
Des modèles roue-rail en chambre aux circuits et trains d'essais : une mise en perspective des chemins de fer français (XIX^e- XX^e siècles)

From wheel-rail models in chambers to test tracks and trains: a different perspective on the French railways (19th - 20th century)

Georges Ribeill



Édition électronique

URL : <http://dht.revues.org/1659>

ISSN : 1775-4194

Éditeur :

Centre d'histoire des techniques et de l'environnement du Cnam (CDHTE-Cnam),
Société des élèves du CDHTE-Cnam

Édition imprimée

Date de publication : 1 décembre 2011

Pagination : 71-83

ISBN : 978-2-9530779-7-1

ISSN : 0417-8726

Référence électronique

Georges Ribeill, « Des modèles roue-rail en chambre aux circuits et trains d'essais : une mise en perspective des chemins de fer français (XIX^e- XX^e siècles) », *Documents pour l'histoire des techniques* [En ligne], 20 | 2e semestre 2011, mis en ligne le 14 septembre 2012, consulté le 30 septembre 2016. URL : <http://dht.revues.org/1659>

Ce document est un fac-similé de l'édition imprimée.

© Tous droits réservés

Des modèles roue-rail en chambre aux circuits et trains d'essais : une mise en perspective des chemins de fer français (XIX^e- XX^e siècles)

Georges Ribeill

École Nationale des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Le système ferroviaire, assimilable à des mobiles guidés circulant sur une paire de rails, se prêtait bien à la modélisation mathématique et à la résolution théorique de certains problèmes : tracé de la voie, stabilité des véhicules, freinage des convois. Mais ces approches seront vite complétées, voire corrigées, par des études empiriques en grandeur nature et « sur le terrain » : des appareils de mesure et d'enregistrement appropriés (tachymètres, ressorts dynamométriques, pendules gravitationnels) équipent des wagons de mesure ; des expérimentations sont réalisées sur des trains d'essai. En 1909, les réseaux d'Europe s'entendent même au plan international pour soumettre les essais des divers systèmes de freins continu à un protocole uniformisé.

Résumés et mots clés en anglais sont regroupés en fin de volume, accompagnés des mots clés français

Malgré sa complexité évidente et le double impératif qui le régit, régularité horaire mais aussi sécurité physique, le système ferroviaire est apparu aux nombreux polytechniciens à qui les compagnies confièrent les tâches de conception et d'innovation techniques, comme susceptible d'être abordé par la formulation mathématique et la résolution de problèmes de mécanique rationnelle. Le fait même qu'un essieu, une locomotive, un wagon ou un train soient toujours guidés sur une paire de rails, facilita cette modélisation, en quête du tracé géométrique idéal de la voie, jusqu'à la recherche du système de freinage optimum d'un train entier. La littérature technique ferroviaire fourmille de ces approches théoriques en chambre, conduisant parfois à l'adoption de formules pratiques, mais largement corrigées par de généreux coefficients empiriques de sécurité.

Ce n'est que progressivement que les essais et mesures « grandeur nature » relayeront ces calculs et modèles théoriques. Aux premiers tachymètres embarqués succèdent dans les années 1880 divers ressorts dynamométriques ou pendules gravitationnels qui équipent les premiers wagons de mesure, chaque

compagnie se dotant de matériels particuliers. En 1890, une ligne pentue à faible rayon de courbure se prête enfin à des observations directes de stabilité dans le cadre d'une commission officielle, et un petit circuit d'essai est construit par la Compagnie de l'Est, ouvert à toutes les compagnies pour venir y tester leur matériel roulant.

C'est d'un conflit de « religion » entre réseaux, que résultera en 1889-1890, proposée par la Compagnie du PLM, une campagne intensive d'essais de grande vitesse (soit à l'époque, plus de 120 km/h), locomotives seules puis attelées à des voitures, où l'on s'intéresse aux vitesses-limites que peuvent atteindre en toute sécurité des machines diverses circulant sur une même voie parfaite. De ces observations et comparaisons très fécondes entre divers types de locomotives à vapeur, naîtront quelques confirmations quant aux risques d'instabilité dus à l'effet intempestif et redouté de lacet, ainsi qu'une nouvelle génération de locomotives !

Il faut attendre 1909 toutefois pour qu'au plan international, soit inventé le principe d'un protocole d'épreuves pour valider tout système de frein continu prétendant assurer la sécurité d'un train

de marchandises circulant par delà les frontières des réseaux et des pays, son interopérabilité en termes modernes. Trains d'essais sur des lignes à fortes déclivités, relevés complets des mesures détaillées sur des formulaires standards, tout cela prépare l'avènement entre les deux guerres des essais de pleine voie, où de nouveaux types de capteurs et appareils enregistreurs équipant des « voitures d'auscultation », contribueront à renouveler fondamentalement l'approche de la dynamique du système ferroviaire.

Très poussée au siècle précédent, la modélisation en chambre trouvait là ses limites, invisibles selon la vision myope, analytique et réductrice des ingénieurs réduisant en somme un convoi à un essieu chargé circulant entre deux rails parallèles ou à un châssis rigide et suspendu soumis à diverses forces et mouvements parasites.

Deux « barres parallèles », tremplin de la modélisation du système ferroviaire

Mettant en jeu des véhicules moteurs ou remorqués chargés d'individus et circulant sur les mêmes voies ferrées, l'exploitation des chemins de fer doit satisfaire à des critères très stricts de sécurité mais aussi de régularité : si les trains étaient à tout instant à l'heure, à la minute près et conformément aux horaires tracés à priori, les risques de collision seraient inexistantes, et assujettis à certaines vitesses limites imposées, dans un courbe serrée par exemple, ils ne dérailleraient pas sous l'effet de la force centrifuge. Modélisable et prévisible comme tout système dynamique de mobiles contraints par le rail qui les supporte et les guide à la fois, le chemin de fer constitue en première approximation un système déterministe : donnez-moi l'état des forces de traction, des poids des véhicules, le profil de la voie, et je calculerai l'avancement du train sur la voie ferrée.

Né au XIX^e siècle, à l'âge de la mécanique rationnelle classique, le chemin de fer a constitué pour les ingénieurs qui furent chargés de sa conception puis de son exploitation, un objet propice à sa modélisation, cinématique (position des trains sur une trajectoire présentant en profil des paliers, des rampes et des descentes, en plan des alignement et des courbes), ou dynamique (forces de traction des locomotives ou de résistance des wagons, adhérence entre roues et rails, etc.). Mais ce système ferroviaire a aussi pour caractéristique d'être un système ouvert, plongé dans un environnement naturel aléatoire, capable d'être soumis à des perturbations altérant sa « bonne marche » théorique et programmée. Ainsi certains paramètres sont peu prévisibles (vent, neige,

verglas, voie jonchée de feuilles humides, obstacles naturels sur la voie, actes de malversation, etc.), comme aussi de possibles aléas ferroviaires, d'origine technique (cassure de rail, rupture d'attelage) ou humaine (défaut de vigilance du mécanicien ou du serre-frein, manque de vigilance du garde-ligne ou étourderie de l'aiguilleur...).

En réalité, les circulations réelles des trains n'obéissent à la minute près que fort médiocrement aux graphiques horaires de circulation tracés en chambre, qui les ont à la fois planifiées (horaires et vitesses d'acheminement) et rendues compatibles entre elles (pas de collision, échelonnement de l'arrivée des trains dans les gares, éventuelles correspondances entre trains, etc.).

Mais comme le soulignera au milieu du XX^e siècle et en de multiples reprises l'ingénieur des Mines Louis Armand, ingénieur de la Traction devenu le directeur général de la SNCF, exposé maintenant à des modes concurrents (la route ou l'air), le système de transport ferroviaire avait un atout exclusif, son *guidage* : la modélisation de son exploitation était facilitée du fait que tout train pouvait en première approximation être localisé par une seule variable, sa position précise (x), au mètre près, sur la voie ferrée (V1 ou V2 distinctement orientées et parcourues à sens unique) de la ligne reliant A à B ; si le fait pour un train d'être guidé par les rails simplifiait ainsi certes sa gestion, il constituait aussi un facteur important d'insécurité, par le risque possible de collisions dans un système perturbé, « désheuré » dans le jargon cheminot : trains se croisant sur la même voie ou l'un rattrapant l'autre, l'un prenant l'autre en écharpe sur un aiguillage. Ainsi sont définis les trois risques majeurs inhérents à la multiplicité et simultanéité de circulations ferroviaires sur de mêmes lignes : nez-à-nez, rattrapage, prise en écharpe. Faiblesse du système, inversement donc à la circulation automobile sur une route à deux voies (autorisant le dépassement) ou aux trajectoires tridimensionnelles des avions. En contre partie, la dynamique ferroviaire pouvait se réduire à l'étude d'un système mécanique guidé régi par n variables principales, la position x de chaque train sur le réseau des voies ferrées. La plus belle réalisation résultant du guidage ferroviaire fut le « block-system », soit l'autorisation d'accès des trains sur des cantons successifs de voie protégés par un « circuit de voie » : tant que le canton est occupé, qu'un seul essieu ouvre ce circuit électrique et déclenche le feu rouge d'arrêt d'un sémaphore placé à l'entrée de ce canton, aucun train ne peut s'y engager.

Sur la ligne d'horizon du système ferroviaire, le mirage cybernétique

Dans ce guidage du train par la voie ferrée, dans les années 60, Louis Armand voulait donc voir un atout considérable pour l'application de tous les concepts opérationnels d'une cybernétique alors en vogue : « Ce que la cybernétique a apporté au chemin de fer et ne pouvait apporter qu'à lui seul, ce fut le retournement, en faveur des transports guidés, des chances longtemps confisquées par les non guidés. Le guidage des rails est le principal agent de ce feed-back (...). Grâce à la cybernétique, le rail n'est plus demeuré le garde-boudin des roues innombrables qui le martelaient jour et nuit ; il est en passe de devenir l'un des principaux artisans du relais de l'homme par la machine »¹.

Ainsi, pouvait-on entrevoir en 1970 l'aube d'un chemin de fer entièrement automatisé : alors que « la cybernétique a déjà pris pied sur la plate-forme des locomotives pour y installer la conduite automatique des trains », par ailleurs « la télécommande règne dans maints triages qui bougent maintenant comme mus par une main invisible », écrit avec son autorité indiscutée et sa foi mobilisatrice l'académicien et homme de prospective Louis Armand. Jusqu'à échafauder une véritable utopie ferroviaire² : « Les ordinateurs vont prendre la relève des dispatchers [terme d'origine américaine désignant les régulateurs des circulations en temps réel] ; ils suivront à leur place la marche des wagons et allègeront ainsi d'une astreignante et permanente veille le cerveau soucieux de ces agents ; ceux-ci n'auront plus à intervenir que dans les situations inattendues, sortant des « programmes ». Les machines électroniques chercheront d'autre part où doivent être envoyés les wagons après déchargement, pour être réutilisés au plus vite et au mieux ; on est fondé à espérer doubler, de cette façon, le rendement du matériel ». Décédé en 1971, Louis Armand ne pourra assister au fiasco de sa rêverie d'un système ferroviaire « cybernétisé » qui, au XXI^e siècle, certes largement automatisé, s'appuie toujours dans le monde entier au moins sur un trinôme essentiel d'agents humains : un « mécano » dans une cabine de conduite de chaque train, un « agent de circulation » télécommandant depuis un lointain poste de commandement les aiguilles et signaux, signaux classiques latéraux ou signaux

modernes embarqués (*cab-signal*), enfin un « régulateur » arbitrant les « conflits de circulation » entre trains diversement prioritaires, ces deux derniers opérateurs étant parfois confondus.

C'est du moins grâce à « ses deux barres parallèles » que Louis Armand assurait donc au chemin de fer sa survie pluriséculaire : « C'est à la cybernétique que nous devons la surprise majeure que réservait le chemin de fer. Grâce à cette nouvelle discipline, on peut dès à présent affirmer que, si la machine à vapeur ne devait pas dépasser le XX^e siècle, les rails sont appelés à rester l'un des supports fondamentaux du transport au XXI^e siècle. Après avoir débuté en compagnie des coches d'eau, de la diligence, du vélocipède, le chemin de fer poursuivra, sur ses barres parallèles, sa carrière de pair avec les fusées de l'astronautique »³. Pronostic à ce jour valide, en ce début de XXI^e siècle.

Avant même donc de se prêter aux paradigmes bien fascinants mais en vérité naïfs d'une ère de cybernétique généralisée, du moins le système ferroviaire s'était fort bien livré aux charmes intellectuels de la modélisation mathématique. Ingénieurs des Mines ou des Ponts et Chaussées, qu'ils soient des hauts fonctionnaires chargés des services de contrôle technique de l'exploitation (expertise en cas d'accident ; pouvoir réglementaire technique, etc.) ou des ingénieurs passés dans les services de l'Exploitation, de la Traction ou de la Voie des premières compagnies privées, ces nombreux polytechniciens à qui furent confiées les tâches de conception et d'innovation techniques ou sécuritaires, pouvaient être tentés d'approcher les problèmes de circulation des trains en recourant à de séduisants modèles de mécanique rationnelle : géométrie du contact roue/rail, profil et plan de la voie, masses des véhicules circulant sur les deux files de rail, puissance de traction des engins moteurs, capacité de freinage du matériel moteur et remorqué, tous paramètres et variables en interaction caractérisant l'état dynamique du train à l'instant t asservi à des limites de puissance et contraint par des règles de sécurité.

Nous avons déjà évoqué comment le système ferroviaire s'était tôt prêté à une conceptualisation parcellaire des nombreux problèmes pratiques, concernant la sécurité de l'exploitation ou le confort du voyageur⁴. Le tracé de la voie en plan et en profil, la

³ *Ibid.*, p. 23.

⁴ Georges Ribeill, « Les questions de stabilité dynamique dans les chemins de fer. Expériences et/ou théories à l'épreuve d'un siècle à l'autre », Claudine Fontanon éd., *Histoire de la mécanique appliquée. Enseignement, recherche et pra-*

¹ Louis Armand, *Propos ferroviaires*, Paris, Fayard, 1970, p. 236.

² Louis Armand, *Message pour ma patrie professionnelle*, Paris, Association des Amis de Louis Armand, chapitre 1, « Sur les barres parallèles », pp. 24-25 (écrit posthume).

géométrie du contact roue-rail, tous ces paramètres topographiques et géométriques permettaient d'aborder l'étude de la stabilité des véhicules moteurs ou remorqués moyennant des approches réductrices, très simplificatrices puisque ne prenant en considération que l'un des composants du système : l'essieu moteur, le bogie porteur, les freins, les suspensions ou les attelages ; la voie et son tracé topographique ; le rail et son profil géométrique, ses césures que constituent les joints de rails, etc. Autant de composants essentiels de la mécanique ou de la sécurité du système bien étudiés, mais sans s'intéresser à leurs possibles et complexes interactions. Rappelons les principales illustrations d'une telle orientation des premières recherches ferroviaires.

La géométrie de la voie

Engagé dans une longue courbe, le train était soumis à une force centrifuge préjudiciable tant du point de vue du matériel roulant (frottement amplifié de la voie et de la roue, risque de déraillement du train ou de ripage de la voie) qu'au point de vue du confort du voyageur qui, assis dans son compartiment, voire debout, était désagréablement déporté. D'où la correction apportée par le *dévers* calculé entre les deux files d'un rail en courbe et le *surhaussement du rail extérieur* conséquent : la composante entre les charges exercées par le train et la force centrifuge devait être normale au plan de roulement pour faire disparaître tout effort latéral exercé sur le rail extérieur ou subi par le voyageur. Mais comme la résolution optimale de ce problème simple dépendait du poids des masses véhiculées et des vitesses des trains, tous paramètres fort variables d'une circulation à l'autre, c'est un *dévers moyen* que les ingénieurs de la Voie devaient adopter sur leurs lignes. Comme en bien des fois, la pureté absolue de la solution analytique était convertie en une formule semi-empirique⁵, dont chaque réseau faisait sa norme de référence, considérée comme le meilleur choix pour son exploitation.

De ce dévers découlait le problème de son *raccordement* : on ne peut passer brusquement du rail en alignement au niveau surélevé de la courbe qui le prolonge. Faute de transition en douceur obtenue par un *plan incliné*, le passage du premier

tronçon au second engendrerait une accélération centrifuge brutalement subie par le délicat matériel roulant et mal ressentie par le voyageur. En l'absence de règle générale, les ingénieurs concepteurs de la voie adoptèrent des règles variables : raccordement avec pente constante ou sur une longueur constante, raccordement opéré sur l'alignement ou sur la courbe, ou mixte ... Les ingénieurs français adoptèrent comme principe une courbure progressive de la voie, assurant une continuité géométrique entre son tronçon rectiligne et son tronçon en courbe de rayon fini. Complété par les deux conditions que le dévers soit en chaque point proportionnel au rayon de courbure et qu'il croisse suivant une pente uniforme, la résolution d'une équation différentielle du deuxième ordre conduisait à une courbe *radioïde* dont on pouvait se contenter d'une approximation, une *parabole cubique*⁶ : d'où l'appellation consacrée jusqu'à nos jours de *raccordement parabolique*. Solution théorique fixée dès 1865-1870, recommandée en 1879 par une circulaire ministérielle, et adoptée en France jusqu'à nos jours.

La résistance des trains à la traction

De leur côté, les ingénieurs du Matériel avaient à s'intéresser en premier lieu au problème de la résistance des trains à la traction, faisant intervenir de multiples facteurs : frottement des roues sur les fusées, résistance due à la voie, en alignement ou en courbe, en pente, résistance de l'air. Si le calcul de la résistance *r* unitaire des trains à la traction (résistance par tonne de train brut remorqué, machine et tender compris) suscita chez les ingénieurs des Mines des modélisations théoriques précoces, elle va s'appuyer néanmoins avec des confrontations expérimentales, conduisant à des formules semi-empiriques : une importante série d'expériences conduites en 1865 au chemin de fer de l'Est par Vuillemin (un centralien de la promotion 1835), Guebhard et Dieudonné, permet d'améliorer le calcul de *r*, en s'affranchissant de la « formule de Harding » établie en Angleterre en 1846 et communément adoptée en France.

Mais assez vite, des wagons d'expériences sont conçus par les ingénieurs, dans lesquels des dynamomètres permettent de mesurer les efforts de traction subis, c'est-à-dire le travail fourni au crochet de traction du tender : la méthode consiste à interposer entre le tender et les véhicules du train, un wagon spécial portant un *ressort dynamométrique* pouvant enregistrer un effort de traction jusqu'à dix tonnes, dont les mouvements étaient enregistrés automatiquement

tiques mécaniciennes après 1880, 1998, pp. 137-159.

⁵ Ainsi, le dévers découlait de la formule exacte, $d = 0,0118 \frac{V^2}{R}$ dans les compagnies de l'Orléans, du Midi et de l'Est ; alors que le PLM, le Nord, l'Ouest et le Réseau de l'État s'en tenaient à une formule simplifiée, $d = V/R$ (d = dévers en cm, V = vitesse en km/h, R en mètres) : Charles Bricka, *Cours de chemins de fer professé à l'École nationale des Ponts et Chaussées*, Paris, Gauthier-Villars, 1894, t.1, p. 363.

⁶ Équation développée de la courbe : $y = mx^3 (1 + ax^4 + bx^8 + cx^{12} + \dots)$

sur une bande de papier se déroulant en fonction de l'avancement du train.

La Compagnie de l'Est profita ainsi du concours de l'ingénieur électricien Marcel Deprez pour se doter d'appareils manométriques qui permettaient de relever les diagrammes en opérant à l'intérieur du wagon⁷. Bien que « les problèmes très compliqués auxquels conduisait une expérience de ce genre paraissaient entièrement résolus », « les résultats obtenus n'ont pas été d'une précision suffisante », pouvait-on objecter⁸, en raison de la rusticité des appareillages. Les Compagnies du Nord⁹, de l'Ouest¹⁰ et du PLM¹¹ disposaient de wagons d'expériences similaires. Le PLM se distingua par deux wagons construits

en 1888, qui, attelés, devaient permettre d'isoler l'effet de certains facteurs testés, comme l'expliquait son ingénieur polytechnicien Chabal :

« La Compagnie a construit deux wagons parce que lorsqu'on veut comparer, au point de vue de l'influence qu'elles peuvent avoir sur la résistance à la traction, deux dispositions différentes, on est conduit, le plus souvent, pour éliminer toutes autres influences, à faire les expériences sur un train composé de deux parties qui ne diffèrent que par les dispositions que l'on veut comparer, et à relever les efforts de traction nécessités par chacune des moitiés du train ; les influences de la vitesse, du profil de la voie, des circonstances atmosphériques étant les mêmes sur les deux moitiés du train à un même moment, on peut ne plus s'inquiéter de ces influences dont il serait fort difficile de tenir compte, et la comparaison des efforts de traction, relevés à un même moment, chiffre exactement l'influence, toutes choses égales d'ailleurs, des deux dispositions que l'on veut comparer ».

7 Napoli, « Note sur le wagon d'expérience du chemin de fer de l'Est », *Revue générale des chemins de fer* [notée par la suite RGCF], novembre 1878 ; *Annales industrielles*, 5 janvier 1879.

8 Ernest Deharme, Pierre Pulin, *Chemins de fer. Matériel roulant. Résistance des trains. Traction*, Gauthier-Villars, 1895, p. 78.

9 Jules de Laboriette, « Note sur le wagon dynamométrique du chemin de fer du Nord », *RGCF*, avril 1883 ; *Annales industrielles*, 19 novembre 1882.

10 « Fourgon d'expérience de la Compagnie de l'Ouest » (Note), *RGCF*, juillet 1889.

11 Ernest Chabal, « Wagon dynamométrique des chemins de fer PLM », *RGCF*, février 1894.

fig. 1 - Coupe et plan du wagon dynamométrique du PLM (*RGCF*, février 1894)

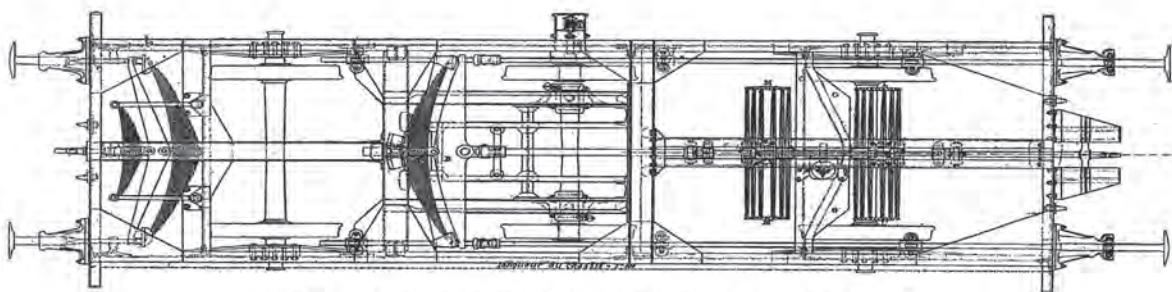


Fig. 85. — Wagon dynamètre P.-L.-M. — Plan du châssis, la caisse étant enlevée.

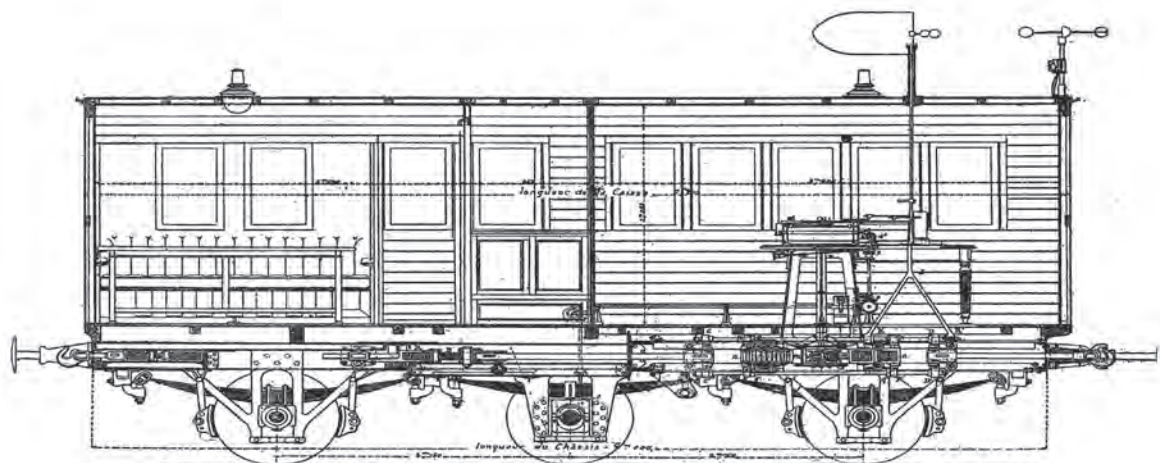


Fig. 84. — Coupe longitudinale.

Alors que tous ces wagons expérimentaux étaient équipés de ressorts dynamométriques, il revint à un ingénieur du réseau de l'État, le polytechnicien Desdouits d'inventer une nouvelle méthode d'enregistrement des efforts, fondée sur un dynamomètre à force d'inertie, enregistrant uniquement des variations de vitesse, soit un accéléromètre, dit *pendule Desdouits*¹².

Les deux types d'appareillages embarqués avaient leurs avantages et inconvénients respectifs. Alors que le ressort dynamométrique mesurait la résistance totale du train brut, machine et tender compris, seule la résistance des véhicules remorqués était évaluée grâce au pendule Desdouits. Celui-ci ne donnait d'indications qu'en régime de marche non uniforme, mais les mesures étaient indépendantes du tracé de la ligne, alors que les données des ressorts dynamométriques étaient d'autant plus précises que le mouvement était uniforme et effectué sur une voie rectiligne. La courbe des accélérations enregistrées par le pendule Desdouits présentait des ondulations plus fortes que celles fournies par les ressorts de traction, d'une interprétation graphique très délicate ...

Du contact roue-rail aux mouvements vibratoires des wagons

En 1882, l'ingénieur des Ponts et Chaussées Pochet¹³, affecté à un service de contrôle, s'intéressa le premier aux conditions du *déraillement* d'un wagon dans une courbe : il formula la relation analytique nécessaire entre l'effort latéral exercé sur le rail par le boudin de la roue et l'effort vertical exercé par la roue sur la surface de roulement du rail, qui provoquait le déraillement. Ainsi, à partir d'un modèle très simplifié du train, assimilé à des roues pesantes guidées par une paire de rails, n'hésitait-on pas à extrapoler des règles très générales. Plus tard, au PLM, le polytechnicien Marié modifiait et généralisait la formule du déraillement

de Pochet, traitant de manière théorique l'influence des profils des bandages et boudins¹⁴. Formules semi-empiriques, souvent corsetées de généreux et rassurants coefficients de sécurité¹⁵.

Bien plus compliqués furent les problèmes de stabilité rail/roue, régis en première approximation par les profils géométriques du champignon du rail et du boudin de la roue et leur point de contact précis. Comme le soulignait l'ingénieur Marié qui y consacra l'essentiel de ses travaux théoriques, dans ce domaine, « il n'y a pas deux études distinctes, celle du matériel et celle de la voie ; il n'y en a qu'une seule, celle de la stabilité du matériel sur la voie »¹⁶. D'origines très diverses - conception du matériel roulant, rôle des masses suspendues, passages successifs réguliers sur les joints de rail, etc. -, les oscillations complexes du matériel sur la voie, disséquées analytiquement selon six mouvements élémentaires parasites¹⁷, pouvaient conduire à des phénomènes de résonance, aux conséquences redoutables pour la circulation des convois.

En résumé, si les ingénieurs des Ponts et Chaussées apportèrent leur contribution théorique à la conception géométrique optimale du rail ou de la voie, les ingénieurs des Mines, mieux formés à la mécanique, comme ceux aussi issus du corps du Génie maritime (tels, précités, Desdouits et Chabal) développèrent des modèles plus centrés sur les masses mobiles en mouvement, locomotives, voitures et wagons, ressorts et suspensions. Mais dans tous les cas, on se bornait à l'étude d'un essieu roulant sur une paire de rails parallèles. Les résultats de la

12 Eusèbe Desdouits, « Nouvel appareil dynamométrique, applicable à la mesure des efforts moteurs et résistants développés dans la traction des trains de chemin de fer et au contrôle de leur marche », *RGCF*, octobre 1883 ; « Note sur l'emploi des observations chronométriques pour l'étude dynamique des systèmes en mouvement. Application à la résistance des trains et à la puissance des machines », *RGCF*, mars 1884 ; « Résumé des expériences exécutées au chemin de fer de l'État sur la mesure des efforts moteurs et résistants développés dans la marche et dans l'arrêt des trains », *RGCF*, mai et juin 1890.

13 *Théorie du mouvement en courbe sur les chemins de fer, avec ses applications à la voie et au matériel. Nouvelle méthode ayant pour but d'assurer en courbe le roulement parfait des essieux*, Dunod, 1882.

14 Georges Marié, « Etude complémentaire sur la stabilité du matériel des chemins de fer. Théorie des déraillements. Profil des bandages », *Mémoires de la SICF*, mai 1909.

15 Aujourd'hui, en continuité avec la tradition théorique des ingénieurs polytechniciens ferroviaires, une célèbre formule dite « de Prud'homme », admise par la communauté internationale, définit la condition de dérapage de la voie, pouvant conduire au déraillement. Elle est due à l'ingénieur des ponts et chaussées André Prud'homme, qui dirigea le Service des Etudes et Recherche de la Voie à la SNCF durant les années 1960-70 (voir « La résistance de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant », *RGCF*, janvier 1967).

16 Georges Marié, *Traité de stabilité du matériel des chemins de fer*, Paris et Liège, Librairie polytechnique Ch. Béranger, 1924, p. III.

17 Oscillations de rotation autour d'un axe horizontal et parallèle à la voie (*roulis*); oscillations de rotation autour d'un axe horizontal et perpendiculaire à la voie (*galop* ou *tangage*); oscillations de rotation autour d'un axe horizontal et perpendiculaire à la voie (*lacet*); mouvement de va-et-vient horizontaux parallèles au rail (*tangage* ou *recul* ou *va-et-vient*), ou perpendiculaires (*lacet* ou *ballant*) ou mouvement verticaux de va-et-vient (*galop* ou *trépidation*).

modélisation théorique trouvaient là ainsi leurs limites, oubliant par exemple de s'intéresser à la modélisation d'un bogie plutôt que d'un essieu¹⁸, incapable de modéliser a fortiori un ensemble de wagons attelés formant un convoi et sujet à des chocs et oscillations longitudinaux. C'est pourquoi tout de même à la fin du XIX^e siècle, pour parer aux insuffisances et incertitudes des résultats tirés de ces approches théoriques réductrices ou des mesures recueillies par des wagons d'expériences aux interprétations bien délicates, on assiste à l'apparition de recherches expérimentales « grandeur nature » : circuits d'essai spéciaux d'abord, puis trains spéciaux d'essais circulant sur les voies ordinaires.

Des circuits d'essai spéciaux

Les nombreuses recherches théoriques concernant la résistance des trains à l'avancement dans les courbes avaient conduit à des résultats trop discordants. Par décision ministérielle du 18 juillet 1890, le ministre des Travaux publics Yves-Guyot constitua une commission spéciale, dite *Commission des courbes de faibles rayons*, chargée de procéder à des expériences sur la ligne reliant Draguignan à Grasse, comportant des courbes jusqu'à 150 mètres de rayon. Définitivement constituée en novembre 1890, présidée par l'inspecteur général de la Tournerie¹⁹, la commission avait pour simple but à l'origine de rechercher s'il était possible d'assurer la traction de trains militaires sur cette ligne avec des locomotives ordinaires, non articulées. Les essais effectués en juin et juillet 1891 révélèrent l'aptitude au franchissement de ces courbes de divers types engagés de locomotives du PLM et des chemins de fer de l'État. Mais les nombreuses données recueillies étaient totalement inexplicables par un modèle théorique simple : dans des circonstances a priori identiques, les résultats variaient, ce qui révélait finalement l'existence d'importantes variables cachées, jusqu'alors négligées par les modèles théoriques.

¹⁸ Il faut attendre l'entre-deux-guerres pour voir l'essieu et ses deux roues modélisés comme un solide *dicône*, le bogie étant assimilé similairement à un *double dicône*, et découvrir du coup les redoutables mouvements de *lacet* dûs au *gauche* de la voie : défaut de parallélisme des deux files de rail dans le plan vertical, d'où porte-à-faux des 4 points de contact du bogie avec les deux rails. Ce sera la contribution de l'ingénieur Mauzin, polytechnicien chargé à la Compagnie d'Orléans des recherches sur le système élargi voie/wagon, à l'origine d'une célèbre voiture d'auscultation du profil des rails et d'enregistrement de ses défauts, la *voiture Mauzin*.

¹⁹ Sur les travaux de cette commission, voir Ch. Bricka, *Cours de chemins de fer, op. cit.*, t. 2, pp. 66-68 ; E. Deharme, P. Pulin, *Chemins de fer. op. cit.*, pp. 133-140.

Du coup, pour approfondir les expériences et observations, la commission décida de créer une voie spéciale à Noisy-le-Sec dans les dépendances d'un dépôt de la Compagnie de l'Est : le circuit expérimental était constitué d'une boucle comportant une succession de trois courbes de cent, cent cinquante et deux cents mètres de rayon. Les nouvelles expériences mirent en relief l'influence de circonstances fortuites, telles l'orientation du premier essieu qui entre dans la courbe, et plus encore, l'état de l'atmosphère, dont la direction et l'intensité du vent ! Dans des conditions apparemment identiques, la résistance du véhicule pouvait ainsi varier du simple au double ! Parmi les résultats acquis, contraires à l'opinion dominante chez les ingénieurs de la Traction, on découvrait que le serrage des attelages diminue la résistance du convoi en courbe ; on relevait aussi l'influence considérable des bandages, ou encore l'indépendance (ou constance) de la résistance à des vitesses modérées. Le rapport de la Commission fut présenté au congrès de l'Association internationale pour le Congrès des Chemins de fer tenu à Saint-Petersbourg en 1892, et ses conclusions, prudentes et restrictives, y furent adoptées, invitation étant faite aux réseaux étrangers d'engager des expériences similaires.

Premiers essais de grande vitesse sur un « champ de course » aménagé

En 1879, le PLM mit en service une importante série de locomotives de vitesse, de type 121, dont les longues chaudières et les deux paires de roues motrices de deux mètres de diamètre devaient en faire les plus puissantes machines françaises en tête d'express. Critiquées de loin pour leurs volumineux cylindres en porte-à-faux à l'avant soupçonnés de déformer les voies, le directeur général de la Compagnie, Gustave Noblemaire, organisa une longue série d'essais sur sa « ligne impériale », invitant les autres réseaux à venir essayer leurs propres locomotives d'express.

En 1889 et 1890, sous la houlette de l'ingénieur du PLM Baudry, les locomotives seules, puis en tête de trains, se livrèrent à une sorte de rodéo ferroviaire entre Montereau et Sens (trente-quatre km), leur vitesse de pointe étant testée sur un tronçon intermédiaire de 9,5 km, parfaitement rectiligne et presque en palier, dont les deux voies préalablement renouvelées constituaient ainsi un parfait « champ de course ». De chaque train, inégalement chargé à chaque essai, on mesurait la vitesse, l'effort de traction, le travail développé sur la barre d'attelage à l'arrière du tender, la puissance utile, les consommations d'eau et de charbon. Faire courir toutes les locomotives à

125 km/h, soit au-delà de vitesse-plafond autorisée de 120 km/h, et examiner leur allure à ces grandes vitesses, tel était l'objectif initial de ces galops d'essai comparés. Mais constatant la bonne tenue des bielles d'accouplement de leurs locomotives, les ingénieurs poussèrent les essais jusqu'à 138 km/h. Le 20 juin 1890, en tête de 157 tonnes de charge, une Crampton²⁰ de la Compagnie de l'Est, qui n'avait pas de bielles à ménager, atteint ainsi 144 km/h, soit 40 mètres par seconde : discret record mondial de vitesse, très éphémère aussi²¹.

Aux grandes vitesses et sur cette voie parfaite, toutes les locomotives appelées à comparaître révélèrent une très bonne tenue de marche, alors que sur le reste du parcours, où la voie était moins bonne et la vitesse moindre, leurs qualités et défauts relatifs se dévoilaient. Ces résultats très positifs libérèrent en sorte l'innovation en matière de locomotives de grande vitesse, en révélant notamment la supériorité des machines à bogie et leur influence réduite sur les mouvements de lacet, conformément à la théorie des masses à mouvement alternatif²². Chaque compagnie en tira promptement des leçons pour son compte, et les machines exposées à Paris à l'Exposition universelle de 1900 témoignèrent bien d'un nouvel âge technologique de la vapeur, notamment avec le développement des machines compound à deux paires de cylindres, révolution majeure accomplie en une décennie et qu'évoquera en 1901 Baudry, fier des retombées des essais de 1889-1890²³.

Puisant dans les abondantes données recueillies, ordonnées et publiées dans un mémoire tiré à petit nombre²⁴, longtemps après ces essais, Marié tirait des enseignements personnels, s'agissant des ressorts d'avant des locomotives : il se réjouissait que les données expérimentales valident ses théories et calculs traitant des oscillations verticales des locomotives, tout en montrant « le grand avantage

de la grande flexibilité des ressorts d'avant, contrairement aux idées presque universellement admises avant nos travaux »²⁵.

En quête de « l'équation des freins »

D'abord rudimentaire et appliqué à une seule roue d'un petit groupe de wagonnets lorsqu'il était contemporain du rail en bois, le frein s'adaptant constamment aux nécessités nouvelles a été successivement disposé pour enrayer plusieurs roues d'un seul véhicule, puis celle d'un petit groupe de véhicules dans un train, et enfin sous la forme de frein continu, il peut actuellement agir sur toutes les roues d'un convoi. » Tel est en résumé l'histoire des progrès accomplis par le freinage des trains en un siècle²⁶.

Les réseaux européens ayant adopté le principe d'attelages lâches entre wagons, du coup, pour arrêter le train, le seul freinage de la locomotive n'était pas possible, en raison des secousses répétées qu'imprimerait au convoi la succession de compressions des attelages. C'est donc en intercalant dans le convoi des freins mécaniques, « à vis », actionnés par des garde-freins attentifs aux coups de sifflet commandés par le mécanicien, que l'on pouvait assurer un freinage réparti et simultané du convoi. Les ingénieurs de la Traction s'attelèrent à l'élaboration des formules semi-empiriques qui déterminaient la proportion et la répartition optimales des wagons qui devraient être équipés de freins. Gosserez et Jonet ont établi un historique détaillé de cette quête de la meilleure « équation des freins », de la formule de Thoyot (1874) à celles de Bricka qu'une circulaire imposera sur tous les réseaux français durant une décennie²⁷.

L'idée de créer un *frein continu*, c'est-à-dire d'asservir les freins des wagons à une commande depuis la locomotive, germa tôt. D'un intérêt économique évident, l'automatisation substituée au freinage manuel palliait aussi le risque d'assoupissement qui guettait les serre-freins. Les essais s'orientèrent d'abord vers la télécommande d'électro-aimants activés par un circuit électrique : tous ces dispositifs délicats s'avèrent trop fragiles, et en cas de rupture d'attelage, rien n'arrêterait plus un wagon livré aux forces de la pesanteur.

Grâce à une conduite d'air comprimé ou de vide, on pouvait par contre imaginer un frein non seulement continu mais aussi *automatique* : en cas de rupture d'attelage, les freins des wagons détachés s'enclenchaient automatiquement.

20 C'est-à-dire une locomotive de type 210, à deux essieux porteurs à l'avant et un seul essieu moteur.

21 Le 27 août 1891, aux Etats-Unis, une locomotive du *Philadelphia and Reading* roule à 146 km/h en tête d'un train de 137 t. ; en décembre suivant, une autre américaine du *Central Railroad of New Jersey* couvre un mile (1609 m) en 37 secondes, soit à 156 km/h ; enfin, le 9 mai 1893, une 220 du *New-York Central & Hudson River Railroad* réalise 165 km/h (100 mile à l'heure) avec un train de 164 t.

22 Lucien Maurice Vilain, *L'évolution du matériel moteur et roulant de la Compagnie PLM*, Paris, Ed. Vincent, 1973, p. 85.

23 *Mémoires de la SICF*, 1901, t. 1, p. 29.

24 Charles Henri Baudry, *Essais des locomotives à grande vitesse de différents chemins de fer français et anglais faits en 1889 et 1890 entre Paris et Laroche*, Mémoire autographié de la Compagnie PLM.

25 Georges Marié, *Traité de stabilité*, op. cit., pp. 460-463.

26 Paul Gosserez et Achille Jonet, *Freinage du matériel de chemin de fer*, Paris, Doin, 1913, p. 24.

27 *Ibid.*, p. 260-281. Une nouvelle circulaire ministérielle du 4 janvier 1910 invite les réseaux à étudier de nouvelles règles de freinage.

Avec l'inconvénient, à l'inverse de commandes électriques, que le déplacement non instantané de l'onde de compression ou de détente soulevait de graves difficultés techniques²⁸ : « En raison du temps plus ou moins long qui s'écoule entre le freinage du véhicule de tête et celui du véhicule de queue, il se produit des chocs et des réactions désagréables pour les voyageurs, et préjudiciables à la bonne conservation du matériel en raison des ruptures d'attelage qui peuvent en être la conséquence. »

Cinq qualités idéales étaient attendues du *frein continu automatique*²⁹ : « 1°) proportionner l'effort de freinage de l'essieu à sa charge ; 2°) diminuer l'effort de freinage à mesure que la vitesse du train diminue ; 3°) obtenir un effort de freinage tel que les roues ne soient jamais enrayées, mais soient toujours sur le point de l'être ; 4°) modérer l'effort de freinage dans les limites les plus étendues ; 5°) freiner simultanément tous les véhicules, quelle que soit la longueur du train ». C'est cette dernière condition qui suscita de nombreuses recherches avec l'apparition de trains de marchandises de plus en plus longs, jusqu'à 80 véhicules !

L'inflation des systèmes de freins continus imaginés dans chaque pays (freins Heberlin, Smith, Soulerin, Lipkowski, Wenger, Westinghouse, Kunze-Knorr...) ou testés sur chaque réseau³⁰, suscita des appareils de mesures et expériences très variés, à l'instar de l'étude de la résistance des trains à la traction³¹. Et de la même manière que le freinage manuel, il y eut une effervescence de modèles voués à élaborer une « théorie du freinage par les freins continus »³², bien enseignée à l'École des Mines³³.

28 *Ibid.*, p. 379.

29 *Ibid.*, p. 379.

30 C'est la Compagnie de l'Ouest qui adopta en France la première le frein à air comprimé Westinghouse : voir Jules Morandière, « Application du frein Westinghouse au matériel des chemins de fer de l'Ouest », *RGCF*, décembre 1881.

31 Voir surtout Albert Kapteyn, « Diagramme pour la détermination du degré d'efficacité des freins continus et de l'influence des déclivités de la voie », *RGCF*, août 1883, p. 99 ; « Appareils Kapteyn pour l'étude des freins continus », *RGCF*, juin 1906, p. 553.

32 Tels ceux de Douglas Galton (1878, 1894), Raymond Séguela (1882), Léon Soulerin (1887), François-Dominique Massieu (1891), Charles Doyen (1908) : voir P. Gosserez et A. Jonet, *Freinage du matériel de chemin de fer*, op. cit., pp. 328-400.

33 Ernest Vicair et Ferdinand Maison, *Cours de chemins de fer professé à l'École nationale supérieure des Mines*, Paris, Gauthier-Villars, 1903 (freins continus : pp. 351-376 ; théorie des freins, p. 372).

Un protocole international pour de nécessaires essais en ligne des systèmes de frein continu (1909)

Sur chaque réseau et dans chaque pays, il y avait une inflation de systèmes de freins. La donne changea lorsque la conférence internationale pour l'Unité technique³⁴, lors de sa troisième session tenue à Berne en mai 1907, proposa aux réseaux membres d'étudier la question des freins pour trains de marchandises. On reconnaissait non seulement l'utilité qu'il y aurait à appliquer à ces trains un frein continu automatique satisfaisant à toutes les conditions désirables, mais aussi, en vue du trafic international, l'intérêt de systèmes de frein variés pouvant coexister dans un même train, leur *interopérabilité* dirait-on aujourd'hui. On proposa de constituer une commission internationale chargée à la fois de définir les *conditions minimales* attendues de tout frein continu automatique et d'élaborer le *programme d'essais* auquel tout réseau devrait soumettre son système de frein.

Réunie en mai 1909 à Berne, cette commission rédigea un *Protocole final* en six articles³⁵. L'article premier énumère les vingt-cinq conditions que doit remplir un frein continu pour trains de marchandises : être automatique, d'une construction simple, aussi léger que possible, d'un coût d'acquisition et d'entretien réduit, etc. L'article II fixait précisément les trente et une conditions du programme d'essais : pour la première fois, un protocole expérimental était fixé, que devait respecter tout train d'essai afin que ses mesures soient connues et son système de frein éventuellement validé. Par exemple, un dispositif minimal de mesures était prescrit par les deuxième et troisième conditions : trois postes d'observation également espacés au minimum dans le train, tous dotés d'appareils dynamométriques. La cinquième condition définissait la composition (150 essieux) et la charge (1100 t.) du train éprouvé en palier et sur des pentes inférieures ou égales à 16 mm, ainsi que sur de longues pentes supérieures à 16 mm (110 essieux et 800 t.). Bien entendu, le freinage de ces trains d'essais serait éprouvé sur des lignes à forte pente, jusqu'à tester même les capacités de freinage d'une rame détachée de sa locomotive, aux termes de la

34 L'Unité technique était une organisation intergouvernementale fondée à Berne en 1882, dotée, moyennant l'accord des Etats-membres, d'un pouvoir supranational d'édicter des normes techniques visant l'interopérabilité des systèmes ferroviaires, à commencer par le gabarit des trains.

35 Unité technique des chemins de fer. *Protocole final de la Commission internationale chargée d'établir un programme de conditions que doit remplir un frein continu pour trains de marchandises*, Berne, 11 mai 1909, 22 p., deux tableaux annexes.

condition n° 22 : « on procédera à des essais en vue de déterminer l'efficacité du frein pour empêcher les dérives sur les plus fortes déclivités qui se présentent sur les lignes principales. Il faudra en particulier déterminer le parcours de la rame en dérive depuis le point où s'est produite la rupture d'attelage jusqu'au point d'arrêt définitif ».

Deux tableaux-formulaires devaient être remplis pour chaque série d'essais de train (condition n° 32) : un premier détaillait les véhicules entrant dans la composition du train d'essai (nombre d'essieux, tare, charge, surface utile du piston du frein, pression sur le piston, pressions totales des sabots, diamètre de la conduite principale, longueur du véhicule, etc.) ; un second relevait les caractéristiques de chaque essai (mode de freinage ; répartition des véhicules freinés, vitesse) et les effets observés (pressions dans la conduite principale, dans le cylindre, temps de propagation, parcours d'arrêt, réactions diverses observées, conditions atmosphériques, etc.).

L'article visait le contrôle et la publicité des essais comparatifs : les gouvernements qui voudraient proposer l'introduction en trafic international d'un frein continu « indigène », devraient inviter les représentants des autres États signataires de la convention à assister aux essais de ces freins, ces représentants devant rédiger un avis sur la valeur du frein essayé ...

L'aboutissement de cette Commission fut alors considéré au plan technologique comme un avancée considérable, dans un domaine où les rivalités industrielles et les protectionnismes étatiques jouaient en faveur de systèmes nationaux de frein, notamment de part et d'autre du Rhin³⁶, l'Allemagne penchant pour imposer le système Kunze-Knorr ...

En raison d'une émulation certaine entre les constructeurs de systèmes et devant la diversité des options propres à chaque réseau, aucune décision normative ne put aboutir avant-guerre ! La Commission reçut seulement deux demandes d'agrément : en 1912, le ministère des chemins de fer autrichiens présenta un frein Clayton-Hardy ; puis en 1913, les chemins de fer royaux de l'Etat hongrois présentèrent un frein continu Westinghouse à triple valve modifié, testé avec succès depuis 1907. Mais bien que chaque système fut validé, la Commission se garda d'en

³⁶ Sur ces rivalités politiques dans le domaine des « normes techniques ferroviaires, je renvoie à ma série d'articles intitulée *Histoire de l'interopérabilité des chemins de fer européens*, et notamment : « Les relations ferroviaires internationales à la veille de la Grande Guerre : entre émulation technique et compétition politique », *Chemins de fer*, n° 497, 2006/2, p. 27-35.

prononcer l'adoption qui eût pu être interprétée comme une recommandation trop hâtive. En France, inspirés par le succès du frein Westinghouse testé en Hongrie, à l'invitation du ministre des Travaux publics, les réseaux se décidèrent à l'expérimenter. En 1912 et 1913, le PLM accueillit ainsi sur son réseau cinq séries d'essais : en ligne de plaine (Villeneuve-Saint-Georges à Montereau par Corbeil et Héricy), en ligne en dents de scie avec pentes et rampes moyennes de 15 à 20 mm/m (Besançon à Lons-le-Saulnier) et sur fortes pentes (Livron à Briançon et Modane à Saint-Jean-de-Maurienne, aux pentes respectives de 25 mm/m et 30 mm/m). Conformément au protocole de Berne de 1909, les trains d'essai roulant à 60 km/h étaient composés de quatre-vingts véhicules. Les essais révélèrent que « le frein Westinghouse expérimenté répond *pratiquement* aux besoins d'exploitation » dès que 40 % du parc en serait équipé³⁷.

La guerre attisa les rivalités internationales. Se considérant comme affranchie du protocole de 1909, l'Allemagne va équiper d'un frein à air comprimé Kunze-Knorr perfectionné tout son parc neuf de wagons à marchandises, cherchant ainsi « à créer, à n'importe quel prix, un état de fait pour imposer aux autres pays, après la paix, sa propre solution »³⁸. Côté français, en 1918, le choix s'est reporté sur le frein à vide Clayton-Hardy éprouvé en Autriche : incompatible avec le frein à air comprimé Kunze-Knorr, il permettrait de couper l'herbe sous le pied aux velléités allemandes... La guerre terminée, le Traité de Versailles, dans son article 370, impose à l'Allemagne vaincue d'accepter sur ses lignes et dans ses trains de marchandises des wagons des puissances alliées, qu'un système de frein continu standard équipera dans les dix années suivant la signature du traité ...

Le frein Westinghouse à l'épreuve

Scénario d'attente dont va profiter la Société Westinghouse pour promouvoir son frein à air comprimé concurrent du Clayton-Hardy : le stock des 38 000 wagons à bogies affectés pendant la guerre au transport des troupes américaines sur le territoire français, tous munis du frein Westinghouse avec *retaining-valve*, fut incorporé dans le parc des

³⁷ Société anonyme Westinghouse, *Essais de freinage de longs trains de marchandises exécutés sur les chemins de fer des Paris à Lyon et à la Méditerranée, 1912-1913* ; Henri Lancrenon, « Essais du frein continu système Westinghouse pour trains de marchandises faits sur le réseau PLM », *Revue générale des chemins de fer*, juillet 1914.

³⁸ Luigi Greppi, « Note sur l'application du frein continu aux trains de marchandises », *RGCF*, janvier 1922 (trad. de *Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane*, 15 juillet 1921).

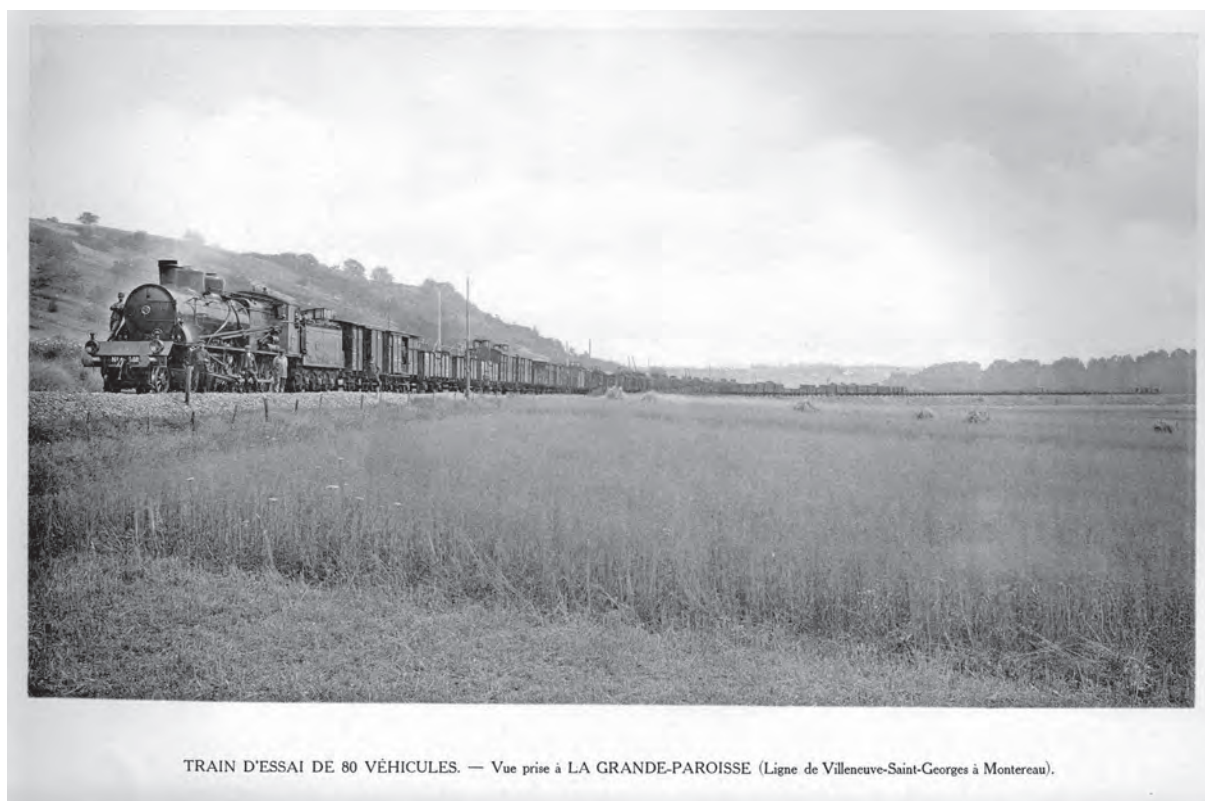


fig. 2 - Train d'essai Westinghouse à la Grande-Paroisse (Société Westinghouse, *Essais de freinage...*, op. cit., 1913).

réseaux français ... Aubaine pour Westinghouse qui obtint du ministre des Travaux publics Le Trocquer, que ce frein soit testé au PLM, conformément au protocole de Berne. Ces essais se déroulèrent au printemps 1921 sur les lignes de plaine et de pentes moyennes déjà sélectionnées avant-guerre, ainsi que celle de Brioude à Saint-Flour (33 mm/m), mais avec des trains à composition renforcée : 880 mètres de longueur et de 1576 tonnes au lieu de 760 mètres et 1300 tonnes fixés en 1912-1913. Ainsi l'emploi de la *retaining-valve* fut reconnu efficace dans les fortes pentes, moyennant l'équipement d'un nombre suffisant de wagons pour équilibrer la composante de la pesanteur³⁹.

La création de l'Union internationale des chemins de fer en 1922, à des fins de faciliter le trafic ferroviaire international européen, relança la question d'un « frein-type » idéal et l'élaboration de son cahier des charges, confiée à sa Commission des questions techniques⁴⁰. A l'issue de la consultation des réseaux-

39 Joanny Tête, « Nouveaux essais du frein continu système Westinghouse, pour trains de marchandises, faits sur le réseau PLM », *Revue générale des chemins de fer*, juillet 1921, p. 35.

40 Voir Georges Ribeill, « D'une guerre à l'autre, frein continu pour trains de marchandises, attelage automatique : deux chantiers laborieux de l'UIC », *Chemins de fer*, n° 505, 2007/4, pp. 33-38.

membres de l'UIC, celle-ci retint neuf améliorations souhaitables tout en reconnaissant que les qualités et défauts relatifs des systèmes Westinghouse et Kunze-Knorr justifiaient l'acceptation nécessaire des deux systèmes... Un programme d'essais fut élaboré auquel chacun des freins, le Kunze-Knorr et un Westinghouse amélioré (avec triple valve dite *type Lu*), serait soumis dans les mêmes conditions sur des lignes italiennes et suisses C'est en mars et avril 1926 que ces essais comparatifs se déroulèrent, les réseaux français ayant conçu un *train d'essai*, composé conformément au protocole de Berne et équipé des plus modernes appareils de mesure et d'enregistrement. Soit sept wagons couverts transformés en *postes d'observation* (quatre principaux et trois secondaires), chacun disposant de trois manomètres branchés sur la conduite, le réservoir et le cylindre du frein continu, et d'une ingénieuse « boîte à billes » servant à mesurer les chocs. Le train était aussi équipé d'un wagon *dynamomètre* placé avant le wagon de queue, d'un wagon-*atelier*, de deux wagons-*magasins*, d'un wagon *photographique*, d'un wagon *d'étude* et de deux wagons-*dortoirs*. Un dispositif entièrement autonome, qui représente alors le summum en matière de train d'essai et justifie une belle plaquette cartonnée confiée à l'imprimeur de luxe Draeger⁴¹.

41 *Essais internationaux du frein Westinghouse monté sur un*

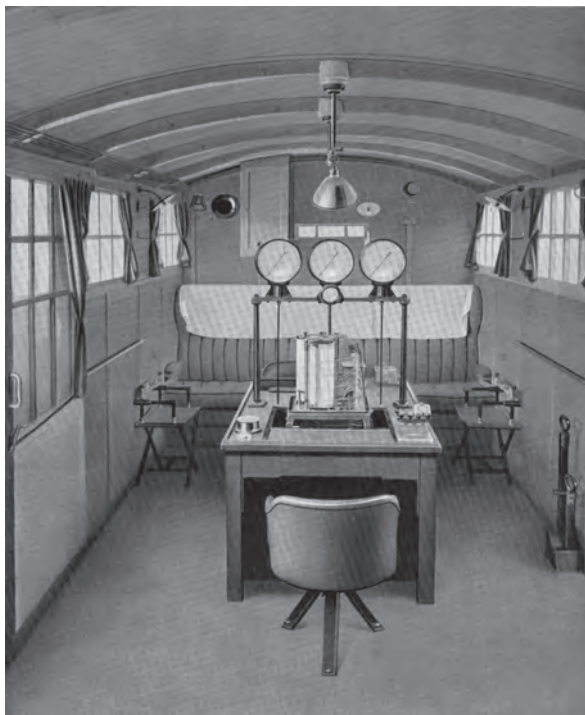


fig. 3 : Poste d'observation du train d'essais Westinghouse (*Essais de frein Westinghouse...*, op. cit., 1926, figure 28).

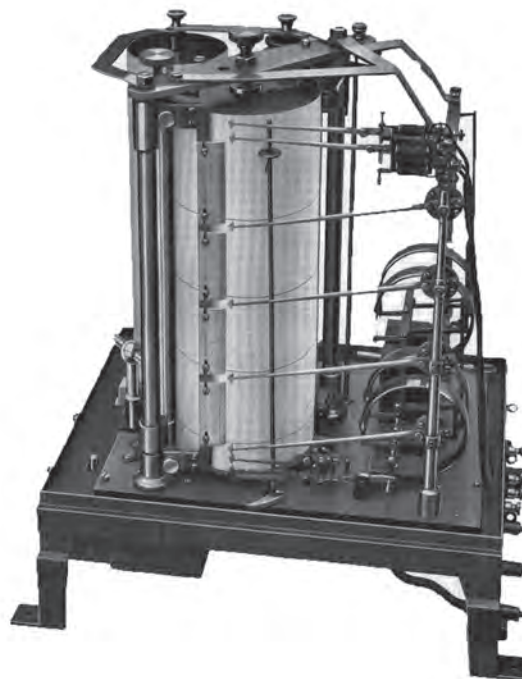


fig. 4 : Appareil enregistreur du train d'essais Westinghouse (*Essais de frein Westinghouse...*, op. cit., 1926, figure 31).

Bref aperçu sur le XX^e siècle

Durant la longue période étudiée, nous voyons bien comment l'expérience a conquis un terrain d'application de plus en plus large, évoluant d'un composant ferroviaire limité, isolé, jusqu'à un convoi ferroviaire entier soumis à diverses configurations de lignes⁴². Expériences capables parfois de dérouter les certitudes acquises « en chambre », de les contredire même. Mais la traditionnelle formation scientifique poussée des ingénieurs ferroviaires a contribué à entretenir l'importance du recours aux modèles, d'autant plus qu'ils allaient disposer d'outils de calcul renouvelés et puissants : méthodes analytiques de calcul (résolution d'équations différentielles en des systèmes de plus en plus complexes), puis méthodes digitales de calcul où les corps mécaniques sont maintenant définis de manière discrète. Grâce aux travaux théoriques du mécanicien hollandais Joost Kalker (1933-2006) sur le contact roue/

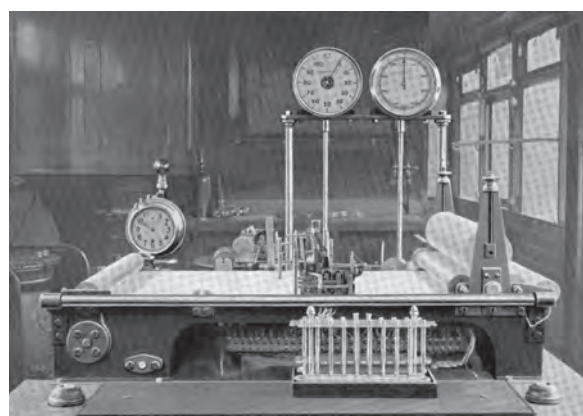


fig. 5 : Appareil enregistreur du wagon-dynamomètre du train d'essais Westinghouse (*Essais de frein Westinghouse...*, op. cit., 1926, figure 32).

train de marchandises présenté par les administrations des chemins de fer français. Italie-Suisse, Mars-Avril 1926, 50 p., 32 figures.

42 Je remercie Serge Montagné (t), ancien chef du Département de Recherche à la Direction de l'Équipement à la SNCF, de m'avoir communiqué ses réflexions synthétiques quant aux récentes évolutions observées dans la recherche ferroviaire.

rail et les efforts causant le redouté lacet, on sait aujourd'hui modéliser le *comportement* (autrefois appelé *l'allure*) d'un *véhicule complet* à l'aide de logiciels de calcul commercialisés. On sait même introduire dans les hypothèses les tracés de voie et des défauts de sa géométrie. Mais il n'en reste pas moins un aspect irréductible aléatoire : à l'évidence, le contact roue/rail dépend de la forme précise du champignon du rail et du profil de la roue, que l'on ne sait pas encore bien mesurer, ni intégrer valablement dans les modèles. Comme au XIX^e siècle, on constate bien que, selon le point

de départ d'une modélisation sur la géométrie de la voie, on obtient des résultats proches mais différents, et l'on sait que l'entrée dans une courbe dépend bien de la façon dont le premier essieu s'y est présenté, qui dépend du vent ! Il faut donc rester très modeste en ce qui concerne l'emploi de ces modèles, et pratiquer en complément ou en vue de les améliorer, des essais réels, expérimentaux, en ligne.

En 1924, Marié écrivait⁴³: « On dit que les ingénieurs doivent toujours se guider d'après les indications de la théorie associées à celles de la pratique. Cette règle nous paraît incomplète ; ils doivent, suivant nous, s'éclairer par l'association des indications de la théorie, de la pratique, et des expériences bien comprises. A notre avis, l'on ne fait pas assez d'expériences dans notre pays ; celles qui ont été exécutées ont rendu de grands services ». Ces propos sont toujours d'actualité, et bon nombre de progrès de la connaissance

résultent de méthodes de mesure « embarquées » considérablement améliorées : évoquons à partir des années 1940, l'apparition d'abord de jauges de contraintes, puis celle de capteurs électroniques de déplacement, de vitesse, d'accélération, ou de pression. Quant aux essais de matériel roulant, ils sont devenus très courants, et si les célèbres records de vitesse des chemins de fer français (1954, 1955, 1981, 2007) ont un indéniable objectif publicitaire pour l'exploitant et les constructeurs ferroviaires français, ils ont toujours eu comme autre objectif d'éprouver la résistance globale du système ferroviaire, soit en validant d'importantes marges de sécurité dans le futur régime de croisière, soit en révélant son « talon d'Achille », son composant-limite, le premier à se dégrader anormalement (voie, moteurs, couple caténaire/pantographe, etc.).

43 Georges Marié, *Traité de stabilité*, op. cit., p. 486.