

## 334 SINGULARITÉS MÉCANIQUES

### DANS LE COMPORTEMENT

### DES VÉHICULES DE CHEMINS DE FER

L'aspect des problèmes de stabilité et de mécanique générale concernant le matériel circulant sur voie ferrée a considérablement évolué depuis quelques années. D'une part, ce matériel s'est orienté vers des formes très différentes des anciens véhicules relativement lents et légers : nous avons vu apparaître des voitures de plus en plus lourdes, des locomotives qui sont de véritables usines et qui circulent à 140 km. à l'heure, tandis qu'à l'autre bout de la gamme, les autorails légers et extrêmement rapides réussissent à se maintenir sur la voie au mépris de toutes les formules anciennes !

#### FAILLITE DE LA « MÉCANIQUE RATIONNELLE »

Parallèlement à cette évolution matérielle, un changement de conception s'opérait parmi les techniciens du rail. Au temps du « classicisme » ferroviaire, représenté par Marié et ses émules, on admettait que la mécanique rationnelle la plus générale s'appliquait intégralement aux problèmes de comportement sur voie ferrée ; disons plutôt que l'on croyait pouvoir admettre que locomotives et voitures étaient strictement guidées par les rails comme sur une épure, moyennant quelques restrictions simples sur les élasticités et les jeux.

Le théorème de l'Alembert, qui exprime la proportionnalité analytique des forces aux accélérations, compte tenu des liaisons, suffisait dans ces conditions à rendre compte de tous les phénomènes : réactions latérales, oscillations de translation, roulis, galop, lacet, recul, oscillations des locomotives à vapeur dues à l'irrégularité du couple moteur, fléchissement de double amplitude à l'entrée et à la sortie des courbes non raccordées par des sections à rayon de courbure progressif, sans parler de la théorie des déraillements basée sur le fameux « profil international des mentonnets de roues » fixé par la Conférence de Berne.

L'introduction de monstres de 160 t. circulant à la vitesse maxima compatible avec la résistance de la voie a conduit les spécialistes à reviser cette vue trop... cartésienne. Les recherches de M. Lanos, par exemple, ont montré que les déformations, normales et tangentielles, des rails pouvaient atteindre des valeurs telles que le mentonnet

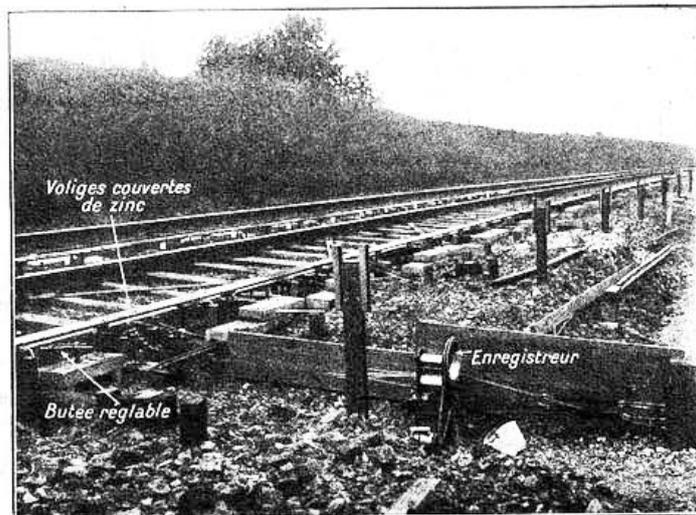
d'une roue manquait de plusieurs millimètres la « pointe de cœur » d'un croisement ou d'un aiguillage ! M. Lanos a montré d'autre part (fig. 1, 4, 6) que les locomotives circulant en courbe peuvent occuper dans la voie des positions très différentes (fig. 5) et inégalement stables, le passage d'une position à l'autre se faisant par un régime critique. Nous avons signalé par ailleurs les déformations élastiques stupéfiantes qui peuvent se produire en marche dans un essieu coudé de locomotive équilibré par contrepoids de roue suivant la forme classique : M. Chan a montré qu'à 120 km. à l'heure, on peut avoir des déformations représentant 9 mm. en plus et en moins sur l'écartement des roues (1).

On est ainsi conduit à des méthodes nouvelles, qui se rapprochent curieusement de celles des biologistes : traiter le matériel existant, voitures, wagons, locomotives, ainsi que la voie, comme une « donnée » naturelle et s'efforcer d'en déterminer par l'expérience le comportement détaillé. Conception modeste mais féconde qui a trouvé son expression la plus accomplie

1. Voir *La Nature*, n° 3034 du 1<sup>er</sup> octobre 1938.

Fig. 1. — Équipement de voie pour l'étude expérimentale de la stabilité des locomotives « Mountain » en courbe.

Des planches minces ou voliges, couvertes de zinc, sont disposées le long du rail sur des supports à ressorts ; un cercle tranchant, fixé à chaque roue (fig. 6) vient graver sa trace sur la feuille de zinc. Des butées réglables, à vis, permettent de mesurer le renversement du rail. Au premier plan, un enregistreur graphique avec le moteur d'entraînement du papier.



dans les mesures des efforts en tous les points du matériel roulant et de la voie, par la méthode des quartz piézo-électriques Mauzin (1).

#### PSEUDO-GLISSEMENT DES ROUES

Les essieux de chemin de fer ne comportent pas de différentiel. L'avancement inégal des deux roues d'un même essieu, indispensable dans les courbes, est partiellement assuré par la conicité des bandages ; le train étant plaqué contre le rail extérieur par la force centrifuge, la roue extérieure tourne sur son plus grand diamètre, donc avance sur la roue intérieure, l'essieu se plaçant en position oblique. Son axe géométrique passe par le centre du virage qui constitue — si tout se passe comme sur le papier ! — le centre instantané de rotation du véhicule.

Il est certain que cette compensation de l'inégalité des chemins parcourus par les deux roues n'est qu'approximative ; une certaine différence subsiste et doit être rattrapée par glissement des bandages sur le rail. En outre, la force centrifuge peut se trouver insuffisante, puisque, précisément, les ingénieurs de la voie s'efforcent de l'annuler en donnant du « dévers », c'est-à-dire en inclinant la voie vers l'intérieur. En outre, il ne faut pas oublier qu'un train peut être amené à ralentir ou même à s'arrêter en courbe ; il vient alors se placer contre le rail intérieur, la conicité jouant à rebours ; l'effort de traction prend alors des valeurs considérables.

Dans cet ordre de phénomènes, où de petits déplacements se traduisent par des forces très grandes, il devient indispensable de faire intervenir les déformations parasites. C'est ce qu'a pu faire M. Robert Lévi, qui a précisé ce fait curieux : l'entraînement élastique de la surface supérieure du rail. Dans une courbe, la force centrifuge produit un entraînement transversal, tandis que l'entraînement est longitudinal dans le cas d'une roue motrice de locomotive, qui repousse le rail vers l'arrière. Cette déformation tangentielle momentanée est loin d'être négligeable ; pour une roue

1. Voir *La Nature*, n° 3034 du 1<sup>er</sup> octobre 1938.

Fig. 2. — Dispositif mécanique pour l'étude du glissement axial d'un tambour coulissant reposant sur une roue tournant au point fixe.

Le tambour est sollicité dans le sens de l'axe par un poids ; il est retenu par son frottement contre la roue. Bien qu'il n'y ait pas de glissement dans le sens de la rotation, on constate un glissement axial qui croît avec le poids appliqué et prend une allure asymptotique.

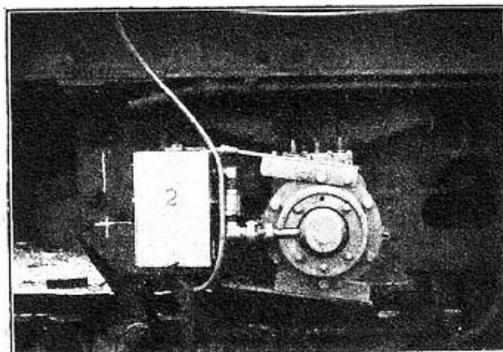
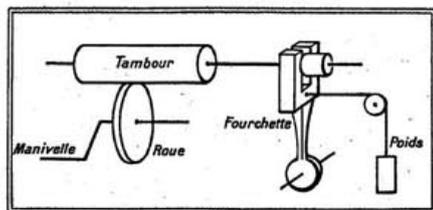


Fig. 3. — Montage d'un quartz piézo-électrique pour la mesure des efforts en bout d'un essieu de chemin de fer.

motrice de 2 m. de diamètre, exerçant sur le rail une charge verticale totale de 10 t. et produisant un effort de traction de 1 t., on a constaté que la roue avançait de 1/2.000 de moins que lorsqu'il n'y avait pas d'effort moteur ; la traction se traduisait donc par un pseudo-glissement atteignant 0 m. 50 par km. Il y a là un phénomène analogue à l'allongement élastique des courroies motrices, qui fait que le brin conducteur va plus vite que le brin conduit.

Examinant de plus près les conséquences pratiques de ce pseudo-glissement, M. Robert Lévi a été conduit à pousser les conditions à l'extrême, non plus sur le matériel de chemin de fer, mais au moyen d'un appareil spécial comportant un tambour roulant contre une roulette et sollicité axialement par un poids (fig. 2). Quand on augmente ce poids, on observe que le tambour glisse de plus en plus vite le long de la roulette, la loi qui lie cette vitesse au poids étant nettement asymptotique.

Il existe donc une limite approximative de l'effort transversal que peut supporter une roue de chemin de fer, au delà de laquelle la roue, bien que ne glissant pas dans le sens longitudinal, part carrément par le côté ; le mentonnet est seul à intervenir, à ce moment pour empêcher le déraillement ; mais Marié a montré que cette sécurité elle-même n'est pas absolue, car il y a lieu de faire intervenir l'angle des tangentes aux surfaces respectives du mentonnet et du rail, en tenant compte du coefficient de frottement. A la limite, le mentonnet monte sur le rail et les chances sont assez réduites pour qu'il retombe à l'intérieur de la voie !

Ces recherches se rapprochent de façon curieuse des récents travaux sur le « déroulement » des pneus de voiture à la surface du sol. Dans un virage, les pneus d'une voiture en marche donnent lieu à une faible vitesse axiale, dirigée vers l'extérieur ; il en est de même pour l'effort transversal dû au « bombé » de la route, le résultat étant la classique « marche en crabe ».

Nous retrouvons, dans ces cas si différents, les cir-

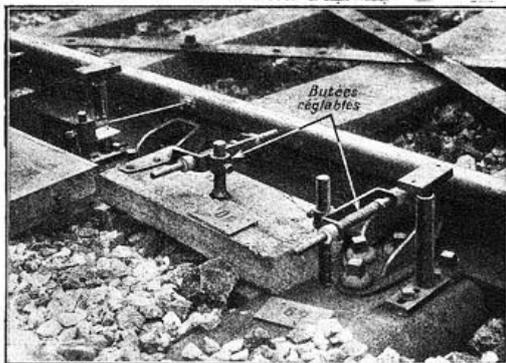


Fig. 4. — Détail des butées de renversement de rail ; à gauche, un enregistreur relié au rail par une tige soudée.

constances caractéristiques des *mouvements louvoyants* que l'on peut énoncer ainsi : « Quand on impose à un solide, glissant au contact d'un autre solide, un déplacement à vitesse constante dans une direction OX, toute force transversale, appliquée à ce même corps mobile, se traduit par une vitesse dirigée suivant la direction perpendiculaire OY et proportionnelle à cette force » (1).

Pratiquement, suivant un énoncé familier, le glissement dans le sens OX fait « disparaître » le frottement dans le sens perpendiculaire OY. Il en résulte, pour les locomotives plus encore que pour les véhicules remorqués, une liberté beaucoup plus grande que ne l'admettaient les théories classiques, et l'on a pu dire que certaines locomotives filaient entre leurs deux rails « comme une voiture sur une chaussée verglassée entre deux bordures de trottoirs » !

#### PERCUSSIONS SUR LES RAILS

Ainsi posé, le problème offre deux aspects : quelle est la grandeur des *efforts* exercés par le matériel sur la voie ? De quelle façon ce matériel se place-t-il sur la voie au cours de ces débats jusque-là insoupçonnés ?

Le premier point a été étudié très méthodiquement par M. Mauzin, dont nous ne ferons que rappeler les travaux (2). Le dispositif utilisé comporte des *quartz piézo-électriques* interposés dans les endroits les plus divers entre les pièces d'effort ; ainsi, un quartz peut être logé entre

1. Voir *La Nature*, n° 2968 du 1<sup>er</sup> janvier 1936.  
2. Voir *La Nature*, n° 3034, du 1<sup>er</sup> octobre 1938.

coussinet et boîte à graisse ou entre une butée en bout de l'essieu et une plaque fixe, pour mesurer les réactions transversales de l'essieu sur la machine ; ces réactions sont égales à celles des roues sur la voie, à l'inertie des masses non suspendues près (fig. 3).

Soumis à un effort, un quartz piézo-électrique développe sur ses deux faces une quantité d'électricité très faible mais proportionnelle à l'effort. Les armatures des différents quartz sont reliées, par des conducteurs à très fort isolement, à une *lampe thermoionique* équivalant à un galvanomètre dont la résistance de fuite atteindrait le milliard de mégohms ; cette lampe est connectée à un *oscillographe cathodique* enregistreur ; des commutateurs permettent d'obtenir l'inscription méthodique de tous les efforts utiles à connaître.

Des essais ont été faits sur la ligne d'Héricy, à des vitesses atteignant 140 km. à l'heure et sur des courbes dont le rayon s'abaisse à 500 m. Avec des *Atlantics* et des *Pacifics*, ils ont fait ressortir des « pointes » d'effort, autrement dit des *percussions*, pouvant atteindre le *décuple* de l'effort moyen et représentant un « risque » très supérieur au risque moyen de déraillement. Ce sont ces pointes qui limitent les vitesses autorisables pour le matériel et les voies actuelles, soit 140 km. à l'heure pour des *Atlantics* circulant sur courbes de 1 200 m. de rayon et 130 km. à l'heure si le rayon s'abaisse à 900 m.

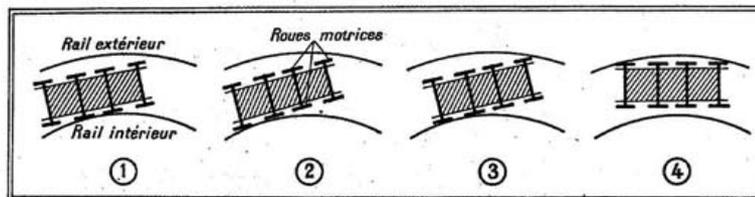
#### QUATRE POSITIONS EN COURBE

Les essais de M. Lanos ont porté sur les positions géométriques des véhicules sur la voie ferrée et plus spécialement sur l'inscription en courbe de machines longues de la classe 241 dites *Mountains*.

Dire qu'un essieu se trouve maintenu sur les rails par la concité des bandages et, à la limite, par les mentonnets, n'a un sens précis que si l'on considère un essieu unique. Lorsqu'on a affaire à plusieurs essieux, le problème se complique du fait des montages cinématiques différents de ces essieux. Le bogie, orientable et « déportable », grâce à son pivot et à ses ressorts horizontaux de rappel (ces ressorts présentent une « bande au départ » de l'ordre de 3 à 4 t.) peut

Fig. 5. — Voici les quatre positions principales d'une « Mountain » en courbe, suivant la vitesse.

Le bogie et le bissel arrière ne sont pas représentés. I, passage de la machine à faible vitesse ; elle s'appuie contre le rail intérieur de la courbe par ses deux roues motrices médianes. II, à vitesse plus élevée, la machine s'appuie par ses deux roues motrices arrière, l'avant commençant à pointer vers l'extérieur. III, la vitesse croissant encore la locomotive se place en oblique, appuyée diagonalement aux deux rails par ses roues motrices extrêmes. IV, aux grandes vitesses, la locomotive est plaquée contre le rail extérieur, contre lequel elle s'appuie par ses deux motrices extrêmes.



être considéré comme parfaitement inscriptible ; on en peut dire autant du *bissel* arrière, qui présente un jeu latéral et possède également des rappels élastiques. Mais il n'en est pas de même de la longue partie rigide formée par les quatre essieux moteurs d'une *Mountain* ; on peut se demander quelles roues, dans cet ensemble, viennent toucher le rail extérieur par leurs mentonnets, et par suite quelle position la machine tend à occuper, selon la vitesse, dans l'espace libre que lui octroie le jeu des mentonnets dans la voie (fig. 5).

Cette position offre un intérêt pratique indéniable, car elle définit l'angle exact sous lequel chaque mentonnet attaque le rail ; si cet angle devient excessif, des copeaux peuvent être arrachés au flanc du champignon et le mentonnet peut même monter sur la table de roulement. En outre, toutes les positions ainsi définies ne sont pas *stables* ; il en est qui sont des positions de passage ou qui représentent les « pointes » de dangereuses oscillations de lacet.

Les expériences ont porté sur des courbes de tracé satisfaisant et sur des courbes nettement « défavorables », de 1 000 et de 600 m. de rayon. Des mesures préliminaires firent en effet ressortir, sur une courbe de 1 000 m. de rayon nominal, des rayons réels variant de 621 à 2 572 m. !

Le dispositif expérimental employé fut le suivant (fig. 1). On fit choix de deux arcs de 40 m. de longueur, qui furent équipés au moyen de voliges de bois plates, couvertes d'une lame de zinc et disposées en file continue le long du rail extérieur ; ces voliges étaient montées sur des supports à ressorts leur permettant de s'abaisser de 52 mm. Accessoirement, des butées à vis permettaient de mesurer le déplacement horizontal du champignon de rail sous l'effort de renversement (fig. 4).

Contre les roues motrices des locomotives (fig. 6), on fixa d'autre part des cercles à bord tranchant, en acier ; ces cercles venaient rouler, au passage, sur le revêtement de zinc des voliges, gravant la trace précise de leur trajectoire. En outre, des tampons encreurs de différentes couleurs permettaient de distinguer, parmi les différentes traces, celle qui se rapportait à telle ou telle roue.

Voici les résultats, qui sont fort curieux (fig. 5). La *Mountain*, circulant en courbe, peut occuper quatre positions principales. A faible vitesse, elle glisse vers l'intérieur de la courbe sous l'influence du dévers et

s'appuie contre le rail intérieur par ses deux roues médianes ; quand la vitesse augmente, ce rôle d'appui se trouve dévolu aux deux essieux arrière, la locomotive commençant à pointer vers l'extérieur ; elle se place ensuite carrément en travers, une roue arrière s'appuyant contre le rail intérieur de la courbe, tandis que la roue avant opposée prend appui contre le rail extérieur. Aux grandes vitesses, la machine est tout entière entraînée par la force centrifuge et s'appuie contre le rail extérieur par ses deux roues motrices extrêmes.

Plaquée entièrement contre le rail bas (rail intérieur) aux faibles vitesses ou au contraire contre le rail haut aux vitesses élevées, la machine est irréprochable. Il n'en est malheureusement pas de même pour les positions intermédiaires, qui sont des positions transitoires et qui peuvent donner lieu à des résonances dangereuses avec chocs violents contre les rails. Cette zone critique, pour les *Mountains* étudiées, s'est étendue de 85 à 115 km. à l'heure.

Il n'est donc pas absurde d'affirmer que dans certaines circonstances, une courbe sera passée avec plus de sécurité à 120 km. à l'heure qu'à 110 ! Il y a là un phénomène de réaction des mobiles semi-libres analogue au phénomène classique des *vitesse critiques* communs à toutes les machines rotatives ou rythmiques. Ajoutons que des améliorations sensibles peuvent être envisagées grâce à des modifications convenables des ressorts de rappel du bogie et du bissel, ainsi que du comportement de la cheville ouvrière d'attelage du tender. Les vitesses critiques pourraient ainsi se trouver rejetées en dehors des vitesses usuelles de la locomotive.

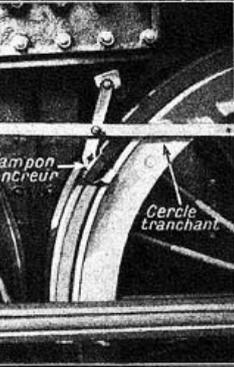


Fig. 6. — Equipement des roues motrices pour l'enregistrement du parcours des roues en courbe.

La roue porte un cercle tranchant en acier, destiné à marquer sa trace sur les feuilles de zinc (fig. 1) disposées le long de la voie ; des tampons encreurs diversement colorés permettent de distinguer les traces des différentes roues.

PIERRE DEVAUX.

Ancien élève de l'École polytechnique.