/LS485 » doit assurer une passerelle et un découplage entre la structure informatique de la motorisation et l'informatique du réseau de bord ;
- Les évolutions des logiciels applicatifs du « fonctionnel » côté bloc moteur n'impactent pas le SIE ;
- Les messages échangés avec l'U.T.P. (et l'U.T.A.) doivent reprendre la structure existante.

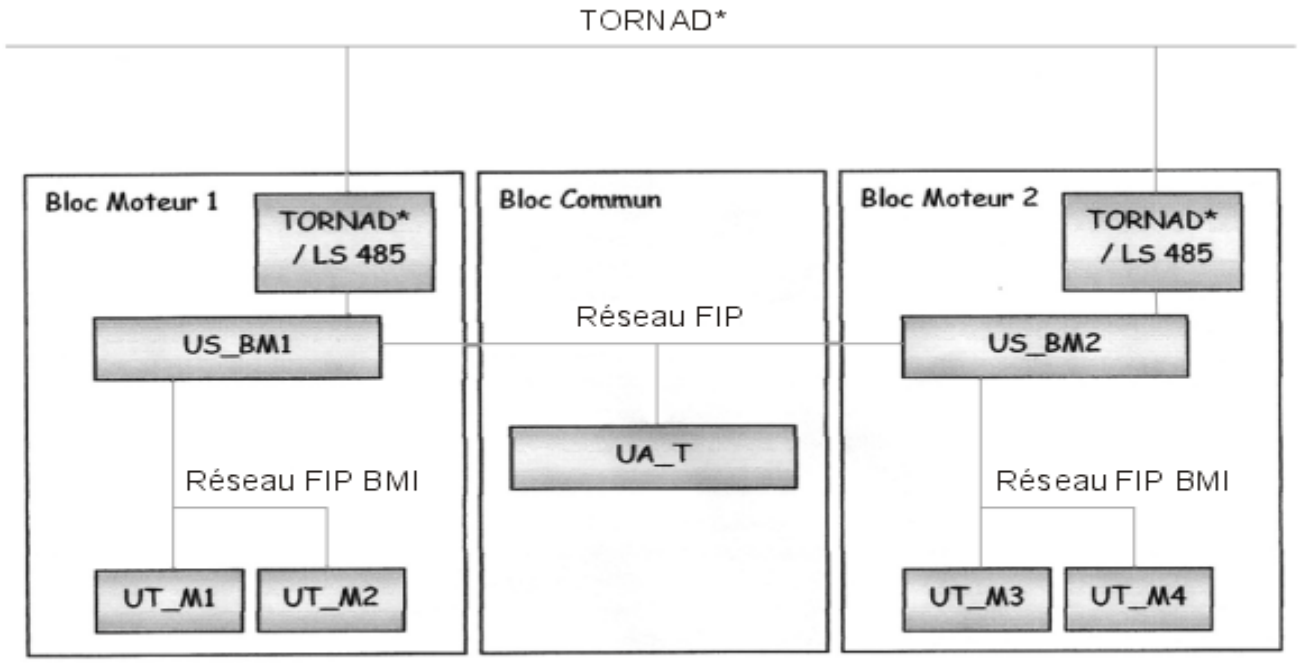
3-2-4 Architecture de l'électronique de pilotage associée à la motorisation

La figure 4 représente l'architecture de pilotage retenue pour la nouvelle motorisation du TGV POS. Chaque bloc moteur dispose de 3 tiroirs électroniques de type « AGATE 3 » :

- 1 tiroir «superviseur » appelé « US_BM ». Les US_BM de chacun des blocs moteurs de la motrice sont connectés entre eux par un réseau F.I.P. (Factory Instrumentation Protocole), déjà en service sur de nombreux matériels moteurs récents.
- 2 tiroirs de commande de la motorisation qui assurent le pilotage et la surveillance des différents convertisseurs de chaque essieu : P.M.C.F., onduleur, hacheur de freinage.

La connexion au réseau « TORNAD* » est réalisée au niveau de chacun des blocs moteurs. Cette solution ne modifie pas le nombre « d'abonnés » du système informatique de bord. Elle confirme la possibilité d'utiliser le S.I.E. existant sans modification des logiciels, elle renforce également l'assurance de la non modification du fonctionnement du système actuel.

figure 4 : architecture de l'électronique de pilotage de la motorisation et « couplage » au S.I.E. de la rame TGV POS.



Les tiroirs US_BM :

Le tiroir électronique Unité Superviseur Bloc Moteur (US_BM) assure des fonctions séquentielles de type « automates » et des fonctions de calcul et de pilotage de type « temps réel ». Elles peuvent se présenter de la manière suivante :

Fonctions séquentielles :

- gestion de la liaison série Type RS485 permettant la communication entre les électroniques de pilotage de la chaîne de traction et le S.I.E. via le coupleur « TORNAD*/LS485 » ;
- gestion de certaines fonctions dites de « relayage BT » sur la motrice ;
- supervision des tiroirs UT_M (entre autre la transmission des consignes en provenance du S.I.E.) ;
- supervision du dialogue avec le S.I.E. pour les fonctions de maintenance embarquées (vidage des défauts, exécution des tests télécommandés depuis la cabine) et la mise en forme des données reçues par RS485 destinées aux commandes traction via le réseau F.I.P. et inversement ;
- surveillance des autres équipements reliés au réseau F.I.P. ainsi que la fonction « arbitre » du bus F.I.P.

Fonctions temps réel :

- Le contrôle du hacheur abaisseur des auxiliaires motrice permettant de générer la tension intermédiaire nécessaire aux onduleurs de ventilation des fonctions liées à la traction ;
- La commande de l'onduleur des auxiliaires pilotés à fréquence variable ;
- La commande de l'onduleur des auxiliaires pilotés à fréquence fixe ;
- La commande de l'écrêteur actif en sortie du hacheur abaisseur ;

Les tiroirs UT_M :

Deux tiroirs électroniques identiques nommés Unité de Traitement Moteur (UT_M) équipent chacun des blocs moteurs. Chaque UT_M est associé à un essieu moteur et assure les fonctions de type « temps réel »:

- Commande et pilotage des P.M.C.F. en traction et en freinage dynamique;
- Commande et pilotage des onduleurs de traction ;
- Commande et pilotage du hacheur rhéostatique de freinage ainsi que la gestion de la conjugaison du frein dynamique et pneumatique ;
- Fonction « anti-enrayage » ;
- Surveillance mécanique de la chaîne cinématique.

L'architecture de l'électronique de pilotage, associée aux convertisseurs de puissance, est parfaitement orientée vers une indépendance structurelle de chacun des essieux moteurs. Elle montre également un « découplage » et une indépendance entre les systèmes informatiques de bord. Une évolution soit du côté S.I.E., soit du côté bloc moteur pourra être maîtrisée par un simple contrôle des flux de données au niveau de la carte coupleur CRV5.

Le tiroir UA_T :

Le bloc commun est également équipé d'un tiroir électronique de type « AGATE 3 » nommé Unité Auxiliaire Tronçon (UA_T). Ce dernier est relié au réseau F.I.P. motrice. Cette mise en œuvre permet aux équipes de maintenance de collecter de manière télécommandée, depuis la cabine de conduite, les codes défauts mémorisés et leurs contextes. Ceci améliore le dispositif d'aide à la maintenance par rapport à la famille des TGV où le Bloc Commun n'est pas relié au S.I.E. Ce tiroir UA_T assure les fonctions de type « temps réel » suivantes :

- Commande et pilotage des P.M.C.F. des auxiliaires du tronçon ;
- Commande et pilotage du hacheur abaisseur (1500/530V) alimentant l'une des lignes « 500V » du tronçon.

Le tiroir TORNAD*/LS485 :

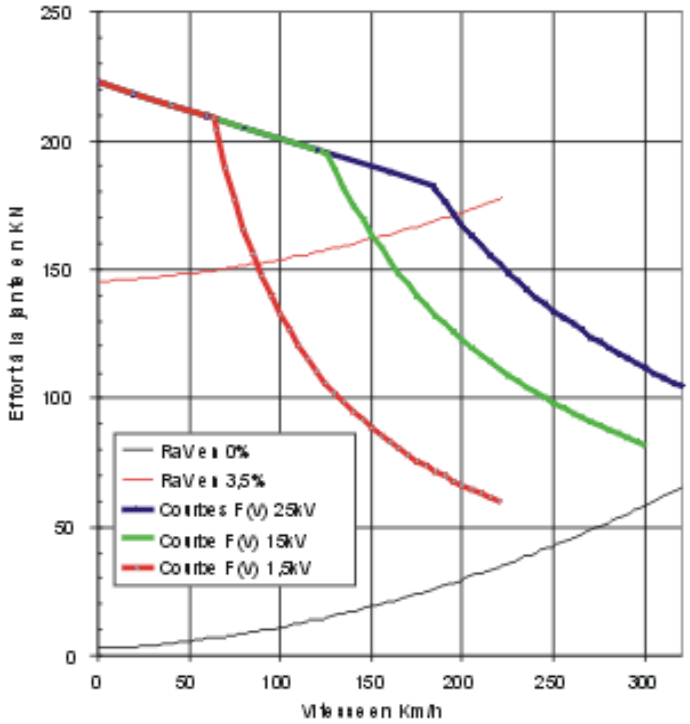
Chaque Bloc moteur est équipé d'un tiroir, maintenant de technologie ancienne, de type « AGATE 1 » (Eurofer 6U) assurant l'interface entre les US_BM et TORNAD*. Ce tiroir contient la carte coupleur « CRV5 ».

4 les principales caractéristiques de la motorisation du TGV POS

4-1 caractéristiques « effort-vitesse » F(V) en traction

Le souci du respect des S.T.I. et l'évolution des vitesses commerciales sur les réseaux allemand et français ont conduit à une augmentation sensible de la puissance transmise à la jante par essieu moteur. Les caractéristiques « effort-vitesse » F(V), sous les trois types d'alimentation, sont données à la figure 5.

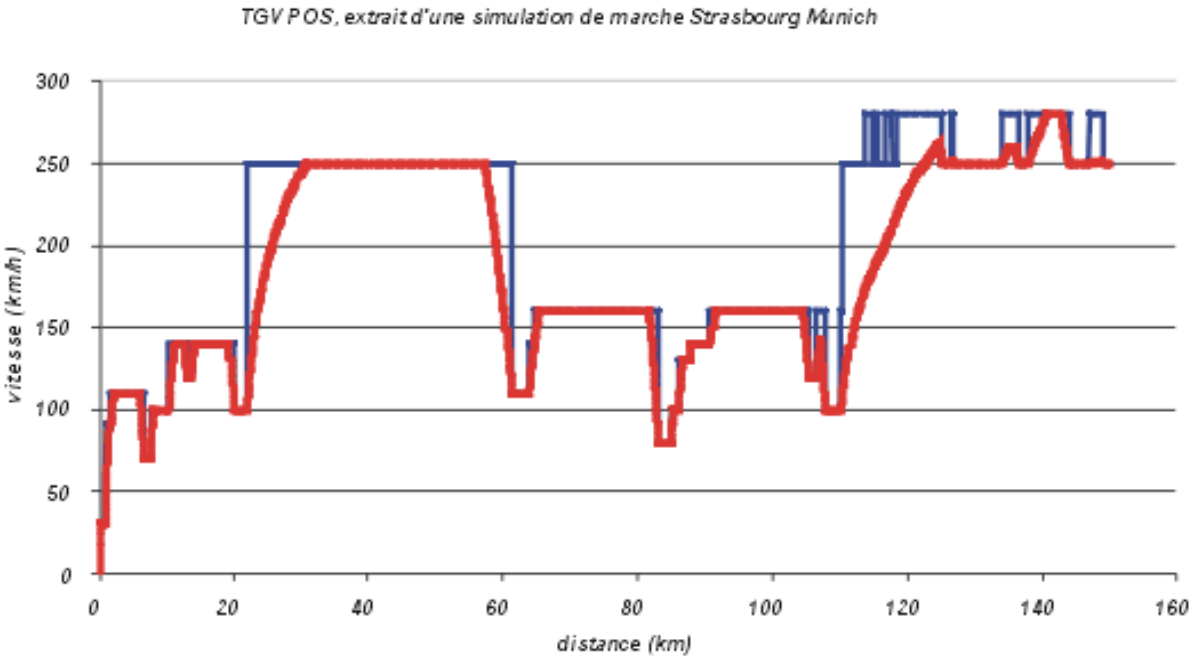
figure 5 :
Caractéristiques Effort-Vitesse, « F(V) » en alimentation 25kV 50Hz, 15kV 16,7Hz et 1500V continu



Sous caténaire 25kV 50Hz, l'augmentation de la vitesse passant de 300km/h à 320km/h a naturellement porté la puissance de 1100 à 1160kW à la jante par essieu moteur. Cette puissance permet de conserver un potentiel d'accélération à haute vitesse similaire à celui des rames TGV Réseau de la SNCF.

Sous caténaire 15kV 16,7Hz, pour respecter les exigences de la S.T.I. matériel roulant qui impose, à vitesse maximale, une accélération résiduelle en palier de 0,05m/s², la puissance à la jante par essieu moteur a été définie à 850kW. La figure 6, qui présente un extrait d'une simulation de marche entre Strasbourg et Munich, donne un aspect des performances de la nouvelle motorisation du TGV POS. Elle montre d'une part le polygone de vitesse imposé par l'infrastructure de la ligne et d'autre part la vitesse « réelle » (calculée) du train bénéficiant de la F(V) à 850kW jante par essieu moteur.

figure 6 : extrait d'une simulation de marche Strasbourg Munich : aperçu de la vitesse en pointillé et du profil de vitesse « tourmenté » en trait continu sur les 150 premiers kilomètres (Document SNCF).

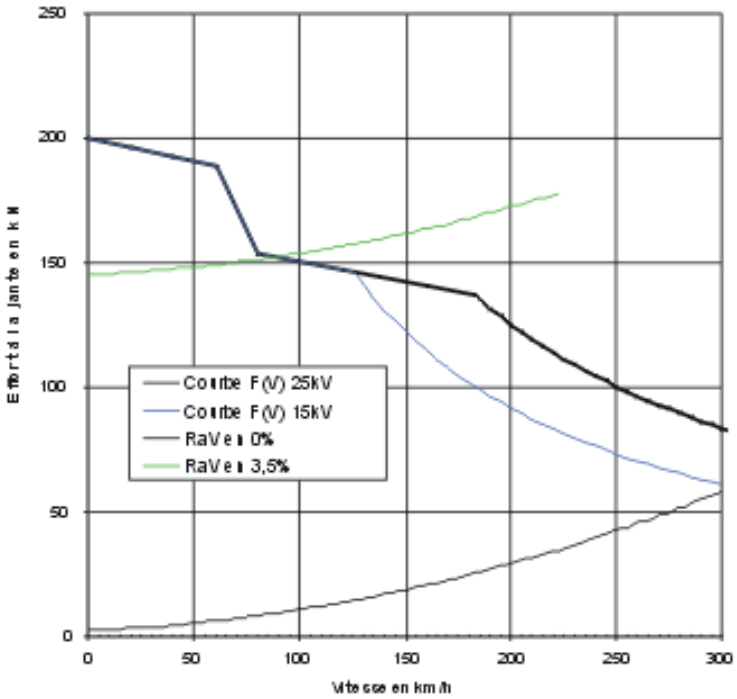


Sous caténaire 1500V continu, les caractéristiques de la nouvelle motorisation du POS sont similaires à celles des TGV Réseau et PBKA de la SNCF : la puissance développée sur un essieu moteur reste de 460kW à la jante.

Le dimensionnement de la caractéristique « effort vitesse » aux basses vitesses a également été conduit avec d'une part le souci du respect des S.T.I. qui imposent, avec 75% de motorisation, une aptitude au démarrage en rampe de 35mm/m et d'autre part la prise en compte des contraintes spécifiques des L.G.V. allemandes sur lesquelles il existe, entre Cologne et Francfort par exemple, des rampes en 40mm/m.

Dans le but de conserver les performances d'un TGV à motorisation synchrone, en configuration « 3 blocs moteurs en service » l'effort de chaque moteur a été augmenté de l'ordre de 20% dans la plage de vitesse de 0 à 70km/h (« booster »). Cet effort supplémentaire demandé au démarrage et pendant la mise en vitesse permet de démarrer dans toutes les rampes connues du réseau européen à grande vitesse, avec seulement 3 blocs moteurs en service et d'atteindre une vitesse d'équilibre de 80km/h dans les rampe de 35mm/m. Cette performance, illustrée figure 7, permet également de satisfaire aux exigences des S.T.I..

figure 7 : 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.



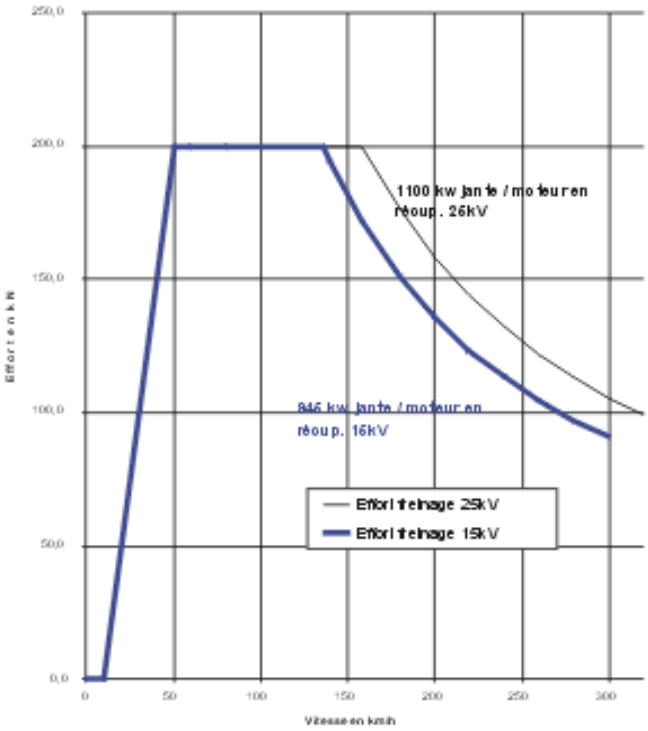
4-2 caractéristiques « effort-vitesse » F(V) en freinage dynamique.

La mise en œuvre du freinage électrique conserve les principes déjà largement éprouvés par les rames TGV de la SNCF. Pour assurer un freinage de service ou un freinage d'urgence, l'utilisation du freinage rhéostatique associée au freinage pneumatique a été reconduite. Cette disposition offre une indépendance vis à vis des aléas de la tension caténaire, et l'architecture électrique du schéma de puissance procure naturellement une indépendance entre chaque essieu motorisé.

Par contre en freinage de maintien, la parfaite réversibilité structurelle du schéma de puissance, offre « gratuitement » la possibilité de freiner en récupération d'énergie sans ajout de composants de puissance supplémentaires et sans commutations complexes. Cette disposition permet la restitution de l'énergie de freinage à la caténaire. Le freinage par récupération sera établi pour chaque freinage de ralentissement demandé soit par l'agent de conduite, soit par le dispositif de vitesse imposée.

Les caractéristiques « effort-vitesse » F(V) en freinage dynamique, à récupération d'énergie ou rhéostatique, sont données à la figure 8.

figure 8 : Courbes F(V) Freinage en récupération d'énergie sous 25kV 50Hz et 15kV 16,7Hz



De plus, pour obtenir l'autorisation de circulation à 160km/h en Allemagne, sur les lignes classiques non équipées de L.Z.B., la SNCF a décidé de renforcer le dispositif de freinage par frottement, par des patins magnétiques.

4-3 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. Ainsi le facteur de puissance est en tous points du plan effort-vitesse proche de l'unité offrant un gain sensible au dimensionnement des installations fixes de traction électrique. La rame TGV POS est ainsi conforme aux exigences de la S.T.I. Energie.

L'amélioration du rendement est très sensible. Un chiffre à lui seul image bien ce progrès : les pertes dans le transformateur principal qui est le plus gros contributeur en terme de pertes de la chaîne de traction ont été réduites de 20% par rapport à un transformateur de rame PBKA.

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%.

4-4 l'intensité psophométrique (Ipso)

Le courant psophométrique (Ipso) caractérisant l'agressivité du matériel moteur vis à vis des lignes téléphoniques riveraines de l'emprise ferroviaire, a bénéficié lui aussi, du changement de technologie. En 15kV, malgré l'augmentation sensible de puissance par rapport au TGV PBKA, l'Ipso est restée à un niveau très faible : voisin de 1,5A par rame. En 25kV, l'amélioration est très significative : au 12A maximum observés sur le PBKA, le TGV POS propose seulement de 2A.

4-5 Principales caractéristiques de la nouvelle motorisation du TGV POS

Le tableau suivant indique les principales caractéristiques de la nouvelle motorisation du TGV POS en relation avec les systèmes d'alimentation.

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 : λ	≈1	≈1	≈1	–
Intensité psophométrée en alimentation à courant monophasé : IPSO (A)	2	2	1,5	–
Rendement estimé	0,87	0,87	0,85	0,90

4-6 le bilan masse de la motrice :

Comme le montre la figure 9, l'implantation dans un chaudron de motrice TGV Duplex du transformateur, des blocs moteurs, du bloc commun et des rhéostats n'a pas entraîné de modifications substantielles de structure de caisse.

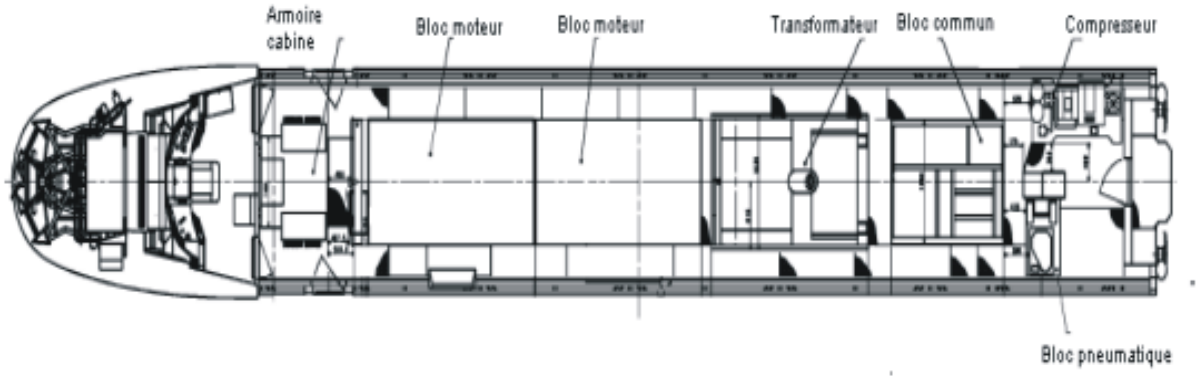


Figure 9 : implantation des équipements dans la motrice

En général, les améliorations telles que celles présentées précédemment s'accompagnent d'une augmentation de masse de la chaîne de traction. Là encore, le changement de technologie a été bénéfique. A périmètre constant, on estime de l'ordre de 2 tonnes la réduction de masse permise par l'apport de la nouvelle motorisation. Les principaux postes contributifs à cette réduction de masse sont les moteurs de traction et l'ensemble transformateur- inductances.

Ces gains de masse ont été mis à profit pour installer un couple de patins magnétiques sur le bogie arrière de la motrice plutôt que sur un bogie du tronçon, et pour conserver les batteries sur la motrice tout en respectant les limites de charge imposées par les S.T.I..

Ces évolutions majeures de la chaîne de traction se font sans remise en cause des principes de conception de la motrice. Les composants de la chaîne de traction sont regroupés par blocs appelés « bloc moteur » à raison de un par bogie. Les composants nécessaires à la production d'énergie auxiliaire quant à eux sont regroupés dans un « bloc commun » dans lequel se situe aussi certains composants de protection comme le disjoncteur continu. Comme sur nos TGV classiques, ces blocs sont implantés dans l'axe de la motrice. Le circuit de ventilation nécessaire au refroidissement des composants (transformateur, moteurs, composants électroniques de puissance....) a été reconduit : l'aspiration de l'air s'effectue par les faces latérales de la motrice, et en partie supérieure pour éviter les aspirations de neige et autres poussières, et le rejet en toiture par le lanterneau.

5 Les principaux éléments de la motorisation

5-1 Les équipements de toiture

- **Le captage**

Les motrices seront équipées de deux pantographes de type « CX » pilotés pour respecter les exigences de l'infrastructure des réseaux empruntés. La circulation sous la caténaire 15kV du réseau suisse impose un archet de 1450mm équipé de bandes d'usure en carbone. Cet archet sera également utilisé sous la caténaire 25kV française et luxembourgeoise.

Pour la circulation sur les réseaux allemand et français les dispositions actuelles des rames PBKA sont conservées. L'archet utilisé sous 15kV monophasé de la DB sera le même que celui pour le 1500V continu français. Par contre cet archet d'une silhouette nouvelle, comme le montre les photographies de la figure 10, sera composé de deux bandes d'usure indépendantes.

figure 10 : photographies de l'archet à bandes d'usures indépendantes, en investigation sur une rame TGV Sud Est

En effet la principale difficulté, du point de vue du captage, est révélée par l'augmentation de la vitesse de circulation sur certaines lignes à grandes vitesses du réseau Allemand, précédemment limitées à 250 km/h, qui devront être parcourues prochainement à 280 km/h. Cette augmentation de performance conduit à proposer une tête de captage à "bandes indépendantes" plus légère, procurant une réponse dynamique, à grande vitesse, plus efficace que l'archet classique actuel. Ces bandes en carbone dites "Haute Intensité" devront également être capables de capter les fortes intensités nécessaires sous 1500V continu.

- **Les équipements haute tension**

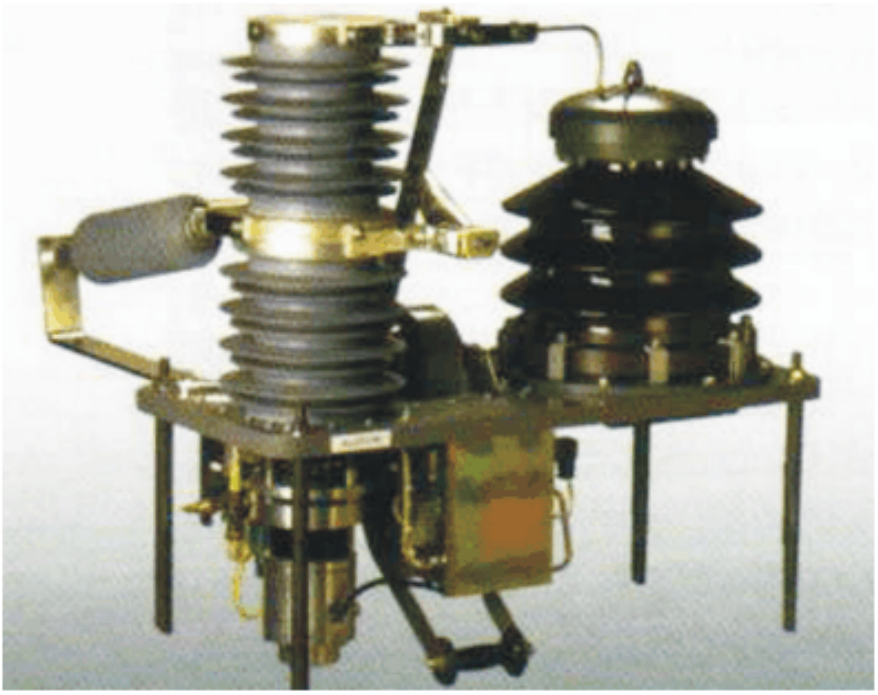
Les dispositions récentes déjà mises en œuvre et éprouvées sur d'autres matériels (BB27000, ZTER, Z20900, etc...) ont été reconduites. Elles se composent principalement :

- d'un disjoncteur monophasé DJ(M) à ampoule sous vide associé à un parafoudre et à une ferrite réduisant les nuisances électromagnétiques haute fréquence pour l'environnement ;
- d'un commutateur mono continu H(O-C) connectant à la « terre », sous alimentation monophasée, la partie de la ligne de toiture non utilisée;
- d'un sectionneur H(O-M) connectant lui aussi à la « terre » l'ensemble de la ligne de toiture lors d'une intervention par les personnels de maintenance, sur les équipements haute tension à bord de la rame POS.

- d'un transformateur de palpage ,
- d'une ligne de toiture 25kV identique à celle des autres TGV.

La technologie du disjoncteur à ampoule sous vide offre un pouvoir de coupure bien supérieur au disjoncteur classique à coupure à air comprimé, passant ainsi de 12kA à 20kA. Le vide d'air dans l'ampoule permet un rapprochement des contacts principaux et procure ainsi un fonctionnement plus rapide, et une commande plus simple. L'ampoule est calée dans un isolateur. Ces dispositions font de cet ensemble un appareil silencieux. Dans l'encombrement d'un disjoncteur à air comprimé, il a été possible d'associer au disjoncteur : le parafoudre monophasé, le sectionneur de mise à la terre et le transformateur de palpage. Cet ensemble, illustré par la figure 11, est dénommé : « combiné 4 fonctions ».

figure 11 : photographies du combiné 4 fonctions composé du parafoudre 25Kw à gauche, puis du disjoncteur à ampoule sous vide, du sectionneur de mise à la terre et du transformateur de palpage à droite.



5-2 L'ensemble transformateur et inductances

L'ensemble transformateur et inductances présenté figure 12, regroupe le transformateur principal (TFP) abaisseur de tension et les inductances de filtre d'entrée, de filtre pour le hacheur des auxiliaires, et des filtres « 2F » 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.

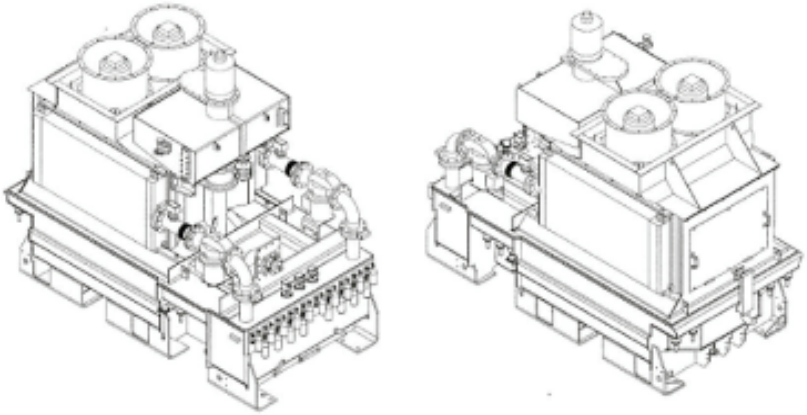


Figure 12 : Dessins CAO de l'ensemble « Transformateur et inductance »

5-2-1 Le transformateur

Le transformateur proprement dit 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.

5-2-2 L'ensemble inductances

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.

5-2-3 Caractéristiques générales

- Classe thermique

L'exigence impérative de masse et la performance souhaitée de la motrice POS en alimentation 15kV 16,7Hz conduisent à augmenter la masse du circuit magnétique par rapport à une performance équivalente sous 25kV 50Hz. Alors pour réduire au mieux la masse du cuivre, la densité de courant dans les conducteurs a été sensiblement augmentée. Ainsi le couple isolant solide/diélectrique liquide est défini pour tenir des températures de fonctionnement plus importantes. L'isolation est de classe thermique H.

- Caractéristiques 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

5-3 Le bloc moteur :

Le bloc moteur regroupe les convertisseurs nécessaires à alimenter d'une part les 2 moteurs de traction d'un même bogie, et d'autre part les auxiliaires de ventilation et de refroidissement des équipements de traction. Il regroupe également l'ensemble des contacteurs haute tension, l'électronique de commande, le bloc rhéostatique et le circuit de refroidissement des composants de puissance. La figure 13 représente les vues d'ensemble réalisées en CAO du bloc moteur.

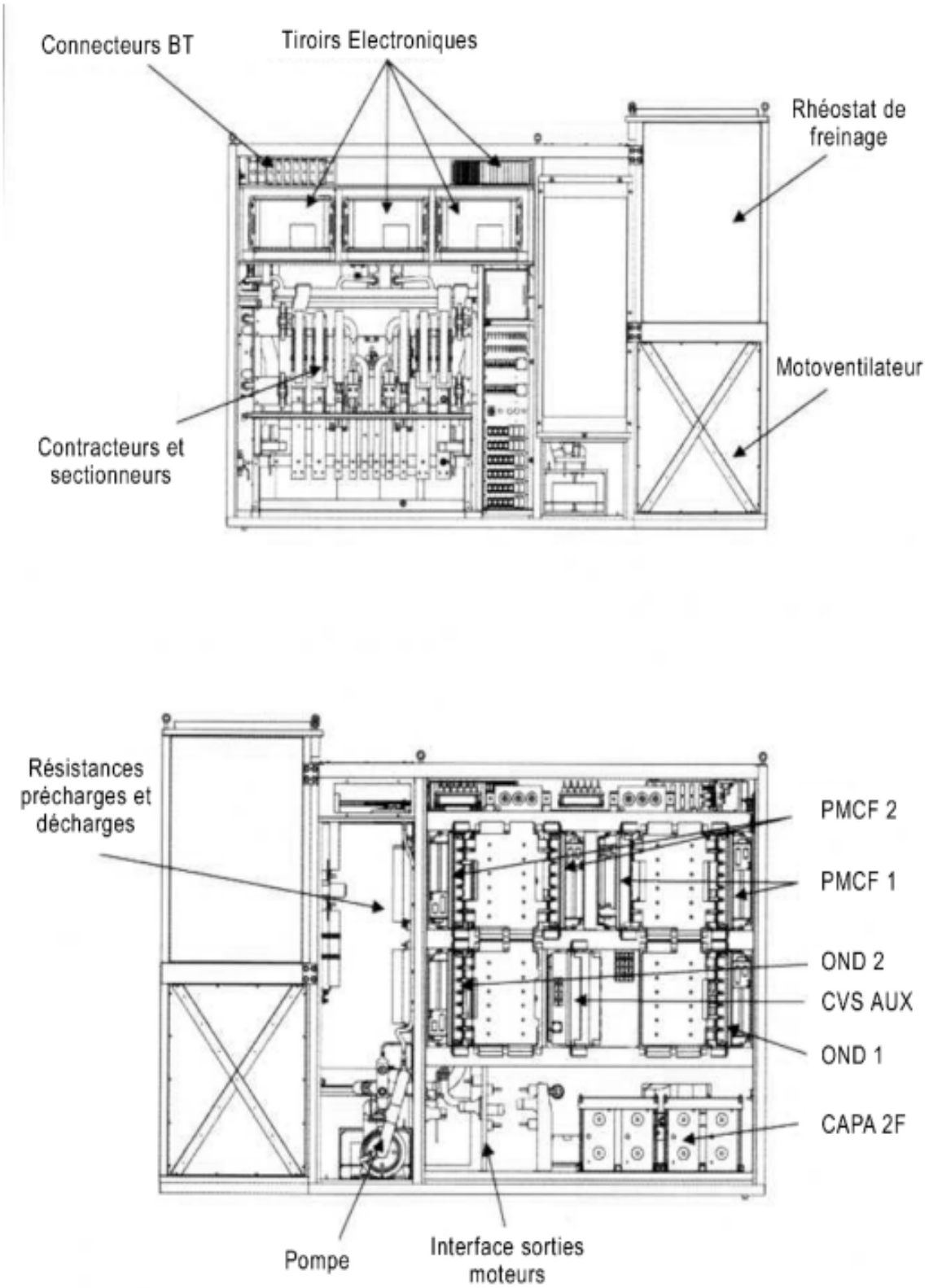


Fig 13 : Vues CAO de la structure du bloc moteur et de ses sous-ensembles

5-3-1 l'électronique de puissance

Le schéma de puissance de la figure 1 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 TFP 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. Les composants du P.M.C.F. sont disposés sur 2 platines du type « PALIX » : P.M.C.F.1 et P.M.C.F.2.
- Le hacheur rhéostatique, constitué respectivement, d'un module I.G.B.T. et d'un module diode de décharge ou « roue libre », montés sur la platine P.M.C.F.1 ;

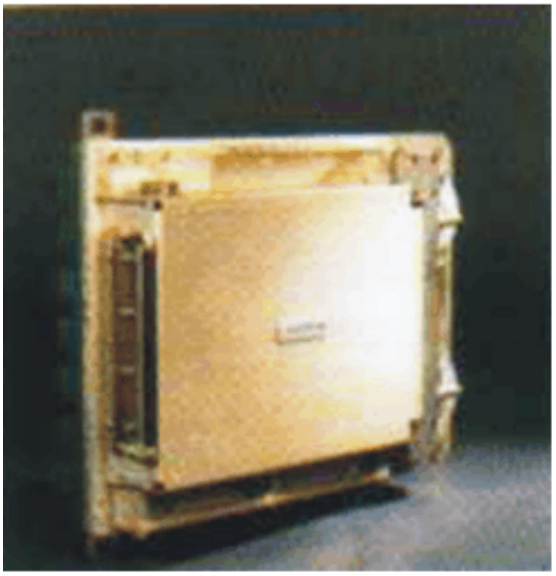
Les auxiliaires du bloc moteur sont alimentés par un hacheur identique au hacheur rhéostatique. Il est connecté au bus de tension des essieux 2 et 4 : ces essieux disposent ainsi de deux platines P.M.C.F.1.

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) bien sûr, mais également TER2N, Z20900, ZTER, TER2N NG.

L'assemblage de ces « briques » se réalise sur des « plaques » froides équipées de l'électronique de commande et de contrôle rapprochée des I.G.B.T. : les « drivers ». Elles sont conçues pour l'évacuation des pertes thermiques créées au sein des pastilles de silicium lors du passage du courant. Cette structure modulaire constitue l'élément déposable pour la maintenance.

5-3-2 La partie mécanique, le circuit d'eau, et le circuit aéraulique

Les modules de puissance font partie de la gamme « PALIX » et sont identiques à ceux qui équipent certaines locomotives électriques et Diesel récentes construites par ALSTOM (Amtrak, BB27000 et 37000 de la SNCF pour les électriques, et Iran, Syrie, ... pour les Diesel,). Leur technologie est largement répandue et éprouvée. Ces modules, présentés figure 14, sont constitués à partir d'une plaque métallique sur laquelle sont disposés les I.G.B.T. de calibre 3300V 1200A comme le montre la figure 15. La connexion entre chaque composant et les condensateurs de filtrage est assurée par des « bus-bars » faiblement inductifs qui limitent la surtension à chaque commutation. Ce type de module est configurable en une fonction P.M.C.F., onduleur, ou hacheur par exemple en jouant simplement sur le nombre d'I.G.B.T. et sur le choix du « bus-bar » pour réaliser les connexions utiles.



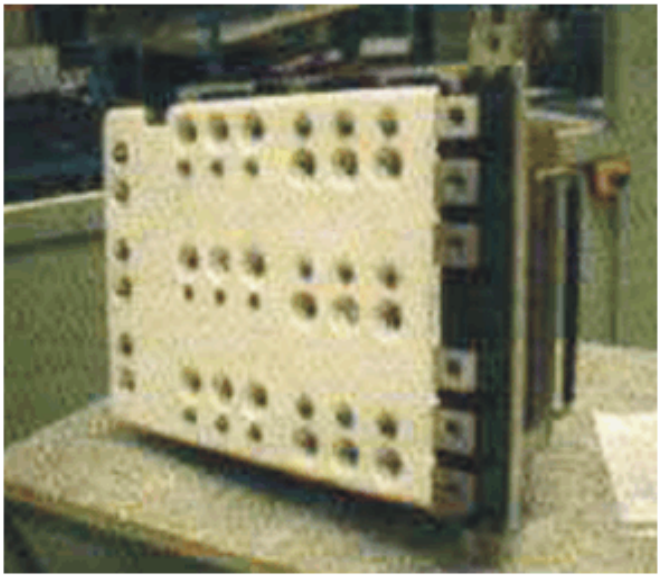


Figure 14 :vues d'un module de type « PALIX » le module présenté est l'onduleur triphasé complet, associé à un essieu capable d'alimenter le moteur de traction de 1200Kw. A droite, vue côté connexions de puissances et « bus bar »

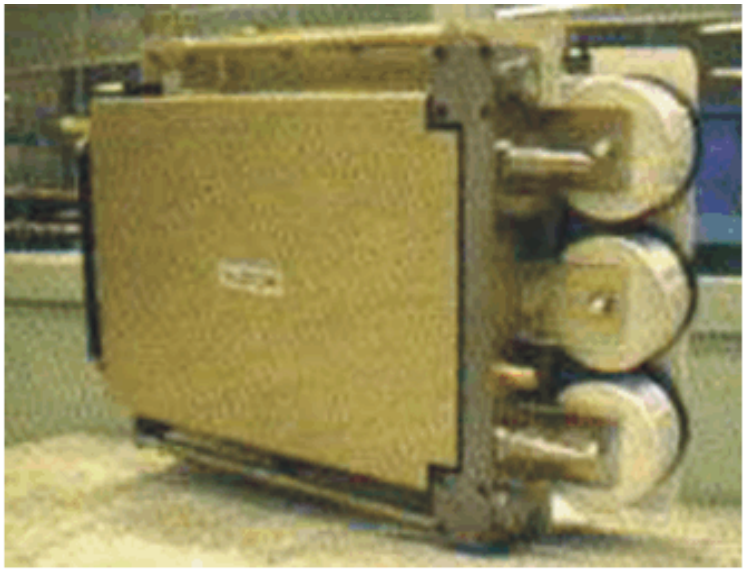


Figure 14 : représentant les connexions au circuit.

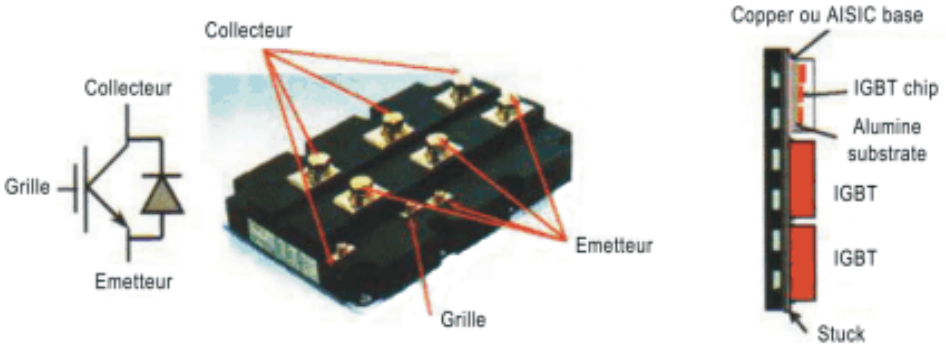


Figure 15:le module IGBT 3 300V/1 200A et le montage des modules IGBT sur la plaque « froide » du système PALIX..

Chaque plaque métallique est constituée d'un serpentin parcouru par un liquide caloporteur à base d'eau glycolée qui assure le refroidissement des composants de puissance. Le circuit de refroidissement spécifique à chaque bloc moteur visible figure 16, comprend : un vase d'expansion, une pompe qui assure la circulation de l'eau avec un débit de l'ordre de $5m^3/s$, un échangeur air-eau ventilé, et enfin les modules de puissance à refroidir. La température de l'eau est de 60 °C.

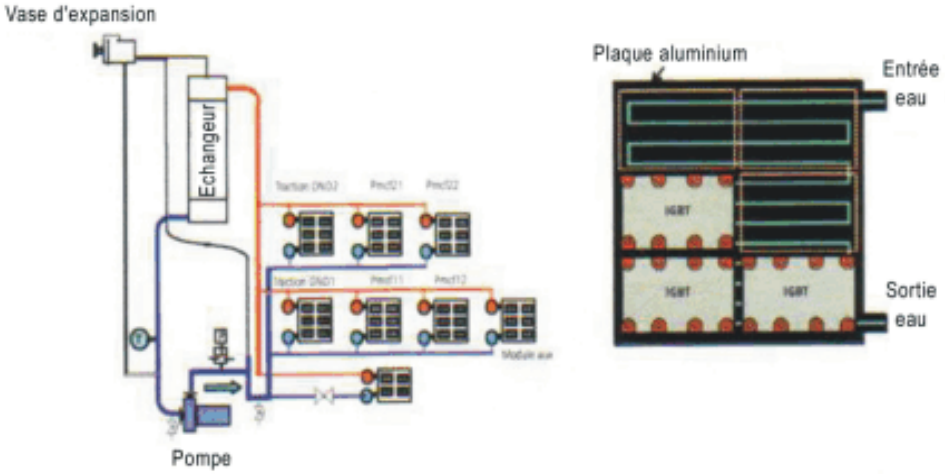


Figure 16:vue de la technologie PALIX, principe de refroidissement des modules IGBT. Principe de la boucle à eau et détail de la plaque froide.

Il faut souligner que cette technique de refroidissement fait appel à de l'eau, qui grâce à la structure des I.G.B.T. n'est pas en contact avec les pièces sous tension. Cette technique est parfaitement respectueuse de l'environnement.

Le système de ventilation est du type classique en cascade. L'air entre dans le bloc moteur par sa partie latérale via l'échangeur, ventile des composants passifs telles que résistances et inductances, puis traverse le groupe moto-ventilateur et les rhéostats avant d'être rejeté à l'extérieur via le lanterneau de la motrice.

5-3-3 Le rhéostat

Chaque essieu moteur dispose d'un rhéostat de type à colonne à ventilation forcée non plus disposé au dessus du bloc moteur comme traditionnellement, mais juxtaposé au bloc moteur comme le montre la figure 13. Leur puissance est de 900kW. Le débit d'air nécessaire au refroidissement des deux colonnes rhéostatiques est de $3m^3/s$.

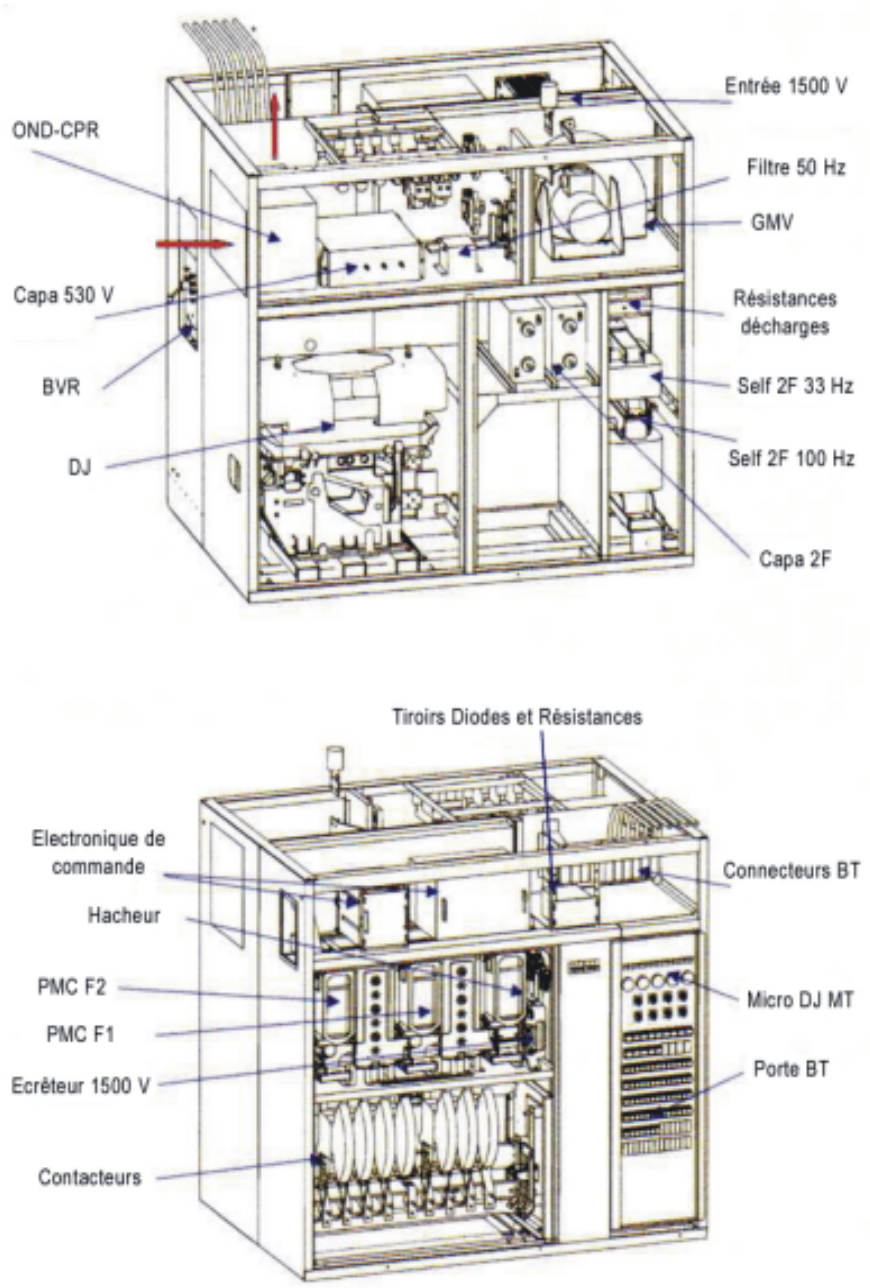


Fig : 17 Dessin d'ensemble du bloc commun et implantation de ses sous-ensembles

5-4 Le bloc commun

Le bloc commun, illustré par les vues en perspectives de la figure 17, regroupe principalement les équipements suivants :

le disjoncteur continu ;

les convertisseurs de production de l'énergie auxiliaire composés de 2 P.M.C.F. connectés en parallèle sur un « bus de tension » 1500V;

d'un hacheur abaisseur 1500V / 530V ;

un onduleur triphasé destiné à alimenter le compresseur d'air .

Le disjoncteur continu appartient à la famille des disjoncteurs ALSTOM ARC . Dans le cas du POS il s'agit d'un disjoncteur 1500V à commande électromagnétique de calibre 3500A. La conception du bloc commun a été réalisée de façon à pouvoir implanter indifféremment un disjoncteur 1500V ou 3000V dans le cas d'applications futures suivant un esprit gamme comme expliqué dans le paragraphe suivant.

Les modules de puissance des convertisseurs de production de l'énergie auxiliaire font partie de la gamme « CADIX », illustrée par la figure 18.

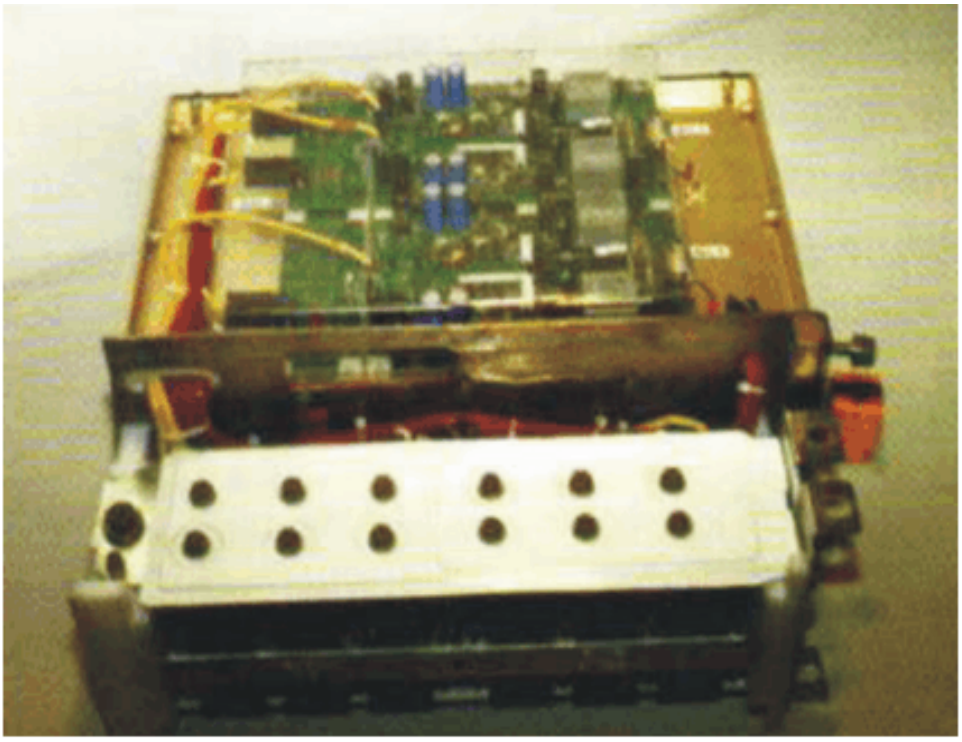


Figure 18: photo d'un module « CADIX » vue au premier plan du "bus –bar" réalisant la connexion des IGBT, et au second plan des circuits électroniques déclencheurs.

Cette famille de produits équipe depuis plusieurs années, de façon satisfaisante la plupart des automotrices récentes de la SNCF (Z20900 et ZTER). Ces modules sont constitués d'une « plaque froide » sur laquelle sont montés des modules I.G.B.T. de calibre 3300 V 1200 A, identiques à ceux des modules PALIX. L'échange thermique entre les modules I.G.B.T. et l'air utilise le principe du caloduc. Il se réalise grâce à un système de tubes étanches contenant de l'eau, insérés dans la « plaque froide », et disposés verticalement. L'avantage de ce dispositif réside dans sa simplicité. Le mouvement du fluide caloporteur ne nécessite aucun apport énergétique mécanique d'une pompe. Il se développe au sein du tube, simplement par ébullition et par évaporation au niveau de la source chaude, ici la plaque en contact avec les modules I.G.B.T.. En suite au sommet du tube, au niveau de la source froide qui est constituée par des ailettes ventilées fixées aux tubes, l'eau se condense et revient en gouttelettes vers la source chaude. Compte tenu des caractéristiques du caloduc, cette « mécanique » s'amorce à 65°C et permet au module CADIX de transmettre une puissance de 600 à 700 kW.

De même que pour les modules PALIX ; les CADIX sont configurables en différentes fonctions P.M.C.F., onduleur, ou hacheur, en adaptant le nombre de module I.G.B.T. et par le choix du « bus-bar ».

L'air pénètre dans le bloc commun par sa partie latérale, via les caloducs des modules de puissance, puis traverse le groupe moto-ventilateur du bloc et enfin ventile différents composants passifs (résistances et inductances de filtre).

Les électroniques de commande sont de même technologie que celles utilisées sur les blocs moteurs. Dans le bloc commun on retrouve un tiroir qui assure les fonctions de pilotage des convertisseurs de production de l'énergie auxiliaire.

5-5 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 19 donne une illustration du nouveau moteur de traction.

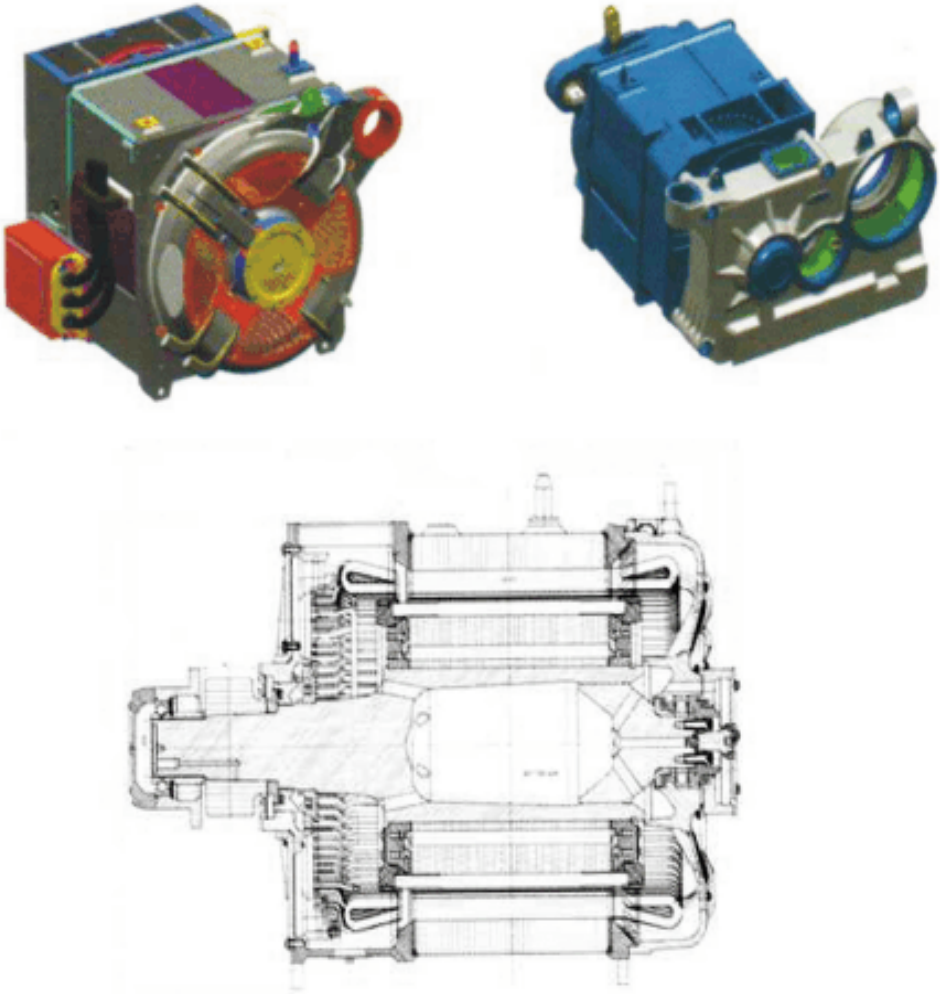


Fig : 19 Images du moteur et du réducteur et dessin en coupe du moteur

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'écureuil 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.

L'intérêt d'un tel moteur, par rapport à son équivalent synchrone qui équipe avec succès la majeur 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 compact et globalement conduit à une optimisation des coûts.

5-6 Les auxiliaires

Le rôle des auxiliaires consiste à alimenter de façon adaptée les charges qui assurent d'une part l'évacuation des calories produites par les organes électriques de la fonction traction et d'autre part la distribution d'énergie « domestique » à bord de la rame pour alimenter les systèmes de climatisation, les équipements de restauration, les installations frigorifiques du conditionnement alimentaire, l'éclairage, etc…. Leurs conditions de fonctionnement doivent être particulièrement étudiées car ils sont souvent à l'origine des nuisances sonores lorsque la rame est stationnée en gare par exemple. Leur fiabilité et leur disponibilité de fonctionnement dans toutes les conditions d'exploitation de la rame TGV doivent être assurées sans défaillance. L'architecture de la distribution d'énergie est structurée pour répondre à ces exigences.

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 » *(la tension continue distribuée à bord des rames TGV est souvent appelée le « 500V », en réalité la tension est réglée à 530V)* 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. Ces modules de puissance sont montés sur un « CADIX ».

Les lignes « 500V » alimentent également les chargeurs de batterie associés à chacun des blocs moteurs ainsi que le convertisseur statique du compresseur d'air de la motrice.

La fourniture d'énergie auxiliaire des blocs moteurs.

Pour chacun des bogies, les auxiliaires liés à la traction sont alimentés soit par un hacheur abaisseur connecté au bus à tension continue, soit directement par un « OU » à diode connecté aux lignes « 500V » communes au tronçon. Cette disposition nouvelle par rapport à celles retenues pour les TGV « classiques », se justifie d'une part pour assurer le refroidissement des équipements durant un freinage rhéostatique alors que la tension caténaire est absente, et d'autre part pour réduire le plus efficacement possible l'intensité des nuisances sonores en stationnement.

Chaque bogie moteur dispose de deux convertisseurs statiques : l'un destiné aux charges qui nécessitent des vitesses variables, l'autre alimente les charges fonctionnant à fréquence fixe. Ces deux convertisseurs sont dimensionnés pour alimenter l'ensemble des charges en cas de défaillance de l'un d'entre eux. La répartition des charges est la suivante :

- Charges à fréquence variable : le moto-ventilateur de refroidissement du circuit d'eau et du rhéostat, ainsi que le moto-ventilateur des moteurs de traction. Ces charges génératrices de nuisances sonores sont inactives lorsque la rame est en stationnement.
- Charges à fréquence fixe : la pompe à eau, les pompes à huile et le moto-ventilateur de du circuit de refroidissement du transformateur ainsi que celui du bloc commun. Pour réduire leurs nuisances sonores pendant les temps de stationnement, ces charges seront utilisées à faible vitesse et seront donc alimentées à fréquence réduite voire être inactives si les pertes à dissiper sont faibles.

5-7 les électroniques de commande

Généralités :

Les électroniques font partie de la gamme « AGATE 3 » qui équipe déjà les locomotives BB27000 de la SNCF et les rames automotrices TER2N NG. Basé sur une architecture de type PC industriel, le tiroir électronique, de technologie « easy-plug », est constitué par une carte mère unique au format 6U (260x480x300mm), sur laquelle vient se connecter sur deux niveaux des cartes au format 3U : un niveau Entrées/Sorties, et un niveau PCI comme le montre la figure 20. Le type de carte et leur nombre peuvent varier selon les fonctions à réaliser. Ainsi, les différentes cartes électroniques entrant dans la composition d'un tiroir sont les suivantes :

Sur l'étage PCI :

- ALNU : Alimentation 110W numérique (3,3V ; 5V ; +/-15V)
- ALCA : Alimentation 150W capteurs et allumeurs (+/-24V)
- PCST : Carte processeur superviseur du tiroir (processeur INTEL 486)

- NETX : Carte réseaux de communication (CAN, F.I.P.)
- CCN : Carte DSP pour les régulations des convertisseurs
- CCAx : Entrées Analogiques régulateurs (capteurs I, U, V)
- CCB : Sorties impulsions I.G.B.T. et retours
- OUTI : Outillage d'observabilité (sorties Analogiques)

Sur l'étage E/S :
- EBY4 : Carte 24 entrées logiques 72V
- SBT : Carte 14 sorties Basse Tension
- ESAL : Entrées sorties analogiques superviseur
- SYPH : Synchronisation P.M.C.F./Hacheur
- ALSV : Alimentation 5V sauvegardée
- CEV : Commande électrovalves
- ESFP : E/S frein pneumatique
- ECCC : Ecrêteur 1500V tronçon et court-circuiteur 500V.

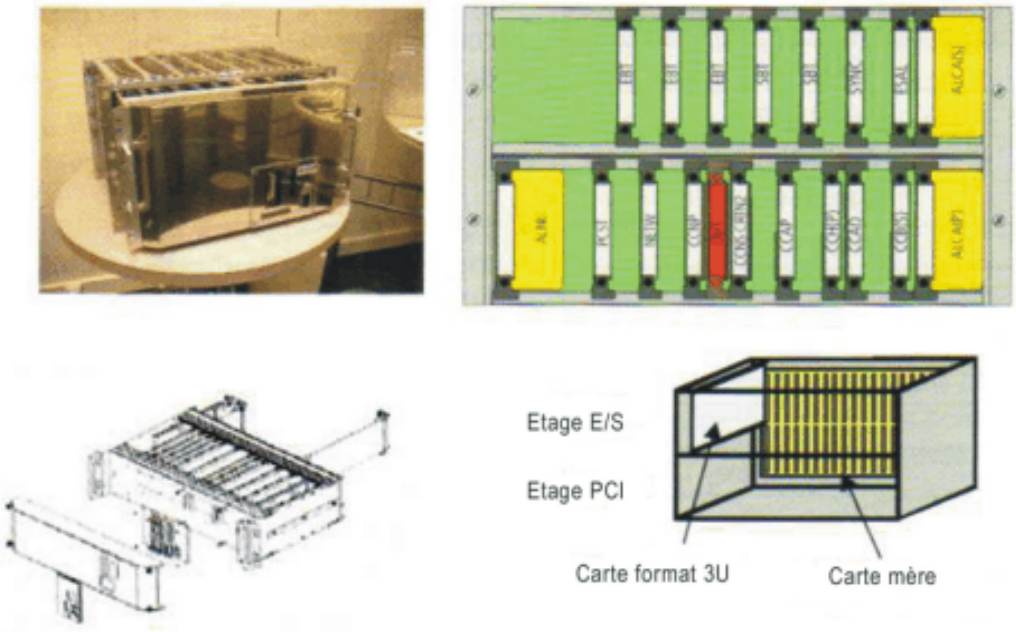


Fig : 20 Photo d'un tiroir "AGATE 3"
principe de la disposition des cartes électroniques et dessin CAO du tiroir de technologie "easy-plug"

6 L'esprit « gamme »

Le défi du TGV POS a constitué une opportunité pour le développement de cette nouvelle chaîne de traction. Les futures générations de train à grande vitesse pourront bénéficier des dispositions et des technologies retenues à cette occasion. L'esprit de conception de cette nouvelle motorisation prend en compte le respect des S.T.I., les exigences des principaux opérateurs ferroviaires et plus particulièrement celles des opérateurs européens. Ses caractéristiques principales sont :
- La capacité d'adaptation aux différentes tensions caténaires ;
- L'aptitude à démarrer dans les plus fortes rampes connues aujourd'hui du réseau à grande vitesse européen ;
- La modularité de ses équipements.

Ainsi plusieurs variantes peuvent être déclinées :
- Version bi tension 25kV, 1500V typiquement destinée à l'exploitation sur le réseau français ;
- Version tri tension 25kV, 1500V et 15kV avec comme application principale le POS ;
- Version tri tension 25kV, 1500V et 3kV pour des exploitations transfrontalières avec l'Italie ou la Belgique et un prolongement vers la Hollande par exemple.

L'intérêt d'une telle démarche est d'aboutir à une gamme de produits similaires, adaptables aisément à chacune des exploitations souhaitées par l'opérateur ferroviaire. La structure modulaire réduit la quantité et l'importance des adaptations pour passer d'une version à une autre. A partir de la version de base bicourant, la version tri tension 3kV s'en déduit immédiatement :

- Pour le bloc Moteur : adjonction d'un hacheur abaisseur 3kV/1500V et adaptation du jeu de contacteurs de reconfiguration du schéma de puissance ;
- Pour le bloc Commun : remplacement du disjoncteur 1500V par le disjoncteur 3000V

Le même principe est applicable au générateur d'énergie auxiliaire d'alimentation du tronçon. Il s'adapte aux tensions d'alimentation caténaire sans impacter les dispositions du bloc commun. Le jeu de contacteurs de reconfiguration du schéma de puissance est installé en fonction de la version souhaitée.

Ce développement réalisé avec « l'esprit gamme », présente un certain nombre d'avantages partagés par l'opérateur ferroviaire et l'industriel pour les futurs marchés :

- réduction des frais de développement (conception, validation, industrialisation) par réutilisation de produits existants ;
- standardisation des équipements, et limitation des types de pièces détachées pour la maintenance ;
- réduction des délais de fabrication, des essais de mise au point et des essais d'homologation ;
- minimisation des risques technologiques et industriels.

De plus les applications de cette « gamme » peuvent être étendues. Ainsi, à titre d'exemple, dans le cadre de projet de TGV de grande capacité (400m de long et 2 niveaux), la réutilisation des produits d'une telle gamme s'avérerait fort judicieuse.

7 Les étapes vers la mise en service

7-1 la conception

Cette phase d'étude et de réalisation des équipements de pré-série a débuté en avril 2002, avec en particulier l'écriture des spécifications techniques. L'été 2003 voit les premières réalisations :

- le montage des premiers blocs moteurs, ainsi que;
- l'installation du banc de test de la chaîne de traction à l'usine ALSTOM de Tarbes ;
- les moteurs de traction instrumentés subir leurs premiers tests à l'usine d'Ornans ;
- la réalisation des premiers tiroirs électroniques de la motrice TGV POS à l'usine de Villeurbanne.

7-2 les réglages au banc en usine

Les réglages de la motorisation ont commencé en septembre 2003 au banc d'essais à Tarbes. La structure du banc permet de tester l'ensemble des composants de la nouvelle chaîne de traction. Le banc sera utilisé pendant toute la phase de mise au point : il permettra de « rejouer » des scénarios difficiles à reproduire ou à mettre en œuvre en ligne.

7-3 la mise au point sur anneau d'essai et en ligne

Le premier tronçon TGV Réseau sera retiré du service fin mars 2004. Après équipement de patins magnétiques par l'E.I.M.M. de Bischheim il rejoindra Belfort pour la mise en rame prévue en Septembre 2004.
Les travaux de réglage des motrices de pré-série seront réalisés sur anneau d'essais, jusqu'à la vitesse de 160km/h, permettant de réduire la durée des premiers essais de mise au point. La phase finale de réglage sera réalisée à la vitesse commerciale sur les réseaux allemand, suisse luxembourgeois et français. Cette phase devrait occuper toute l'année 2005.

7-4 l'admission technique :

Compte tenu des réglementations spécifiques propres à chacun des pays la phase d'admission technique constitue une des phases « marathon » du projet. L'ensemble des activités nécessaires à l'obtention de l'autorisation de circulation sur chacun des réseaux concernés constitue un travail important d'ingénierie et de réalisation d'essais de qualification. Le travail comprenant en premier lieu l'élaboration du dossier de démonstration permettant de prouver que la conception et la réalisation du train tient compte du respect des exigences des S.T.I. et des exigences d'accès aux réseaux français, allemand, suisse et luxembourgeois, est déjà entamé. La phase d'essais qui confirmera les éléments théoriques de l'étude d'ingénierie et complètera le dossier d'admission ne pourra se dérouler qu'à partir du moment où le train sera en état final de mise au point. Ces essais de qualification ne pourront pas débuter avant fin 2005. L'estimation de leur durée est de l'ordre de 1 an : 2006 sera donc consacrée entièrement à cette phase ultime.

La réussite de l'admission technique des rames TGV POS sur les réseaux concernés permettra la préparation de l'exploitation commerciale avec la formation des agents de conduite et des personnels de bord. Cette étape est particulièrement importante car le succès de la mise en service des relations de la France vers l'Allemagne, la Suisse ou le Luxembourg en dépend.

8 La maintenance

La technologique du schéma de puissance de la motrice TGV POS est une opportunité pour l'E.I.M.M. de Bischheim, situé à proximité de Strasbourg, désigné comme atelier directeur de la série des TGV POS.

Déjà directeur des séries de TGV Sud-Est et Atlantique, ce nouveau directorat donne l'occasion de renforcer les liens existants avec les équipes du C.I.M. et permet un accès aux nouvelles technologies de l'électronique de puissance.

Ce choix réconforte la région Alsace qui s'est engagée financièrement dans le projet du TGV Est Européen. Il récompense aussi l'engagement des cheminots de Bischheim qui se sont investis depuis plus de 20 ans dans l'amélioration continue de la fiabilité et la modernisation des rames TGV. Nul doute que les efforts d'adaptation des compétences techniques et de l'outil de production seront réalisés avec le souci de réussir la mise en service de ces rames en 2007.

Des synergies seront recherchées avec les établissements industriels de la SNCF travaillant sur des technologies similaires (modules PALIX à l'E.I.M.M. d'Oullins, module CADIX à l'E.I.M.M. de St Pierre des Corps, ...) afin de faire profiter la maintenance future des motrices du TGV POS du retour d'expérience du comportement des locomotives BB27000 et BB37000 et autres automotrices.

Par ailleurs, Bischheim sera également chargé de la rénovation et de l'adaptation des remorques des rames POS, notamment suite à l'implantation du freinage par patin magnétique sur les bogies d'extrémité.

L'E.I.M.M. de Bischheim aura à accompagner dans l'acquisition des compétences liées à cette technologie le futur centre de maintenance TGV de l'Ourcq, situé près de la gare de l'Est, dont une illustration est donnée figure 21. Cet établissement aura à assurer l'ensemble des opérations d'examens, de visites et d'échanges d'organes.

Fig : 21 Vision du futur centre de maintenance des TGV de l' Ourcq

9 Conclusion et perspectives

C'est à la fin de l'année 2006 que les premières rames TGV POS de série feront leur apparition sur les réseaux ferrés européens. Le rythme des livraisons sera d'une rame par mois. Elles sont le fruit d'un travail en commun avec l'industriel où l'opérateur ferroviaire a été capable de définir précisément ses besoins et l'industriel capable d'offrir des solutions pertinentes en fonction du contexte technique, réglementaire et économique.

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. Cette structure est une première étape vers une nouvelle génération de trains à grande vitesse parfaitement adaptée à une exploitation sur l'ensemble des réseaux européens et toujours plus respectueuse de l'environnement.

Texte fourni par Michel DUROCHAT avec l'accord de :