

Séminaire RER 28/9 - 2/10 1987

2.1.2/00

THEME 2

302

2.1.2 - Caractères propres à la voie pour roulement fer

2.1.21 - Principes du guidage des véhicules ferroviaires

2.1.22 - Types de déraillement

2.1.23 - Action du matériel roulant sur la voie

2.1.2 - Caractères propres à la voie pour roulement sur fer

2.1.2.1 - Principes du guidage des véhicules ferroviaires

2.1.2.1.1 - Préliminaire

Sur la quasi totalité des véhicules ferroviaires du monde, les essieux sont rigides ; les deux roues sont donc contraintes d'effectuer le même mouvement.

La roue de chemin de fer est caractérisée par sa conicité et son mentonnet qui doivent être en adéquation avec l'inclinaison et le profil du rail. Leur rôle s'avère différent en alignement et en courbe.

2.1.2.1.2 - Circulation en alignement

En alignement le mentonnet n'est pas actif ; en situation normale il ne rentre pas en contact avec le rail, son rôle reste purement sécuritaire. C'est la conicité des roues qui assure le guidage en provoquant un mouvement de rappel lorsque l'essieu s'écarte de sa position normale. Quand la vitesse du véhicule dépasse un seuil appelé "vitesse critique", le roulement devient instable ce qui se traduit par une oscillation horizontale non amortie : le lacet ; il peut atteindre une amplitude telle que les mentonnets viennent heurter les rails.

2.1.2.1.3 - Circulation en courbe

En courbe de rayon suffisamment grand, la conicité permet de compenser la différence de trajet entre la roue extérieure et la roue intérieure de l'essieu. Dans le cas de petits rayons, cette différence devient trop grande pour que le roulement s'effectue normalement : les roues glissent sur le rail chacune dans un sens. Ces glissements opposés génèrent un couple qui "braque" l'essieu, c'est-à-dire qui lui impose de rouler tout en faisant un angle avec la voie. Cette position particulière crée à son tour des glissements transversaux perpendiculaires aux premiers. Dans cette configuration le mentonnet de la roue extérieure est en contact permanent avec le rail : c'est lui qui assure le guidage.

2.1.22 - Déraillement

2.1.221 - Types de déraillement

Si l'on excepte les déraillements provoqués par de fausses manœuvres sur appareils de voie, par une avarie du matériel roulant, ou résultant de collisions, il existe plusieurs types de déraillement ayant pour cause une anomalie de la voie.

Dans les appareils de voie, il peut y avoir enfourchement de l'aiguillage, lorsqu'une aiguille n'est pas en contact avec le contre-aiguille. Néanmoins, cela n'est pas spécifique au roulement sur fer puisque le guidage s'effectue de manière similaire dans les appareils pour roulement sur pneus.

En voie courante on distingue trois causes de déraillement :

a) rupture de rail

Lors de certaines ruptures, une partie du rail se détache créant ainsi une discontinuité du chemin de roulement. C'est en particulier le cas lorsqu'une fissuration longitudinale entraîne la chute du champignon.

b) déformation importante de la voie

Sur une voie en longs rails soudés, une élévation importante de température induit dans le rail une force de compression très élevée (60 t par rail pour une élévation de température de 40° C) qui peut provoquer un flambement si certaines règles impératives de pose et d'entretien n'ont pas été strictement respectées. Les déformations sont alors telles que le déraillement est inévitable. L'affaissement de la plateforme, dû par exemple à un séisme ou à un éboulement, a des conséquences semblables.

c) déraillement spontané

Ce terme désigne les déraillements qui se produisent alors qu'un examen visuel sommaire de la voie ne révèle rien d'anormal. C'est par exemple le cas lorsqu'un déversement ou un déplacement transversal des rails, causés par une défaillance des attaches, font "tomber" l'essieu au milieu de la voie. Mais le cas le plus fréquent est le franchissement du rail par la roue résultant d'une montée progressive de celle-ci ou, beaucoup plus rarement, d'un saut brusque.

2.1.222 - Mécanisme de montée de la roue

Lors du franchissement d'une courbe, l'insuffisance de dévers fait que la roue extérieure est fortement appuyée contre le rail. Elle a donc tendance à monter et sa position est maintenue par la charge qu'elle porte. Si cette charge vient à diminuer (par exemple sur un gauche) ou si le frottement augmente (par exemple si le graissage est insuffisant), la roue peut monter sur le rail et retomber de l'autre côté en provoquant un déraillement. Ceci est résumé dans l'inégalité suivante comme sous le nom de formule de Nadal.

$$\frac{Y/Q}{\alpha} < \frac{\operatorname{tg} \alpha - f}{1 + f \operatorname{tg} \alpha} = \operatorname{tg} (\alpha - \varphi) \text{ si } \operatorname{tg} \varphi = f$$

ou : Y = force transversale roue-rail

Q = charge de la roue

f = coefficient de frottement au contact rail-mentonnet

α = angle du mentonnet de la roue

La propension au déraillement est ainsi caractérisée par le rapport Y/Q de la force transversale à la charge verticale qui ne peut pas dépasser une valeur limite fonction de l'angle du mentonnet et du coefficient de frottement.

2.1.223 - Facteurs favorisant le déraillement

L'angle étant une donnée les trois paramètres influents sont Y, Q et f. La force Y est fonction de l'insuffisance de dévers, du rayon de la courbe (cf. 2.1.322), de l'empattement du bogie et de l'écartement (cf. 2.1.323).

La charge Q dépend de la valeur du gauche de la voie (cf. 2.1.321) mais aussi de l'état d'entretien du bogie (suspension, diamètre des roues).

Enfin, le coefficient de frottement f est lié à l'état de graissage du contact rail-mentonnet (cf. 2.1.324).

2.1.23 - Action du matériel roulant sur la voie

2.1.231 - Forces verticales

Sur une voie parfaite, les forces se réduisent, en théorie, aux charges statiques auxquelles s'ajoutent, dans les courbes, les effets du dévers et de la force centrifuge. Dans la réalité, les irrégularités de la surface de roulement - qu'elles soient dues à un défaut du nivellement ou du rail lui-même - communiquent à la roue des accélérations verticales. Il en résulte une suite de surcharges et de décharges dynamiques, fugitives mais intenses dues essentiellement aux parties non suspendues du véhicule. Le vieillissement de la voie s'en trouve accéléré, tous ses composants étant soumis à des forces alternatives d'amplitude plus ou moins élevée selon son état. Le phénomène est totalement cumulatif puisque chaque défaut génère sa propre aggravation et l'usure globale, très lente au début, croît exponentiellement en fonction du tonnage.

2.1.232 - Forces horizontales

Les glissements longitudinaux et transversaux, imposés aux roues dans les courbes de petit rayon, créent des forces au contact rail-roue. L'analyse détaillée de l'ensemble de ces forces sur un bogie révèle d'une part, que celles-ci sont reprises par la force de réaction rail-mentonnet à la roue guidante et d'autre part, que l'essieu avant agit comme un vérin qui pousse les rails en sens opposé vers l'extérieur de la voie. Ces résultats ont été de nombreuses fois confirmés expérimentalement.

Le rail de la file haute subit une usure latérale rapide et les différents éléments des attaches sont soumis à des contraintes élevées et cycliques.

2.1.233 - Usure ondulatoire

Le système rail-roue est également le siège de phénomènes dynamiques à haute fréquence. Ainsi, les glissements dont il a été question plus haut sont en fait discontinus, une phase de glissement succédant à une phase d'adhérence. La surface du rail se trouve ainsi marquée par une suite de crêtes et de creux (usure ondulatoire) qui s'amplifie dans le temps. Au passage des trains, des vibrations sont générées et se propagent à la fois dans le véhicule et dans la voie. Des mesures ont montré que les surcroûts de force engendrés peuvent être considérables provoquant des ruptures d'organes sur le matériel roulant, une fatigue accélérée de la voie et des nuisances dans les constructions adjacentes en zone urbaine.

THEME 2

2.1.3 - Conception d'une ligne pour roulement sur fer

2.1.31 - Principes généraux

2.1.32 - Caractéristiques essentielles à respecter

2.1.3 - Conception d'une ligne pour roulement sur fer

2.1.31 - Principes généraux

On a vu au paragraphe précédent comment la voie pouvait être à l'origine d'un déraillement sans cause externe. Dans chaque cas elle se trouve hors de sa condition normale à la suite d'une évolution graduelle ou brutale. Lors de la conception d'une ligne nouvelle, il importe que l'ingénieur de la voie définisse cette condition normale de telle sorte qu'elle soit suffisamment éloignée des conditions de déraillement. Il réduit ainsi considérablement la probabilité d'un tel incident.

Pour cela, il doit posséder une bonne information sur les différents types de véhicules qui seront amenés à circuler. Cette information, conjointement avec celle relative au trafic (tonnage journalier, vitesse), lui permettra d'évaluer les forces roue-rail. Il disposera ainsi de toutes les données pour établir les règles de tracé et l'armement de la voie.

2.1.32 - Caractéristiques essentielles à respecter

2.1.321 - Norme de gauche

La rigidité à la torsion de chaque véhicule détermine une valeur maximum de la variation de dévers en entrée et sortie de courbe au-delà de laquelle une des roues subira un déchargement excessif. La valeur théorique utilisée pour l'étude devra être suffisamment faible pour que des déformations toujours possibles de la voie ne conduisent pas à un dépassement du maximum admissible.

2.1.322 - Rayon minimum

On a vu plus haut que le roulement en courbe de faible rayon engendre des glissements et, de ce fait, des forces très importantes avec pour conséquence une usure rapide de la voie et un risque de déraillement accru. Il est donc souhaitable de se fixer un rayon minimum permettant le roulement sans glissement et de ne déroger à cette règle que lorsque les contraintes de tracé l'exigent.

2.1.323 - Norme d'écartement

Les véhicules à bogies ne nécessitent pas, en général, de surécartement au franchissement des courbes. Seuls certains véhicules de grand empattement peuvent conduire à une telle disposition. De toute façon, l'écartement théorique doit toujours être choisi le plus faible possible pour ne pas augmenter l'angle d'attaque de la roue et donc les glissements avec leurs conséquences néfastes.

2.1.324 - Graissage du rail

Le graissage du contact rail-mentonnet constitue un facteur de sécurité primordial. Le système choisi doit être d'une très grande fiabilité car toute interruption se traduit rapidement par une situation périlleuse. Il existe deux types de solutions :

- le graissage fixe
- et le graissage embarqué.

Les dispositifs embarqués sont les plus fiables mais ils exigent que les trains équipés d'un système de graissage (environ 1 sur 7) soient convenablement intégrés dans le trafic afin de graisser régulièrement la voie. De plus, le personnel d'entretien du matériel roulant doit être conscient de l'importance fondamentale de ces dispositifs.

2.1.325 - Contre-rail

L'utilisation d'un contre-rail dans toutes les courbes de faible rayon permet de "désamorcer" les déraillements. Si la roue guidante escale de le rail, le contre-rail agissant sur l'autre roue empêchera la poursuite du déraillement et un resserrement de l'ornière en sortie de courbe ramènera l'essieu en position normale.

2.1.326 - Longs rails soudés

Sur un chemin de fer moderne il est souhaitable d'utiliser au maximum les longs rails soudés, mais pour chaque nouveau projet une étude complète des conditions de stabilité, en fonction des données locales, s'avère nécessaire en particulier pour déterminer le rayon limite de pose sans joint. Une marge de sécurité très importante doit être prise en compte car une négligence d'entretien, toujours possible conduirait sinon au flambement de la voie et donc au déraillement.

2.1.327 - Armement de la voie

La voie ferrée vieillit par usure et par fatigue. Elle doit donc être conçue de manière à ce que ces deux processus ne conduisent pas à une durée de vie trop courte. Par exemple, le choix d'un rail à forte inertie posé avec un travelage serré permettra de réduire le niveau de contrainte dans le rail et diminuera le risque de rupture par fatigue. L'emploi d'acier de nuance dure dans les courbes augmentera la durée de vie du rail en ralentissant l'usure.

Les données de base pour cette étude sont les forces rail-roue et les caractéristiques d'exploitation.

THEME 2

2.1.4 - Maintenance

2.1.41 - Impératifs liés à la sécurité

2.1.42 - Impératifs liés au vieillissement de la voie

2.1.4 - Maintenance

2.1.4.1 - Impératifs liés à la sécurité

2.1.4.1.1 - Objectif

Le premier objectif de la maintenance de la voie est d'assurer, à tout instant, la sécurité en veillant à ce que les conditions de déraillement ne soient jamais atteintes ou proches d'être atteintes et en intervenant immédiatement si une situation dangereuse est observée. Il s'agit donc de l'aspect court terme de la maintenance.

2.1.4.1.2 - Moyens

Pour réaliser cet objectif il faut définir une politique fixant les types de contrôles à effectuer et leur périodicité en fonction du trafic et de l'âge de la voie. En effet, une voie se dégrade d'autant plus vite que le tonnage supporté est important et que le temps écoulé depuis sa pose s'accroît.

Les contrôles visuels effectués par des agents parcourant tout le réseau à pied sont les plus fréquents : toutes les semaines ou toutes les deux semaines. Ils comprennent l'examen des attaches, des joints, du rail, des contre-rails, des appareils ainsi que l'observation et l'écoute de la voie au passage des trains. Bien que la probabilité d'une dégradation notable de la voie entre deux contrôles soit très faible, cette possibilité ne peut être ignorée en particulier à cause des ruptures de rails. Les conducteurs, qui ont une grande habitude de leur ligne, sont à même de signaler les anomalies qu'ils décèlent et leur action complète l'observation directe. La procédure de transmission de leurs signalements doit être très simple afin de permettre une intervention rapide du service de la voie.

Le contrôle du gauche de la voie dont l'excès crée un risque important de déraillement, doit être effectué systématiquement au moins deux fois par an et après toute opération de gros entretien.

La mesure manuelle étant trop lente le contrôle géométrique ne peut être réalisé que par un véhicule enregistreur spécialisé qui, en outre, présente l'avantage de mesurer une voie chargée.

L'auscultation des rails par ultra-sons permet de prévenir une partie des ruptures de rails en détectant les défauts internes. La périodicité souhaitable varie de une à quatre fois par an selon le trafic.

L'ensemble de ces contrôles ne peut se révéler efficace que si le personnel chargé de leur exécution a pleinement conscience de leur importance et des conséquences éventuellement dramatiques pouvant résulter de leur absence. Une formation adéquate des agents, leur expliquant la raison d'être de leur travail, doit être considérée comme une partie intégrante de la politique de maintenance.

2.1.42 - Impératifs liés au vieillissement de la voie

2.1.421 - Objectifs

Les efforts qui s'exercent sur la voie, en partie dus à des facteurs intrinsèques tels que les rayons des courbes ou les caractéristiques du matériel roulant, ont également pour origine les irrégularités de la géométrie de la voie et du contact rail-roue. En d'autres termes, aux forces quasi-statiques qui constituent une donnée incontournable et qui existeraient même sur une voie idéale, se superposent des forces dynamiques dont l'amplitude dépend de la qualité du roulement fer sur fer. Plus une voie est en mauvais état, plus sa dégradation sera rapide. Ce caractère exponentiel conditionne la politique d'entretien à long terme : un niveau de qualité minimum doit être assuré afin d'éviter l'accélération du vieillissement. Dans le cas d'un réseau neuf, l'évaluation de ce niveau ne peut être que très approximative. Une observation systématique et méthodique permettra, d'une part, de l'affiner progressivement et, d'autre part, de connaître la pathologie du matériel de voie afin de pouvoir le perfectionner et l'utiliser de manière optimale.

2.1.422 - Moyens

Tous les quatre à six ans en moyenne, la voie est soumise à une révision générale. Une expertise détaillée est effectuée et tous les composants jugés defectueux ou à limite d'usure sont remplacés ; la géométrie est corrigée si nécessaire et on procède à certaines opérations telles que le serrage et la consolidation des attaches. Au bout de plusieurs cycles, le maintien du niveau de qualité recherché demande des travaux de révision d'une trop grande ampleur : le renouvellement complet devient économiquement justifié. Dans le cas d'une voie très chargée, l'intervalle entre renouvellements est de l'ordre de 25 ans.

Certaines opérations doivent être effectuées annuellement, elles concernent essentiellement les joints de tous types et les appareils. Cette périodicité doit également être retenue pour le contrôle complet de la géométrie de la voie par un véhicule de mesure afin de détecter des évolutions locales anormalement rapides.

Enfin il faut citer le meulage des rails qui constitue une opération particulière dont la fréquence dépend de la vitesse de réapparition de l'usure ondulatoire et du degré de gêne que ce phénomène engendre au sein de la population avoisinante.

2.1.5 - Conclusion

Par sa nature même, le roulement d'un essieu de chemin de fer sur une voie classique présente deux caractères essentiels :

- le guidage est simplement assuré soit par la conicité au contact rail-roue, soit par le mentionnet,
- il génère des forces verticales et transversales qui peuvent, dans certains cas, atteindre des valeurs considérables concentrées sur de très petites surfaces.

En comparaison avec le roulement sur pneumatiques qui assure un guidage quasiment infaillible, le risque de déraillement est réel et ne peut être minimisé que par une maintenance rigoureuse. D'autre part, la voie subissant des efforts plus intenses que ceux exercés par un pneumatique, son usure et sa dégradation sont plus rapides ; les cycles d'entretien s'en trouvent raccourcis et le volume des travaux accru.

Il en résulte des dépenses de maintenance beaucoup plus élevées sur les lignes exploitées avec des trains classiques. Ainsi, à Paris, le coût par mètre de voie est près de trois fois moins élevé sur le réseau équipé pour le roulement sur pneumatiques.

Dans le cas de lignes nouvelles, cet écart peut être réduit de façon notable si le tracé et l'armement de la voie sont judicieusement étudiés mais il serait illusoire d'espérer l'annuler. Même en utilisant une assise en béton - de toutes façons exclue dans le cas de lignes sur plateforme compactée - on n'élimine que le coût d'entretien de la géométrie qui est maintenant de plus en plus faible grâce aux bouteuses niveleuses de plus en plus performantes actuellement disponibles.