



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Comptes Rendus

Mécanique

David Goeres

Les chaînes de traction des TGV

Volume 352, Numéro spécial S1 (2024), p. 43-53

En ligne depuis le 15 novembre 2024

Numéro publié le 15 novembre 2024

Numéro spécial : Hommage à Denis Papin

Rédacteur en chef invité : Bruno Chanetz (Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), BP80100, 91123 Palaiseau Cedex, France)

<https://doi.org/10.5802/crmeca.256>

 Cet article est publié sous la licence
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1873-7234



Article de synthèse / *Review article*

Hommage à Denis Papin / *A tribute to Denis Papin*

Les chaînes de traction des TGV

The TGV traction chains

David Goeres ^a

^a Directeur de projet TGVM, Expert scientifique et technique du réseau Synapses, SNCF Voyageurs, Direction de l'Ingénierie du Matériel, France

Courriel: david.goeres@sncf.fr

Résumé. Cet article décrit les différents composants des chaînes de traction des TGV, en partant du TGV SE (1er TGV) jusqu'au TGVM.

Abstract. This article describes the different components of the TGV drive trains, from the TGV SE (1st TGV) to the TGVM.

Mots-clés. TGV, Chaîne de traction, Train, Performances de traction, TGVM.

Keywords. TGV, Traction chain, Train, Traction performance, TGVM.

Manuscrit reçu le 14 janvier 2024, accepté le 28 mai 2024.

1. Les débuts de la motorisation électrique des trains

La motorisation électrique des trains est apparue en 1837, soit à peine trente ans après la circulation du premier train à vapeur. Après ce premier train électrique qui utilisait des batteries embarquées, il faut attendre 1879 pour voir Werner Von Siemens faire rouler à Berlin la première locomotive électrique. La petite locomotive électrique était entraînée à 13 km/h sur un anneau de 300 m par un moteur série de 2,2 kW alimenté en 150 V continu par un 3^e rail avec un galet collecteur.

Très vite, les villes adoptent ce nouveau mode transport et construisent des lignes de tramway. Clermont-Ferrand sera la première à inaugurer son tramway le 7 janvier 1890.

C'est de nouveau en Allemagne que la première utilisation ferroviaire du courant alternatif se fait en 1904 avec des moteurs à collecteurs par alimentation directe en monophasé, dont la difficile commutation impose la fréquence peu ordinaire de $16\frac{2}{3}$ Hz sous 15 kV. Cette tension caténaire spécifique s'est généralisée jusqu'à nos jours en Allemagne, en Autriche et en Suisse.

Mais il faut attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour voir des grands chantiers d'électrification des lignes ferroviaires partout en Europe. Dès lors, les chaînes de traction électriques se multiplient et deviennent de plus en plus performantes (figure 1).



FIGURE 1. TGV, également connu sous le nom d’Avelia Horizon. Photo : Alstom.

2. Définition de la chaîne de traction électrique

Dans le monde ferroviaire, le terme « chaîne de traction électrique » définit tous les équipements électriques permettant de générer un effort mécanique au niveau des roues motorisées d’un train, appelé également « effort à la jante », à partir d’une source électrique soit interne, par exemple des batteries, soit externe par une caténaire.

Une chaîne de traction regroupe les principaux composants suivants :

- Le pantographe qui permet de capter l’énergie électrique à la caténaire ;
- Le transformateur principal qui abaisse la valeur de la tension des caténaires monophasées afin de la rendre compatible avec les semi-conducteurs ;
- Les convertisseurs électriques, à base de semi-conducteurs, qui transforment la tension caténaire en un réseau de tensions triphasées de fréquence variable (fréquence = vitesse de rotation du moteur) ;
- Le moteur de traction qui permet de transformer une puissance électrique en effort de rotation.

La courbe de l’effort en fonction de la vitesse ($F(v)$) d’un train (figure 2) caractérise l’effort mécanique généré par l’ensemble des moteurs du train sur toute la plage de vitesse d’exploitation. Cette courbe $F(v)$ doit être supérieure à la somme des forces qui s’opposent au déplacement du train, appelées « résistance à l’avancement ». Ceci afin de pouvoir circuler à la vitesse maximale des lignes ferroviaires ciblées pour le service commercial mais aussi de démarrer dans les rampes maximales de ces lignes.

La résistance à l’avancement en fonction de la vitesse ($R(v)$) est caractérisée par l’équation suivante :

$$R = A + Bv + Cv^2 (+Mgp)$$

- v est la vitesse du train
- $A + Bv$ représente la résistance due au roulement et aux frottements mécaniques
- Cv^2 représente la résistance due à la traînée aérodynamique du train
- M est la masse du train en Tonne
- g est l’accélération de l’apesanteur
- p est la valeur du profil de la voie en mm/m.

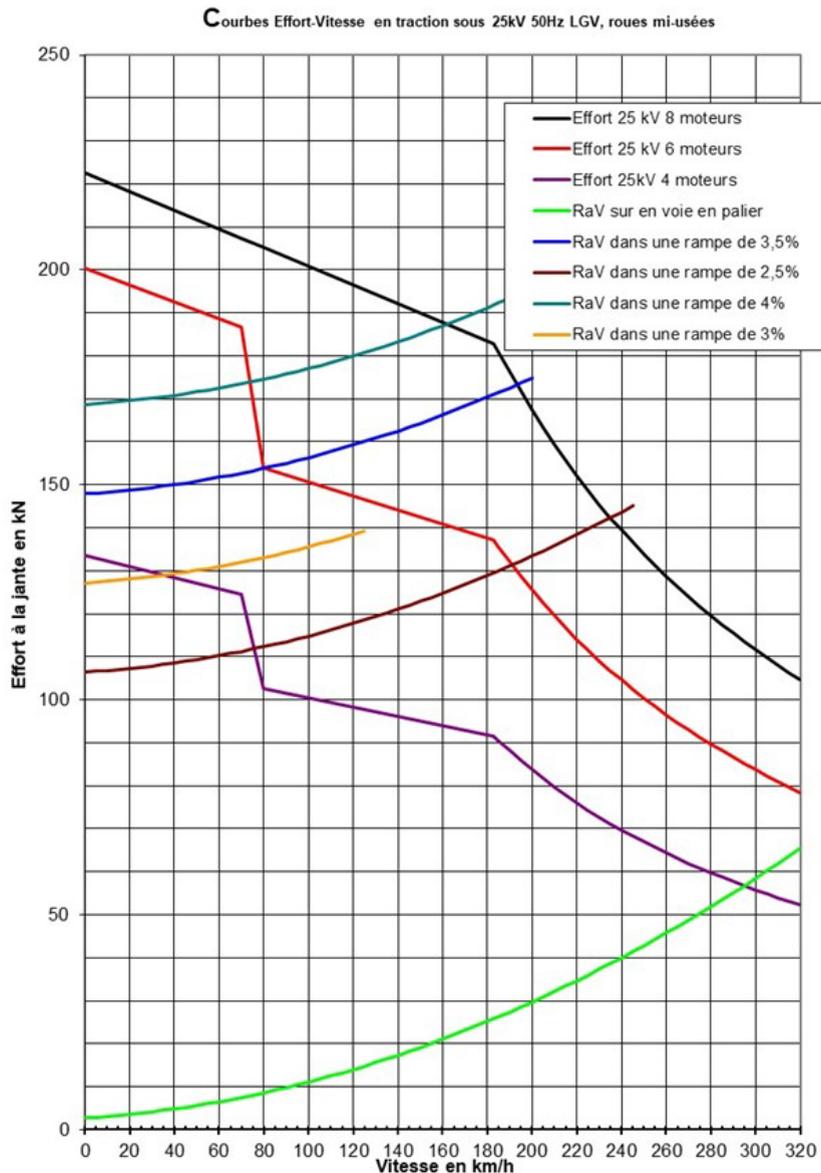


FIGURE 2. Courbes de l'effort de traction d'un TGV asynchrone en fonction de la vitesse sur ligne à grande vitesse.

Comme pour tout mobile terrestre, la résistance à l'avancement d'un train augmente avec la vitesse de circulation. C'est d'autant plus vrai pour un train à grande vitesse, pour lequel la traînée aérodynamique devient prépondérante et représente environ 80 % de la résistance à l'avancement à 300 km/h. Ainsi, la résistance à l'avancement d'un TGV double entre 200 km/h et 300 km/h. Cette contrainte, liée à la grande vitesse, entraîne un saut de performances important pour les chaînes de traction TGV par rapport à des trains exploités à des vitesses inférieures à 200 km/h. Ainsi, TGV doivent disposer d'une puissance de traction très élevée pour emmener ses 400 T à plus de 300 km/h. Cette puissance de traction est passée de 6,4 MW pour les TGVSE qui étaient dimensionnés initialement pour 260 km/h, à 8 MW pour le TGV Atlantique, premier TGV

à circuler à 300 km/h en service commercial. Avec l'arrivée des TGV Réseau, cette puissance a été portée à 8,8 MW afin de leur permettre de circuler à 300 km/h sur des zones géographiques plus accidentées. Il faut attendre le milieu des années 2000 avec l'inauguration de la Ligne à Grande Vitesse Est Européenne, première ligne en Europe homologuée pour une vitesse commerciale de 320 km/h, pour que la puissance de traction des nouvelles motrices TGV à motorisation asynchrone soit portée à 9,28 MW. C'est sur cette même ligne que le record de vitesse sur rail sera battu par la SNCF et Alstom. En effet, le 4 avril 2007, la rame TGV V150 atteint la vitesse de 574,8 km/h avec une puissance de traction de 19,6 MW. A titre de comparaison, la puissance de la voiture moyenne en France est de 85 kW.

3. Le pantographe

Tous les composants de la chaîne de traction sont ainsi hors norme pour atteindre de telles performances à commencer par le pantographe, qui permet de capter cette puissance à la caténaire. Le pantographe est soumis à toutes les « agressions » météorologiques possibles, ainsi qu'aux turbulences aérodynamiques inhérentes aux écoulements de l'air autour du train.

Cet équipement électromécanique permet de capter une puissance apparente d'environ 10 MVA via une surface de contact avec la caténaire équivalente à une pièce de 1€. Pour atteindre cette performance, le pantographe doit avoir une structure métallique la plus légère possible tout en assurant le plus de stabilité aux bandes de frottement et résister aux contraintes aérauliques à 320 km/h. De plus, le choix des matériaux de frottement des bandes en contact avec la caténaire est en lien direct avec la durée de vie de la caténaire. Ces bandes sont le plus souvent composées de poudre de carbone et de poudre de cuivre dans des proportions adaptées à la vitesse et aux courants à capter.

Ces optimisations sont illustrées ci-dessous avec 3 générations de pantographes de TGV (figure 3 et table 1).

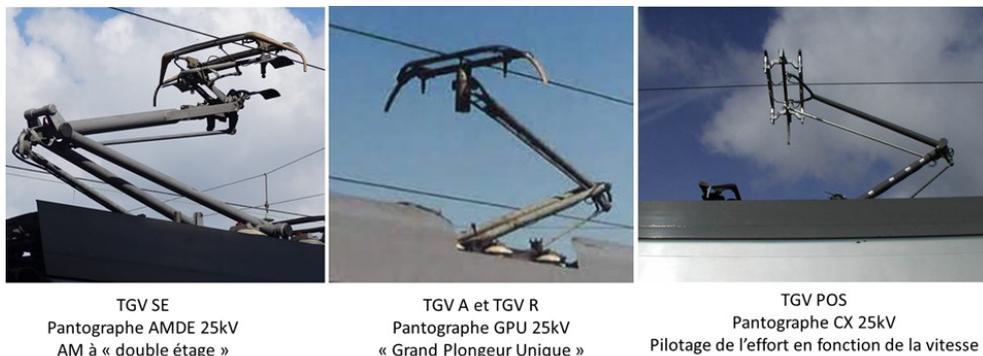


FIGURE 3. Évolution des pantographes de TGV (voir aussi table 1).

TABLE 1. Évolution de la masse des pantographes TGV.

Pantographe	Masse mobile du pantographe	Masse mobile de l'archet
AMDE 25 kV	50 kg	10 kg — Archet métal
GPU 25 kV	40 kg	8 kg — Archet carbone
CX 25 kV de 1 ^{ère} génération	25 kg	8 kg — Archet carbone
CX 25 kV de 2 ^{ème} génération	23 kg	5 kg — Archet carbone mono-bande

Pour assurer un captage, le pantographe doit assurer une poussée mécanique suffisante sur la caténaire afin d'assurer un contact électrique de bonne qualité. Ni trop, pour ne pas soulever excessivement le fil de contact élastique de la caténaire, ce qui pourrait conduire à son arrachement; ni trop peu, pour éviter la séparation physique entre les bandes de frottement et la caténaire, qui génère des arcs électriques destructeurs pour les parties métalliques de l'archet. Les effets aérodynamiques étant de plus en plus importants à mesure que la vitesse augmente, l'effort mécanique doit s'accroître à mesure que la vitesse augmente. L'effort de contact est usuellement proportionnel au carré de la vitesse.

L'effort mécanique du pantographe soulève légèrement la caténaire aux zones de contact et produit une onde qui se déplace à la vitesse du train. Cette onde nécessite, pour des vitesses élevées, d'assurer une distance minimum entre 2 pantographes en service. Cette distance minimum ne permet pas de lever les deux pantographes des deux motrices accouplées lors des circulations de 2 rames TGV. En effet, l'ondulation de la caténaire n'est pas suffisamment « amortie » pour assurer un captage de qualité. Ainsi, il n'est pas possible de lever le pantographe de chaque motrice mais seulement un pantographe par rame, celui de la motrice arrière, en fonctionnement nominal, et celui de la motrice avant, en cas d'avarie. L'énergie électrique est acheminée à la motrice distante via un câble 25 kV, appelé « ligne de toiture », fixé sur la toiture du TGV.

4. Le transformateur de puissance (TFP)

L'énergie captée à la caténaire par le pantographe est ensuite acheminée au transformateur principal (TFP) de chaque motrice. Le TFP assure d'une part une isolation galvanique entre le 25 kV capté à la caténaire et le reste des équipements électriques du train; et, d'autre part, il permet d'adapter le niveau de tension électrique afin de le rendre compatible avec les semiconducteurs de puissance des convertisseurs électriques. Dimensionné pour une puissance d'environ 5 MVA, le TFP d'une motrice TGV est un équipement relativement volumineux et d'une masse moyenne de 10 T (figure 4).

Le principe de fonctionnement d'un TFP est assez simple, il permet à un courant électrique circulant dans une bobine primaire d'induire un courant dans une bobine secondaire via un circuit magnétique. L'intensité du courant secondaire est égale à l'intensité du courant primaire multipliée par le rapport entre le nombre de spires du bobinage primaire et le nombre de spires du bobinage secondaire.

La puissance électrique absorbée par le bobinage primaire étant égale à la puissance dans le bobinage secondaire aux pertes près ($U_1 * I_1 = U_2 * I_2$), la relation entre les tensions des bobinages vérifie l'égalité suivante : $U_2 = (n_2/n_1) * U_1$. Le rapport n_2/n_1 appliqué à un train est environ 1/25, permettant ainsi d'abaisser la tension 25 kV de la caténaire appliquée au primaire du TFP à une tension secondaire d'environ 1000 V. Un transformateur de TGV dispose de 4 bobinages de traction secondaires, un pour chaque essieu moteur de la motrice (figure 5).

5. La conversion d'énergie

5.1. Fonctionnement d'une chaîne de traction sous caténaire continue

La conversion d'une tension continue en un réseau de tensions triphasées à fréquence variable est assurée par un convertisseur appelé « onduleur de tension ». L'association d'un onduleur et d'un moteur triphasé permet d'assurer la fonction « traction » d'un train sous caténaire continue (figure 6).

La technologie des interrupteurs de puissance « IGBT » (Insulated Gate Bipolar Transistor) permet, depuis plus de vingt ans, de réaliser la fonction onduleur de tension. Les onduleurs



FIGURE 4. Un TFP de motrice TGV asynchrone. Source : photographie personnelle de l'auteur.

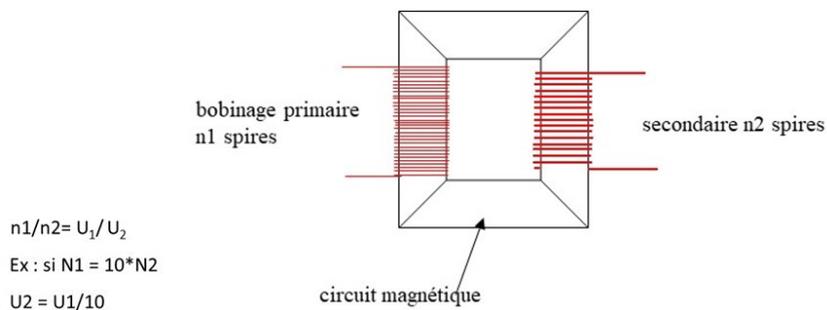


FIGURE 5. Schéma de principe d'un transformateur.

à IGBT absorbent (traction) ou restituent (freinage par récupération d'énergie) de la puissance à la source de tension continue. Il s'agit donc d'un convertisseur réversible capable de créer un réseau triphasé à partir d'une tension continue (traction) ou une tension continue à partir d'une tension triphasée (freinage).

Un onduleur transforme une tension continue en une tension sinusoïdale. Pour ce faire, les semi-conducteurs vont « découper » une source de tension continue E , et en appliquant plus ou moins longtemps cette tension à la charge (coefficient α), vont créer une tension moyenne dont l'amplitude pourra varier en fonction du coefficient α (figure 7).

Ce principe appliqué 3 fois, en déphasant les ordres de commandes de 120° permet de créer un réseau triphasé dont l'amplitude est fonction de α . La fréquence est déterminée par la commande des semi-conducteurs (figure 8).

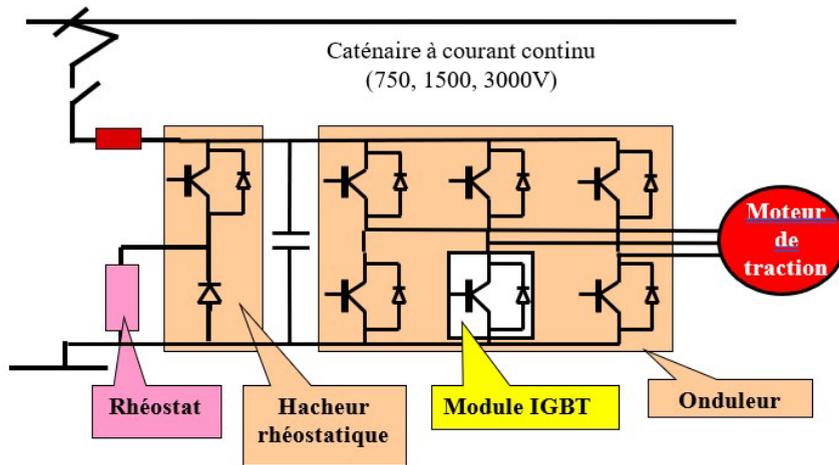


FIGURE 6. Architecture typique de la chaîne de traction moderne alimentée en courant continu.

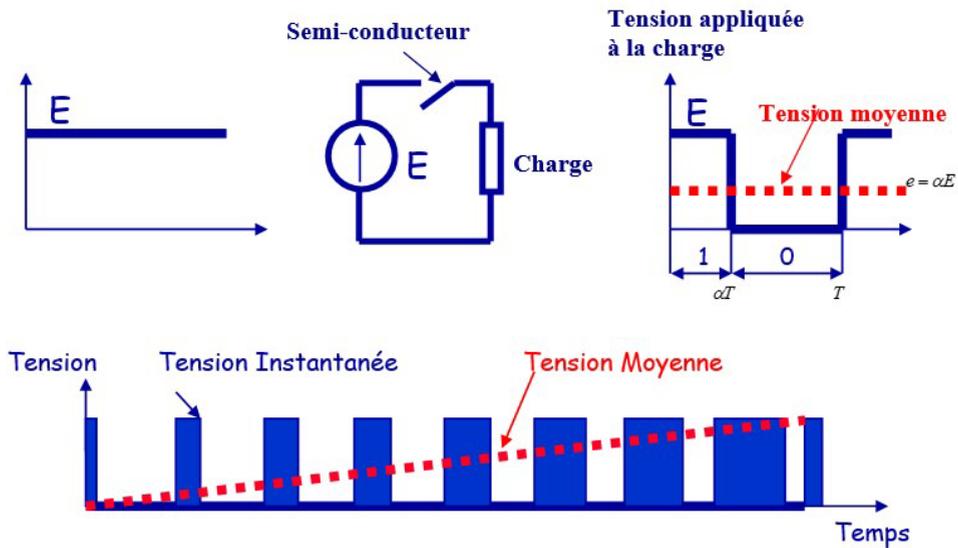


FIGURE 7. Génération d'une tension moyenne variable.

5.2. Fonctionnement d'une chaîne de traction sous caténaire monophasée

Les chaînes de traction fonctionnant sous des tensions caténaires monophasées (25 kV–50 Hz ou 15 kV–16,7 Hz) disposent d'un étage supplémentaire capable de transformer la tension sinusoïdale à fréquence fixe (fréquence de la caténaire) en une tension continue adaptée au fonctionnement de l'onduleur. Cet étage supplémentaire est composé d'un pont monophasé à commutation forcée (PMCF) (figure 9).

Le PMCF est un convertisseur réversible comme l'onduleur. Sa structure et son pilotage lui permettent de jouer le rôle de redresseur d'une part (transformer une tension sinusoïdale en tension continue), mais aussi d'être un onduleur capable de renvoyer vers la caténaire l'énergie

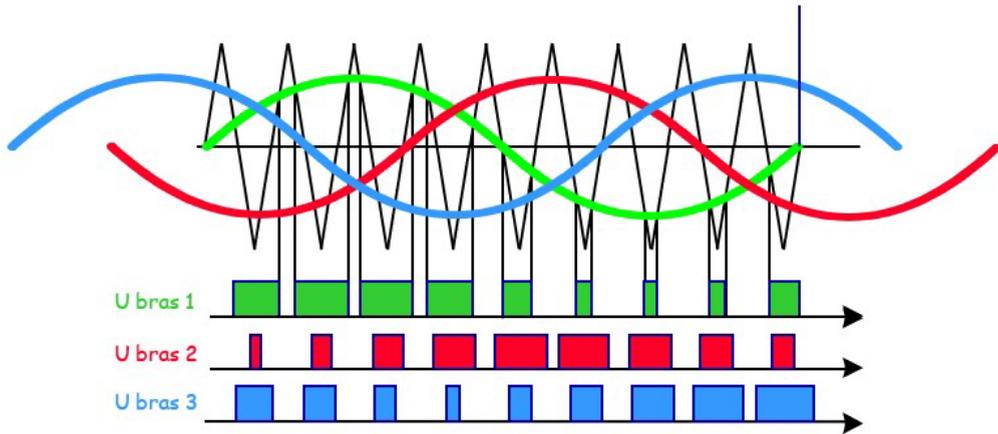


FIGURE 8. Construction d'un réseau triphasé.

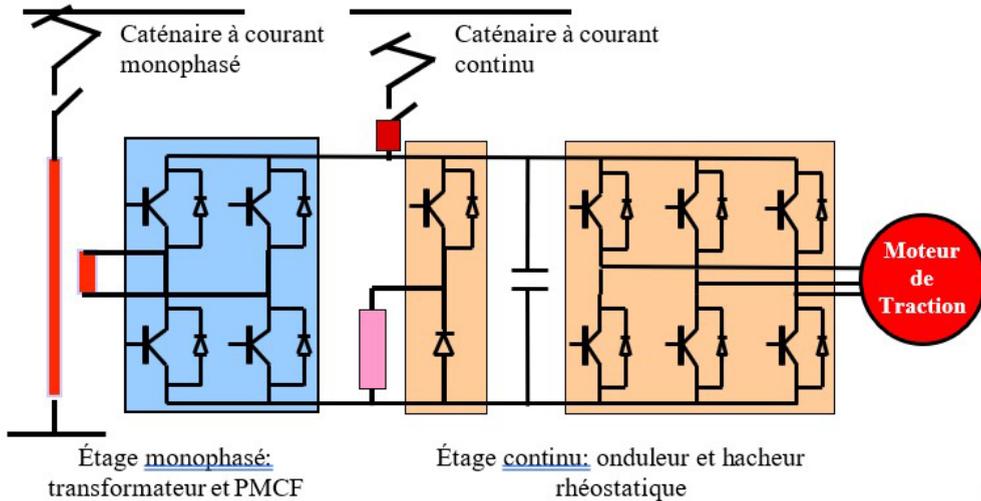


FIGURE 9. Architecture de la chaîne de traction « moderne ».

de freinage produite par les moteurs de traction. Son fonctionnement est similaire à un onduleur monophasé travaillant à fréquence fixe, celle de la caténaire.

Ainsi, les convertisseurs de la chaîne de traction permettent de transformer la tension 25 kV de la caténaire de fréquence fixe 50 Hz, en un réseau de tensions triphasées sinusoïdales d'amplitudes et fréquences variables, la vitesse de rotation du moteur synchrone ou asynchrone étant proportionnelle à la fréquence.

6. Les moteurs de traction

Le moteur électrique est le dernier composant de la chaîne de traction. Il peut être fixé dans le bogie ou sous caisse au-dessus du bogie; cet environnement contraint donc fortement son volume. Plusieurs types de moteurs électriques se sont succédés dans le ferroviaire au fil des années.

Le moteur à courant continu était usuellement utilisé jusqu'au début des années 80. Son fonctionnement très simple permettait de le piloter à partir de composants électromécaniques.

L'apparition des Thyristors (semi-conducteur) de forte puissance dans les années 80, associée à des électroniques de commande numérique a permis de concevoir des pilotages complexes, et l'utilisation de moteurs synchrones et asynchrones. Ces moteurs alternatifs ont l'immense avantage d'être moins complexes, plus puissants (pas de collecteur) et plus légers (figure 10).

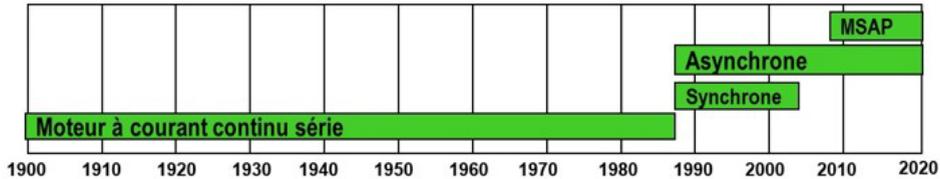


FIGURE 10. Évolution du type de motorisation dans les trains.

Ainsi les années 90 ont vu le déploiement du moteur synchrone, notamment sur les TGVA, TGVR et TGV Duplex de première génération. Il faut attendre le début des années 2000, et l'apparition des IGBT de puissance pour que le moteur asynchrone se généralise. Pour comprendre ces évolutions successives, il convient d'évoquer les paramètres fondamentaux de dimensionnement.

Le couple « C » d'un moteur vérifie l'égalité (Figure 11)

$$C = A * B * D^2 * L$$

- A en Ampère.conducteurs/m
- B = induction en Tesla
- D = diamètre du moteur
- L = longueur de fer

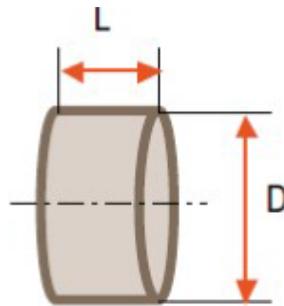


FIGURE 11. Schéma simplifié d'un rotor de moteur.

Ainsi, le couple est directement lié au volume de fer du moteur. Pour un moteur de locomotive fret, qui nécessite un fort couple au démarrage, on privilégiera un moteur de diamètre important.

Mais pour une application grande vitesse, il est plus pertinent de disposer d'une vitesse de rotation élevée et d'augmenter la longueur de fer, dans le respect des contraintes d'encombrement associées au bogie. En effet, réduire le diamètre des moteurs est nécessaire pour augmenter la vitesse de rotation sans augmenter les contraintes mécaniques et donc les contraintes de calage des conducteurs électriques du rotor.

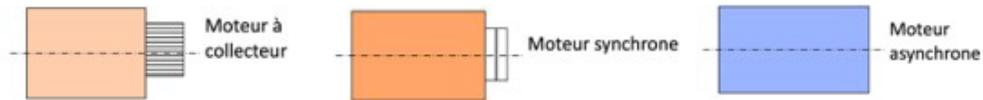


FIGURE 12. Schémas simplifiés des rotors des différents types de moteur de traction ferroviaire.

TABLE 2. Caractéristiques des différents moteurs des TGV.

Année	1981	1989	2007
Ligne LGV	Paris — Sud Est	Atlantique	Est Européenne
Type de moteur	Courant continu	Synchrone	Asynchrone
Puissance de kW	535	1100	1160
Ration kg/kW	2,9	1,35	1,16
Vitesse en tr/min	3400	4000	3900

Ainsi, en considérant un même volume de moteur, les 3 figures ci-dessous illustrent le gain en longueur de fer des 3 types de moteurs électriques (Figure 12).

L'alimentation des enroulements des rotors nécessite l'ajout de balais qui sont en contact avec le collecteur du moteur à courant continu ou les couronnes du moteur synchrone. La suppression de ces dispositifs dans le moteur asynchrone permet de disposer d'un volume de fer plus important et donc d'une plus grande puissance. La table 2 ci-dessus illustre les gains apportés par les différentes motorisations TGV.

Le moteur synchrone à aimants permanents est apparu au milieu des années 2000. Ce moteur reprend les avantages du moteur synchrone tout en éliminant la contrainte d'alimentation des enroulements du rotor (électro-aimant) qui ont été remplacés par des aimants. Ce moteur très compact est de plus en plus utilisé dans l'automobile et sur les tramways. Cependant, certains de ses modes dégradés et son coût (utilisation de terres rares pour les aimants) freinent sa généralisation à des matériels à plus grande vitesse. A noter, que l'AGV d'Alstom est le premier train à grande vitesse à utiliser cette motorisation.

7. La chaîne de traction du TGVM : de nouveaux défis

Différentes chaînes de traction se sont succédées au gré des avancées technologiques. Les performances étaient souvent à la limite de ce que permettait la technologie de l'époque. L'arrivée des IGBT a permis de standardiser la conversion d'énergie électrique et par conséquent les chaînes de traction. Cette standardisation a permis des gains de fiabilité notables et une réduction des coûts.

Les défis liés au réchauffement climatique et la nécessité de réduire toujours plus la consommation d'énergie induisent un nouveau souffle d'innovation dans cet environnement standardisé. Ces nouveaux défis ont évidemment orienté les choix techniques du nouveau TGVM. Une attention particulière a été portée sur les innovations en lien avec l'aérodynamique, ce qui a réduit d'environ 13 % le coefficient de pénétration dans l'air du TGVM vis-à-vis de ses prédécesseurs. Ce gain sur la résistance à l'avancement a contribué à diminuer, dans les mêmes proportions, la puissance des moteurs de traction et donc leur taille. Ainsi, ces optimisations ont permis de fixer les moteurs du TGVM sur le bogie alors qu'ils étaient historiquement fixés sur la caisse des motrices. Cette nouvelle architecture a simplifié la chaîne cinématique entre le moteur et l'essieu, entraînant une réduction de coût importante, une plus grande fiabilité et un gain de rendement de 2 %.

D'autres optimisations et innovations ont permis de réduire de 20 % la consommation d'une rame TGVM par rapport aux TGV Duplex existants. Le nombre de places assises ayant par ailleurs été augmentées de 10 à 20 % sur TGVM, c'est une réduction de 32 à 37 % de GES par voyageur. Cet écart s'accroît jusqu'à 50 % de gain pour le TGVM en comparaison avec les matériels à grande vitesse à 1 niveau des exploitants ferroviaires concurrents de la SNCF. Toutes ces innovations permettent au TGVM de reprendre une longueur d'avance vis-à-vis de ses concurrents, validant l'objectif initial de ce partenariat d'innovation entre SNCF Voyageurs, Alstom et l'ADEME.

Déclaration d'intérêts

Les auteurs ne travaillent pas, ne conseillent pas, ne possèdent pas de parts, ne reçoivent pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et n'ont déclaré aucune autre affiliation que leurs organismes de recherche.