

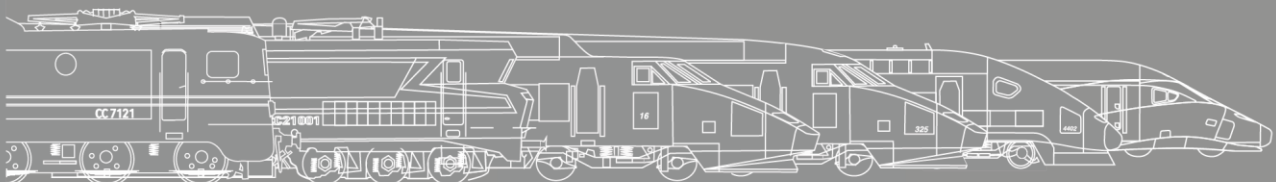
Histoire – Technique

Le TGV TMST

La création d'un matériel transmanche à
grande vitesse

Aurélien Desnues

Septembre 2026



Remerciements et avant-propos

Je remercie Gérard Auditeau, Florent Brisou, Daniel Brun, Michel Durochat, Olivier Flippe, Alain Jeunesse, Roger J. Kemp, François Lacôte, Alain Ledoux, Claude Pujol et Philippe Robert sans qui ce document n'aurait pas pu être aussi détaillé. Je remercie également Augustin Burgarella pour m'avoir permis de voir de plus près les pièces préservées de la rame 3302 stockées sur le site Oc'Via de Nîmes.

Ce dossier tentera, autant que faire se peut, de résumer l'histoire si particulière des TGV TMST à travers les difficultés rencontrées par les ingénieurs à sa conception et la technique lui permettant de circuler sur quatre réseaux, dont le Tunnel sous la Manche. Symbolisant l'ouverture de ce dernier et les premières relations transmanche à grande vitesse, il m'a semblé pertinent de rédiger un tel document afin de garder trace des différentes connaissances mais aussi éveiller les curiosités.



La rame 3015/3016 assurant l'Eurostar 9028 Londres St-Pancras – Paris Nord près de Baron, dans l'Oise.

Photographie : © Michel Moreau (avec son aimable autorisation).

Je dédie ce texte à Gaston.

Préface de Daniel Brun

M. Aurélien Desnues a fait une étude très complète et fort détaillée sur les rames Eurostar d'origine dites TMST et m'a très aimablement demandé de faire une introduction pour sa parution, en raison de mon rôle actif dans le groupe de projet mis en place par les trois réseaux concernés (SNCB, SNCF et BR) pour leur conception et leur réalisation. Son texte dépasse largement mes connaissances de ce matériel alors que j'ai pourtant été le responsable technique du projet au sein du GPI (Groupe de Projet International) mis en place par les trois réseaux cités ! Mais la confiance que je pouvais faire à mes collaborateurs français, belges et britanniques m'a permis de leur laisser prendre les dispositions jugées les meilleures sans que je sois, fort heureusement, « dans leur dos » pour les décider et en suivre de façon pointilleuse la réalisation. Je me contenterai donc de souligner l'extraordinaire engagement de tous ceux qui ont pris une part active dans la conception et la réalisation de ce matériel, tant au niveau des réseaux ferroviaires que des constructeurs, ayant eu pourtant à faire face à des problèmes sans précédent dans la construction de matériel roulant ; problèmes essentiellement dus à la crainte – légitime – des conséquences d'un incendie survenant dans un tunnel de 50 km, qui avait d'ailleurs conduit la France et le Royaume Uni à mettre en place une structure spécifique chargée d'édicter des mesures spéciales pour combattre les conséquences d'une telle catastrophe. Ce Comité de Sécurité franco-britannique composé de fonctionnaires n'ayant pas forcément de notion des caractéristiques particulières au matériel roulant ferroviaire avait un rôle déterminant dans la conception des différents matériels pouvant emprunter le Tunnel et faisait preuve d'un pouvoir littéralement discrétionnaire, qui a contraint réseaux ferroviaires et constructeurs à adopter des mesures totalement inédites et spécifiques aux matériels devant l'emprunter. S'y sont ajoutées des contraintes liées à la crainte d'un attentat par l'IRA (irlandaise) qui n'ont pas facilité les choses... Et enfin, il a fallu rendre ce matériel apte à circuler sur la ligne classique anglaise, au gabarit très étroit et électrifiée par 3^e rail sous la tension de 750 V ; à l'origine il n'était pas question de construction de ligne nouvelle en Angleterre (Mme Thatcher était plus qu'intransigeante sur ce point...), ce qui imposait d'emprunter la ligne existante jusqu'à Londres Waterloo (!!), avec cependant des travaux très importants qui n'ont servi que... treize ans ! Je tiens donc à souligner l'extraordinaire engagement des acteurs de cette réalisation, tant au niveau des trois réseaux concernés que des constructeurs : à aucun moment, la volonté d'aboutir, et dans

des délais remarquablement courts, n'a été mise en défaut. L'ingéniosité des techniciens, l'appui sans faille des instances dirigeantes de la SNCF des BR et de la SNCB, et notamment l'aide précieuse apportée par la direction du Matériel SNCF, ont eu un rôle déterminant dans l'aboutissement du projet dans des délais remarquablement courts. Tous ceux qui ont contribué à son aboutissement peuvent en être légitimement fiers. Même si, en fait, les contraintes imposées se sont révélées superflues pour une part non négligeable : la « sécabilité », qui a conduit à complexifier sensiblement les TMST et les contraintes fortes imposées par la circulation sur les lignes classiques anglaises se sont en fin de compte révélées superflues, grâce notamment à la conception même du Tunnel et, finalement, de son arrivée à Londres. Les mesures adoptées pour contenir les conséquences d'incendies notables de camions qui sont survenus dans le Tunnel ont en effet amplement démontré leur pertinence puisque dans tous les cas, malgré l'importance des dégâts matériels, il n'y a eu aucune conséquence pour les personnes. Il est heureux que les matériels Eurostar qui sont et seront les successeurs des rames TMST voient leur conception sensiblement simplifiée, ce qui rend leur construction plus simple et moins coûteuse grâce à la qualité et la pertinence des mesures mises en place dans la conception et la réalisation du Tunnel. Je me dois de souligner la réelle amitié qui s'est instaurée entre les membres des réseaux et les responsables du GPI, à tels points que trente ans après la fin de nos travaux communs, nous avons plaisir à nous retrouver pour un déjeuner quelque part dans le Nord de la France ! De même faut-il souligner la qualité de la collaboration qui s'est instaurée entre le GPI et leurs collègues des réseaux spécialistes de la signalisation pour mettre au point les transitions entre les systèmes de sécurité en vigueur sur chacun d'eux, pour que ces transitions s'opèrent sans le moindre « trou » dans la surveillance de la sécurité. À la sortie du Tunnel côté anglais, cette transition a nécessité les travaux d'un groupe spécifique sur près d'un an, ce qui montre la complexité des dispositions à mettre en place.

Mais tout cela est maintenant le passé. Tous mes vœux vont aux acteurs du projet avec lesquels j'ai eu la chance de travailler pour le réaliser et qui, me semble-t-il, peuvent être légitimement fiers de ce qu'ils ont conçu, même si, l'expérience aidant, la complexité du matériel d'origine s'est avérée superflue.

Daniel Brun

Préface de François Lacôte

Relier la France et l'Angleterre fut longtemps un rêve : l'Angleterre ne serait plus vraiment une île isolée, mais un vrai territoire européen... Un rêve, mais aussi une crainte, voire une angoisse pour un pays qui risquerait de perdre une partie de sa singularité, sans parler du risque relatif à sa totale autonomie...

Les deux gouvernements, anglais et français, décidèrent cependant réaliser la liaison transmanche, sous la forme d'une liaison ferroviaire (et non routière !), par la réalisation d'un tunnel sous la Manche. Cette décision fut officialisée par la signature du traité de Canterbury le 12 février 1986.

Cette décision historique permit de relancer, enfin, un projet datant des années 1960 : créer une liaison ferroviaire à « grande vitesse » (oui, déjà, mais 200 km/h à l'époque...) pour des relations entre Paris, la Belgique et l'Angleterre. Ce projet, abandonné en 1975, fut ainsi relancé en 1986 par le traité de Canterbury. Tout vient à point à qui sait attendre !

Très vite les trois réseaux ferroviaires concernés par cette décision historique (BR, SNCB, SNCF) décidèrent de créer des commissions en charge de préparer la mise en œuvre de l'exploitation de cette liaison ferroviaire avec des trains à grande vitesse (300 km/h) reliant les trois capitales, puisqu'en parallèle la décision de réaliser le réseau TGV Nord-Europe avait également été prise. Une de ces commissions eut la charge de la création du matériel roulant à grande vitesse : définition des caractéristiques techniques en fonction des infrastructures concernées et du programme d'exploitation envisagé, puis rédaction des spécifications techniques, du dossier de consultation des industriels, du calendrier de livraison des rames, pour une flotte unique de TGV, commune aux trois réseaux.

En charge, à l'époque, des programmes TGV de la SNCF, j'eus la responsabilité de diriger la participation française (SNCF) à cette commission.

Les débuts des travaux de cette commission furent difficiles : la composante britannique d'une part avait un pourcentage supérieur aux deux autres dans le financement des rames, ce qui lui donnait déjà une certaine force dans ses exigences, et d'autre part considérait que l'ouverture du marché britannique aux européens créée par cette liaison (l'Angleterre n'est plus vraiment une île...) renforçait cette légitimité des exigences.

Une illustration parmi d'autres de ces exigences : la vitesse maximale de ces trains, 225 km/h, bien suffisante, et non 300 km/h ! Cela permettait de proposer la fourniture de trains de la série « Intercity 225 » prévus pour la ligne East Coast Main Line... Exigence que nous avons fini par faire tomber, rappelant que France et Belgique, dans le même temps, investissaient sur des infrastructures dimensionnées pour la vitesse de 300/320 km/h !

Plus généralement les représentants BR dans cette commission veillaient à préserver l'influence britannique dans tous les domaines de la définition de ce futur « TGV », comme, par exemple, le design de la rame qui donna lieu à de nombreuses réunions et la décision finale d'une équipe de design issue de trois bureaux de design (un de chaque pays...), heureusement (j'obtiens in fine cet accord) coordonnée par le designer français Roger Tallon (TGV A, R, PBKA, Corée...).

Les conséquences industrielles pour l'industrie britannique de nos décisions techniques étaient scrupuleusement scrutées : on peut par exemple noter une forte détente dans les discussions lorsque la direction générale SNCF finit (contre mon gré...) par accepter le choix de la traction asynchrone (contrairement au choix de la traction synchrone largement validée et éprouvée, équipant tous les TGV cités), à la condition toutefois (mon exigence...) de créer un schéma permettant le freinage électrique « de sécurité » des motrices, solution évidemment moins naturelle en traction asynchrone (enclencher un léger freinage permanent dès que l'on coupe la traction...) qu'en traction synchrone : la partie britannique accepta notre exigence. L'ouvrage d'Aurélien ci-après en fait une description très claire.

Au final, un accord fut, après ces longues discussions/négociations, définitivement trouvé, la consultation de l'industrie ferroviaire effectuée, et un marché signé le 18 décembre 1989 avec un consortium international d'industriels des trois pays signataires, comprenant GEC-Alsthom (maintenant Alstom) chef de file, côté britannique Metro-Cammell, Brush et BREL, puis ACEC et Brugeoise et Nivelles côté belge.

Les trois réseaux créèrent alors le « GPI » (Groupe de Projet International) pour piloter le suivi et le contrôle de conformité du projet industriel, sous la direction de Daniel Brun (SNCF) pour la partie technique.

Autant jusque-là les discussions avaient été nombreuses, difficiles voire très difficiles, autant, une fois cet accord trouvé entre les trois parties, l'entente et la coordination des actions furent exemplaires au sein du GPI avec un unique objectif : réussir le projet !

Et ce projet a effectivement abouti à la réalisation d'un nouveau TGV (oui, un TGV !) qui conserve les gènes de la famille TGV (dont l'architecture articulée, unique au monde, à ne pas confondre avec l'architecture « bogie Jacob »), mais dont le programme d'exploitation sur les trois réseaux, chacun avec ses spécificités, a rendu la conception particulièrement difficile du fait de sa complexité, en particulier pour le système de traction : réussir l'exploit de concilier 160 km/h en 750 V par troisième rail et forte puissance donc intensité (exceptionnel !), 160 ou 200 km/h sous caténaire 3kV DC, 300 km/h sous caténaire 25 kV – 50 Hz, et cela associé à de multiples systèmes de signalisation différents, aux spécificités de circulation dans le Tunnel sous la Manche : un véritable exploit, bravo à tous les acteurs de cette réussite exceptionnelle !

Une conception longue, difficile, une gestation exemplaire, au final quel beau bébé !

L'ouvrage d'Aurélien Desnues constitue ainsi un témoignage extrêmement précieux de ce remarquable résultat.

Il présente une description riche, précise, détaillée de cette complexité, avec au final un résultat remarquable : la réalisation du premier train à grande vitesse reliant la Grande Bretagne au continent européen.

Merci Aurélien pour ce bel ouvrage !

François Lacôte

Table des matières

Remerciements et avant-propos	3
Préface de Daniel Brun	4
Préface de François Lacôte.....	6
1 – Généralités.....	13
1.1 – Description	13
1.2 – Caractéristiques techniques	14
1.3 – Gabarit anglais	16
1.4 – État du parc.....	17
2 – L’histoire du TGV TMST	20
2.1 – Genèse du projet Eurotunnel	20
2.2 – Un consortium européen pour un matériel nouveau	21
2.3 – Commande et construction des rames	22
2.4 – Un cahier des charges complexe	24
2.5 – Des règles de sécurité draconiennes pour le Tunnel	26
2.6 – Essais et mise en service	29
2.7 – Inauguration du Tunnel sous la Manche	34
2.8 – Lancement du service Eurostar	35
2.9 – Regional Eurostar et premier rétrofit.....	36
2.10 – Abandon des Regional Eurostar et premières mutations.....	37
2.11 – Nouvelles relations et ouverture de CTRL1	39
2.12 – Ouverture de CTRL2.....	42
2.13 – Et après ?	44
3 – Fonctionnement et technique des TGV TMST	48
3.1 – Préambule : la BB 10003.....	48
3.2 – Introduction à la chaîne de traction des TGV TMST	51
3.3 – Captage du courant.....	52
3.3.1 – Pantographe 25 kV – 50 Hz (PT-AC).....	52
3.3.2 – Pantographe 1,5 et 3 kV continu (PT-DC)	56
3.3.3 – Frotteurs 750 V continu (SG-01 à 08)	58
3.3.4 – Sélection en cabine.....	60
3.4 – Technologie de puissance.....	62

3.4.1 – Dispositifs de protection en toiture	62
3.4.2 – Transformateur principal (T-01)	65
3.4.3 – Bloc Commun (BC)	67
3.4.4 – Blocs Moteurs (BM-01 à 03)	72
3.4.5 – Modules de puissance (MO)	75
3.4.6 – Schéma de traction sous 25 kV – 50 Hz	77
3.4.7 – Facteur de puissance et courant psophométrique	81
3.4.8 – Schéma de traction sous 3 kV continu	86
3.4.9 – Schéma de traction sous 1,5 kV continu	88
3.4.10 – Schéma de traction sous 750 V continu	89
3.4.11 – Schéma de puissance d'un bloc moteur	90
3.4.12 – Schéma d'ensemble de la chaine de traction	91
3.4.13 – Freinage rhéostatique	91
3.5 – Motorisation (M-TT-01 à 06)	92
3.6 – Stratégie de commande des moteurs	95
3.6.1 – Généralités sur le moteur asynchrone	95
3.6.2 – Généralités sur le thyristor GTO	98
3.6.3 – Généralités sur l'onduleur de tension et la MLI	101
3.6.4 – Application au TGV TMST	103
3.6.5 – Pertes de l'onduleur	108
3.7 – Transmission mécanique	109
3.8 – Auxiliaires	113
3.9 – Immunisation à la source	115
3.10 – Système informatique embarqué	117
3.11 – Équipements de sécurité	120
3.12 – Équipements pneumatiques	123
3.12.1 – Production d'air	123
3.12.2 – Réseau pneumatique	124
3.12.3 – Freinage pneumatique	125
3.13 – Cabine de conduite	126
4 – Conclusion	130
Annexes	132
Glossaire	136
Bibliographie	137

1 – Généralités

1.1 – Description

Le TGV TMST (Trans-Manche Super Train), également connu sous les noms d'Eurostar ou British Rail Class 373, est un train à grande vitesse spécialement conçu pour les liaisons Paris-Londres et Bruxelles-Londres via le Tunnel sous la Manche. Bien que développé pour répondre aux spécificités uniques de ces trajets, ses technologies sont étroitement dérivées de celles du TGV classique. Ce train présente un certain nombre de particularités liées à la circulation dans le Tunnel sous la Manche, notamment la sécabilité, une continuité du tronçon voyageur ainsi que des dispositifs d'extinction d'incendie. De plus, son gabarit est adapté au réseau britannique. À noter qu'entre l'ouverture du Tunnel sous la Manche et la publication de ce dossier, certaines règles ont évolué, voire ont été supprimées dans l'objectif de se conformer aux spécifications techniques d'interopérabilité (STI), mais aussi de réduire les obstacles aux nouveaux services susceptibles d'utiliser le Tunnel.

Entre 1993 et 1996, trente-huit rames ainsi qu'une motrice de réserve ont été construites par le consortium « TMSTG » (Trans-Manche Super Train Group). Ce parc comprenait trente-et-une rames « Trois Capitales » et sept rames « North of London (NOL) ». Les rames « Trois Capitales » assurent les relations Eurostar entre Paris, Bruxelles et Londres. Elles se composent de deux motrices et de dix-huit voitures. En revanche, les rames « NOL » ne comportent que quatorze remorques. Construites à l'origine pour réaliser des trajets entre Paris et le nord du Royaume-Uni, notamment l'Écosse (Édimbourg et Glasgow), ces rames ont été remisées dès leur sortie d'usine en raison de l'absence de rentabilité du service « Regional Eurostar » prévue.

À la genèse du projet, il était prévu des rames « NOL » similaires aux « Trois Capitales », c'est-à-dire avec dix-huit voitures, mais avec en plus la particularité d'avoir une cabine de conduite en extrémité de demi-rame, au point de sécabilité central. Cela aurait permis de pouvoir séparer la rame en deux à Londres, afin de pouvoir atteindre deux destinations différentes plus au nord, tout en gardant la possibilité de pouvoir passer d'une demi-rame à l'autre lorsque ces dernières étaient raccordées et formaient une rame « NOL » classique. Ce projet a abouti à la réalisation d'une maquette et d'une étude de faisabilité qui s'est révélée non concluante.

1.2 – Caractéristiques techniques

Chaque rame complète est divisée en deux demi-rames parfaitement symétriques, mesurant 196,86 m et pouvant être séparées l'une de l'autre grâce à un attelage automatique de type Scharfenberg. Elles disposent d'une motrice, d'une remorque d'extrémité motorisée, de huit voitures articulées et comportent les dispositifs nécessaires pour la circulation en France, Angleterre, Belgique et dans le Tunnel sous la Manche.

Tableau 1 – Architecture d'une demi-rame « Trois Capitales ».

N° véhicule	373001 0	373001 1	373001 2	373001 3	373001 4	373001 5	373001 6	373001 7	373001 8	373001 9
Disposition essieux	Bo'Bo'	Bo' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2'								
Commentaire	Motrice	Voiture de sécabilité motorisée					Voiture bar			Voiture de sécabilité
Code UIC	93 70 3730 000-0 GB EIL									

Tableau 2 – Architecture d'une demi-rame « NOL ».

N° véhicule	373301 0	373301 1	373301 3	373301 2	373301 5	373301 6	373301 7	373301 9
Disposition essieux	Bo'Bo'	Bo' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2' + 2'						
Commentaire	Motrice	Voiture de sécabilité motorisée				Voiture bar		Voiture de sécabilité
Code UIC	93 70 3733 000-0 GB EIL							

Le design de la rame fut confié à un groupe composé de différents cabinets. La décision fut prise à l'issue d'une consultation de neuf sociétés de design, trois par membre du consortium en charge de l'acquisition des rames (BR, SNCF, SNCB) et choisis par ces membres. Les propositions firent l'objet de présentations d'abord aux membres du groupe de projet « spécifications », pour une présélection qui aboutit au choix de trois sociétés de design (une par pays), puis à une séance finale sous l'autorité des Directeurs Généraux Adjoints chargés de la politique commerciale voyageurs de chaque entreprise. Et c'est ainsi que la décision finale, très « politique », fut de choisir :

- Roger Tallon (ADSA) pour la livrée extérieure et les voitures ;
- Jacques Tilman pour l'aménagement des remorques de 1^{re} et 2^{de} classe ;
- Jones Garrard pour la cabine de conduite, le design extérieur et l'aménagement de la voiture bar ;
- Roger Jones pour le nez aérodynamique des motrices ;
- INOV pour certains aménagements intérieurs, notamment les toilettes.

On demanda ainsi à ces designers de faire une proposition commune reprenant ces décisions, avec Roger Tallon (designer du TGV Atlantique, Réseau et Duplex), qui connaissait bien la problématique de développement d'un train à grande vitesse, comme maître d'œuvre général chargé de la coordination des différents cabinets.

Parmi les propositions pour le nez de la motrice, un des designers avait eu l'idée d'une cabine de conduite sans baie frontale, donc sans vision sur la voie, faute à une mauvaise compréhension du système de signalisation en cabine. Bien que cette solution proposait un nez plus effilé et fluide, cette solution ne fut, fort heureusement, pas conservée !

Différentes maquettes ont été réalisées afin d'analyser les réactions de la clientèle, mais également la faisabilité technique (aménagements de la voiture bar).



Figure 1 – Aménagement intérieur d'origine de seconde classe.

Photographie : Jiel Beaumadier (Wikimedia Commons - CC BY-SA 3.0).

Tableau 3 – Capacité des rames.

Aménagement	1 ^{re} classe (places)	2 ^{de} classe (places)	Total (places)
D'origine	210	584	794
Rénovation 2004	206	544	750
Rénovation e300	210	540	750
NOL	114	464	578

Tableau 4 – Caractéristiques dimensionnelles du matériel.

Intitulé	Valeur
Longueur totale	393,720 m (Trois Capitales) 318,920 m (NOL)
Longueur de caisse	22,150 m (motrices) 21,845 m (voitures R1 et R18) 21,965 m (voitures R9 et R10) 18,700 m (voitures R2-R8 et R11-R17)
Largeur	2,814 m
Hauteur	3,815 m
Section transversale	8,9 m ²
Empattement	3,000 m
Entraxe des bogies	14,000 m (motrices) 18,700 m (voitures)
Tare	752,4 t (Trois Capitales) 665,0 t (NOL)
Masse maximale en service	816,0 t (Trois Capitales) 748,0 t (NOL)
Masse adhérente	204,0 t

1.3 – Gabarit anglais

Le TGV TMST a été élaboré en conformité avec le gabarit UIC 505-2 et BR des lignes du sud de l'Angleterre. Ce dernier étant le plus restrictif, il a naturellement influencé la conception de la rame. Étant plus petit que le modèle UIC, en particulier dans les sections inférieures, il a donc été indispensable de mener une étude spécifique autour des bogies. Tandis qu'après une nouvelle étude du gabarit, les TGV Atlantique ont pu être élargi à 2,904 m, les TGV TMST conservèrent la largeur des TGV PSE de 2,814 m.

De plus, les rames sont conçues pour s'adapter aux différentes hauteurs de quais variant sur les différents réseaux. Un dispositif d'embarquement à deux marches mobiles a été réalisé. À noter que les quais des gares de la ligne à grande vitesse High Speed 1¹ (ainsi qu'Ashford International après élévation des voies) ont la même position que les quais SNCB, respectant ainsi le gabarit STI. En présence d'un quai BR (915 mm), la seconde marche reste effacée afin de ne pas engager le gabarit du quai.

¹ : La ligne à grande vitesse High Speed 1 (souvent abrégé en « HSI ») est la ligne nouvelle allant du Tunnel sous la Manche à la gare de Londres Saint-Pancras. Elle a été construite en deux phases, à savoir la première (CTRL1 – Channel Tunnel Rail Link 1) de 1998 à 2003 entre le Tunnel et Southfleet puis la seconde (CTRL2) de 2003 à 2007 entre Southfleet et Londres Saint-Pancras. La ligne dessert les gares d'Ashford (avec un raccordement), d'Ebbsfleet et de Stratford. À noter qu'une seconde ligne nouvelle (HS2) est en cours de construction entre Londres et Birmingham, pour une mise en service estimée entre 2029 et 2033.

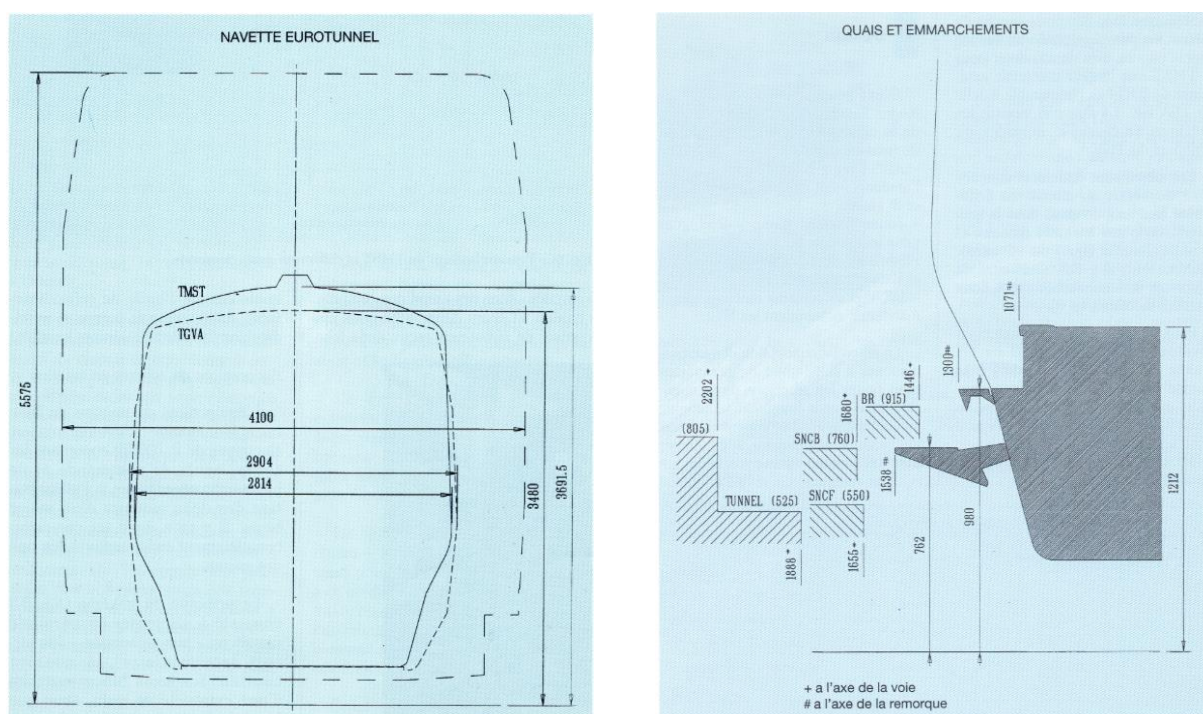


Figure 2 – Gabarit (à gauche) et emmarchement (à droite) des rames TGV TMST.

Document : Revue Générale du Chemin de Fer.

En outre, des études et travaux supplémentaires ont été réalisés sur l'itinéraire BR (CTR1 via Tonbridge et CTR2 via Maidstone) afin de dégager le gabarit nécessaire pour le passage des rames Eurostar et des trains de marchandises chargés de conteneurs en provenance du Tunnel. De plus, une partie du nez des motrices est peinte en jaune pour respecter la réglementation du Royaume-Uni et une ligne orange délimite la hauteur maximale à laquelle on peut travailler en toute sécurité sur le train en présence d'une caténaire. Cette ligne, présente sur la totalité des rames « NOL », n'était visible que sur les motrices des rames « Trois Capitales » jusqu'à l'ouverture d'HS1 où les voitures en ont été équipées.

1.4 – État du parc

Dès la mise en place des relations internationales le 14 novembre 1994, le parc « Trois Capitales » a été exploité par l'entité Eurostar, mais les rames appartenaient aux compagnies ferroviaires impliquées dans le projet.

Tableau 5 – Répartition d'origine des rames.

Demi-rames	Eurostar UK Ltd. (BR)	SNCB	SNCF
« Trois Capitales »	373001 à 3022 + 3999	373101 à 3108	373201 à 3232
« North of London »	373301 à 3314		

Tableau 6 – Récapitulatif des rames construites.

Élément	Rame	Sortie d'usine	Radiation	Baptême	Commentaire
EUKL – 8 rames + une motrice de réserve					
3001/3002	PS1 / F15	22 janvier 1993	16 mars 2018	14 novembre 2007 : 3001 : Tread Lightly 3002 : Voyage Vert	Rame de pré-série.
3003/3004	UK3	7 janvier 1994	14 décembre 2016	14 septembre 2010 : Tri-City-Athlon 2010	
3005/3006	UK4	4 février 1994	26 octobre 2016		1 ^{re} rame complète radiée et démolie.
3007/3008	UK5	18 mars 1994		13 novembre 2007 : Waterloo Sunset	Dernier service commercial au départ de Londres-Waterloo (9154 pour Bruxelles- Midi).
3009/3010	UK10	22 avril 1994	19 janvier 2018	19 juillet 2010 : Remembering Fromelles	
3011/3012	UK11	27 mai 1994	16 février 2018		
3013/3014	UK8	1 ^{er} juillet 1994	17 mars 2017	6 juillet 2005 : London 2012	
3015/3016	UK9	7 octobre 1994			1 ^{re} rame rénoverée e300 Cabine prototype e300 testée sur la 3015. 1 ^{re} rame arborant le nouveau logo Eurostar.
3017/3018	UK12	7 octobre 1994	31 mars 2018	18 juin 2010 : 70 ^e anniversaire de l'appel du 18 Juin	
3019/3020	UK14	11 novembre 1994	2 décembre 2016		
3021/3022	UK15	11 novembre 1994	4 septembre 2018		
3999	M62	2 septembre 1996			Motrice de réserve.
SNCB – 4 rames					
3101/3102	UK1	31 octobre 1993	28 février 2018 (3101) 29 juillet 2015 (3102)		Rame accidentée le 5 juin 2000 vers Croisilles. Rame stockée à Forest jusqu'en 2012 puis utilisée à Hellemmes pour tester les aménagements des rénovations e300. Motrice 3101 stockée sur un terrain d'airsoft à Bawtry Woods et motrice 3102 stockée à Worksop. Elles ont été vidées et aménagées en salles de réunion.
3103/3104	UK2	17 décembre 1993	25 novembre 2017		
3105/3106	UK6	22 avril 1994	8 février 2017		Rame accidentée le 19 février 2016 sur LGV1 par la pose d'un bloc de béton sur la voie. Motrice et voiture R1 stockées à la réserve du musée Train World en Belgique.
3107/3108	UK7	27 mai 1994	1 ^{er} février 2017		

SNCF – 16 rames					
3201/3202	PS2 / F16	8 juin 1993	25 mai 2018		Rame de pré-série.
3203/3204	F1	24 septembre 1993	19 décembre 2014		Tronçon rénové e300 et assemblé avec les motrices 3211/3212. Rame d'essai pour le 1500 V continu en 1996.
3205/3206	F2	2 novembre 1993			
3207/3208	F3	10 décembre 1993	1 ^{er} avril 2019	27 avril 2004 : Michel Hollard	Incendie sur la motrice 373207 le 24 janvier 2016 près de Mory sur LN3.
3209/3210	F4	14 janvier 1994		16 mai 2006 : The Da Vinci Code	Rame prototype ETCS + Bi-Standard.
3211/3212	F5	25 février 1994			Tronçon de la 3203/3204.
3213/3224	F6 / F11	3213 : 18 mars 1994 3224 : 12 août 1994	10 janvier 2021		Rame dédié au service Izy à partir de décembre 2018. Rame stockée au Havre. Déplacée à Ambronay du 1 ^{er} au 3 avril 2025.
3215/3216	F7	1 ^{er} avril 1994	GBE (Février 2020)		Stockées au dépôt de Temple Mills.
3217/3218	F8	6 avril 1994			
3219/3220	F9	27 avril 1994			
3221/3222	F10	24 juin 1994			
3223/3214	F11 / F6	3223 : 12 août 1994 3214 : 18 mars 1994	4 décembre 2020		Rame stockée au Havre. Déplacée à Ambronay du 15 au 17 avril 2025.
3225/3226	F12	9 septembre 1994	13 décembre 2014		
3227/3228	F13	30 septembre 1994	13 décembre 2014		
3229/3230	F14	28 octobre 1994			
3231/3232	UK13	28 octobre 1994	12 mai 2017		
EUKL NOL – 7 rames					
3301/3302	FN1	23 juin 1995	13 décembre 2014		
3303/3307	FN2 / FN3	3303 : 21 mai 1996 3307 : 17 septembre 1995	13 décembre 2014	30 mai 2000 : The White Rose (3303)	
3305/3306	UN1	29 septembre 1995	13 décembre 2014	3305 : Yorkshire Forward 3306 : Golden Jubilee	
3304	FN2	21 mai 1996	Novembre 2010	30 mai 2000 : The White Rose	Motrice 3304 échangée avec la motrice 3311. Radiée prématurément pour défaut sur châssis. Stockée au Landy jusqu'à sa destruction. Motrice et voiture R9 préservées par The One:One Collection.
3308	FN3	17 septembre 1995	N'a jamais roulé en service commercial.		Motrice exposée au National Railway Museum de York.
3309/3310	UN2	23 juillet 1995	13 décembre 2014		
3311/3312	UN3	7 mai 1996	13 décembre 2014		Motrice 3311 échangée avec la motrice 3304.
3313/3314	UN4	30 novembre 1996	13 décembre 2014	5 avril 2004 : Entente cordiale	Motrice 3314 préservée à Temple Mills.

2 – L'histoire du TGV TMST

2.1 – Genèse du projet Eurotunnel

Depuis l'époque napoléonienne et jusqu'au milieu du XIX^e siècle, de nombreuses propositions ont été formulées pour établir une liaison fixe entre la France et le Royaume-Uni. Les premières études géologiques avaient révélé la présence de couches de craie bleue favorables au creusement d'un tunnel. Notamment, l'ingénieur français Aimé Thomé de Gamond consacra l'essentiel de sa carrière à chercher des solutions pratiques pour une telle liaison.

Dans les années 1880, un premier chantier fut lancé à Shakespeare Cliff côté britannique et à Sangatte côté français. Le percement avança sur environ 1,8 km de chaque côté, mais les travaux furent interrompus pour des raisons politiques. Les galeries restèrent intactes et furent redécouvertes bien plus tard : en 1958 en France et en 1987 au Royaume-Uni. Un autre projet, relancé en 1974, fut lui aussi abandonné pour des motifs politiques, cette fois du côté britannique.

La dynamique reprit en 1979 avec la création du Groupe Européen du Tunnel sous la Manche qui entreprit de nouvelles études. En 1985, les gouvernements français et britannique organisèrent un concours international. Quatre projets majeurs furent présentés :

- Euroroute : une solution hybride comportant ponts et tunnels ;
- Europont : un grand pont-tube suspendu de 37 km ;
- Transmanche Express : un système de quatre tunnels pour le trafic routier et ferroviaire ;
- Eurotunnel : un projet reposant sur trois tunnels, deux dédiés à la circulation des trains et un tunnel de service permettant l'évacuation et la maintenance. Pour des raisons de coûts, d'environnement et de sécurité, c'est ce dernier projet qui sera retenu.

Le 20 janvier 1986, la concession pour la construction et l'exploitation fut attribuée aux sociétés France-Manche et Channel Tunnel Group, bientôt regroupées sous les noms Eurotunnel (ET) et Transmanche Link (TML). Quelques semaines plus tard, le 12 février 1986, les gouvernements britannique et français signèrent à Canterbury le « *Traité concernant la construction et l'exploitation par des sociétés privées concessionnaires d'une liaison fixe transmanche* ». Ratifié le 29 juillet 1987, il marqua le lancement officiel des travaux.

Cependant, plusieurs points restaient à définir : l'itinéraire « international » entre la côte du Kent et Londres, ainsi que le type de matériel roulant pour les passagers. British Rail, la SNCF et la SNCB ouvrirent alors de longues consultations pour convenir d'un modèle de train compatible avec leurs trois réseaux. Les discussions portaient notamment sur la gestion des sillons alloués et sur la conception d'un train capable de circuler sous trois tensions électriques différentes, tout en respectant le gabarit britannique, particulièrement contraint. À ces difficultés techniques s'ajoutaient les réticences des compagnies nationales, chacune attachée à ses propres pratiques et réglementations. Finalement, les intérêts britanniques dans le projet furent pris en charge par une filiale de British Rail, European Passenger Services (EPS).

2.2 – Un consortium européen pour un matériel nouveau

En 1986, avant même la ratification du traité de Canterbury, des discussions s'engagèrent au sein d'une commission tri-nationale afin de définir le matériel roulant destiné aux dessertes entre Londres, Paris et Bruxelles via le futur tunnel ferroviaire. Il était prévu de commander en commun un parc de rames apte à circuler à 300 km/h, empruntant la ligne à grande vitesse Nord Europe, alors en construction, puis son prolongement en Belgique, dont la mise en service interviendrait courant 1997. Du côté britannique, le gouvernement ayant renoncé à construire une nouvelle ligne, les trains devaient circuler sur l'infrastructure existante, électrifiée par 3^e rail à 750 V. Celle-ci devait toutefois être renforcée au niveau de l'alimentation électrique et adaptée à l'approche de la gare de Waterloo, la seule en mesure d'accueillir le trafic prévu grâce à une extension conçue par Nicholas Grimshaw, composée de cinq voies couvertes par une canopée autoportante constituée de trente-sept arcs en treillis métalliques. Rapidement, le TGV français s'imposa comme l'option la plus réaliste : train électrique à grande vitesse déjà éprouvé, il offrait les meilleures garanties. Les Britanniques avaient toutefois envisagé, dans un premier temps, un concept de rame tractée par locomotive. Cette idée ressurgit ultérieurement dans le cadre du programme Nightstar, destiné à mettre en place des services de nuit reliant plusieurs grandes villes de province britanniques au continent via le Tunnel.

Suite à cela et à la finalisation du cahier des charges, le Groupe de Projet International transmanche (GPI) fut créé fin 1987, au 15 rue Traversière à Paris, près de la Gare de Lyon, réunissant British Rail, la SNCF et la SNCB. Sa mission était de coordonner le projet entre toutes les entreprises impliquées.

Le matériel Nightstar fut effectivement construit, comprenant voitures-lits et voitures à places assises. Mais l'augmentation des coûts entraîna la suspension du projet en 1997 puis son abandon définitif en 1999. Les trains furent alors livrés neufs au dépôt militaire de MoD Kineton pour y être stockés. Depuis, ces voitures sont exploitées par l'entreprise « Via Rail » sur le réseau canadien.

L'accord s'est, en fin de compte, assez rapidement fait sur des rames s'inspirant du TGV français, mais avec de nombreuses particularités, conséquences de l'emprunt d'un tunnel de grande longueur, de la circulation sur l'infrastructure britannique mais aussi de la volonté des anglais d'avoir une part de conception britannique dans le train. De leur côté, les industriels des trois pays constituaient, pour répondre à la demande des réseaux, un consortium appelé TMSTG (TransManche SuperTrain Group) dirigé par Alstom et constitué à l'origine des sociétés suivantes :

- Alstom, De Dietrich et les Ateliers de construction du Nord de la France (ANF) côté français ;
- GEC, Metro-Cammell, Brush Traction et British Rail Engineering Ltd. (BREL) outre-manche ;
- La Brugeoise et Nivelles ainsi que les Ateliers de Constructions Électriques de Charleroi (ACEC) en Belgique.

2.3 – Commande et construction des rames

Dès le second semestre 1987, un travail intense fut mené pour rédiger les spécifications du futur matériel roulant, baptisé alors TMST. Ce travail associait les services « matériel roulant » de la SNCF, de la SNCB et de British Rail, ainsi que des représentants des futurs utilisateurs. La SNCF, forte de son expérience de vingt ans avec le TGV, joua naturellement un rôle de leader technique, ce qui fut pleinement accepté par ses partenaires. La direction du projet fut confiée à un représentant de British Rail, chargé des aspects contractuels et financiers, assisté de quatre ingénieurs issus des trois compagnies nationales, responsables de la coordination, de la conception et du suivi de la réalisation des différentes parties du train.

Dès novembre 1987, une première version des spécifications était prête dans un délai particulièrement court compte tenu de la complexité du projet et des obstacles linguistiques. Les relations avec les industriels commencèrent dès la fin de cette même année, même si la signature officielle du contrat sur la fourniture de trente rames « Trois Capitales » n'intervint que le 18 décembre 1989.

Les fusions et acquisitions dans le secteur ferroviaire à la fin des années 1980 entraînent cependant plusieurs changements dans la composition du consortium. BREL et Metro-Cammell s'en retirèrent, tandis que GEC fusionna avec Alsthom en 1989 et racheta Metro-Cammell dans la foulée, qui réintégra de fait le groupement. Le contrat initial fut complété, en décembre 1991, de huit rames supplémentaires, avec une rame « Trois Capitales » et sept rames « North of London » destinées au projet Regional Eurostar. En 1994, une motrice de réserve (numérotée 3999) fut également commandée.



Figure 3 – Construction des rames TMST.

Photographies : GEC-Alsthom, collection Alain Jeunesse.

Sur le plan technique, la chaîne de traction fut conçue par GEC, puis construite dans les usines GEC-Alsthom de Preston et Villeurbanne (ex-TCO). Les moteurs, de type asynchrones triphasés, furent développés et fabriqués par Brush Traction. À l'origine, les rames ne devaient comporter que dix-sept voitures en raison de la longueur des quais à Londres Waterloo, mais ne facilitant pas l'utilisation du parc s'il était composé de rames asymétriques, la solution des dix-huit voitures a rapidement été adoptée au prix d'un allongement des quais de cette gare.

Tableau 7 – Construction des différents éléments.

Élément	Rames	Usine de production	Quantité
Motrices	F 1 à 16, FN 1 à 3 + M 62	GEC-Alsthom, Belfort	39
	UK 1 à 15, UN 1 à 4	GEC-Alsthom, Washwood Heath (Birmingham)	38
R1 (remorque motorisée)	Toutes	De Dietrich Ferroviaire, Reichshoffen	76
R2 – R5	Toutes	GEC-Alsthom, Aytré	290
R6 (voiture bar)	Toutes	GEC-Alsthom, Aytré (structure)	76
		GEC-Alsthom, Washwood Heath (équipement intérieur)	
R7, R8	Toutes	ANF, Crespin	138
R9	Toutes	La Brugeoise et Nivelles, Bruges	76
Bogies	Toutes	GEC-Alsthom, Le Creusot (ex-MTE)	886
Assemblage des rames	Toutes	GEC-Alsthom, Belfort	38
		GEC-Alsthom, Washwood Heath	

Le coût total du parc est estimé, au départ, à 713 000 000£, soit environ 23 000 000£ par rame (50 000 000£ aujourd'hui). Pour comparaison, une rame Eurostar e320 coutait 60 000 000€ en 2010.

2.4 – Un cahier des charges complexe

Le cahier des charges du TGV TMST était particulièrement complexe puisqu'il devait circuler aussi bien sur des lignes à grande vitesse continentales que sur le réseau britannique et à travers le Tunnel sous la Manche. Un des objectifs était de pouvoir atteindre une vitesse de 300 km/h tout en respectant une masse maximale de 17 t par essieu. La question des organes de roulement fut résolue assez rapidement grâce à l'adoption de bogies TGV à grand empattement et à la suspension pneumatique SR10. En revanche, les principales difficultés concernaient l'exploitation sur le réseau britannique et dans le Tunnel, compliquées par le partage industriel entre les entreprises du consortium.

Le premier obstacle majeur venait du gabarit réduit imposé en Grande-Bretagne qui nécessita un travail important sur la forme des caisses des motrices, des remorques et des bogies. Malgré cela, de nombreux travaux furent réalisés pour adapter les infrastructures britanniques : modifications de quais et d'ouvrages d'art le long du tracé des futures lignes CTR1 et 2.

Le second défi concernait l'alimentation électrique. Le réseau au sud-est de Londres fonctionnait avec un 3^e rail à 750 V, ce qui impliquait des intensités extrêmement élevées pour assurer la puissance nécessaire, jusqu'à 3400 A par motrice. Cette contrainte imposa un câblage dimensionné en conséquence et des aménagements spécifiques pour rester sous la limite de 68 t par motrice. À cela s'ajoutaient les difficultés liées aux patins de captage du courant : installés sur les bogies, donc simplement suspendus (c'est-à-dire suspendus uniquement par la suspension primaire), ils devaient en plus être rétractables, car ils engageaient le gabarit continental.

Les bogies disposant de frotteurs furent également équipés de capots isolants afin de limiter les risques de « coups d'arc ». En effet, les défauts de captage étaient fréquents et un arc électrique pouvait provoquer des fissures de fatigue. Ces problèmes, totalement inédits pour des TGV, furent abordés avec une expérience limitée, ce qui renforça encore la difficulté du projet.

Quant à la circulation sur le réseau belge, cette dernière n'imposait pas de contraintes supplémentaires, si ce n'est le captage du 3 kV et l'installation du système de sécurité TBL (Transmission Balise-Locomotive).

Le partage industriel imposé par le consortium fut à l'origine de nombreuses difficultés, tant sur le plan électrique que mécanique. Sur le plan de la traction électrique, Alstom confia la conception et la fabrication de la chaîne de traction à son partenaire britannique GEC, promoteur d'une technologie encore nouvelle à l'époque : la motorisation asynchrone alimentée par onduleurs de tension à thyristors GTO (Gate Turn-Off). Les ingénieurs de la SNCF, de leur côté, auraient préféré conserver les moteurs synchrones déjà éprouvés et utilisés avec succès sur les rames TGV Atlantique et Réseau. Conscients de cette réticence, les dirigeants d'Alstom plaidèrent directement auprès de la direction générale de la SNCF pour imposer la solution de GEC, mettant en avant l'expérience supposée de l'industriel britannique dans ce domaine.

En réalité, GEC n'avait aucune expérience ferroviaire concrète en matière de moteurs asynchrones associés à des onduleurs de tension. La décision fut néanmoins entérinée, en l'absence d'ingénieurs SNCF lors des discussions finales. Dès lors, ces derniers s'employèrent à viabiliser cette technologie, par le biais de nombreuses réunions et échanges techniques, afin de l'adapter aux exigences de fiabilité et de maintenabilité propres à un matériel roulant de grande vitesse.

Les difficultés furent tout aussi marquées sur le plan mécanique. Les usines de Washwood Heath (ex-Metro-Cammell) et de La Brugeoise et Nivelles, chargées de la fabrication des chaudrons, ne disposaient ni des équipements ni de l'expérience nécessaire pour appliquer les méthodes développées par Alsthom pour ses TGV. Les premiers chaudrons fabriqués présentaient ainsi des défauts si importants qu'ils étaient jugés inutilisables. Devant le refus des techniciens d'Alsthom chargés de la construction de prêter assistance à leurs homologues britanniques et belges, il fallut dépêcher sur place des ingénieurs du Service du Contrôle des Fabrications et du Département de la Construction de la Direction du Matériel de la SNCF pour résoudre les problèmes de mise au point.

Enfin, les échanges avec le Railway Safety Inspectorate britannique soulevèrent également des difficultés inattendues. L'organisme de contrôle exigea, par exemple, la suppression des tabourets initialement prévus dans la voiture-bar, considérés comme dangereux pour les voyageurs en cas d'arrêt brutal ou de collision.

2.5 – Des règles de sécurité draconiennes pour le Tunnel

Conformément au traité de Canterbury, la rédaction des exigences liées à la circulation dans le Tunnel sous la Manche a été confiée à la Commission Intergouvernementale de Sécurité (CIG). Cette dernière a ainsi défini un ensemble de contraintes auquel devaient se soumettre les TGV TMST pour une circulation à travers le Tunnel, à commencer par la « sécabilité ».

La rame est divisée en deux moitiés symétriques, les remorques R9 et R10 comportant un bogie à l'extrémité où peut intervenir la coupure ; elles sont accouplées par un coupleur automatique Scharfenberg¹. Cela permet de diviser la rame en moins de deux minutes en cas d'urgence dans le Tunnel. Cette opération peut également être réalisée entre la motrice et la remorque R1, permettant ainsi de séparer le train en trois endroits distincts. Dans tous les cas, aucune intervention extérieure n'est nécessaire, la procédure étant effectuée depuis l'intérieur du train grâce à une commande manuelle à action hydraulique située à proximité de la zone de séparation.

La protection et la lutte contre l'incendie constituèrent également un enjeu majeur lors de la conception des rames TMST. Parmi les mesures destinées à réduire les risques, le choix des matériaux joua un rôle déterminant.

¹ : cf. annexe 1.

Or, au début de l'année 1988, lorsque les spécifications des rames furent établies, aucune norme internationale n'existait encore dans ce domaine. Les discussions au niveau européen, menées par le CEN et le CENELEC, n'en étaient qu'à leurs prémices. Chaque réseau appliquait donc ses propres règles nationales : la norme BS 6853 au Royaume-Uni, les normes NF F 16-101 à 103 en France et, le plus souvent, ces dernières en Belgique. Cette situation faisait craindre l'imposition d'une synthèse des normes de chaque pays, ou pire, l'obligation d'utiliser la norme la plus stricte.

Pour éviter une telle impasse, le GPI proposa dès 1988 une approche pragmatique. Il fut convenu que les normes française et britannique, ayant déjà démontré leur pertinence dans leurs contextes respectifs, seraient définies équivalentes et applicables conjointement. Le choix de la norme à appliquer serait laissé à la discrétion des constructeurs, en fonction de la localisation de leurs bureaux d'études et de leurs habitudes de travail. Cette décision fut prise en amont, avant même que la répartition précise des études entre les différentes usines du consortium ne soit arrêtée et sans chercher à privilégier l'une ou l'autre des approches nationales. Ce sont au final les normes françaises qui ont été les plus largement appliquées.

L'exploitation du Tunnel a donc nécessité au début l'installation d'un système sophistiqué d'extinction des incendies par gaz halon 1301 (Bromotrifluorométhane) incorporé dans les compartiments de traction. Ce gaz agissait comme inhibiteur de la réaction chimique de combustion. En cas de détection d'un incendie dans les appareillages de puissance de la motrice, le gaz est projeté par des buses situées sur une tuyauterie fixe et disposées de telle façon que le jet soit dirigé sur les endroits où l'incendie a le plus de chance de se déclarer. Le déclenchement intervient environ vingt secondes après la détection, avec signal sonore et signalisation lumineuse. Cependant, le Protocole de Montréal, les exigences de Kyoto et la réglementation Européenne interdisent désormais l'usage de ce gaz, en raison de ses effets sur la couche d'ozone. Ainsi, Brush Traction a étudié différents systèmes d'extinction d'incendie disponibles, tels que le brouillard d'eau, le FM200, le Novec 1230, des gaz inertes et des systèmes d'aérosols condensés comme alternatives au gaz halon et l'aérosol « Stat-X » est ressorti comme la solution la plus pertinente. Entre 2010 et 2012, le travail d'Eurostar, Brush Traction et Nobel Fire Systems a permis de faire approuver le système par la CIG pour une installation dans les rames entre juillet 2012 et 2015. Le « Stat-X » agit sur les radicaux libres de la combustion et limite ainsi la propagation d'un éventuel incendie.

Des matériaux résistants au feu sont utilisés dans la mesure du possible (conduite générale en inox, câbles anti-feu, panneaux de frein, planchers, attelages...) et les portes d'extrémité des compartiments voyageurs sont résistantes au feu pendant trente minutes (norme ISO 834).

Quant au système de détection, celui-ci est similaire aux TGV classiques, composé d'une double chaîne, équipée chacune de sondes de température et d'une série de tubes en rilsan sous pression d'air (7 bars) munis de détendeurs et comportant des manostats. Ils sont conçus pour fondre en cas d'incendie et donc perdre la pression d'air. Ils sont donc contrôlés en permanence par le système de surveillance et de commande de déclenchement du gaz extincteur. Le système de ventilation est également équipé d'un dispositif de recirculation d'air pour verrouiller les entrées d'air en cas d'incendie. Côté voyageurs, des détecteurs de fumée assurent le contrôle. Enfin, les conducteurs disposent en cabine d'un masque à gaz en cas de déclenchement du système anti-incendie dans les compartiments de traction. À noter que ces systèmes de détection sont actifs en permanence dès la mise en service des batteries et pas seulement dans le Tunnel.

Lors de la traversée du Tunnel, des portes coupe-feu situées en extrémité de remorques se ferment. Celles-ci restent manœuvrables par les voyageurs voulant circuler. La commande de fermeture des portes est assurée par la position « $\overline{ET}$ » du sélecteur de tension¹.

Une communication radio permanente est assurée entre la rame et le RCC (Rail Control Center) avec la « Radio Concession » ainsi qu'entre le conducteur et les membres d'équipage de la rame. En cas d'urgence, le train pouvait être coupé et repartir dans l'autre sens avec le conducteur suppléant. Une rame complète pouvait être extraite du Tunnel avec une seule motrice en service. De plus, un second conducteur était présent dans la cabine arrière et un « Train Manager » apte à la conduite dans le Tunnel était situé sur chaque plateforme d'extrémité afin de prendre en charge le train en cas d'incident dans le Tunnel. Aujourd'hui, seul le « Train Manager » demeure en extrémité du train durant la traversée.

Si une rame devait rester bloquée dans le tunnel en raison d'une panne de courant, les attelages à chaque extrémité de la rame Eurostar sont compatibles avec les locomotives diesel-électriques d'Eurotunnel, de même que les connexions de freinage et de service.

¹ : cf. § 3.3.4

La longueur exceptionnelle d'une rame Eurostar – quasiment 400 m – est également la conséquence d'une règle Eurotunnel. En effet, les rameaux de circulation, permettant la communication entre tunnel ferroviaire et tunnel de service sont disposés tous les 375 m. Ainsi, une longueur de 400 m assurait au train qu'en tout point dans le tunnel, il soit devant au moins un accès de secours. La continuité sur la longueur du train était, de fait, obligatoire pour une évacuation. Malgré une longueur plus faible (environ 320 m), les rames « NOL » étaient également autorisées à la circulation dans le Tunnel.

Ces règles ainsi énoncées par la CIG et par l'Autorité de Sécurité du Tunnel sous la Manche (CTSA) ont été définies dans la Concession Quadripartite de la Liaison Fixe Transmanche :

« Sauf règles contraires dans le règlement d'exploitation, tous les trains empruntant la Liaison Fixe seront équipés de deux locomotives situés l'une en tête et l'autre en queue de train, permettant le sectionnement éventuel et l'inversion du sens de marche.

[...]

Tous les trains utilisant le tunnel seront équipés d'un système de frein continu automatique d'un modèle conforme aux règles de l'Union Internationale des Chemins de fer applicables au trafic international.

[...]

Les rames navettes touristes et toute voiture ferroviaire de rame navette dans laquelle voyagent des passagers seront munies de portes ou rideaux coupe-feu intermédiaires d'une tenue minimale d'une demi-heure pour empêcher la fumée de se propager dans le train en cas d'incendie à bord. Autant que faire se peut la conception des rames navettes permettra que, dans certains cas, les trains puissent continuer à rouler et sortir du tunnel après l'apparition d'un feu.

Un système permettant au conducteur et au chef de train de communiquer entre eux et avec le public sera installé sur tous les wagons des trains navettes touristes et toute voiture ferroviaire de rame navette dans laquelle voyagent des passagers. »

2.6 – Essais et mise en service

Avant même la construction des premières rames, des essais préliminaires avaient été réalisés sur la BB 10003¹. Dès 1988, cette dernière a été équipée de la future chaîne de traction des TGV TMST afin de contrôler la compatibilité avec la signalisation ou la tenue en service des systèmes de refroidissement. Ces essais se déroulèrent entre 1991 et 1993.

¹ : cf. § 3.1

Le 10 décembre 1992, la première motrice (3202) fut présentée à la presse dans le tout nouveau bâtiment international des ateliers du Landy, puis le 28 janvier 1993, la rame PS1 (Pre-série 1), composée des motrices 3001/3002 et de sept voitures (R1 + R2 + R3 + R4 + R9 + R10 + R18), débuta ses essais entre Strasbourg et Mulhouse, sur les plaines d'Alsace, où la vitesse de 220 km/h fut atteinte.

Ces essais se poursuivirent jusqu'au 20 juin 1993 où la rame PS1 effectua la première traversée du tunnel sous la Manche, encadrée par les locomotives diesel A1A A1A 68041 et BB 66275. Relevée par trois locomotives des BR (73118, 83301 et 73205), la rame PS1 effectua par la suite des essais de captage par frotteurs entre Ashford et Dollands Moor de nuit. Ces essais ont rapidement révélé des interférences avec la signalisation fixe. L'objectif de cette rame était de réaliser les mises au point de la chaîne de traction sous 25 kV – 50 Hz et 750 V continu ainsi que d'amorcer la vérification des performances contractuelles.



Figure 4 – Rame PS1 encadrée par les locomotives A1A A1A 68041 et BB 66275 s'apprêtant à réaliser la toute première traversée du Tunnel sous la Manche pour un TGV TMST.
Photographie : © Christopher J. Wilson¹ (avec son aimable autorisation).

¹ : Collection Eurostar Christopher J. Wilson : <https://expresstrains.smugmug.com/Channel-Tunnel-1/Eurostar/i-RW2PHvQ>

Dans un même temps, la rame PS2, composée des motrices 3201/3202 et de dix-huit voitures, sortit des usines de Belfort dès avril 1993 et fut acheminée au Landy par la BB 15058 le 8 juin 1993. En composition complète, cette rame permettra de contrôler les performances en freinage ainsi que le comportement général lors de marches entre Paris et Calais-Fréthun à plus de 300 km/h, vitesse atteinte dès le 1^{er} juillet. D'ailleurs, lors de la première marche d'essai, l'une des deux motrices s'isola en raison d'un manque d'huile transformateur. L'arrêt en dévers à l'entrée de la LGV a penché le fluide qui n'était donc plus détecté par les capteurs. La première traversée du tunnel en autonomie fut réalisée le même mois.

Au printemps 1993, c'est au tour de la motrice 3101 seule de partir réaliser des essais de freinage entre Metz et Thionville. Ces essais seront réalisés tantôt seule, tantôt avec un convoi de trois voitures de mesures. Puis en septembre 1993, c'est la rame 3203/3204 qui est livrée au Landy pour des essais de planage¹ dès octobre sur la ligne Nantes-Angers. Enfin, la première rame assemblée à Washwood Heath (3101/3102) réalise des essais à partir du 16 octobre entre Lichfield et Erdington. Dans le même temps, la rame PS1 fait son retour à Belfort pour être remise au type. Lors de ce trajet, elle roula exceptionnellement dans le terminal Eurotunnel de Coquelles.



Figure 5 – Rame PS1 traversant le terminal de Coquelles.

Photographie : © Eisenbahn – Revue (avec leur aimable autorisation).

¹ : Les essais de planage consistent à optimiser les réglages aérodynamiques du pantographe, en circulation et sans contact avec la caténaire (cf. § 3.3).

Les circulations en Belgique ont commencé dès novembre 1993 avec la rame 3203/3204 sur la ligne Mouscron – Tournai – Enghien (Ligne 94) puis entre Tournai et Lille afin de tester les circulations sous caténaire 3 kV, ainsi que les transitions entre le 3 kV et le 25 kV. Une vitesse de 215 km/h a été atteinte dans la nuit du 19 au 20 mars 1994 sur la ligne Gent – Brugge. Les essais se poursuivirent en 1994 avec notamment la première circulation en présence de journalistes le 13 avril 1994 à bord de la rame 3205/3206 entre Paris et Arras.

Compte tenu du cahier des charges imposé par la circulation sur le réseau anglais, les rames ont rencontré des difficultés lors des essais. La voie de l'ancienne Southern Railway, parcourue par Eurostar en Grande-Bretagne, utilise un circuit de voie à 50 Hz. Le retour du courant de traction vers les sous-stations emprunte également les rails, ce qui impose d'éviter toute interférence entre la traction et la signalisation. La composante 50 Hz vient le plus souvent d'un redressement du courant alternatif mal équilibré dans les sous-stations de traction. Cette tension peut ainsi générer un courant 50 Hz à travers le train et venir parasiter les circuits de voies, d'autant plus si ce courant est en phase avec l'émetteur du circuit de voie. British Rail a donc imposé l'installation, en plus du filtre 50 Hz monté en parallèle du filtre d'entrée, d'une unité de surveillance du courant d'interférence¹ dit de « sécurité » qui ouvre automatiquement le disjoncteur principal dès qu'une composante 50 Hz est détectée. Cependant, dès le début des essais des rames Eurostar en Grande-Bretagne, l'ICMU déclenchait l'ouverture des disjoncteurs de manière intempestive (près de cent fois entre la sortie du Tunnel et Londres). Ces détecteurs étaient sensibles à toutes les variations de courant. En cas de givre ou de rupture brutale (lacunes du 3^e rail pour les appareils de voies par exemple), le spectre du courant continu s'enrichit de nombreuses composantes alternatives, dont le 50 Hz que l'ICMU détectait. Ces modules ont donc été remplacés par des cartes incorporées dans l'unité de traitement du bloc commun qui se révélèrent à l'usage bien plus fiables, ce qui supprimera ces problèmes. De même, la SNCB a imposé l'installation d'un détecteur 50 Hz (DT50), toutefois moins restrictif que l'ICMU. Celui-ci, prévu initialement sur les Z2N, a finalement été modifié par la société Mors et installé sur les rames TMST et permettait indéfiniment le réarmement du disjoncteur.

De plus, un autre problème sous 750 V est apparu : la perte du palpage sur des lacunes, nécessitant une refermeture des disjoncteurs. La solution a donc été de ne plus ouvrir le disjoncteur tant que le filtre d'entrée était suffisamment chargé.

Enfin, le 3^e rail posait un autre inconvénient inattendu, celui de trouver régulièrement des rames sans frotteurs à l'arrivée en Gare du Nord / Bruxelles-Midi. Ces derniers n'étaient fixés que par de simples joints « frangibles » pour pouvoir casser en cas de contrainte trop importante sans générer d'autres dégâts. Après recherches, il s'est avéré que ces casses étaient dues à une pente de 3^e rail qui n'était pas aux normes et provoquait la casse du joint « frangible ». Un dispositif pour rompre les patins a été installé à l'entrée du tunnel côté Angleterre, dans le cas où ces derniers étaient encore en position basse.

Un des autres points sensibles des essais Eurostar a concerné le système informatique embarqué de la rame. Le TGV TMST se basait sur le système de communication déjà utilisé sur les TGV Réseau. Cependant, celui-ci devait être adapté aux contraintes spécifiques d'Eurostar, comme la sécabilité qui imposait la possibilité de couper la rame en deux et de repartir immédiatement avec une demi-rame, sans intervention extérieure. Cette procédure nécessitait le bouclage du réseau informatique au point de séparation, la coupure des conduites pneumatiques et l'action d'un vérin hydraulique permettant le mouvement de la manille des deux attelages au moyen d'un levier accessible au voisinage du point de sécabilité. Ce dispositif a nécessité la conception de câblots arrachables aux points de coupures afin de ne pas avoir à sortir de la rame. Le développement du système informatique a été confié, à la demande de GEC, à une équipe basée dans leur établissement de Rugby et qui a réussi, de manière remarquable, à rendre ce système fonctionnel dans les délais impartis. Un « laborame » était utilisé pour simuler les équipements de la rame.

De plus, un grand nombre de dispositifs de sécurité étaient présents à bord des motrices, chacun demandant également des essais spécifiques sur les réseaux concernés. Les transitions entre chaque signalisation devaient s'opérer sans discontinuité. En particulier, la transition Eurotunnel – BR a demandé un groupe de travail sur près d'un an pour mettre en place les dispositions nécessaires.

Néanmoins, de nombreux systèmes de sécurité développés pour le TGV TMST se sont révélés inutiles à l'usage, comme la sécabilité qui n'a jamais été utilisée en urgence dans le Tunnel (bien que très utile lors de la maintenance), malgré la complexité qu'elle a ajoutée au développement du matériel. De même, l'exploitation des TGV TMST sur les lignes classiques au sud de Londres a engendré des surcoûts en infrastructures (extension de la gare de Londres-Waterloo, Viaduc de Stewarts Lane etc.) et en renforcement de l'alimentation électrique par 3^e rail.

2.7 – Inauguration du Tunnel sous la Manche

L'inauguration officielle du Tunnel sous la Manche se déroula le 6 mai 1994 au terminal de Coquelles. Côté anglais, la Reine Elisabeth II d'Angleterre accompagnée du Duc d'Edimbourg, de John Major, Premier Ministre, de nombreux invités et journalistes inaugurèrent le nouveau terminal international de Londres Waterloo avant d'embarquer dans la rame 3003/3004 et de rejoindre le terminal français via le Tunnel. Côté français, le président François Mitterrand accompagné de Charles Pasqua, Ministre de l'Intérieur, inaugurèrent dans un premier temps le terminal de la Gare du Nord, avant d'embarquer dans la rame 3211/3212 puis, dans un second temps, celui de Lille-Europe situé sur leur trajet, rejoint par la délégation Belge, avant de repartir direction Calais. Sur place, les deux rames officielles arrivèrent face à face, tandis que plusieurs rames de réserve (deux rames TGV TMST et une rame TGV Réseau stationnant à Calais – Fréthun) étaient prévues en cas de panne. Les rames étant fragiles, il était impératif de prévenir tout aléa.

Cependant, à ce moment, le système informatique n'étant pas encore achevé et la fonction de maintien de service n'était pas fonctionnelle, cela a entraîné une coupure de courant dans les voitures lors des changements de cabine. Pour pallier ce problème, un agent était placé dans chaque remorque pour commuter manuellement l'éclairage sur batterie au moment opportun, rendant ainsi la coupure d'électricité invisible pour les voyageurs.

Suite à la cérémonie officielle, la Reine Elisabeth II et François Mitterrand embarquèrent au volant de la Rolls Royce royale dans une navette tourisme Shuttle pour une traversée du tunnel dans l'autre sens.

Par la suite, la CIG délivra l'autorisation pour le transport de voyageurs pour les marches d'essais. S'ensuivit, à partir du 17 août 1994, une puis deux rotations Londres-Paris et une rotation Londres-Bruxelles par jour afin de former les agents aux futures circulations commerciales avec simulation d'accident pour tester les procédures. Certains trajets Londres-Paris passèrent déjà sous les trois heures.

Le 6 octobre 1994, la CIG délivra l'autorisation définitive aux rames pour le transport de voyageurs à travers le Tunnel sous la Manche puis le 12 octobre, c'est au tour d'Eurotunnel d'obtenir le certificat d'exploitation.

Enfin, Le 13 octobre 1994, le Roi Albert II et la Reine Paola de Belgique ont à leur tour inauguré officiellement la relation Eurostar Bruxelles-Londres. Un trajet, à bord de la rame 3105/3106, fut réalisé entre les deux capitales.

2.8 – Lancement du service Eurostar

Le service commercial Eurostar fut officiellement lancé le lundi 14 novembre 1994 avec deux allers-retours quotidiens entre chaque capitale. Le trajet Paris-Londres dure exactement 3 h et le trajet Bruxelles-Londres 3 h 15. Le service sera progressivement augmenté jusqu'en 1997 :

- Le 23 janvier 1995, le service passe à quatre allers-retours Paris-Londres et trois Bruxelles-Londres quotidiens ;
- Le 27 février et le 3 avril, le service passe respectivement à cinq puis six allers-retours Paris-Londres quotidiens. Les Bruxelles-Londres restent inchangés ;
- Le 28 mai, le service passe à neuf allers-retours Paris-Londres et cinq Bruxelles-Londres. Le temps de trajet passe à 2 h 53 entre Paris et Londres ;
- Le 22 octobre, Eurostar propose désormais onze allers-retours Paris-Londres, mais seulement six entre Bruxelles et Londres ;
- Le 8 janvier 1996, la gare d'Ashford International ouvre ses portes et le service est porté à treize allers-retours le vendredi entre Paris et Londres ;
- À l'été 1996, le service passe à seize allers-retours entre Paris et Londres, puis le 1^{er} juillet, Eurostar lance la liaison Londres-Marne-la-Vallée-Chessy ;
- Le 14 décembre 1997, la LGV1 Belge ouvre. Le trajet Bruxelles-Londres passe à 2 h 36. Eurostar augmente le service à dix allers-retours quotidiens.

Tableau 8 – Points de passage sur l'itinéraire CTRL d'Eurostar.

Point de passage	Point kilométrique	Temps de parcours
Londres Waterloo	0,00	Départ (0')
Brixton	6,77	8'
Bromley South	19,10	19'
Orpington	25,50	23'
Sevenoaks	38,78	30'30"
Tonbridge	50,66	37'
Ashford	93,18	59'
Portail Nord (Castle Hill)	114,37	70'
Portail Sud (Beussingue)	164,58	91'
Lille-Europe	268,16	119'
Frétin	279,80	122'30"
Haute-Picardie TGV	366,29	143'
Bifurcation de Gonesse	476,46	171'
Paris Gare du Nord	492,16	180'

2.9 – Regional Eurostar et premier rétrofit

Pour rappel, le projet Regional Eurostar visait à utiliser les rames « North of London » composées de seulement quatorze voitures pour les dessertes de York, Newcastle, Edimbourg, Birmingham, Manchester ou encore Glasgow. Les essais des rames débutèrent fin 1995 pour une mise en service prévue dans la première moitié 1996.

Dans un même temps, certaines rames TMST participèrent à des évènements, comme Eurailspeed 1995 à la gare de Lille Flandres (demi-rame 3201) entre le 4 et le 6 octobre 1995 et aux portes ouvertes de la gare de Rotterdam (3309/3310) les 6 et 7 avril 1996. Puis, à la suite de la demande de la clientèle anglaise souhaitant aller skier dans les Alpes Françaises ou se rendre sur la Côte d’Azur, Eurostar a procédé aux essais et à la modification d’un certain nombre de rames pour les rendre compatibles au 1500 V continu. Ces essais se déroulèrent avec la rame 3203/3204, sortie de Belfort le 15 juillet 1996 après modifications, durant juillet et août 1996 entre, d’une part Dijon et Saint Amour, puis d’autre part entre Orléans et Vierzon. Un projet de liaison vers les Pays-Bas était envisagé, mais les coûts engendrés par l’installation de nouveaux pantographes ainsi que de l’ATB (système de sécurité en vigueur sur le réseau néerlandais) a provoqué l’abandon du projet. Puis, entre le 28 et 29 novembre et entre le 2 et 3 décembre 1996, deux trajets Londres-Bourg-Saint-Maurice furent effectués, respectivement via Lyon Saint Exupéry et Chambéry puis via Mâcon, Ambérieu et Chambéry. Parallèlement, les rames « NOL » débutèrent leurs essais. Durant l’hiver 1997, les rames 3225/3226 et 3227/3228 furent aussi adaptées au 1500 V. Le 14 décembre 1997, la rame 3311/3312 a circulé entre Bruxelles et Cologne, où elle a participé, en gare de Cologne-Deutz, à l’inauguration de la relation Thalys Paris – Bruxelles – Cologne.

Tableau 9 – Essais notables des rames « NOL ».

Date	Rame	Essais
Fin 1995	3301/3302	Début des essais des rames « NOL ».
Fin 1996	3301/3302	Début des essais de jour sur l’ECML entre Newark et Welwyn Garden City.
8 décembre 1996	Inconnue	Essais aérodynamiques du pantographe entre Tours, Nantes et Angers.
4/5 juin 1997	3307/3308	Essais à Glasgow, remorquée par les BR Class 37601 et 37606.
Août 1997	3301/3302	Essais à Manchester.

2.10 – Abandon des Regional Eurostar et premières mutations

Alors que les essais sur poursuivirent, aucune date d'entrée en service n'a été communiquée. Même si certaines rames « NOL » ont été utilisées sur des relations Bruxelles-Londres en raison de problèmes de transformateurs sur des rames « Trois Capitales », le projet Regional Eurostar semble au point mort. Au printemps 1999, le ministre des transports John Prescott annonça de nouvelles études pour ces liaisons après la proposition de certaines entreprises d'abandonner le service Regional Eurostar et d'utiliser les rames pour des relations Paris-Londres Heathrow. Néanmoins, en juillet 1999, les rames retournèrent faire des essais entre Londres King Cross et York.

Et pour cause, certaines rames « NOL », devenues inutiles après l'abandon du projet, ont été louées à la compagnie GNER qui les a dotées d'une livrée bleu nuit afin de remplacer temporairement les Intercity 225 pendant leur rénovation. Les rames 3301/3302 et 3303/3304 (3309/3310 servant de rame de réserve) effectuaient à partir du 30 mai 2000 des dessertes sur l'East Coast Main Line entre Londres, York et Leeds, sous le nom commercial de « The White Rose ». Par la suite, mi-2002, la rame 3305/3306 s'ajoute à la flotte commerciale GNER et la rame 3311/3312 à la réserve.



Figure 6 – Rame 3303/3304 GNER.

Photographie : © John Turner¹ (avec son aimable autorisation).

¹ : Lien Flickr : <https://flic.kr/p/8M3G1P>

Cependant, en raison de plusieurs facteurs, des restrictions ont été imposées quant au moment et au lieu où ils pouvaient circuler, ainsi qu'à leur vitesse. Tout d'abord, le premier service en direction du nord de la journée, pendant l'heure de pointe du matin, devait initialement partir de Peterborough plutôt que de King's Cross en raison de la puissance électrique qu'il consommait. L'alimentation a ensuite été renforcée, ce qui a permis de résoudre ce problème et de les faire circuler jusqu'à la gare de King's Cross. De plus, leurs pantographes avaient tendance à arracher les caténaires qui étaient particulièrement fragiles au nord de Londres, ce qui leur a valu une limitation de vitesse à 110 mph (environ 180 km/h), bien qu'une vitesse de 125 mph (200 km/h, vitesse maximale sur la ligne) ait finalement été autorisée entre Grantham et Woolmer Green. Cependant, le facteur limitant le plus contraignant sur l'ECML était que les voitures articulées des rames engageaient le gabarit du pont King Edward VII à Newcastle, très courbé, ce qui leur interdisait l'accès et les empêchait de circuler vers Édimbourg et Glasgow. En conséquence, York et Leeds ont été les seules gares à pouvoir être desservies par les rames « NOL » en provenance de Londres.

Enfin, les rames étant trop longues pour certains quais, un verrouillage manuel des portes de la première et de la dernière voiture devait être effectué préalablement à la desserte des gares concernées. Cette location a pris fin le 10 décembre 2005.

Le 8 mai 1999, la SNCB a organisé des expositions « Journée du voyage » dans cinq grandes gares belges. La demi-rame 3305 fut exposée à Bruxelles-Midi.

Le parc des rames « Trois Capitales » étant surdimensionné pour les relations transmanche, les rames 3203/3204, 3225/3226 et 3227/3228 ont été retirées du service Eurostar et ont assuré à partir du 30 mai 1999 les relations Bruxelles-Nice (sillons 9532 et 9573) à la place de quatre rames TGV Réseau. Celles-ci ont pour l'occasion vu leur logo Eurostar remplacé par un logo SNCF casquette. Cette relation a pris fin le 10 juin 2001 et les trois rames ont été envoyées sur les services Paris Nord-Lille, Dunkerque, Calais, Boulogne, Rang-de-Fliers et Valenciennes. Elles ont arboré un logo TGV et SNCF Carmillon à l'avant et vu leurs nez jaunes remplacés par du gris argent.

En outre, après la fin de location des rames « NOL » par GNER, la SNCF loua six rames (toutes, à l'exception de la 3304 et 3308) qui passeront au Technicentre Industriel d'Hellemmes pour des modifications mineures. Ces rames ont été utilisées sur les relations TERGV du nord de la France jusqu'au 13 décembre 2014.



Figure 7 – Rame 3203/3204 à Étaples – Le Touquet.

Photographie : OceanAtoll (Wikimedia Commons - CC BY-SA 2.0), *rognée*.

2.11 – Nouvelles relations et ouverture de CTRL

Le 13 décembre 1997 marqua le début des relations vers Bourg-Saint-Maurice. Le 11 mars 1998, la rame 3225/3226 réalisa une relation Londres – Valence en vue d’une éventuelle relation vers Marseille pour la coupe du monde de Rugby. Du 28 au 30 octobre, la rame 3303/3304 participa à EurailSpeed 1998 à Berlin-Grunewald. Au cours de l’année 2000, Eurostar entra en pourparlers pour des relations vers Bordeaux et Avignon et plusieurs excursions seront réalisées. À partir du 20 juillet 2002, Eurostar lança la relation Londres-Avignon Centre tous les samedis de juillet et août. Cette relation pris fin en août 2014 et fut remplacée par une relation Londres-Marseille à partir du 1er mai 2015. Elle fait suite à l’expérimentation par Eurostar d’une relation Londres-Aix-en-Provence TGV du 4 mai au 29 juin 2013.

Tableau 10 – Excursions de rames Eurostar.

Date	Rame	Relation
15 janvier 2000	3201/3202	Aller-retour Londres-Tours.
13 mai 2000	3201/3202	Aller-retour Londres-Orléans.
19 mai 2000	3207/3208	Nevers-Londres.
16 septembre 2000	3201/3202	Aller-retour Londres-La Rochelle (9066 puis 9073).
23 et 26 mai 2003	Inconnue	Aller-retour Londres-Bordeaux (9076 puis 9071).
20 et 23 juillet 2003	Inconnue	Aller-retour Londres-Tours.



Figure 8 – Rame 3207/3208 en gare de Nevers le 19 mai 2000.

Photographie : © Marc Mariette (avec son aimable autorisation).

Le 5 juin 2000, la rame 3101/3102 assurant l'Eurostar 9047 dérailla au raccordement de Croisilles (accès à Arras). L'architecture articulée de la rame a permis de garder le train dans l'axe du rail, mais la rame est particulièrement endommagée. Celle-ci sera stockée à Forest et ne roulera plus jamais en service commercial. L'accident a été provoqué par une bielle de réaction qui s'est désolidarisée sur le bogie arrière de la motrice de tête (3102) en raison d'un défaut dans la boulonnerie. Le rapport d'enquête indiqua que six jours auparavant, la rame 3007/3008 a subi le même incident dans le Kent et que cinq autres rames souffraient du même problème après contrôle de l'intégralité du parc. Ce rapport pointa un manque de communication entre les trois opérateurs en charges des rames. Suite à cela, des mesures curatives (contrôles systématiques) et préventives ont été prises afin qu'une telle situation ne puisse se reproduire.

Le demi-tronçon voyageur de la rame 3101 fut néanmoins conservé et envoyé à Hellemmes début 2012 pour développer et tester les nouveaux intérieurs pour l'opération mi-vie e300. Le demi-tronçon 3101 fut finalement démoli à partir du 28 février 2018 et le 3102 à partir du 29 juillet 2015. Les motrices ont toutefois été conservées par le National College for High Speed Rail à Doncaster (3101) et à Birmingham (3102) avec une livrée spéciale, dépourvues de leurs équipements électriques et aménagées en salles de réunion. Après la fermeture des établissements, la 3101 est désormais stockée sur un terrain d'airsoft à Bawtry Woods près de Doncaster et la 3102 à Worksop.

Le 21 janvier 2003, la construction du premier tronçon d'High Speed 1 (CTRL1 – Channel Tunnel Rail Link 1) est achevée. Il relie la sortie de Dollands Moor (sortie de la concession Eurotunnel) au raccordement de Fawkhams, que les Eurostar empruntaient entre 2003 et 2007 afin de rejoindre la Chatham Main Line et Londres Waterloo. Puis à partir de mi-avril, les essais en survitesse (330 km/h et plus) furent réalisés avec la rame 3313/3314 spécialement équipée en conséquence. Le record britannique de vitesse sur rail, détenu par le prototype APT-P, fut battu à deux reprises :

- Le 8 juillet, à 333 km/h ;
- Le 30 juillet à 11 h 35 avec 70 invités à bord, où la rame 3313/3314, conduite par Alan Pears, roula à 334,7 km/h.



Figure 9 – Raccordement de Fawkhams, débouchant à Southfleet sur la Chatham Main Line. Photographie : Revue de l'AFAC.

Figure 10 – Voiture de mesures de la rame 3313/3314. Photographie : Matthew Halloran (Flickr – CC BY-SA 2.0).

Le 27 septembre 2003 fut organisée l'opération « Circonflexe »¹, consistant en deux marches d'essai entre les trois capitales, via la ligne CTRL1 et le raccordement de Fawkhams. Le premier train, l'Eurostar 9117 composé de la rame 3107/3108, quitta Bruxelles-Midi à 9 h 07 et atteignit Londres-Waterloo en 1 h 58 min 15 s. Le second, l'Eurostar 9022 formé des rames 3005/3006, partit de Londres-Waterloo à 11 h 42 et arriva à Paris-Nord après 2 h 18 min de trajet. Pour réaliser ces performances, l'arrêt habituel à Lille-Europe fut supprimé, la vitesse dans le tunnel sous la Manche portée à 170 km/h et celle sur la LGV Nord à plus de 300 km/h, avec un pic à 324,2 km/h au niveau de Beugnâtre près d'Arras. Par ailleurs, les sillons des trains de banlieue furent adaptés afin de ne pas perturber la progression des deux Eurostar.

¹ : Nom donné par Philippe Mirville.

Entre 2004 et 2005, Eurostar lance une grande opération de modernisation de la flotte « Trois Capitales » réalisée en collaboration avec Philippe Starck. Elle permettra l'ajout de prises électriques, de rangements à bagages supplémentaires dans le compartiment voyageur des voitures et une modification des couleurs intérieures. Cette opération, d'un coût annoncé de 35 000 000£ sur trois ans, verra la première rame modernisée (3219/3220) sortir des ateliers le 7 septembre 2004. La rénovation des vingt-sept rames se terminera en décembre 2005 pour un coût final de 25 000 000£ (soit environ 900 000£ par rame).

2.12 – Ouverture de CTRL2

Après quelques événements et marches spéciales, comme le 15 novembre 2004 où la motrice 3307 circula sur la Tamise à bord d'une péniche, ou encore le 16 mai 2006 où la rame 3209/3210, arborant une livrée spéciale, transporta l'équipe du film « Da Vinci Code » de Londres à Cannes en 7 h 23 (Eurostar 9068), la construction du second tronçon de la nouvelle ligne à grande vitesse High Speed 1 arriva à son terme. Le 20 juillet 2007 commencèrent les essais d'homologation de CTRL2 avec les rames 3309/3310 et 3313/3314. Cette dernière sera la première rame à rentrer dans le nouveau terminal international de la gare de Londres Saint-Pancras le 6 mars de la même année.



Figure 11 – Motrice 3307 sur la Tamise.

Photographie : Droits Réservés.

Le 4 septembre 2007, l'Eurostar 9021, assuré par la rame 3223/3224, a relié la Gare du Nord à Londres-Saint-Pancras en 2 h 3 min 39 s (soit une vitesse moyenne de 238,7 km/h). Pour réaliser cette performance, les vitesses limites d'exploitation commerciale ont été dépassées, pour atteindre 325 km/h sur la LGV Nord et 314 km/h sur High Speed 1. Enfin, cette même rame réalisa le 20 septembre 2007 l'Eurostar 9125, de la gare de Bruxelles-Midi à la gare internationale de Londres-Saint-Pancras, en 1 h 43 min 53 s à une vitesse moyenne de 215,4 km/h.

Au cours de la nuit du 13 au 14 novembre 2007, les services Eurostar sont déplacés de la gare de Waterloo à Saint-Pancras, puis la gare d'Ebbsfleet International ouvre ses portes. La dernière rame commerciale au départ de Londres Waterloo (3007/3008) a reçu pour l'occasion une livrée spéciale « Waterloo Sunset ».

Jusqu'à ce jour, les rames Eurostar étaient entretenues conjointement par les établissements du Landy en France, de Forest en Belgique et de North Pole en Angleterre. Depuis l'ouverture aux services commerciaux de CTRL2 et de la gare de Londres Saint-Pancras le 14 novembre 2007, les opérations de maintenance et d'entretien côté anglais ont été transférées du dépôt de North Pole à celui de Temple Mills, à Stratford, dans l'est de Londres. Une semaine avant l'ouverture officielle de CTRL2, tout le matériel roulant a été transféré de North Pole à Temple Mills, le premier dépôt ne conservant plus que la fonction d'inspection générale des rames. Les travaux de maintenance lourde ont commencé à Temple Mills le 7 octobre 2007 (le dépôt ayant été officiellement mis en service le 2 du même mois), afin de permettre aux ingénieurs de se familiariser avec le nouveau site et ses installations. Le manque de connaissance des itinéraires de la North London Line par les conducteurs a conduit les cinq derniers trains en service en gare de Waterloo à rejoindre le dépôt de Temple Mills par un itinéraire secondaire. Les rames ont emprunté le raccordement de Fawkham, ont fait demi-tour à Southfleet pour accéder à CTRL2, puis ont de nouveau fait demi-tour à Stratford International pour accéder à l'embranchement menant au nouveau centre de maintenance.

Après le transfert des services Eurostar depuis Waterloo International, les anciens quais 20 à 24 sont restés inutilisés pendant plusieurs années. Une réouverture partielle a eu lieu en décembre 2018, suivie d'une remise en service complète en mai 2019, cette fois pour un usage domestique. Entre-temps, la gare de Waterloo a connu d'importants problèmes de capacité, faute de pouvoir utiliser l'ancienne gare internationale. Dès décembre 2008, des travaux préparatoires avaient été engagés afin de permettre l'utilisation du quai 20 par les services banlieue de South West Trains. Toutefois, la transformation des autres quais fut retardée afin de changer le plan de voies en sortie de gare. Les quais 20 à 22 ont finalement été raccourcis et rouverts à l'exploitation fin 2018, tandis que les quais 23 et 24 l'ont été en mai 2019. Ces travaux ont permis d'augmenter la capacité de la gare de 30%. À l'origine, les quais internationaux n'étaient dimensionnés que pour accueillir six trains par heure, un niveau très inférieur aux cadences nécessaires pour les services de banlieue.

Enfin, suite à l'ouverture de CTRL2, l'intégralité de l'itinéraire entre la sortie du Tunnel et Londres est désormais électrifié par caténaire. Les équipements dédiés à l'utilisation du 750 V¹ (frotteurs, disjoncteur, ICMU, etc.) sont devenus superflus et ont été démontés.

2.13 – Et après ?

Fin 2008, Eurostar annonça la préparation des opérations mi-vie nommées e300 de l'intégralité des rames « Trois Capitales » encore en circulation (à l'exception des trois rames SNCF sorties du service Transmanche) à l'horizon 2011, pour un coût estimé de 100 000 000£. En mars 2009, Eurostar annonça avoir choisi l'entreprise Pininfarina pour la rénovation des intérieurs.

Durant la nuit du 18 au 19 décembre 2009, cinq rames Eurostar sont tombées en panne dans le Tunnel. Ces pannes ont été causées par la fonte rapide de la neige présente en abondance sur la toiture des rames au moment de l'entrée dans le Tunnel. En effet, l'atmosphère dans les deux tunnels ferroviaires y est chaude (environ 25 °C) et humide (proche de la saturation). La différence de température a ainsi provoqué d'une part la fonte de la neige et d'autre part la formation de condensation à l'intérieur des motrices, ayant pour conséquence l'amorçage de différents équipements électriques. Près de deux mille voyageurs ont été impactés par ces incidents. Une liste de recommandations a été formulée par le rapport d'enquête permettant d'établir des mesures en cas d'épisodes similaires.

Tableau 11 – Liste des Eurostar impactés.

Sillon	Heure de la panne	Défaillance(s) ¹
9157	21h30	Perte de cinq blocs moteurs en raison d'une défaillance électronique pour deux blocs, d'un amorçage d'une bobine, défaut d'un circuit de détection de tension et problème de surtension.
9053	22h38	Défaillance des blocs moteurs et de l'électronique.
9055	23h14	Perte de quatre blocs moteurs en raison d'une défaillance électronique, d'un amorçage d'une bobine et de problèmes de surtensions dans le bloc commun.
9059	0h08	Défaillance du réseau informatique.
9057	1h08	Perte de quatre blocs moteurs en raison d'un amorçage d'une bobine et de surtensions dans le bloc commun.

¹: cf. § 3.3 et 3.4

Suite à l'incident et au rapport d'enquête, différentes mesures techniques curatives ont été prises afin de minimiser le risque de récurrence en cas d'épisode neigeux. Les portes d'accès à l'informatique embarquée du bloc commun et des blocs moteurs sont renforcées, des écrans pare-neige sont installés à l'entrée d'air du transformateur principal, les flux d'air sont modifiés dans les blocs moteurs afin d'éviter la pénétration d'humidité dans les baies informatiques et dans les moteurs qui aurait pour conséquence des amorçages entre rotor et stator. De plus, l'armoire cabine a été équipée de portes de protection des équipements informatique et le système de ventilation a été équipé d'un échangeur thermique afin de réguler les variations thermiques au sein de l'armoire. Enfin, des modifications des cartes informatiques ont été réalisées afin de réduire la tension de 1900 V à 900 V sur le bus de tension en inhibant les ponts redresseurs supérieurs (ponts mixtes) par temps froid ($< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) et sur la zone Eurotunnel afin de réduire les risques d'amorçage au sein du bloc commun.

Depuis le 1^{er} septembre 2010 et le lancement de la structure Eurostar International Ltd, l'intégralité du parc « Trois Capitales » encore en service est passée sous la propriété de cette entreprise. De ce fait, toutes les rames passent sous la dépendance du dépôt de Temple Mills, bien que la maintenance soit toujours réalisée conjointement avec les centres du Landy et de Forest.

En 2014, après trois ans de retard, Eurostar annonce réduire de moitié le nombre de rames prévu pour l'opération mi-vie. Ce chiffre passera à huit rames en novembre de la même année. Les voitures de la demi-rame 3102 qui étaient stockées au dépôt de Forest ont été utilisées pour développer les intérieurs de la rénovation e300. En juin 2014, les motrices 3015 et 3016 sortent du Technicentre Industriel d'Hellemmes avec un tronçon non rénové pour essais. En raison de diverses difficultés, le tronçon voyageur rénové ne sortira des ateliers qu'en juillet 2015. Les opérations mi-vie se dérouleront jusqu'au printemps 2019 avec la rame 3209/3210. Cette opération inclut le remplacement des aménagements intérieurs d'origine par des équipements neufs, l'installation d'écrans pour l'information voyageurs, d'équipements 1500 V pour les rames non-compatibles, du Wi-Fi, d'une nouvelle livrée et de diverses modifications mécaniques.

Dans un même temps, les premières radiations sont intervenues le 13 décembre 2014 à la fin de la période D du Service Annuel 2014 avec les rames « NOL » et « Trois Capitales » exploitées par la SNCF. Il s'ensuit, à partir de 2016, les premières radiations côté Eurostar avec la rame 3003/3004.



Figure 12 – Rame « NOL » 3305/3306 louée par la SNCF à destination de Gare du Nord.
Photographie : Aleix Cortés (Flickr – CC BY-NC-ND 2.0), *rogée*.

En 2018, le parc s'est vu équiper par le Technicentre Industriel d'Hellemmes du système de sécurité belge TBL 1+. À partir de la fin d'année 2022 et jusqu'au début d'année 2026, les rames encore en circulation vont être équipées de l'ETCS et du Bi-standard. Cette opération, organisée par MASTERIS, est confiée aux ateliers SNCB de Forest TGV et de La Dorsale (Salzinnes). Les équipements AWS, TPWS et TBL 1+ seront également déposés. Le 29 avril 2024, la rame prototype 3209/3210 sortait des ateliers belges pour débiter ses essais. Suite aux essais, l'autorisation de circulation a été délivrée par l'ERA (European Union Agency for Railways) le 24 juin 2026 et les premières circulations commerciales ont été réalisées à partir du 17 juillet de la même année.

En décembre 2018, Thalys a loué la rame hybride 3213/3224 afin de remplacer le TGV Réseau (rame 4551) utilisé pour les relations Izy. Mise en service à partir du 9 décembre 2018, elle a circulé jusqu'en 2021 sur la liaison Bruxelles-Midi – Paris-Nord, avec une fréquence d'un aller-retour par jour du lundi au jeudi et le samedi ainsi que deux allers-retours le vendredi et le dimanche. Une livrée spéciale Izy lui a été appliquée pour l'occasion. Cependant, en raison des conséquences économiques de la pandémie du COVID-19, la 3213/3224 est radiée et le service Izy fut effectué par des rames classiques Thalys (TGV PBA et PBKA) jusqu'à la suppression du service le 10 juillet 2022.



Figure 13 – Rame 3213/3224 assurant le Thalys Izy 9603 Paris – Bruxelles à Feuchy.
Photographie : Cramos (Wikimedia Commons – CC BY-SA 4.0), *rognée*.



Figure 14 – Rame 3219/3220 en livrée e300 sur la LGV Nord.
Photographie : © Kyliam G. (avec son aimable autorisation), *rognée*.

Enfin, du 1^{er} au 3 août 2025, la motrice 3999 est présentée au « The Greatest Gathering » organisé par Alstom à son établissement de Derby. Cet évènement marqua les deux-cents ans de l'histoire du transport ferroviaire avec la « Locomotion No. 1 » et la traction du tout premier train de voyageur au monde sur le chemin de fer de Stockton et Darlington le 27 septembre 1825.



Figure 15 – Motrice 3999 à côté de la Class 43 n°43004 à Derby au Greatest Gathering.
Photographie : Steve Knight (Flickr – CC BY 4.0).

3 – Fonctionnement et technique des TGV TMST

3.1 – Préambule : la BB 10003

Fruit d'un concours entre Alsthom et Jeumont-Schneider pour l'expérimentation de chaînes de traction nouvelles, la première version de la BB 10003, construite en 1984 à partir de la BB 7003, elle-même élaborée à partir de la BB 15007, avait vocation à expérimenter la faisabilité d'une chaîne de traction à moteurs asynchrones. Opposée à la BB 10004 de Jeumont-Schneider proposant une chaîne de traction à moteurs synchrones autopilotés alimentés par commutateurs de courants à thyristors, la BB 10003 proposa, quant à elle, des moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de tension constitués de thyristors et pilotés par de nombreux composants électroniques analogiques. Elle fait suite à la première expérimentation réalisée avec la CC 14003 et le fourgon Z 4212 qui, dix ans plus tôt, ont testé un onduleur de tension. Ce dernier, situé dans le fourgon Z 4212, alimenta le moteur n°5 de la CC 14003. Au sein de la BB 10003, les semi-conducteurs de puissance étaient immergés dans des cuves hermétiques contenant du « fréon 113 ». Cette technique permet l'échange thermique entre les composants qui y sont enfermés et l'air ambiant. Elle offre la possibilité de concentrer davantage de puissance dans un volume plus réduit.

Après sa « première carrière », la BB 10003 a été modifiée en 1988 par Alsthom à Villeurbanne avec les spécificités de GEC afin de tester les différents composants à thyristors GTO et les calculateurs associés qui équiperont le futur TGV TMST. Le prototype était équipé de deux onduleurs à thyristors GTO de calibre 4 kV – 2,5 kA ainsi que d'un hacheur 3 kV et d'un transformateur 25 kV – 50 Hz avec les ponts de diodes et mixtes associés pour le redressement de la tension. Le rapport de démultiplication du moteur a été choisi de telle sorte que la vitesse maximale de 160 km/h sur la BB 10003 donnait la vitesse moteur équivalente à la vitesse maximale de 300 km/h du TGV TMST. Seul un des deux bogies était motorisé.

Le but des essais réalisés avec la BB 10003 était de valider les performances de l'équipement et de consolider sa conception. Ces tests ont notamment permis d'apporter des améliorations au filtre d'entrée. Les résultats des essais en ligne ont montré qu'il était possible d'améliorer l'atténuation de certains harmoniques en modifiant le filtre à deux étages. Les recherches se poursuivirent avec un circuit à commutation alternative permettant la transformation en un filtre à un seul étage de fréquence de résonance plus basse.

Ainsi, l'objectif de la construction d'un prototype était de prouver la pertinence des moteurs asynchrones et des systèmes divers utilisés à la conception du TGV TMST. Cela impliquait notamment d'examiner certains aspects pertinents des performances :

- Contrôler la génération d'harmoniques pour la compatibilité de la signalisation ;
- Contrôler les courbes d'effort de traction en fonction de la vitesse selon la tension d'alimentation, y compris en cas de conditions d'adhérence dégradées ;
- Gérer des conditions d'alimentation défavorables : rebond du pantographe, alimentation instable, etc. ;
- Maintien d'un facteur de puissance supérieur à 0,9 sous une alimentation de 25 kV – 50 Hz ;
- Conformité du freinage rhéostatique avec l'exigence d'établir et de maintenir le freinage en l'absence de tension sur la ligne. Cela inclut une réponse active aux conditions de patinage des roues ;
- Contrôler la communication entre les systèmes auxiliaires et les systèmes d'alimentation ;
- Vérifier les caractéristiques en fonctionnement des équipements afin de démontrer l'application du refroidissement à l'huile.

La BB 10003 avait également pour objectif de tester l'équipement informatique embarqué nécessaire au pilotage des moteurs. Celui-ci embarque 14 Eurocard 6U, utilisant des composants montés en surface. Ce dispositif commande les deux onduleurs et le hacheur rhéostatique. Huit microprocesseurs Intel 80C196 16 bits 12 MHz sont utilisés. La communication entre les cartes est assurée par des liaisons à haut débit utilisant le réseau de contrôle Intel 82526.

Les essais se déroulèrent à l'usine de Belfort mais également sur différentes lignes en France et en Belgique. N'ayant pas de frotteurs et ne pouvant pas se rendre en Angleterre compte tenu de son gabarit, l'alimentation en 750 V s'effectua par caténaire et non par 3^e rail. Le futur pantographe continu des TGV TMST fut également testé.

Garée en 1993 après plusieurs années de bons et loyaux services, elle sera remise au type (BB 15007) le 5 mars 1998 après prélèvement de nombreuses pièces sur la BB 15015 accidentée en 1994 près de Bâle.

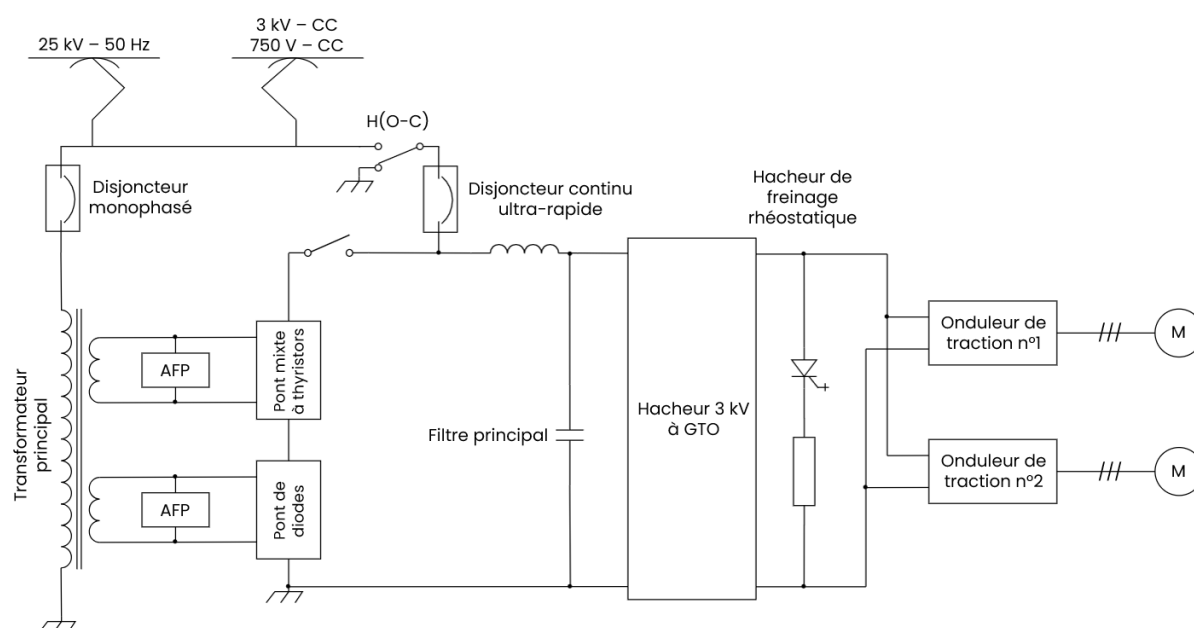


Figure 16 – Schéma de traction simplifié de la BB 10003.

Document : Aurélien Desnues.



Figure 17 – Seconde version de la BB 10003 à Enghien. La HLE 2760 en queue assure un effort de retenue. Trois voitures de mesure sont incorporées au convoi.

Photographie : © Christian Vanheck¹ (avec son aimable autorisation).

¹ : Lien Flickr : <https://flic.kr/p/2mdk4gN>

3.2 – Introduction à la chaîne de traction des TGV TMST

La chaîne de traction d'un matériel roulant constitue sa partie active. Elle a pour tâche de capter et convertir l'énergie électrique pour la traction, les auxiliaires et les servitudes du train. Cette chaîne de traction est constituée de différents systèmes, chacun remplissant une fonction particulière pour le fonctionnement du train :

- Captage du courant ;
- Conversion (puissance ou auxiliaires) ;
- Transmission mécanique ;
- Cette chaîne de traction doit être capable de fonctionner en toutes circonstances (redondance), sous les différentes tensions prévues pour l'engin en plus de respecter les réglementations en vigueur des réseaux pour lequel il est homologué.

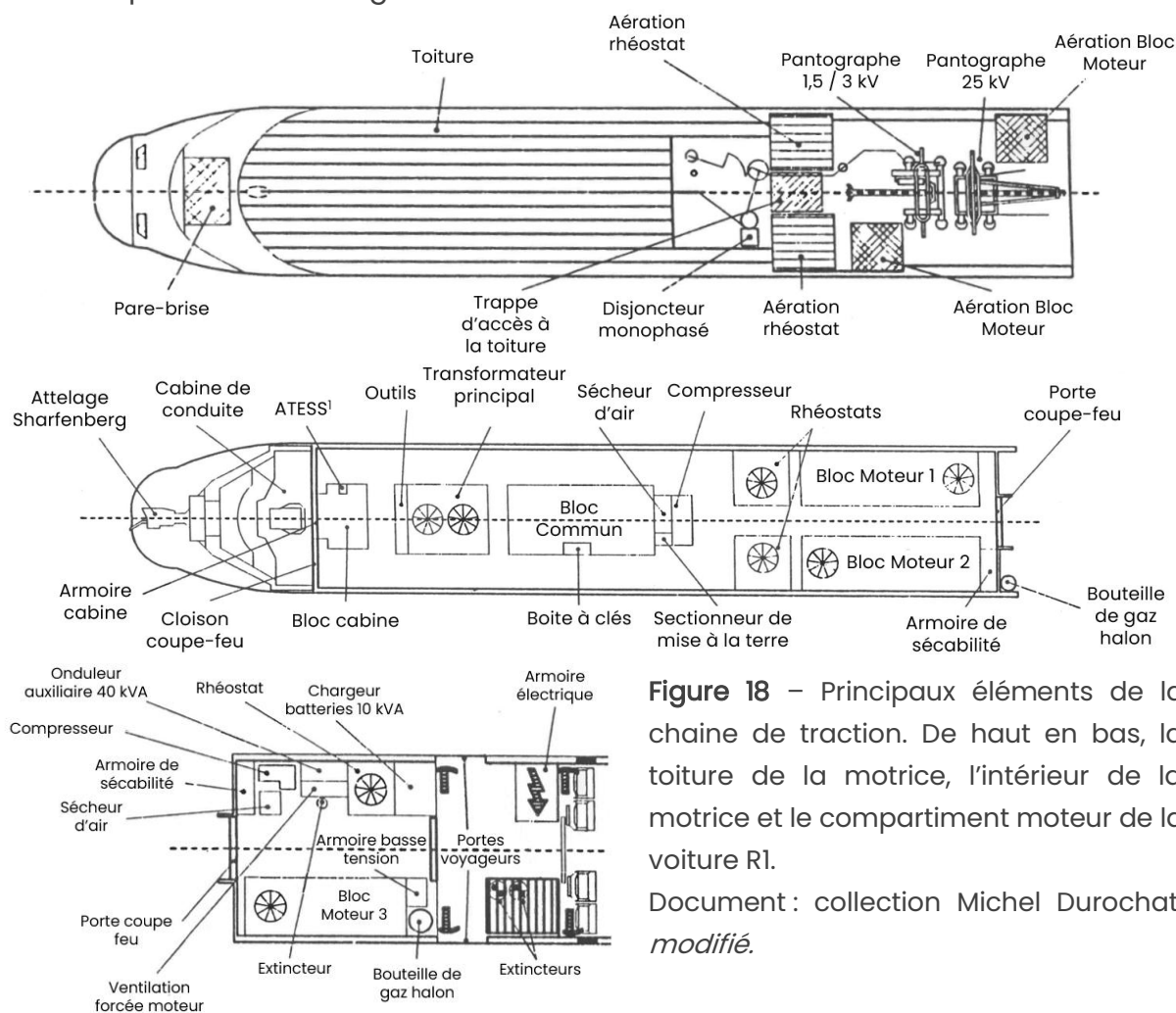


Figure 18 – Principaux éléments de la chaîne de traction. De haut en bas, la toiture de la motrice, l'intérieur de la motrice et le compartiment moteur de la voiture R1.

Document : collection Michel Durochat, *modifié*.

1 : Acquisition et Traitement des Événements de Sécurité en Statique. Système analogue à la boîte noire d'un avion, il enregistre toutes les informations de conduite, permettant ainsi de reconstituer un trajet (par exemple en cas d'accident).

3.3 – Captage du courant

La première étape pour alimenter le train est de capter le courant sur le réseau. Afin d'être capable, à l'origine, de rouler sur le réseau français, belge et anglais, le TGV TMST était équipé de pantographes et de frotteurs :

- Un pantographe 25 kV – 50 Hz par motrice ;
- Un pantographe 3 kV continu (et 1,5 kV pour les rames aptes) par motrice ;
- Huit frotteurs 3^e rail 750 V continu par motrice.

3.3.1 – Pantographe 25 kV – 50 Hz (PT-AC)

Le captage du courant sous caténaire 25 kV – 50 Hz est assuré sur chaque motrice par un pantographe GPU (Grand Plongeur Unique) conçu par Faiveley. Ce type de pantographe a déjà été installé en amont sur le TGV Atlantique et testé sur le prototype TGV PSE 88 (02301 et 02302) ainsi que plusieurs BB 15000. Ce pantographe est utilisé sur le réseau classique français et anglais à caténaire monophasée, les LGV et la concession Eurotunnel.

Tableau 12 – Caractéristiques techniques du pantographe monophasé.

Intitulé	Valeur
Vitesse maximale	300 km/h (testé à plus de 330 km/h)
Extension maximale	2,8 m
Hauteur caténaire / réglage butées	5,08 m / 5,28 m (LGV)
	5,92 m / 6,07 m (Eurotunnel)
Masse totale	331 kg (profil « BR – British Rail »)
	329 kg (profil « BSM – Bourg-Saint-Maurice »)
Masse archet	9,5 kg (profil « BR »)
	7,8 kg (profil « BSM »)
Intensité maximale	350 A
Débattement du grand plongeur	140 mm
Suspension	2 x 6350 N/m (archet)
	1200 N/m (GPU)
Amortisseur, à 3 cm/s	156 N (descente)
	78 N (montée)
Effort statique	70 N
Effort dynamique, à 300 km/h (avant, arrière)	150 N, 220 N (profil « BR »)
	120 N, 210 N (profil « BSM »)

Le TGV TMST était à l'origine équipé d'archets unipalettes de 1600 mm à deux bandes carbone de 670 mm et cornes arrondies isolées de 150 mm. Ce profil spécial « BR » était adapté à la circulation sous caténaire monophasée anglaise entre Londres et North Pole, tout en étant capable de circuler côté français entre Paris et le Tunnel. Cependant, un problème se posait pour circuler sous 25 kV sur les lignes SNCF car le gabarit électrique était incompatible avec le profil « BR » des archets. À partir de 1996, certaines rames ont été équipées de la compatibilité 1500 V. Afin d'assurer le gabarit électrique des différentes lignes parcourues (notamment les tunnels pour rejoindre Bourg-Saint-Maurice), l'archet à profil « BR » a été remplacé par un archet à profil « BSM » avec des cornes isolées en composite de 265 mm. En effet, sur l'archet au profil « BR », la partie sous tension était trop proche de certaines des parties à la masse de l'infrastructure, ce qui pouvait poser des problèmes d'amorçage. L'archet « BSM » résout donc ce problème en passant d'une largeur sous tension de 1300 mm à 1070 mm. Chaque archet est conforme à la norme « UIC 608 Annexe C ». En outre, un troisième archet de 1600 mm a été développé et monté sur les rames « NOL ». Ces derniers sont équipés de bande carbone de 915 mm de long et de cornes isolées de 150 mm en raison du désaxement plus important de la caténaire sur l'ECML, le fil de contact devait rester sur la partie carbone et éviter le contact avec les parties métalliques de l'archet. Ils ont été remplacés lors de la location des rames par la SNCF par les archets « BSM ».

En raison de l'absence d'une ligne de toiture 25 kV¹, alors que des équipements de sectionnement n'exigeant aucune intervention manuelle existaient pour la sécabilité, les pantographes des deux motrices sont utilisés sous caténaire monophasé. Ces derniers, distants d'environ 355 m, sont bien plus éloignés que pour des TGV Atlantique ou Réseau en unités multiples, avec respectivement 237 m et 200 m. Pour autant, un phénomène de résonance provoquait un captage très dégradé sur le pantographe de queue. Cette contrainte a nécessité une période d'essais longue et la mise au point d'artifices aérodynamiques adaptés. Par exemple, l'effort de contact du pantographe de tête a volontairement été réduit à des valeurs inhabituelles (150 N à 300 km/h) pour limiter l'excitation du fil de contact en amont du pantographe de queue dont l'effort de contact a été réglé à 220 N à 300 km/h. L'absence de ligne de toiture résultait de l'opposition formelle à son existence (sans toutefois donner de justification) du président britannique du comité de sécurité mis en place pour le Tunnel.

¹ : À noter qu'assurer le captage d'une rame TMST complète aurait été possible avec un seul pantographe, comme c'est le cas sur les rames KTX-I en Corée du Sud ou sur la VI50 où 24 MW étaient captés par une unique bande de carbone de 60 mm de large.

Des profilés aérodynamiques au niveau de la traverse support d'archet et deux ailerons aérodynamiques (7° et 52° par rapport au bras supérieur sur les pantographes équipés d'archets « BR » et « BSM »), positionnés sur le bras supérieur, assurent l'effort dynamique en fonction de la vitesse et du sens de circulation. Pour les pantographes équipés d'archets « NOL », un mécanisme additionnel permet de maintenir une incidence constante des ailerons à $22,9^\circ$ par rapport à l'horizontale pour obtenir l'effort dynamique attendu malgré les différences de hauteur des caténaires LGV et ECML.

Tableau 13 – Essais du pantographe monophasé.

Date	Objectif
Octobre 1993	Essais de planage entre Angers et Nantes.
Février à avril 1994	Essais de captage sur la LGV Nord.
Mars 1994	Essais de comptabilité du captage dans le Tunnel sous la Manche et les terminaux anglais.
Octobre 1996	Essais de planage de l'archet « BSM » entre Angers et Nantes.
Novembre 1996	Essais de captage de l'archet « BSM » sur la LGV Nord.
Décembre 1996	Essais de planage de l'archet « NOL » entre Angers et Nantes.



Figure 19 (à gauche) – Pantographe GPU, archet profil « BR ».

Photographie : Rsa (Wikimedia Commons – CC BY-SA 3.0), *rognée*.



Figure 20 (à droite) – Pantographe GPU, archet profil « BSM ».

Photographie : © Garry Keenor¹ (avec son aimable autorisation).

¹ : Document d'origine : Overhead Line Electrification for Railways, Garry Keenor.

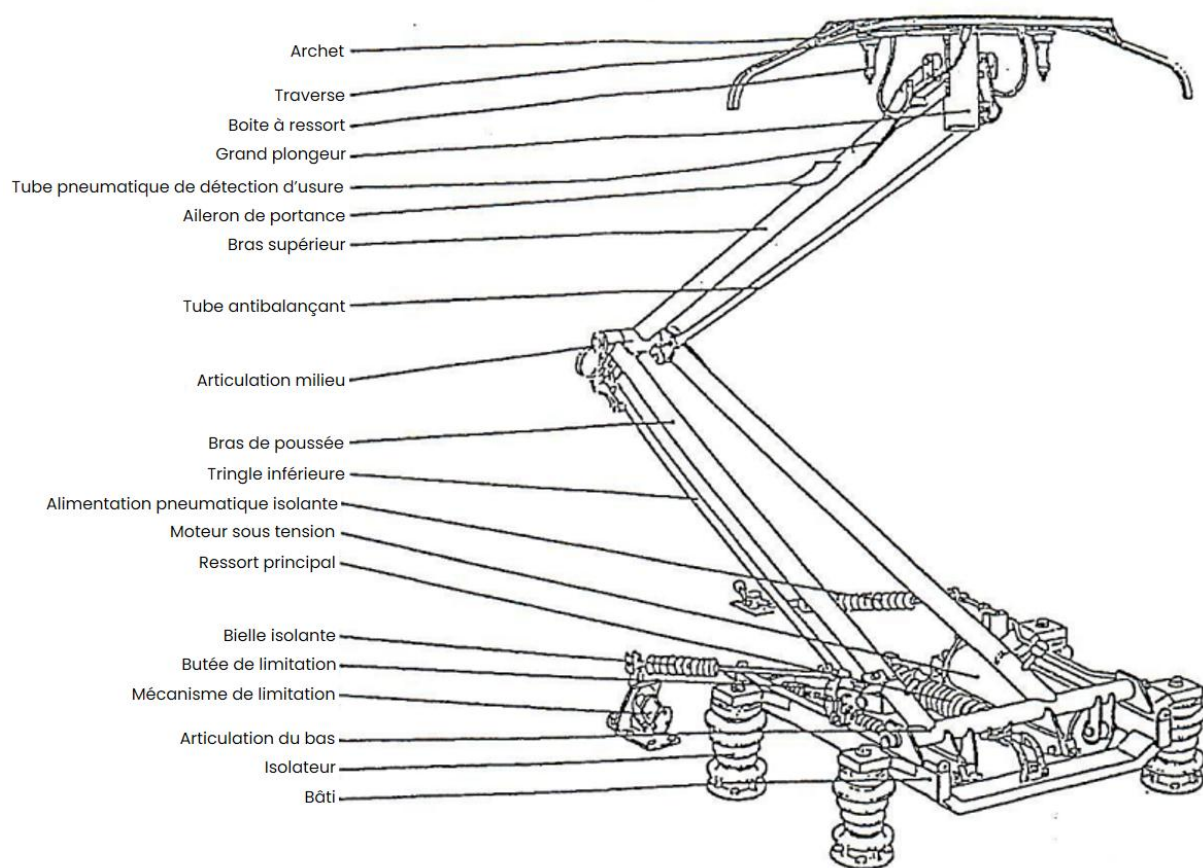


Figure 21 – Schéma du pantographe GPU.

Document : document d'étude EPS.



Figure 22 (au-dessus) – Archet profil « NOL ».

Figure 23 (à gauche) – Pantographe GPU, archet profil « NOL ».

Photographies : Droits Réservés.



Enfin, les pantographes GPU sur les rames « NOL » étaient équipés d'un dispositif d'abaissement automatique en cas de dépassement d'une hauteur limite d'environ 6,3 m.

3.3.2 – Pantographe 1,5 et 3 kV continu (PT-DC)

Le captage du courant sous caténaire belge 3 kV continu (puis dans un second temps sous caténaire française 1,5 kV continu) est assuré par un pantographe Brecknell Willis High Speed Pantograph par motrice. Au départ équipé d'un archet de 1760 mm à quatre bandes en carbones de 1000 mm, il sera remplacé par la suite à partir de 1999 sur les rames aptes au 1,5 kV par un archet à deux bandes Kasperowski (assemblage mixte carbone-cuivre) de même dimension adapté aux intensités sous cette tension (400 A à l'arrêt et 2000 A en circulation par pantographe).

Tableau 14 – Caractéristiques techniques du pantographe continu.

Intitulé	Valeur
Vitesse maximale	220 km/h (testé à 240 km/h)
Extension maximale	3,135 m
Masse totale	173 kg
Intensité maximale	400 A (à l'arrêt)
	2000 A (en mouvement)
Effort statique	120 N
Effort dynamique, à 220 km/h	170 N

Tableau 15 – Essais du pantographe continu.

Date	Objectif
Fin 1993	Essais de captage et de planage en Belgique entre Mouscron, Tournai et Enghien puis entre Tournai et Lille.
Février à avril 1994	Essais en tant que pantographe de secours sur la LGV Nord.
Mars 1994	Essais de compatibilité du captage dans le Tunnel sous la Manche et les terminaux anglais.
Février et mars 1999	Essais du nouvel archet Kasperowski, planage entre Angers et Nantes, captage entre Vierzon et les Aubrais, marches d'endurance entre Bordeaux, Vierzon et Massy, LGV pour le secours, faisceau des Laumes – Alésia afin de contrôler la température du fil de contact lors d'un maintien de service sous caténaire légère et marches entre Marseille et Nice.

Comme mentionné ci-dessus, le pantographe Brecknell Willis peut être utilisé en secours sous certaines caténaires monophasées, notamment dans le Tunnel ou sur ligne à grande vitesse, avec toutefois une vitesse maximale de 220 km/h.

Ces archets sont néanmoins fragiles face au givre. Les relations jusqu'à Bourg-Saint-Maurice étant effectuées tôt le matin, des archets étaient sectionnés du fait d'arcs électriques de forte puissance et devaient être remplacés. Ce problème a impliqué la présence d'un agent de maintenance du Landy à bord du train afin de remplacer les archets hors d'usage à Bourg-Saint-Maurice.

Légende :

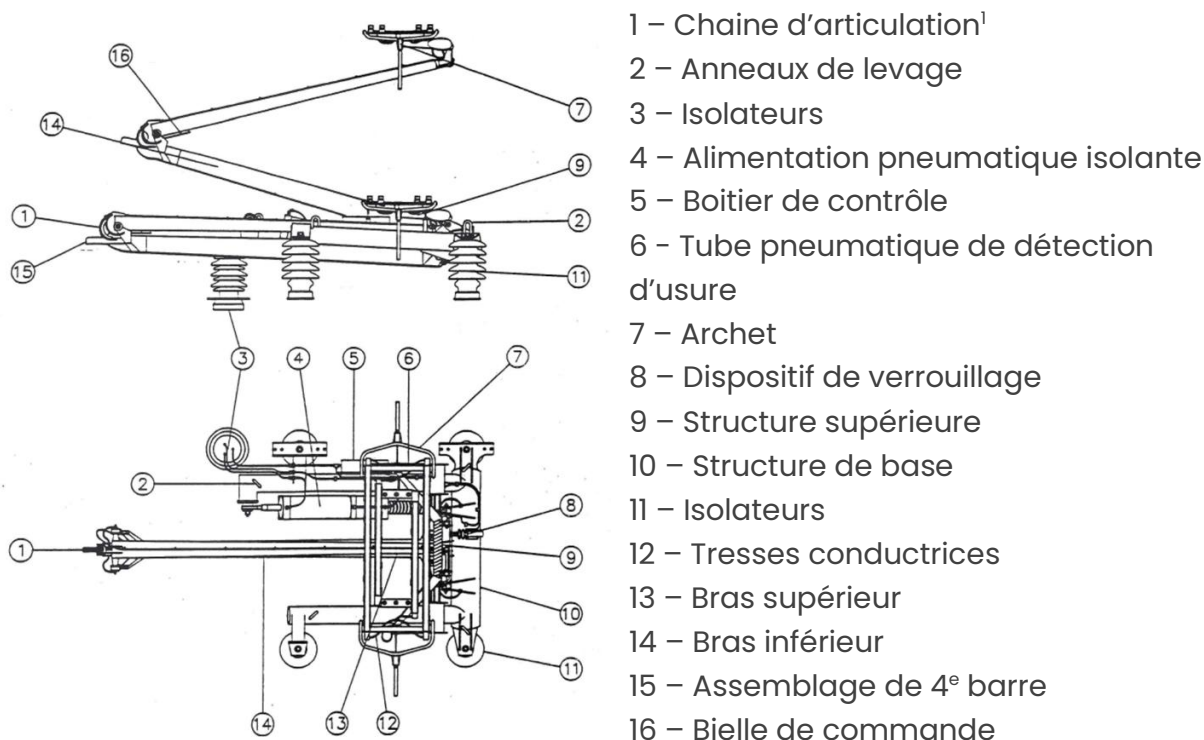


Figure 24 – Schéma du pantographe continu. Archet d'origine à quatre bandes carbone.
Document : document d'étude EPS.

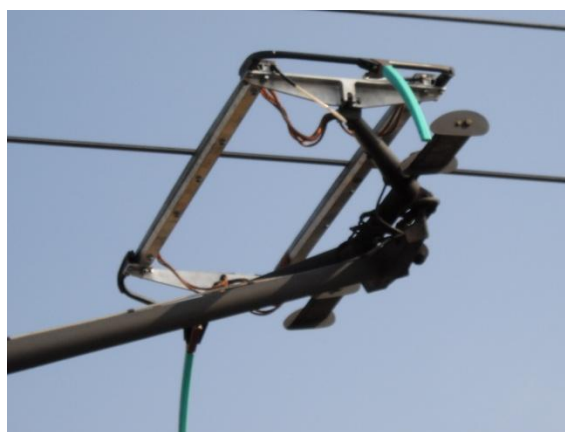


Figure 25 – Brecknell Willis High Speed Pantograph avec archet Kasperowski.
Photographies : © Gérard Auditeau (avec son aimable autorisation).

¹ : Contrairement au pantographe Faiveley GPU où le déploiement du pantographe et l'horizontalité de l'archet sont assurés par une tringle inférieure et un tube antibalançant, le pantographe Brecknell Willis est équipé d'un assemblage de 4^e barre à l'intérieur du bras inférieur, d'une chaîne d'articulation montée autour d'une came et d'une barre de contrôle à l'intérieur du bras supérieur.

3.3.3 – Frotteurs 750 V continu (SG-01 à 08)

De 1994 à 2007, les services Eurostar empruntaient le réseau classique BR de la sortie du Tunnel sous la Manche (puis du raccordement de Fawkham) jusqu'à la gare internationale de Londres Waterloo. Ce réseau était alimenté par 3^e rail 750 V continu. Le TGV TMST disposait donc d'un système de captage par frotteurs. Chaque motrice possédait huit frotteurs rétractables installés sur les bogies moteurs (les bogies moteurs des voitures d'extrémités n'en étaient pas équipés), déployés au moyen d'un système pneumatique et rétractés à l'aide d'un ressort. En position basse, ces frotteurs engageaient le gabarit continental, il était donc nécessaire que ces frotteurs soient effaçables. La réduction de puissance de l'engin sous cette tension permettait de limiter l'intensité à environ 750 A par frotteur. Ces derniers sont mis à la terre lorsqu'ils sont rétractés.

Ces frotteurs ont été développés conjointement par Faiveley et Brecknell Willis. Ils permettaient une vitesse maximale de 160 km/h sur les lignes équipées de 3^e rail et étaient fixés à l'aide de joints dits « frangibles » prévus pour se rompre en cas de choc afin d'éviter d'autres dégâts. De plus, un capot était disposé sur le châssis du bogie pour éviter la formation d'amorces de ruptures dues aux arcs électriques.

Ces frotteurs ont été retirés suite à l'ouverture du second tronçon de HS1 en novembre 2007 entre la bifurcation de Southfleet et Londres Saint-Pancras.

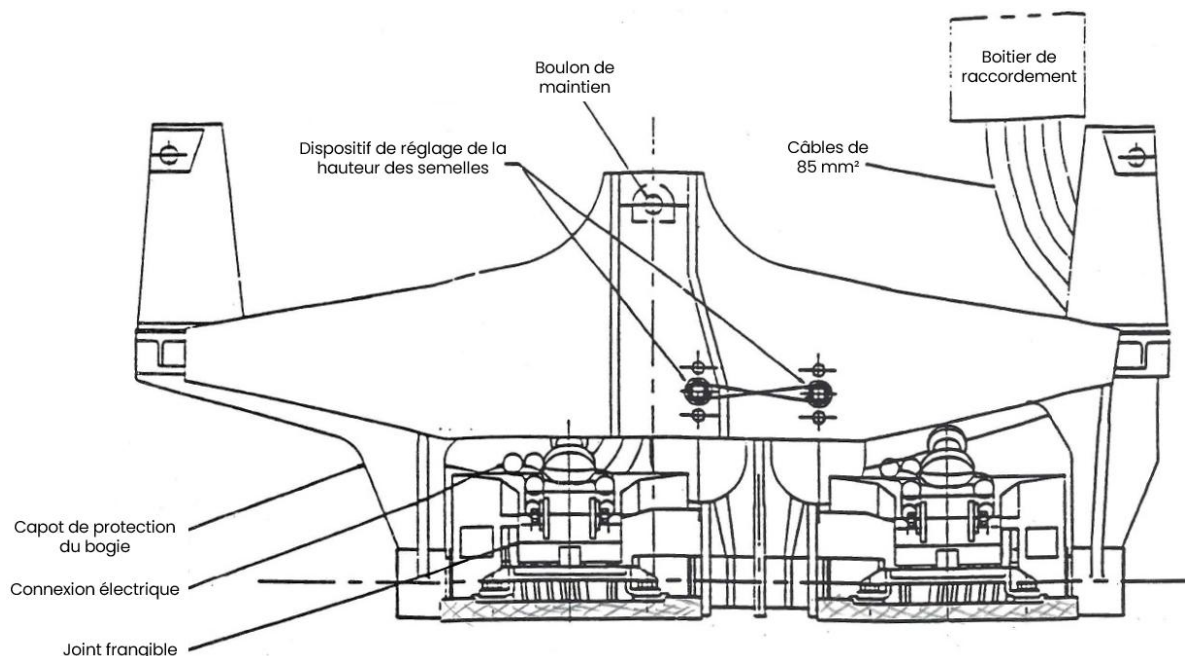


Figure 26 – Schéma du dispositif de captage monté sur bogie.

Document : document d'étude EPS.

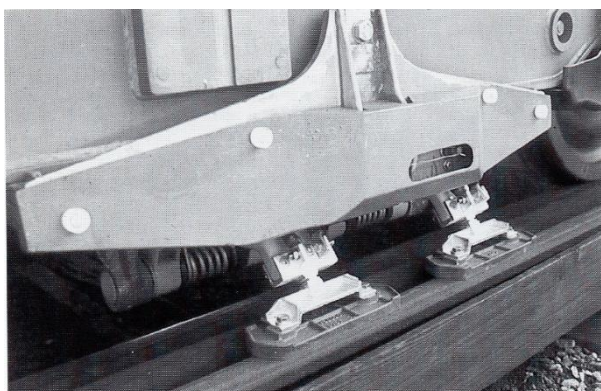


Figure 27 (à gauche) – Frotteurs en contact avec le 3^e rail.

Photographie : Revue Générale du Chemin de Fer.

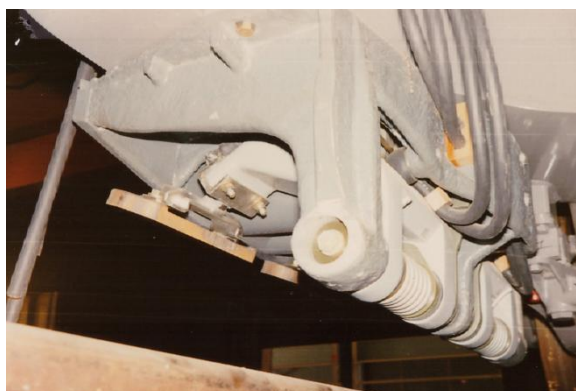


Figure 28 (à droite) – Frotteurs vus de derrière.

Photographie : collection Alain Ledoux / Olivier Flippe.

En outre, les ateliers du Landy disposaient de chariots permettant d'alimenter les rames par frotteurs. Ces chariots étaient équipés de deux supports sur lesquels les frotteurs venaient en contact afin de capter le 750 V.



Figure 30 (ci-dessus) – Supports situés à l'intérieur du chariot sur lesquels viennent en contact les frotteurs.

Photographie : collection Alain Ledoux / Olivier Flippe.

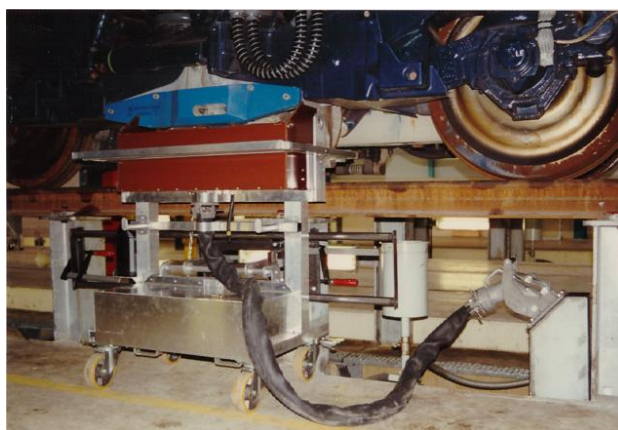


Figure 29 (ci-dessus) – Chariot permettant la mise sous tension de la rame par frotteurs lors de la maintenance.

Photographie : collection Alain Ledoux / Olivier Flippe.

3.3.4 – Sélection en cabine

Deux sélecteurs rotatifs en cabine permettent de sélectionner le pantographe en fonction du réseau parcouru (sélecteur tension KS-03) et de la configuration voulue (sélecteur de capteur KS-02).

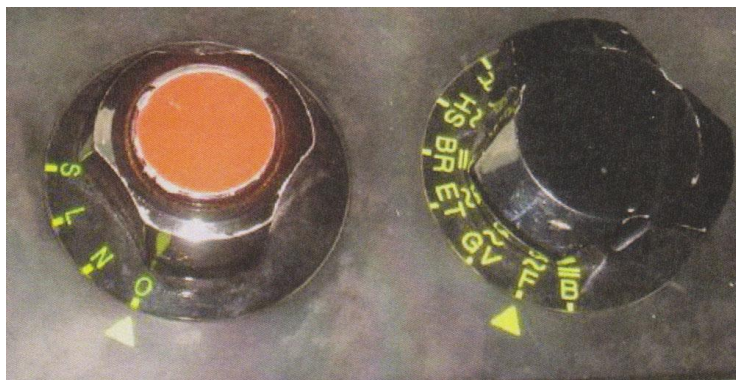


Figure 31 – Sélecteur de capteur (à gauche) et sélecteur de tension (à droite) d'origine. La position $\bar{F}$ sera ajoutée ultérieurement à droite du $\bar{B}$.

Photographie : Michel Durochat.

Le sélecteur de tension, dont la fonction première est de sélectionner le mode de captage du courant, permet aussi la sélection des particularités propres à chaque réseau parcouru. Chaque position permet le regroupement de toutes les caractéristiques de chaque zone qui sont traduites par l'informatique de bord.

Tableau 16 – Caractéristiques de chaque position du sélecteur de tension.

Position	Réseau	Puissance	Horloge	Unité vitesse	Emmarchement	Sablage automatique	Captage
$\bar{F}^1$	Réseau classique SNCF 1,5 kV.	4800 kW	Continentale	km/h	Gabarit continental (deux marches sorties)	Activé	Pantographes continus
$\bar{B}$	Réseau classique SNCB 3 kV.	5700 kW	Continentale	km/h	Gabarit continental	Désactivé (règlement SNCB)	Pantographes continus
$\bar{B}\bar{R}$	Réseau classique BR 750 V.	3400 kW	Méridien de Greenwich	mph	Gabarit britannique (une marche sortie)	Désactivé (règlement BR)	Frotteurs
$\bar{F}$	Réseau classique SNCF 25 kV.	7000 kW	Continentale	km/h	Gabarit continental	Activé	Pantographes monophasés
$\bar{B}\bar{R}$	Réseau classique BR 25 kV.	7000 kW	Méridien de Greenwich	mph	Gabarit britannique	Désactivé (règlement BR)	Pantographes monophasés
$\bar{G}\bar{V}$	Réseau LGV SNCF/SNCB 25 kV.	12 240 kW	Continentale	km/h	Gabarit continental	Activé	Pantographes monophasés, butée à 5,28 m.
$\bar{H}\bar{S}$	Réseau LGV CTRL 25 kV.	12 240 kW	Méridien de Greenwich	km/h	Gabarit continental	Activé	Pantographes monophasés, butée à 5,28 m.
$\bar{E}\bar{T}$	Réseau Eurotunnel 25 kV.	12 240 kW	Continentale	km/h	Gabarit continental	Désactivé (règlement Eurotunnel)	Pantographes monophasés, butée à 6,07 m.

¹ : Position issue du rétrofit pour les dessertes de Bourg-Saint-Maurice. Non présente d'origine.

En outre, certaines positions du sélecteur de tension permettent de réaliser des opérations spécifiques au réseau concerné. La position « $\overline{B}$ » permet l'armement automatique et le test du TBL 1+ et TBL 2¹ ainsi que le contrôle d'ouverture du disjoncteur en cas de détection 50 Hz. Les deux positions BR permettent l'initialisation, les tests et l'armement manuel de l'AWS¹. Enfin, la position « $\overline{ET}$ » permet la configuration des systèmes de sécurité propres au Tunnel sous la Manche (fermeture des portes coupe-feu d'intercirculation).

Le sélecteur de capteur quant à lui permet d'actionner le dispositif de captage (pantographes ou frotteurs) dans la configuration voulue :

- « 0 » : Capteurs hors service ;
- « N » (Normal) : Capteurs des deux motrices en service ;
- « L » (Local) : Capteur(s) de la motrice locale (poste de conduite en service) ;
- « S » (Secours) : Utilisation en 25 kV des pantographes 3 kV des deux motrices en service lorsque le sélecteur de tension est sur « $\overline{GV}$ », « $\overline{ET}$ » ou « $\overline{HS}$ ».

L'utilisation de la position « S » n'est possible que sur les lignes suivantes :

- Toutes les LGV SNCF, INFRABEL et CTRL ;
- Eurotunnel ;
- Paris-Nord – LGV Nord (section de séparation du PK 2,341) ;
- Traversée de Lille (LGV Nord) ;
- LGV Nord – Froyennes.

Sur les autres sections de lignes 25 kV – 50 Hz, compte tenu du gabarit du pantographe 3 kV, son utilisation est interdite.

Cette configuration permet de conserver les deux motrices en service et de délivrer le maximum de puissance pour la mise en vitesse, le franchissement des rampes et la traversée d'Eurotunnel. La vitesse limite dans cette configuration est de :

- 190 km/h sur la LGV Sud-Est. Les essais de 1999 portant sur l'archet Kasperowski ont permis de porter cette vitesse à 220 km/h ;
- 220 km/h sur les autres lignes autorisées.

À noter qu'une pression suffisante aux réservoirs principaux est requise pour assurer la montée des pantographes. Dans le cas contraire, le compresseur auxiliaire alimenté par les batteries se met en service automatiquement.

¹ : cf. § 3.II. À noter qu'avec HSI et l'équipement KVB à Ashford et Saint-Pancras, le TGV TMST n'a plus l'utilité de l'AWS. Il reste néanmoins une balise test à la sortie du « London Tunnel 1 » avant l'arrivée à Saint-Pancras.

3.4 – Technologie de puissance

Après le captage du courant, il est nécessaire de convertir le courant pour les moteurs de traction. C'est l'entreprise GEC qui a été chargée de concevoir les dispositifs de puissance des rames TMST. C'est ainsi que l'on voit l'avènement des thyristors GTO dans les onduleurs de traction. Cette technologie ne connaîtra en France qu'une courte durée de vie avec son application sur les BB 36000, les IGBT remplaçant progressivement les GTO sur les nouveaux matériels grâce à leur commande simplifiée, leur fréquence maximale de commutation sensiblement supérieure et leur capacité à supporter les courts-circuits pendant un bref instant.

3.4.1 – Dispositifs de protection en toiture

Avant d'arriver dans le « ventre » de la motrice, le courant capté à la caténaire va circuler à travers différents équipements de sécurité disposés en toiture.

La protection des équipements électriques vis-à-vis des surtensions d'origine atmosphérique (foudre) et des surtensions lentes, dites de manœuvre, est assurée de manière conjointe par un parafoudre (empilement de résistances non-linéaires en oxyde de zinc) situé à proximité du disjoncteur monophasé et un éclateur à pointes situé au niveau de la traversée de toiture. Ce dernier est réglé à 110 kV et met en court-circuit la caténaire (phase) et le rail (neutre) lorsqu'il est activé, permettant de déclencher les protections de la sous-station électrique. Quant au parafoudre, il agit comme écrêteur de surtension caténaire tant que celle-ci est supérieure à 120 kV. Son temps d'action n'est que de quelques nanosecondes et permet d'écouler plusieurs milliers d'ampères.

Un transformateur de palpage est ensuite utilisé pour contrôler la tension captée afin de refuser la fermeture du disjoncteur en cas de mauvaise sélection ou de tension ligne trop faible. En monophasé, le palpage est réglé à 14 kV, sauf sur les rames « NOL » en position « $\overline{BR}$ » ou celui-ci est réglé à 12,5 kV.

Un sectionneur (IS-06) permet de connecter les circuits appropriés en fonction de la tension captée. En effet, les deux pantographes étant électriquement connectés, un sectionneur est nécessaire afin d'alimenter tantôt les circuits monophasés, tantôt les circuits continus. Le TGV TMST introduit le principe du sectionneur de mise à la terre continu (H(O-C)) qui sera retrouvé notamment sur les TGV POS et générations futures. Ce dispositif permet de mettre à la terre la section entre le disjoncteur continu et le H(O-C).

Enfin, également situé en toiture, le disjoncteur monophasé (DJ-AC) permet la protection des équipements face aux surintensités. Celui-ci, de type disjoncteur à ampoule de vide (ou VCB pour Vacuum Circuit Breaker) 22CB, est un dispositif utilisé depuis 1980 par British Rail en 25 kV et testé sur une BB 15000 côté français pour son utilisation sur le TGV TMST. Ce type de disjoncteur restait toutefois moins connu en Europe continentale où la protection contre les surintensités est assurée, sur les engins à courant monophasé, par des disjoncteurs à air comprimé type DBTF (Disjoncteur Basse Tension Ferroviaire) dérivant des modèles mis au point en 1952 par Brown Boveri sous 15 et 25 kV.

Le disjoncteur à ampoule de vide exploite la rigidité diélectrique du vide, qui peut varier de 20 à 10^{12} kV/mm selon sa qualité, contre environ 3,6 kV/mm pour l'air. Cette propriété permet de réduire l'entrefer entre contacts tout en supportant des tensions élevées sans risque de claquage. Inversement, la séparation mécanique des contacts permet une coupure efficace de courants importants sans nécessité de dispositif d'extinction complexe.

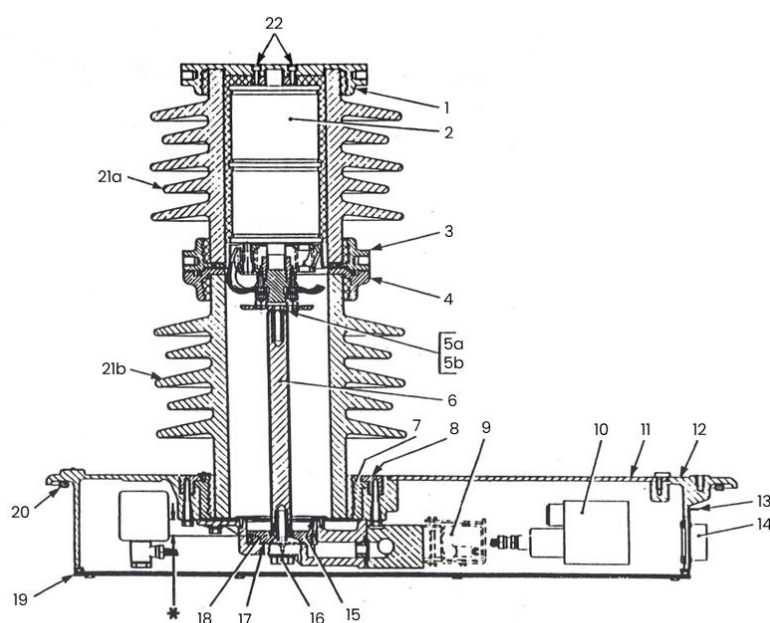
Lors de l'ouverture, un arc électrique se forme malgré l'absence d'air en raison de l'ionisation de la vapeur métallique émise par les surfaces des contacts. Ce plasma (composé d'électrons, d'ions métalliques et de vapeur de métal) est instable dans le vide car il n'y a pas de milieu pour le maintenir. Très rapidement, les particules ionisées et la vapeur métallique se refroidissent et repassent à l'état solide en se redéposant sur les surfaces proches. Cette condensation rapide fait disparaître le plasma, ce qui éteint l'arc très efficacement. La rigidité diélectrique du vide est ainsi restaurée presque instantanément.

Le maintien des contacts fermés est assuré par un actionneur électropneumatique, tandis que des ressorts antagonistes provoquent l'ouverture en cas de coupure d'alimentation électrique de l'électrovalve ou de décharge pneumatique du servomoteur. L'ouverture se fait alors rapidement, limitant la formation de points chauds lors de l'apparition de l'arc. Grâce au passage à zéro de la tension sinusoïdale, la coupure s'effectue avec un courant résiduel minimal, évitant ainsi les surtensions transitoires.

Grâce à l'action de ressorts à caractéristique effort-vitesse constante, l'ouverture du disjoncteur peut intervenir en moins de trois périodes, dans un silence relatif, ce qui constitue un avantage notable pour le tunnel, en termes de sécurité et de confort.

Tableau 17 – Caractéristiques techniques du disjoncteur monophasé.

Intitulé	Valeur
Tension maximale en service	27,5 kV – 50 Hz
Tension maximale exceptionnelle	38 kV – 50 Hz (20 ms)
Rigidité diélectrique	75 kV – 50 Hz RMS (1 min)
Intensité maximale	1000 A (25 °C)
Pouvoir de coupure	20 kA RMS sous 27,5 kV – 50 Hz
Temps de fermeture	< 115 ms
Temps d'ouverture	< 40 ms



Légende :

- 1 – Couvercle moulé
- 2 – Chambre sous vide
- 3 – Base moulée
- 4 – Bride supérieure
- 5a – Cale en acier
- 5b – Rondelle plate
- 6 – Tige d'ancrage
- 7 – Bride inférieure
- 8 – Bague de serrage
- 9 – Electrovanne
- 10 – Pressostat
- 11 – Couvercle d'accès
- 12 – Plaque support
- 13 – Support du connecteur
- 14 – Connecteur électrique
- 15 – Bague de sécurité
- 16 – Fiche
- 17 – Amortisseur
- 18 – Piston pneumatique
- 19, 20 – Interface d'étanchéité
- 21a, 21b – Isolateur supérieur, inférieur
- 22 – Maintien en position du couvercle
- * – Permet d'ajuster la longueur de la tige d'ancrage 6

Figure 32 – Schéma du disjoncteur monophasé.

Document : document d'étude EPS.

Lors des essais sur les BB 15000 à Strasbourg, des sauts à l'indicateur de vitesse étaient observés (15 km/h affichés à l'arrêt) au moment de la fermeture du disjoncteur. Il s'est avéré que la structure de caisse de la locomotive possède sa propre résonnance lorsqu'elle est soumise à un stress électromagnétique, comme lors d'une mise sous tension avec une variation rapide de tension, pouvant perturber les équipements électroniques sensibles. Il a donc été décidé, à la suite également de différents amorçages internes au bloc commun, d'installer en toiture une ferrite (inductance de quelques μH) afin de réduire les agressions parasites lors de la fermeture du disjoncteur à ampoule de vide.

3.4.2 – Transformateur principal (T-01)

Chaque motrice contient un ensemble regroupant le transformateur principal, un ensemble d'inductances de filtrage et un dispositif de refroidissement.

Tableau 18 – Caractéristiques techniques du transformateur principal.

Intitulé	Valeur
Puissance nominale	7500 kVA
Nombre d'enroulements secondaires	4
Tension à l'enroulement primaire	25 kV – 50 Hz
Intensité à l'enroulement primaire	300 A (nominale)
	343 A (pendant 15 min)
Tension aux enroulements secondaires	1157 V – 50 Hz
Intensité aux enroulements secondaires	1620 A (nominale)
	1870 A (pendant 15 min)
Constitution	Bobinages cylindriques, noyau de fer
Huile diélectrique	Huile silicone
Refroidissement	ODAF – Refroidissement à air forcé et circulation dirigée d'huile forcée
Masse totale	8800 kg

D'un encombrement sensiblement identique aux transformateurs des TGV Atlantique, il devait être 40% plus puissant. L'usage d'une huile silicone permet ce gain de puissance grâce à une tenue jusqu'à 120 °C et une protection accrue contre le feu par rapport aux huiles minérales classiques.

Tableau 19 – Caractéristiques des inductances situées dans le bloc transformateur.

Usage	Inductance	Quantité	Intensité
Amélioration du facteur de puissance	3,3 mH	4	265 A (nominale efficace)
			600 A (crête)
Filtre principal	7,4 mH	2	905 A (nominale efficace)
			1025 A (pendant 15 min)
	3,7 mH	1	1810 A (nominale efficace)
			2050 A (pendant 15 min)
Filtre intermédiaire	5,3 mH	2	1760 A (nominale efficace)
			2010 A (pendant 15 min)
Hacheur auxiliaire	2,6 mH	2	545 A (régime été)
			805 A (régime hiver)

Le transformateur est subdivisé en trois blocs fonctionnels :

- Une cuve inférieure contenant le primaire et les secondaires du transformateur ainsi qu'une cuve secondaire contenant les différentes bobines des dispositifs d'amélioration du facteur de puissance¹ et du filtre ;
- Au-dessus, une colonne aéroréfrigérante composée de deux radiateurs et de ventilateurs permettant le refroidissement par échange thermique de l'huile. Le radiateur supérieur assure le refroidissement du bloc commun et le radiateur inférieur celui du transformateur. L'air est aspiré par les persiennes latérales et soufflé en toiture par deux motoventilateurs. Ces derniers débouchant sur la toiture, un récupérateur d'eau permet de rediriger l'eau de pluie en dehors du bloc ;
- À côté, une colonne composée d'un réservoir d'huile et de quatre motopompes permettent la circulation de l'huile. Deux des quatre pompes assurent la circulation forcée d'huile dans le transformateur, les deux autres servent au refroidissement du bloc commun.



Figure 33 (à gauche) – Transformateur principal. On peut distinguer les deux radiateurs et le groupe motoventilateur sur le dessus.

Photographie : Olivier Flippe.

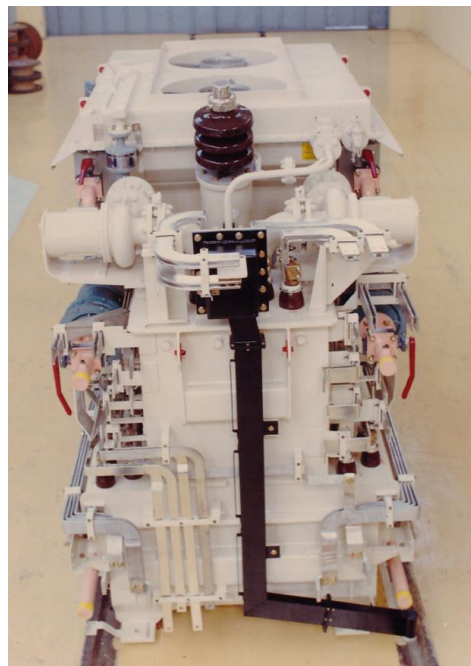


Figure 34 (à droite) – Interface arrière du transformateur principal. En haut, la colonne surmontée d'un isolateur marron et d'un embout argenté est l'arrivée (phase) du 25 kV.

Photographie : collection Alain Ledoux / Olivier Flippe.

¹ : cf. § 3.4.6

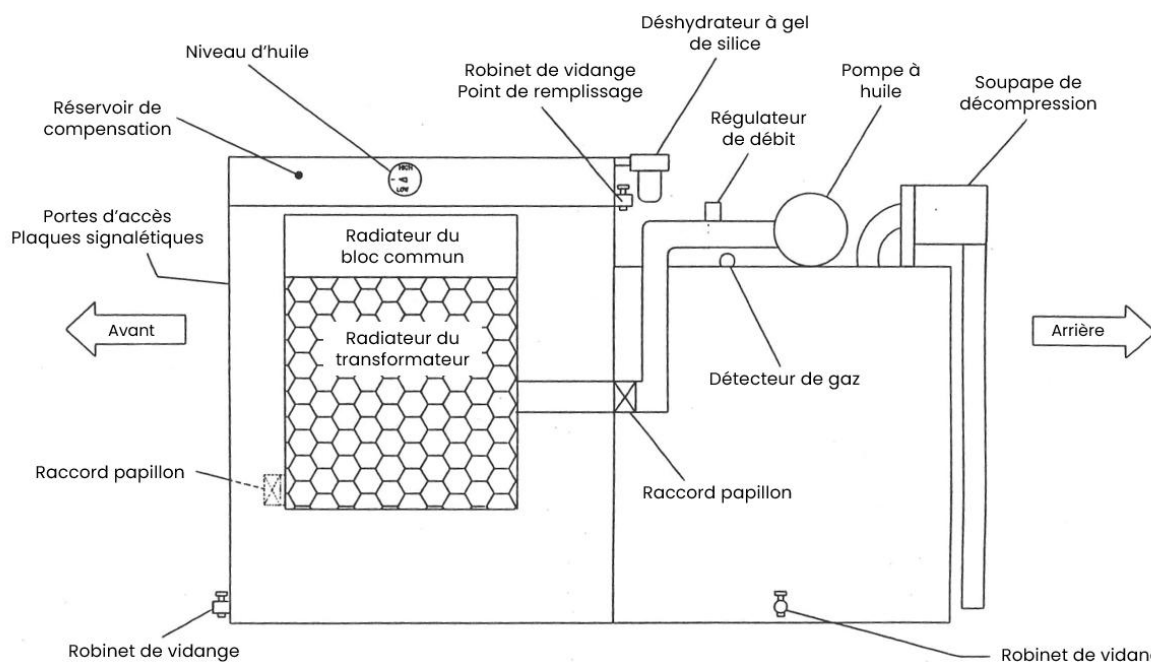


Figure 35 – Schéma de principe du système de refroidissement du transformateur principal.
Document : document d'étude EPS.

3.4.3 – Bloc Commun (BC)

Juxtaposé et raccordé électriquement au transformateur, le bloc commun est un ensemble mécanosoudé de 6450 kg contenant deux circuits de puissance et de commandes indépendants appelés « groupe 1 et 2 » dont les sorties alimentent une ligne commune appelée « bus de tension » ou « étage intermédiaire » sous une tension continue de 350 à 2200 V (1900 V nominalement).

Le bloc commun dispose des éléments principaux suivants :

- Deux disjoncteurs continus type HSCB (High Speed Circuit Breaker). Ces derniers sont similaires aux HRKS (Hyper Rapide Kerdoncuff Schneider Westinghouse) utilisés sur de nombreuses machines SNCF. Il s'agit d'un appareil à maintien électromagnétique et à commande pneumatique possédant une cheminée et des bobines de soufflage d'arc ainsi qu'un contact mobile. Associé à un contrôle d'intensité par sonde à effet Hall, son temps d'intervention est de l'ordre de 0,7 ms, pour une ouverture en 2,5 ms et une coupure en 10 ms avec une intensité maximale de 64 kA.
- Le disjoncteur continu n°1 (DJ-DC-01) est opérationnel sous 3000 V, 1500 V et 750 V, tandis que le disjoncteur n°2 (DJ-DC-02) n'est opérationnel que sous 750 V. Il s'agit d'un disjoncteur 1500 V ;

- Quatre ponts redresseurs. Chaque groupe comprend deux redresseurs, chacun monté en série puis connecté d'une part à un secondaire du transformateur et d'autre part à l'étage intermédiaire. Les rames « Trois Capitales » disposent d'un pont mixte et d'un pont de diodes, tandis que les rames « NOL » possèdent deux ponts mixtes (pour réduire la production de certaines harmoniques au nord de Londres) ;
- Quatre dispositifs d'amélioration du facteur de puissance (AFP) connectés aux bornes de chaque secondaire du transformateur ;
- Deux hacheurs permettant d'abaisser la tension de 3000 V à 1100 – 1900 V ;
- Deux hacheurs auxiliaires (« TAC – Train Auxiliary Chopper ») permettant d'alimenter en 530 V les auxiliaires tronçon à partir de l'étage intermédiaire ;
- Les condensateurs des différents filtres de l'étage intermédiaire et « 50 Hz » (les bobines étant disposées dans la cuve transformateur) et cinq écrêteurs de tension associés.

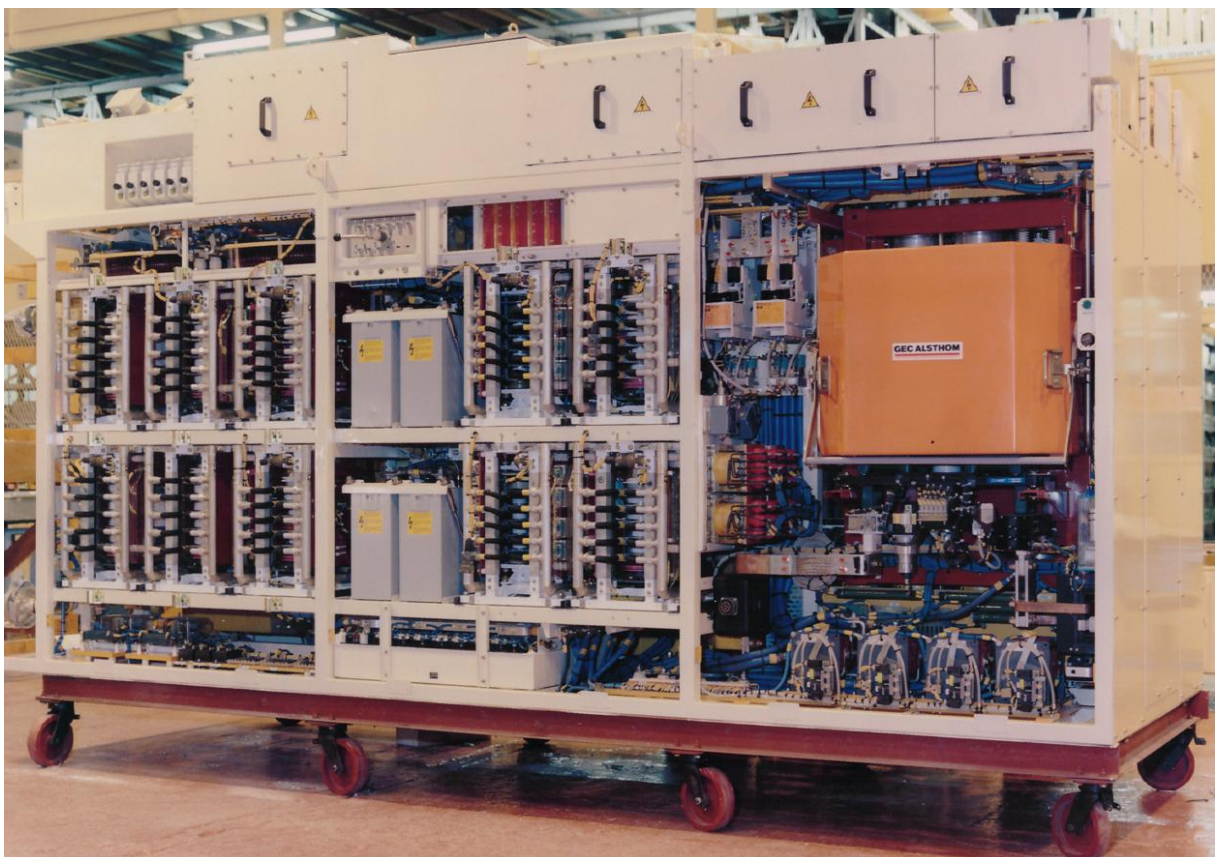


Figure 36 – Face avant du bloc commun. On distingue les dix modules de puissance et un des deux disjoncteurs (DJ-DC-02) caché derrière le capot orange. Celui-ci a été retiré en même temps que les équipements 750 V.

Photographie : collection Alain Ledoux / Olivier Flippe.

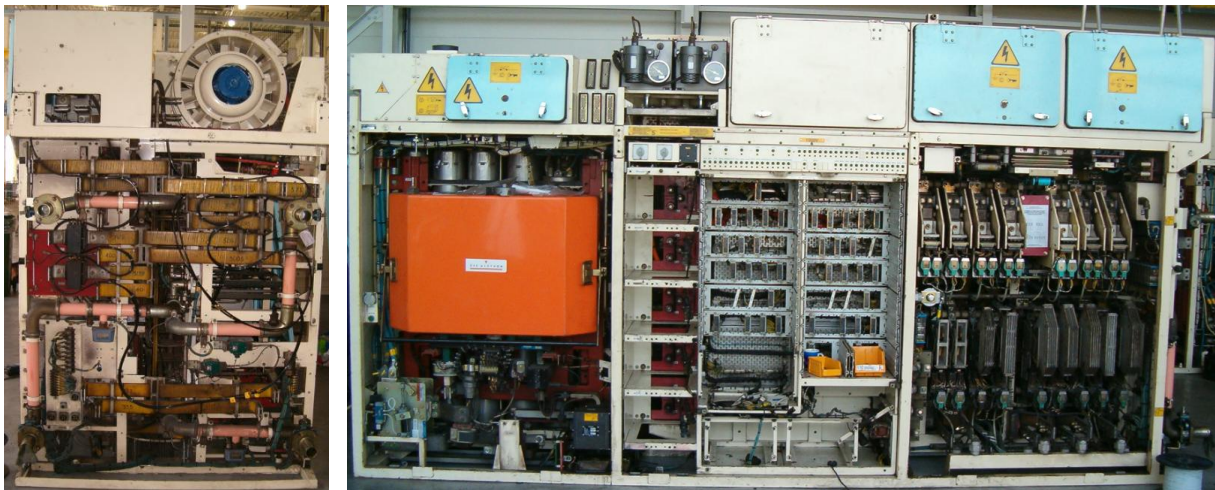


Figure 37 – À gauche, les connexions haute-tension du bloc commun. Ces dernières sont réalisées à partir de barres conductrices plates afin de réduire leurs inductances mutuelles. À droite, l'arrière du bloc commun. On distingue l'autre disjoncteur continu (DJ-DC-01), la baie électronique vidée au centre ainsi que les contacteurs et les sectionneurs à droite. Photographies : Olivier Flippe.

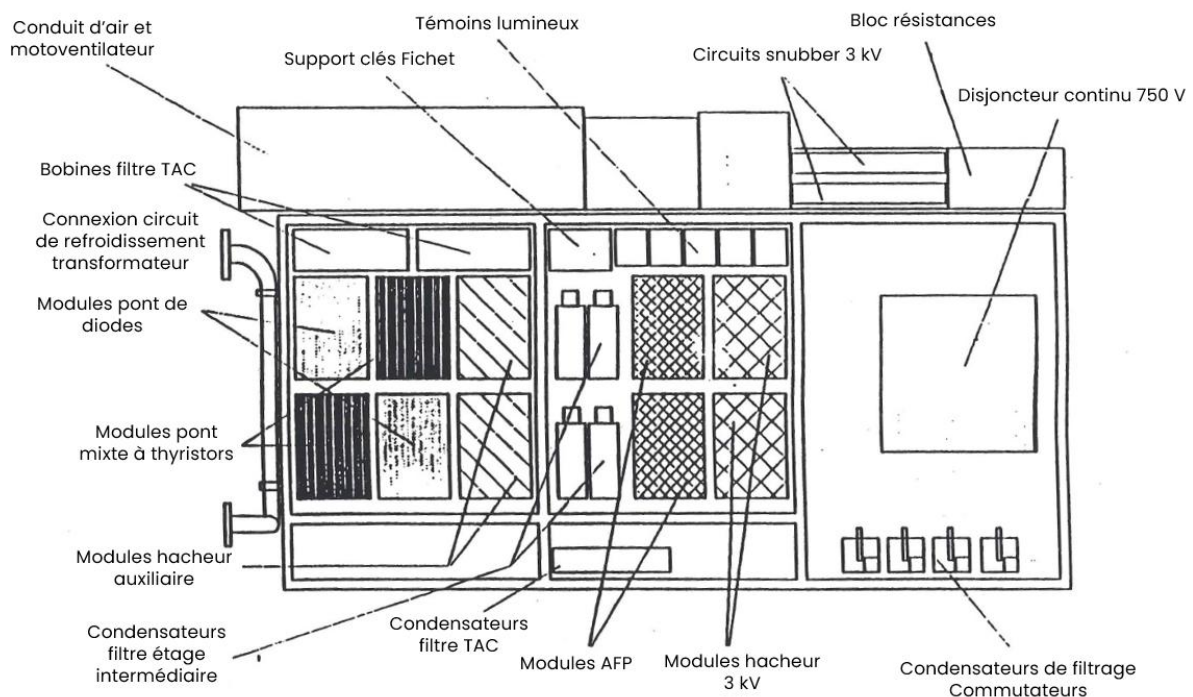


Figure 38 – Schéma de principe de la disposition des différents composants sur la face avant du bloc commun. Sur les rames « NOL », les quatre ponts redresseurs étant des ponts mixtes, les deux modules « pont de diodes » ont été remplacés en conséquence. Depuis le retrait des équipements 750 V, le disjoncteur continu 750 V DJ-DC-02 a été retiré. Document : document d'étude EPS.

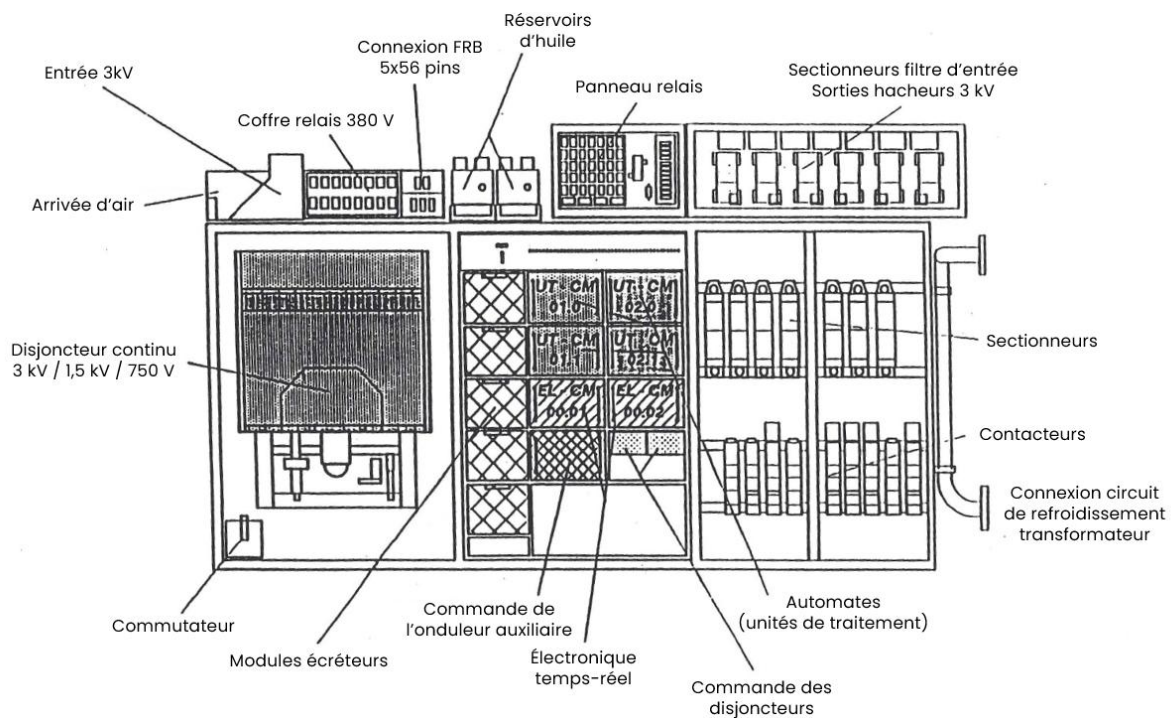


Figure 39 – Schéma de principe de la disposition des différents composants sur la face arrière du bloc commun.

Document : document d'étude EPS.

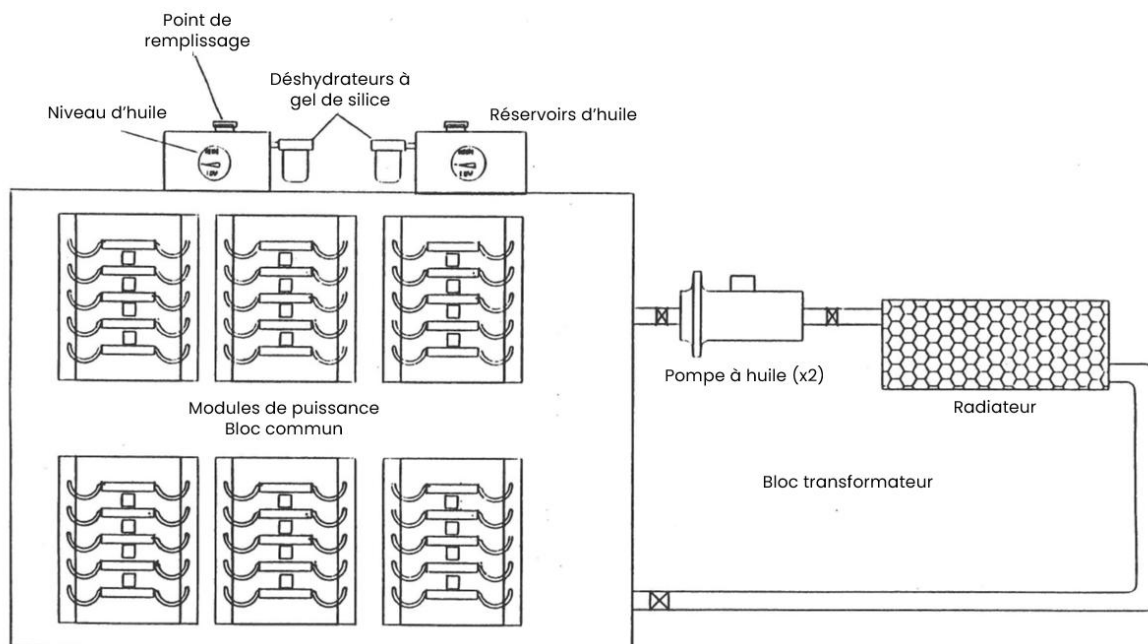


Figure 40 – Schéma de principe du système de refroidissement par circulation d'huile dans le bloc commun. Deux pompes à huile sont situées dans le bloc transformateur et assurent une circulation forcée d'huile dans les modules de puissance. L'huile est refroidie par échange thermique dans les radiateurs. Des valves papillons à obstruction automatique assurent le raccordement entre les deux blocs.

Document : document d'étude EPS.

Le bloc commun est piloté par une baie électronique (UT-BC) subdivisée en deux sous-parties, une par groupe. Chaque sous-partie est constituée de :

- Un automate AME15 divisé en deux tiroirs (UT-CM) piloté par un processeur type « 68000 » cadencé à 8 MHz et programmé en langage Élodie et Grafcet. Cet automate sert à toutes les fonctions dont le temps de traitement n'est pas critique, comme la configuration des circuits (filtre commutable, etc.) ou les différentes autorisations de commande ;
- Une électronique temps-réel sur un seul tiroir (EL-CM) pilotée par microcontrôleurs Intel 80C196 16 bits cadencés à 12 MHz. Elle assure les fonctions critiques, demandant un faible temps de réaction et une forte puissance de calcul comme la commande des ponts redresseurs ou des hacheurs 3 kV.

La baie dispose également d'une électronique temps-réel pour les auxiliaires (et une autre en remorque motorisée) et de deux électroniques temps-réel pour la commande des disjoncteurs continus.

Chaque tiroir contient différentes cartes servant à l'alimentation, la communication ou encore aux calculs. Les cartes communiquent entre elles via un réseau CAN ou un bus AME, tandis que l'UT-CM possède une liaison série (RS-232) avec l'EL-CM, mais aussi avec le second UT-CM. Une carte CRX2 permet de faire la liaison entre chaque UT-BC et le réseau TORNAD*.

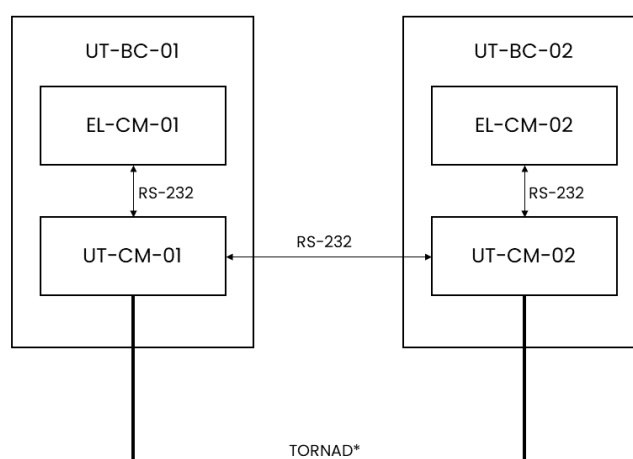


Figure 41 – Baie électronique d'un bloc commun et schéma de principe.

Photographie et document : Aurélien Desnues.

3.4.4 – Blocs Moteurs (BM-01 à 03)

Chaque demi-rame Eurostar est équipée de trois blocs moteurs : deux situés dans les motrices et un dans la voiture d'extrémité (alimenté grâce à des câblots arrachables reliant la motrice à la première voiture), chacun ayant une masse de 2750 kg. Fabriqués par GEC-Alsthom dans les usines de Preston et Villeurbanne, ils ont été conçus par GEC avec la participation active des ex-TCO.

Chaque bloc moteur contient, dans un bloc d'équipements unique, les dispositifs de puissance et de commande requis pour fournir la traction et le freinage électrique d'un bogie. Il contient les éléments suivants :

- Deux onduleurs de traction triphasés pilotables en tension et en fréquence d'une puissance unitaire d'environ 1 MW alimentant chacun un moteur de traction asynchrone ;
- Un hacheur de freinage rhéostatique d'environ 1,5 MW ;
- Un hacheur auxiliaire de 63 kW et deux onduleurs auxiliaires de 40 kVA ;
- Un chargeur pour la précharge des condensateurs des onduleurs.

En outre, chaque bloc moteur dispose d'une baie électronique de contrôle, des connexions haute tension, ainsi que d'un système de refroidissement. Une motopompe fait circuler de l'huile à travers les modules puis dans une colonne aéroréfrigérante pour extraire la chaleur vers l'extérieur.

De plus, une colonne destinée au freinage rhéostatique est installée à côté du bloc moteur. Cette colonne contient quatre caissons de résistances à bandes de métal, pour une valeur résistive de $2,2 \Omega$, ainsi que le système de refroidissement des résistances. Ce dispositif a également un usage d'écrêteur actif.

Un hacheur auxiliaire puis deux onduleurs auxiliaires permettent l'alimentation des différentes servitudes du bloc moteur. L'onduleur auxiliaire n°1 (IR-AUX-01) assure l'alimentation du ventilateur de rhéostat (VN-FN) tandis que l'onduleur auxiliaire n°2 (IR-AUX-02) assure l'alimentation simultanée du ventilateur de moteur de traction (VN-TT), de la pompe à huile (OP-BM), du ventilateur de la colonne aéroréfrigérante (VN-BM-01) et du ventilateur des onduleurs auxiliaires (VN-BM-02).

La nouveauté par rapport aux autres TGV réside dans l'utilisation d'onduleurs de tension à GTO. Les générations précédentes utilisaient pour la traction des commutateurs de courant à thyristors et l'utilisation des GTO était restreinte aux onduleurs auxiliaires et au hacheur principal sur les TGV Réseau tritension.

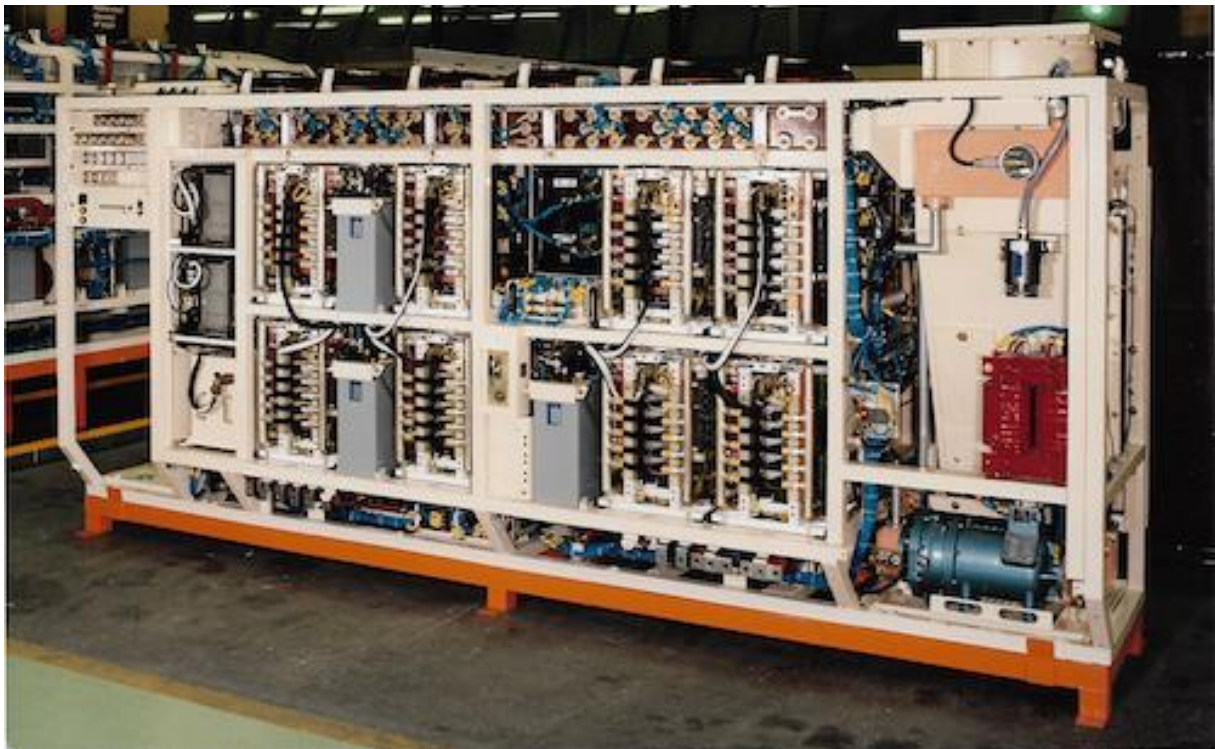


Figure 42 – Bloc moteur à l'usine de Preston. La baie électronique est ici vide.

Photographie : GEC-Alsthom, collection Alain Jeunesse.

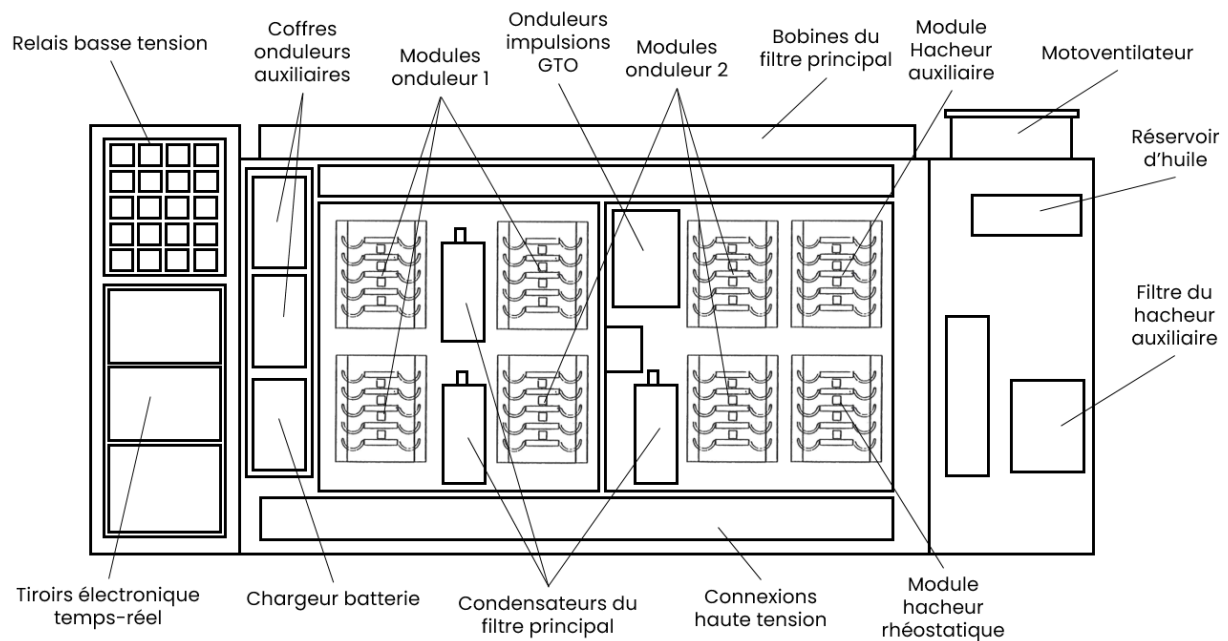


Figure 43 – Schéma de principe des éléments du bloc moteur. Le ventilateur des moteurs de traction (VN-TT) est à l'extérieur du bloc moteur, tandis que le ventilateur des onduleurs auxiliaires (VN-BM-02) est situé sous le chargeur batterie.

Document : Aurélien Desnues.

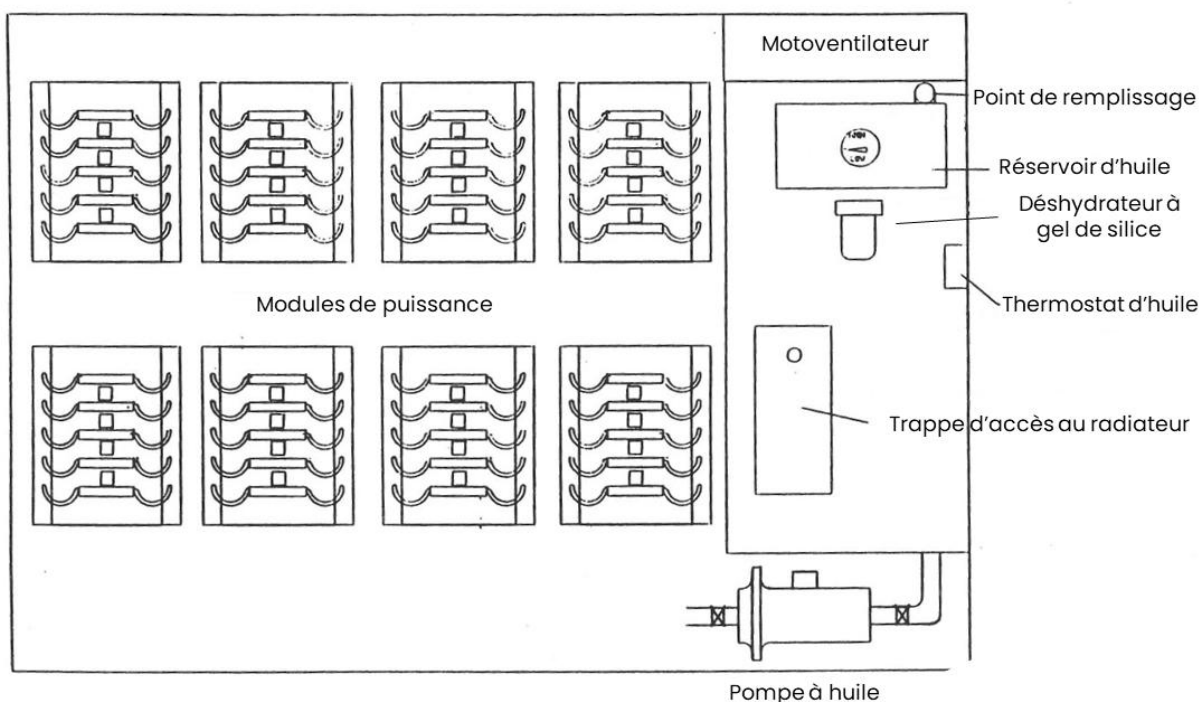


Figure 44 – Schéma de principe du système de refroidissement du bloc moteur. Les pertes par commutation s'élèvent à 11,7 kW par onduleur et les pertes totales en incluant les circuits de protection (snubbers) à 60 kW.

Document : document d'étude EPS.

À l'instar du bloc commun, le bloc moteur est piloté par une baie informatique. Cette dernière est composée d'une électronique temps-réel (EL-BM). En effet, le pilotage des moteurs asynchrones demande une puissance de calcul conséquente (pilotage vectoriel, calcul d'angles, etc.). On y retrouve donc une conception modulaire avec des cartes entrées/sorties, des cartes d'acquisition et des cartes calculateurs composées de neuf microcontrôleurs Intel 80C196 16 bits cadencés à 12 MHz. Par ailleurs, cette baie informatique communique avec les autres automates de l'engin via les cartes de traitement réseau et le réseau TORNAD*.

L'ensemble des éléments sous tension est protégé par des tôles verrouillées à l'aide de serrures à clés Fichet. Ces clés ne peuvent être obtenues qu'après mise à la terre de la motrice, mais aussi du bloc moteur lui-même (KS-TE-03). Cette procédure permet ainsi de s'assurer de la mise hors-tension des équipements, mais aussi de l'élimination des tensions induites résiduelles pouvant être présentes dans les circuits de puissance et pouvant parfois atteindre plusieurs milliers de volts.

3.4.5 – Modules de puissance (MO)

Les dispositifs de commutation (GTO, thyristors et diodes) sont regroupés sous forme de « sandwich » dans des blocs modulaires permettant leurs connexions électriques et l'évacuation de la chaleur produite par les pertes thermiques. Une circulation forcée d'huile entre chaque composant (solution déjà utilisée par GEC dans la Class 91) permet le refroidissement de ces derniers, tandis que les TGV Atlantique et Réseau utilisent des cuves remplies d'un fluide frigorigène (R113 puis FC-72, pour se conformer au Protocole de Montréal). Le calibre des thyristors GTO utilisés permet la commutation de 3 kA sous une tension de 4,5 kV. Ces modules contiennent également une « Gate Drive Card » assurant la génération des impulsions (allumeurs) pour la gâchette du GTO.

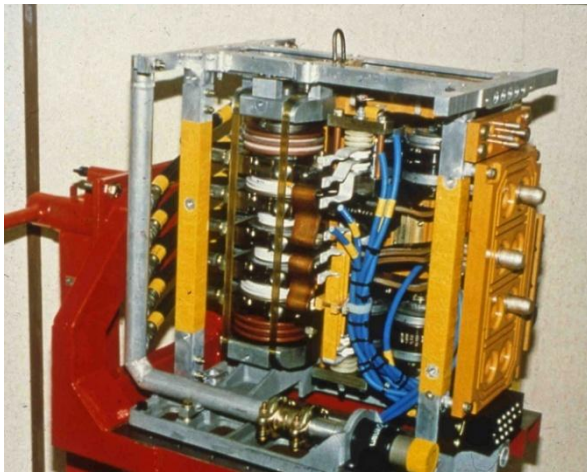


Figure 45 (à gauche) – Module de puissance prototype.

Photographie : Roger J. Kemp.

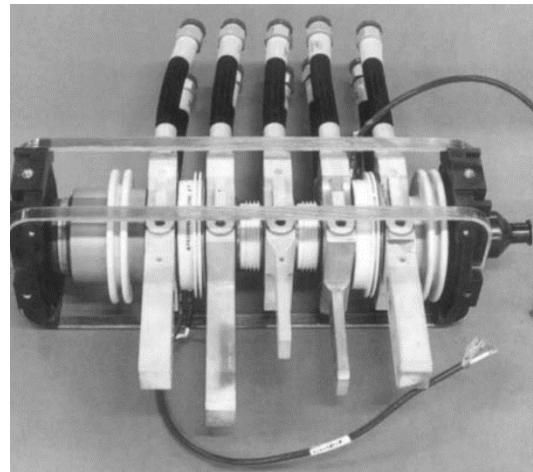


Figure 46 (à droite) – Empilement des semi-conducteurs.

Photographie : Revue 3E.I.

Ces modules de 68 kg ont été construits au sein de l'usine GEC-Alsthom de Manchester. On peut remarquer sur la figure 45 l'empilement composé de deux diodes et de deux thyristors GTO, le tout refroidi par huile « Midel 7131 » (aujourd'hui « Nycodiel 1244 ») au travers des deux raccords hydrauliques à obturation automatique, des flexibles et des cinq échangeurs thermiques enserrant les cellules de commutation. Sur la droite, on peut voir trois branches, deux connectées à l'étage intermédiaire pour l'alimentation de l'onduleur et la dernière branche connectée à une phase du moteur pour la sortie « alternative ». Sur la figure 46, on peut observer les câbles des gâchettes et les deux sangles isolantes en fibre de verre permettant de maintenir l'ensemble en compression.

Tableau 20 – Liste des modules de puissance.

Nom	Fonction	Position
MO-FP-01 MO-FP-02	Modules d'amélioration du facteur de puissance sur rame « Trois Capitales ». Contient huit thyristors.	Bloc commun
MO-K-01 MO-K-02	Modules d'amélioration du facteur de puissance sur rame « NOL ». Contient huit thyristors et deux contacteurs. Refroidissement passif.	
MO-RR-01.1 MO-RR-01.2	Modules redresseur à pont mixte. Contient deux diodes et deux thyristors.	
MO-RR-01.3 MO-RR-01.4	Modules redresseur à pont mixte sur rames « NOL ». Contient deux diodes et deux thyristors.	
MO-RR-02.1 MO-RR-02.2	Modules redresseur à pont de diodes sur rames « Trois Capitales ». Contient quatre diodes.	
MO-HR-01.1 MO-HR-01.2	Modules hacheurs 3 kV. Contient deux GTO en série et deux diodes roues libres.	
MO-HR-02.1 MO-HR-02.2	Modules hacheur auxiliaires du train. Contient un GTO, une diode de protection et une diode roue libre.	
MO-IR-01 à MO-IR-06	Modules bras des onduleurs de traction. Contient deux GTO et deux diodes roues libres à commutation rapide.	Bloc moteur
MO-HR-03	Modules hacheur de freinage rhéostatique. Contient un GTO, une diode de protection et deux diodes en parallèle empêchant le retour des courants de traction dans l'étage intermédiaire.	
MO-HR-04	Modules hacheur auxiliaires. Contient un GTO, une diode de protection et une diode roue libre.	

3.4.6 – Schéma de traction sous 25 kV – 50 Hz

Sous caténaire 25 kV – 50 Hz, la source de tension continue aux bornes des onduleurs triphasés s'obtient par deux groupes de ponts redresseurs monophasés associés en parallèle au moyen de filtres passifs commutables LC aux valeurs de capacitances et inductances appropriées. Chaque groupe comprend deux ponts redresseurs monophasés montés en série et assurant la charge du bus de tension continu à 1900 V.

Sur les rames « Trois Capitales », chaque groupe est composé d'un pont de diode sur le pont inférieur et d'un pont mixte asymétrique semi-commandé à thyristors sur le pont supérieur. Les ponts redresseurs fonctionnant en source de tension, un dispositif à deux ponts mixtes commandés en décalés comme sur les TGV à motorisation synchrone n'est pas nécessaire. Par conséquent, un des deux ponts mixtes peut être substitué par un pont de diode, permettant de maximiser son facteur de puissance.

Le pont mixte permet, quant à lui, le réglage continu de la tension. En effet, en ajustant l'angle d'amorçage des thyristors, on peut régler la valeur moyenne de la tension redressée. Néanmoins, le pont mixte n'est pas réversible, le freinage par récupération est donc impossible.

Tableau 21 – Intensité maximale en fonction du réseau 25 kV – 50 Hz.

Réseau	Intensité maximale	
	Par pont	Sur bus de tension
Lignes à grande vitesse	2250 A	4500 A
Lignes classiques	2250 A	1850 A

Sur les rames « NOL », chaque groupe est composé de deux ponts mixtes. Cette configuration permet, avec une séquence particulière d'amorçage des deux ponts, de minimiser les perturbations des circuits de voies « reed » au nord de Londres conformément à la spécification BR1914. En effet, la bande de fonctionnement des relais « reed » se situe entre 350 et 450 Hz, ce qui correspond respectivement au 7^e et au 9^e harmonique des ponts redresseurs. Toutefois, cette commande particulière n'est active qu'en position « $\widetilde{BR}$ » sur le sélecteur de tension et s'inhibe sur les autres réseaux équipés en 25 kV, puisque cette commande particulière des ponts redresseurs est incompatible avec les circuits de voie UM71¹.

¹ : Universel Modulé 1971. Il s'agit d'un circuit de voie à joint électrique fonctionnant avec les fréquences 1700, 2000, 2300 et 2600 Hz.

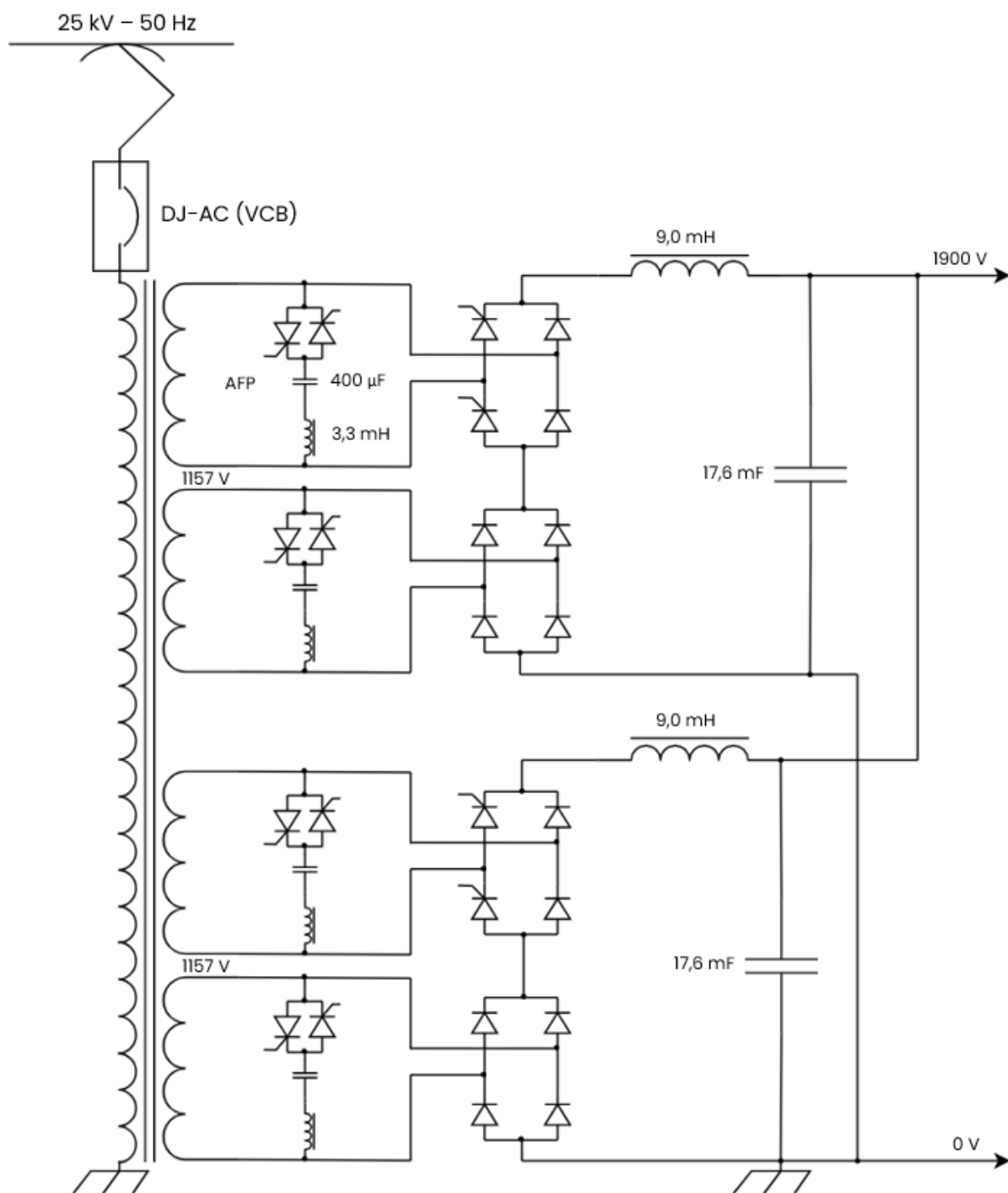


Figure 47 – Schéma de traction sous 25 kV – 50 Hz des rames « Trois Capitales ».
Document : Aurélien Desnues.

La tenue en tension des thyristors et diodes des ponts redresseurs des rames « Trois Capitales » et « NOL » est de 4400 V. La limite de 2250 A est définie en fonction de la température de jonction des semi-conducteurs.

Sur les lignes classiques française et sur les lignes à grande vitesse anglaise, belge et française, la tension du bus est définie en fonction de l'état de conduite (traction, marche sur l'erre ou freinage) et de la vitesse du train.

Tableau 22 – Résumé de la commande des ponts.

Mode de conduite	Vitesse	Tension à l'étage intermédiaire
Marche sur l'erre ou freinage	/	1200 V
Traction	< 40 km/h en accélération ou > 35 km/h en décélération	1200 V
Traction	≥ 40 km/h en accélération ou ≥ 35 km/h en décélération	1900 V

Lors des phases de transition de tension, le pont supérieur des deux groupes modifie progressivement son angle d'amorçage afin d'atteindre la tension cible, à raison de 300 V/s pour une augmentation et de 900 V/s pour une réduction.

Dans le cas des rames « NOL » sur le réseau au nord de Londres, afin de réduire les composantes susceptibles de perturber les relais « reed », les ponts redresseurs fonctionnent à angle d'amorçage calculé. Les deux ponts n'étant jamais complètement débloqués, la tension de l'étage intermédiaire peut être inférieure à la tension cible en cas d'une tension ligne faible. En dehors des lignes au nord de Londres, les deux ponts reprennent un fonctionnement conforme au tableau 22, le pont inférieur fonctionnant alors comme un pont de diodes.

Tableau 23 – Résumé de la commande des ponts au nord de Londres.

Mode de conduite	Puissance à l'étage intermédiaire	Vitesse	Angle d'amorçage		Tension cible de l'étage intermédiaire
			Pont inférieur	Pont supérieur	
Marche sur l'erre ou freinage	/	/	37°	Pont bloqué	1000 V
Traction	> 500 kW (décroissant) ou > 600 kW (croissant)	≥ 40 km/h en accélération ou ≥ 35 km/h en décélération	37°	44° minimum	1900 V

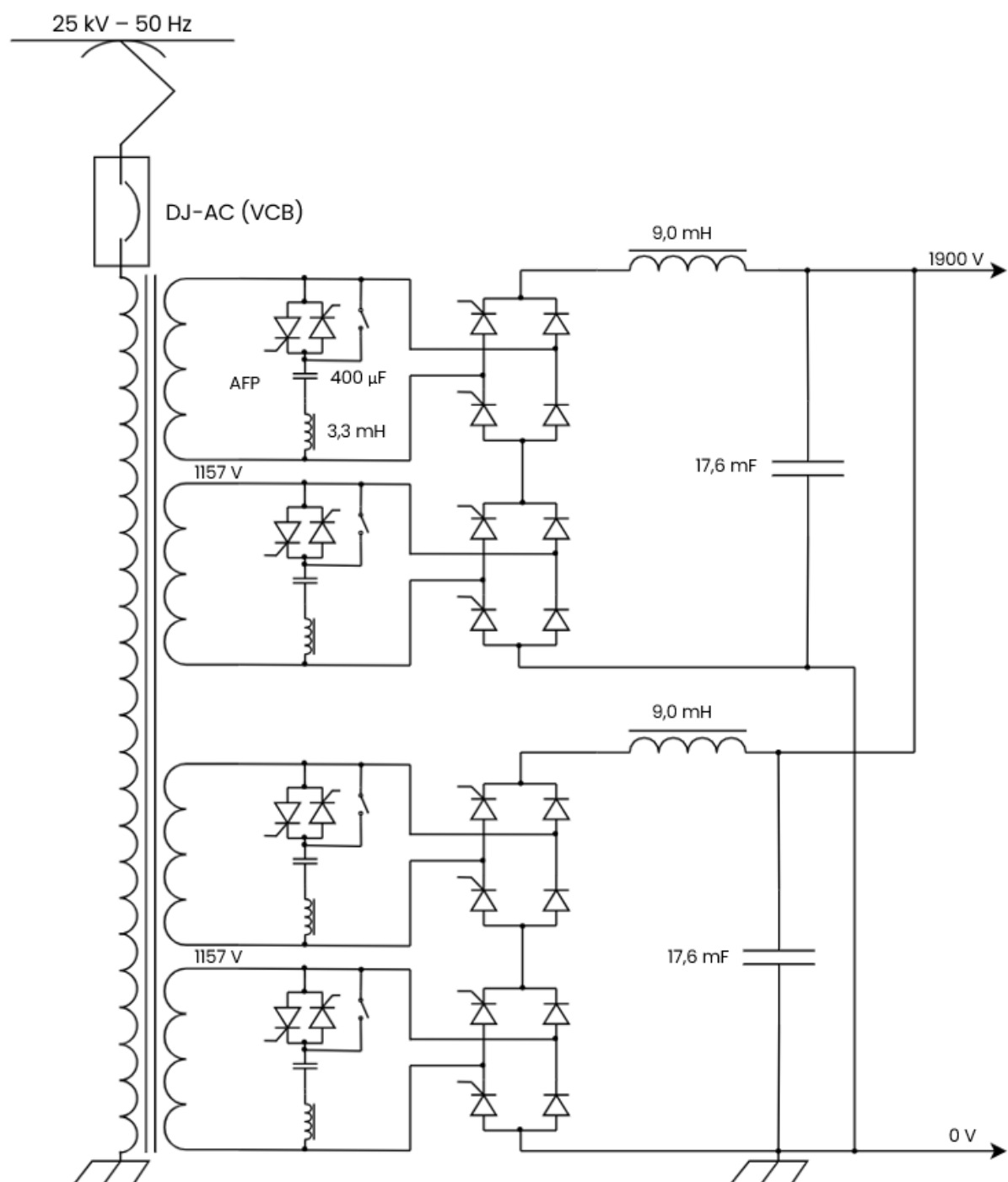


Figure 48 – Schéma de traction sous 25 kV – 50 Hz des rames « NOL ».
Document : Aurélien Desnues.

Au nord de Londres, en cas d'isolation d'une des deux motrices, la limite d'intensité sur l'étage intermédiaire passe de 1850 A à 3000 A, permettant de rehausser la puissance à la jante de 3500 à 5000 kW sur la seule motrice restante.

3.4.7 – Facteur de puissance et courant psophométrique

L'augmentation de la puissance des matériels roulants électriques a été rendue possible par l'utilisation de convertisseurs statiques de puissance au sein de leur chaîne de traction. Du fait de leur fonctionnement non linéaire, ces convertisseurs déforment l'onde de courant absorbée par l'engin et l'enrichissent en harmoniques multiples de la fréquence fondamentale égale à 50 Hz.

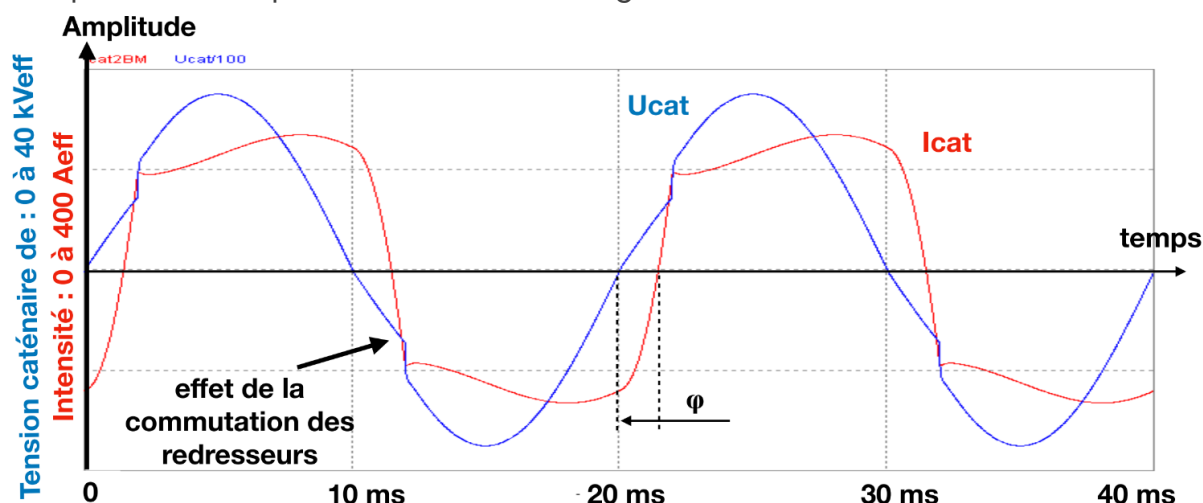


Figure 49 – Allure temporelle de la tension caténaire et du courant absorbé par un engin de traction équipé d'un pont mixte.

Document : Alain Jeunesse.

Du point de vue du train, la caténaire, les sous-stations de traction et le raccordement au réseau national se comportent comme une source imparfaite de tension, dont l'impédance interne est à la fois résistive, inductive et capacitive. Cette impédance dépend de la fréquence à laquelle on la considère, mais aussi de la position du train concerné et de celle des autres trains présents sur le réseau au même instant. La circulation d'un harmonique de courant I_h de fréquence donnée, généré par les convertisseurs statiques du matériel à travers l'impédance Z_h caractéristique du circuit de traction crée un harmonique de tension à la même fréquence selon la loi d'Ohm $\underline{U}_h = \underline{Z}_h \times \underline{I}_h$.

Les harmoniques de tension, sommés vectoriellement, engendrent une déformation de la tension caténaire. Cette déformation est d'autant plus importante que les impédances de ligne vues par l'engin moteur sont élevées et que les courants de traction sont intenses et riches en composantes harmoniques. Des phénomènes de résonance sont souvent à l'origine de surtensions répétitives qui peuvent endommager aussi bien le matériel roulant que les installations fixes.

Pour rendre compte de la « qualité » du courant tiré à la caténaire, l'indicateur utilisé est le facteur de puissance F_p . Ce dernier correspond au rapport entre la puissance active et la puissance apparente absorbées à la caténaire. En régime sinusoïdal, celui-ci est égal au déphasage entre l'onde de tension et l'onde de courant (aussi appelé facteur de déplacement F_d ou $\cos \varphi$). Cependant, en présence de convertisseurs de puissance non-linéaires (ponts redresseurs), il faut prendre en compte la puissance déformante, c'est-à-dire inclure au calcul le facteur de forme du courant F_i et de la tension F_u . Le facteur de forme du courant (resp. tension) correspond au rapport entre la valeur efficace de l'onde fondamentale du courant (resp. tension) au pantographe et sa valeur efficace. On obtient donc finalement $F_p = F_d F_i F_u$, variant de 0 à 1.

Ainsi, plus cette valeur est proche de l'unité, plus la part de puissance active est importante dans le total de puissance apparente absorbée. À noter que la puissance de court-circuit des sous-stations de traction du réseau monophasé SNCF est généralement grande par rapport à la puissance apparente absorbée par les trains, la tension caténaire peut donc être considérée comme parfaitement sinusoïdale, ce qui implique $F_u = 1$.

Le fonctionnement en source de tension des ponts redresseurs sur les TGV TMST permet d'obtenir, sans compensation active, un facteur de puissance proche de 0,8. En effet, dans le cas d'un pont mixte, plus son angle d'amorçage est faible, meilleur est son facteur de puissance. En source de tension, les ponts redresseurs chargent le bus de tension à une tension fixe, ce qui implique une conduction importante des ponts dès le départ.

Les harmoniques de courant générés à la caténaire sont de rangs impairs et décroissent en $\frac{1}{n}$ pour les premiers rangs. Le facteur de puissance ainsi obtenu peut sensiblement être amélioré en utilisant aux bornes de chaque secondaire du transformateur principal un filtre passif d'amélioration du facteur de puissance (AFP ou PFC – Power Factor Correction en anglais). Il est composé de deux paires de thyristors montées en antiparallèle fonctionnant en synchronisme avec l'alternance 50 Hz et d'un filtre passif accordé au voisinage du troisième harmonique de la tension d'alimentation. Sur le TGV TMST, chaque AFP est équipé d'une paire de thyristors anti-parallèle en série, d'un condensateur de 400 μF et d'une bobine de 3,3 mF (voir figure 47). Ce filtre est donc accordé à 138,5 Hz, c'est-à-dire à une fréquence proche du minimum du troisième harmonique (145,5 Hz) de l'alimentation afin d'augmenter son efficacité.

Ce filtre passif permet :

- La dérivation du premier harmonique de courant permettant d'améliorer le facteur de forme du courant côté transformateur ;
- La compensation de la puissance réactive absorbée par le redresseur et l'inductance de fuite du transformateur, ce qui améliore le facteur de puissance côté caténaire ;
- La réduction de l'inductance équivalente de commutation, ce qui augmente la tension moyenne maximale redressée. En effet, lors d'un passage d'une branche à l'autre du pont redresseur, la commutation du courant n'est pas instantanée, compte tenu de l'inductance de fuite du transformateur. Le secondaire se retrouve donc en court-circuit pendant un bref instant, ce qui implique une chute de la tension moyenne redressée, c'est le phénomène « d'empiètement ». L'AFP permet de compenser une partie de cette inductance de fuite ainsi que l'inductance de ligne, permettant de réduire ce phénomène.

La commande des AFP ne dépend que de la puissance absorbée par l'étage intermédiaire sur chaque groupe et de la vitesse du train.

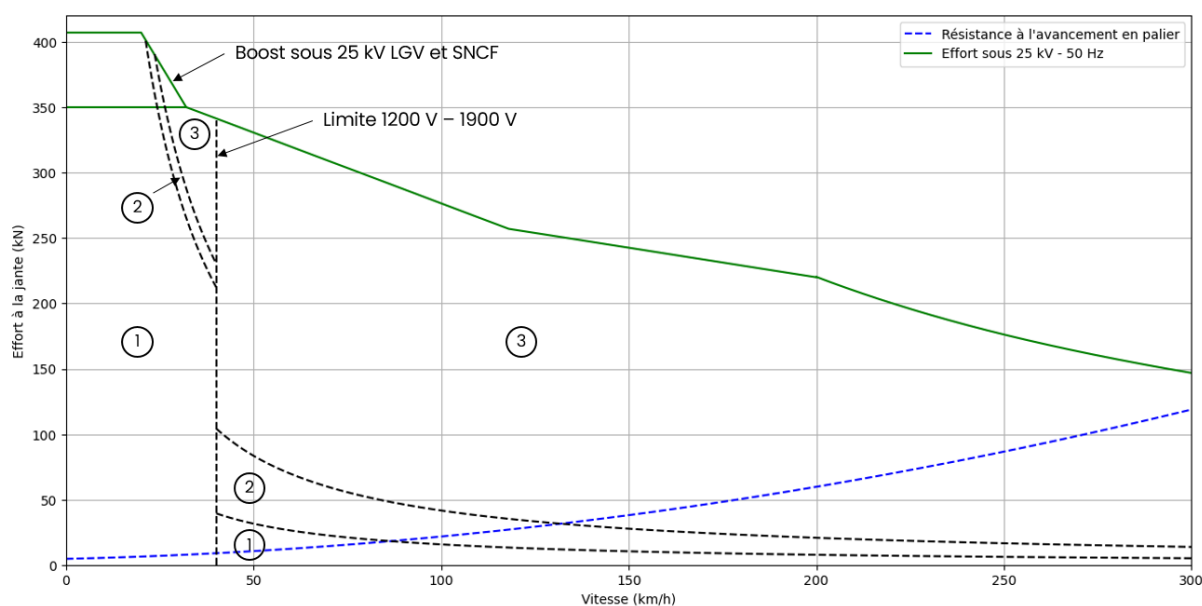


Figure 50 – Zones d'activation des AFP en fonction de la vitesse et de l'effort à la jante. Dans la zone 1, aucun AFP n'est activé, dans la zone 2, seuls les AFP des ponts inférieurs sont en service, puis dans la zone 3, tous les AFP sont en service, à condition que les ponts mixtes aient un angle d'amorçage inférieur à 70°. À noter qu'une hystérésis de 50 kW par groupe est permise pour l'arrêt des AFP.

Document : Aurélien Desnues.

Sur les rames « NOL » (voir figure 48), les AFP sont équipés d'un contacteur supplémentaire et de thyristors refroidis à air. En effet, afin de réduire les perturbations engendrées par les thyristors du circuit AFP sur les lignes au nord de Londres, 10 ms après le passage du courant, l'électronique de commande EL-CM ferme le contacteur permettant de court-circuiter les thyristors et 100 ms plus tard, l'amorçage des gâchettes est inhibé, forçant l'intégralité du courant traversant l'AFP à circuler par le contacteur. La durée de 110 ms pour la conduction des thyristors rend suffisant le refroidissement à air. Les conditions d'allumage des AFP restent néanmoins identiques aux rames « Trois Capitales », exception faite des lignes au nord de Londres où la puissance seuil au bus de tension est sensiblement supérieure aux autres lignes.

Ce dispositif permet ainsi de maintenir un facteur de puissance supérieur à 0,9 pour un effort de traction supérieur à 20% et une vitesse supérieure à 50 km/h. Plus généralement, sur toute la plage de traction, le facteur de puissance est compris entre 0,8 et 0,95. Quant au facteur de déplacement, celui-ci est compris entre 0,85 et 1.

De plus, les exigences d'accès aux réseaux ferrés imposent également aux engins moteurs de limiter le niveau des composantes harmoniques du courant de traction susceptibles de parasiter les liaisons téléphoniques entre les centraux et les abonnés. Cette exigence est caractérisée par le niveau du courant psophométrique que l'on désigne par « I_{pso} ». Cette grandeur est définie par l'UIT (Union Internationale de Télécommunications) comme une somme quadratique des composantes harmoniques du courant appelé à la caténaire, affectées de coefficients pondérateurs traduisant leur influence sur l'oreille humaine.

Elle se définit comme suit :

$$I_{pso} = \sqrt{\sum (P_f I_h)^2}$$

Avec :

- I_h : valeur efficace de l'harmonique du courant à la fréquence f ($f < 5 \text{ kHz}$) ;
- P_f : poids attribué à la fréquence f ; la valeur de P_f est maximale et légèrement supérieure à 1 entre 800 et 1200 Hz.

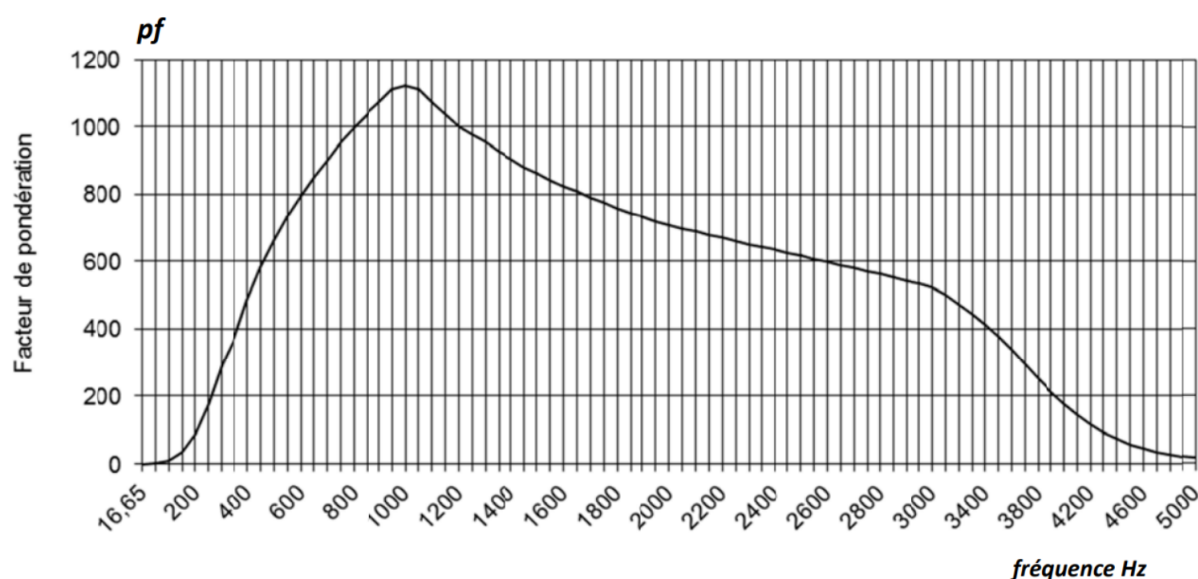


Figure 51 – Courbe de pondération en fonction de la fréquence.
Document : EPSF – Compatibilité électromagnétique (SAM S 006).

L'Ipso est en fait une valeur efficace pondérée. Cette grandeur est communément appelée injustement « Intensité Perturbatrice Equivalente » (IPE). En fait, l'IPE est l'intensité estimée sur les câbles de téléphonie soumis à l'influence des courants circulant à la caténaire, dans les liaisons de retour, en fonction de la proximité des installations ferroviaires par rapport aux lignes téléphoniques, de la topologie du terrain, de la nature des sols plus ou moins conducteurs et de la qualité des câbles téléphoniques. Plus cette valeur est grande, plus la gêne des liaisons téléphoniques filaires des riverains peut être importante.

En raison de la déformation de l'onde de courant par les ponts redresseurs lors de la commutation, le spectre du courant alternatif s'enrichi de nombreux harmoniques, ce qui implique un courant psophométrique assez important, de 6 à 28 A à pleine puissance. Pour comparaison, un TGV Atlantique peut atteindre 15 A et un TGV PSE, sur la prise 500 V du transformateur, peut atteindre 35 A.

Plus généralement, il faudra attendre les ponts redresseurs à absorption sinusoïdale (Ponts Monophasés à Commutation Forcée chez Alstom) pour réduire le courant psophométrique et augmenter le facteur de puissance. En effet, la commande MLI et l'entrelacement des ponts redresseurs permettent d'annuler le déphasage entre l'onde de tension et de courant, mais aussi d'obtenir un facteur de forme du courant proche de l'unité. Ainsi, les TGV POS ont un facteur de puissance égal à 1 sur toute la plage de puissance, tout en ayant un courant psophométrique d'environ 1 A.

Selon la configuration du bloc commun, les deux hacheurs peuvent fonctionner de manière différente. En effet, en cas d'isolation d'un des deux groupes, le fonctionnement est dit « simple » et dans le cas où les deux groupes sont en service, le fonctionnement est dit « dual ». Dans ce mode « dual », les deux étages intermédiaires peuvent prendre deux configurations, à savoir l'état « réunis » où les deux bus de tensions sont connectés entre eux via les contacteurs de puissance et l'état « découplé » où les deux bus sont indépendants.

Tableau 24 – Résumé de la commande des hacheurs.

Mode	État	Mode de conduite	Nombre de blocs moteurs sur l'étage intermédiaire	Consigne de tension	
				Groupe n°1	Groupe n°2
Dual	Réunis	Traction	Sans importance	1900 V	1900 V
		Freinage		1300 V	1300 V
		Marche sur l'erre		1300 V	1300 V
	Découplé	Traction	Aucun	800 V	1300 V
		Traction	Supérieur à zéro	1900 V	1900 V
		Freinage	Sans importance	800 V	1300 V
		Marche sur l'erre		800 V	1300 V
		Simple		Traction	Aucun
Traction	Supérieur à zéro		1900 V	1900 V	
Freinage	Sans importance		800 V	1300 V	
Marche sur l'erre			800 V	1300 V	

La variation de tension entre 0 et 1300 V est de 900 V/s, puis de 300 V/s jusqu'à 1900 V. Elle revanche, elle est de 900 V/s lors d'une diminution, quelle que soit la tension. En mode « dual », la tension de l'étage intermédiaire est commandée par le hacheur du groupe n°1, puis lorsque la puissance au bus de tension dépasse 180 kW, le hacheur n°2 se met à son tour en route. De même, ce dernier s'arrête lorsque la puissance au bus de tension passe sous les 60 kW.

Enfin, une tension caténaire comprise entre 1100 et 3600 V est nécessaire pour autoriser les deux hacheurs à démarrer. De même, une tension inférieure à 650 V ou supérieure à 4000 V provoque l'arrêt des deux hacheurs. Le courant maximal de sortie par hacheur est de 1000 A, soit une puissance maximale de 1900 kW. Le courant caténaire reste néanmoins limité à 1200 A par motrice.

3.4.9 – Schéma de traction sous 1,5 kV continu

Sous caténaire 1500 V, l'alimentation des onduleurs triphasés s'obtient directement par l'intermédiaire d'un filtre passif LC. De plus, un filtre « 50 Hz » est connecté aux bornes du condensateur du filtre d'entrée. Dans cette configuration, seul le groupe n°1 est utilisé. Cette disposition est donc moins redondante qu'avec les autres tensions d'alimentation.

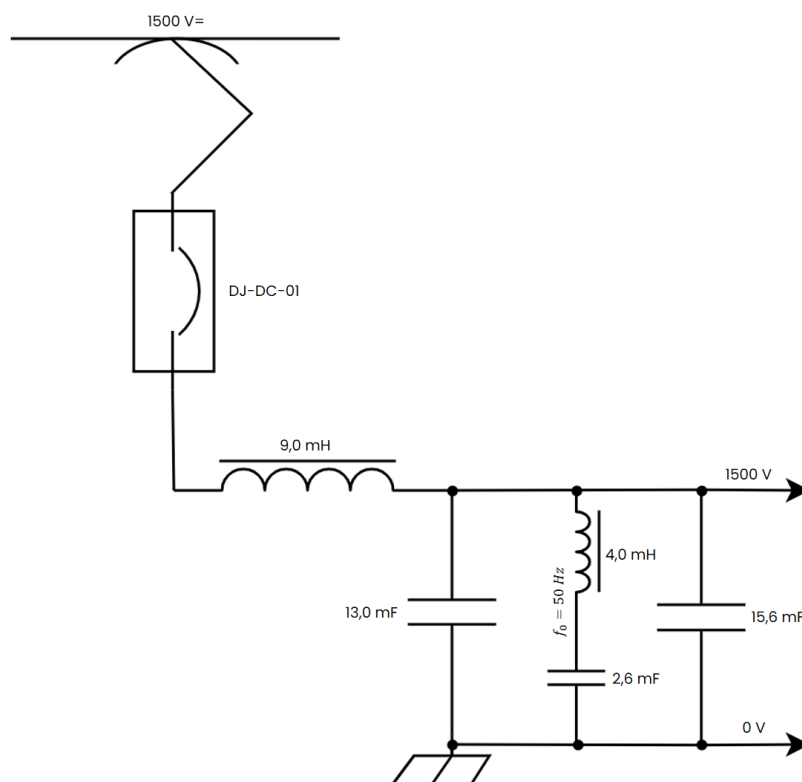


Figure 53 – Schéma de traction sous 1,5kV continu.

Document : Aurélien Desnues.

Cette aptitude est issue d'un rétrofit à partir de 1996 de douze rames pour la desserte de Bourg-Saint-Maurice puis Avignon pour Eurostar et Nice pour la SNCF :

- 1996 : 3203/3204 (essais) ;
- Début 1997 : 3225/3226, 3227/3228 ;
- 1998 : 3201/3202, 3207/3208, 3215/3216, 3221/3222, 3223/3224, 3229/3230 ;
- 2001 : 3209/3210 ;
- 2006 : 3213/3214, 3217/3218.

Aujourd'hui, toutes les rames encore en circulation peuvent circuler sous cette tension, le Technicentre Industriel d'Hellemmes ayant, lors de l'OPMV, équipé les rames inaptées en conséquence.

3.4.10 – Schéma de traction sous 750 V continu

Sous 3^e rail 750 V continu, l'alimentation des onduleurs triphasés s'obtient également par l'intermédiaire de filtres passifs LC. Comme précédemment, un filtre « 50 Hz » est connecté aux bornes de chacun des deux condensateurs du filtre d'entrée. En outre, le schéma de traction est découpé en deux groupes traction, chacun alimentant un ou deux blocs moteurs. Jusqu'à 6800 A pouvaient être consommés au 3^e rail. Néanmoins, une restriction à 4500 A a été imposée pour préserver les installations fixes. Chaque groupe était équipé d'un capteur différentiel (CA-SG-01 et 02) contrôlant le courant circulant dans chaque frotteur. En cas de défaut, ces capteurs pouvaient provoquer l'isolement du groupe concerné.

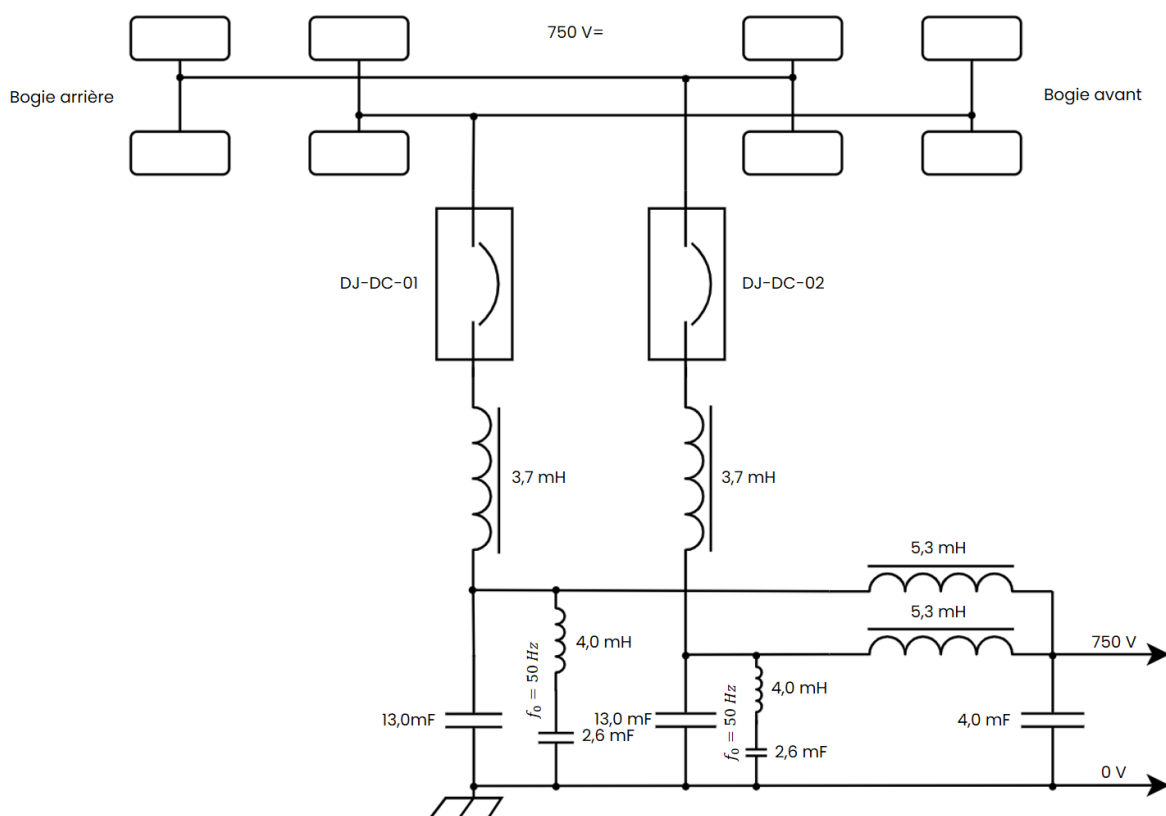


Figure 54 – Schéma de traction sous 750 V continu.

Document : Aurélien Desnues.

Les frotteurs avant et arrière de chaque bogie sont reliés électriquement et distants de 14 m. Les lacunes ne mesurant en moyenne que 12 m, cette configuration permet d'éviter les coupures d'alimentation des motrices et de réduire l'intensité des arcs électriques formés lors de leur franchissement.

3.4.11 – Schéma de puissance d'un bloc moteur

Les blocs moteurs disposent des circuits pour assurer l'alimentation triphasée des moteurs, mais également l'alimentation des auxiliaires et du freinage rhéostatique. Les onduleurs de tension sont composés de six thyristors GTO asymétriques et six diodes roues-libres à commutation rapide. Un hacheur de freinage rhéostatique assure la régulation du courant dans le rhéostat et un hacheur des auxiliaires abaisse la tension à 530 V pour l'alimentation des différents ventilateurs.

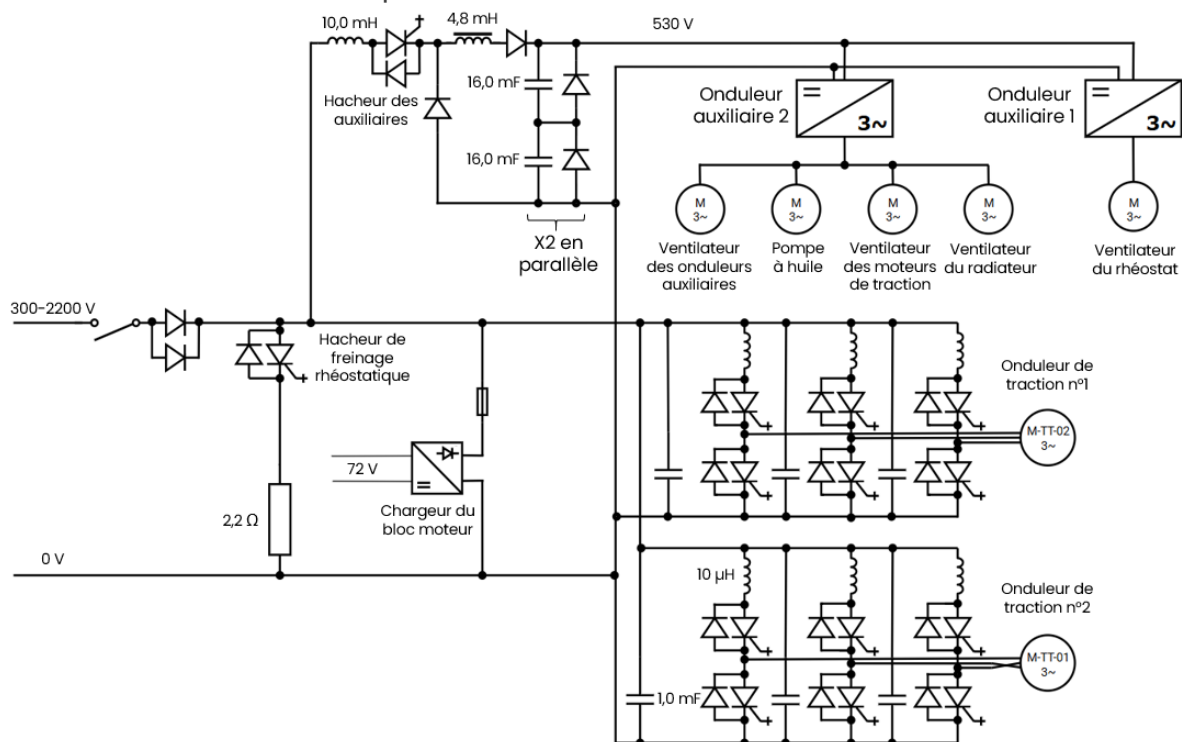


Figure 55 – Schéma de puissance d'un bloc moteur.

Document : Aurélien Desnues.

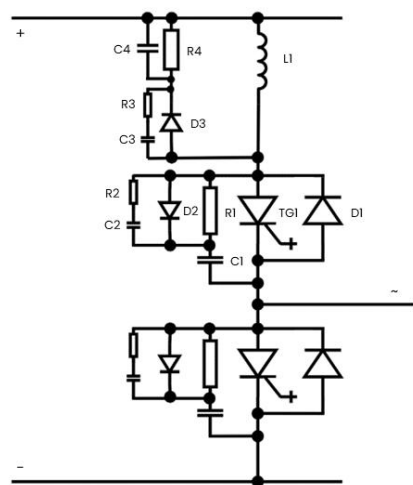


Figure 56 – Phase de l'onduleur.

Document : Aurélien Desnues.

Légende :

TG1 – Thyristor GTO.

D1 – Diode roue libre à commutation rapide pour le fonctionnement de l'onduleur. Protège également le GTO des tensions inverses.

C1 – Condensateur limitant la variation de tension aux bornes du GTO lors de sa commutation (snubber capacitif).

C1, D1 et R1 – Circuit de protection du thyristor GTO.

D2 – Diode servant à la charge directe de C1.

R2 et C2 – Circuit de protection de D2.

L1 – Bobine servant à limiter la variation courant lors de l'amorçage du thyristor GTO (snubber inductif).

D3, R4 et C4 – Empêche l'apparition d'un circuit oscillant L1-C1.

R3 et C3 – Circuit de protection de D3.

3.4.12 – Schéma d'ensemble de la chaîne de traction

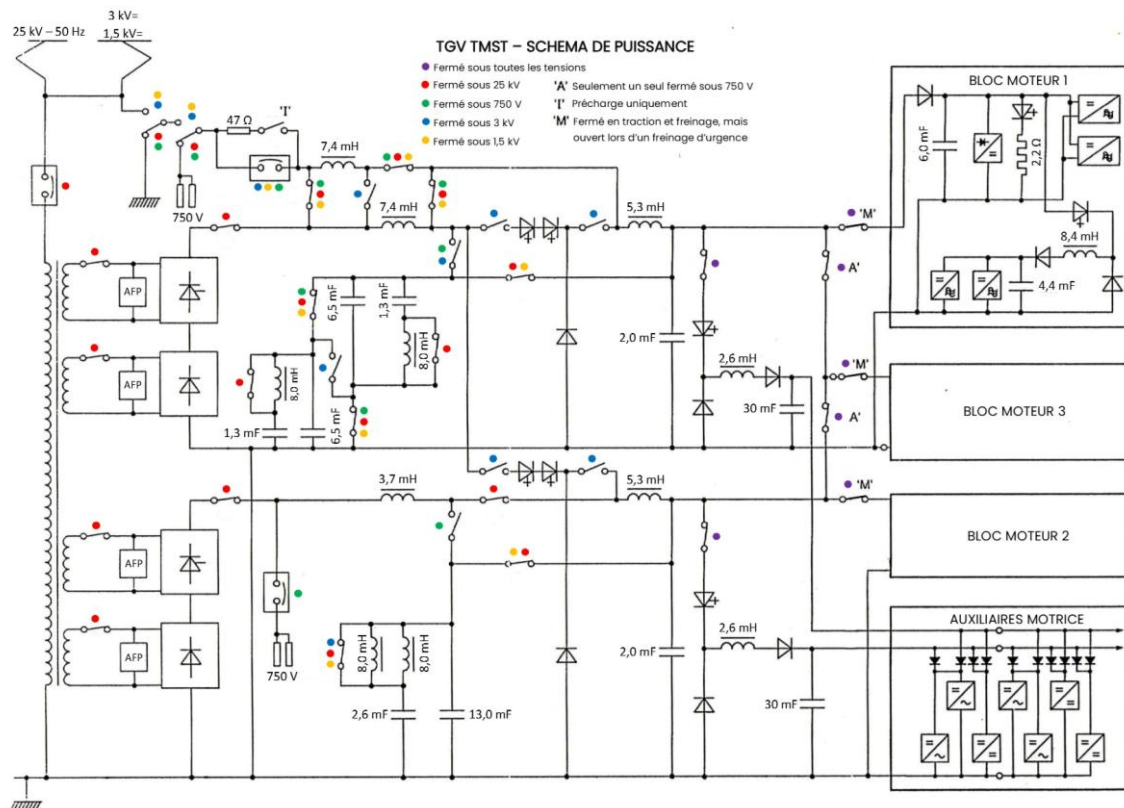


Figure 57 – Schéma de principe de la chaîne de traction d'une motrice Eurostar. Il était décrit de manière évocatrice « C'est une usine à gaz ».

Document : Roger J. Kemp, *modifié*.

3.4.13 – Freinage rhéostatique

Le TGV TMST est équipé d'un frein électrique de type rhéostatique. Ce système repose sur l'utilisation des moteurs de traction en mode générateur, le courant ainsi produit étant dissipé dans des résistances de forte puissance, créant une force de freinage par couple résistant sur l'arbre moteur.

Plusieurs convertisseurs auxiliaires interviennent pour assurer le bon fonctionnement du frein rhéostatique, notamment un dispositif de précharge des condensateurs du filtre, alimenté par batterie. Ce système est essentiel pour amorcer le freinage en cas de disparition ou d'insuffisance de la tension de l'étage intermédiaire. En effet, pour satisfaire aux exigences du freinage « de sécurité » en traction asynchrone, une tension suffisante doit être maintenue en permanence à l'entrée de l'onduleur afin de permettre le « fluxage » du moteur, utilisé alors comme génératrice hypersynchrone. Les deux onduleurs alimentent en parallèle, via un hacheur, les résistances de freinage.

3.5 – Motorisation (M-TT-01 à 06)

La motorisation du TGV TMST est obtenue au moyen de douze moteurs Brush Traction TRIM 2151B réalisés à la demande de GEC. Il s'agit d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, asservi en fréquence et en tension par onduleur. Ce moteur présente l'avantage par rapport aux moteurs synchrones à rotor bobiné de n'avoir aucun contact électrique entre le rotor et le stator. À noter que ce moteur a été testé sur banc à Preston, associé à l'un des anciens moteurs de la rame prototype TGV PSE 88 (STS 43-40-6) assurant un couple résistant pendant les essais.

Tableau 25 – Caractéristiques techniques du moteur TRIM 2151B.

Intitulé	Valeur
Couple maximal au démarrage	7030 Nm
Couple à vitesse maximale	2470 Nm
Vitesse de rotation maximale	3940 tr/min
Fréquence maximale	200 Hz
Tension nominale	1450 V entre phase
Intensité efficace au démarrage	850 A (~ 1400 A en crête)
Intensité efficace nominale	510 A
Puissance continue	1020 kW
Facteur de puissance	0,85 (à 300 km/h)
Rendement	96%
Isolation	Classe 200 (élévation de 200 K en service)
Refroidissement	Ventilation forcée, axiale, 1,25 m ³ /s
Masse totale	1300 kg ± 5%
Paires de pôles	3
Glissement à vitesse maximale	~ 1,5%
Couplage	Étoile

Tableau 26 – Caractéristiques techniques en fonction de la tension.

Tension d'alimentation	25 kV – 50 Hz		3000 V=	1500 V=	750 V=
	LGV	Classique			
Vitesse commerciale (km/h)	300	220	220	220	160
Puissance par moteur (kW)	1020	580	475	400	285
Puissance totale (kW)	12 240 ¹	7000	5700	4800	3400
Effort total au démarrage (kN)	407 ²		350		
Effort maximal de freinage rhéostatique (kN)	217,8				

1 : Puissance également disponible dans le Tunnel sous la Manche.

2 : 350 kN sur les lignes classiques BR.



Figure 58 – Moteur complet, stator bobiné et rotor à cage d'écureuil. Ces moteurs sont réhabilités aux ateliers SNCB de Salzinnes.

Photographies : © Geert Maes¹ (avec son aimable autorisation).

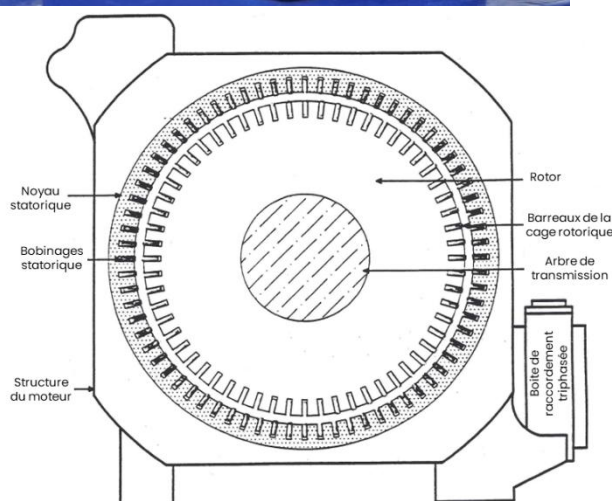


Figure 60 – Schéma du moteur de traction. Le rotor est guidé en rotation par des roulements à aiguilles. Un capteur angulaire permet de connaître la position du rotor pour le pilotage vectoriel. Enfin, une ouverture sur la partie supérieure permet la ventilation forcée de l'intérieur du moteur.

Document : document d'étude EPS.

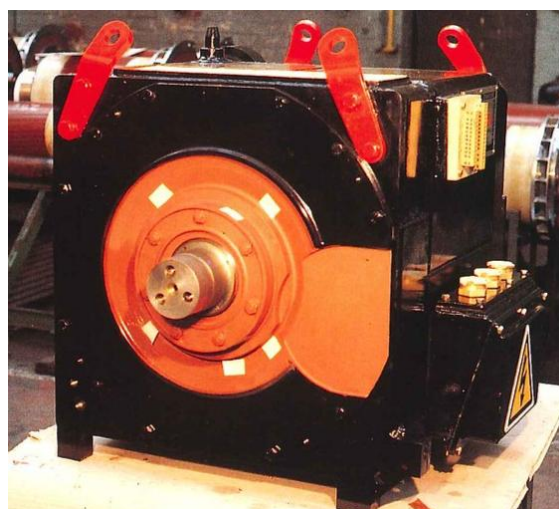


Figure 59 – Moteur prototype.

Photographie : brochure Brush Traction.

¹ : Collection « Portes ouvertes Salzinnes » - <https://www.treinfo2000.be/stelplaatsen/ACSalzinnes23102011/bobinage.htm>

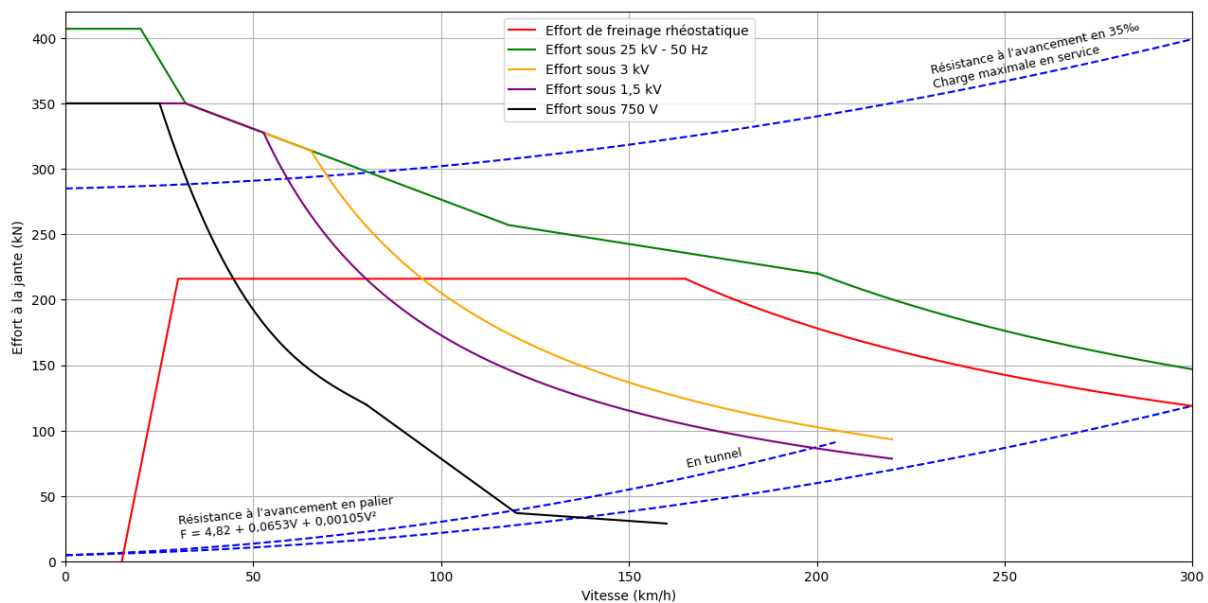


Figure 61 – Courbes d'effort à la jante en traction et freinage rhéostatique d'un TGV TMST comparées aux courbes de résistance à l'avancement.

Document : Aurélien Desnues.

L'effort total à la jante d'un matériel ferroviaire est défini par la formule suivante :

$$F(kN) = R + Mgi' + kM\gamma$$

Avec :

- $R = A + BV + CV^2$ la résistance à l'avancement avec V la vitesse en km/h, A représentant la résistance massique, C la résistance aérodynamique et B tout le reste. La résistance à l'avancement seule exprime l'effort que doit développer le train afin de conserver la vitesse V en palier et avec une accélération nulle ;
- Mgi' la composante de gravité avec M la masse du train, g la constante de gravitation et $i' = i + \frac{800}{\rho}$ le profil corrigé. Ce dernier prend en compte le profil de la ligne i et la résistance spécifique générée par les frottements lors d'une courbe de rayon de courbure ρ .
- $kM\gamma$ l'inertie des masses tournantes avec k le coefficient d'inertie (de l'ordre de 1,04 pour le TGV TMST) et γ l'accélération résiduelle en m/s².

Ainsi, pour rouler en charge maximale de service, à une vitesse V (km/h), en rampe de i (‰), dans une courbe de rayon ρ (m) et avec une accélération γ (m/s²), le TGV TMST doit être en mesure de développer un effort à la jante égal à :

$$F(kN) = 4,82 + 0,0653V + 0,00105V^2 + 8\left(i + \frac{800}{\rho}\right) + 848,64\gamma$$

3.6 – Stratégie de commande des moteurs

Le développement de la traction équipée de moteurs asynchrones, en particulier lorsqu'ils sont alimentés par une tension imposée, connaît un essor significatif dans les années 80-90. Cela est rendu possible grâce aux avancées technologiques dans le domaine des semi-conducteurs de puissance d'une part et de l'augmentation de la puissance de calcul permettant de mettre en œuvre des lois de commande complexes d'autre part.

3.6.1 – Généralités sur le moteur asynchrone

Inventé par Nikola Tesla en 1887 puis industrialisé à partir de 1897, le moteur asynchrone à cage d'écureuil n'est alimenté que par une seule source d'alimentation triphasée qui fournit :

- La puissance active convertie en puissance mécanique envoyée à l'essieu ;
- La puissance réactive magnétisante nécessaire à la production du flux d'entrefer.

Trois bobines placées à 120° et alimentées par un réseau triphasé créent un champ magnétique $\vec{B}$ tournant à la vitesse $n_s = \frac{f}{p}$ où f représente la fréquence du réseau triphasé et p le nombre de paires de pôles de chaque bobine.

Un rotor formé d'une cage en aluminium est placé à l'intérieur du champ $\vec{B}$ défini précédemment. Cette cage est constituée de barres fixées en cylindre par l'intermédiaire de disques évidés.

Le champ $\vec{B}$ étant tournant, chaque barre de la cage voit un champ variable qui la traverse. Chaque barre est donc soumise à un flux magnétique variable $d\Phi = \vec{B} \cdot \vec{dS}$ avec Φ en weber, B en tesla et S la section d'une barre en m^2 .

D'après la loi de Lenz, cette variation de flux magnétique génère une force électromotrice (f.é.m.) $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ entre les barreaux courts-circuités du rotor et un courant induit circule dans ces barreaux. La circulation de ce courant $\vec{I}$ dans la barre soumise au champ tournant $\vec{B}$ crée une force de Laplace $\vec{F} = \vec{B} \wedge L\vec{I}$ (avec L la longueur de barre en m) sur le conducteur qui se traduira par un couple moteur.

On peut donc définir le glissement qui correspond à la différence relative de vitesse entre le champ tournant et le rotor.

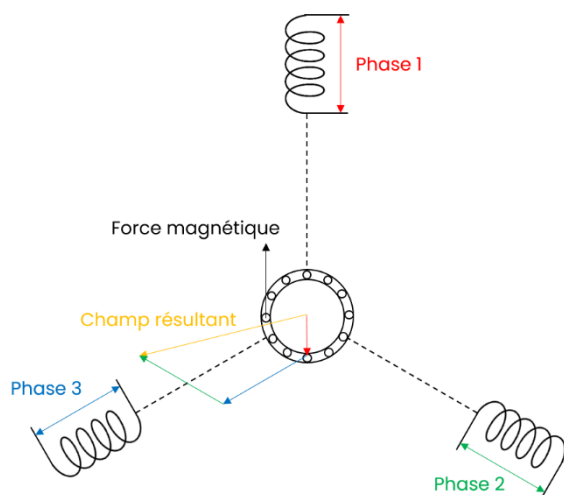


Figure 62 – Schéma de principe du fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé. En réalité, trois paires de pôles représentent dix-huit bobinages différents au sein du stator. De plus, l'entrefer doit être le plus faible possible.
Document : Aurélien Desnues.

La caractéristique « Couple-Vitesse » d'un moteur asynchrone alimenté par une tension triphasée d'amplitude U et de fréquence f est présentée ci-dessous :

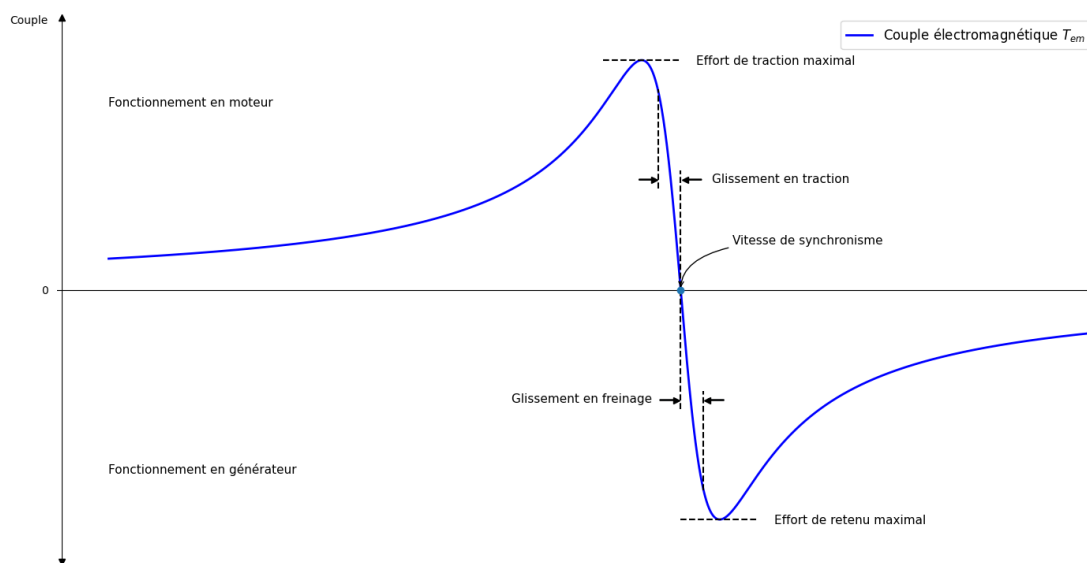


Figure 63 – Caractéristique « Couple - Vitesse » d'un moteur asynchrone.
Document : Aurélien Desnues.

À basse vitesse, le couple est faible mais les courants statoriques sont élevés. La zone d'utilisation du moteur se situe sur la partie quasi-linéaire entre les deux extremums d'effort. Lorsque le glissement est nul, c'est-à-dire à la vitesse de synchronisme, chaque barre composant le rotor sera soumise à un champ magnétique invariant. Il n'y a donc plus de variation de flux magnétique et, par conséquent, plus de force électromotrice ni de courant circulant dans les barres du rotor. Ainsi, la force exercée sur chaque barre devient nulle et le couple s'annule.

Cependant, en traction ferroviaire où l'effort maximal est demandé au départ pour une mise en vitesse du convoi, cette caractéristique de couple faible à basse vitesse ne convient pas. Il est donc nécessaire de disposer d'un réseau de caractéristiques permettant d'obtenir un couple constant au départ. Chaque caractéristique correspond à une fréquence f_i et une amplitude de tension U_i données de telle façon que $\frac{U_i}{f_i} = cste$ afin de fonctionner à l'induction convenable.

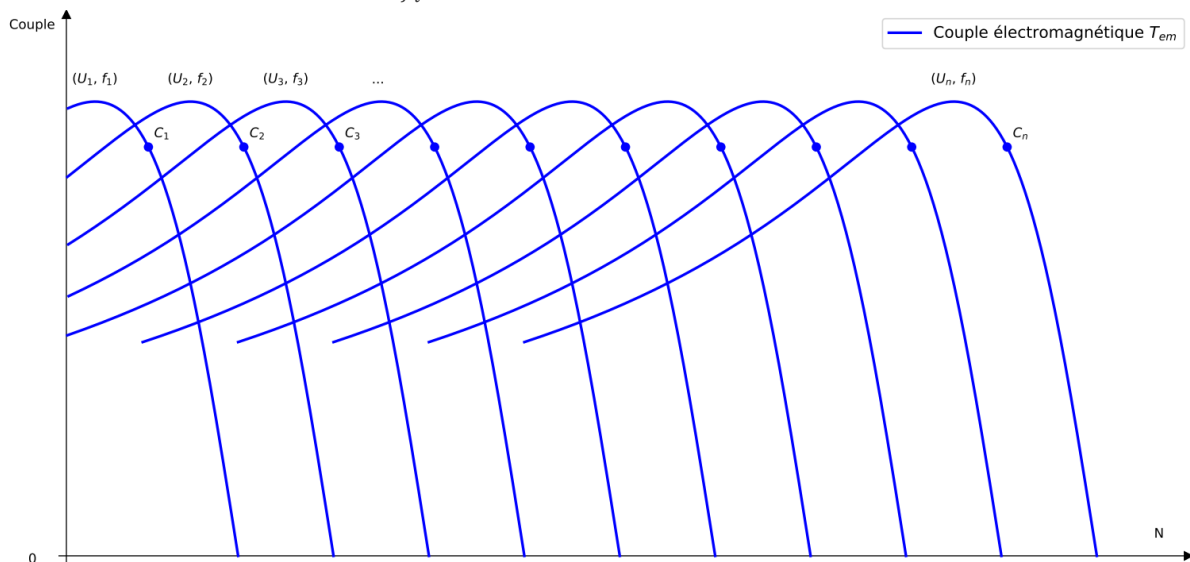


Figure 64 – Réseau de caractéristiques à $\frac{U_i}{f_i} = cste$.

Document : Aurélien Desnues.

Ce réseau permet d'obtenir des points de fonctionnement $(C_1, C_2, C_3, \dots, C_n)$ jusqu'au moment où la tension nominale U_n du moteur est atteinte. À cette tension correspond la fréquence f_n qui définit la vitesse nominale du moteur. Pour atteindre des vitesses de rotation plus importantes, il faut augmenter la fréquence tout en maintenant la tension d'alimentation à sa valeur nominale. On obtient donc un nouveau réseau de caractéristiques. Dans cette plage de fonctionnement à tension constante, le flux d'entrefer décroît avec la fréquence et le couple maximal varie en fonction inverse de la fréquence.

Ainsi, par des réglages convenables de la tension U et de la fréquence f , il est possible de multiplier les caractéristiques et de balayer les deux réseaux permettant de réaliser une plage de fonctionnement à couple constant, puis à puissance constante. Il en résulte qu'il faudra produire pour le moteur une tension triphasée dont l'amplitude et la fréquence sont asservies en fonction de la vitesse du moteur.

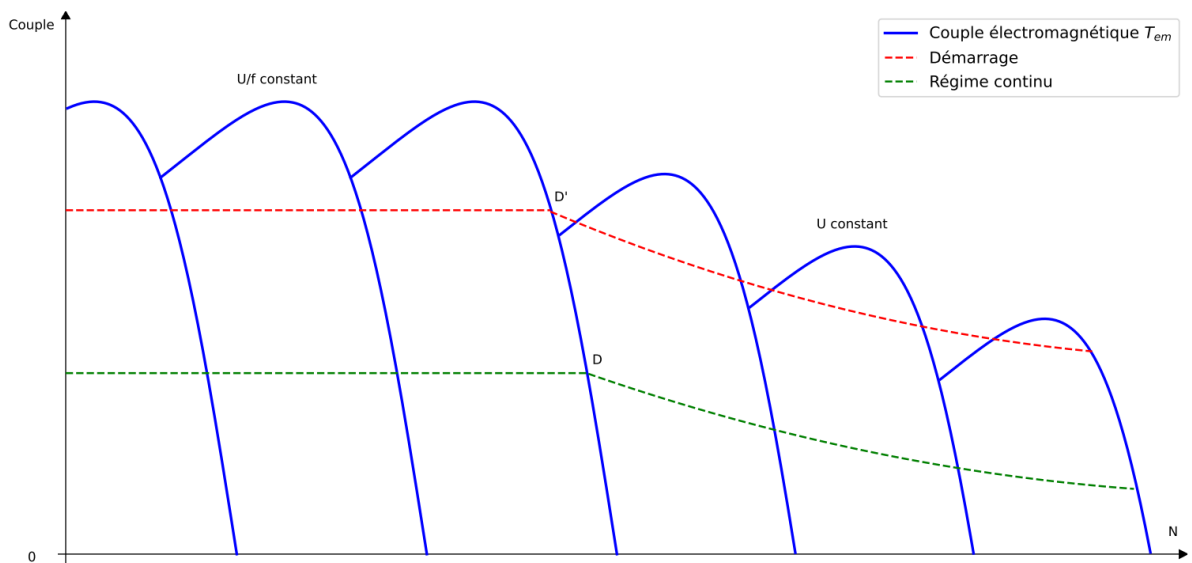


Figure 65 – Second réseau de caractéristiques à $U = cste$.
Document : Aurélien Desnues.

3.6.2 – Généralités sur le thyristor GTO

Le thyristor GTO (Gate Turn-Off) est un semi-conducteur dont l'ouverture et la fermeture peuvent être commandées par la gâchette.

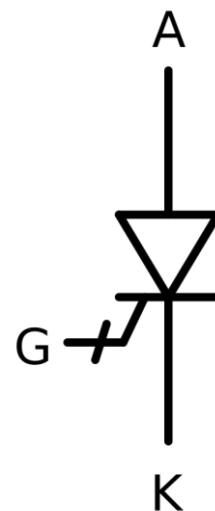
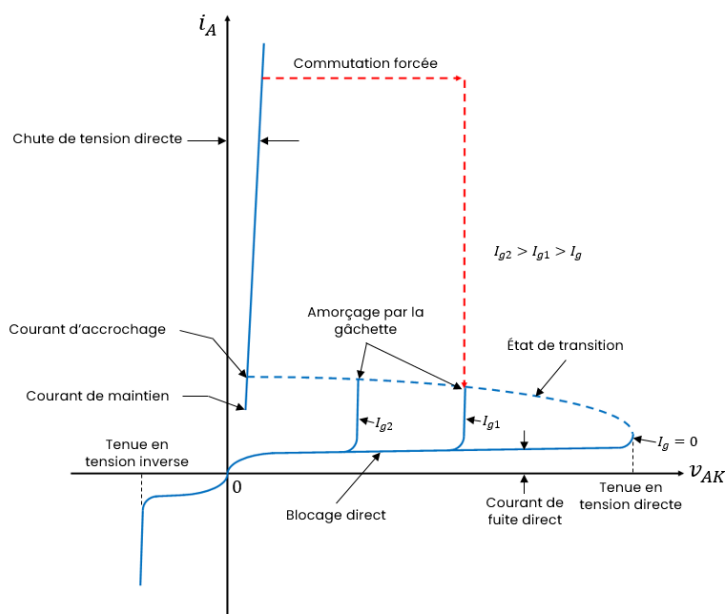


Figure 66 (à gauche) – Caractéristique tension-intensité d'un thyristor GTO.
Document : Aurélien Desnues.

Figure 67 (à droite) – Représentation schématique d'un thyristor GTO. Le « A » représente l'anode, le « K » la cathode et le « G » la gâchette (gate).

Document : wdwd (Wikimedia Commons - CC BY-SA 4.0), *rognée*.

L'amorçage commandé d'un thyristor GTO est similaire à celui d'un thyristor classique, c'est-à-dire avec une impulsion de courant d'environ 50 A envoyée à la gâchette et une tension v_{AK} positive. Toutefois, la croissance du courant doit être limitée à environ 500 A/ μ s à l'aide d'un circuit snubber inductif. Après l'amorçage, il est nécessaire de maintenir un courant de gâchette positif (de l'ordre de 0,5 à 1 A) afin d'assurer une bonne répartition du courant au sein du composant. Si la tension aux bornes du GTO atteint sa tenue en tension directe, un amorçage spontané non désiré peut avoir lieu et provoquer un court-circuit. Propriétés intrinsèques au thyristor GTO, le courant d'accrochage est la valeur minimale que le courant anodique doit atteindre pour que le GTO reste passant même lorsque le courant de gâchette est supprimé. Quant au courant de maintien, il s'agit de la valeur minimale du courant anodique en dessous de laquelle le GTO passe à l'état bloqué. Enfin, à l'état passant, une chute de tension directe supérieure à la tension de maintien de l'ordre de 3 V est présente aux bornes du composant.

La commutation naturelle (c'est-à-dire sans action d'un mécanisme d'extinction extérieur) par application d'une tension inverse aux bornes du GTO s'opère comme pour un thyristor classique, si ce n'est qu'il faut annuler le courant de gâchette afin d'éviter un fort accroissement du courant de fuite. Toutefois, dans le cas d'un GTO asymétrique, sa tenue en tension inverse est très faible (de l'ordre de 20 V) et un dépassement provoquerait un dommage permanent au semi-conducteur. C'est pour cela qu'une diode roue-libre est montée en antiparallèle, elle permet d'éviter la formation d'une tension négative aux bornes du GTO. Plus généralement, les thyristors GTO sont utilisés pour leur propriété de commutation par la gâchette et ne sont, de fait, pas utilisés en commutation naturelle.

La commutation forcée d'un thyristor GTO en conduction peut être réalisée en appliquant une forte impulsion négative au courant de gâchette¹, d'une amplitude équivalente de 20 à 30% du courant i_A à interrompre. Cependant, cela n'est possible que si la vitesse de remontée de la tension v_{AK} aux bornes du composant est limitée à environ 1000 V/ μ s à l'aide d'un circuit snubber capacitif. À la fin de la commutation, le courant i_A reste encore significatif et ne diminue que lentement, sous forme d'un courant de queue. Ce phénomène de traînage du courant lors de l'ouverture entraîne un accroissement notable des pertes par commutation. De plus, il impose de respecter un temps minimum entre un ordre d'ouverture et l'ordre de fermeture suivant. En effet, le courant de queue doit s'être totalement annulé avant de pouvoir réamorcer le GTO en toute sécurité.

¹ : Application d'une tension négative par une source d'impédance interne suffisamment faible.

Tableau 27 – Caractéristiques d'un thyristor GTO¹ asymétrique de calibre 4,5 kV – 3 kA.

Intitulé	Valeur
Tenue en tension directe	4500 V
Tenue en tension inverse	17 V
Tension continue maximale permanente	2800 V
Courant maximal commutable	3000 A
Courant maximal	930 A (moyen)
	1460 A (RMS)
Courant maximal en court-circuit	24 kA pendant 10 ms
	40 kA pendant 1 ms
Chute de tension directe	4 V à 3000 A
Courant de maintien	50 A
Temps minimal de blocage	80 μ s
Diamètre	75 mm
Masse	1,3 kg

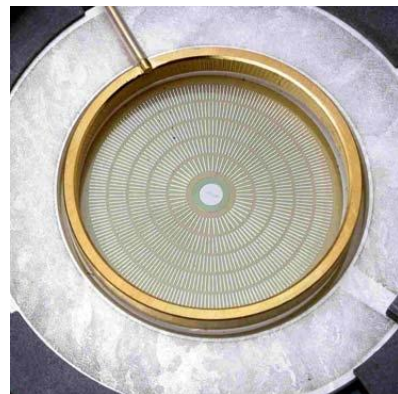
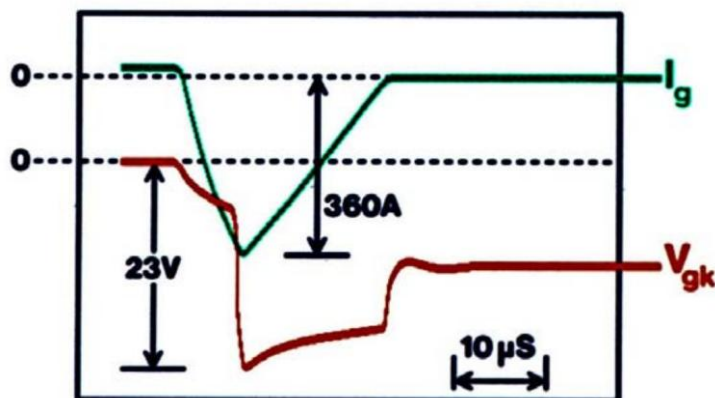


Figure 68 – Commutation forcée d'un GTO parcouru par 2000 A, une impulsion de près de 8 kW est nécessaire (à gauche) et GTO dont sa face cathodique a été retirée. On distingue la gâchette en forme d'anneau et la grille composée de multitude d'îlots de cathode, afin de permettre aux électrons d'être extraits de toute la tranche (à droite).

Document et photographie : Roger J. Kemp.

Aujourd'hui supplanté par des dispositifs plus performants tels que les transistors IGBT ou les MOSFET au carbure de silicium, les GTO perdent petit à petit du terrain sur l'électronique de grande puissance. Malgré l'obligation d'associer de nombreux modules élémentaires en série ou en parallèle pour atteindre les performances des GTO, les IGBT restent par exemple plus intéressants économiquement pour des puissances allant jusqu'à plusieurs centaines de kilowatts.

¹ : ABB, référence 5SGA 30J4502.

3.6.3 – Généralités sur l'onduleur de tension et la MLI

L'alimentation d'une machine asynchrone par un onduleur de tension triphasée implique un fonctionnement en commutation forcée sur l'ensemble de sa plage de fonctionnement. Une MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion, ou PWM pour Pulse Width Modulation) appropriée permet de contrôler de manière très précise le moteur, tout en réduisant la production d'harmoniques et les contraintes mécaniques dues aux variations brutales de couple.

Ce schéma à onduleur de tension revient à générer une tension triphasée, la plus sinusoïdale possible, appliquée aux bornes du moteur asynchrone. Pour offrir son couple maximal dès le départ, ce dernier doit être alimenté par un réseau à tension U et à fréquence f variables, telles que $\frac{U}{f} = cste$. Néanmoins, à basses fréquences, il est nécessaire de compenser les chutes ohmiques qui sont alors prépondérantes face aux chutes inductives.

Pour obtenir un système de tensions sinusoïdales triphasées, on part d'une source de tension à courant continu de valeur constante que l'on applique à un onduleur composé de trois bras déphasés de 120° électriques à deux hacheurs chacun et leurs dispositifs de commutation forcée associés.

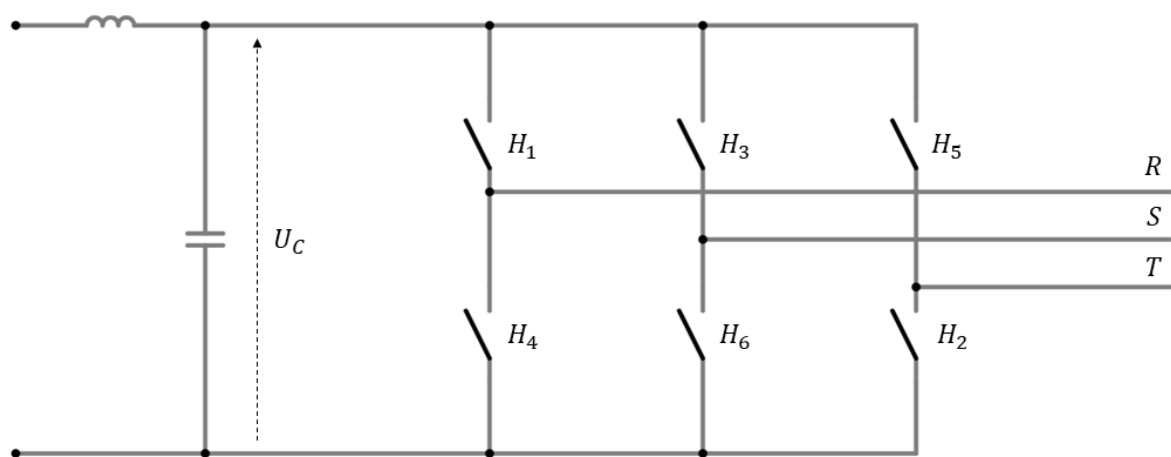


Figure 69 – Schéma de principe d'un onduleur de tension.

Document : Aurélien Desnues.

Deux interrupteurs d'un même bras ne doivent pas conduire en même temps, au risque de provoquer un court-circuit « diamétral ». Ils fonctionnent donc en « OU exclusif », c'est-à-dire soit l'un, soit l'autre, mais pas les deux en même temps.

Par un pilotage approprié de ces hacheurs, la tension à la sortie d'une phase de l'onduleur sera constituée de créneaux de tension, positifs et négatifs dont la largeur sera modulée pour que la valeur moyenne de cette tension varie selon une loi sinusoïdale. La variation de fréquence est obtenue en faisant varier la période de l'onde fondamentale tout en conservant le même rapport entre les durées respectives des créneaux de tensions positives et négatives.

Si on modifie dans chaque alternance l'importance des créneaux positifs par rapport aux négatifs sans modifier la somme de leurs largeurs, on ne change que l'amplitude de la tension sinusoïdale. La combinaison des deux variations permet d'obtenir la relation souhaitée entre la tension et la fréquence. Ce procédé est désigné sous le terme de « Modulation à Largeur d'Impulsion » ou MLI. Il s'agit plus concrètement d'une modulation de durée de créneaux.

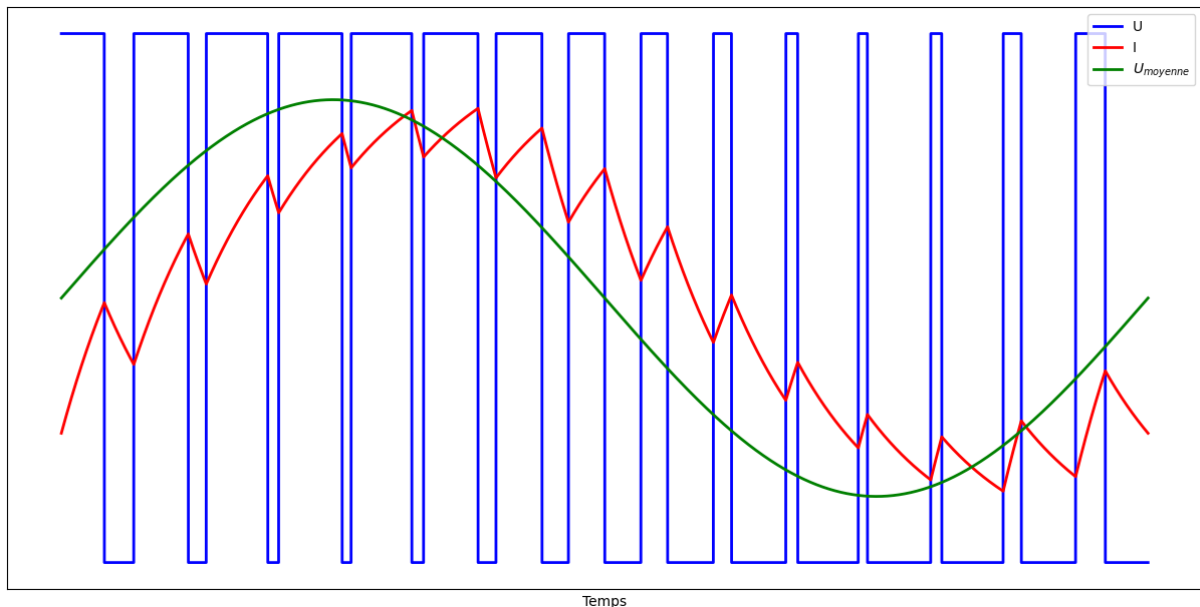


Figure 70 – Principe d'une MLI intersective alimentant une charge inductive.

Document : Aurélien Desnues.

Cette technique de pilotage des onduleurs va ainsi permettre d'assurer les deux types de pilotage d'un moteur asynchrone :

- Le pilotage vectoriel pour la partie de la commande où le flux dans le moteur est constant ;
- Le pilotage scalaire pour la partie à puissance constante, où il n'est plus possible d'augmenter la tension statorique.

Le pilotage vectoriel consiste à réguler le flux et le couple moteur par l'acquisition des tensions entre phases et des courants statoriques. Les valeurs calculées sont ainsi comparées aux consignes de couple et de flux et régulées en temps réel. Afin d'obtenir un flux constant, il faut $\frac{U}{f} = cste$. De ce fait, les valeurs de sortie de la régulation sont transformées afin d'obtenir le taux de modulation qui sera utilisé pour déterminer la tension efficace appliquée aux bornes du moteur en fonction de la tension d'entrée. Quant à la régulation de la fréquence du champ tournant statorique, elle est réalisée par mesure de la fréquence de rotation du rotor, en prenant en compte également le nombre de paires de pôles et le glissement.

Lorsque la tension nominale du moteur est atteinte, on ne contrôle plus l'amplitude de la tension statorique ni l'amplitude du flux, d'où le pilotage scalaire. La régulation du couple moteur détermine la fréquence de l'onduleur.

3.6.4 – Application au TGV TMST

Sur le TGV TMST, le réglage de la tension et de la fréquence statorique s'obtient par une commande MLI basée sur la fonction « intersective » et à « angles calculés » avant le passage en « pleine onde ». En effet, il s'avère qu'avec la fonction « intersective », les temps minimaux à respecter d'amorçage et de commutation des thyristors GTO impliquent une discontinuité importante sur le taux de modulation de l'onduleur, d'où une variation du couple électromagnétique lors du passage en pleine onde et inversement. Le but est de conserver la valeur efficace du courant entre chaque transition de façon à ne pas avoir d'à-coups de couple.

Le principe de la MLI intersective (aussi appelée « sinus-triangle ») est de déterminer le découpage de la tension moteur par l'intersection d'une tension de référence sinusoïdale (porteuse) avec une tension de découpage de forme triangulaire d'amplitude constante et de fréquence plus élevée que celle de la tension de référence (modulante).

Deux types de MLI intersective existent, l'asynchrone et la synchrone. Dans le cas de l'asynchrone, la fréquence de la porteuse est constante et indépendante de la modulante. Ce mode de pilotage est utilisé au démarrage du moteur et l'ondulation du couple électromagnétique a une faible amplitude. Quant au cas de la synchrone, la fréquence de la porteuse correspond à un multiple triple de la fréquence de la tension statorique. Cette caractéristique permet une bonne maîtrise des courants harmoniques.

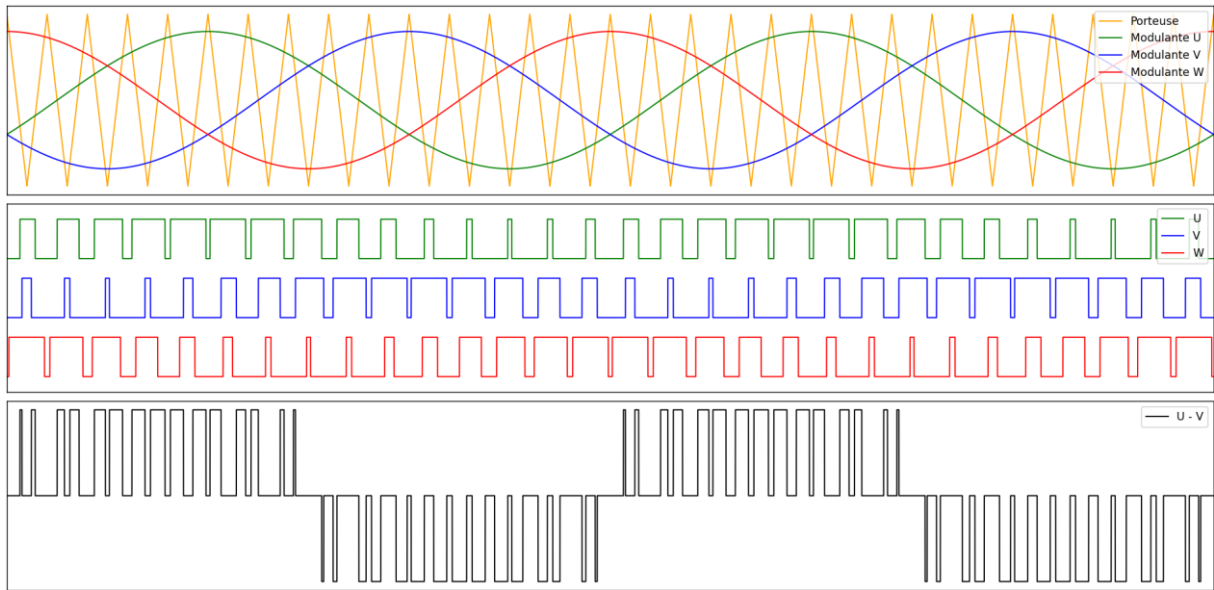


Figure 71 – Principe de la MLI intersective. À chaque croisement entre une modulante et la porteuse, un changement d'état est observé sur la modulation correspondante.

Document : Aurélien Desnues.

Dans le cas de la MLI à angles calculés, les fréquences de commutations de l'onduleur sont calculées à l'avance et mémorisées dans des tables afin d'être exploitées par l'informatique de bord. Ces commutations sont appliquées de manière identique sur les trois phases avec un déphasage de 120° chacune.

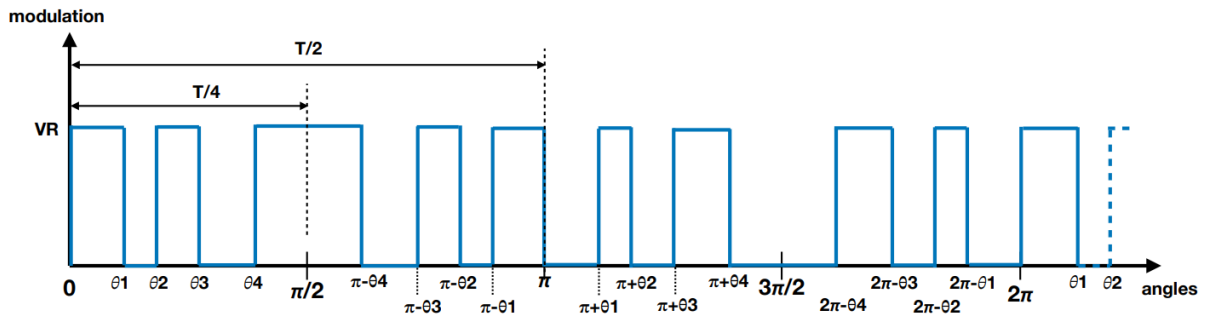


Figure 72 – Principe de la MLI à angles calculés. Ici, quatre angles sont utilisés.

Document : Alain Jeunesse.

Les angles sont calculés à partir de l'équation non-linéaire suivante :

$$(\pm 1) \frac{4}{\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{2N} (-1)^k \cos(a_k) \right] = t_m$$

Avec N le nombre d'angles, t_m le taux de modulation et a_k l'angle à calculer. Le caractère non-linéaire de cette équation impose de la résoudre numériquement.

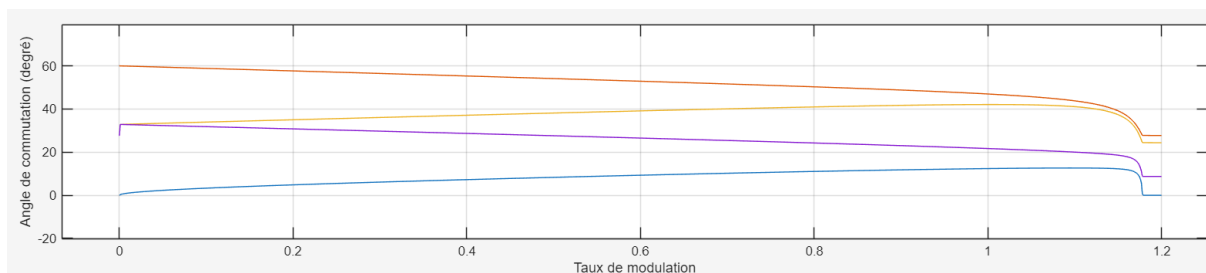


Figure 73 – Calcul de quatre angles de commutation en fonction du taux de modulation.
Document : Aurélien Desnues.

Chaque angle peut contrôler l'amplitude d'un seul harmonique. Comme les tensions de phase sont symétriques sur un quart de période, toutes les harmoniques paires (2^e, 4^e, 6^e, etc.) sont automatiquement annulées et puisque le système est triphasé, les harmoniques triples (3^e, 9^e, 15^e, 21^e, etc.) s'annulent également. Cela signifie que seules les harmoniques non triples (5^e, 7^e, 11^e, 13^e, etc.) doivent être éliminées. Ainsi, un angle permet d'agir uniquement sur le fondamental, deux angles permettent en plus un contrôle du 5^e harmonique, trois angles sur le 7^e et quatre angles sur le 11^e. Ce mode porte aussi le nom de modulation à sélection d'harmoniques à éliminer (SHEPWM – Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation).

Le nombre de découpes en fonction du nombre d'angles calculés est déterminé par la relation suivante : $N_{découpes} = 2N_{angles} + 1$.

Enfin, aux fréquences de travail élevées, le taux de modulation est égal à 1. Il n'y a qu'un créneau positif ou négatif de tension pour chaque demi-période statorique. L'onduleur ne permet plus le réglage de l'amplitude de la tension statorique. Les pertes par commutation dans l'onduleur sont minimales et la valeur nominale de la tension fondamentale entre phases est $U_{nominal} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} E = 0,78E$.

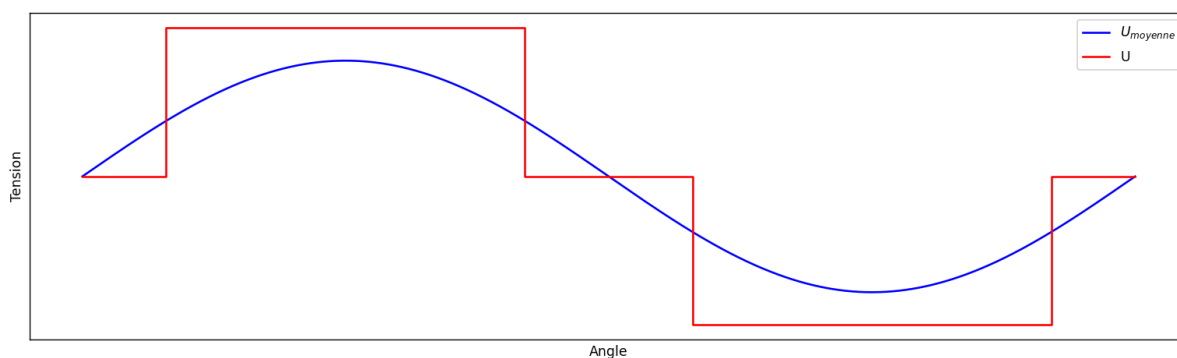


Figure 74 – Représentation d'une MLI pleine onde. L'amplitude de tension est maximale.
Document : Aurélien Desnues.

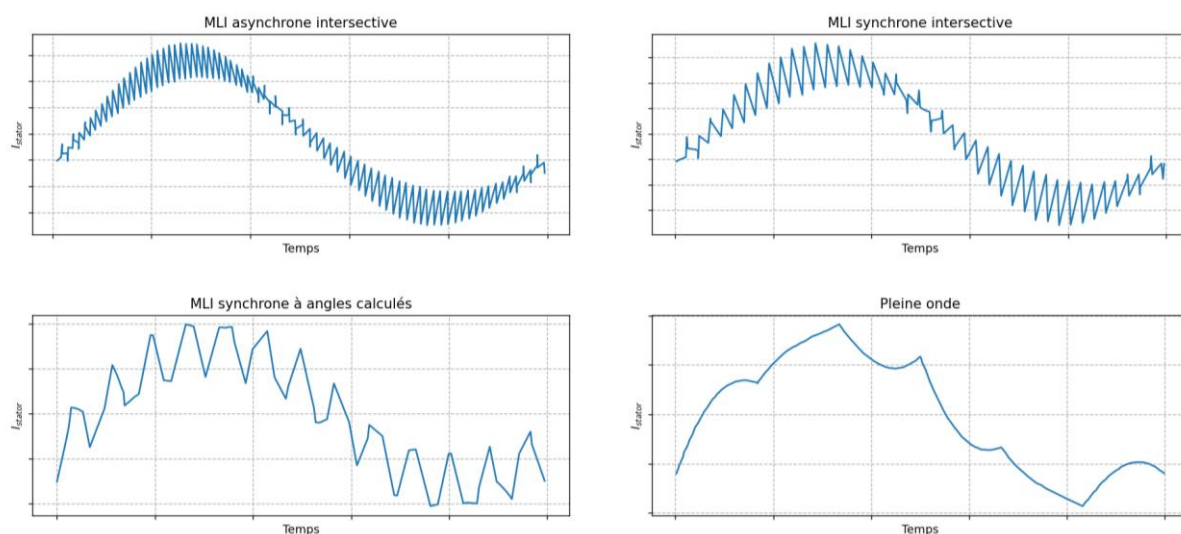


Figure 75 – Allures typiques du courant statorique lors d’une montée en vitesse.
Document : Aurélien Desnues.

Tableau 28 – Stratégie de pilotage des onduleurs de traction des TGV TMST.

Type de modulation	Modulation	Plage de vitesse
MLI asynchrone intersective	Asynchrone 115 Hz ¹	Au décollage du train et à très faible allure.
	Asynchrone 200 Hz	
MLI synchrone intersective	21 découpes	Lors de la montée en vitesse jusqu’à 60 km/h environ.
	15 découpes	
MLI synchrone à angles calculés	Quatre angles calculés avec bord d’attaque négatif.	Lors de la montée en vitesse jusqu’à 200 km/h environ.
	Trois angles calculés avec bord d’attaque positif.	
	Deux angles calculés avec bord d’attaque négatif.	
	Un angle calculé avec bord d’attaque positif.	
Pleine onde	Pleine onde (1 découpe)	Au-delà de 200 km/h.

Les fonctions intersective et à angles calculés assurent le pilotage vectoriel de l’onduleur grâce à des transformations de repères appropriées (transformée de Park). La fonction pleine onde assure, quant à elle, le pilotage scalaire de l’onduleur. Dans le cas du TGV TMST, la fréquence moyenne maximale de hachage de l’onduleur ne doit pas dépasser 600 Hz.

¹ : Modulation non-présente jusqu’à fin 1995. Le train démarrait avec la modulation asynchrone à 200 Hz.

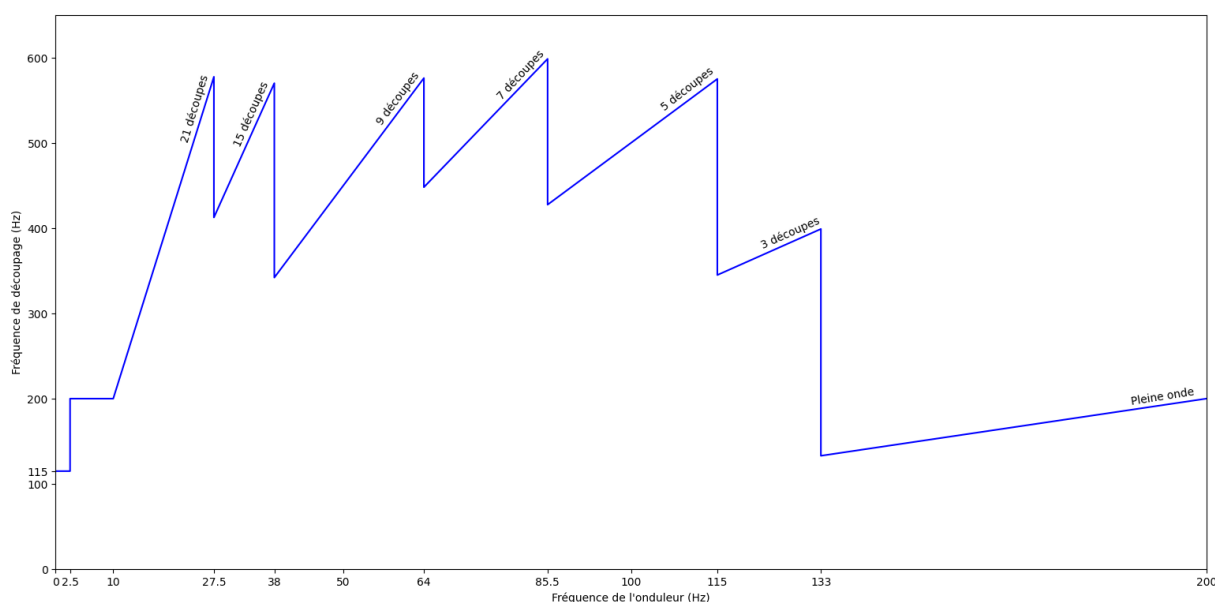


Figure 76 – Fréquence fondamentale en fonction de la fréquence de commutation.

Document : Aurélien Desnues.

À chaque instant de fonctionnement de l'onduleur, une fréquence de commutation est associée à un taux de modulation (rapport entre la tension instantanée et la tension maximale de sortie de l'onduleur). Ce couple implique de choisir le type de modulation permettant de respecter les contraintes de l'onduleur (courant crête maximal, fréquence maximale, temps de recouvrement etc.) et de la source (minimisation des courants harmoniques côté bus de tension). À noter que le temps minimal entre un amorçage et une commutation est de 170 μ s.

Tableau 29 – Contraintes de l'onduleur en fonction du type de modulation.

Indice	Type de modulation	$F_{minimum}^1$	$F_{maximum}^1$
1	Asynchrone 115 Hz	0 Hz	3,5 Hz
2	Asynchrone 200 Hz	2,5 Hz	10 Hz
3	21 découps	9 Hz	27,5 Hz
4	15 découps	24,5 Hz	40 Hz
5	4 angles calculés	39 Hz	66,6 Hz
6	3 angles calculés	65,6 Hz	85,5 Hz
7	2 angles calculés	84,5 Hz	120 Hz
8	1 angles calculés	119 Hz	260 Hz
9	Pleine onde		

¹ : $F_{minimum}$ correspond à la fréquence en dessous de laquelle il est possible de passer au type de modulation inférieur et $F_{maximum}$ correspond à la fréquence où il est obligatoire de passer au le type de modulation supérieur.

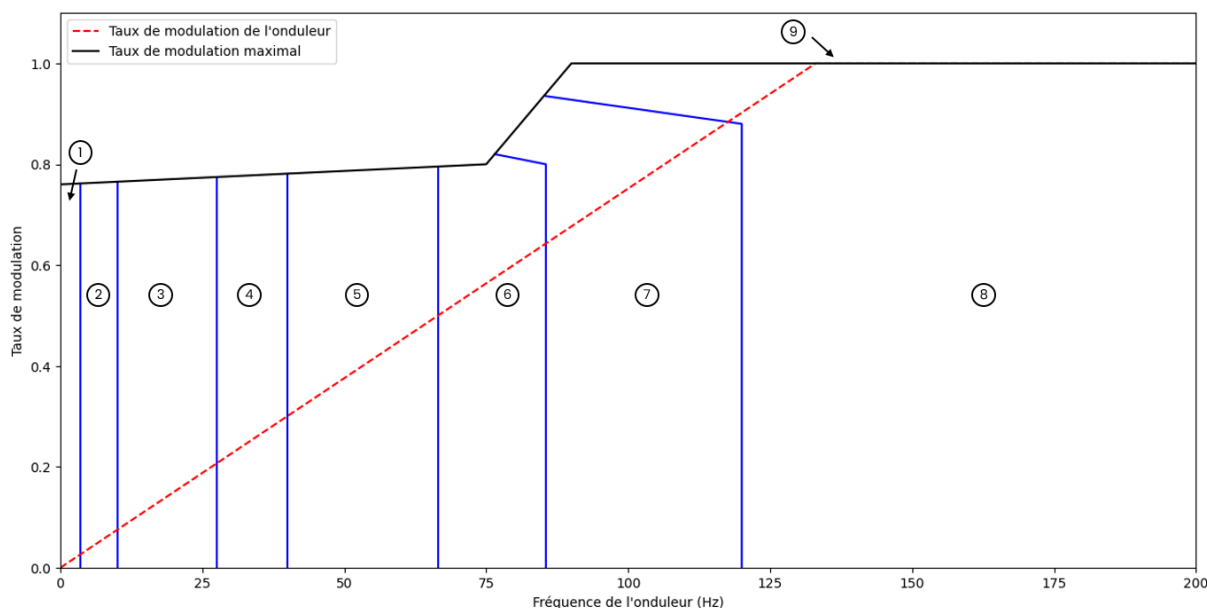


Figure 77 – Taux de modulation en fonction des zones de fonctionnement de l'onduleur.
Document : Aurélien Desnues.

3.6.5 – Pertes de l'onduleur

Les pertes par effet Joule des onduleurs de traction ont deux principales causes, à savoir les pertes par commutation des diodes et thyristors GTO, ainsi que les pertes des circuits snubbers. Ces derniers sont réglés pour le TGV TMST à 200 A/μs pour l'amorçage et à 500 V/μs pour la commutation.

Tableau 30 – Pertes pour un onduleur de traction.

Type	Formule	Valeur maximale
Pertes snubbers à l'amorçage.	$P_1 = \frac{1}{4} L I_E^2 f_c$	0,61 kW
Pertes snubbers à la commutation.	$P_2 = \frac{3}{2} C U_E^2 f_c$	12,13 kW
Pertes snubbers associées à la diode roue libre.	$P_3 = \frac{1}{2} L I_D^2 f_c$	3,36 kW
Pertes par commutation d'un thyristor GTO.	P_4	1,8 kW
Pertes par commutation d'une diode.	P_5	0.65 kW
Total	$P_T = 3(P_1 + P_2 + P_3) + 6(P_4 + P_5)$	63 kW ¹

¹ : Cette valeur maximale est obtenue ponctuellement à la transition entre la modulation à quatre angles calculés et à trois angles calculés. Plus généralement, les pertes sont maximales aux zones de transition, là où la fréquence des GTO est la plus importante.

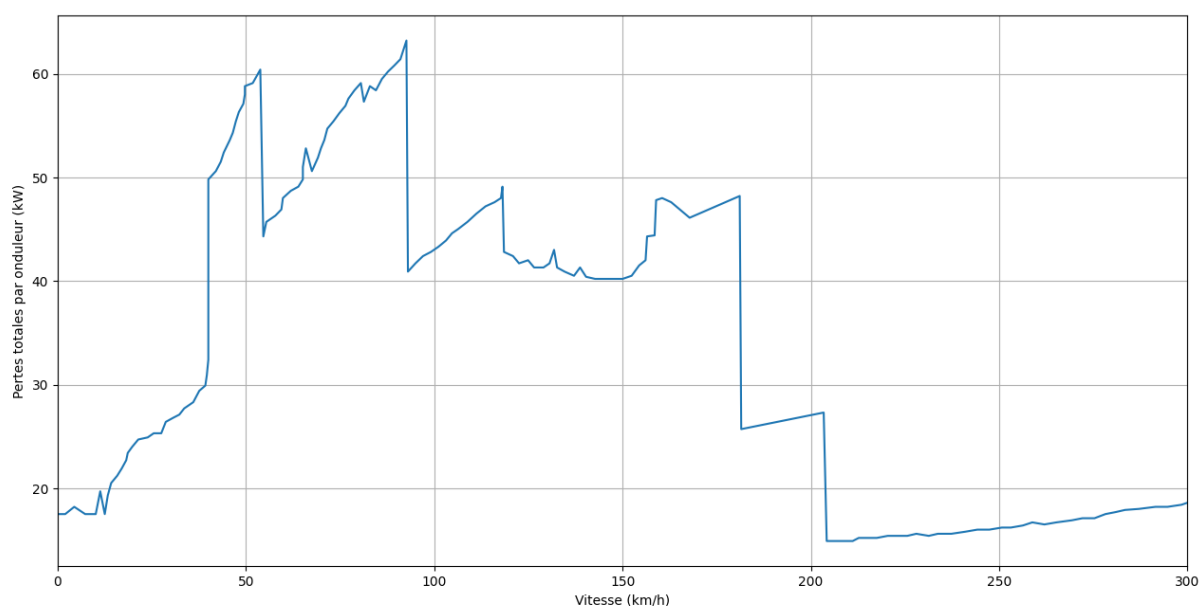


Figure 78 – Mesure des pertes Joule totales d'un onduleur en fonction de la vitesse.

Document : Aurélien Desnues.

3.7 – Transmission mécanique

À l'instar de tous les TGV (sauf TGV-M), le moteur étant situé sous caisse, la transmission de puissance s'effectue via un réducteur, une tripode et un pont moteur.

Le réducteur est un assemblage de trois roues à dentures hélicoïdales en série dans un carter (aluminium d'origine, acier après opération mi-vie) solidaire du moteur contenant une réserve d'huile. Le premier pignon est solidaire du rotor moteur, la deuxième roue intermédiaire est située au centre du réducteur et la troisième roue est, quant à elle, située sur l'arbre de transmission tripode. Chaque roue est guidée en rotation par des roulements et lubrifiée par barbotage. L'ensemble moteur-réducteur est fixé sous la caisse en trois points munis de silentblochs pour absorber les vibrations.

L'ensemble étant suspendu à la fois par la suspension primaire et secondaire, il est nécessaire de pouvoir absorber les variations de distance et de parallélisme entre la sortie du réducteur et l'entrée du pont moteur. La tripode assure ainsi cette tâche. Ce dispositif coulissant est situé sur un arbre de transmission télescopique. De fabrication Glaenzer ou Voith, il est soumis à un couple d'environ 11 000 Nm au démarrage. Le TGV TMST a permis un retour d'expérience sur la transmission à moteur asynchrone et tripode pour le futur TGV POS.

Enfin, le pont moteur assure, au travers de deux roues dentées, la liaison entre l'arbre et l'essieu. Une première roue dentée est solidaire de l'arbre, puis celle-ci entraîne une seconde roue solidaire de l'essieu. Le carter du pont moteur prend appui à la fois sur l'essieu via deux roulements et sur le châssis du bogie par l'intermédiaire d'une bielle de réaction et d'un silentbloc. La lubrification des roues dentées est également assurée par barbotage. Le rapport de réduction de l'ensemble de la transmission est de 2,19 et le rendement estimé à 97%.



Figure 79 – Bogie moteur (à gauche) et bogie porteur (à droite). Le bogie moteur n’est équipé que du pont moteur. Le moteur, le réducteur et la tripode viennent se loger dans l’espace entre l’essieu et le châssis du bogie.

Photographies : GEC-Alsthom, collection Alain Jeunesse.

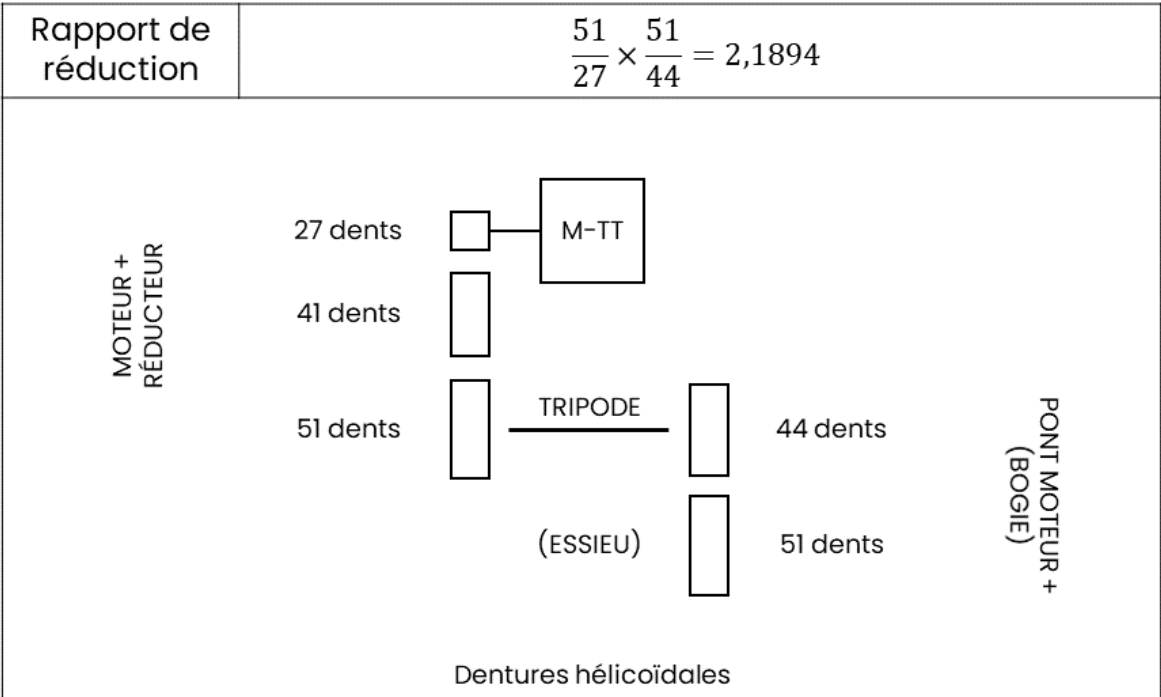


Figure 80 – Chaine cinématique du TGV TMST.

Document : Aurélien Desnues.

Chaque bogie, qu'il soit moteur ou porteur, est équipé de deux suspensions, la primaire et la secondaire. La suspension primaire est constituée d'un ressort hélicoïdal reliant la boîte d'essieu au châssis du bogie. Elle absorbe les hautes fréquences vibratoires, tandis que les amortisseurs atténuent les mouvements verticaux. La suspension secondaire, constituée de ressorts hélicoïdaux sur les motrices et d'une membrane pneumatique sur les remorques, relie le châssis du bogie au châssis de caisse. Elle absorbe les basses fréquences vibratoires, tandis que les amortisseurs atténuent les mouvements verticaux de la caisse et limitent le mouvement de galop. Les bogies sont également équipés d'amortisseurs antilacet¹ assurant la stabilité du bogie en circulation, d'amortisseurs transversaux, d'amortisseurs antirapprochement mais également de barres de torsion associées à des bras de levier permettant de limiter le mouvement de roulis.

Tableau 31 – Liste des bogies des TGV TMST.

Nom	Usage
Y 238	Bogie moteur, motrice, rame « Trois Capitales ».
Y 240P	Bogie moteur, voiture d'extrémité, rame « Trois Capitales ».
Y 239P	Bogie porteur, entre caisse.
Y241P	Bogie porteur, extrémité de demi-rame.
Y248	Bogie moteur, motrice, rame « NOL ».
Y 250P	Bogie moteur, voiture d'extrémité, rame « NOL ».

Ces bogies disposent d'un entraxe de 3m et ont été fabriqués sur le site GEC-Alsthom du Creusot (ex-MTE). Les essieux sont guidés en rotation par deux boîtes d'essieux composées de deux roulements à rouleaux coniques montés en O.

Les bogies TGV des motrices avec frotteurs ont été adaptés et testés sur la Class 33 83301 dès mai 1991 à des vitesses allant jusqu'à 90 mph. Le train d'essai était équipé de la 83301 baptisée « Zebedee » qui assurait le captage du courant au 3^e rail pour être envoyé, via un câble haute tension à la locomotive diesel-électrique Class 73205 baptisée « London Chamber of Commerce » qui assurait l'effort de traction du convoi. En queue, les voitures ADB 977687, 977686, 977763, 977764, 977685 et 977684 complétaient le convoi. De même, en 1990, la rame TGV Atlantique n°341 a été équipée de frotteurs afin de tester leur comportement à 300 km/h.

¹ : Les amortisseurs antilacet ne sont là que par précaution. L'empattement et le profil des roues offrent aux bogies une vitesse critique bien supérieure à la vitesse maximale commerciale. Les Siemens Velaro (Eurostar e320) ont, quant à eux, un empattement plus faible (2,5 m), ce qui impose un double amortisseur antilacet de chaque côté du bogie par sécurité, la vitesse critique étant nettement plus faible. Ces amortisseurs introduisent une liaison « parasite » entre bogies et caisses, défavorable au confort.

Les bogies des rames « NOL » sont en outre équipés de spécificités propres à la circulation sur les voies au nord de Londres.

Tout d'abord, les bogies des motrices sont équipés de barres de torsion antiroulis afin de limiter le gîte de la caisse et la dérivation du pantographe par rapport à la caténaire lors des virages à grande vitesse et par fort vent sur les lignes au nord de Londres. La suspension secondaire est également raidie, des butées élastiques ont été ajoutés sur les suspensions primaires afin de limiter le débattement vertical et les butées latérales des pivots de bogie ont été épaissis de 10 mm de manière à limiter le déplacement transversal du bogie par rapport à la caisse.



Figure 81 – Bielle de liaison entre le châssis de bogie et la barre antiroulis. On distingue derrière les deux ressorts de la suspension secondaire.

Photographie : Aurélien Desnues.

Les voies au nord de Londres sont pourvues d'aimants AWS plus faibles que sur les lignes en 750 V puisqu'il n'est plus nécessaire de contrer le champ magnétique généré par les forts courants. Pour que l'antenne AWS des rames « NOL » puisse détecter correctement les informations transmises, celle-ci a été déplacée du dessous de la caisse sur les rames « Trois Capitales » vers le dessous du bogie avant de la motrice. À noter que les antennes restent identiques entre les rames « Trois Capitales » et les rames « NOL ».

Enfin, au nord de Londres, le franchissement des sectionnements se fait automatiquement par l'intermédiaire d'aimants placés à l'extérieur du rail et détectés par un dispositif spécifique monté sur le bogie moteur de la première remorque.

3.8 – Auxiliaires

Du côté des équipements auxiliaires, les convertisseurs ont été réalisés par les Ateliers de Constructions Électriques de Charleroi. Bien qu'ils reprennent en grande partie les fonctions de leurs homologues installés sur les rames TGV Atlantique, ils s'en distinguent par leur conception ainsi que par leurs circuits de commande qui intègrent ici des microcontrôleurs et des EPROM. Cela concerne notamment les différents chargeurs de batteries de 10 et 30 kW à double résonance¹ ainsi que les onduleurs de 300 kVA à base de thyristors GTO.

En revanche, les nombreux onduleurs de 30 kVA destinés à l'alimentation triphasée des moteurs auxiliaires des blocs communs et blocs moteurs ainsi que des quatre compresseurs d'air sont directement dérivés des onduleurs à transistors équipant les locomotives BB 26000, leur puissance ayant été portée à 40 kVA sans difficulté. L'alimentation de ces convertisseurs, à l'exception de ceux situés dans les blocs moteurs, est assurée conjointement par les deux lignes 530 V issues des hacheurs auxiliaires, qui parcourent toute la rame de motrice à motrice.

Les dix-huit remorques nécessitent une puissance de 1230 kW pour le chauffage en conditions hivernales extrêmes et seulement 830 kW en été lorsque la demande en climatisation est maximale. Le principe des deux lignes de train a été reconduit du TGV Atlantique et autorise la génération d'un réseau triphasé 380 V – 50 Hz. Le choix de cette tension était d'ailleurs nécessaire compte tenu de la basse tension disponible dans le 3^e rail côté anglais. La puissance est ainsi fournie par quatre hacheurs abaisseurs à GTO (modules MO-HR-02) de 435 kW chacun. Ainsi, en cas de perte d'un hacheur, la puissance maximale est toujours disponible et dans le cas où deux hacheurs seraient isolés, la tension de la ligne de train diminue à 400 V afin de diminuer la puissance demandée sans pour autant délester les remorques.

Le retour de courant des lignes 530 V sur les rames « Trois Capitales » s'effectue par le châssis du train via des tresses de masse sur chaque bogie et deux câblots arrachables entre la motrice et la première remorque puis retourne au rail. Un châssis moins résistif que le rail assure la circulation du courant. Cette configuration permet de réduire la masse des voitures. Sur les rames « NOL », ce retour 530 V est entièrement câblé (ligne 0 V supplémentaire) afin de surveiller au mieux les courants perturbateurs sur le réseau du nord de Londres. Ce retour implique donc deux câblots arrachables supplémentaires aux points de sécabilité.

¹ : On parle de chargeur à « double résonance » car celui-ci est constitué d'un double circuit résonnant (un premier circuit LC parallèle puis un second constitué du premier auquel on ajoute en série une bobine et l'inductance de fuite du transformateur).

Tableau 32 – Répartition des convertisseurs auxiliaires par demi-rame.

Position	Onduleur de 40 kVA.	Onduleur 380 V de 300 kVA.	Chargeur 72 V de 10 kW.	Chargeur 72 V de 30 kW.
Bloc commun	4		1	
Blocs moteurs	6			
Voiture R1	2		2	
Voiture R3				1
Voiture R5		1		
Voiture R7				1
Voiture R8		1		
Total	12	2	3	2

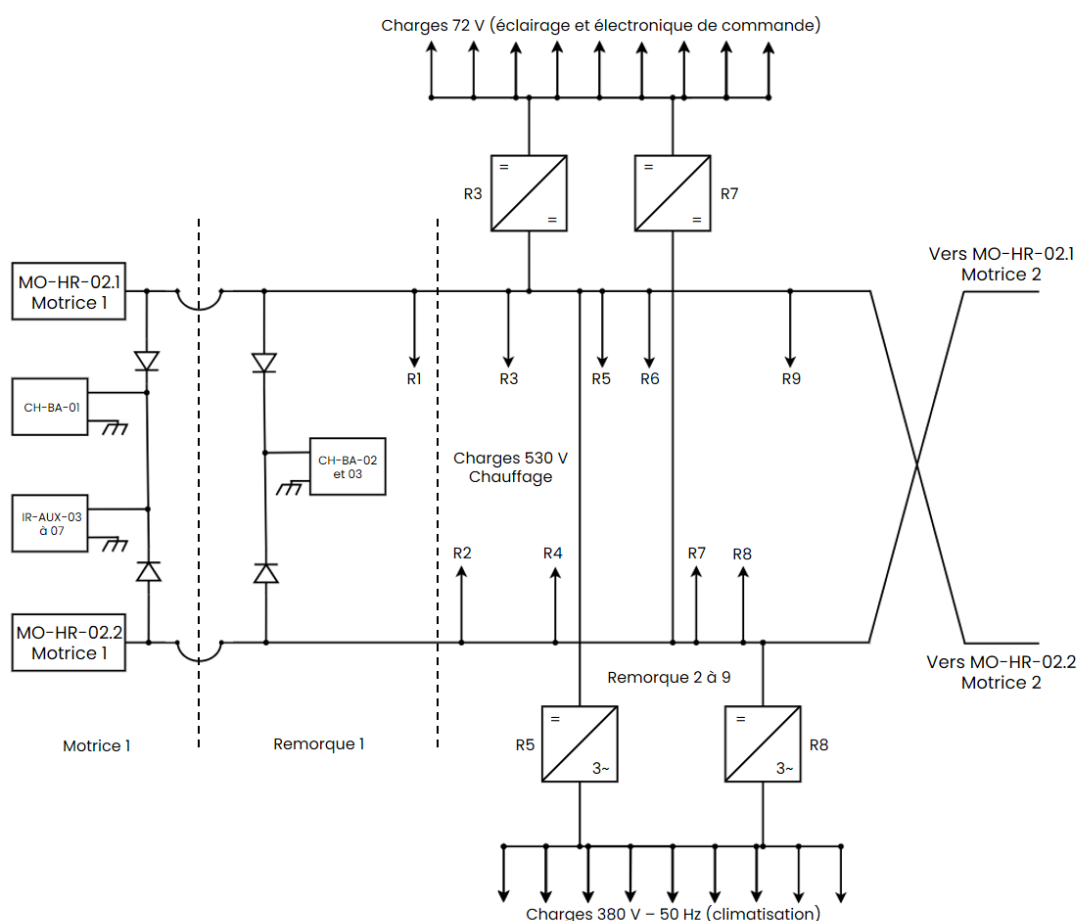


Figure 82 – Schéma de principe de l'alimentation électrique des auxiliaires remorques. La disposition est identique pour l'autre demi-rame. CH-BA représentent les chargeurs batteries et IR-AUX les onduleurs auxiliaires. Ces derniers, basés originellement sur les modèles à modules Darlington (1000 V – 300 A) équipant les BB 26000, ont aujourd'hui été remplacés par des modèles à transistors IGBT.

Document : Aurélien Desnues.

3.9 – Immunisation à la source

Les réseaux empruntés par l'Eurostar sont équipés de circuits de voie sensibles à des fréquences pouvant être générés ou transmis par l'engin.

Tableau 33 – Résumé des circuits de voie sur les différents réseaux.

Réseau	Circuits de voie
SNCF (1500 V)	Relais à palette 50 Hz
	Audiofréquence de 1600 à 2700 Hz (UM71)
SNCF (25 kV – 50 Hz)	Relais à palette 83,3 Hz
	Audiofréquence 1500 à 2800 Hz (UM71)
SNCB (3000 V)	Relais à palette 50 Hz
	Audiofréquence de 1600 à 2700 Hz (UM71)
BR (750 V)	Relais à palette 50 Hz
	Audiofréquence de 1532 à 2610 Hz
BR (25 kV – 50 Hz)	Relais à palette 83,3 Hz
	Relais reed (350 à 450 Hz)
	Audiofréquence de 1532 à 2610 Hz

Les sources des perturbations sont multiples. Les onduleurs produisent des courants ondulatoires au sein du bus de tension sur une bande de fréquence dépendante de sa fréquence fondamentale. Ces courants sont également modulés par les hacheurs ou les ponts redresseurs qui ont leurs propres harmoniques caractéristiques. Ainsi, pour éviter de perturber les circuits de voie en question, des mesures préventives et curatives ont été prises pour, d'une part, réduire la production de ces fréquences et, d'autre part, couper l'alimentation du train en cas de dépassement d'un certain seuil.

Les rames « Trois Capitales » étaient équipées d'un ICMU (Interference Current Monitoring Unit) Ansaldo assurant la surveillance de la fréquence 50 Hz lors des circulations sous 750 V au sud de Londres. Le seuil de déclenchement sur une rame complète est de 9 A. Sur les rames « NOL », l'ICMU Ansaldo a été remplacé par un ICMU multifréquence Adtranz pouvant surveiller à la fois le 50 Hz lors des circulations sous 750 V, mais aussi le 83,3 Hz et la bande reed côté masse au primaire du transformateur principal pour les circulations au nord de Londres. Toute détection de ces fréquences, au-delà d'un certain seuil, déclenchait l'ouverture des disjoncteurs principaux. La fréquence 83,3 Hz est issue d'une composante à 33,3 Hz dans le bus de tension traversant les ponts redresseurs.

Un détecteur 50 Hz « DT50 » repris des Z20500 équipe également les rames et permet de détecter cette fréquence en Belgique sous 3000 V. Moins restrictif que l'ICMU, il permettrait indéfiniment le réarmement des disjoncteurs. Le détecteur se déclenche au-delà de 4 A pendant une seconde.

Une impédance d'entrée 50 Hz non-capacitive est mise en place sur les motrices, permettant de restreindre tout courant d'ondulation 50 Hz d'une sous-station de passer dans le train.

Tableau 34 – Valeurs d'impédance à 50 Hz selon la configuration.

Configuration	Impédance (Ω)
750 V – Un groupe en service	1,19
750 V – Deux groupes en service	0,59
1500 V	1,19
3000 V	4,74

De plus, comme mentionné dans la partie précédente, il y avait, sur les rames « NOL », une ligne de train 0 V supplémentaire afin d'éviter tout retour de courant via le rail. En cas d'isolement d'un des deux hacheurs d'une motrice, un jeu de contacteurs permet une reconfiguration appropriée de la ligne de train pour rester conforme aux seuils de perturbations. Ces rames sont également équipées d'un DCMD (Differential Current Monitoring Device) sur chaque ligne 530 V, permettant d'ouvrir le disjoncteur principal si un défaut à la masse (déséquilibre de courant entre les deux lignes) est détecté.

Enfin, au nord de Londres, les courants de précharge du transformateur principal doivent être maîtrisés et ne doivent pas produire de crête en courant continu de plus de 150 A. Pour cela, une temporisation de trois seconde est mise en place entre la fermeture du disjoncteur principal monophasé et l'autorisation de mise en service des ponts redresseurs et des hacheurs auxiliaires. De même, la fermeture des disjoncteurs des deux motrices sont décalées de trois secondes.

À noter que tous les dispositifs actifs au nord et au sud de Londres sur les rames « NOL » ne sont actifs qu'en cas de sélection de la position « BR » (monophasé ou continu), elle-même autorisée qu'avec une clé de boîte à levier particulière rouge. En effet, ce changement de clé de boîte à levier permet d'autoriser la fermeture des disjoncteurs principaux au nord de Londres et réduit le risque d'erreur pour les autres réseaux.

3.10 – Système informatique embarqué

L'essor des microprocesseurs dans les années 1980 a profondément transformé l'électronique embarquée des engins moteurs et notamment celle des TGV. Ainsi, les cartes électroniques « classiques » présentes sur le TGV Sud-Est ont été remplacées, sur le TGV Atlantique, par des calculateurs à microprocesseurs offrant de nouvelles fonctionnalités et des performances accrues. Cette évolution s'est accompagnée de l'introduction du réseau TORNAD (Token Ring Network Alsthom Device), un réseau en boucle complète assurant la transmission des informations entre les équipements embarqués. Une évolution du réseau TORNAD, nommée TORNAD* a fait son apparition sur le TGV Réseau.

Le TGV TMST reprend ces principes de conception, tout en les poussant plus loin encore. Il marque une nouvelle étape avec une utilisation renforcée d'unités de traitement décentralisées, interconnectées au sein d'un réseau informatique temps réel, améliorant ainsi la rapidité, la fiabilité et la résilience du système embarqué.

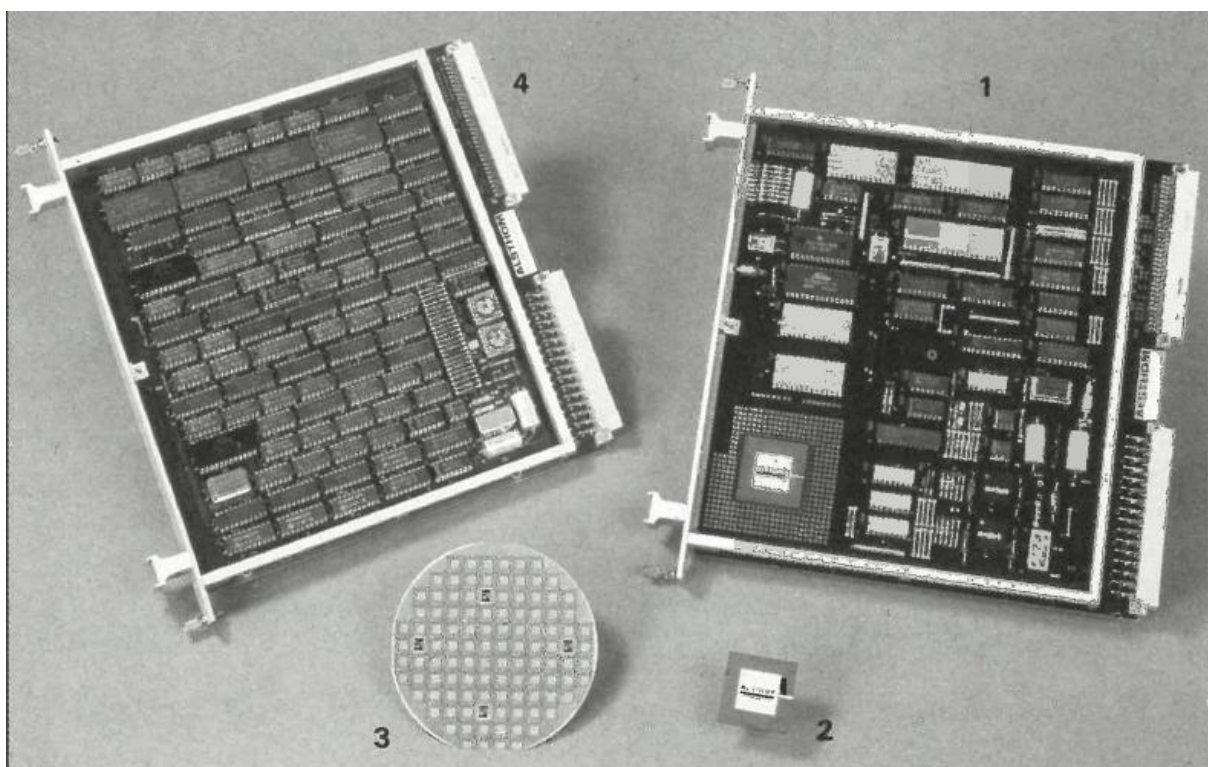


Figure 83 – Cartes électroniques GEC-Alsthom utilisées sur le TGV Atlantique. On retrouve en 1 la carte électronique réalisant la liaison entre chaque ordinateur et le réseau TORNAD du TGV Atlantique, dite « coupleur de communication ». Elle utilise le composant prédiffusé 2 qui est lui-même tiré d'une tranche de silicium (Wafer) représentée en 3 qui en contient une centaine. Le composant 2 se substitue à la carte électronique traditionnelle située en 4. Photographie : Revue de l'AFAC.

Bien que construite par GEC, la chaîne de traction disposera d'une commande développée par Alsthom en 1989 nommée CAS (Commande Asynchrone Standard) qui sera ensuite déclinée en 1992 en CSS (Commande Synchrone Standard) pour les TGV Réseau tritension. Montées dans l'électronique temps-réel du bloc moteur, les cartes 6U (standard IEC 60297) et leurs alimentations donneront le premier standard AGATE (Advanced GEC-Alsthom Traction Electronics).

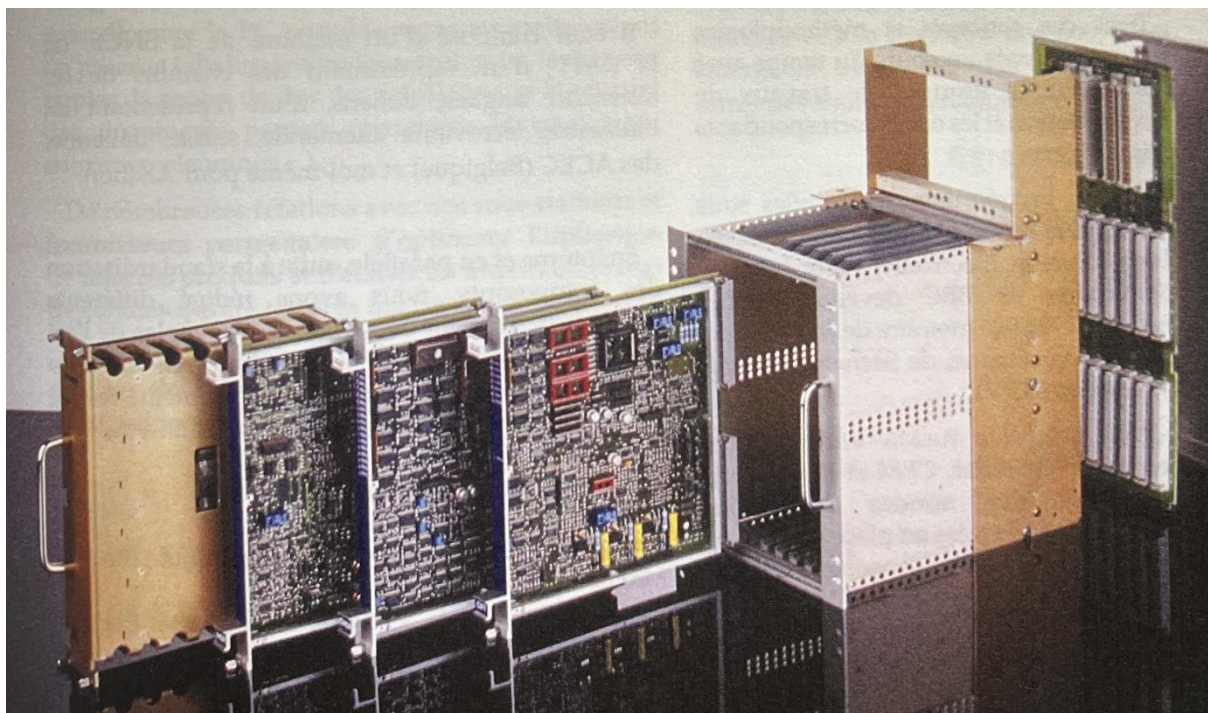


Figure 84 – Première version de la gamme AGATE.

Photographie : collection Alain Jeunesse.

On trouve, dans un TGV TMST, deux types d'unités de traitement :

- Les unités de traitement à base d'automates programmables qui conviennent parfaitement à la gestion des fonctions « non-critiques » en terme de temps de réaction (telles que les portes et l'éclairage). La programmation des processeurs (famille 68000 de Motorola) s'effectue en langage Grafcet, ce qui facilite aussi les mises au point ;
- Les unités de traitement à base d'électronique temps réel qui s'articulent autour de microprocesseurs 16 bits de la génération 80C196 d'Intel. On retrouve, au sein d'une conception modulaire, des cartes d'entrées/sorties, des cartes d'acquisition et des cartes calculateurs. Le pilotage en temps réel des semi-conducteurs de la chaîne de traction rend nécessaire l'installation d'une telle puissance de traitement.

Toutes ces unités sont distribuées sur la rame et liées par un réseau informatique type TORNAD*¹ qui assure l'acheminement des informations. Ce réseau est constitué de deux sous-réseaux identiques (un sur chaque demi-rame) reliés entre eux et incorporant deux routeurs gérant les communications. Pour assurer le niveau de disponibilité requis ainsi que la conservation des performances en situation dégradée, les concepteurs ont adopté un réseau type « bus à jeton », constitué de deux paires de fils torsadées, blindées, redondantes et rebouclées par les deux routeurs. Le TGV TMST est équipé de trente-huit ordinateurs par élément.

Chaque « abonné » étant relié au reste du système par deux paires de fils, il en résulte un fonctionnement sans dégradation sensible des performances en cas de coupure d'une paire, voire des deux.

Lorsqu'un ordinateur reçoit une information, il la code sous forme de télégramme, qu'il transmet ensuite aux autres ordinateurs via les voies de transmission. À la réception, l'ordinateur destinataire analyse le télégramme, le decode, commande l'équipement concerné, puis émet un accusé de réception. Afin de garantir le fonctionnement, les télégrammes cheminent en faisant une boucle. En cas d'incident (coupure, court-circuit sur une voie de transmission ou panne d'un équipement), les télégrammes circulent jusqu'à l'ordinateur situé juste avant le point de défaillance, puis rebroussement chemin pour atteindre l'autre extrémité du réseau, c'est-à-dire le dernier ordinateur accessible avant la zone défectueuse.

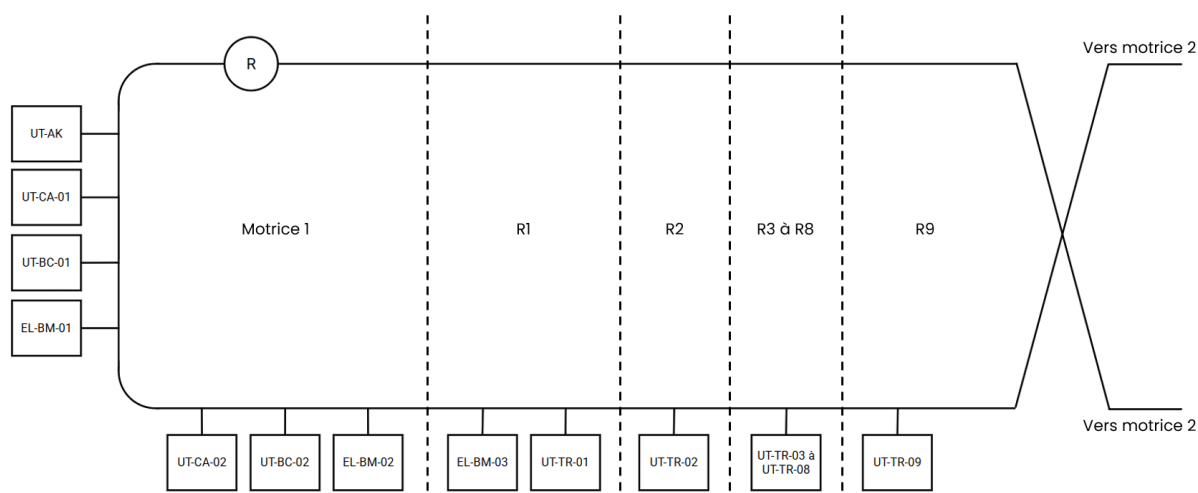


Figure 85 – Configuration du réseau informatique pour une demi-rame. La configuration est identique pour la seconde demi-rame.

Document : Aurélien Desnues.

¹ : Sur un réseau TORNAD, chaque unité de traitement communique en série dans un ordre précis, tandis que sur un réseau TORNAD*, toutes les unités communiquent entre elles via un bus selon un ordre de priorité défini par des jetons.

Tableau 35 – Liste des unités informatiques.

Nom	Usage
UT-AK	Unité de traitement de la motrice.
UT-CA	Unité de traitement de la cabine. UT-CA-01 et UT-CA-02 en redondance active. UT-CA-01 assure quelques fonctions supplémentaires comme la Vitesse Imposée, le cycle de lavage ou encore le pré-conditionnement.
UT-BC	Baie électronique du bloc commun. UT-BC-01 : groupe 1. UT-BC-02 : groupe 2. Contient les automates UT-CM et l'électronique temps réel EL-CM.
EL-BM	Électronique temps-réel du bloc moteur.
UT-TR	Unité de traitement des remorques (éclairage, climatisation, anti-enrayage, etc.).
R	Routeur pour la gestion des communications.

3.11 – Équipements de sécurité

Afin de pouvoir rouler sur les différents réseaux, le TGV TMST est équipé d'un certain nombre d'équipements de sécurité permettant d'assurer la lecture de la signalisation ou encore la mise en œuvre d'un arrêt d'urgence en cas de défaillance d'un système ou du conducteur.

Tableau 36 – Liste des équipements de sécurité.

Nom	Usage
RS	Répétitions des signaux par « crocodile » en France.
VACMA	Détection d'une défaillance du conducteur (malaise...).
KVB	Contrôle ponctuel par balise de la vitesse en France.
Préannonce	Vitesses supérieures à 160 km/h sur lignes classiques en France.
TVM 430	Signalisation en cabine sur LGV et Eurotunnel.
TBL 1+	Répétitions des signaux en Belgique.
TBL 2 dérogatoire	Signalisation en cabine pour la section Bruxelles Midi – Hal.
AWS	Répétitions des signaux sur lignes britanniques.
TPWS	Contrôle de la vitesse sur lignes britanniques.
ETCS	<i>Signalisation européenne en cabine. En cours d'installation.</i>
ATESS	Enregistrement des actions en cabine. Équivalent d'une boîte noire dans un avion.

Chaque motrice dispose des éléments de détection et de traitement pour chacun des systèmes de sécurité. Un bloc fonctionnel au dos de la cabine assure cette tâche. De fait, chaque système est indépendant des autres, mais également du système informatique de la rame. Les capteurs de chaque système sont situés sous la motrice, avec, à l'avant, derrière l'étrave, la poutre TVM avec les différents capteurs pour les indications continues dans le rail et dans les boucles inductives. D'autres capteurs sont disposés au centre afin de communiquer avec les balises. Bien que ces équipements soient indépendants du système informatique de la rame, ce dernier permet tout de même d'assister le conducteur lors des essais avant départ.

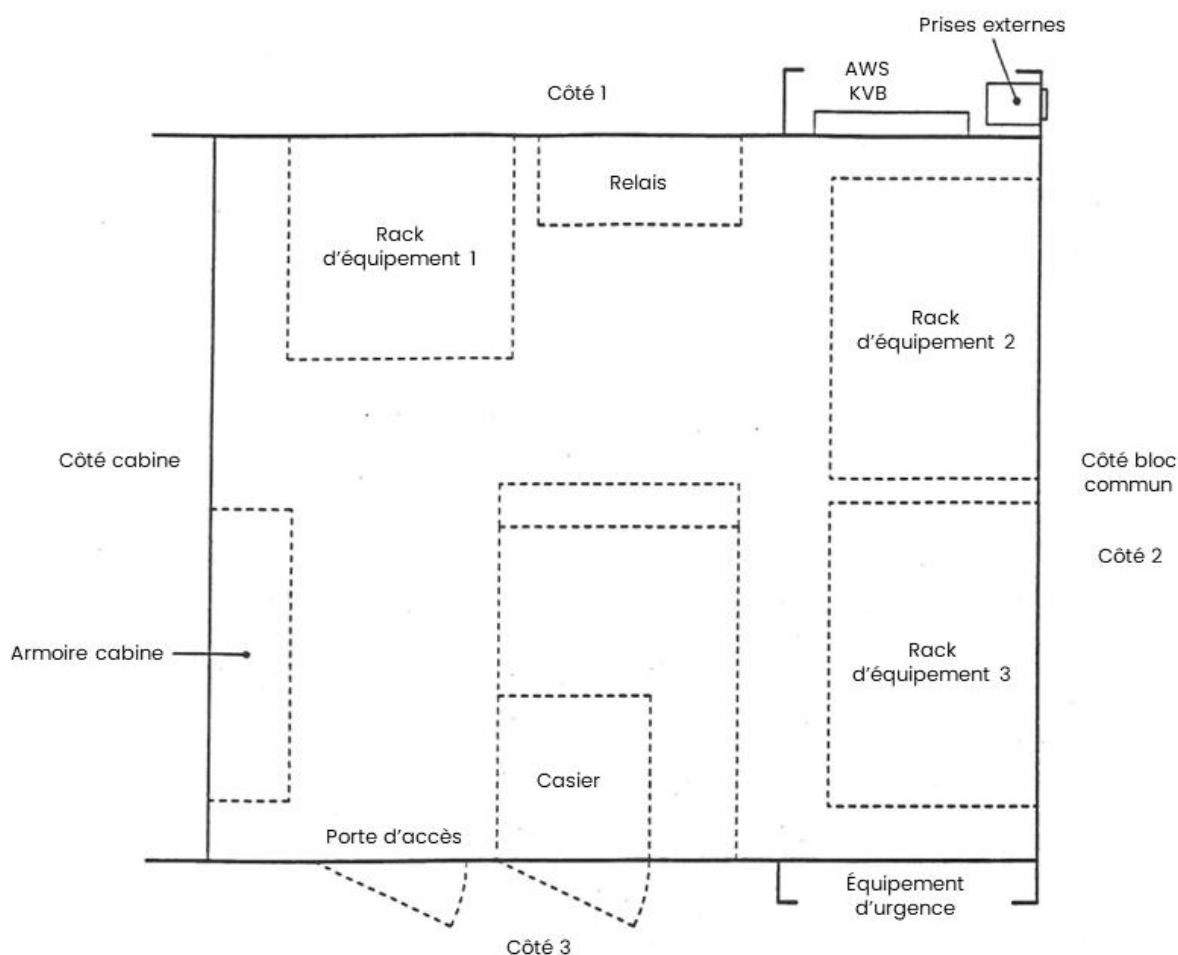


Figure 86 – Configuration du bloc cabine vu du dessus. Cet élément est situé contre la cabine du conducteur dans la partie technique. L'armoire cabine est accessible depuis la cabine du conducteur. Elle contient de nombreux commutateurs et microdisjoncteurs. Un système de ventilateur permet de refroidir l'intégralité des blocs informatiques.

Document : document d'étude EPS.

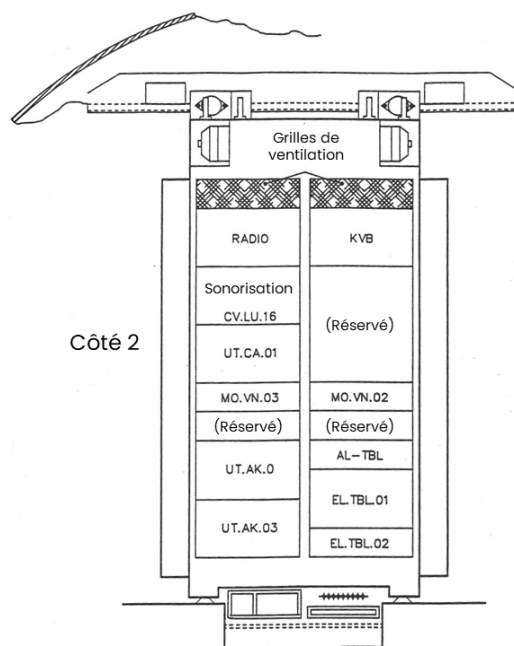
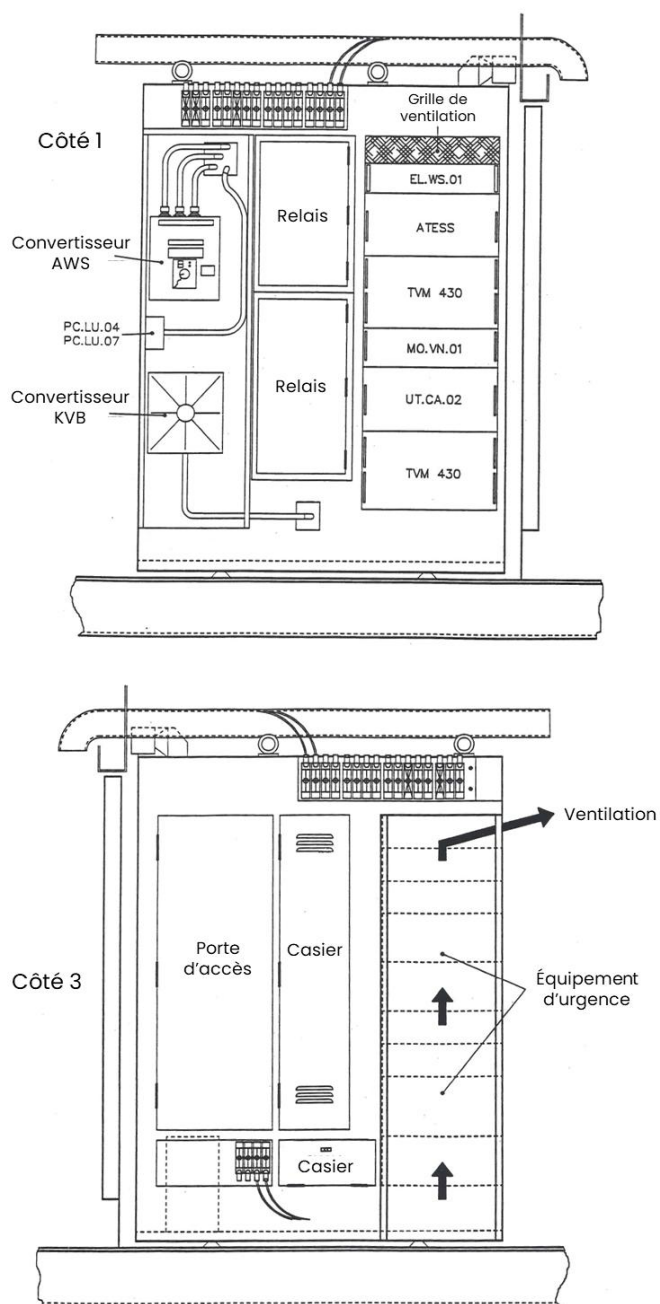


Figure 87 – Équipements du bloc cabine d'origine. Certains modules ont pu évoluer, notamment avec l'ajout du TPWS, du TBL 2 dérogatoire et du TBL 1+. Document : document d'étude EPS.

PC.LU : alimentation externe 72 V pour les unités de traitement (04) et l'éclairage (07) ;

EL.WS.01 : gestion du son en cabine ;

MO.VN : module de ventilation ;

CV.LU.16 : Convertisseur phares ;

AL-TBL et EL-TBL : Modules TBL.

Les câbles au départ des différents modules sont groupés et répartis d'une part dans des gouttières circulantes dans les courbes de la motrice afin de relier les différents automates et d'autre part en direction de la cabine afin de raccorder les différentes interfaces des systèmes de sécurité et les commandes de conduite.

Quant à l'équipement d'urgence, il contient les différents agrès de sécurité réglementaires, mais aussi des éléments de remplacement (fusibles entre autres).

3.12 – Équipements pneumatiques

À l'instar des autres matériels ferroviaires, le TGV TMST est équipé d'un circuit pneumatique assurant le fonctionnement des servitudes et du freinage. Une Conduite Générale (CG) et Principale (CP) parcourent la totalité de la rame et assurent l'alimentation en air comprimé des équipements associés.

3.12.1 – Production d'air

La production d'air est assurée par quatre compresseurs à vis Knorr type SL20-5, chacun d'un débit nominal de 2000 NI/min¹ dans les deux motrices et remorques d'extrémités. En fonctionnement normal, seuls deux compresseurs sont en marche, à savoir celui de la motrice de tête et celui de la voiture d'extrémité arrière. En cas de panne d'un des deux compresseurs, le plus proche se met en service. Ces quatre compresseurs sont associés à un sécheur d'air bi-colonne à adsorption Knorr type LTZ-E. L'air est stocké dans différents réservoirs principaux, deux en motrice (355 et 160 L), un en remorque d'extrémité et deux en remorque de sécabilité (250 L).

De plus, des mesures techniques ont été prises afin d'augmenter la disponibilité de l'alimentation en air de la rame :

- Doublement de la conduite principale entre motrice et remorque d'extrémité permettant d'assurer l'alimentation en air du robinet de mécanicien à partir du compresseur de la remorque d'extrémité en cas de panne du compresseur de la motrice et de la conduite principale ;
- Redondance des réservoirs principaux, tous équipés de clapets anti-retours, afin de prévenir toute coupure de la conduite principale et assurer un freinage en toute circonstance ;
- En cas de pression inférieure à 4 bars à la conduite principale, une commande locale surveillant la pression dans les réservoirs principaux prend le relais sur les compresseurs non en service afin d'assurer une production d'air jusqu'à 6 bars. Cela permet d'accélérer les mises en pression initiales et d'assurer la production d'air en cas de panne du réseau informatique global.

En outre, chaque motrice est équipée d'un compresseur auxiliaire à piston Wabco Westinghouse CP75 d'un débit nominal de 50 NI/min associé à un sécheur d'air auxiliaire mono-colonne à adsorption GEC-Alstom SECAL222.

¹ : « Normaux litres par minute ». Il s'agit de litres en conditions ANR (Atmosphère Normale de Référence).

3.12.2 – Réseau pneumatique

Le train est parcouru par deux lignes pneumatiques, à savoir la conduite principale et la conduite générale. L'air, comprimé à 9 bars, est stocké dans différents Réservoirs Principaux (RP) en lien direct avec la conduite principale qui alimente les différentes servitudes du train nécessitant de l'air comprimé.

Tableau 37 – Principaux équipements alimentés par la conduite principale.

Équipement	Commentaire
Pantographes et frotteurs	Reliés au circuit du compresseur auxiliaire.
Disjoncteurs et H(O-C)	
Sablères	
Essuie-glace	Système de lave-glace intégré.
Avertisseur sonore	Deux trompes dans le nez de la motrice assurent les tonalités grave et aigu.
Graisseurs de boudins	
Suspensions pneumatiques	Coussin pneumatique de 155 L.
Système de détection d'incendie	Tube en rilsan circulant dans les compartiments de puissance.
Portes	Portes d'accès, portes d'intercirculation coupe-feu, portes de salle.
Emmarchements	
Toilettes	
Conduite générale	Alimentée via les électrovannes du FEP.

La conduite générale, quant à elle, assure le freinage de l'engin. Connectée au réservoir principal et à la conduite principale via des électrovalves contrôlées par la ligne FEP (Frein Électropneumatique) et des détendeurs, sa pression nominale est de 5 bars. Elle assure une réponse rapide des dispositifs de frein en cas de commande depuis la cabine de conduite. Les locomotives et motrices TGV ne sont généralement pas équipées de FEP (électrovalves de serrage et de desserrage). En effet, la proximité du robinet de mécanicien sur l'engin de tête pourrait entraîner des instabilités transitoires de la pression de conduite générale si un second point de vidange ou de remplissage se trouvait à seulement quelques mètres. Pour les autres motrices d'un TGV, leur faible longueur permet à la voiture adjacente équipée du FEP de rapidement propager la variation de pression. Néanmoins, le TGV TMST constitue une exception puisqu'il est équipé de FEP sur ses motrices, mais ce dispositif est automatiquement inhibé sur celle de tête.

3.12.3 – Freinage pneumatique

Le TGV TMST est équipé d'un frein automatique PBA2 (Presse Bouton Automotrice, version n°2). Ce système est sensiblement le même que le PBL2. Le frein PBA2 assure les fonctions de freinage au moyen d'électrovannes dans le bloc frein.

Chaque essieu moteur comporte deux semelles de freinage en métal fritté de 320 mm (une par roue), chacune actionnée par un bloc de freinage comprenant un cylindre d'environ 152 mm de diamètre. Les essieux porteurs disposent quant à eux de quatre disques en acier (28CrMoV5-08) à haute puissance non ventilés de 640 mm de diamètre (freinage appliqué de 610 à 310 mm) et 45 mm d'épaisseur sur lesquels viennent s'appliquer des garnitures composées de trente-six plots de 40 mm de diamètre en matériau fritté à matrice métallique (Fe-CuSn). Ces garnitures sont actionnées par un cylindre d'environ 230 mm de diamètre et montées sur des rondelles ressort permettant de mieux épouser les aspérités des disques de frein. Cela permet ainsi de mieux répartir le flux thermique lors du freinage. Chaque dispositif de freinage est connecté à la conduite générale via un distributeur. Ce dernier assure une montée de pression aux cylindres de frein en cas de diminution de la pression à la conduite générale et inversement.

Des antienrayeurs à régulation de glissement et des détecteurs de non rotation fournis par Faiveley équipent en redondance chaque essieu de la rame.

Tableau 38 – Distances d'arrêt d'urgence en fonction de la vitesse pour une charge de 786 t.

Vitesse	Distance contractuelle
300 km/h	3500 m
270 km/h	2800 m
230 km/h	1900 m
180 km/h	1150 m
160 km/h	900 m
Ralentissement de 270 km/h à 220 km/h	1250 m

Différents essais ont été réalisés avant la mise en service de l'engin, à savoir des essais Haut-le-Pied (motrice seule) entre Metz et Thionville puis sur les plaines d'Alsace où des freinages à 195 km/h ont été réalisés, des essais en rame complète jusqu'à 320 km/h sur la LGV Nord et enfin des essais de secours avec une deuxième rame TMST et une unité multiple de TGV Réseau. Ces essais ont permis de valider les performances contractuelles de freinage.

3.13 – Cabine de conduite

La cabine de conduite du TGV TMST a fait l'objet d'un travail spécifique mené par un groupe spécialisé au sein du consortium TMSTG, réunissant des équipes de la SNCF, de la SNCB et de British Rail. L'objectif principal était de parvenir à un consensus sur la disposition des commandes, de manière à faciliter leur prise en main par les conducteurs, tout en réduisant les difficultés d'acquisition des réflexes et des bonnes pratiques au cours de la formation.

Traditionnellement, la position du pupitre – et donc du conducteur – était située à gauche, héritée de l'époque où un second agent était présent en cabine. Cependant, l'évolution vers une conduite en cabine monoposte, ainsi que le développement de la circulation à contre-sens ou sur voie banalisée, ont rendu cette configuration obsolète. Le choix s'est donc porté sur un pupitre central, plus adapté aux conditions modernes d'exploitation.

Par ailleurs, deux contraintes ont influencé l'ergonomie de la cabine :

- D'une part, les effets hypnotiques induits par le défilement des lumières dans le tunnel ;
- D'autre part, la nécessité de réduire la résistance aérodynamique.

Ces considérations ont conduit au choix d'une cabine étroite, avec une position de conduite centrale et un pare-brise de petite taille. Ces recommandations ergonomiques et fonctionnelles ont été formulées par Jones Garrard.

Très rapidement, compte tenu des exigences opérationnelles du train, le groupe de travail est parvenu à un consensus sur un pupitre inspiré de ceux des TGV déjà en service. Le premier enjeu majeur concernait la commande du frein automatique. En Europe continentale, la convention est de tirer le levier pour provoquer une dépression (donc un freinage) et de pousser pour réalimenter la conduite générale (desserrage), tandis que la pratique était inversée chez British Rail.

Finalement, la convention continentale a été retenue. Le levier de commande utilisé est de type PBA82S à quatre positions :

- Desserrage : en poussant le levier ;
- Serrage : en tirant le levier ;
- Marche : position neutre (le levier y revient automatiquement depuis les positions de serrage ou de desserrage) ;
- Serrage d'urgence.

Autour de ce levier, plusieurs commandes et instruments sont présents :

- Le bouton « coup de poing » de freinage d'urgence ;
- La commande de secours du frein automatique ;
- La mise au neutre de la commande de frein, avec son témoin lumineux ;
- La commande du FIEF (Freinage d'Immobilisation pour Essai de Frein) ;
- La commande de surcharge ;
- Ainsi que divers manomètres : pression de la conduite générale, du réservoir principal, de la conduite principale et des cylindres de frein.

Pour le manipulateur de traction, un « volant » était utilisé pour cette fonction. Celui-ci était hérité des locomotives à « crans » permettant de réguler la tension aux bornes des moteurs à courant continu via un rhéostat. Ce volant a été conservé jusqu'aux TGV Réseau, avec ici une plage de pilotage analogique permettant d'envoyer plus ou moins de courant dans les moteurs de traction.

Méthode jugée obsolète par les représentants britanniques pour un matériel qui se voulait résolument moderne, le choix du manipulateur de traction s'est tourné vers un dispositif de double levier (manipulable à droite ou à gauche) à pousser pour augmenter l'intensité moteur et à tirer pour amorcer le freinage électrique. Ce système est installé dans un coffret métallique disposant de l'inverseur, de deux boutons à effleurement pour la VACMA, du sélecteur Traction, marche lente (SL) et Vitesse Imposée (VI), de la commande des projecteurs et de la liseuse. À noter que contrairement aux autres TGV, les TGV TMST ne disposent pas de sélecteur de puissance.

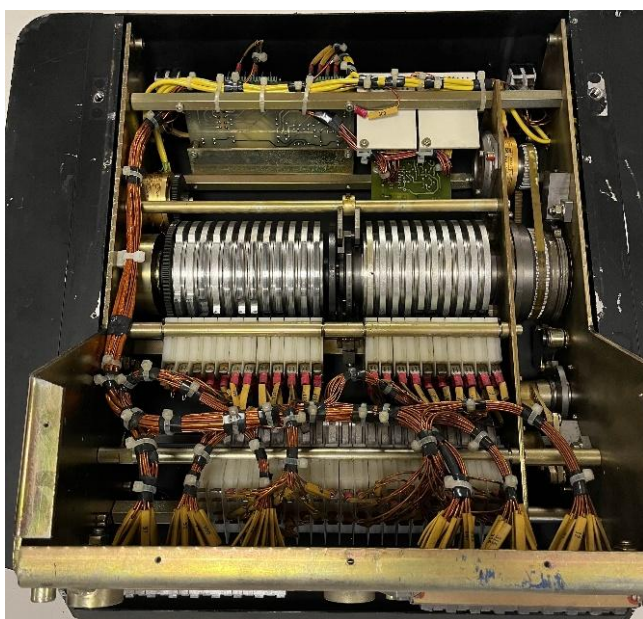


Figure 88 – Dispositif électromécanique à l'intérieur d'un manipulateur de traction d'un TGV TMST. Les cames sur l'axe central permettent d'enclencher les contacteurs en traction ou en freinage, ainsi qu'interdire certaines fonctions lorsque le manipulateur n'est pas à zéro. Photographie : © Quentin Gag (avec son aimable autorisation).

Le reste de la cabine a été adapté au regard des différents réseaux parcourus. Sur la gauche sont disposés les lampes de signalisation, le boîtier KVB, les commandes liées au TBL et d'essai AWS. Au centre, on retrouve l'indicateur de vitesse commutable entre km/h et mph, l'indicateur TBL 2 et l'indicateur TVM 430. Enfin, on retrouve à droite la boîte à levier, l'indicateur de tension ligne, l'indicateur de traction/freinage, l'indicateur de vitesse imposée et le tournesol de l'AWS. Le bouton d'acquiescement des signaux français, anglais et belge est commun.



Figure 89 – Cabine d'un TGV TMST (rame « NOL »).

Photographie : NB80 (Wikimedia Commons – CC BY-SA 3.0).

En raison de la diversité des tensions utilisées, l'indicateur de tension ligne est unique avec trois zones distinctes :

- Une zone verte indiquant une tension suffisante ;
- Une zone orange indiquant une tension faible mais encore suffisante ;
- Une zone rouge indiquant une tension faible ou nulle.

Ainsi, l'indicateur s'adapte à chaque système d'alimentation et indique le niveau en fonction de la tension d'alimentation.

Les ampèremètres moteurs ont également été simplifiés avec un indicateur unique possédant une plage de traction et de freinage électrique, l'aiguille déviant plus ou moins en fonction de l'intensité demandée.

De plus, chaque cabine de conduite est équipée du SIAC (Système Informatique d'Aide à la Conduite) permettant l'informatisation des fiches roses, l'essai des freins ou encore le guide de dépannage. Il est composé d'un écran électroluminescent et d'un clavier à touches.

Enfin, à l'arrière de la cabine se situe le bloc cabine où se trouvent différents commutateurs, interrupteurs et microdisjoncteurs (disjoncteurs magnéto-thermiques unipolaires) permettant d'isoler certaines fonctions du train.



Figure 90 – Une des deux cabines de la rame 3209/3210 équipée du bi-standard TVM/ETCS.
Photographie : © Sam Cooper (avec son aimable autorisation).

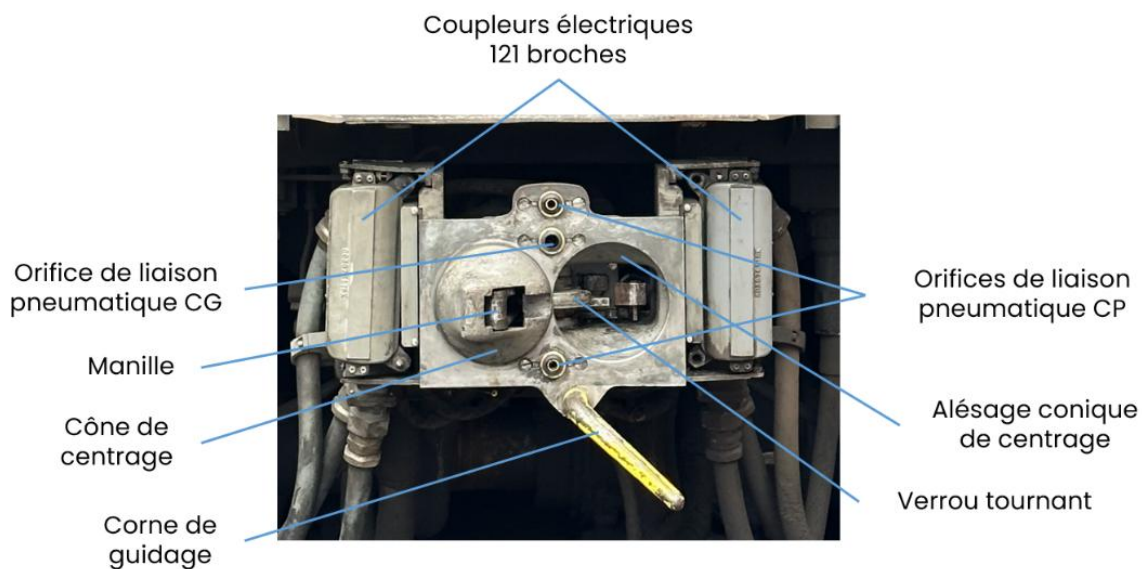
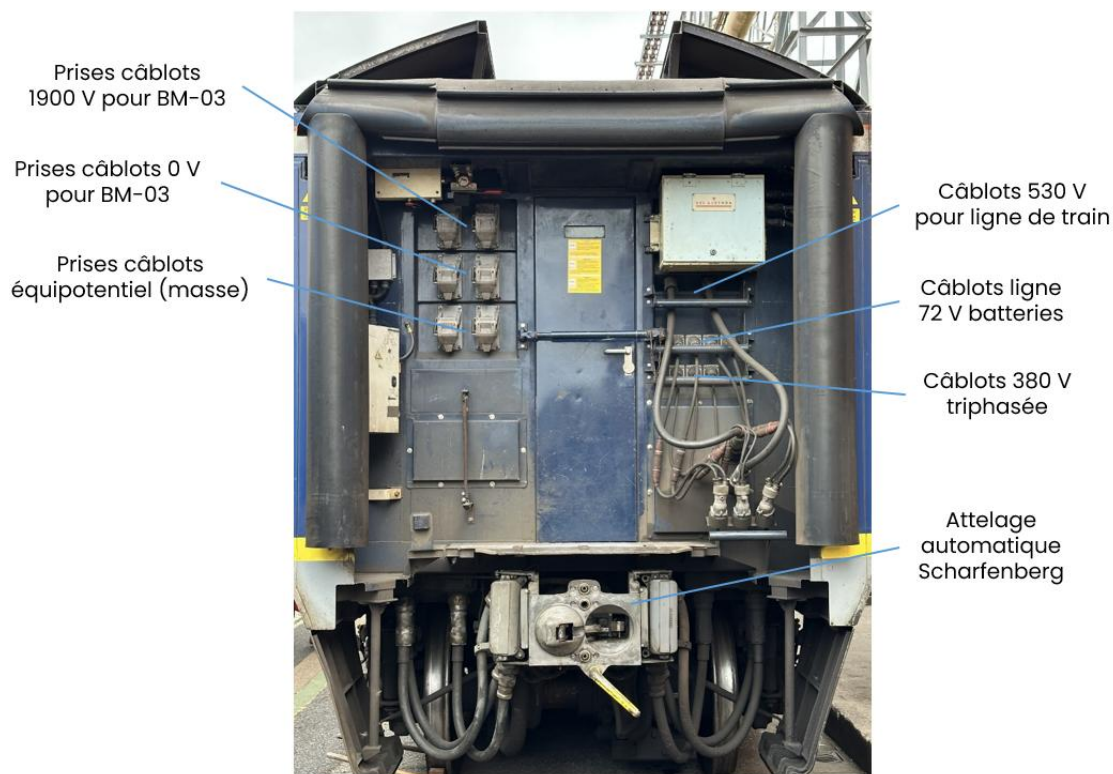
4 – Conclusion

Le TGV TMST symbolise le projet de liaison fixe transmanche et la collaboration ferroviaire entre la France, la Belgique et le Royaume-Uni. Il a permis d'éprouver la technologie des thyristors GTO, jusque-là inédite en traction dans le domaine de la grande vitesse ferroviaire en France. Cependant, sa faible puissance massique et ses caractéristiques techniques en font un train peu flexible, difficilement utilisable en dehors des relations Eurostar.

Ce projet a néanmoins permis de fédérer les technologies et les savoir-faire d'un grand nombre d'entreprises et d'ingénieurs, ce qui le rend unique. Aujourd'hui, huit rames TMST (désignées e300) effectuent encore de nombreuses relations entre Paris, Bruxelles et Londres sous la bannière Eurostar. Elles opèrent aux côtés des rames e320, désormais majoritaires sur les liaisons transmanche, mais aussi des rames TGV PBA et PBKA issues de la fusion avec l'entreprise Thalys. Avec plus de trente ans de service, ces rames pourraient bénéficier d'un sursis supplémentaire grâce à l'installation du système ETCS, nécessaire pour leur circulation sur les voies belges.

Le 22 octobre 2025, Eurostar annonce l'achat à Alstom de trente rames Avelia Horizon (+ vingt en option), nommées « Eurostar Celestia ». Ces rames à deux niveaux et longues de 200 m signent la fin de l'obligation au sein du Tunnel des rames continues de 400 m. L'expérience de plus de trente années d'exploitation sans incident majeur a permis, par analyse de ce retour d'expérience, d'alléger sensiblement la réglementation d'origine, guidée par une très grande prudence en face d'une situation inconnue, qui allait concerner le transport de plusieurs centaines de personnes par rame dans un environnement à priori hostile en cas de défaut du système.

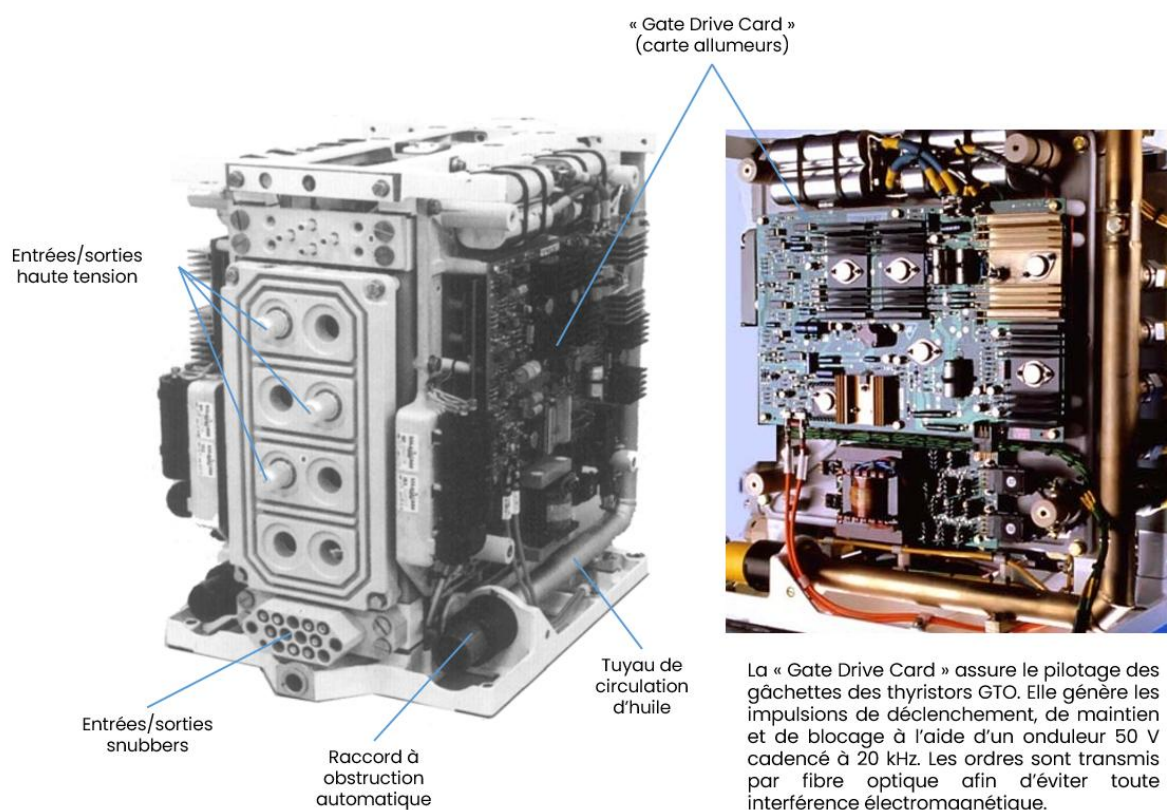
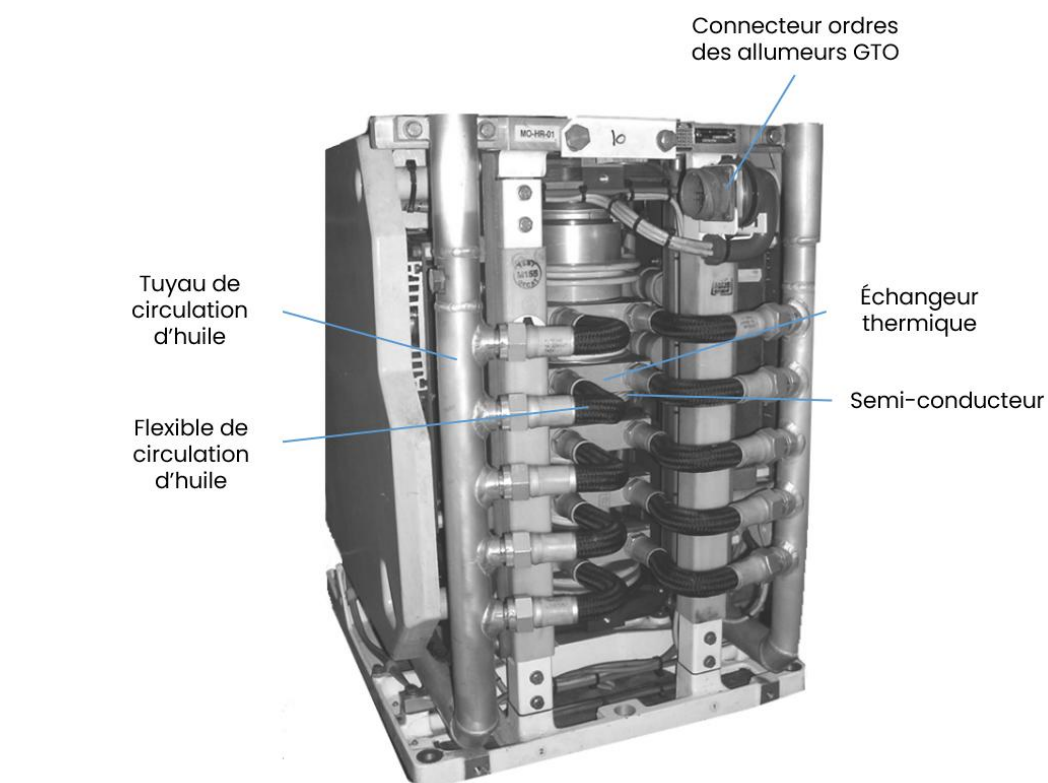
Annexes



Annexe 1 – Arrière de la motrice 3999, avec les dispositifs de couplage avec la voiture d'extrémité.

Photographies : © Adam Lucas¹ (avec son aimable autorisation).

¹ : Lien Flickr : <https://flic.kr/p/2rqUtp8>



Annexe 2 – Description des modules de puissance.
 Photographies : Revue 3E.I. et Roger J. Kemp.

Annexe 3 – Récapitulatif des rames construites par dates.

Élément	Rame	Sortie d'usine	Date de réception	Première rénovation	Opération Mi-Vie
EUKL – 8 rames + une motrice de réserve					
3001/3002	PS1 / F15	22 janvier 1993	31 octobre 1995	7 novembre 2005	
3003/3004	UK3	7 janvier 1994	15 août 1994	4 novembre 2004	
3005/3006	UK4	4 février 1994	13 août 1994	8 mars 2004	
3007/3008	UK5	18 mars 1994	15 août 1994	14 décembre 2004	Motrices : Mars 2015 OPMV sèche : Novembre 2015 Aménagements intérieurs : Janvier 2019
3009/3010	UK10	22 avril 1994	16 janvier 1996	19 octobre 2004	
3011/3012	UK11	27 mai 1994	27 septembre 1996	19 octobre 2005	
3013/3014	UK8	1 ^{er} juillet 1994	10 novembre 1994	2 février 2005	
3015/3016	UK9	7 octobre 1994	19 décembre 1994	5 décembre 2005	Motrice : juin 2014 ¹ Voitures : juillet 2015
3017/3018	UK12	7 octobre 1994	20 février 1995	8 avril 2005	
3019/3020	UK14	11 novembre 1994	18 juin 1995	15 novembre 2005	
3021/3022	UK15	11 novembre 1994	31 octobre 1995	5 janvier 2005	
3999	M62	2 septembre 1996			Janvier 2017
SNCB – 4 rames					
3101/3102	UK1	31 octobre 1993	8 février 1996		
3103/3104	UK2	17 décembre 1993	9 novembre 1994	12 juillet 2005	
3105/3106	UK6	22 avril 1994	28 septembre 1994	11 mai 2005	
3107/3108	UK7	27 mai 1994	9 décembre 1994	22 février 2005	
SNCF – 16 rames					
3201/3202	PS2 / F16	8 juin 1993	31 octobre 1995	28 avril 2005	
3203/3204	F1	24 septembre 1993	9 mai 1996		
3205/3206	F2	2 novembre 1993	30 novembre 1994	12 septembre 2004	Août 2018
3207/3208	F3	10 décembre 1993	10 février 1996	22 novembre 2004	
3209/3210	F4	14 janvier 1994	30 septembre 1994	25 mai 2005	Avril 2019
3211/3212	F5	25 février 1994	12 août 1994	23 janvier 2005	Motrices : Juin 2015 Voiture : Juillet 2016
3213/3214	F6	18 mars 1994	12 août 1994	28 juin 2005	
3215/3216	F7	1 ^{er} avril 1994	12 août 1994	13 juin 2005	
3217/3218	F8	6 avril 1994	20 septembre 1994	12 décembre 2005	
3219/3220	F9	27 avril 1994	20 octobre 1994	26 août 2004	Février 2017
3221/3222	F10	24 juin 1994	4 novembre 1994	23 mars 2005	Décembre 2017
3223/3224	F11	12 août 1994	30 décembre 1994	18 septembre 2005	
3225/3226	F12	9 septembre 1994	3 mars 1995		
3227/3228	F13	30 septembre 1994	19 mai 1995		
3229/3230	F14	28 octobre 1994	30 juin 1995	30 septembre 2004	Juillet 2017
3231/3232	UK13	28 octobre 1994	25 avril 1995	5 janvier 2005	
EUKL NOL – 7 rames					
3301/3302	FN1	23 juin 1995	31 mars 1998		
3303/3304	FN2	21 mai 1996	31 mars 1998		
3305/3306	UN1	29 septembre 1995	31 mars 1998		
3307/3308	FN3	17 septembre 1995	31 mars 1998		
3309/3310	UN2	23 juillet 1995	31 mars 1998		
3311/3312	UN3	7 mai 1996	31 mars 1998		
3313/3314	UN4	30 novembre 1996	31 mars 1998		

¹ : Les motrices rénovées 3015/3016 ont temporairement été renumérotées 3211/3212 puisqu'elles encadraient le tronçon de la rame 3211/3212 pendant que le tronçon de la 3015/3016 et que les motrices de la 3211/3212 étaient en cours de rénovation.

Annexe 4 – Kilométrage des rames (au 14 août 2026).

Demi-rame	Kilométrage cumulé
3007	7 319 714 km
3008	7 427 687 km
3015	7 054 881 km
3016	7 082 975 km
3205	7 963 280 km
3206	8 203 389 km
3209	7 613 638 km
3210	7 615 112 km
3211	8 691 046 km
3212	8 648 147 km
3219	7 902 553 km
3220	7 981 140 km
3221	8 351 288 km
3222	8 234 315 km
3229	8 021 891 km
3230	8 276 371 km
3999	38 000 km (août 2025)

Glossaire

2' : Bogie à deux essieux porteurs	IGBT : Insulated-Gate Bipolar Transistor
ACEC : Ateliers de constructions électriques de Charleroi	IPE : Intensité Perturbatrice Equivalente
ADSA : Agence Design programmes SA	Ipso : Intensité Psophométrique
AFP : Amélioration du Facteur de puissance	IRA : Irish Republican Army
AGATE : Advanced GEC-Alsthom Traction Electronics	ISO : International Organization for Standardization
ANF : Ateliers de construction du Nord de la France	KVB : Contrôle de Vitesse par Balise
APT-P : Advanced Passenger Train - Prototype	LC : Filtre bobine-condensateur
ATB : Automatische Treinbeïnvloeding	LGV : Ligne à Grande Vitesse
ATESS : Acquisition et Traitement des Événements de Sécurité en Statique	LN : Ligne Nouvelle
AWS : Automatic Warning System	MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion
Bo'Bo' : Bogie bimoteur à deux essieux motorisés	MOSFET : Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
BR : British Rail	MTE : Matériel de Traction Électrique
BREL : British Rail Engineering Limited	NF : Norme Française
BS : British Standards	NOL : North Of London
BSM : Bourg-Saint-Maurice	ODAF : Oil Directed Air Forced
CAS : Commande Asynchrone Standard	OPMV : Opération Mi-Vie
CEN : Comité Européen de Normalisation.	PBA : Presse Bouton Automotrice
CENELEC : Comité Européen de Normalisation Électrotechnique.	PBA : Paris – Bruxelles – Amsterdam
CIG : Commission Intergouvernementale de Sécurité	PBKA : Paris – Bruxelles – Köln – Amsterdam
CSS : Commande Synchrone Standard	PBL : Presse Bouton Locomotive
CTR : Channel Tunnel Route	POS : Paris – Ostfrankreich – Süddeutschland
CTRL : Channel Tunnel Rail Link	PS : Pre-serie
CTSA : Autorité de Sécurité du Tunnel sous la Manche	PSE : Paris Sud-Est
DBTF : Disjoncteur Basse Tension Ferroviaire	RCC : Rail Control Center
DCMD : Differential Current Monitoring Device	RMS : Root Mean Square
DT50 : Détecteur 50 Hz	RS : Répétition des Signaux
ECML : East Coast Main Line	SIAC : Système Informatique d'Aide à la Conduite
EIL : Eurostar International Limited	SNCB : Société Nationale des Chemins de fer Belges
EPROM : Erasable Programmable Read-Only Memory	SNCF : Société Nationale des Chemins de fer Français
EPS : European Passenger Services	SR10 : Suspension Rame n°10
EPSF : Établissement Public de Sécurité Ferroviaire	STI : Spécification Technique d'Interopérabilité
ERA : Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer	TBL : Transmission Balise-Locomotive
ET : Eurotunnel	TCO : Traction CEM-Oerlikon
ETCS : European Train Control System	TERGV : Train Express Régional à Grande Vitesse
FEP : Frein Électropneumatique	TGV : Train à Grande Vitesse
FIEF : Freinage d'Immobilisation pour Essai de Frein	TML : Transmanche Link
GBE : Garé Bon État	TMST : Transmanche Super Train
GEC : General Electric Company	TMSTG : Transmanche Super Train Group
GNER : Great North Eastern Railway	TORNAD : Token Ring Network Alsthom Device
GPI : Groupe de Projet International transmanche	TPWS : Train Protection and Warning System
GPU : Grand Plongeur Unique	TVM : Transmission Voie Machine
GTO : Gate Turn-Off	UIC : Union Internationale du Chemin de fer
HRKS : Hyper Rapide Kerdoncuff Schneider Westinghouse	UIT : Union Internationale des Télécommunications
HSI : High Speed I	UM71 : Universel Modulé 1971
HSCB : High Speed Circuit Breaker	VACMA : Veille Automatique par Contrôle du Maintien d'Appui
ICMU : Interference Current Monitoring Unit	VI : Vitesse Imposé

Bibliographie

Victor Sabaté – Traction électrique ferroviaire – Convertisseurs et moteurs. Techniques de l'ingénieur, D5502 VI, mai 1998.

Marc Debruyne – Apport de l'électronique de puissance pour la traction électrique. Techniques de l'ingénieur, D3278 VI, août 2010.

Revue de l'AFAC – L'expérience de la SNCF. N°399 1989/6.

Marc Debruyne, Michel Durochat, Gilbert Desplanques – La traction synchrone.

EPS – Class 373 introduction, août 1995.

ACTGV – TGV Transmanche 3 Capitales, février 2012.

Marek Graff – Historia pociągów TGV Eurostar, mars 2011. (pl)

Florent Brisou – TGV Transmanche ("TransManche Super Train").

André Cossé – Essai de transmission asynchrone avec convertisseur statique à la SNCF. Revue Générale du Chemin de Fer, octobre 1977.

Daniel Brun – La conception et la réalisation des rames Eurostar : un projet sortant de l'ordinaire. Intermines, mai 2014.

Alain Jeunesse – Engins expérimentaux à moteurs à courant alternatif : les onduleurs, mai 2019.

Alain Jeunesse – Les fondamentaux ferroviaires 9. La chaîne de traction électrique, partie 4, janvier 2025.

David Haydock – Channel Tunnel, 25 Years of Experience, 2020. (en)

Christian Leclerc – L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire. Revue 3E.I, n°43, décembre 2005.

Alain Jeunesse – Les perturbations électriques dans le domaine ferroviaire. Revue 3E.I, n°19, décembre 1999.

Daniel Brun, Marc Provoost, Claude Pujol – Les rames Eurostar. Revue Générale du Chemin de Fer, février 1994.

François Lacôte – La famille TGV : 40 ans de service commercial, 4 générations. Bulletin de la Sabix n° 68, mars 2022.

Daniel Brun – Logique de projet et normalisation : comment a été traité le cas concret d'Eurostar dans un domaine essentiel : les normes anti-incendie. Revue d'histoire des chemins de fer n°26, février 2003.

Olivier Brun – Les rames Eurostar « NOL » (North of London). Revue Générale du Chemin de Fer, décembre 2008.

Figures 2 et 27 : Daniel Brun, Marc Provoost, Claude Pujol – Les rames Eurostar. Revue Générale du Chemin de Fer, février 1994.

Figure 9 : Revue de l'AFAC – Avec l'achèvement de la CTRL1, le Royaume-Uni s'ouvre aux 300km/h. N°482 2003/5.

Figure 46, Annexe 2 : Christian Leclerc – L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire. Revue 3E.I, n°43, décembre 2005.

Figure 59 : Brush Traction – AC traction drive system, Brochure, Années 90.

Figure 83 : Revue de l'AFAC – L'expérience de la SNCF. N°399 1989/6.



Aquarelle format A4 offerte par la SNCF lors de l'inauguration du 6 mai 1994. L'œuvre, éditée à deux mille exemplaires, est signée Raymond Moretti. À cette œuvre était joint la mention « Inauguration officielle du Tunnel sous la Manche. Le Vendredi 6 Mai 1994 [Nom] a voyagé à 45 mètres sous le fond de la mer en Eurostar ».

Document : collection Alain Jeunesse.



Symbole des premières relations transmanche, le TGV TMST est le fruit d'une collaboration tri-nationale entre la France, l'Angleterre et la Belgique.

Ce document retrace l'histoire de ce matériel, mais aussi la technologie lui permettant de circuler aussi bien à 300 km/h en France qu'alimenté par 3^e rail en Angleterre.



<https://cgvf.fr> - contact@cgvf.fr