Club de la Grande Vitesse Ferroviaire

Document

LA RAME ARTICULÉE TGV

François LACÔTE

Décembre 2021

Club de la Grande Vitesse Ferroviaire

Table des matières

LIMINAIRE 3

1. La rame articulée TGV : spécificité et origine 4

1.1 Définitions : rame à bogies Jacob et rame articulée 4

1.2 Handicaps communs des rames à bogies Jacob et rame articulée 5

1.2.1. Dynamique ferroviaire : 5

1.2 .2. Composition fixe : Handicap pour l'exploitation, handicap pour la maintenance 5

1.3. Les origines 6

1.3.1. La rame TGV 001 6

1.3.2. La mutation vers la traction électrique 6

2. Les atouts de la rame articulée TGV 8

2.1. Les avantages non spécifiques à la grande vitesse 9

2.2. Les avantages supplémentaires pour l'exploitation à grande vitesse 9

2.3. La sécurité « passive » contre le déraillement 10

3. Un handicap retourné à son avantage : la suspension SR10. 11

3.1 Le constat 11

3.2. Les tentatives infructueuses de solution au problème vibratoire 11

3.3. Une bataille duraille : la suspension SR10 12

4. La troisième génération TGV : un TGV à deux niveaux en rame articulée : la deuxième bataille duraille ! 16

4.1. Les origines 16

4.2. La controverse 17

4.3. La rame articulée en formule « deux niveaux » 18

4.3.1. Les handicaps 18

4.3.2. Les vertus de l'architecture articulée pour la rame Duplex 19

LA RAME ARTICULÉE TGV

LIMINAIRE

L'architecture de la rame TGV est restée inchangée au fil des générations successives, de la rame Paris-Sud-Est (1ère génération) à la rame AGV d'Alstom (4ème génération), en passant par les rames Atlantique, Réseau, Thalys, Eurostar, ou Duplex.

Cette architecture, dite en « rame articulée », est unique dans le monde ferroviaire ; elle présente des avantages incomparables pour la pratique de la très grande vitesse.

Photo Lionel SUTY

Photo Florent BRISOU

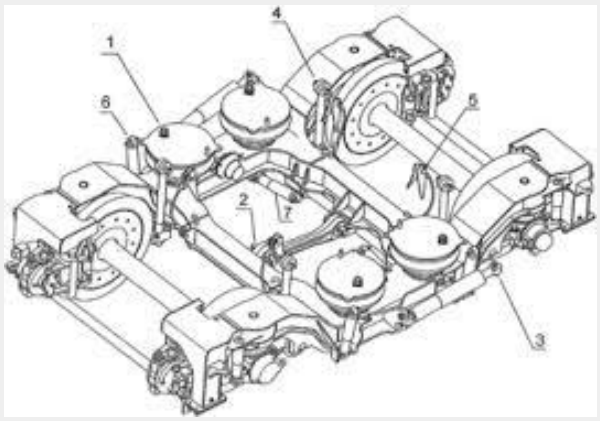
Cette note a ainsi pour objet de montrer la pertinence de cette architecture et de rappeler l'histoire des décisions qui ont accompagné la très forte évolution de la rame articulée TGV au fil des générations successives : une évolution qui résulte de choix qui ont surpris, et parfois furent fortement contestés : en d'autres termes, elle est le fruit de dures batailles, des batailles « durailles ».

1. La rame articulée TGV : spécificité et origine

1.1 Définitions : rame à bogies Jacob et rame articulée

Une rame « à bogies Jacob » est une rame dont les voitures intermédiaires partagent le même bogie avec les voitures adjacentes, mais chacune repose sur sa propre suspension secondaire ; ainsi chaque bogie « intermédiaire » supporte quatre éléments de suspension secondaire ; cette disposition est assez répandue dans le monde ferroviaire, en particulier pour les éléments automoteurs de composition courte, en général affectés à des services périurbains ou régionaux.

Figure 1 : Bogie « type Jacob », Rame articulée « Régio 2N ».
Photo Alain JEUNESSE



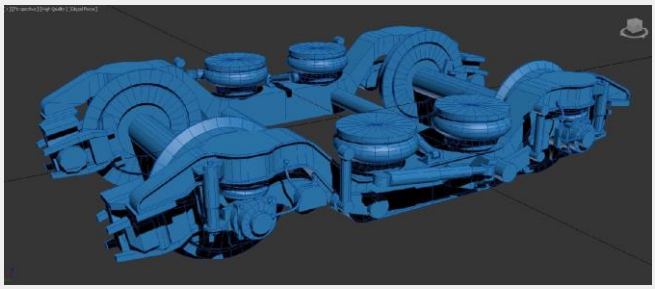


Figure 2 : Bogie « type Jacob » 4 points d'appui

Documents Claude PUJOL

La rame TGV, elle, est un cas tout à fait particulier, et à vrai dire unique, puisque chaque bogie ne supporte que deux éléments de suspension secondaire, une extrémité de caisse reposant sur cette suspension secondaire (bout porteur) supportant, par l'intermédiaire d'une rotule, l'extrémité de la caisse adjacente (bout supporté); comme on le verra dans la suite de l'exposé, c'est cette rotule qui fait toute la différence et la spécificité de la rame articulée (sur la rotule) TGV.

1.2 Handicaps communs des rames à bogies Jacob et rame articulée

1.2.1. Dynamique ferroviaire :

Il s'agit là probablement du domaine du plus gros handicap apporté par ce type d'architecture ; le fait de suspendre une caisse à chaque extrémité est une disposition doublement défavorable :

- pour la réponse vibratoire, puisque la suspension vient « exciter » la caisse au niveau du « ventre » du premier mode de flexion, contrairement aux véhicules ferroviaires classiques sur deux bogies, où la suspension est pratiquement (surtout sur les véhicules à grand porte-à- faux d'extrémité type RTG) au niveau des « nœuds » de vibration ; autrement dit, la suspension vient exciter la caisse à un endroit où elle ne demande qu'à « répondre » ;
- pour la réponse en lacet de caisse (mouvement basse fréquence de la caisse autour d'un axe vertical), cette disposition est également défavorable, dans la mesure où le ratio entre le rayon de giration de la caisse et l'entraxe pivot (ratio qui doit être le plus élevé possible) ne peut être aussi élevé, toutes choses égales d'ailleurs, que dans le cas d'une caisse sur ses deux bogies, avec porte-à-faux.

Ces deux handicaps, mal identifiés à l'origine de la conception de la première génération TGV, se sont révélés à la mise en service, et ce fut une problématique majeure pour la conception de la deuxième génération : la suspension SR10, comme on le verra plus loin, a su retourner ces deux handicaps à son avantage grâce à la présence de la rotule entre caisses, ce que les autres rames « à bogies Jacob » ne peuvent faire. C'est là une des spécificités majeures de la rame articulée TGV.

1.2 .2. Composition fixe : **Handicap pour l'exploitation, handicap pour la maintenance**

Il faut se souvenir qu'à l'époque de la conception de la rame TGV (milieu des années 1970), tous les trains de grande ligne en Europe (le Japon avec l'exploitation Shinkansen étant l'exception, qui a évidemment inspiré la SNCF) étaient de composition variable (locomotive et voitures indépendantes) permettant une modulation temporelle de l'offre de transport ; de même la maintenance était organisée en différenciant, dans des établissement distincts, contenu et périodicité des interventions entre locomotives et voitures ; les établissements de maintenance avaient en outre des dimensions adaptées à la longueur des véhicules, et non des trains formés ; là encore l'exemple japonais du Shinkansen fut certainement inspirant pour SNCF. La décision de la rame articulée, « indéformable » en exploitation et en maintenance, représentait ainsi une véritable « révolution culturelle ». A mon sens, seule la SNCF (et non l'industriel) pouvait lancer une telle réflexion sur l'architecture optimale pour la très grande vitesse, puis prendre cette décision en rupture avec les architectures classiques de trains de grandes lignes.

1.3. Les origines

1.3.1. La rame TGV 001

Le choix de cette architecture articulée remonte à la rame prototype du programme TGV, la rame TGV001 : l'objectif était à la fois de valider techniquement les choix techniques pris pour la pratique commerciale de la vitesse de 260 km/h et en même temps d'en faire un démonstrateur, à l'intention des décideurs publics, des possibilités et atouts de la grande vitesse ferroviaire ; dans ce domaine, l'appel à des technologies issues du domaine aérien (turbine à gaz, climatisation des voitures de type « aéronautique », etc…) témoignait de l'esprit d'ouverture et d'innovation de la SNCF. Par ailleurs, le choix d'une propulsion autonome (la LGV n'était pas prévue à l'époque d'être électrifiée, pour des raisons économiques évidentes à une époque antérieure à la première crise du pétrole, où les considérations environnementales étaient moins prégnantes) conduisait d'abord à la recherche de la légèreté, et bien entendu à la minimisation de la résistance à l'avancement :

- Légèreté : choix de la turbine d'hélicoptère Turmo III, déjà expérimentée avec succès sur les rames dites ETG puis RTG de la SNCF ;
- Minimisation de la résistance à l'avancement : réduction du nombre de bogies.

Les études entreprises par la direction du Matériel (département Construction) sur la résistance à l'avancement avaient montré pour ce qui est la dépense en énergie la prédominance de la résistance aérodynamique à la vitesse envisagée (260 km/h), et, parmi les différents facteurs qui la composent, l'influence importante des bogies : le choix d'une architecture minimisant, à longueur équivalente, le nombre de bogies, était ainsi très intéressant ; la longueur de la rame (100m) restant comparable à celle des turbotrains déjà lancés en service commercial, et donc déjà « adoptés » par l'activité maintenance de la SNCF, la contrainte évoquée ci-dessus pour la maintenance d'une rame indéformable apparaissait supportable vis-à-vis de l'avantage de la diminution de la résistance à l'avancement. Ainsi fut décidée pour la rame TGV 001 cette architecture si originale de « rame articulée ».

1.3.2. La mutation vers la traction électrique

La crise du pétrole d'octobre 1973 rendit obligatoire pour la SNCF d'étudier à fond la mutation de la traction de la rame TGV vers la traction électrique, et simultanément une évolution de la composition de la rame TGV en tirant les conséquences des expérimentations de la rame TGV 001 : les instabilités de bogie rencontrées lors des marches d'essai à grande vitesse amenaient en effet à revoir les bogies prévus pour le TGV, la mutation vers la traction électrique en fournissait, entre autres, l'opportunité.

La conception des bogies moteurs fut complètement reprise en augmentant l'empattement (passage à 3 m) et en déchargeant le bogie des moteurs de traction qui deviennent suspendus dans la caisse des motrices et reliés aux ponts moteurs sur essieu par l'intermédiaire d'une transmission coulissante « tripode » ; cet empattement de 3 m fut en même temps adopté pour les bogies porteurs.

Mais la question de l'architecture de la rame restait pendante : articulée, ou retour à l'architecture classique ?

Décision pas évidente, puisque le choix de l'architecture articulée, préférable sur le plan technique (dimensionnement en puissance et économie d'énergie) bouleversait les pratiques de l'exploitation (composition variable pour adapter l'offre) et de la maintenance (ateliers pour rame désormais de 200m, levage simultané pour échange bogies, etc.).

Cette décision, historique à plus d'un point de vue, et extraordinairement « visionnaire », fut prise par la direction générale de la SNCF après avoir entendu toutes les parties concernées. La contrainte liée à la rigidité de la composition de la rame fut acceptée du fait de la possibilité de couplage de deux rames (doublement de l'offre) et la décision de la réservation obligatoire permettant une anticipation de la demande. Deux facteurs ont dû faciliter la prise de décision :

- l'exemple japonais du Shinkansen que connaissaient bien, pour l'avoir étudié et expérimenté, plusieurs dirigeants SNCF impliqués dans le projet ;
- la présence en tant que directeur commercial de l'activité voyageurs de la SNCF d'un dirigeant venant de l'aérien (Jean Ravel) qui connaissait l'exploitation d'un moyen de transport de composition fixe.

Il fut ainsi décidé que la rame TGV Paris Sud-Est serait une rame de 200 m en composition fixe M+8R+M (M pour motrice), couplable en Unité Multiple, le tronçon « 8R » étant « articulé ».

La conception d'origine de la liaison entre remorques, avec des structures spécifiques pour assurer la liaison entre remorques (anneau porteur, anneau fixe, rotule assurant la liaison), structures distinctes des remorques proprement dites, procédait d'une grande prudence pour faciliter d'éventuelles opérations de maintenance de ces dernières ; avec l'expérience, il fut possible de simplifier grandement cette conception pour aboutir, avec le TGV Duplex, à l'intégration complète de ces « anneaux » dans les structures de caisse des remorques TGV.

2. Les atouts de la rame articulée TGV

Cette architecture originale, décidée à l'origine essentiellement pour réduire la résistance aérodynamique et la masse globale de la rame, est apparue, au fil des générations, comme particulièrement intéressante dans de nombreux domaines, certains étant d'ailleurs spécifiques de la grande vitesse ; on verra cependant plus loin que le maintien de cette architecture fut plusieurs fois fortement contesté, ce ne fut pas du tout « un long fleuve tranquille », mais le résultat de confrontations sévères.

Figure 3 : TGV PSE. Anneau mobile posé sur ses coussins de suspension

Photo Alain JEUNESSE

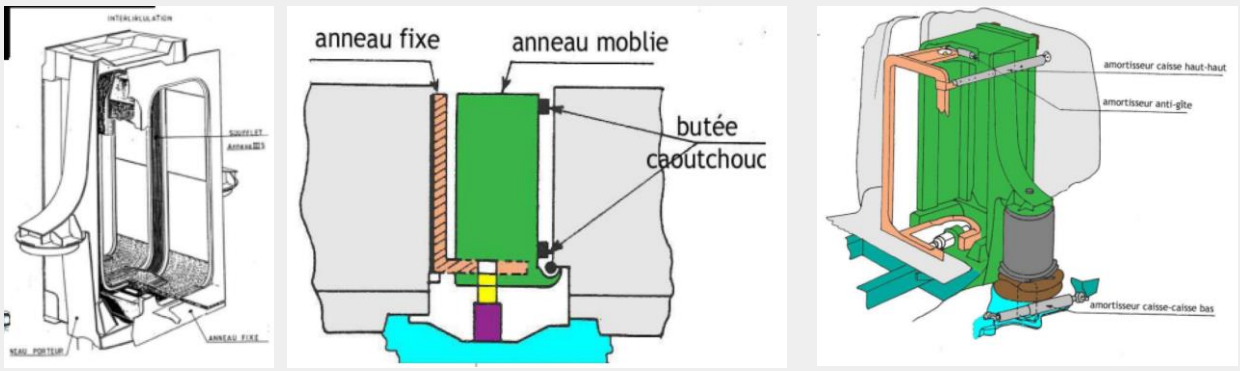


Figure 4 : Schémas de principe des dispositions retenues pour assurer l'intercirculation entre caisse

Document Claude PUJOL

Commençons par énumérer ces avantages tout à fait spécifiques, au-delà de ceux à l'origine de la décision (résistance aérodynamique) :

2.1. Les avantages non spécifiques à la grande vitesse

- le confort du train : des caisses plus courtes permettent une largeur de caisse plus importante (3 m pour la 4ème génération, l'AGV, contre 2,9 m pour les trains d'architecture classique), une intercirculation entre remorques plus large, donc plus confortable : à partir de la deuxième génération de TGV, les portes d'intercirculation ont par exemple été supprimées, car finalement superflues, la traversée dans l'intercirculation s'effectuant sans aucun "cisaillement" d'une extrémité de caisse par rapport à l'autre (contrairement à une architecture classique ou, mais dans une moindre mesure, une architecture « bogies Jacob ») ;
- la masse du train : moins de bogies à longueur équivalente signifie masse plus faible ;
- coût de maintenance : moins de bogies signifie également un coût de maintenance plus faible (les bogies représentent plus du tiers du coût de maintenance d'un train).

2.2. Les avantages supplémentaires pour l'exploitation à grande vitesse

- tout d'abord, rappelons-le, une résistance aérodynamique plus faible qu'en architecture classique, avec ses retombées importantes pour le dimensionnement de la traction, la consommation d'énergie, le coût de maintenance de la partie traction (comparer les 4 bogies moteurs TGV, ou les 5 bogies moteurs AGV, aux 8 bogies moteurs pour ICE3 / Velaro) ;

- une plus grande facilité pour rendre les caisses étanches à la pression (circulations en tunnel) du fait de l'absence de déplacements entre extrémités de caisse au niveau de l'intercirculation, la rotule entre caisses n'autorisant que des mouvements de rotation ;

- le grand empattement des bogies moteurs comme porteurs (3 m), nécessaire à la stabilité du bogie réduirait l'espace disponible pour les équipements techniques en dessous de caisse, … sauf en avoir moins ; particulièrement intéressant pour les rames à deux niveaux, qui doivent réserver le niveau inférieur à l'espace voyageurs ;

- la tenue aux vents traversiers : il s'agit là d'un vrai problème, largement spécifique à la grande vitesse ; le couplage des véhicules entre eux via la rotule améliore leur tenue aux vents traversiers, et tout particulièrement pour la rame TGV Duplex : l'optimum de capacité se trouve dans une rame à motorisation concentrée, avec les motrices en tête de rame. C'est la motrice de tête qui, par sa masse élevée – et par nature constante - vient « protéger » le tronçon à deux niveaux. En effet c'est toujours le premier véhicule d'un train qui subit le plus fort « torseur » de renversement, et la motrice, plus lourde, a une meilleure tenue qu'une voiture à deux niveaux de grande section de caisse, qui de surcroît a elle une masse fonction de l'occupation par les voyageurs. Elle est donc considérée dans les calculs comme vide, et donc « légère » :

Ainsi, contrairement aux apparences une rame TGV Duplex a la même résistance au renversement par les vents traversiers qu'une rame TGV à un niveau (et bien évidemment qu'une rame un niveau à motorisation répartie non articulée, dont ce sont tous les véhicules qui doivent être pris comme vides dans les calculs). Ce point fut d'abord mis en évidence lors des essais en soufflerie (sur maquettes) préliminaires à la mise en service de la ligne TGV Méditerranée ; il a pu être magnifiquement vérifié en « vraie grandeur » lors de marches d'essai (plus de 500 km/h) de la campagne TGV150 qui a conduit au record du monde de vitesse à 574,8 km/h : en effet la rame était complètement instrumentée et nous avons connu en février 2007 lors des essais préliminaires au record un jour de grand vent de travers !

- à citer enfin le bruit de roulement, réduit à proportion du nombre moindre d'essieux…

2.3. La sécurité « passive » contre le déraillement

Dans ce domaine, il faut rester très mesuré : la sécurité ferroviaire repose d'abord sur la sécurité active vis-à-vis de tous les risques inhérents à la circulation.

Cela étant dit, il reste vrai qu'en cas de déraillement accidentel, le comportement de la rame articulée s'avère bien meilleur que celui d'une rame à véhicules indépendants, la présence de la rotule assurant une forte liaison entre les remorques adjacentes.

Figure 5 : Ablaincourt Pressoir (80) déraillement de la rame 511 le 22/12/1993

Ces images démontrent tout l'intérêt de la structure articulée qui se comporte comme une « poutre » relativement souple. Les passagers ont eu la « peur de leur vie » mais sans conséquences.

Photos DELCAMPE.NET

C'est ainsi par exemple qu'en décembre 1993 lorsque la rame TGV a déraillé (du moins le tronçon derrière la motrice qui elle n'a pas déraillé) à 300 km/h sur un effondrement de terrain de la ligne TGV Nord, elle est restée intègre et n'a causé aucun dommage corporel aux voyageurs.

Cela étant, répétons que la sécurité ferroviaire repose d'abord, et essentiellement, sur la sécurité active, c'est-à-dire l'aptitude à annuler par la qualité de la conception, de la maintenance, de la conduite, les risques liés à la circulation ferroviaire (collision, déraillement, renversement, incendie).

3. Un handicap retourné à son avantage : la suspension SR10

3.1 Le constat

La conception de la suspension du tronçon articulé faisait appel aux mêmes principes que ceux des voitures modernes de la SNCF comme les voitures « Corail » (avec d'ailleurs un jeu transversal augmenté (80 mm)). On s'attendait ainsi à un niveau de confort équivalent à celui de ces voitures réputées pour l'excellence de leur confort vibratoire vertical. Il fallut cependant déchanter dès les premières marches des rames de présérie ; le confort vibratoire, vertical comme transversal, n'était pas acceptable, ou du moins pas au niveau de ce que l'on pouvait attendre d'un matériel de cette classe ; et cela en dépit d'une qualité de voie TGV tout à fait excellente.

Le handicap (suspension en extrémité de caisse) cité plus haut n'avait pas été identifié, la fréquence propre des gros ressorts de suspension secondaire était proche des premiers modes vibratoires des caisses, eux-mêmes proches de ceux des sièges ; le spectre d'excitation issu du contact roue-rail n'avait pas été suffisamment étudié, car différent de celui d'une circulation à 160 km/h : à qualité de voie équivalente, ce spectre à 260 km/h est plus étendu en fréquence et plus élevé en niveau, et l'on n'avait pas pris garde aux éventuelles « résonnances ».

Figure 6 : TGV SE Suspension à ressort
Photo Jean-Marc FRYBOURG

Enfin l'analyse des modes vibratoires de caisse mit en évidence un autre « handicap » en réponse vibratoire de la rame articulée : l'effet « modes de rame » représentatif du couplage par la rotule des caisses entre elles : en plus des fréquences propres de chaque caisse se crée un ensemble de fréquences de couplage par la rotule que l'on a baptisé à l'époque d'un terme évocateur : « le peigne de fréquences ».

3.2. Les tentatives infructueuses de solution au problème vibratoire

Les premières recherches s'orientèrent vers une solution qui consistait à diminuer très sensiblement la raideur de la suspension secondaire en faisant appel à une suspension pneumatique au lieu de la classique suspension « Corail » par ressorts en acier, supprimant ainsi également les excitations parasites de ces ressorts.

Une première solution fut élaborée en plaçant les coussins pneumatiques juste au-dessous des potences de l'anneau porteur, de manière à ne pas augmenter significativement le coefficient de souplesse par augmentation de la flexibilité verticale ; cette solution se révéla inefficace, le niveau vibratoire n'étant pas significativement réduit du fait de la sensibilité au galop de bogie de la disposition haute « plan haut de suspension ».

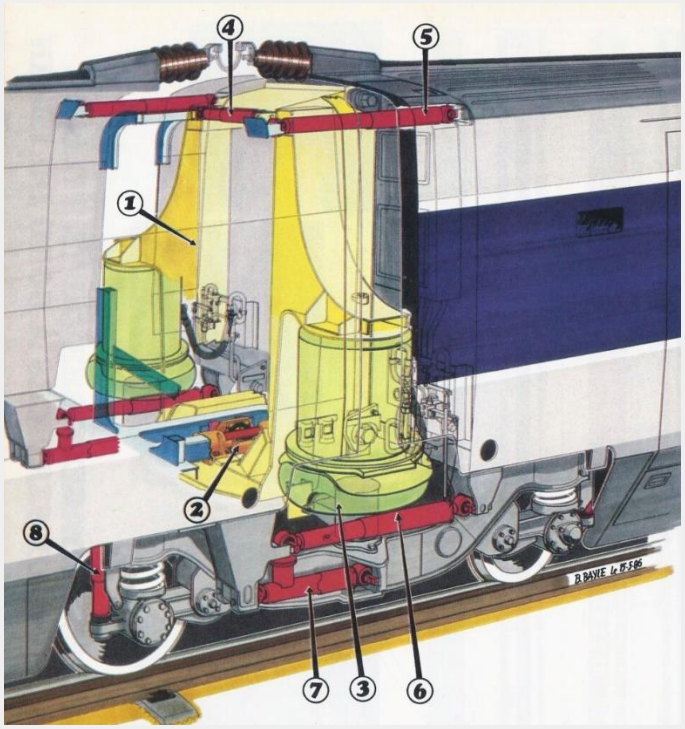
La seconde solution consista à essayer une solution « plan bas de suspension », qui avait certes l'avantage d'échapper à l'influence du galop de bogie, mais nécessitait l'implantation de barres anti-roulis pour maintenir le coefficient de souplesse à un niveau acceptable ; de surcroît les effets sur le comportement vibratoire restaient insuffisants, tandis que le comportement des remorques en transversal se révéla inacceptable (apparition de « balancements » basse fréquence).

Ainsi les rames TGV de première génération, les rames TGV Paris Sud-Est, furent mises en service commercial avec leur suspension d'origine, à ressorts en acier.

En synthèse, la conclusion de toutes ces investigations était :

- *aucun bénéfice* à espérer de la seule adoption d'une suspension pneumatique ;
- le plus gros problème à régler : supprimer le « peigne de fréquences » venant des « modes de rame » créés par la liaison entre caisses assurée par la rotule.

3.3. Une bataille duraille : la suspension SR10



Suspension pneumatique

Type SR10

1. Anneau porteur
2. Rotule
3. Membrane à grande flexibilité
4. Amortisseur anti-gite
5. Amortisseur longitudinal caisse/caisse haut
6. Amortisseur longitudinal caisse/caisse bas
7. Amortisseur anti-lacet
8. Amortisseur anti-galop

Figure 7 : *Dessin de Bernard BAYLE* SNCF Direction du Matériel Septembre 1986

Une erreur de diagnostic : lorsque la SNCF m'a confié la responsabilité des programmes TGV (4ème trimestre 1982), les conclusions étaient bien celles-là, et ainsi, pour supprimer ce « peigne de fréquences » réputé être la cause de ce comportement vibratoire très défavorable, il avait été décidé de prototyper une solution « à bogies Jacob », c'est-à-dire en supprimant la liaison par la rotule et en créant une suspension secondaire indépendante pour chaque remorque TGV, tout en conservant le bogie commun qui ainsi comportait maintenant quatre supports de suspension secondaire (deux par côté).

Figure 8 : TGV 001 bogie « type Jacob »
Photo Claude SERY

Ces dispositions nouvelles furent appliquées sur la rame TGV 001, démotorisée, pour les évaluer, la rame TGV 001 étant tractée par une rame TGV PSE.

Figure 9 : TGV 001 démotorisé
Photo CAV-SNCF

Mon diagnostic était en effet différent : après avoir étudié l'ensemble des rapports d'essai des phases précédentes, il m'apparut clairement que le problème n'était pas spécifiquement ce « peigne de fréquences », mais simplement cette susceptibilité aux vibrations et au lacet de caisse inhérente à la rame articulée, comme décrit en 3.1.

Ainsi ma proposition fut la suivante :

- Pour lutter contre les vibrations, tout d'abord créer un filtre vibratoire « passe-bas » efficace accordé sur une fréquence très basse (inférieure au Hertz) tout en restant compatible avec le risque de « cinétose », le mal des transports engendré par de très basses fréquences, pour cela :
  - ➢ adopter une suspension pneumatique avec un très grand volume de réservoir additionnel, et ainsi la réalisation de réservoirs « structuraux » permettant d'exploiter le maximum de volume (environ 150 l) entre longeron de bogie et anneau porteur ;
  - ➢ adopter une solution « plan bas » avec réservoirs au-dessus de la membrane pneumatique pour échapper au galop de bogie, au prix de l'installation de barre anti-roulis (influence vibratoire négligeable) pour conserver un excellent niveau de confort en roulis (faible coefficient de souplesse) ;

- s'attaquer par ailleurs aux « shunts vibratoires » que sont les amortisseurs : pour les amortisseurs anti-lacets, profiter de la très grande marge de sécurité apportée par les caractéristiques du bogie porteur TGV vis-à-vis du risque d'instabilité (résultat de la campagne d'essais TGV 88) pour adoucir un peu la caractéristique « front raide » des amortisseurs anti-lacet et ainsi diminuer la sollicitation vibratoire de la caisse (essentiellement en transversal) ;
- surtout, comme au judo, retourner la faiblesse de l'articulé en avantage : supprimer les amortisseurs verticaux et transversaux entre caisse et bogie (les fameux « shunts vibratoires », indispensables pour la basse fréquence, mais nuisibles dans le spectre vibratoire) en reportant l'amortissement, grâce à la présence de la rotule, entre les caisses (les amortisseurs « caisse-caisse », avec des caractéristiques adaptées, pratiquement équivalentes à des « fronts raides ») ; ce faisant, cette disposition faisait le « pari » de l'absence de sollicitation d'ensemble de la rame, en circulation, en vertical comme en transversal. Il n'y aurait donc pas d'amortissement pour de telles sollicitations « en phase » sur tout le tronçon articulé. Pari gagné, l'expérience et les mesures en ligne ont montré que l'advenue de sollicitations de ce type n'arrivait pratiquement jamais.

A noter d'ailleurs que cette solution est vraiment consubstantielle à la rame articulée avec sa rotule. Elle n'aurait pu être appliquée à la solution « bogie Jacob » essayée au long des recherches précédentes avec la rame TGV 001 remorquée.

« Revanche » de la rame articulée TGV ! »

- Les mises au point finales : pour obvier le risque de lacet de caisse, et en même temps prendre en compte les caractéristiques non linéaires de flexibilité des membranes pneumatiques (raidissement pour les petits déplacements), il a fallu lancer le développement de coussins pneumatiques de très grande flexibilité (c'est la Société Continental qui présenta la solution) tout en maîtrisant le risque d'éclatement de cette membrane par agression de projections de ballast, du fait de la plus grande fragilité du coussin adopté par rapport à ceux usuellement utilisés en ferroviaire. Cette grande flexibilité devenant néfaste pour le confort transversal lors des circulations sur le réseau classique en courbe avec forte insuffisance de dévers, il a fallu en parallèle concevoir et valider (par essais au centre d'essais de la SNCF Matériel) un dispositif de « couvercle » ou « jupe » sur laquelle vient s'appuyer la membrane pneumatique au fur et à mesure du déplacement transversal caisse-bogie ; cela afin d'aboutir à une flexibilité variable de la suspension secondaire, très grande en petits déplacements, et progressivement plus faible ensuite. Ces jupes ont été définies et validées par l'agence d'essais ferroviaires SNCF Matériel de Vitry.
- Enfin, compte tenu de la médiocrité du confort dynamique de la rame TGV Paris-Sud-Est, définir une solution de suspension nouvelle qui puisse être appliquée en modification (rétrofit) à ces rames de première génération, et non pas seulement aux nouvelles rames TGV Atlantique et suivantes ; ce qui n'était pas le cas de la solution « rame découplée TGV 001 ».

Cette nouvelle proposition (la solution TGV 001 en caisses découplées était déjà lancée…) fut reçue avec une grande hostilité de la part des Ingénieurs responsables des divisons concernées, Caisse et Structures d'une part, Bogies de l'autre : le premier me disant que j'avais eu de la chance de lancer ces dispositions pendant ses congés d'été (sic !), le second que cela ne fonctionnerait jamais, que les réservoirs structurels seraient refusés par le service des Mines, etc.

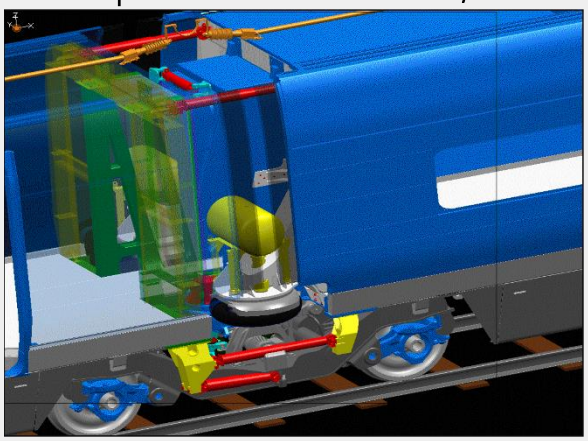


Figure 10 : TGV A, TGV R rame à 1N. Illustration du principe de la suspension pneumatique et de la liaison entre caisses avec les amortisseurs « caisse-caisse » en position haute et en position basse.
Document Claude PUJOL

Figure 11 : TGV Bogie porteur - suspension pneumatique

Photo collection Alain JEUNESSE

Avec l'appui de la direction générale SNCF et du directeur du Matériel, il fut cependant décidé de réaliser, en plus du prototype « découplé » TGV001, une seconde rame prototype TGV « articulée caisses couplées » munies des dispositions décrites ci-dessus. Cette rame, la rame TGV PSE n°10, fut ainsi équipée de cette nouvelle suspension, elle lui donna son nom : la suspension SR10 (Suspension Rame 10).

Rude bataille que celle qui a permis d'obtenir cette décision, une bataille « duraille » qui en valait vraiment la peine : les essais de la rame « découplée » TGV 001 mirent rapidement en évidence son inaptitude à résoudre les deux problèmes cités de vibrations et de mauvaise dynamique transversale, alors que pour la rame 10 ils mirent en évidence un comportement tout à fait excellent sur ces deux tableaux : vibratoire et basse fréquence transversale. Il fut ainsi décidé d'appliquer cette solution de suspension SR10 non seulement aux nouvelles rames TGV Atlantique, mais également en modification aux rames PSE, dans le technicentre de Bischheim ; en parallèle, les discussions avec le service des Mines avaient permis d'autoriser la réalisation des réservoirs structuraux de suspension avec les mêmes règles d'inspection périodique que les réservoirs réglementaires.

Finalement, une belle revanche de la rame articulée sur ses handicaps d'origine !

4. La troisième génération TGV : un TGV à deux niveaux en rame articulée : la deuxième bataille duraille !

4.1. Les origines

Contrairement à ce que certains ont pu penser, dire, ou écrire, cette évolution de la famille TGV ne fut pas « naturelle » ou du moins, comme on le verra plus loin, donna lieu à de très grandes difficultés, pas tant techniques (comme on aurait pu logiquement l'anticiper) que « politiques », au sens de la politique commerciale de la SNCF.

Et pourtant, cette évolution s'inscrivait dans le même « triptyque » que les évolutions précédentes : faire progresser de concert les performances, l'économie, le confort des voyageurs, objectifs auxquels on ajouta la sécurité passive.

En effet passer d'une architecture articulée à un niveau à une architecture articulée à deux niveaux représentait un pari très audacieux, mais en cas de succès permettait une nouvelle étape de progrès dans l'économie d'exploitation (40% de places supplémentaires pour un surcoût en énergie et maintenance très faible, un coût de personnel identique pour la conduite et peu augmenté pour l'accompagnement).

Pour ce qui concerne le confort, cette architecture (toujours en formule articulée) apportait des progrès significatifs dans l'organisation de l'espace intérieur et (paradoxe peut-être !) dans l'accessibilité au train.

Sur le chapitre des performances, après le passage de 260 km/h de la première génération (vitesse de conception d'origine, portée à 270 km/h après un an d'exploitation) aux 300 km/h des rames de la deuxième génération, l'objectif était d'un dimensionnement généreux pour la vitesse de 300 km/h.

Les réflexions relatives à la sécurité passive procédaient de deux évènements :

- Le terrible accident survenu le 23 septembre 1988 à Voiron (Isère), sur ligne classique, entre un TGV et un convoi exceptionnel immobilisé sur la voie en voulant franchir un passage à niveau en « dos d'âne », un accident en dehors du contrôle possible du système ferroviaire ;

Figure 12 : Accident le 23 septembre 1988 à Voiron
Photo collection François LACÔTE

- L'utilisation de l'alliage léger pour les structures de caisse des remorques, pour des raisons évidentes de recherche d'allègement, un des défis de la conception de ce train résidant dans le respect de la charge à l'essieu : faire moins lourd dans un volume plus important et plus complexe, pour pouvoir accueillir 40 % de voyageurs en plus, le tout (avec les voyageurs) à masse constante !

Or les propriétés de l'alliage léger dans le domaine plastique sont beaucoup plus faibles que celles de l'acier utilisé pour la structure des motrices et des remorques des rames TGV des générations précédentes, structures qui avaient permis de réduire considérablement les conséquences de cet accident de Voiron pour les voyageurs.
Il fallait alors que cette nouvelle génération apporte, dans des circonstances comparables, un niveau de protection au moins équivalent pour les voyageurs, et même supérieur pour le conducteur, même en une circonstance évidemment imparable.
Ces considérations furent structurantes pour la conception de la rame TGV Duplex, et s'agissant d'une problématique d'ailleurs non spécifique à la grande vitesse, furent appliquées aux autres matériels de la SNCF, puis prises en compte dans les normes ferroviaires européennes.

4.2. La controverse

Ce projet d'une rame TGV à deux niveaux suscita la très forte hostilité de deux directions de la SNCF, la direction « Commerciale voyageurs » et la direction de la Recherche :

- La direction « Commerciale voyageurs » considérait que la formule « deux niveaux » n'était absolument pas adaptée à un service « voyageurs » pour les grandes distances : avec la seule référence des véhicules à deux niveaux de la banlieue parisienne en voitures indépendantes et à forte densité de sièges, le discours était que l'on allait tuer le concept et l'image de l'offre TGV et en ruiner l'économie.
- La direction de la recherche, et son Directeur Général adjoint, ne remettaient pas en cause le concept, mais l'architecture articulée, estimant qu'elle n'était pas du tout adaptée à une rame à deux niveaux, et qu'il fallait revenir à une architecture de rame « classique » à voitures indépendantes !

Ce chapitre a surtout pour objet de décrire la rame articulée TGV et ses vertus ; ce n'est pas le lieu de décrire toutes les phases de cette bataille « duraille » ; je me bornerai à rappeler qu'elle a sans doute permis (à toute chose malheur est bon !) d'explorer au maximum le parti que l'on pourrait tirer de l'architecture articulée, avec l'aide déterminante de Roger TALLON, designer de la rame dite « Duplex » : réalisation de maquettes échelle 1, puis maquettes dans une rame TGV Paris Sud-est, réalisation d'un prototype de monte-charge pour avitaillement de la remorque-bar (un moment réputée impossible à avitailler, quand on veut tuer son chien…), « grand oral » devant le directeur général adjoint recherche, etc. Quand ce n'est pas, ultime flèche, l'intervention auprès d'un Président fraichement nommé pour lui faire décider la renégociation du marché de construction des rames Duplex pour ramener de 45 à seulement 30 le nombre de rames commandées et, pensait-on, arrêter définitivement cette « absurdité commerciale » ! Bref, cette troisième génération, contrairement à ce qui a pu être cru ou écrit, connut une gestation particulièrement compliquée et douloureuse.
Et pourtant, que d'avantages à cette architecture « articulée » pour une rame à deux niveaux !

4.3. La rame articulée en formule « deux niveaux »

4.3.1. Les handicaps

L'architecture « articulée » pour une rame à deux niveaux TGV (donc limitée à 17 t par essieu en charge) souffre principalement de deux handicaps, le second dérivant directement du premier :

- Le respect de la charge limite de 17 tonnes par essieu en charge normale : un tel objectif semblait une véritable gageure à l'époque, puisqu'il fallait concevoir des remorques plus volumineuses, avec deux planchers, 40 % de sièges en plus et les équipements correspondants pour cette charge supplémentaire en voyageurs (climatisation et autres), et cela dans une masse inférieure à la référence « un niveau » pour permettre d'absorber la charge supplémentaire des voyageurs et leurs bagages ! il eût été autrement plus facile, comme le suggérait la direction SNCF de la Recherche, de revenir à une architecture classique de voitures sur deux bogies (et ainsi bénéficier d'au moins 3 bogies supplémentaires pour répartir la charge), mais on perdait tous les fantastiques avantages de l'architecture articulée en formule deux niveaux, que l'on décrira plus loin.
- Les ingénieurs des différentes disciplines de la conception du matériel, SNCF et Alstom, développèrent leurs talents pour alléger les remorques « du sol au plafond », avec en particulier :
  - ➢ l'utilisation d'acier à Haute Limite Elastique pour les châssis de bogie, équipés d'essieux forés (et non plus à axe plein) ;
  - ➢ le recours au magnésium pour les coques des sièges de seconde classe ;
  - ➢ une recherche systématique du matériau le plus léger, tout en conservant les propriétés mécaniques, acoustiques, et sécuritaires (incendie), pour tous les matériaux de garnissage ;
  - ➢ enfin, pour les structures de caisse, l'abandon de l'acier et le recours à l'alliage léger.

C'est la somme de ces recherches qui a permis de tenir cette « gageure ».

Figure 13 : Le TGV Duplex : la rame articulée en formule 2 niveaux.

Photos Alain JEUNESSE

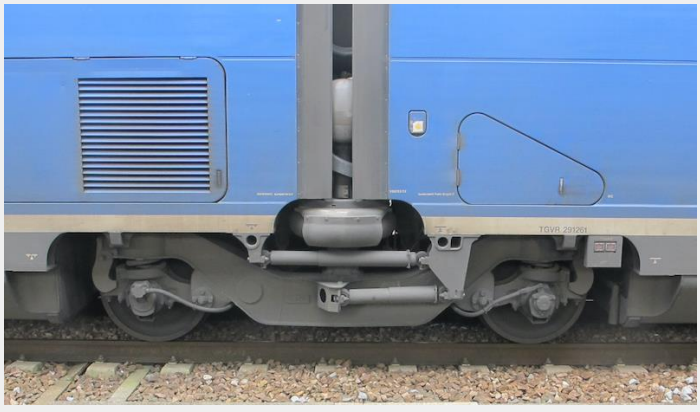


Figure 14 : TGV Duplex : vue d'un bogie porteur illustrant : la suspension pneumatique et la position des amortisseurs « caisse-caisse » en partie basse et « caisse-bogie.

Ce faisant, ces évolutions faisaient apparaître le second handicap de cette solution « deux niveaux en rame articulée » : le remplacement de l'acier par l'alliage d'aluminium pour les structures de caisse, alliage aux propriétés mécaniques sensiblement moins bonnes que l'acier dans le domaine plastique, avec pour conséquence un affaiblissement significatif de la résistance passive de ces structures. Ce recours à l'alliage léger en construction ferroviaire n'était pas une « première » en France, puisque des matériels comme les remorques XR 6000 ou le MI 79 avaient déjà eu recours à cette technologie, mais des essais de choc avec MI 79 avaient déjà mis en évidence cette faiblesse, alors que l'accident TGV de Voiron (23 septembre 1988) avait montré à la fois l'existence de ce type d'évènements extérieurs au système ferroviaire, certes, mais pouvant l'impacter sévèrement, et en même temps la grande résilience des structures en acier des remorques, et cela à une époque contemporaine des études du TGV Duplex.

Il était évident que la nouvelle génération de TGV se devait d'avoir un comportement au moins aussi bon que celui des TGV à un niveau à structure acier, et en même temps améliorer encore la résistance passive de la motrice (structure acier dans les deux cas) pour protéger le plus possible la cabine de conduite.

Ainsi la décision de réaliser le TGV Duplex avec remorques en alliage léger lança la démarche de réflexion et structuration de la doctrine de résistance passive des matériels ferroviaires, appliquée d'abord au TGV Duplex, mais ensuite bien évidemment à l'ensemble des matériels ferroviaires, en France, puis en Europe à travers les référentiels STI et référentiels ferroviaires, ce type de collision pouvant advenir sur un réseau classique : là encore, la rame articulée venait de surmonter son handicap, mais, mieux, faire progresser la sécurité de l'ensemble du transport ferroviaire.

Ces deux handicaps surmontés, la rame articulée Duplex pouvait exprimer toutes ses vertus !

4.3.2. Les vertus de l'architecture articulée pour la rame Duplex

Rappelons déjà que la rame TGV Duplex en formule articulée bénéficie bien évidemment elle aussi des avantages décrits plus haut pour toute rame articulée TGV : masse plus faible, maintenance moins coûteuse, possibilité de bogies bien chargés et de grand empattement pour vitesse critique élevée, gros avantages en aérodynamique stationnaire (faible résistance à l'avancement) et instationnaire (étanchéité pour les ondes de pression en tunnel, meilleure tenue aux vents traversiers). Cette architecture présente de plus des avantages supplémentaires et spécifiques de la formule « deux niveaux » :

- Tout d'abord la possibilité d'une intercirculation continue, à niveau constant, à travers toute la rame, avec en même temps la création d'espaces très différenciés suivant les choix des voyageurs : niveau inférieur « tranquille », non perturbé par la circulation de voyageurs, niveau supérieur plus animé et « panoramique » ; cette disposition, tout à fait originale, a été particulièrement précieuse pour l'aménagement de TGV's médicalisés lors de la pandémie » Covid-19 » ;

- Une accessibilité très confortable au niveau bas depuis le quai, et complètement à niveau pour la voiture spécialement aménagée pour l'accès aux voyageurs à mobilité réduite ; contrairement à l'intuition, ce TGV à deux niveaux est ainsi plus facilement accessible aux voyageurs depuis le quai que tout autre train à grande vitesse à un niveau (du moins pour l'accès aux salles basses) ;

Figure 15 : Accès au niveau bas
Photo CHU de Poitiers Communication 2020-3

- Une capacité optimale, puisque le nombre plus réduit de bogies (par rapport à l'architecture traditionnelle à deux bogies par remorque) permet une meilleure utilisation de l'espace pour des salles voyageurs, puisque chaque bogie empiète sur la salle basse voyageurs ;

- Une excellente tenue aux vents traversiers : les études avaient montré que l'optimum de capacité (sans parler de l'optimum économique) conduisait à concevoir une rame à motorisation concentrée et non à motorisation répartie : ainsi le véhicule « critique » pour ce phénomène, le premier véhicule du train, est la motrice à masse élevée et constante (et non un véhicule voyageurs, plus léger lorsque vide de voyageurs, hypothèse à prendre en compte dans l'analyse sécuritaire) : le potentiel de résistance aux vents traversiers est ainsi le même en TGV deux niveaux articulé qu'un TGV un niveau, et cela malgré la grande différence de section des remorques entre ces deux types de TGV ! Ce phénomène a pu être observé et confirmé lors de la campagne d'essais TGV 150, un jour de février 2007 par grand vent de travers.
Tout se passe comme si la motrice (véhicule exposé) « protégeait » le tronçon articulé voyageurs, qui lui-même déjà résiste mieux (qu'une architecture classique) du fait de l'appui d'une caisse sur l'autre via la rotule, les amortisseurs entre caisses (en particulier l'anti-gîte), et le lien par les barres anti-roulis sur le même bogie ;

- Enfin le confort vibratoire profite de la qualité de la suspension SR10, avec l'avantage supplémentaire intrinsèque apporté par la raideur augmentée des caisses du fait de leur inertie « deux niveaux » et un couple plus favorable des amortisseurs « caisse-caisse » (augmentation de la distance entre rotule et attaches des amortisseurs).

Autrement dit, à condition d'avoir relevé le défi posé par les handicaps originels de cette architecture, et cela grâce aux talents associés des ingénieurs de la SNCF et d'Alstom, l'architecture articulée pour un train à grande vitesse est de très loin la meilleure architecture.

François LACÔTE

Club de la Grande Vitesse Ferroviaire

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

www.cgvf.fr

contact@cgvf.fr

facebook.com/CIFbyCGVF

06.08.07.36.62