

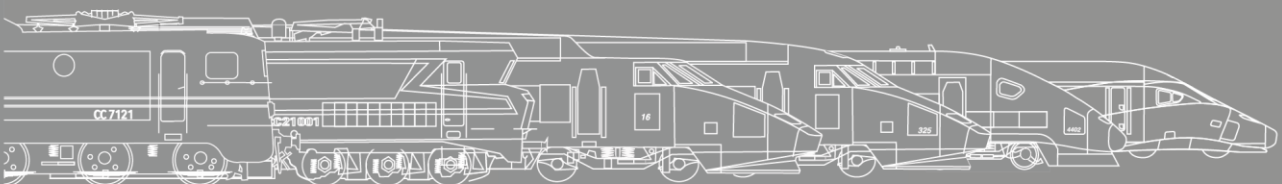
Histoire

La barre des 500 km/h est franchie
en mai 1990

« Le « 515,3 » km/h »

François LACÔTE & Alain JEUNESSE

18 Mai 2021



Sommaire

Edito	Témoignage de François LACÔTE	3
1	Un défi pour franchir la barre des 500 km/h	5
2	La genèse du projet TGV 117	5
3	Le choix du domaine d'essais	6
3.1	Le profil en long	7
3.2	L'alimentation électrique	8
3.3	Les sous-stations du domaine d'essais	8
3.4	La caténaire	10
3.5	La sécurité du domaine d'essais	11
4	Les rames de deuxième génération : TGV A	11
5	La rame 308	12
5.1	Rôle de servitude	14
5.2	Rame balai	14
5.3	Réglage de la tension caténaire	14
6	Le record de décembre 1989 : 482,4 km/h	14
6.1	La rame 325 de décembre 1989	14
6.2	Les limites du couple pantographe caténaire	16
7	Un record peut en cacher un autre	17
7.1	Dépasser le cap des « 500 »	18
7.2	La rame 325 de mai 1990	18
7.3	Le captage et le pantographe	19
7.4	Aérodynamique de l'archet	20
7.5	Caractéristiques principales comparées de la rame 325	21
7.6	La marche 18-21	22
8	Bilan de l'Opération TGV 117	26
8.1	Les marches à grande vitesse	26
8.2	Performance de la rame 325	27
9	Les retombées	28
9.1	Exportation	28
9.2	Service commerciale	28
10	Bibliographie	30

Le « 515,3 » km/h

TGV 117 : les objectifs d'un record de vitesse

A chaque génération de TGV son record

Depuis la première génération, mise en service en septembre 1981, trois autres générations de TGV se sont succédées en l'espace de 40 ans, la génération du TGV Atlantique représentant la seconde génération, mise en service en septembre 1989 ; la rame 325 en constituant un représentant emblématique avec le record de vitesse de 515,3 km/h établi le 18 mai 1990.

D'une génération à la suivante, la SNCF a souhaité faire progresser, en parallèle, et non l'un au détriment de l'autre, la performance de vitesse, le confort du voyageur, l'économie de l'exploitation (avec son corollaire direct le prix pour le client), et l'impact sur l'environnement (et d'abord le bruit dans l'environnement).

L'arrivée de chaque génération a été « sanctionnée » par l'établissement d'un record de vitesse, avec un écart considérable (plus de 100 km/h) entre la vitesse du record et la vitesse d'exploitation envisagée.

La célébration du record du **18 mai 1990** établi par la rame 325 est l'occasion de rappeler les circonstances de ce record et les objectifs poursuivis, comme pour les autres records TGV.

18 mai 1990, l'aboutissement de trois campagnes d'essais TGV (4^{ème} trimestre 88, 4^{ème} trimestre 89, premier semestre 90).

Durant ces trois périodes, la rame PSE 88 (équipée des équipements de traction du futur TGV Atlantique) puis la rame ATL 325 ont pu explorer un très grand nombre de domaines liés à la grande vitesse, comme :

- ✚ La dynamique du contact roue-rail et du bogie grande vitesse, avec plusieurs caractéristiques d'amortisseurs anti-lacet caisse-bogie, cela pour établir la meilleure solution entre la sécurité de roulement (stabilité du bogie) et le niveau vibratoire transmis (confort en caisse) et la motorisation à moteurs synchrones auto-pilotés, pour la rame 88 établissant un record à 408,6 km/h le 12 décembre 1988 ;

- ✚ La stabilité dynamique en grande vitesse, la dynamique du captage à très haute vitesse, avec la rame 325 établissant un record à 482,4 km/h le 5 décembre 1989 ;

- ✚ La dynamique de circulation en courbe de grand rayon et forte insuffisance de dévers : 190 mm d'insuffisance de dévers en courbe de 4500 m, à la vitesse de plus de 360 km/h en mars 1990 ! ;

- ✚ La dynamique de circulation à très haute vitesse sur aiguilles (variation locale de la conicité roue-rail) : la gare de Vendôme a été franchie plusieurs fois à plus de 480 km/h ;

- ✚ Le niveau de bruit dans l'environnement dans la plage 400-500 km/h, permettant une comparaison très intéressante (même niveau de bruit) avec le système à sustentation magnétique, jusque-là réputé moins bruyant ! ;
- ✚ Le comportement du système de traction (transformateurs, onduleurs, moteurs) à moteurs synchrones dans des conditions extrêmes.
- ✚ Sans parler des très riches enseignements sur le comportement de l'infrastructure, recueillis par nos collègues de l'infrastructure.

Des objectifs et des retombées multiples

L'objectif premier de ces campagnes d'essai à très haute vitesse est donc d'explorer dans toutes ses composantes le système ferroviaire, et en particulier le matériel ferroviaire et ainsi :

- ✚ d'abord de vérifier la pertinence de leur conception dans des conditions aux limites ;
- ✚ de corriger ou adapter tel ou tel élément (exemple de l'adoucissement des amortisseurs anti-lacet pour un meilleur confort vibratoire, cela permis par la marge de sécurité mise en évidence par ces essais) ;
- ✚ ensuite de continuer à explorer le domaine des très hautes vitesses pour préparer l'avenir et les générations futures.

C'est aussi un ensemble d'évènements aux retombées multiples.

En interne à l'entreprise, renforcer le dialogue, la compréhension mutuelle et la confiance réciproque entre les différentes entités de l'entreprise SNCF en charge du développement et de la réalisation des différents sous-systèmes composant le système TGV ; à titre d'illustration, soulignons que de telles performances n'auraient jamais été possibles sans une qualité extraordinaire de l'infrastructure, merci Messieurs les Ingénieurs de la Voie !

Toujours en interne à l'entreprise, ce record est un puissant moteur de cohésion, d'adhésion et de fierté d'appartenance pour tout le personnel

Vis-à-vis des Pouvoirs Publics, c'est une démonstration de la maîtrise assurée par la SNCF d'un système de transport appelé à transporter des millions de citoyens voyageurs, sous la responsabilité finale de l'Etat qui délivre l'autorisation de la mise en circulation commerciale.

Pour les voyageurs, c'est certainement une preuve de la marge considérable qui existe, en termes de sécurité et de fiabilité de la circulation, entre la vitesse commerciale et la vitesse extrême possible démontrée par une rame de série (adaptée à la marge, sans modification majeure).

Et enfin, en externe, cet évènement, et surtout la totalité de la campagne d'essais assurée par la même rame TGV, pendant plusieurs semaines, sans intervention de maintenance significative, de très nombreuses fois à plus de 400 km/h, représentent un formidable moteur de promotion dans le monde de l'excellence de la technologie française de la grande vitesse ferroviaire ; et à travers cette technologie « grande vitesse », c'est plus généralement le savoir-faire français dans toutes les composantes du système ferroviaire qui est mis en valeur. Bien entendu je n'oublie pas que dans ce domaine c'est vraiment

le « pack français », associant SNCF et industrie ferroviaire française, qui est à la manœuvre.

Sans exagérer, et pour l'avoir vécu, je peux dire que ce succès de la rame 325 a certainement eu une influence sur la décision d'attribution à la France des contrats relatifs au TGV Espagne comme pour le TGV Corée.

En conclusion, permettez-moi d'exprimer un grand merci à toutes les équipes SNCF (études, essais, maintenance), et aux industriels impliqués, qui ont fait vivre magnifiquement la technologie TGV en France et dans le monde.

François LACÔTE

1 - Un défi pour franchir la barre des 500 km/h

Nous sommes encore à une époque où la livraison d'un nouveau matériel coïncide avec la mise en service d'une infrastructure nouvelle. Les rames TGV Atlantique, TGV de deuxième génération, viennent d'être mises en service commercial sur la nouvelle ligne à Grande Vitesse Atlantique. Un premier tronçon ouvert en septembre 1989, dessert d'une part le bassin ligérien : Le Mans, Angers, Nantes et d'autre part la Bretagne vers Brest et bientôt vers Lorient (1991) en attendant l'électrification complète jusqu'à Quimper (1992). A partir de septembre 1990, l'ouverture de la branche « Aquitaine » étoffera l'offre commerciale vers Tours et la façade Atlantique Sud-Ouest.

Alors retraçons aujourd'hui une page notre l'histoire ferroviaire. Tentons avec les témoins de cette « aventure » exceptionnelle d'apporter quelques éclairages sur cette fabuleuse campagne d'essais à très grande vitesse. Ce document est construit principalement à l'aide de : M. François LACÔTE, Gérard AUDITEAU, Claude MARO, Daniel BEYLOT, Gérard HEULLANT, Pierre CHANAL, Christian COURTOIS et Alain JEUNESSE. Merci également à Romuald et à Diane qui se reconnaîtront, pour leur aide précieuse !

2 - La genèse du projet TGV 117

Début 1988 une idée de record planait dans les coulisses de la Direction Générale de la SNCF. Certains se demandaient « *s'il ne suffisait pas de franchir la "barre" des 400 km/h* ». François LACÔTE alors chargé du programme TGV au sein du Département de la Construction à la Direction du Matériel (MC), avec une grande force de persuasion, avait obtenu l'accord pour 420 km/h, d'où le nom de « l'Opération TGV 117 », soit 117 m/s, en écho au projet « V100 » de février 1981 qui s'était conclu par un nouveau record mondial de vitesse sur rail à 380 km/h. N'oublions pas qu'à cette époque, le 1^{er} mai 1988, nos amis allemands viennent de rouler à 406,9 km/h sur la ligne à grande vitesse Hanovre-Wurtzbourg (Würzburg) avec une rame ICE raccourcie. Les essais de la rame PSE 88 ont très vite montré les capacités en termes de puissance développée à la jante de la nouvelle motorisation à moteur synchrone. Tous à bord avaient bien compris l'interdiction absolue de reprendre aux allemands leur record du 1^{er} mai. Mais il n'a pas été facile, le dernier jour des essais de décembre 1988, de « retenir » la rame 88 avec « un discret » 408,6 km/h non homologué bien sûr !

Par ailleurs, dès février 1989, au laboratoire électrotechnique de Vitry-sur-Seine une petite équipe « ALSTOM_SNCF » travaille au banc d'essais et prépare les réglages qui seront appliqués aux blocs moteurs de la rame 325.

La campagne d'essais de montées en vitesse, baptisée « Opération TGV 117 », vise à explorer le domaine de vitesse supérieure à 400 km/h, en utilisant toute l'expérience acquise lors des précédentes marches à grande vitesse, aussi bien pour le domaine de l'infrastructure que pour le domaine du matériel roulant.

En effet les équipes de l'infrastructure, en établissant le tracé de la branche Aquitaine avaient déjà imaginé une portion de ligne nouvelle permettant des essais à très grande vitesse, avec un profil en long et des rayons de courbure particulièrement soignés.

C'est aussi un défi pour une nouvelle génération de rame TGV : le TGV Atlantique. Le contrôle commande de la rame est structuré autour d'un réseau informatique : « le SIE » (Système Informatique Embarqué). Le moteur de traction est un moteur à courant alternatif : « le moteur synchrone auto-piloté ». Le pilotage et la gestion des blocs moteurs sont organisés autour d'un microprocesseur de type 68000.



Figure 1 : Rame 88 : préfigure la motorisation des rames TGV Atlantique. Elle assure les premières montées en vitesse sur la LGVA.
Photo Jean-Paul DEMOY

Le captage, est assuré par un nouveau pantographe dont le second étage de l'AMDE du TGV PSE est remplacé par un noyau amortisseur appelé « Grand Plongeur Unique » (GPU).

Les montées en vitesse pour la réception de la LGV débutent avec la rame TGV PSE 88, prototype de la future motorisation du TGV Atlantique (Figure 1), puis avec la rame TGV A 308 réduite à 8 remorques.

Les R2 et R7 n'ayant pas d'équipements particuliers ont pu être facilement extraites de la rame.

3 - Le choix du domaine d'essais

La LGV Atlantique à la forme d'un Y (Figure 2) avec un tronc commun de Paris à Courtalain (PK 131). Une branche desservant Le Mans, Nantes et la Bretagne. Une autre desservant Tours et l'Aquitaine. Le domaine d'essais s'étend sur un peu plus de 96 km, du PRS N°16 de Dangeau situé au PK 114, au CAI 210 (PK 210), situé à l'entrée nord du tunnel de Vouvray sur la branche Aquitaine.

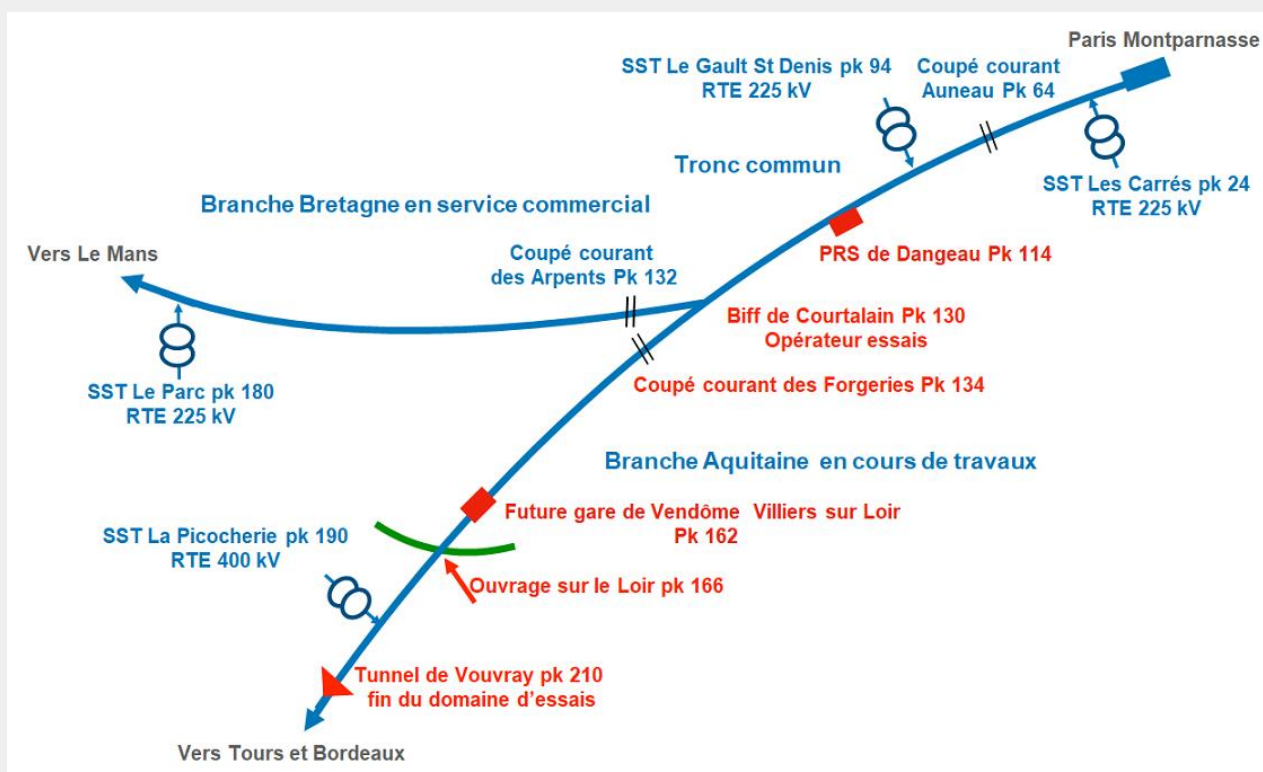


Figure 2 : Représentation schématique de la LGV Atlantique

La zone où la vitesse sera maximale se situe peu après la gare de Vendôme, lorsque la ligne plonge vers la vallée du Loir. Le tronc commun et la branche Bretagne ont été mis en service commercial depuis le 24 septembre 1989. Les trains à destination de Nantes et Rennes, y roulent déjà à 300 km/h. En régime commercial, l'appareil de bifurcation de la Voie 1 à Courtalain est franchissable en voie directe vers Tours, à 300 km/h et en voie déviée vers le Mans, à 220 km/h

3.1 - Le profil en long

Le profil en long montre un parcours favorable dans le sens Dangeau-Vendôme-Vouvray avec un dénivelé de l'ordre de 85 m.

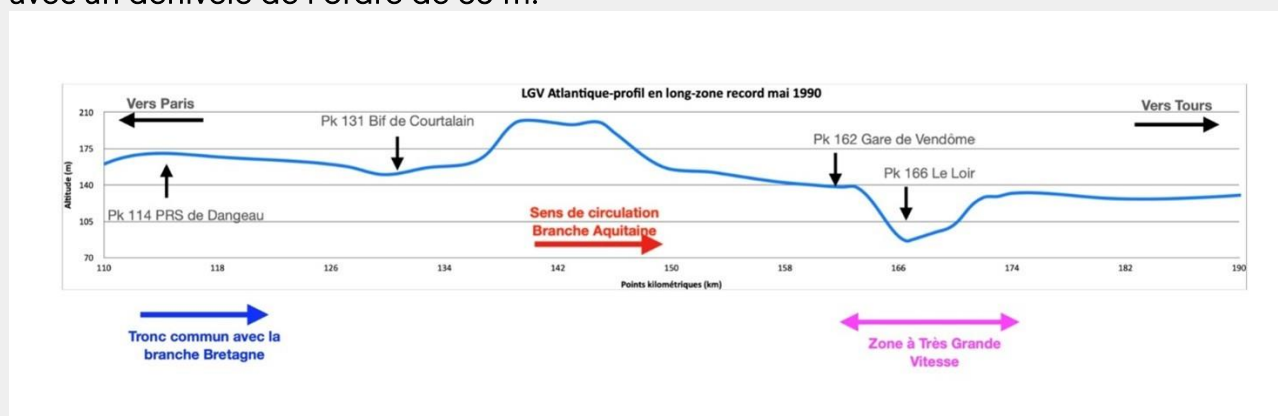


Figure 3 : LGV Atlantique : profil en long de la zone de montée en vitesse pour établir les records en décembre 1989 et mai 1990. Le dénivelé est de l'ordre de 85 m.

Les principales difficultés sont :

- Le passage sur l'appareil de bifurcation de Courtalain qui doit rester actif pour laisser passer le service commercial en déviation vers Le Mans ;
- Une rampe en 18 ‰ après le « couper-courant » des Forgeries ;
- Les appareils de voie de la gare de Vendôme-Villiers-sur-Loir.

Les avantages sont :

- La longue déclivité vers Vendôme ;
- La pente en 25 ‰ juste après la gare de Vendôme Villiers-sur-Loir, PK 162 ;
- Les courbes dont le rayon de courbure croissant depuis la bifurcation de Courtalain jusque vers le kilomètre 178, à Saint-Amant, en passant de 6000 m à 15000 m.

3.2 - L'alimentation électrique

Le schéma d'alimentation de la LGV Atlantique est illustré en page précédente (figure 2). Le tronc commun est alimenté par deux sous-stations : les Carrés située à la sortie côté province du tunnel de Villejust, et le Gault St Denis située au PK 94 + 750. La branche « Bretagne » est alimentée par le Parc à proximité de Connerré. Ces trois premières sous stations sont connectées au réseau de transport 225 kV de RTE.

La branche « Aquitaine » est alimentée par la sous-station de la Picocherie au PK 190 : première sous-station de la SNCF connectée au réseau 400 kV.

Toute la ligne est alimentée en « 2x25 kV ».

3.3 - Les sous stations du domaine d'essais

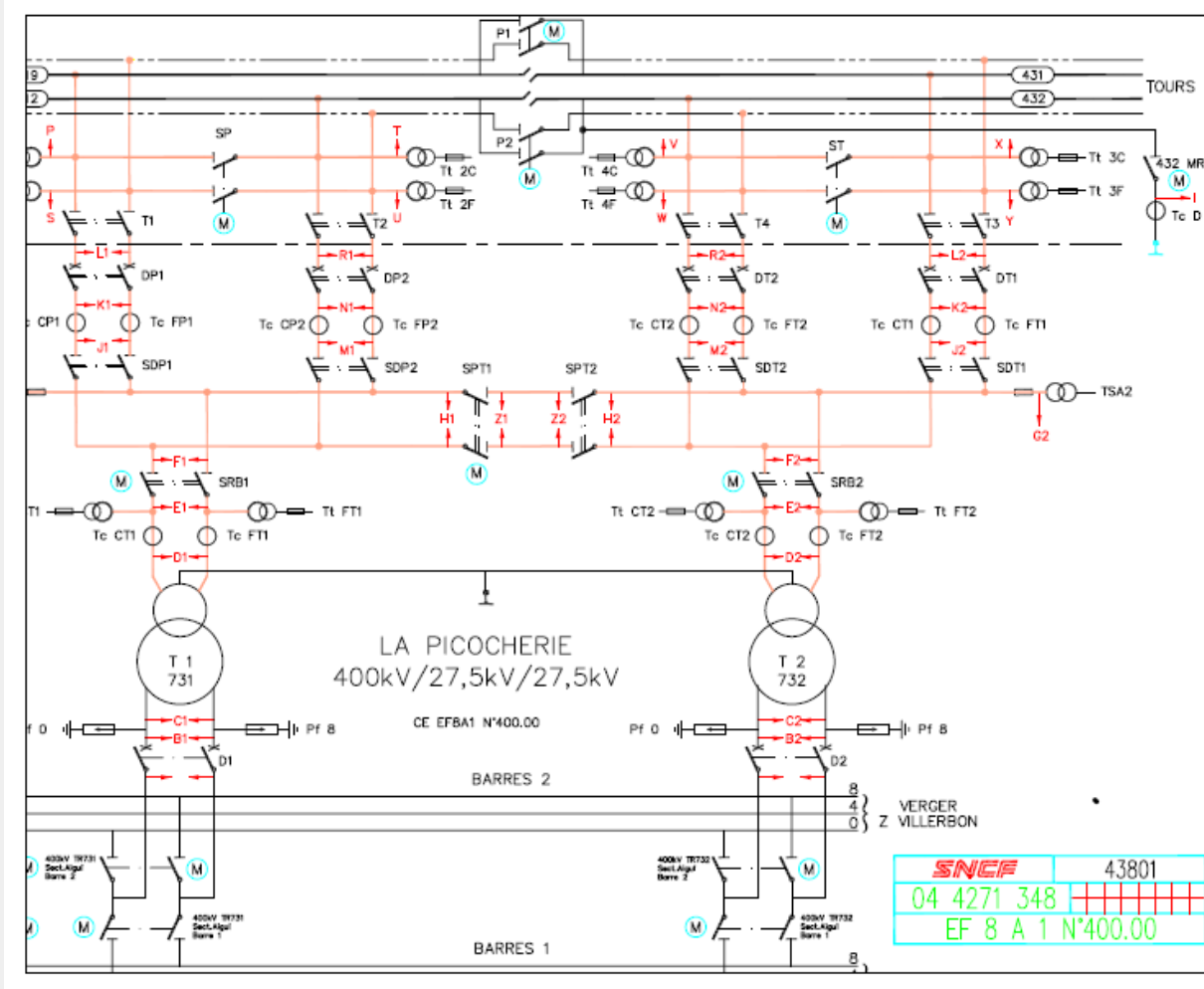
L'alimentation électrique du domaine d'essais est assurée par deux sous-stations :

- **Le Gault St Denis**, sur le tronc commun située au PK 94+750, elle est raccordée en antenne par deux lignes monophasées au réseau 225 kV RTE. Elle est équipée de 2 transformateurs de 60 MVA - 225 kV/2 fois 27,5 kV
- **La Picocherie**, sur la branche Aquitaine au PK 190, est alimentée par le poste RTE installé sur la ligne de transport 400 kV reliant les postes de Distré dans Maine et Loire et le poste de Villerbon dans Loire et Cher.



- La sous-station et le poste RTE sont installés sur le même site. Les deux transformateurs qui la composent sont d'une puissance apparente de 60 MVA également, avec un rapport de transformation 400 kV/ 2 fois 27,5 kV (figure 4).

Figure 4 : Sous-station de La Picocherie
Schéma de principe et transformateur
400 kV/ 27,5kV/ 27,5 kV
Document SNCF Réseau



Afin de ne pas couper l'effort de traction, la SNCF a demandé à RTE de connecter ces deux sous-stations sur la même phase du réseau national de transport. Ainsi le « couper-courant » des Forgeries situé au PK 134+680 a pu être effacé. La prouesse est aussi à partager avec les services de RTE.

3.4 - La caténaire

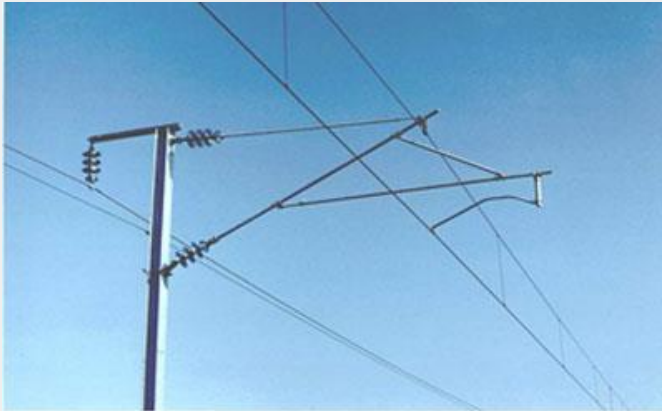


Figure 5 : LGV A : la caténaire, principe de la pendulation.

Côté gauche du poteau le feeder 25 kV caractéristique du système 2 fois 25 kV

Les caractéristiques principales de la caténaire de la LGVA sont les suivantes :

Section du fil de contact : 150 mm²

Tension mécanique : 2000 daN

Elle ne dispose plus de sustentation en Y au droit des supports.

Cette disposition est illustrée par la figure 5 ci-contre.

Document SNCF Réseau



Au niveau du PK 166, sur la zone à très grande vitesse, la caténaire est dotée d'une instrumentation de mesure du soulèvement.

Cette disposition est illustrée par la figure 6.

Figure 6 : PK 166, instrumentation de mesure du soulèvement de la caténaire.

Document SNCF, collection Claude MARO

3.5 - La sécurité du domaine d'essai

La circulation sur le domaine d'essais est contrôlée par un « Opérateur essai » qui joue le rôle de régulateur. Il est situé à la bifurcation de Courtalain au PK 130. Il est en relation avec tous les intervenants : les chefs d'essais à bord des 2 rames TGV A, les postes de mesure au sol et avec le régulateur de la LGV A situé à Paris ; le tronç commun et la branche « Bretagne » sont parcourus par des rames commerciales !

Les ordres de circulation sont passés par dépêches entre l'Opérateur essais et les chefs d'essais situés à bord des rames 325 et 308.

4 - Les rames de deuxième génération : le TGV A

La conception des rames TGV Atlantique fait appel entre autre, à une nouvelle motorisation offrant une puissance bien supérieure à celle du TGV PSE. Le moteur à courant alternatif « synchrone autopiloté » est capable de 1100 kW pour une masse de 1550 kg alors que celui à courant continu du PSE développe pour une masse similaire une puissance de 535 kW. Ce saut de performance permet de passer de 6 à 4 bogies moteurs libérant ainsi les remorques d'extrémité. Ainsi le tronçon est entièrement dédié aux voyageurs.



Figure 7 : Rame TGV Atlantique

Photo Alain Jeunesse 2003

Le profil en long de la ligne Atlantique étant moins contraignant que celui de la LGV PSE avec des rampes limitées à un pourcentage réduit à 25 mm/m au lieu de 35, autorise une composition à 10 remorques au lieu de 8 (figure 7).

Ces nouvelles dispositions offrent une meilleure rentabilité commerciale. La figure 8 représente le diagramme de la rame TGV A.

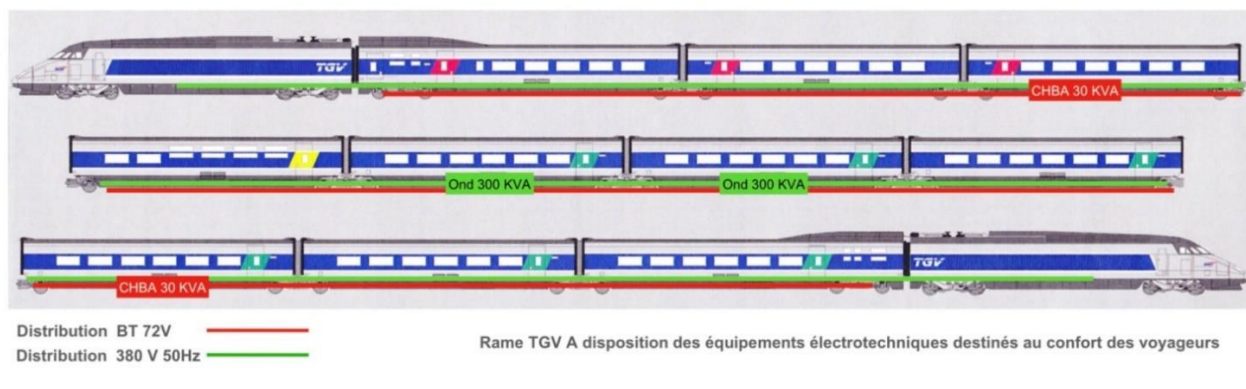


Figure 8 : Diagramme de la rame TGV A



Elles disposent également d'un nouveau pantographe.

Pour alléger la tête de captage, le second étage du pantographe AMDE du TGV PSE est remplacé par un cylindre amortisseur appelé « Grand Plongeur Unique » : GPU (figure 9).

Figure 9 : TGV Atlantique pantographe GPU
Photo Alain JEUNESSE

Les équipements électrotechniques dédiés à la fourniture d'énergie électrique pour le confort des voyageurs sont répartis le long du tronçon. En R5 et R6 sont disposés sous caisse les onduleurs 300 KVA (« OND 300 KVA ») fournissant en redondance l'énergie 380V 50Hz pour les climatisations, les chaînes de froid de la restauration, etc. En R3 et R8 se situent les chargeurs de batterie et leur batterie 72 V associée fournissant l'éclairage et l'énergie pour toutes les fonctions électriques nécessaires : en particulier les ordinateurs de remorque « ORDR », tous connectés au SIE.

La réduction du tronçon à 4 remorques puis à 3 remorques imposera d'installer des convertisseurs d'appoint pour assurer un minimum de confort à bord et surtout assurer les fonctions essentielles des ORDR en particulier l'anti-enrayage.

5 - La rame 308

Sortie de l'usine Alstom de Belfort en janvier 1989, elle fut la première rame de série à pénétrer sur la Ligne Nouvelle (LN2). Elle assurera en grande partie les montées en vitesse nécessaires à la réception de cette nouvelle ligne à grande vitesse, avant la remise des « clés » au Transport. Début août 1989, en préparation de la campagne d'essais à très grande vitesse, elle contribue à l'exploration du domaine de vitesse 380-400 km/h. Cette première étape est baptisée « V117 bis ». La figure 10 permet de découvrir la « 308 » dans sa composition à 8 remorques.



Figure 10 : La rame 308 dans sa composition 8 remorques lors des montées en vitesse pour la réception de la branche Aquitaine. Début août 1989.

Photo Jean-Paul DEMOY

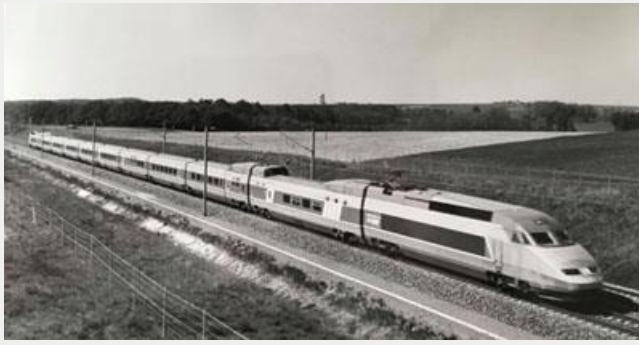


Figure 11 : : Rame 308 assurant le balayage de la zone d'essais. La voiture de mesure « Mélusine » est incorporée dans le tronçon composé alors de 8 remorques. Fin août 1989. *Photo Jean-Paul DEMOY*

Vers la fin du mois d'août la voiture de mesure « MÉLUSINE » sera incorporée entre la motrice et la R1, (figure 11). La figure 12 : présente « MÉLUSINE » Voiture d'Essais à Grande Vitesse (VEGV). Le rôle de cette voiture laboratoire est l'auscultation et l'observation à grande vitesse de l'infrastructure « voie et caténaire ». Elle dispose également d'une vigie d'observation visuelle du pantographe de la motrice située à proximité.



Figure 12 : Mélusine, voiture de mesure.

Collection Daniel BEYLOT

Les rôles de la rame 308

5.1 - Rôle de servitude

La rame 325 ne disposant plus de pantographe à courant continu, elle sera tractée par la rame 308 de l'Atelier du Matériel de Chatillon (AMC) jusqu'à la voie 3 de la future gare de Massy TGV pour retrouver le 25 kV. Ce stationnement permettait aussi à quelques personnalités d'embarquer à bord de la rame 325. Au retour vers le « stand », l'AMC, l'attelage est reconstitué sur la voie 4.

Le 18 mai 1990, pour limiter les échauffements inutiles avant l'exploit, la 308 a tracté la future championne jusqu'au PRS de Dangeau.

5.2 - Rame balai

La rame 308 effectue un « balayage » à 350 km/h avant chaque marche à grande vitesse. Ce rôle est capital pour la sécurité des essais. Divers enregistrements réalisés à bord de « Mélusine » renseignent sur la géométrie de la voie, l'état de la caténaire. Les observations visuelles sont également nécessaires pour signaler par exemple l'intrusion d'animaux sur la zone d'essais. Certains se rappelleront le chevreuil aperçu au voisinage du PK 150 qui retardera le départ de la « marche record » du 18 mai 1990.

5.3 - Réglage fin de la tension caténaire

Stationnée en gare de Vendôme (voie 4) pendant la campagne de mai 1990, la rame 308 mettait, sur commande des responsables des essais à bord de la rame 325, ses AFP (Système d'Amélioration du Facteur de Puissance) pour compenser les courants réactifs et ajuster très finement la tension caténaire à 29 kV sur les derniers kilomètres du parcours à très grande vitesse.

6 - Le record de décembre 1989 : 482,4 km/h.

6.1 - La rame 325 de décembre 1989

La réduction du tronçon à 4 remorques prive la rame de ses convertisseurs auxiliaires situés « normalement » en R3 et R8 pour la charge des batteries du tronçon. Le circuit basse tension assure essentiellement l'éclairage, l'alimentation des électroniques, et du relaying. Il est donc nécessaire d'installer, dans la partie « espace enfant » de la remorque d'extrémité R10, un convertisseur de charge batterie alimenté par le « 500 V » délivré par les motrices. La remorque R6 étant toujours présente dans la composition de la rame, la fourniture du « 380V 50 Hz » pour la climatisation du tronçon et des cabines de conduites est donc encore assurée.

La composition s'établit ainsi : **M1+R1+R4+R6+R10+M2.**

Les roues de 920 mm sont remplacées par des roues de 1050 mm. L'adoption d'un pont moteur de 49/46 sans changement de réducteur confère un rapport de réduction de 2,012 alors que les rames commerciales disposent d'un rapport de réduction de 2,1894.

Les motrices perdent leur pantographe 1500 V continu, et la motrice de tête, la M1, perd également son pantographe monophasé 25 kV. Les cavités pantographes sont obturées par un carénage.

Le laboratoire de mesure est installé dans la R1. Il permet d'enregistrer en continu environ 150 paramètres. Les acquisitions essentielles portent sur la sécurité de la circulation avec la mesure permanente des efforts sur la voie, l'observation du contact glissant pantographe-caténaire et la mesure des efforts exercés par la tête de captage, et enfin les enregistrements des paramètres électriques.

Les figures 13 et 14 donnent une vision du laboratoire où s'activent une vingtaine d'ingénieurs et techniciens.



Figure 13 : Visions du laboratoire installé dans la R1
Collection Claude MARO



Figure 14 : Au premier plan la chaîne de mesure des paramètres électriques : captage et motorisation
Collection Claude MARO



L'image prise à l'Atelier de Maintenance de Chatillon, dévoile le ruban tricolore du 482,4 km/h obtenu le 5 décembre près de Vendôme (figure 15).

Figure 15 : Rame 325 en décembre 1989 au stand
Photo Alain JEUNESSE

6.2 - Les limites du couple pantographe caténaire

Le « mur de la caténaire »

La marche à 482,4 km/h a mis en éclairage le phénomène de vibration du fil « suspendu » lié au déplacement du pantographe. La vitesse de propagation de l'onde ainsi créée est déterminée en partie, par la tension mécanique du fil de contact : c'est la « vitesse critique » de la caténaire. Ce phénomène s'accroît jusqu'au décrochement de la caténaire si la vitesse de déplacement du pantographe voisine de trop près cette vitesse critique. C'est le « mur de la caténaire » qu'il ne faut pas approcher de trop près !

La figure 16, ci-dessous, en est une illustration parfaite.



Figure 16 : Comportement critique du couple « pantographe-caténaire ». Images SNCF

L'expression suivante donne la vitesse critique de la caténaire en fonction de sa tension mécanique et sa masse par unité de longueur.

$$V = 3,6\sqrt{T/m} \quad \text{Avec :}$$

- V la vitesse critique en km/h ;
- T la tension mécanique en N ;
- m la masse par unité de longueur kg/m.

Ainsi le record établi en décembre 1989 est limité par le couple pantographe caténaire. Le soulèvement du fil de contact est de 33 cm, pour une limite fixée à 40 cm. La tension mécanique du fil de contact avait été réglée à 2600 daN du PK 161+063 au PK 170+646. La vitesse critique de la caténaire était donc de l'ordre de 505 km/h, la marge était de 23 km/h ! Peu suffisante pour assurer une circulation sans dégrader le système pantographe - caténaire. Pour la vitesse commerciale de 300 km/h, la tension normale du fil de contact est de 2000 daN, la vitesse critique est alors de 441 km/h, ce qui offre une marge confortable.

7 - Un record peut en cacher un autre

François LACÔTE nous fait part d'une conversation avec le Directeur Général de la SNCF : M Jean COSTET, qui déclencha une nouvelle phase de l'Opération V117, dont il faut rappeler que 117 m/s était la vitesse "strictement autorisée" par le directeur général (DG) lui-même.

« Lorsque à l'arrivée de la marche du 5 décembre avec 482,4 km/h, le DG a félicité l'équipe et demandé ce qui nous avait empêché de franchir la barre des 500 (sic !), et que je lui ai expliqué que nous avions buté sur la "vitesse critique" de la caténaire, il m'a demandé dans quelles conditions cette vitesse critique pouvait être repoussée à des valeurs plus élevées ; je lui répondis bien évidemment qu'il s'agissait de réexaminer la tension mécanique de la caténaire, et que nous pouvions examiner avec nos collègues de l'infrastructure les possibilités dans ce domaine.

Il donna ainsi son feu vert à cette exploration, et en cas de possibilité, à une nouvelle campagne d'essais visant à dépasser 500 km/h.

Apprenant cette décision, Etienne CHAMBRON, directeur de la LGV Atlantique, tout contrit, un peu tendu (voire fâché) me dit : « LACÔTE, tu feras bien ce que tu voudras, mais je t'annonce qu'en tout état de cause, j'ai à assurer la mise en service de la branche Sud-Ouest en septembre, et donc, quoiqu'on fasse, quoiqu'on dise, je terminerai d'équiper la gare de Vendôme et je poserai les aiguilles ! », les aiguillages en gare de Vendôme, en effet, n'avaient pas été posés pour cette première phase de TGV 117.

C'est ainsi qu'il fallut examiner les conditions de passage à très grande vitesse sur aiguilles (variation locale de la conicité au franchissement, et peut-être impulsion vers instabilité de bogie ???), et que l'on décida une campagne spécifique pour valider la possibilité de franchissement à plus de 490 km/h les aiguilles de la gare de Vendôme (campagne de mars 1990), campagne qui valida la possibilité de passage à 490/500 en sécurité en gare de Vendôme. »

7.1 - Dépasser le cap des « 500 »

Dépasser le cap des 500 km/h devient l'objectif fixé par l'équipe de direction. Il est alors impératif de déporter la vitesse critique de la caténaire vers 560 km/h en augmentant la tension mécanique du fil de contact jusque 3300 daN du PK 152+0027 au PK 172+794. De part et d'autre la caténaire sera tendue de manière progressive par paliers : 2000 à 2500 à 2600 à 2700 à 3000 à 3300 daN sans modification de la tension du fil porteur. La zone traitée est de l'ordre de 61 km. La vitesse record pouvait donc être établie au voisinage de 510 à 520 km/h en laissant une marge par rapport à la vitesse critique de la caténaire de 40 à 50 km/h.

La décision de sur-tendre n'a pas été simple car le fil de contact était en cuivre pur et la contrainte obtenue pour la tension souhaitée de 33 kN dépassait la limite élastique du cuivre. On était dans le domaine plastique, c'est-à-dire que si un allongement se produisait il était irréversible avec un risque de rupture. Des essais de cyclage mécanique ont été réalisés à la plateforme spécialisée de Vaires pour déterminer la durée pendant laquelle une telle tension pouvait être maintenue dans un fil de 150 mm². Comme le fil cassait au bout de quelques dizaines de cycles, *« c'était encore jouable : un record, c'est un cycle ... »*.

7.2 - La rame 325 de mai 1990

Faut-il raccourcir la rame 325 : c'est à dire réduire la composition à 2 motrices et 3 remorques ? La question fut posée au sein de l'équipe de direction. Peut-être, que certain pourrait parler de truquage ? Le DGA de l'époque, Roger GERIN, sans hésitation décida de « raccourcir » afin de se donner des marges pour assurer le passage du cap des 500 km/h.

La réduction du tronçon à 3 remorques prive la rame de sa remorque R6 sur laquelle est installé l'onduleur triphasé 300 KVA. Afin de donner un confort minimal à l'ensemble du personnel à bord ainsi qu'aux invités, il fut nécessaire de compléter l'installation de la partie « espace enfant » de la remorque d'extrémité R10 par un onduleur triphasé emprunté aux BB 26000.

L'adoption de « grandes roues » d'un diamètre de 1092 mm nécessite un calage entre caisse et bogie surélevant la structure de caisse des motrices de 40 mm. Pour limiter l'écoulement de l'air sous les caisses, l'étrave de la motrice de tête est abaissée de 100 mm au moyen d'un carénage.

La figure 17, ci-après, représente le diagramme de la rame TGV A 325.

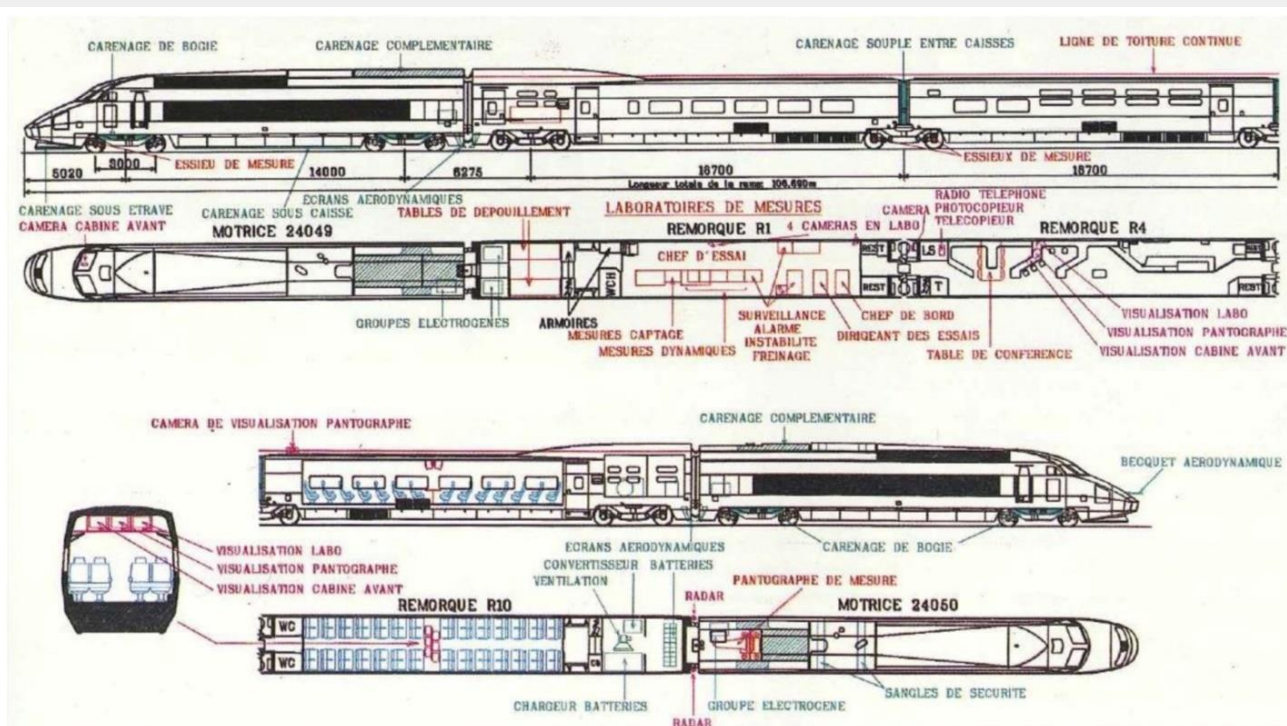


Figure 17 : Diagramme de la rame TGVA 325 « Opération TGV 117 bis » mai 1990.

Ligne de toiture 25 kV : pose d'une ligne de toiture 25 kV continue entre les deux motrices, supprimant ainsi les aspérités formées par les isolateurs de liaison entre caisse.

7.3 - Le captage et le pantographe

Le couple pantographe-caténaire est une illustration de ce qu'est un système intégré. Le sujet extrêmement sensible. A bord de la rame 325, il engendre d'après discussions avec Etienne CHAMBRON et les collègues de l'Infrastructure, sur le réglage du pantographe. Comme le précise aujourd'hui François LACÔTE : « *Tous prétendaient vouloir nous apprendre notre métier, mais c'est exact : nous avons beaucoup « pataugé !* » ».

Les bandes de frottement étaient en acier au silicium car à l'époque c'était le matériau d'origine des archets 25 kV. On ne connaissait pas encore bien le comportement du carbone dans ces conditions extrêmes « d'arcage » avec un courant supérieur à 600 A, d'autant que les premières montées en vitesse se déroulaient en période hivernale. De plus les archets dits « carbone » de l'époque étaient plus lourds que les archets « acier ». La masse de la tête de captage est l'ennemi n°1 de la très grande vitesse.

7.4 - Aérodynamique de l'archet

L'archet d'origine était en forme de U à l'envers avec une « grosse » sensibilité au vent comme l'archet n°1 de la vue ci-dessous (figure 18) (issue du cours de M Jean DAFFOS, résultats provenant des données de soufflerie). Il n'était donc pas possible de conserver une telle forme. Il a été décidé d'opter pour le profil n° 9 en fermant le U et en ajoutant des becquets.

A part qu'il fallait régulièrement remplacer les becquets « mangés » par les arcs, l'archet s'est plutôt bien comporté.

On a estimé par simulations que l'effort de contact était de l'ordre de 250 N à 515 km/h. La participation de l'archet était de 50 % environ.

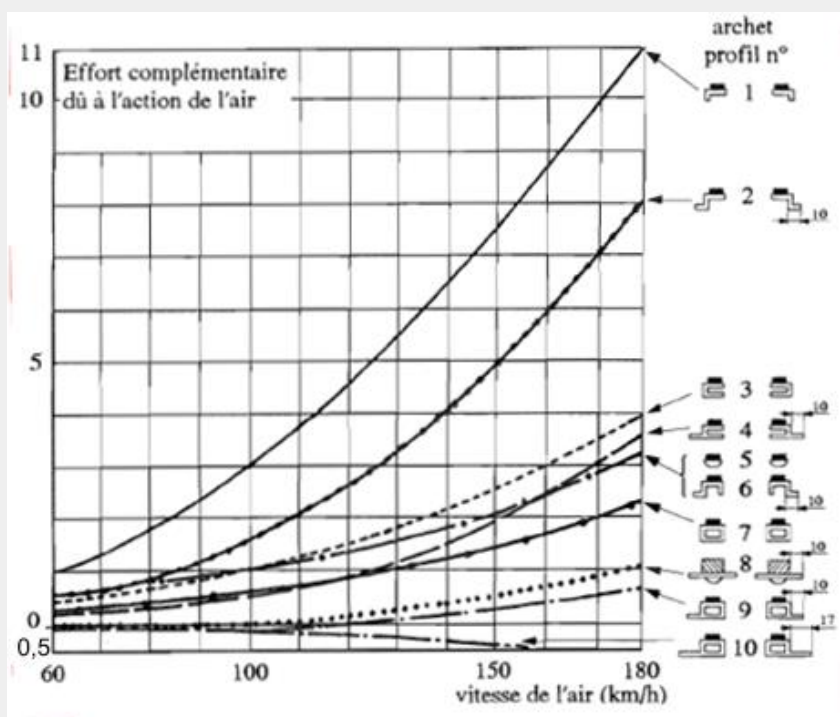


Figure 18, ci-contre :
Diagramme des efforts supplémentaires exercés par l'archet dû à l'action de l'air en fonction de la vitesse et du profil des archets.

Figure 18 : Document
Gérard AUDITEAU
SNCF CIM Le Mans

Le wagon graisseur. Un des responsables des essais avait observé que les bandes en acier étaient rouges à cause du cuivrage dû à un phénomène d'inclusion de cuivre de la caténaire dans les bandes. Le contact cuivre/cuivre étant très mauvais, il fallait tenter de graisser les bandes et le fil de contact, comme sous caténaire 1500 V. Un wagon graisseur a donc été commandé pour graisser la caténaire de la branche Aquitaine à partir de la bifurcation de Courtalain jusqu'à Vendôme.

Autre dilemme :

« Fallait-il limiter le soulèvement en bridant le développement du pantographe avec la butée LGV ? »

Cette butée est un dispositif qui limite le développement du pantographe à une hauteur de 5,28 m par rapport aux rails. Il est actionné uniquement sur LGV.

C'était la demande insistante des collègues de l'infrastructure (VZC à l'époque) pour limiter les soulèvements de la caténaire qui, il est vrai, avait tendance à s'envoler. Les experts coté Matériel, n'étaient pas convaincus par cette idée. L'expérience jouait plutôt en faveur du maintien de l'élasticité globale du système.

Finalement la limitation a été mise en œuvre, mais pas longtemps. Après plusieurs disjonctions qui ont ruinés une des marches, et une colère mémorable de M. Etienne CHAMBRON, celui-ci a édicté une nouvelle règle : « On laisse les leviers hiérarchiques au vestiaire et on laisse les experts faire leur boulot dans leur domaine ».

La limitation de développement par la butée LGV du pantographe a été immédiatement supprimée et la butée a retrouvé son réglage initial.

7.5 - Caractéristiques principales comparées de la rame 325

Caractéristiques	Version commerciale	Version V 117 Décembre 1989	Version V 117 Mars et Mai 1990
Composition	M+10R+M	M+4R+M	M+3R+M
Longueur (m)	237,590	125,390	106,690
Nombre de bogies	15	9	8
Masse en ordre de marche (t)	490	291,6	250
Puissance (kW) • Par moteur • Pour la rame	1 000 8 000	1 800 14 400	1 800 14 400
Diamètre des roues : • motrice • tronçon	920 920	1050 920	1092 920
Vitesse (km/h)	300	482,4	515,3

7.6 - La « marche 18-21 »

Ce jour-là, tout le monde aura aperçu avec un certain étonnement et quelque admiration, la motrice de queue équipée d'un becquet donnant à la rame une allure de « bolide de course ». Comme l'indique le Chef de Projet, François LACÔTE : *« c'est moi qui avait suggéré la pose de ce becquet sur le capot arrière de la motrice de queue ; je dois dire (et ils avaient certainement raison...) que les spécialistes aérodynamiciens m'avaient fait part de leur scepticisme vis-à-vis d'un effet significatif sur la diminution de résistance à l'avancement, ou l'accroissement de l'adhérence sur le bogie moteur arrière, mais c'était (au moins autant) aussi pour un envoyer un « clin d'œil » aux voitures de formule 1, et terminer de donner ainsi à cette rame une allure de « machine de course » »*. Figures 19 et 20 ci-dessous.



Figures 19

Photo Jean Paul DEMOY



Figure 20

Photo Alain JEUNESSE

Le becquet arrière de la rame 325, visible ici sur ces deux images. Sur la photo de droite prise à Dangeau sur le « pas de tir » le jour J. Une dernière « touche » visant à donner l'allure d'une formule 1. Aura-t-il une influence sur la traînée ? Apportera-t-il un effet bénéfique sur le terme C ?

Tous se souviennent de la présence des chevreuils sur la zone d'essais ce jour-là, comme d'ailleurs très souvent : en effet la ligne traverse des zones boisées implantées au milieu d'excellents pâturages pour ces animaux sauvages ayant peu de considération pour nos circulations à grande vitesse. Ainsi à bord, en attendant l'évacuation des animaux errants, François LACÔTE se chargeait des journalistes, expliquant pour les faire patienter, que l'on avait besoin d'un très grand nombre d'échanges avec les responsables de la ligne nouvelle avant d'avoir l'autorisation de départ.

Après l'échange des dépêches entre l'opérateur essais situé à Courtalain et le chef d'essais à bord de la rame 325, le quitus « voie et caténaire » donné par la rame 308 déjà stationnée voie 4 en gare de Vendôme Villiers-sur-Loir, la marche 18-21 est autorisée au départ.

Le chef d'essais et la « conduite » ont la confirmation que le coupé courant des Forgeries est effacé. Les sous stations du Gault-Saint-Denis et de La Picocherie sont alors raccordées sur la même phase du réseau RTE.

Les chevreuils observés par l'équipe de conduite de la rame 308 lors du « balayage » de la zone d'essais ont été endormis et évacués par les agents des eaux et forêt et de la SNCF.

A bord de nombreuses personnalités dont le ministre des Transports, M. Michel DELEBARRE, qui prendra place en cabine, mais aussi des représentants coréens et espagnols.

Cette fois ci le départ a été effectué au repère du PK 113 en voie directe (sur voie 1). Il permet de gagner quelques km/h par rapport au départ habituel donné à partir de la voie 3 de Dangeau. Comme certains témoins le diront : « l'accélération est fantastique ». La bifurcation de Courtalain qui devait être abordée à 370 km/h avec une tolérance de + 5 km/h est passée en réalité à 380 km/h. La zone d'aiguillage du PRS de Droué PK 138 est franchie à 420 km/h. Quelques minutes plus tard le « bolide » traverse la gare de Vendôme à plus de 500 km/h. La puissance absorbée à la caténaire est de l'ordre de 17 600 kW, l'accélération résiduelle encore disponible est 2,5 cm/s². A titre de comparaison, l'accélération résiduelle à la vitesse maximale de définition, pour une rame à grande vitesse, demandée par les Spécifications Techniques d'Interopérabilité (STI) est de 5 cm/s².

La pente vers le viaduc de Naveil sur le Loir, juste après les dernières aiguilles de la gare de Vendôme, apportera « le petit plus » pour atteindre, ce 18 mai 1990, les 515,3 km/h à 10h06 et récompenser le travail de toute les équipes affectées à cette « Opération V 117 ».



Figure 21 : Vendôme le 18 mai 1990 : « Marche Record », la rame 325 traverse la gare à un peu plus de 500 km/h. La photo est prise depuis la vigie de Mélusine intégrée dans la rame TGV A 308.

Photo Alain JEUNESSE



Figure 22 : Le 18 mai 1990 : passage à grande vitesse juste après le PK 166. Traction coupée et déjà en phase de ralentissement
Photo Jean-Paul DEMOY



Figure 23 : PRS de Saint Cyr du Gault PK 188, la rame TGV A 325 en décélération rejoint son point de rebroussement du PK 210.
Photo Alain JEUNESSE

Les photographies, figures 21, 22 et 23, donnent encore quelques émotions à tous ceux qui étaient aux abords du domaine d'essais pendant cette période fascinante des montées en vitesse. La figure 24, ci-dessous, représente le diagramme de vitesse de la marche « 18-21 » signé de la main même du ministre.

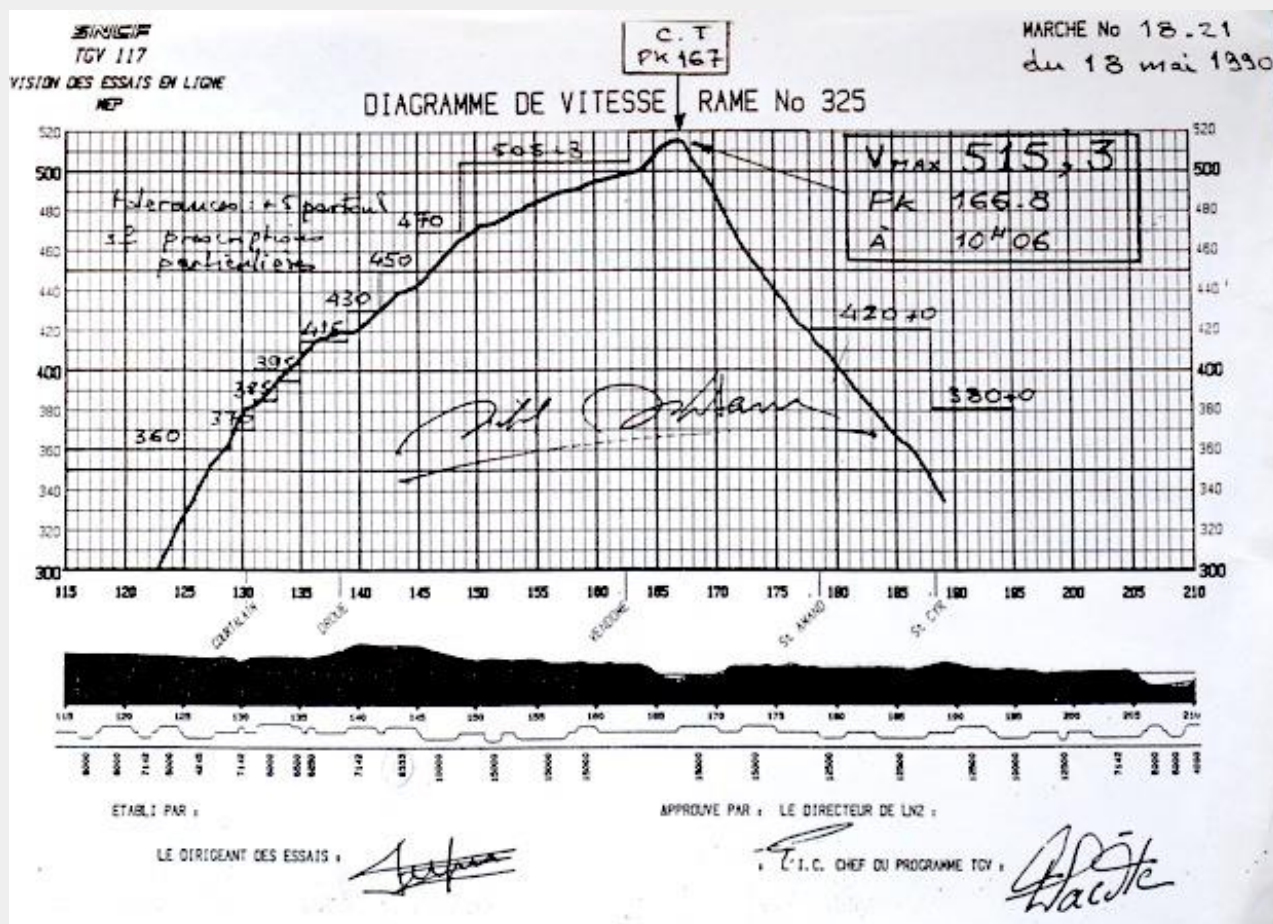


Figure 24 : 515,3 km/h PK 166,8 à 10 h 06 le 18 mai 1990. Diagramme de vitesse de la « marche record » signé par M. Michel DELEBARRE alors Ministre des transports.

Document SNCF

Quand, à l'issue de cette marche exemplaire, un des grands artisans de ce record, Georges PETIT (Chef de la Division Electrotechnique au Département de la Construction - MCE) posa la question : « *et maintenant Chef, on peut le tenter, le "vrai" record ?* ». Il considérait qu'en réduisant, voire supprimant la marge qu'il avait conservée sur le réglage de la commutation des onduleurs (on se souvient du nombre de ratés de commutation lors des marches d'essai), on aurait pu faire encore un peu mieux... La réponse de François LACÔTE fut : « *NON, cela n'aurait aucun sens !* »

Ce « *NON* » et la quasi "frustration" de Georges PETIT, est aujourd'hui un souvenir encore très présent pour de nombreux témoins.

La photographie figure 25, ci-dessous, permet de reconnaître une partie des acteurs de ce magnifique record.



Figure 25 : L'équipe présente à bord de la rame TGV pose pour la photo souvenir.

Collection Claude MARO

8 - Bilan de l'Opération « TGV 117 »

Le Cap des 500 km/h est franchi pour la première fois le 9 mai 1990 au PK 164,8.

8.1 - Les marches à grande vitesse

Le diagramme de la figure 26, ci-après, témoigne des kilométrages parcourus dans le domaine des 400 km/h : 1971 km parcourus à vitesse maximale supérieure à 400 km/h dont :

- 52 marches sur 55 effectuées à plus de 400 km/h ;
- 43 marches sur 55 effectuées à plus de 450 km/h ;
- 9 marches sur 55 effectuées à plus de 500 km/h.

Il faut aussi rappeler que 8 croisements à grandes vitesses ont été effectués avec la rame 308, circulant à 350 km/h, dont un à la vitesse relative de 777,7 km/h.

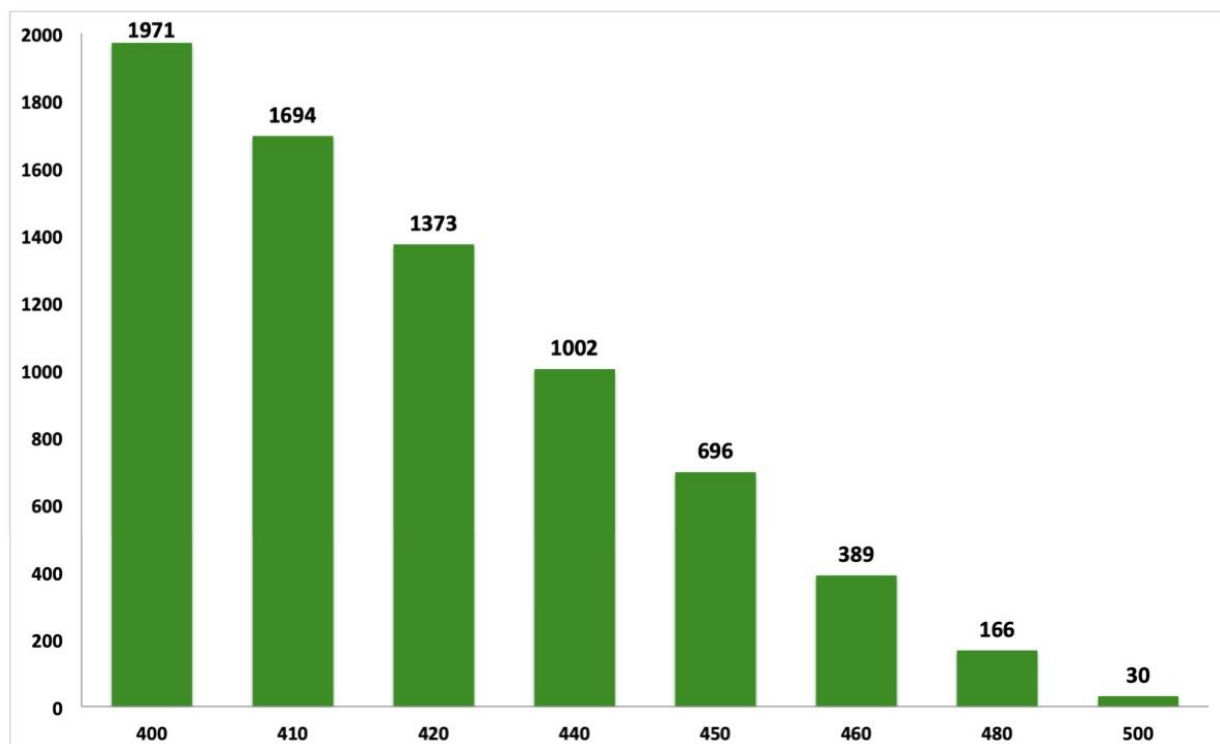


Figure 26 : Bilan de l'exploration du domaine des vitesses supérieures ou égales à 400 km/h.

8.2 - Performances de la rame 325

Aucune des valeurs limites n'a été dépassée. Le soulèvement de la caténaire s'est limité à 26 cm, pour une valeur limite de 40 cm.

Les boîtes d'essieux n'entraîneront aucun souci particulier, les températures maximales relevées n'ont jamais dépassé 48 °C.

Le tableau suivant donne une idée de la puissance prélevée à la caténaire pour trois marches spectaculaires :

	Marche du 5/12/89 482,4 km/h	Marche du 16/05/90 510,8 km/h	Marche du 18/05/90 515,3 km/h
Intensité captée (Aeff)	690	662	665
Tension caténaire (kV)	26,8	29,3	29,4
Puissance (MVA)	18,50	19,40	19,55

9 - Les retombées

9.1 - Exportation

Le « système TGV » s'exporte en Espagne avec en particulier les rames AVE Série 100 et en Corée avec la TVM pour la signalisation (Transmission Voie Machine) et les rames KTX. Il est adopté pour le service international entre Paris Bruxelles Amsterdam et Cologne (Köln) avec des rames dénommées « PBA » et « PBKA ». La TVM s'exporte aussi en Angleterre. Elle équipe le tunnel sous la Manche.

Le 300 km/h pratiqué sur la LGV Atlantique se généralise en France, d'abord sur la LGV Nord Europe puis sur les LGV à destination du Sud Méditerranéen. L'isochrone présenté ici, rappelle que les distances avec le TGV, ne s'expriment plus en km mais en temps de parcours... Le TGV a transformé notre « espace-temps ». Aujourd'hui, la croisière à 320 km/h nous est familière.

9.2 - Service commercial

La rame 325 a repris son service commercial avec ses 10 remorques (figures 27, 28 et 29).



Figure 27 : La Rame 325 en service commercial, ici à Toulouse le 4 mai 2011 prête au départ à destination de Paris Montparnasse

Photo Alain JEUNESSE



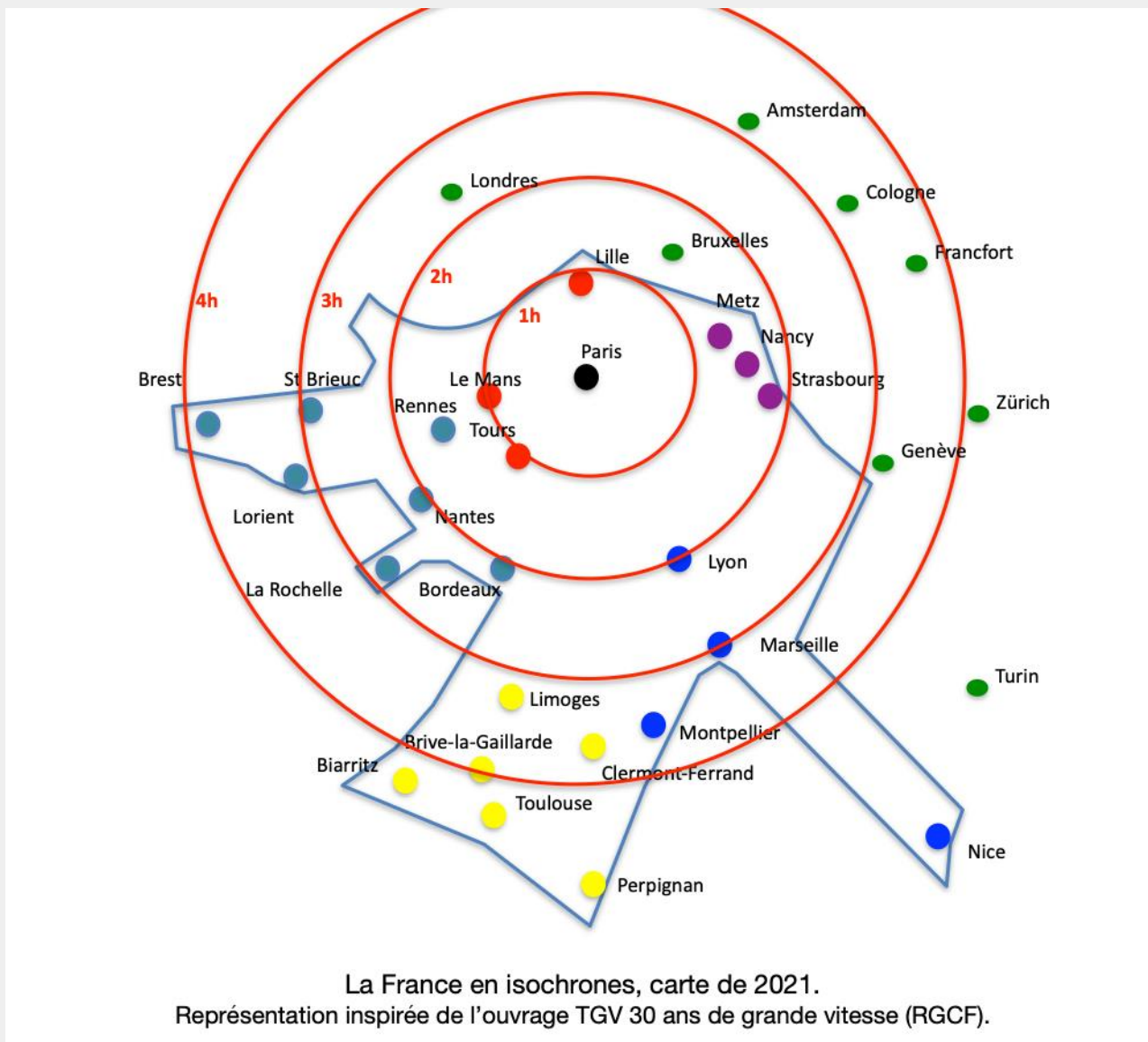
Figure 28 : Rencontre de deux complices !
Les rames 325 et la 308 se côtoient en gare de Nantes le 26 avril 2012

Photo Alain JEUNESSE



Figure 29 : La rame 325 à Nantes en avril 2012 prête au départ pour Paris-Montparnasse

Photo Alain JEUNESSE



Livrée officiellement à la SNCF le 26 janvier 1990, mais en réalité sortie de l'usine Alsthom de Belfort fin juillet 1989, elle aura parcouru 11 056 644 km, soit environ 400 000 km par an. Elle a été réformée le 18/12/2018.

A titre de comparaison, la 2D2 5516 restaurée et préservée à la Cité du Train à Mulhouse a parcouru en 45 ans de service 7 820 519 km, soit 173 790 km/an.

Photo Théo MOLL

Après sa réforme la rame TGV 325 trouve un abri au sein de l'usine Alstom d'Aytré. Elle y restera pendant 2 ans. « De retour à la maison » au Technicentre Atlantique (TATL), elle est l'objet d'une restauration pour être mise en « état de présentation » afin de participer aux futures festivités des « **40 ans du TGV** » prévues en septembre 2021. Espérons enfin, qu'une longue vie d'ambassadrice de « *l'excellence ferroviaire* » lui soit donnée.

Des souvenirs du 18 mai 1990 :



Photos Alain JEUNESSE



Augustin BURGARELLA

&

Merci à tous les contributeurs

10 - Bibliographie

Revue Générale des Chemins de Fer (RGCF) - Janvier 1990. Record mondial de vitesse sur rail.

Chemin de Fer n° 405 1990/6. Jean-Paul DEMOY, Record mondial de vitesse sur rail : de 482,4 à 515,3 km/h.

Revue Générale des Chemins de Fer n° 10 - Octobre 1991. « 10 ans de TGV ».

Le Grand Livre du TGV. 2002 Editions La Vie du Rail. Claude SOULIÉ, Jean TRICOIRE.

Revue Générale des chemins de fer - TGV 30 ans de grande vitesse. Edition Hervé Chopin (2011).

Revue Générale des Chemins de Fer - Octobre 2020. Numéro spécial « les 70 ans du 25000 V 50 Hz ». L'évolutivité de l'électrification 25 kV. Evolution des caténaires 25000 V.





Club de la Grande Vitesse Ferroviaire

Hall C - Résidence Le Parc des Cèdres
21 rue Auguste Bosc
30900 Nîmes

www.clubgrandevitesseferroviaire.fr

contact@clubgvf.fr



facebook.com/ClubGVF



07.67.34.91.62