Etat de la technique rigidité de la voie

Maîtrise de système Interaction matériel roulant – voie ferrée Voie métrique
Project: 4 Rigidité de la voie
Module: Module 1

Rapport technique

ID:	RAILPlus-00086	
Date / Statut:	16.10.2022 / Approuvé	Nombre de pages 50
Auteur:	Stefan Werner KPZ, Martin Siegen MGBahn	
Auteur de la traduction:	Pascal Häller / TPF	
Vérifié:	Peter Güldenapfel / KPZ	
Approuvé:	Martin Siegen / MGBahn	

Citation:
Stefan Werner, Martin Siegen, Railplus: *Etat de la technique rigidité de la voie*, 16.10.2022

Management Summary

L'enquête menée auprès des chemins de fer à voie métrique a montré que la charge de la voie ferrée a fortement augmenté ces 20 dernières années pour la plupart des chemins de fer en raison de l'augmentation des charges par essieu et/ou de la densification de l'horaire. Ces charges se traduisent d'une part par une usure accrue des rails et des roues. D'autre part, elles ont également des répercussions sur la qualité de la position des voies.

Pour remédier à ce problème, des nuances d'acier plus dures et des châssis plus rigides, avec une capacité de portance plus élevée sont construits. Cela a pour conséquence d'augmenter les émissions de bruit. Le bruit est un problème chez 80% des chemins de fer à voie métrique. Outre le crissement en courbe, les émissions sonores causées par la structure plus rigide de la voie ferrée avec des traverses en béton sont gênantes pour les riverains. De même, les vibrations sont de plus en plus un facteur gênant. Cette thématique soulève quelques questions quant à la voie ferrée optimale ou à l'interaction idéale entre la voie ferrée et le véhicule:

- La dureté des rails a-t-elle une influence sur l'usure des roues?
- Quelle est la géométrie de contact optimale entre la roue et le rail en tenant compte du profil d'usure et quelle est l'influence de l'inclinaison du rail?
- Dans quelle mesure les traverses en béton ou la structure plus rigide de la voie ferrée modifient-elles la fréquence propre de la voie ferrée et quelle en est l'influence sur l'usure ou le bruit?

Actuellement, il n'est pas possible de donner des réponses définitives à ces questions. En parcourant la recherche actuelle, il s'avère que les connaissances de base manquent et doivent encore être élaborées, en particulier dans le domaine des chemins de fer à voie métrique avec leurs caractéristiques particulières telles que des courbes étroites.

Sur la base des connaissances acquises par les chemins de fer à voie normale et des expériences des chemins de fer à voie métrique, il est néanmoins possible de dégager quelques tendances.

En particulier en cas de charges de trafic élevées, la croissance des usures ondulatoires et de l'usure peut être nettement ralentie en utilisant des aciers à haute résistance pour les rails dans les courbes étroites. On part du principe que la réduction des défauts des rails permet également de réduire l'usure des roues. De même, la croissance des usures ondulatoire est réduite en utilisant des semelles sous rail souples avec un coefficient d'élasticité statique < 100 kN/mm. Il convient de noter qu'avec des semelles sous rail souples, le bruit (vibrations du rail) augmente.

L'utilisation de semelles sous traverses améliore généralement la qualité de la position de la voie. Les transitions entre traverses avec semelles et traverses sans semelles est contre-productif. C'est pourquoi il est recommandé de poser des semelles sous traverses rigides, si possible plastiques, sur toute la longueur d'un tronçon de voie, afin d'obtenir une qualité constante de la position de la voie et de réduire les coûts LCC, sans tenir compte de la protection contre les vibrations. En outre, les semelles sous traverses peuvent contribuer à compenser la faible capacité de répartition des charges du ballast en cas de faible épaisseur du lit de ballast (<20 cm). Un autre domaine d'application est l'optimisation des sauts de rigidité dans les zones de transition des ouvrages, des voies sans ballast ou des terrains naturels rocheux présentant une rigidité élevée.

L'utilisation de traverses en béton avec semelles peut améliorer la rigidité globale. La recherche doit se poursuivre pour savoir dans quelle mesure les émissions de bruit peuvent être réduites au moyen d'éléments élastiques.

Les chemins de fer à voie métrique suisses utilisent de manière isolée des tapis sous ballast contre les vibrations. Les expériences sont décrites comme fondamentalement positives.

Compte tenu de l'augmentation des charges par essieu et des charges plus élevées sur la voie ferrée, il est recommandé à long terme de réaliser une infrastructure portante avec une couche d'étanchéité et une couche de fondation. Si l'accessibilité est assurée, en cas de charges plus élevées, la pose d'AC-Rail est la solution la plus économique.

Le facteur le plus important pour une voie ferrée à longue durée de vie est le bon fonctionnement de l'évacuation des eaux. Le nouveau wagon de mesure des chemins de fer à voie métrique permet d'une part d'augmenter la sécurité et d'autre part de mettre en place une stratégie d'entretien à court et à long terme orientée sur l'état des installations.

Table des matières

1 Situation initiale 5
2 Bases 5
2.1 Définitions 5
2.2 Littérature disponible 6
3 Etat de la technique 7
3.1 Bases générales 7
3.2 Rails 18
3.3 Semelles sous rail et fixations 24
3.4 Traverses 25
3.5 Semelles sous traverse 26
3.6 Ballast 33
3.7 Semelles sous ballast 33
3.8 Infrastructure, couche de fondation 34
3.9 Evacuation des eaux 38
3.10 Voie ferrée Défauts Usure 38
3.11 Voie ferrée Bruit, Vibrations 40
3.11.1 Bruit 41
3.11.2 Vibrations 41
3.12 Diagnostic de mesure 45
4 Conclusion 48
4.1 Résumé des principales conclusions 48
5 Répertoires 49
5.1 Révisions 49
5.2 Références 49
5.3 Figures 49
5.4 Tableaux 50

1 Situation initiale

En raison de l'usure accrue des roues et des rails chez les chemins de fer à voie métrique, RAILplus a lancé un projet de recherche sur l'interaction entre le matériel roulant et la voie ferrée. L'objectif de ce travail de recherche est d'obtenir une compréhension fondamentale des effets à court et à long terme tels que le crissement en courbe, l'usure des roues et des rails, la formation d'usures ondulatoire, afin d'optimiser ensuite le système global matériel roulant - voie ferrée sur le plan économique et socio-économique.

La voie ferrée fait partie de ce système et doit être considérée en interaction avec le matériel roulant.

Ce document a pour but, d'une part, de présenter l'état actuel de la technique de la voie ferrée et, d'autre part, de mettre en évidence le manque de connaissances, en particulier dans l'interaction matériel roulant - voie ferrée.

2 Bases

2.1 Définitions

Voie ferrée (Fahrbahn)	Corps de la voie ferrée (Fahrbahn) sur lequel le passage d'un train exerce une influence. La voie ferrée comprend la superstructure et l'infrastructure avec l'évacuation des eaux.
Voie ferrée (Fahrweg)	La voie ferrée (Fahrweg) comprend toutes les installations nécessaires à l'exploitation du chemin de fer.
Superstructure	La superstructure est la partie de la voie ferrée située au-dessus de la surface de la couche de base. Elle comprend le rail, la traverse, la fixation du rail et le ballast.
Infrastructure	L'infrastructure est la partie située sous la surface de la couche de base et comprend la couche d'étanchéité, la couche de fondation et la couche de transition.
Terrain naturel	Le terrain naturel est le sol ou la roche qui se trouve sous la superstructure ou l'infrastructure. L'infrastructure et le terrain naturel constituent la fondation de la voie ferrée.

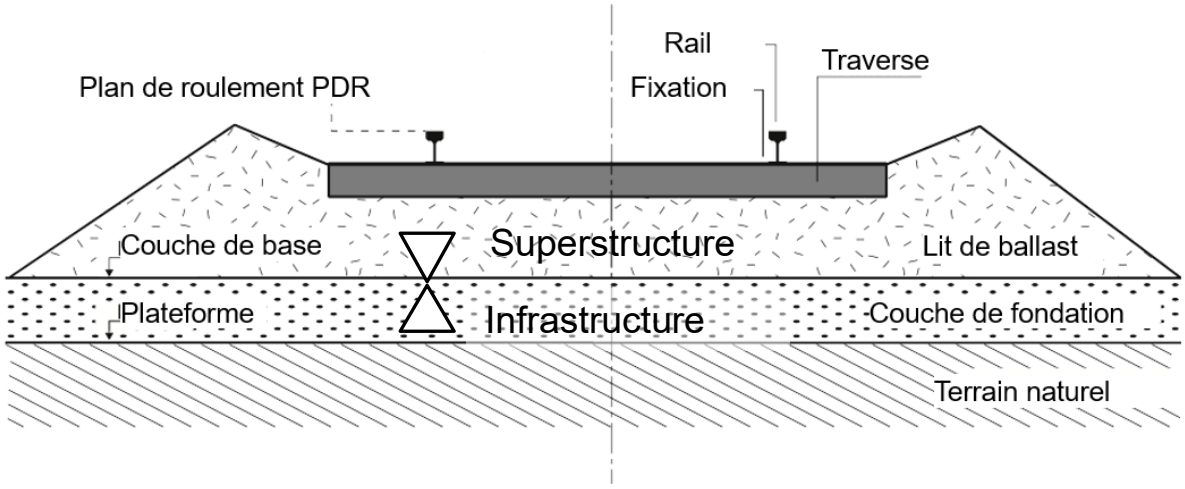

Figure 1: Définitions de la voie ferrée[1]

[1] Dr. M. Kohler, CAS en génie ferroviaire – Voie ferrée

2.2 Littérature disponible

Office fédérale des transports (OFT): DE-OCF, Berne, 2020

UTP: D RTE 22540 Guide pratique de la voie ferrée écartement métrique et spécial, 15.01.2011

UTP: R RTE 21110: Infrastructure et ballast, 01.09.2015

UTP: R RTE 20512: Profil d'espace libre voie métrique

UTP: R RTE 22541: Voies sans joints (VSJ), appareils de voie soudés sans joints et voies éclissées pour l'écartement métrique, 30.11.2005

UTP: R RTE 22546 Conception géométrique de la voie ferrée voie métrique, 15.01.2012

UTP: R RTE 22570 Pose, contrôle et entretien des voies voie métrique, 31.07.2012

Norme suisse: EN 13848: Applications ferroviaires – Voie – Qualité géométrique de la voie, 10.2019

Norme suisse: EN 14363: Applications ferroviaires – Essais et simulations en vue de l'homologation des caractéristiques dynamiques des véhicules ferroviaires – Comportement dynamique et essais stationnaires, 09.2022

Bernhard Lichtenberger: *Handbuch Gleis*, Eurailpress 2010

Johannes Martin Mack, *Untersuchungen zum Schichtübergang Unterbau-Schotter unter Berücksichtigung verschiedener Oberbaukonfigurationen*, TU München, 2022

Hermann Patrick Braess: *Sicherstellung einer langfristig guten Gleislage in atmenden Bögen*, Diss. ETH Nr. 25112, ETH Zürich, octobre 2018

Güldenapfel Peter, RAILplus / KPZ Fahrbahn: *Saisie des bases Sondage chemins de fer.* Rapport technique, 14.10.2022

Nishant Kumar, Claudia Kossman, Stephan Scheriau and Klaus Six: An efficient physical-based method for predicting the long-term evolution of vertical railway track geometries

Dr. H.R. Schneider, Allianz Fahrweg, BAV: *Internationale Literaturrecherche zum Thema Unterbau bei Bahnstrecken*, 18.01.2022

Railway Rolling Stock (Railtex), PEP (Professional Engineering Publishers), Wiley, 01.02.2005

K. Mädler, R. Heyder, DB Systemtechnik, Weiches Rad und harte Schiene oder umgekehrt? Zum Einfluss des Werkstoffes von Rad und Schiene auf den Verschleiss der Kontakt-Partner, Dresde, 2015

3 Etat de la technique

Le sondage effectué auprès des chemins de fer à voie métrique a montré que les sollicitations de la voie ferrée dues à l'augmentation des charges par essieu et/ou à la densification de l'horaire ont fortement augmenté chez la plupart des chemins de fer au cours des 20 dernières années. Ces charges se traduisent d'une part par une usure accrue des rails et des roues. D'autre part, elles ont également des répercussions sur les modifications de la qualité géométrique de la voie.

Pour répondre à ces nouvelles exigences, le présent rapport se penche sur les connaissances existantes concernant les différents composants de la voie et le système global de la voie ferrée.

La voie ferrée fait partie du système global matériel roulant-voie ferrée et ne doit donc pas être considérée de manière isolée, mais doit également tenir compte des interactions entre le véhicule et la voie. La sollicitation des roues et des rails dépend en outre des conditions de tracé du tronçon concerné, des caractéristiques des véhicules utilisés et des valeurs cibles du comportement dynamique.

3.1 Bases générales

La voie remplit les fonctions suivantes:

- Conduire, porter et garantir un bon comportement dynamique des véhicules en toute sécurité
- Reprendre les forces du véhicule dans le sens horizontal, vertical et longitudinal
- Transfert des forces dans le terrain naturel
- Assurer une grande disponibilité avec une maintenance économiquement justifiable
- Assurer un bon confort dynamique

Le principe du mécanisme de conduite et de guidage sur le roulement d'un double cône sur deux cylindres respectivement sur la lame d'un couteau. En position centrée, les deux roues d'un essieu ont le même diamètre. Lorsque l'essieu se déplace latéralement, par exemple vers la droite par rapport au centre de la voie, les roues tournent avec des diamètres différents (rayons de roulement). La roue droite roule sur un diamètre de roue plus grand que la roue gauche. La liaison entre les deux roues de l'essieu monté étant rigide, les distances parcourues par la roue gauche et la roue droite sont différentes.. Lorsque l'essieu roule dans cet état, un moment s'établit autour de l'axe vertical et produit un effet de guidage ainsi qu'un mouvement sinusoïdal et donc un centrage de l'essieu au milieu de la voie sur le tronçon. Si l'essieu se déplace dans une courbe (par exemple dans la figure en bas à droite dans une courbe à gauche), l'essieu est guidé à travers la courbe par le couple résultant des forces appliquées aux deux roues.

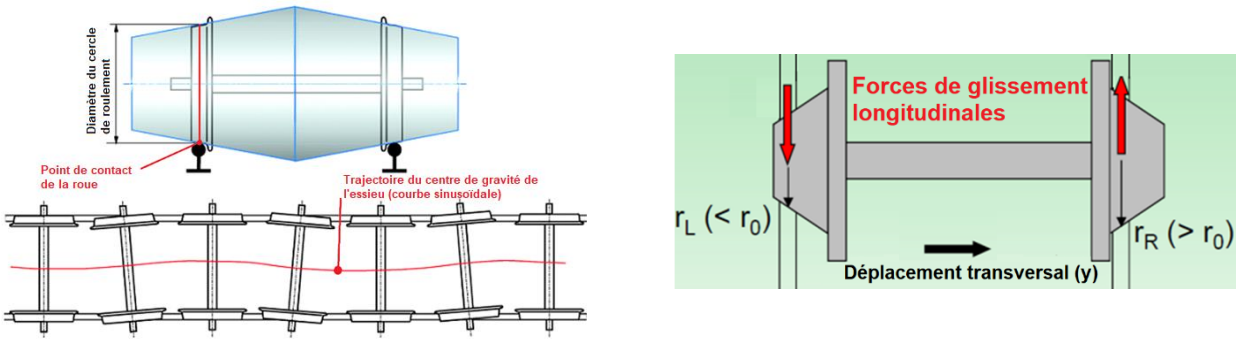

Figure 2: Gauche mouvement sinusoïdal du véhicule dans la voie en raison de la différence des rayons de roulement[2]

[2] Joachim Ihme, Schienenfahrzeugtechnik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2. Auflage, 2019

En régime d'exploitation, l'usure peut modifier les profils des roues et des rails. C'est notamment le cas lorsque les profils ne sont pas adaptés à l'usure. Dans ce cas, le contact entre la roue et le rail est modifié, ce qui peut avoir des conséquences sur le comportement dynamique en alignement d'une part et dans les courbes d'autre part. L'idéal serait donc que l'usure inévitable de la roue et du rail ne modifie pas le comportement dynamique. C'est le cas lorsque les profils sont adaptés l'un à l'autre en termes de géométrie de contact. Dans ce cas, on parle de profils adaptés à l'usure.

L'usure des rails a, dans le pire des cas, une grande influence sur le comportement quasi-statique et dynamique du véhicule. Cela concerne aussi bien les forces entre la roue et le rail en courbe que le comportement et le confort dynamique du véhicule sur les tronçons en alignement. La géométrie de contact a des effets opposés sur le comportement dynamique lors de la conduite en alignement d'une part et en courbe d'autre part. La géométrie de contact roue-rail optimale est toujours un compromis entre un bon comportement en courbe et la maîtrise simultanée de vitesses de circulation élevées en alignement. La stabilité du véhicule à des vitesses élevées dépend des paramètres déterminants du véhicule, de la géométrie de contact roue/rail, de l'écartement (jeu de l'écartement) et de la qualité de la voie.

Dans les courbes étroites, un angle d'attaque important peut se produire entre la roue et le rail au niveau des essieux avant des véhicules. Cela entraîne une forte usure des flancs des rails en extérieur de la courbe et une usure accrue des surfaces de roulement des rails en extérieur et en intérieur de la courbe. En raison des forces latérales élevées sur le flanc des rails en extérieur de la courbe, la roue correspondante risque de grimper sur le flanc du rail, ce qui, dans le pire des cas, peut entraîner le déraillement du véhicule.

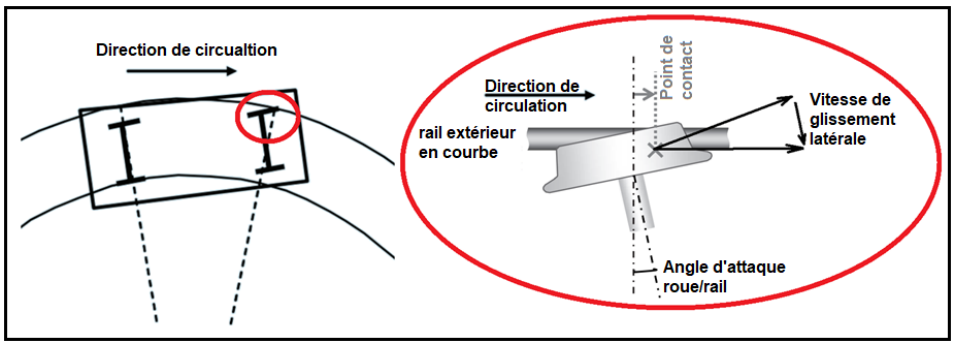

Figure 3: Guidage des essieux[3]

Afin de compenser resp. d'atténuer la force centrifuge agissant dans la courbe, la voie est inclinée vers l'intérieur de la courbe resp. le rail extérieur est surélevé par rapport au rail intérieur (dévers). La différence entre le dévers qui serait nécessaire pour compenser entièrement l'accélération latérale à la vitesse maximale autorisée et le dévers effectif est appelée insuffisance de dévers. Selon les DE-OCF, la valeur limite en cas normal de l'insuffisance de dévers pour la voie métrique est de 86 mm (accélération latérale non compensée au niveau de la voie a_q = 0.8 m/s^2) et sa valeur limite maximale est de 107 mm (a_q = 1.0 m/s^2).

Les paramètres de l'exploitation et du tracé les plus importantes qui influencent le comportement dynamique en courbe sont la géométrie des voies (rayon de courbure, dévers), la qualité géométrique de la voie, l'insuffisance de dévers resp. l'accélération latérale non compensée au niveau de la voie et les conditions de contact entre la roue et le rail (profils des roues et des rails, écartement de la voie et des essieux, inclinaisons des rails, coefficient de frottement roue/rail).

La surface d'appui entre la roue et le rail, permettant de transmettre des charges de roue jusqu'à 8 tonnes (charge par roue maximale voie métrique en Suisse), est d'environ 1cm2. Chez les véhicules routiers, cette surface est environ 100 fois plus grande. Le contact entre la roue en acier et le rail en acier est très rigide. La petite surface de contact qui en résulte entraîne des contraintes de contact très élevées (pouvant atteindre jusqu'à 1100 MPa pour cette charge de roue avec un diamètre de roue de

[3] Joachim Ihme, Schienenfahrzeugtechnik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 16.08.2016

790 mm et sur une voie en alignement). Les dimensions de la surface de contact approximativement elliptique sont calculées de manière simplifiée selon la théorie de Hertz et dépendent de la charge, du module d'élasticité et de la courbure de la roue et du rail au point de contact. Dans la zone de contact, différentes zones d'adhérence et de glissement se forment en fonction du taux d'adhérence. Le mouvement relatif dans la zone de glissement est appelé micro-glissement (dans la littérature, on parle aussi, pour simplifier, du glissement). La force d'adhérence qui agit tangentiellement sur la surface de contact résulte du micro-glissement et de la répartition des contraintes de contact. Elle peut agir individuellement ou de manière combinée dans plusieurs directions et résulte principalement de l'accélération/du freinage du véhicule et/ou du comportement de conduite et guidage lors de la circulation en courbe. Le glissement sur la surface de contact et la force d'adhérence qui y est générée engendrent un effort de frottement. Celui-ci provoque une augmentation de la température à la surface de contact (200-300°), qui génère des contraintes additionnelles aux contraintes normales et tangentielles. Les forces d'adhérence générées par le glissement sont limitées par le coefficient de frottement entre la roue et le rail.

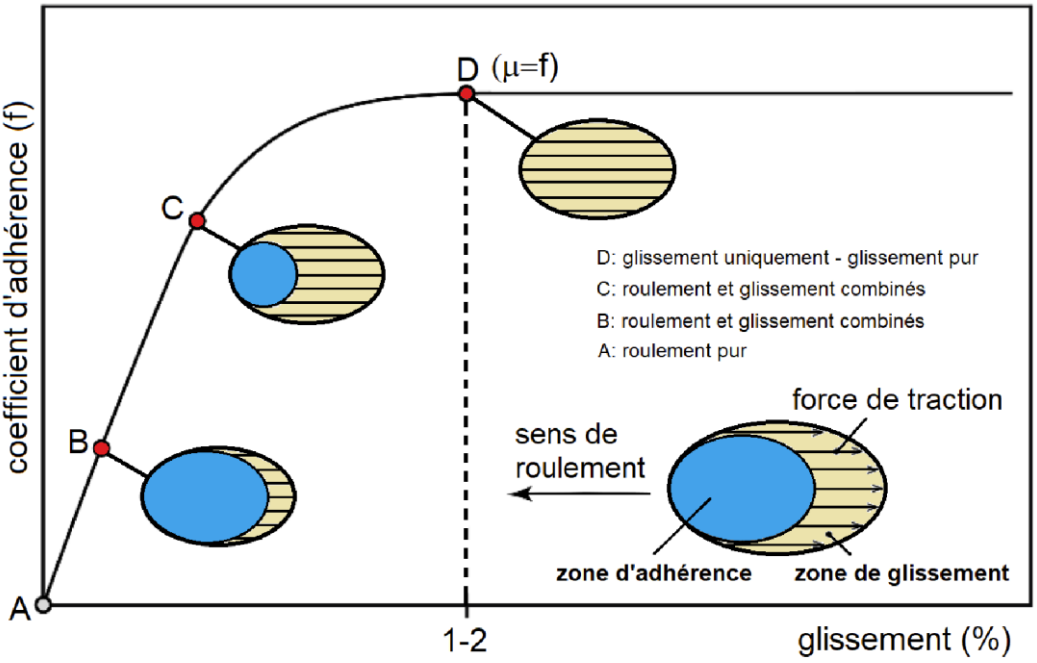

Figure 4: Diagramme coefficient d'adhérence – glissement (collection R. Müller)

Figure 5 montre la représentation schématique des modèles véhicule-voie. Les modèles du véhicule et de la voie tels qu'ils sont utilisés pour les calcul de vérification du comportement dynamique sont représentés sur le côté droit. Les rigidités et les amortissements de la voie sont définis dans des modèles prédéfinis. Pour le véhicule, ils sont déterminés individuellement sur la base des calculs de conception.

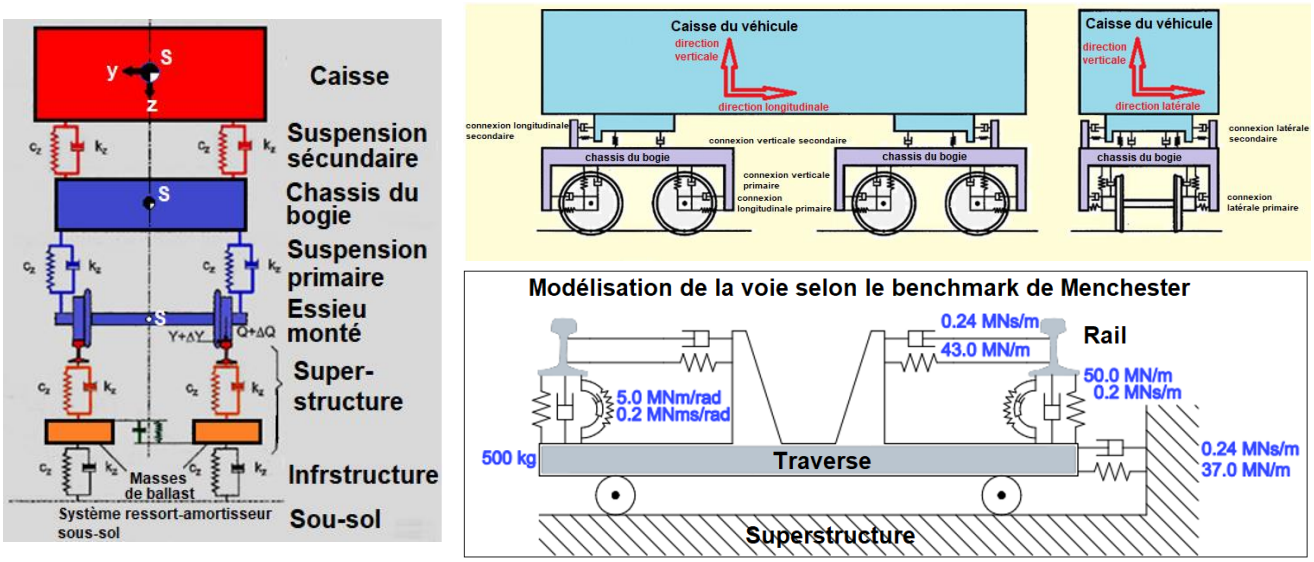

Figure 5: Modèles véhicule – voie (gauche voie ferrée détaillée, droite voie ferrée pour élaboration des preuves)

Tant le véhicule que la voie sont des sous-systèmes capables de produire des vibrations au niveau du système véhicule/voie. Les modèles de véhicules et de voies représentés se composent de masses, de ressorts et d'amortisseurs. Les éléments de ressort et d'amortissement entre la caisse et le bogie ainsi qu'entre le bogie et l'essieu sont très bien connus et leur comportement peut être bien décrit de manière mathématique.

Les propriétés élasto-plastiques de la voie elle-même ne peuvent pas être décrites analytiquement avec précision en raison du comportement inhomogène du lit de ballast, de l'infrastructure et du terrain naturel. Des paramètres et des relations empiriques, déterminés par des essais, sont appliqués [1].

À la suite d'une excitation, les masses représentées comme corps rigides peuvent ainsi se déplacer ou osciller selon leurs degrés de liberté. Ces mouvements peuvent être différenciés selon la cause de la vibration. Les vibrations libres (également appelées vibrations propres) sont généralement générées dans les systèmes par une excitation unique, par exemple sous la forme d'un choc ou d'un saut (joint dans la voie ferrée, cœurs de branchement, défauts de rail) sans autre apport externe continu d'énergie. Le système, par exemple la caisse du véhicule, oscille alors avec sa fréquence propre et son amplitude, qui résultent des paramètres du système. Dans le cas des vibrations à excitation externe ou auto-excitées, l'excitation vibratoire est due à des excitations externes périodiques ou à un apport d'énergie auto-commandé (défauts de position de la voie, marche sinusoïdale des essieux). Comme pour les oscillations libres, la fréquence des oscillations auto-excitées est déterminée par le système oscillant lui-même, tandis que pour les oscillations à excitation externe (ou forcées), la fréquence est déterminée par l'excitation externe périodique. Les vibrations non amorties peuvent entraîner une forte oscillation du système en raison d'une excitation extérieure supplémentaire, ce qui peut aboutir dans le pire des cas à une catastrophe de résonance. Un amortissement plus important de cette fréquence de système calme le système et fait en sorte que les fréquences de résonance éventuelles n'aient plus d'effets négatifs sur les composants du système.

Les défauts géométriques de la voie résultent des effets de l'exploitation, suite aux déformations du système porteur composé de la superstructure, de l'infrastructure et du terrain naturel, ainsi que des effets climatiques. Leur apparition est favorisée par une voie non homogène. Il peut s'agir par exemple dans les zones de transition, de différentes élasticités de la superstructure et de l'infrastructure, comme p.ex. le changement du type de traverses (bois - béton), les ponts sans lit de ballast continu, les passages sur voie sans ballast ou sur infrastructure rigide, les passages à niveau, les passages inférieurs ou les traversées de conduites, les différentes épaisseurs du lit de ballast, etc. Les forces dynamiques exercées lors du passage sur les zones de défaut qui en résultent accentuent encore les défauts géométriques de la voie.

La norme EN 13848-1 distingue par exemple les défauts de nivellement longitudinal en différents domaines de longueur d'onde:

- D1 (ondes courtes), longueur d'onde 3 ≤ 25 m
- D2 (ondes moyennes), longueur d'onde > 25 ≤ 70 m
- D3 (ondes longues), longueur d'onde > 70 ≤ 150 m

Dans les voies à écartement normal, les ondes courtes et moyennes (Figure 6) du nivellement longitudinal se forment le plus souvent en raison de l'interaction entre la voie et le véhicule (en fonction de la vitesse et des caractéristiques du véhicule). Les causes se situent généralement au niveau du ballast et de l'infrastructure, comme p.ex. des zones d'éclaboussures, de destruction du ballast, de tassement de l'infrastructure, provoqué dans certains cas par des défauts au niveau de l'évacuation des eaux, etc.

Dans les voies à écartement normal, l'élément déclencheur des ondes longues se trouve en revanche dans l'infrastructure ou le terrain naturel. Alors que les ondes longues n'ont en général pas d'influence immédiate sur la sécurité de l'exploitation, les ondes courtes et moyennes peuvent entraîner des conséquences indésirables, voire des déraillements, en raison de l'augmentation de l'accélération des roues et donc de l'accélération de la caisse des véhicules. A l'exception du domaine à haute vitesse, seules les ondes courtes doivent être prises en compte lors de l'évaluation de la sécurité, du comportement dynamique et du confort.

Les ondulations de moins de 3 m sont généralement causées par des singularités dans la voie (par exemple des joints dans la voie éclissée, des joints isolants, etc.) et ne peuvent généralement pas être éliminées par des bourrages.

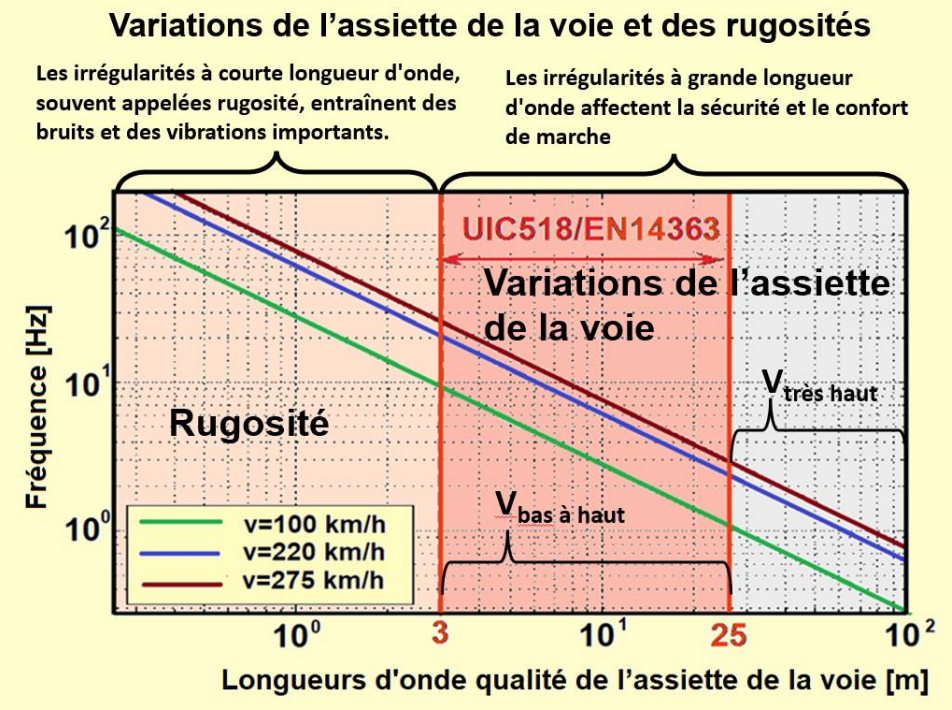

Figure 6: Longueurs d'onde des défauts géométrique de la voie selon EN 13848-1

Figure 6 montre en rouge l'évolution du point de vue technique de la voie ferrée. Pour l'entretien de la voie, les valeurs maximales et les écarts-types issus des saisies d'amplitude sont déterminants. Pour l'interaction véhicule/voie, les contenus de ces signaux sont également nécessaires.

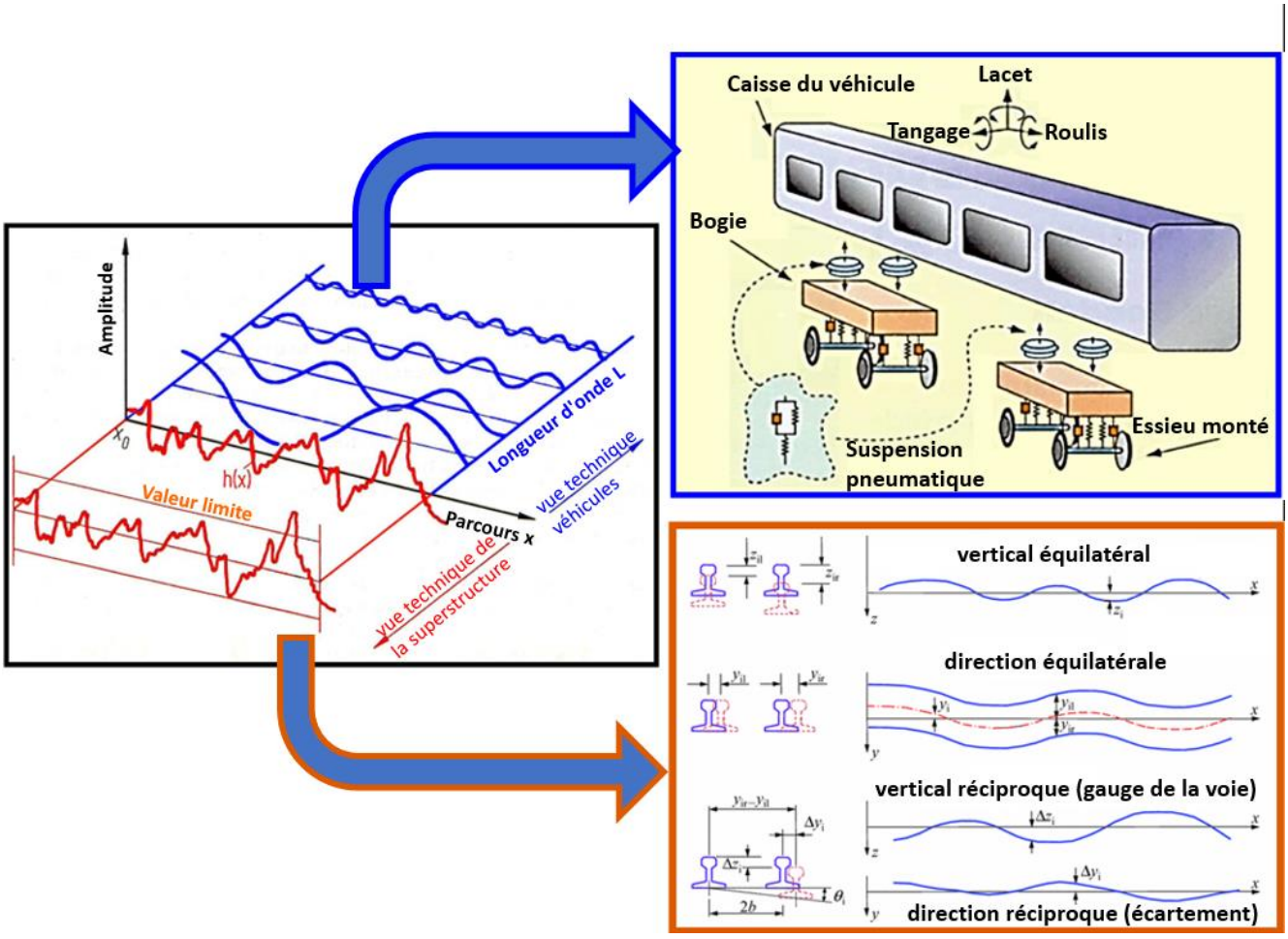

Figure 7: Différents points de vue lors de l'évaluation de la géométrie de la voie pour le véhicule et la voie ferrée (collection R. Müller)

Lors des essais d'homologation des véhicules, l'écart-type est utilisé pour vérifier les exigences fondamentales relatives à la qualité géométrique de la voie du tronçon d'essai. Dans la norme de maintenance (EN 13848-5), il est précisé que les valeurs maximales (concernant les limites de sécurité) tiennent compte à la fois de l'interaction véhicule-voie ferrée et du risque d'événements inattendus. Les valeurs limites pour l'écart-type ne sont définies qu'à titre informatif et uniquement pour le seuil d'attention dans l'annexe de cette norme.

Le spectre de densité de puissance (PSD { Power Spectral Density} en anglais) offre une autre possibilité pour l'analyse des composantes de signaux stochastiques stationnaires des défauts géométriques de la voie. Le principal domaine d'application du spectre de densité de puissance est la synthèse des écarts géométrique de la voie pour la conception des véhicules. Pour ce faire, de nombreuses courses de mesure ont été effectués sur les réseaux européens et des spectres de densité de puissance ont été calculés pour chaque paramètre de description de la géométrie de la voie.

La dynamique des véhicules se situe dans le domaine des basses fréquences (mécanique des corps rigides et vibrations structurelles de la caisse du véhicule jusqu'à 20Hz maximum)), ce qui nécessite des modèles de véhicules affinés et des modèles de voies simplifiés pour leur analyse. La dynamique de la voie se situe dans le domaine des fréquences moyennes à moyennes-hautes (vibrations, comportement à court terme), ce qui nécessite des modèles de voie affinés et des modèles de véhicules simplifiés pour leur analyse. Les problèmes de bruit (par exemple les crissements en courbe) se situent dans le domaine des hautes fréquences. Selon la tâche à accomplir, il sera nécessaire d'utiliser différents modèles pour la modélisation du système véhicule/voie (cf. Tableau 1).

Le tableau suivant donne un aperçu des différentes fréquences de vibration et de leurs inter-dépendances:

Basse fréquence: 3m ≤ λ ≤ 25m	Moyenne fréquence: 20Hz ≤ f ≤ 100Hz	Fréquence moyenne-haute: > 100 Hz	Haute fréquence: 500Hz ≤ f ≤ 8000Hz
La **position de la voie** dépend de:	**Vibrations** surviennent en raison de:	**Défauts & usure sur surfaces de roulement roue / rail**	**Bruit** se manifeste en raison de:
• Charge par essieu & charge du tronçon • Vieillissement du ballast • Traction • Dégâts aux surfaces de roulement de roue/rail → phénomènes de tassements • Modification longitudinale de la rigidité • Qualité de pose • Couches élastiques manquantes (USP,USM) – Conception de l'infrastructure / superstructure • Discontinuités des surfaces de roulement • Infrastructure / terrain naturel non homogène • Comportement dynamique du véhicule (#Amortisseur/ ressort) • Tracé	• Défauts de qualité géométrique de la voie • Excitations paramétriques (empattement, distance entre bogies, …) • Excitations externes (Défauts de circularité des roues, défauts des surfaces de roulement des rails etc.) • Vitesses de circulation • Discontinuités à ondes courtes (0.2m≤λ≤3m) de la voie ferrée • Fonction de transfert défavorable entre voie ferrée et terrain naturel	• Défaut de surface de roulement (usures ondulatoires) • Défaut de circularité de la roue (polygone) • Nuances d'acier rail & roue • Coefficient de frottement roue-rail • Fixation du rail / semelle sous rail • Diamètre de roue • Géométrie de contact • Angle d'attaque roue-rail (glissement) • Comportement en torsion de l'essieu • Semelles sous traverses manquantes?	• Semelle sous rail • Type de traverse • Coefficient de frottement rail-roue • Géométrie de contact • Angle d'attaque roue-rail • Diamètre de roue • Fixation du rail / Semelle sous rail • Voie sans ballast ?

Tableau 1: Différents modèles véhicule – voie ferrée selon l'objectif

Figure 8 montre les objectifs que l'on souhaite atteindre avec des couches élastiques (semelles sous rail, semelles sous traverses, ...) dans la superstructure. L'objectif premier de l'utilisation est de protéger les traverses et le ballast ainsi que de permettre une qualité géométrique durable de la voie. Comme le montre le "triangle magique de la superstructure", les trois objectifs (bruit, vibrations, usure LCC) ne peuvent normalement pas être atteints simultanément en raison des différentes fréquences de vibration ; il faut à chaque fois définir quel objectif doit être optimisé en priorité. La structure de la superstructure est généralement un compromis entre ces trois objectifs.

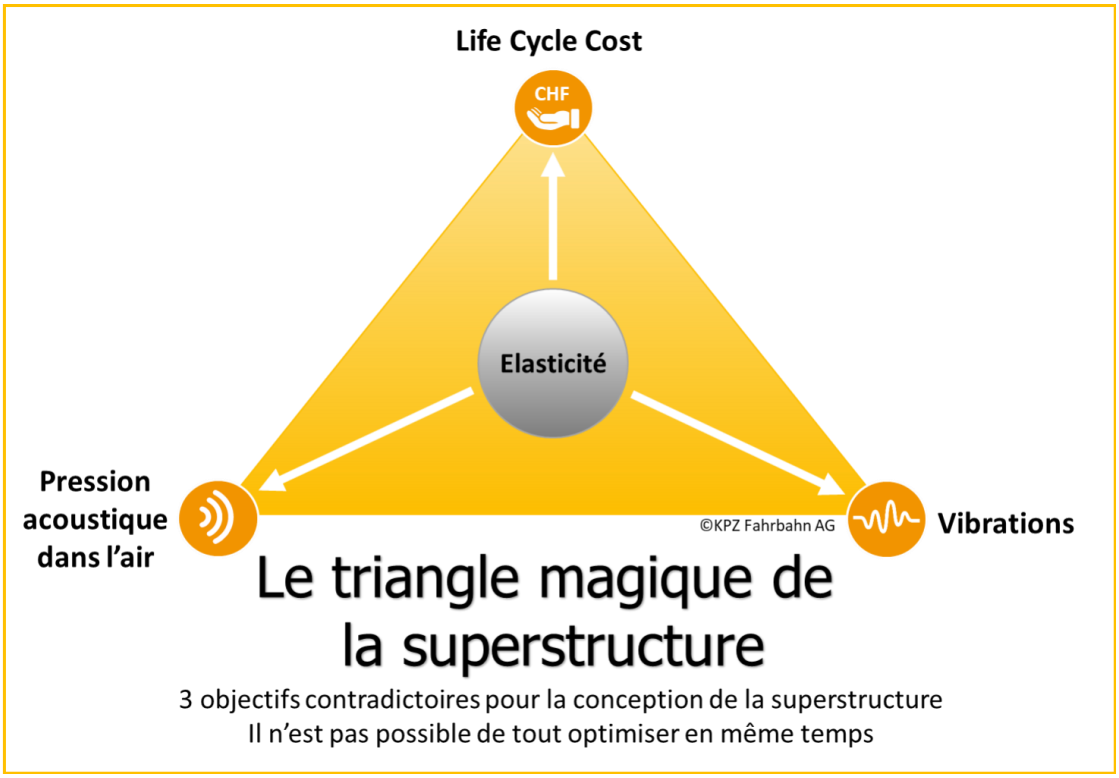

Figure 8: Relations de la superstructure dynamique

Lors de l'interaction entre le véhicule et la voie, ce sont surtout les types d'interaction entre la roue et le rail représentés en Figure 9 qui jouent un rôle décisif. Ces types d'interaction jouent un rôle déterminant:

- pour le comportement de guidage des véhicules dans les différentes plages du tracé ainsi que dans les points fixes de la voie (tous les types de branchements, de jonctions, d'appareils de dilatation, …)
- pour l'usure de la roue et des rails
- pour la sécurité de circulation, le comportement dynamique et le confort
- pour l'évolution de la qualité géométrique
- pour l'impact environnemental par bruit et vibrations

Dans cette interaction, tant le véhicule que la voie doivent répondre aux exigences qui leur sont imposées pendant toute leur durée de vie. Cela doit être garanti tout au long du cycle de vie du système matériel roulant – voie ferrée.

Pour l'interopérabilité, une interaction géométrique parfaite entre roue/rail resp. essieu/voie ferrée doit être garantie dans les différents domaines de tracé. Il en résulte des exigences pour l'acquisition et la maintenance des composants du véhicule et de la voie ferrée impliqués. La plupart des contraintes découlent de la possibilité de circuler de manière sûre et économique sur les appareils de voie.

L'interaction géométrique de contact s'intéresse aux différents aspects du comportement des véhicules dans les différents tracés de pleine voie (sans point de contrainte tel que les appareils de voie, etc.). Les mécanismes qui résultent du contact entre les roues et les rails, ainsi que les caractéristiques dynamiques des véhicules et de leurs organes de roulement, sont déterminants pour l'évolution de l'usure des roues et des rails et pour la stabilité des véhicules dans toutes les plages de vitesse. La mécanique de contact, associée aux nuances d'acier utilisées et aux coefficients de frottement, fournit avant tout des indicateurs sur les forces, l'usure et les défauts de la roue et du rail.

Les mécanismes impliqués dans l'interaction véhicule - voie ferrée ou roue - rail peuvent être de nature statique ou dynamique. Pour les mécanismes dynamiques, il faut distinguer l'interaction véhicule - voie d'une part et l'interaction roue - rail d'autre part. Selon les masses et leurs propriétés structurelles, les effets de l'interaction se manifesteront dans différentes plages de fréquences ou de longueurs d'ondes. La sécurité de circulation, le comportement dynamique et le confort de marche se situent dans la plage des basses fréquences, jusqu'à environ 20 Hz. En conséquence, les effets des masses impliquées dans le véhicule et la voie ferrée se feront sentir dans la plage des basses fréquences et longueurs d'onde (défauts géométriques de la voie avec des longueurs d'onde comprises entre 3 m et 25 m).

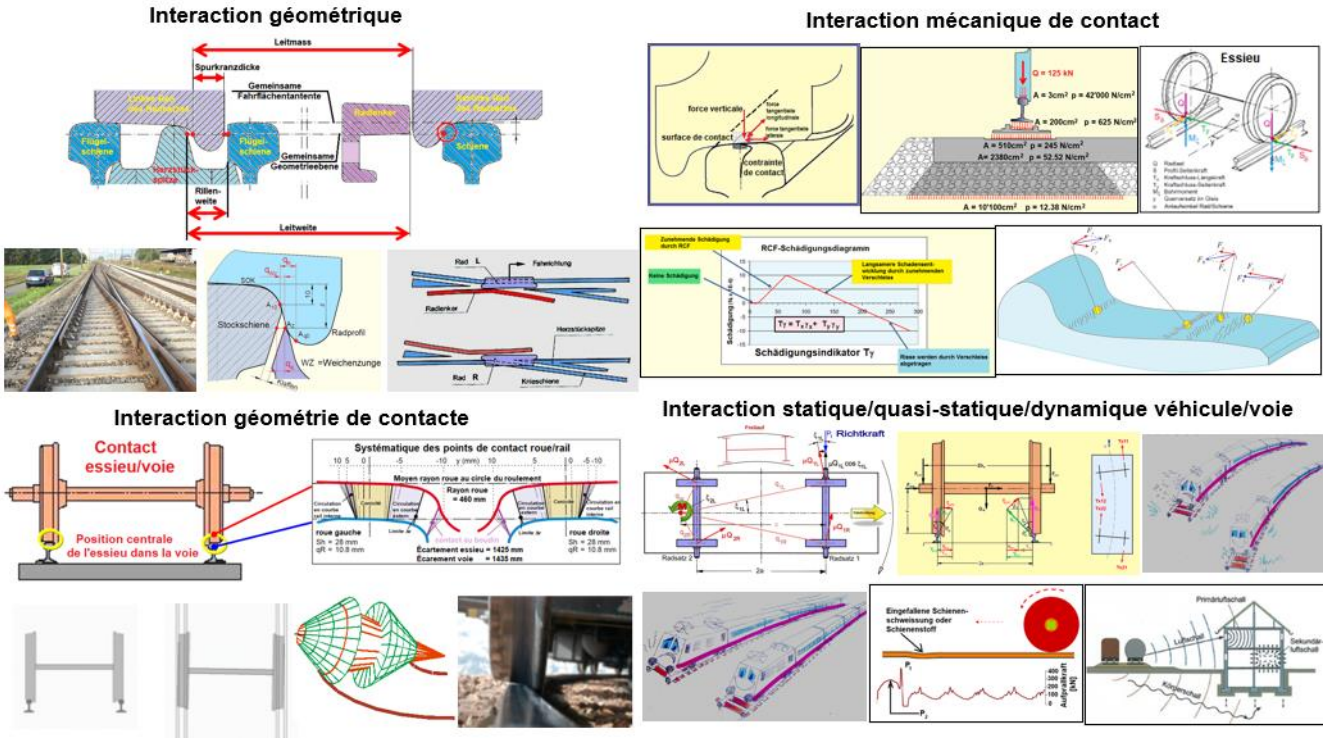

Figure 9: Les quatre principaux types d'interaction véhicule - voie (collection R. Müller)

Les principes du comportement de guidage et de portance des véhicules dans la voie sont basés sur

- les rapports de contact des surfaces de roulement des roues sur les surfaces de roulement des rails et les forces et moments qui s'y développent
- le guidage des essieux dans la voie
- la transmission des forces des essieux aux rails et aux organes de roulement des véhicules
- la transmission des forces et des couples des organes de roulement aux essieux
- la transmission des forces et des moments de la caisse du véhicule aux organes de roulement

Lors du guidage et du support des véhicules dans la voie, on peut distinguer les comportements statiques, quasi-statiques et dynamiques. Les notions relatives aux différents comportements sont abordées dans les modules de formation sur la technique de roulement, car elles nécessitent des connaissances sur les méthodes d'évaluation statistique.

Ces trois comportements différents sont traités à l'aide d'accélérations, de déplacements et de forces, en tenant compte de différentes méthodes d'évaluation.

Trois types de vérification différents sont effectués lors de l'homologation technique des véhicules (Figure 10).

- Contrôle des paramètres du véhicule pertinents pour la circulation sert à l'évaluation grossière des caractéristiques de construction (paramètres du véhicule les plus importants pour le comportement dynamique).
- Vérification de l'aptitude à la circulation à l'aide d'essais stationnaires (statiques)
- Vérification du comportement de circulation en ligne (quasi-statique et dynamique)

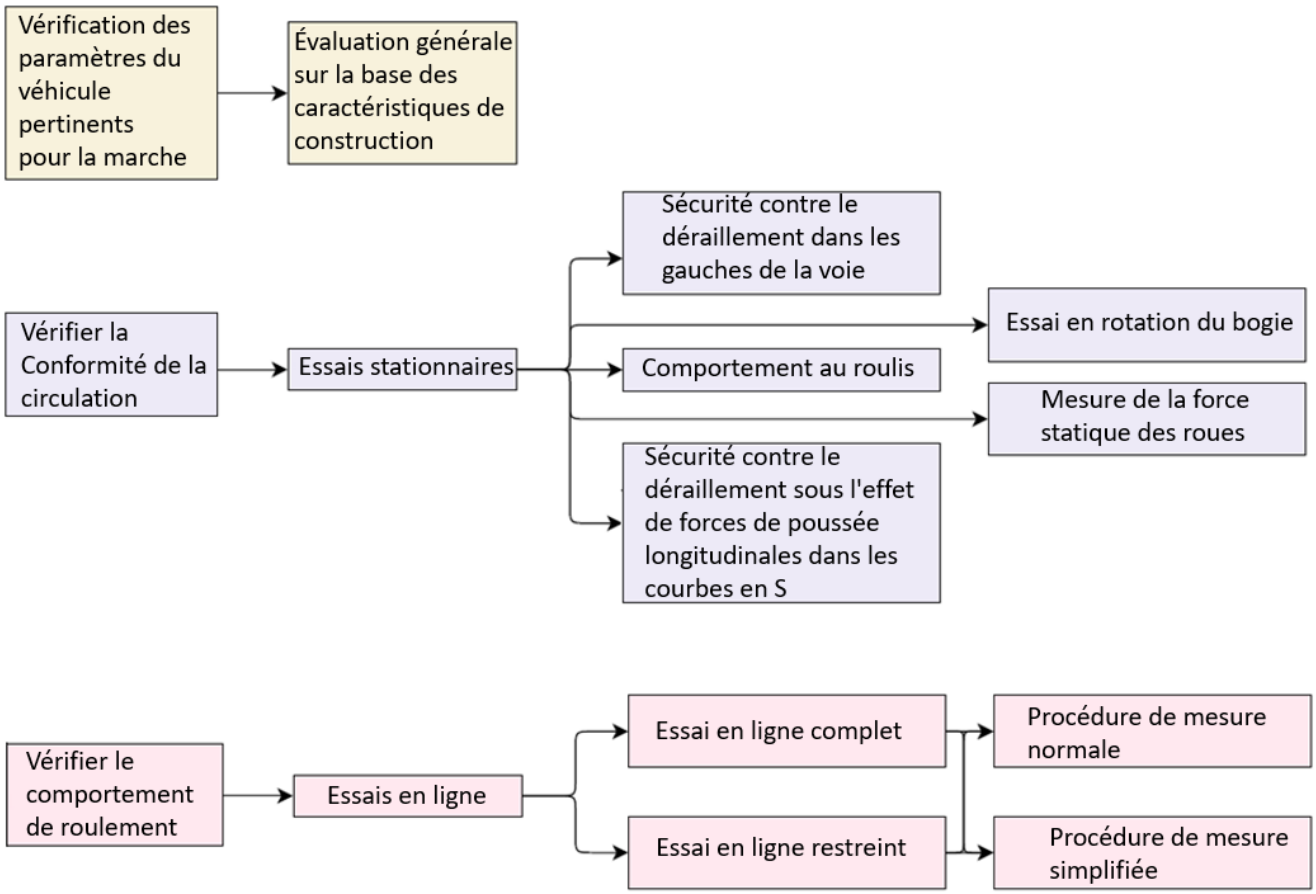

Figure 10: Distinction entre les différents types d'essais pour l'homologation des caractéristiques dynamiques des véhicules selon EN 14363

Figure 11 de la norme EN 14363 divise les essais pour le comportement quasi-statique et dynamique lors de l'homologation des véhicules en 4 plages d'essai, conformément à ce mode de comportement. Le R RTE 29001 prend en outre en compte une 5e plage d'essai avec les très petits rayons de la voie normale suisse (selon CFF R I-50127, R<250m). Il en ressort que dans les faibles rayons avec les vitesses faibles qui y sont applicables, les forces quasi-statiques sont élevées et les parts dynamiques diminuent. Plus le rayon est grand et en conséquent plus la vitesse est élevée, plus les composantes quasi-statiques sont faibles et plus les parts dynamiques sont importantes.

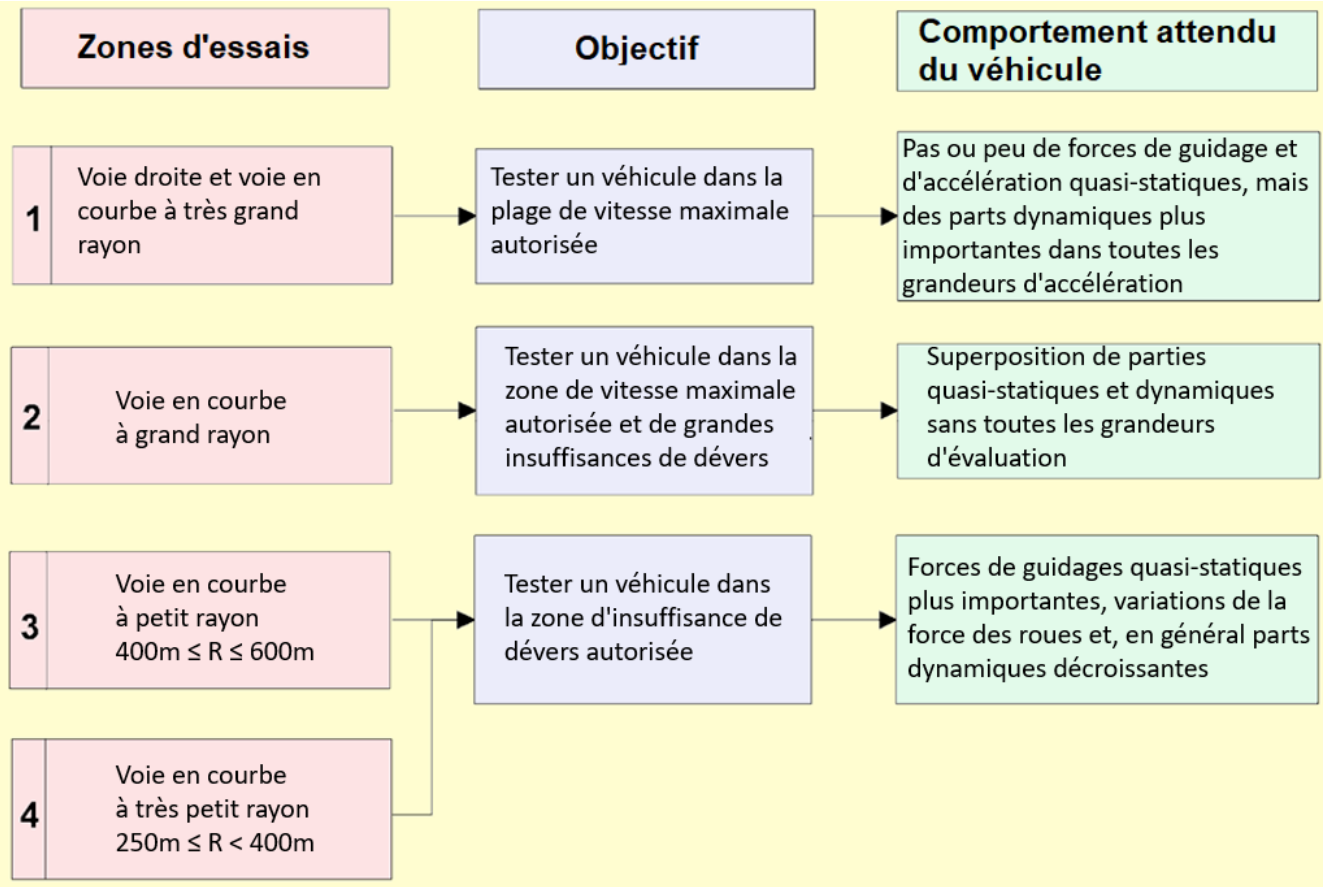

Figure 11: Plage de tracé et comportement des véhicules qui y sont attendus selon EN 14363

Figure 12 présente les méthodes de vérification et les grandeurs d'évaluation pour la sécurité de circulation et la sollicitation de la voie ferrée lors de l'interaction véhicule - voie ferrée. Plusieurs conditions sont nécessaires pour les vérifications par calcul présentées ici :

- Modèles pour les véhicules et la voie
- Domaines d'application avec leurs caractéristiques de ligne
- Profils nominaux des roues et des rails
- États d'usure des profils de roue
- États d'usure des profils de rail, s'ils varient entre les différentes plages de tracé
- Écarts de position de la voie (verticaux, latéraux, nivellement longitudinal), s'ils sont différents pour les différentes plages de tracé
- Coefficients de frottement dans les différentes zones de contact roue/rail (si différent par exemple de l'EN 14363)

Calculs de vérification	Critères d'appréciation		1	2	3	4	5	6	7	8	9
			Amortissements propres, amortissements résiduels, vitesse critique	Fréquences propres, vecteurs propres	Niveaux d'effort		Qualité, confort de marche		Amplitudes de déplacement	Caractéristiques d'usure	Sécurité contre le déraillement
					Latéral	Vertical	Latéral	Vertical			
1	Comportement en alignement	Comportement propre (cycles limites)	x	x	(x)		(x)		(x)		
2		Réponse dynamique aux défauts de la voie discontinus	(x)	(x)	x	x	x	x	x		
3	Comportement quasi-statique	En courbe			x	x			x	x	
4		Dans la contre-courbe			x	x			x		
5	Franchissement des gauches de la voie										x

Figure 12: Etablissement des vérifications pour l'interaction véhicule - voie ferrée (calcul et essai, collection R. Müller issue des travaux de l'ORE SVA B176)

3.2 Rails

Situation:

En raison du manque de disponibilité des rails chez les fournisseurs, les chemins de fer à voie métrique utilisent principalement le profil de rail 46E1 en lieu et place du profil de rail VST36. Certains chemins de fer utilisent le profil de rail 54E2 sur les sols meubles et dans les appareils de voie. Dans le trafic d'agglomération (tramway), le profil de rail à gorge Ri60 est majoritairement utilisé.

En ce qui concerne la dureté des rails, les chemins de fer utilisent principalement deux nuances d'acier: une partie utilise des rails d'une dureté de 260, une autre des rails d'une dureté de 350HT. Certains chemins de fer avec des charges par essieu élevées et des petits rayons utilisent comme standard des rails 400HT. Pour éviter des changements fréquents de nuance d'acier, de nombreux chemins de fer ont pour stratégie de n'utiliser qu'une seule nuance d'acier.

Défauts:

Les principaux défauts des rails des chemins de fer à voie métrique sont les usures ondulatoires et l'usure. Comme la différence entre usures ondulatoires à ondes courtes et longues est souvent méconnue chez les chemins de fer, les principaux défauts sont décrits ci-dessous conformément à l'EN 17397-1:

Usures ondulatoires à ondes courtes 2201 Codification selon EN 17397-1 Gestion des défauts de rails

«L'ondulation à faible tangage est causée par des mécanismes d'usure dus à l'interaction train-voie dynamique qui dépend des propriétés de rigidité du système voie/véhicule. L'ondulation à faible tangage se caractérise par une série quasi-régulière de dépressions dans la surface de roulement, qui forment une succession de crêtes brillantes et de creux sombres. Le pas entre les crêtes varie généralement entre 10 mm et 100 mm. L'ondulation à faible tangage peut apparaître à n'importe quel endroit.[2]»

Chez les chemins de fer à voie métrique, les usures ondulatoires à ondes courtes ont une longueur d'onde de 2 à 8 cm et une profondeur de 0.01 à 0.4 mm. Elles apparaissent sur les deux rails en ligne droite ou dans les courbes à grands rayons. Les usures ondulatoires à ondes courtes se forment par glissement d'adhérence et se trouvent généralement dans la zone d'accélération/décélération.

Figure 13: Usures ondulatoires à ondes courtes – 2201

Usures ondulatoires à ondes longues 2202 Codification selon EN 17397-1 Gestion des défauts de rails

«Les usures ondulatoires à ondes longues sont causées par les charges roulantes et se développent sous l'effet des facteurs suivants:

- rayon de courbure
- insuffisance/excès de dévers de la voie
- nuance d'acier
- caractéristiques de frottement
- caractéristiques des véhicules.

Une usure ondulatoire à ondes courtes et à ondes longues se caractérise par une série de dépressions dans la surface de roulement, qui sont plus ou moins prononcées et irrégulières par rapport au profil rectiligne idéal.

Le pas varie généralement entre 30mm et 1000mm.

L'usure ondulatoire à ondes longues affecte généralement la file basse des voies en courbes et en alignement. [2]»

Chez les chemins de fer à voie métrique, les usures ondulatoires à ondes longues ont une longueur d'onde de 5 à 30 cm et une profondeur d'environ 0.1 à 1 mm. Elles se produisent principalement sur le rail intérieur dans les courbes étroites de moins de 250 m. Les usures ondulatoires à ondes longues sont dues au mouvement relatif entre la roue intérieure et la roue extérieure dans les courbes.

Figure 14: Usures ondulatoires à ondes longues sur le rail en intérieur de courbe

Usure latérale excessive (Chanfreinage) 2203 Codification selon EN 17397-1 Gestion des défauts de rails

« L'usure latérale est causée par les frottements entre la roue et le rail à la suite des choix de conception (trafic mixte).

L'évolution de l'usure latérale dépend des facteurs suivants :

- le rayon de courbure
- l'insuffisance/l'excès de dévers de la voie
- la nuance d'acier
- la qualité du graissage
- l'écartement des roues des véhicules.

L'usure latérale excessive constitue un défaut à partir du moment où:

- il est nuisible à la maintenance des voies (surécartement excessif)
- il est susceptible de provoquer une rupture par affaiblissement du profil (atteinte du congé inférieu du champignon)
- il affecte négativement la géométrie de contact à un point tel que la fatigue de contact de roulement
- augmente de façon significative.

L'usure latérale excessive (chanfreinage) des rails généralement situés sur les files hautes des courbes de petit rayon résulte des frottements roue/rail.

Ce défaut peut se produire alternativement sur les deux rails en lignes droites, sous l'effet du comportement «suiveur» des véhicules.[2]

Figure 15: Usure latérale excessive – 2203

Usure verticale excessive 2204 Codification selon EN 17397-1 Gestion des défauts de rails

«L'usure verticale excessive est causée par les charges roulantes et par l'emploi d'une nuance d'acier inadéquate par rapport au trafic.

Elle s'accentue sous l'effet des charges et du reprofilage du rail.

Ce défaut affecte généralement la file basse des courbes de faible rayon à la suite d'un choix de conception.

À ne pas confondre avec l'écrasement (223).[2]»

Figure 16: usure verticale excessive – 2204

Connaissance:
Lors du choix de la dureté des rails, la question se pose de savoir dans quelle mesure les rails durs favorisent l'usure des roues. Chez les chemins de fer européens, les roues sont généralement moins dures que les rails. Ce sujet a déjà fait l'objet d'études et de présentations en 2015 chez les chemins de fer à voie normale, p.ex. lors du congrès international des véhicules ferroviaires à Dresde. [3] .

En principe, il a été démontré chez les chemins de fer à voie normale que les rails plus durs provoquent moins de défauts sur les surfaces de roulement des rails et que, par conséquent, les roues présentent également moins d'usure et de dommages dus à la fatigue des contacts de roulement. Cela signifie qu'il y a moins de frais d'entretien (non planifiés) et que les durées de vie sont plus longues pour les deux partenaires de contact.

Le projet de recherche Interaction matériel roulant - voie ferrée de la maîtrise de système RAILplus étudie plus précisément dans quelle mesure cela peut être transposé aux chemins de fer à voie métrique, avec leurs rayons de courbure très faibles par rapport à ceux des chemins de fer à voie normale.

En ce qui concerne l'usure, différentes études menées chez les chemins de fer à voie normale ont montré que les rails plus durs présentent une usure nettement plus faible pour les mêmes conditions de sollicitation. Ceci est également confirmé par l'expérience de différents chemins de fer à voie métrique. L'usure peut être massivement réduite par l'utilisation de rails de dureté Brinell 350HT au lieu de rails de dureté Brinell 260. La réduction de l'usure des rails de dureté Brinell 400HT par rapport à ceux de dureté Brinell 350HT est estimée à environ 25% sur la base des expériences faites chez les chemins de fer à voie métrique. En outre, la formation d'usures ondulatoires dans les courbes étroites est également fortement réduite par l'utilisation de rails avec champignon trempé (350HT et 400HT) (p.ex. courbe d'essai RhB).

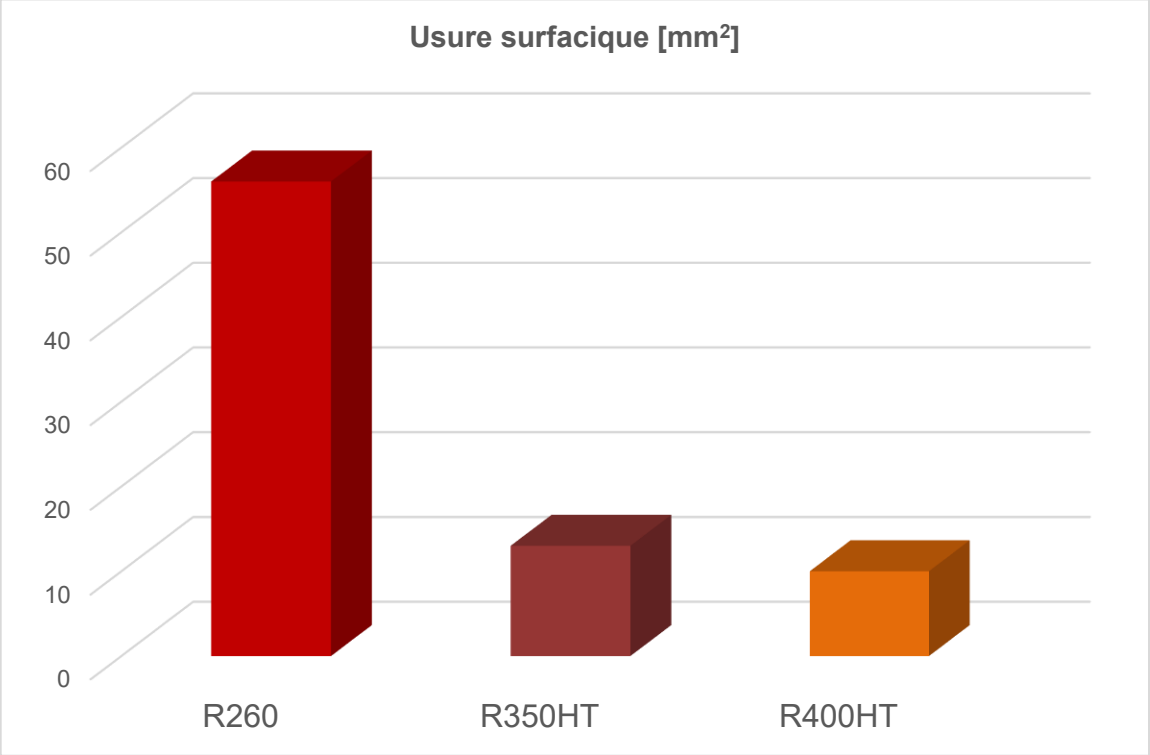

Figure 17: Influence de la dureté de l'acier sur l'usure des rails

Il faut juste noter que les aciers à haute résistance sont plus sensibles à l'entaillage et aux sollicitations thermiques (glissement élevé dû à la traction et au freinage). Il en résulte un risque plus élevé de formation de fissures sur les surfaces de roulement des rails. L'absence ou la réduction de l'usure entraîne la progression des fissures et, par conséquent, la rupture des rails.

Recommandations:
En particulier lorsque les charges de trafic sont élevées, la croissance des usures ondulatoires et l'usure peuvent être considérablement ralenties par l'utilisation d'aciers des rails à plus haute résistance dans les courbes étroites.

Soudage:
L'enquête chez les chemins de fer à voie métrique montre que la quasi-totalité des compagnies soudent les rails en continu. Des rayons allant jusqu'à 40 m sont indiqués.

Chez les chemins de fer, on constate en outre que les joints isolants cèdent de plus en plus souvent la place à des compteurs d'essieux en raison du changement de système chez les installations de sécurité.

3.3 Semelles sous rail et fixations

Les semelles sous rail (Zw) sont placées directement sous le patin du rail et ont pour fonction d'éviter une détérioration des traverses par des pressions de contact trop élevées. Dans le cas des traverses en béton, elles doivent empêcher l'éclatement de la surface de béton dans la zone de contact. Par le passé, les semelles sous rail étaient très rigides, avec un module d'élasticité statique de 500 - 1000 kN/mm, pour remplir cette fonction. La pose de semelles sous rail plus souples et hautement élastiques permet d'apporter une élasticité supplémentaire à la superstructure à ce niveau, afin d'amortir et d'atténuer les vibrations à haute fréquence et de prévenir la formation d'usures ondulatoires sur la surface du rail. Plus le débattement admis est important, plus la déflexion du rail lié à l'élasticité est grande et donc plus la charge est répartie sur plusieurs traverses. Pour une augmentation notable de l'élasticité verticale totale de la superstructure, un module d'élasticité statique de la semelle sous rail de 25 à 100 kN/mm est nécessaire. Dans les courbes, les forces latérales dues à la circulation des trains entraînent toutefois de très grandes déflexions latérales du champignon du rail. Cela est particulièrement problématique dans les très petits rayons. C'est pourquoi il faut utiliser dans ce cas des crampons élastiques plus puissants, R RTE 22540 [4]. Afin d'éviter un déversement important des rails et de protéger les semelles sous rail d'une sollicitation excessive due à des tensions élevées aux extrémités, les systèmes de fixation des rails comportent désormais une protection intégrée contre le déversement, afin d'éviter une surcharge du crampon élastique dans les cas de charge extrêmes. Cela vaut en particulier pour le profil de rail 54E2, dont le rapport entre la hauteur du rail et la largeur du patin de rail est plutôt défavorable lors de charges latérales. Si les forces horizontales dues aux forces de guidage sont nettement plus importantes que dans le cas normal, le point d'application de la charge se situe en dehors de la semelle sous rail, ce qui peut entraîner des déformations extrêmes et, finalement, des ruptures de crampons élastiques. Le déplacement latéral du patin du rail est alors responsable de la rupture. Chez la voie normale, ce phénomène peut être constaté dans les rayons inférieurs à 200 mètres. Etant donné que les forces de guidage en courbe devraient être nettement plus faibles chez les chemins de fer à voie métrique en raison des charges par essieu plus faibles, ce phénomène ne devrait plutôt pas se produire, l'auteur n'a du moins pas connaissance à ce jour de cas de ruptures de crampons élastiques dans des courbes étroites.

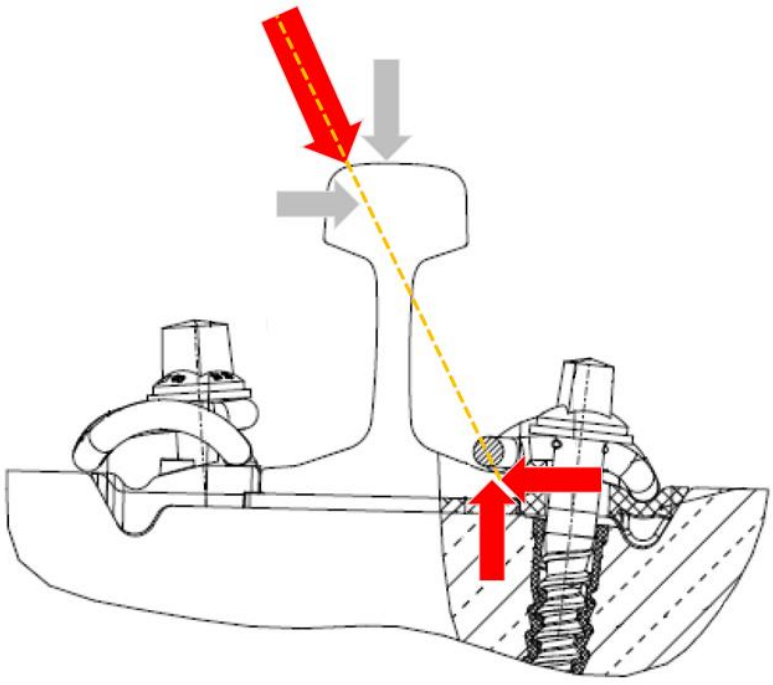

Figure 18: Equilibre des forces fixation des rails Source: Stefan Werner, KPZ Fahrbahn

La plupart des chemins de fer utilisent des semelles sous rail rigides d'une rigidité de 700 kN/mm. Quatre chemins de fer utilisent, sur les traverses en béton, des semelles sous rail souples d'une rigidité de 85 ou 100 kN/mm dans le but de réduire la formation d'usures ondulatoires dans les courbes étroites.

Comme une augmentation du bruit a été constatée lors de l'utilisation de semelles sous rail plus souples, certains chemins de fer ont opté pour la pose de semelles sous rail moyennement rigides d'une rigidité de 200 kN/mm. Des mesures du taux d'atténuation de la voie chez la voie normale avec profil de rail 54E2 ont montré que celui-ci se situe en-dessous de la courbe limite selon EN ISO avec des semelles sous rail souples (c_{stat} ≈ 100 kN/mm) en combinaison avec Skl14 et celles-ci ne satisfont donc pas la norme. Il en résulte du bruit supplémentaire par rapport à une semelle sous rail rigide en combinaison avec Skl14. Dans le cadre d'une étude pas encore achevée chez le SOB, l'influence du crampon élastique sur le taux d'atténuation a été examinée. Si la force de pression est augmentée par l'utilisation d'un crampon élastique pour charges lourdes (ici SL1 de la société Schwihag), la combinaison semelle sous rail souple et SL1 répond à la norme. Tous les taux de décroissance en tiers d'octave se situent au-dessus de la courbe limite. Il n'a pas encore été étudié si l'utilisation d'une Skl21 en combinaison avec des semelles sous rail souples constitue également une amélioration en termes d'émissions sonores pour la voie métrique.
Tous les genres de pose avec les fixations correspondantes sont décrits et présentés dans le D RTE 22540 au point 6.5.

Recommandation:
La dureté de la semelle sous rail est déterminée d'une part par les exigences posées à la voie, à savoir un faible niveau de bruit ou d'usure, et d'autre part par l'élasticité globale. De nouveaux produits disponibles sur le marché, qui tentent de répondre à plusieurs exigences, donnent de bons résultats chez les chemins de fer à voie normale. Dans ce domaine, il existe encore des lacunes de connaissances chez les chemins de fer à voie métrique, qui doivent être comblées par le projet de recherche.

3.4 Traverses

Situation:
Chez les chemins de fer à voie métrique, les traverses en béton tendent à remplacer les traverses en bois. Sur les lignes à crémaillère, les traverses en acier sont le standard.

Les traverses en bois synthétique FFU ont déjà été utilisées pour remplacer des traverses en bois sur des ponts et lorsque le terrain naturel est géologiquement mauvais.

Selon l'enquête, aucune traverse en plastique n'a été posée.

Lors du passage de traverses en bois à des traverses en béton, on constate souvent une augmentation des émissions sonores, notamment des crissements en courbe.

Défauts:
La plupart des défauts des traverses en bois sont dus à l'âge : les vieilles traverses en bois présentent des fissures importantes, sont parfois fortement déformées, de sorte que l'écartement des voies est réduit, et il y a des fixations desserrées. Les traverses en acier peuvent subir une forte corrosion due au sel, notamment à proximité des routes, ce qui entraîne souvent des fissures.

Connaissances:
L'UE a déjà interdit l'utilisation de la créosote pour l'imprégnation des traverses en bois, et il est probable que la Suisse suive cette décision. Il n'existe actuellement aucune alternative à la créosote cancérigène. Les traverses en bois non imprégnées n'ont qu'une courte durée d'utilisation et ne sont donc pas économiques.

Les traverses en béton, trois fois plus lourdes, présentent une meilleure stabilité par rapport aux traverses en bois, et leur poids entraîne moins de forces dynamiques dans le corps de la voie. Cependant, en raison des charges plus élevées sur la couche de base, il est nécessaire de disposer d'une bonne infrastructure.

Afin d'améliorer la répartition des charges sur la surface de la couche de base, il est recommandé d'utiliser des éléments élastiques supplémentaires (semelles sous rail souples, semelles sous traverse, ...).

Selon le R RTE 22541, une respiration latérale régulière de 20 mm est autorisée dans les rayons < 200 m. Dans la pratique, il s'est avéré que la respiration n'est en règle générale pas régulière. Pour une respiration homogène, une rigidité de cadre élevée est nécessaire. Les traverses en Y présentent une rigidité de cadre élevée grâce au treillis formé entre les rails, ce qui entraîne une respiration régulière en courbe et, par conséquent, moins d'écrasement de la voie. Dans la pratique, le maintien du dévers avec les traverses en Y peut toutefois entraîner des problèmes géométriques de la voie.

Les traverses en béton présentent une résistance latérale élevée par rapport aux autres traverses. Celle-ci peut encore être augmentée par l'utilisation de semelles sous traverses. En outre, il est possible d'installer des bêches de sécurité dans les petits rayons.

Le fait de peindre les rails en blanc peut aider dans certaines situations (env. -5° C de température des rails) à démontrer une résistance latérale suffisante, mais ne résout pas les problèmes fondamentaux d'écrasement des rails.

Chez la plupart des chemins de fer à voie métrique, l'inclinaison des rails est de 1:20, certains chemins de fer obtiennent de bons résultats en termes d'usure avec une inclinaison de 1:40. Un changement d'inclinaison des rails peut entraîner une usure importante, il est important que les bandages de roues soient adaptés à l'inclinaison des rails.

Recommandation:
Pour obtenir une voie géométriquement stable avec une bonne résistance latérale au long terme, une bonne infrastructure est recommandée en cas d'utilisation de traverses en béton.
Le projet de recherche en cours vise à déterminer dans quelle mesure les traverses en béton modifient la fréquence propre de la superstructure en ce qui concerne le bruit et quelle est l'inclinaison optimale des rails en relation avec les bandages.

3.5 Semelles sous traverse

Situation:
Actuellement, les semelles sous traverses sont encore peu utilisées chez les chemins de fer à voie métrique et ce uniquement dans le cadre d'essais. Là où des semelles sous traverse sont utilisées, il s'agit de semelles rigides.

Connaissances:
Module d'élasticité
Sur les lignes principales existantes avec une superstructure ballastée conventionnelle (superstructure, traverse B 70), le module d'élasticité est de $C_{Infrastructure}$ = 0.10 N/mm^3, ce qui permet d'obtenir une flexion du rail (affaissement) de 1.0 – 1.2 mm sous une force d'essieu de 200 kN [5]. Un effet de répartition de la charge encore meilleur est obtenu avec un module d'élasticité de C_{Total} = 0.05 N/mm^3 [6]. L'utilisation de semelles sous traverse n'est pas judicieuse dans le cas d'une infrastructure à faible portance ($C_{Infrastructure}$ < 0.05 N/mm^3); autrement dit, l'infrastructure (ballast et terrain naturel) doit présenter un module d'élasticité de $C_{Infrastructure}$ > 0.05 N/mm^3. Dans le cas d'une infrastructure en béton et en ballast ou sur des nouveaux tronçons, le module d'élasticité augmente jusqu'à plus de 0.35 N/mm^3 [7]. Dans ce cas, il est possible de poser des semelles sous traverses plus souples. En utilisant la formule pour les ressorts en série,

$$\mathbf{1/C_{Total} = 1/C_{Infrastructure} + 1/C_{Semelle} + (1/C_{Zw} \sim 0)} \qquad \text{(Equation 1)}$$

on peut déterminer la rigidité minimale des semelles sous traverses de manière que le module d'élasticité minimal admissible C_{Total} = 0.05 N/mm^3 (sans fixation élastique des rails, c.-à-d. $1/C_{Zw} \sim 0$) ne soit pas dépassé lors de l'utilisation de semelles sous traverses.

Le comportement à la déformation des couches sous la traverse peut également être décrit par le module d'élasticité C = P/s à partir de la charge P et de la déflexion élastique s. Le Tableau 2 ci-dessous contient des valeurs indicatives pour les modules d'élasticité C dans l'infrastructure/le terrain naturel en fonction de la qualité de portance. Il faut en tenir compte si l'utilisation d'éléments élastiques péjore le module d'élasticité.

Qualité de portance	**Infrastructure/Terrain naturel**	**Module d'élasticité C [N/mm³]**
Très mauvaise	Argile souple, Sols organiques, sable à grains légers	< 0.05
Mauvaise	Argile semi-solide liée, limon, sable meuble	≥ 0.0.5
Bonne	Gravier argileux et sableux	≥ 0.10
Très bonne	Grave, couche de protection	≥ 0.15
Dalle en béton	Ponts, Tunnels, Voie sans ballast	≥ 0.30

Tableau 2: Valeurs indicatives pour le module d'élasticité en fonction de la qualité de portance

Utilisation de semelles sous traverses

Pour garantir la disponibilité des lignes en limitant les frais d'entretien, il est nécessaire de disposer de composants de superstructure de haute qualité. Après l'utilisation de nuances d'aciers du rail plus élevées et de traverses en béton précontraint, le ballast constitue le maillon faible de la voie ferrée. L'utilisation de semelles sous traverses, fabriquées en élastomère et fixées sur toute la surface inférieure de la traverse, permet de préserver le ballast. La préservation du ballast s'explique essentiellement par deux effets. D'une part, par une augmentation de la surface de contact entre la face inférieure de la traverse et la couche supérieure de ballast et, d'autre part, par une prolongation de la ligne de flexion. Pour augmenter considérablement la surface de contact, il faut des semelles sous traverses plastiques qui permettent d'enrober les grains de ballast en les ménageant au maximum. En revanche, pour une répartition idéale des charges sur la voie grâce à une prolongation de la ligne de flexion, des semelles sous traverses très élastiques sont optimales. Indépendamment des propriétés des matériaux mentionnées ci-dessus, les semelles sous traverses contribuent généralement à une voie plus homogène avec moins de traverses "dansantes". Un résumé des principaux domaines d'application est présenté dans le Tableau 3.

Domaines d'application des semelles sous traverse	**Type de semelle**		
	Souple	**Moyen**	**Rigide**
Amélioration de la qualité géométrique de la voie		■	■
Appareils de voie	■	■	■
Zones de transition		■	■
Zones avec épaisseur de ballast réduite		■	■
Ralentissement de formation d'usures ondulatoires		■	■
Réduction du bruit solidien	■	■	

Tableau 3: Cas d'application principaux pour semelles sous traverses [8]

En Suisse, on utilise aujourd'hui exclusivement des semelles rigides sur les voies à écartement métrique, car elles ont déjà prouvé à plusieurs reprises leur aptitude à l'utilisation sur les voies à écartement normal et sont homologuées. Les fabricants de ces semelles rigides sont Tiflex, Paul-Müller et Getzner Werkstoffe. Chez le RhB, une première utilisation de semelles élastiques dans le domaine de la voie métrique est probablement prévue en 2023 dans le cadre d'un test d'exploitation accompagné et surveillé par le KPZ Fahrbahn.

La classification des semelles sous traverses selon leur module d'élasticité statique peut être consultée dans le Tableau 4. Les valeurs présentées se réfèrent toutefois à des résultats de mesure avec des paramètres d'essai de la voie normale. Pour la voie métrique, seules les fiches techniques de Getzner présentent des valeurs adaptées.

Type de semelle sous traverse	Module d'élasticité statique C_{stat}
Rigide	0.25 N/mm³ ≤ C_{stat} < 0.45 N/mm³
Moyen	0.15 N/mm³ ≤ C_{stat} < 0.25 N/mm³
Souple	0.08 N/mm³ ≤ C_{stat} < 0.15 N/mm³
Très souple	C_{stat} < 0.08 N/mm³

Tableau 4: Classification des modules d'élasticité statique des semelles sous traverse [8]

Influence des semelles sous traverse sur le module d'élasticité

En utilisant la formule pour les ressorts en série selon Équation 1, le module d'élasticité minimal admissible C_{Total} = 0.05 N/mm³ (sans fixation élastique du rail, c.-à-d. $1/C_{Zw} \sim 0$) est respecté en utilisant des semelles sous traverses avec une rigidité minimale suivante:

Infrastructure	**Module d'élasticité de l'infrastructure** $C_{infrastructure}$ [N/mm³]	**Module d'élasticité minimal des semelles sous traverses** $C_{semelle}$ [N/mm³]	**Module d'élasticité minimal du système global** C_{total} [N/mm³]
Ballast et terrain naturel (faible portance)	≤ 0.05	Pas de pose	0.05
	0.06	≥ 0.30	
Ballast et terrain naturel (bonne portance)	0.10	≥ 0.10	
Ballast et terrain naturel (très bonne portance)	0.15	≥ 0.08	
Nouveau tronçon ou ballast sur dalle en béton (p.ex. ponts, tunnels)	0.35	≥ 0.058	

Tableau 5: Module d'élasticité minimal des semelles sous traverse en fonction de l'infrastructure (Leykauf G. [5])

Les semelles sous traverses sont une évolution de la superstructure ferroviaire classique et ont été utilisées pour la première fois à titre d'essai en 1996 pour préserver le ballast sur le réseau des ÖBB. Les matériaux élastiques sont appliqués directement sous la traverse. Les semelles peuvent être soit insérées directement dans le béton frais lors de la fabrication des traverses, soit collées ultérieurement sur la face inférieure. L'utilisation de semelles sous traverses apporte une élasticité supplémentaire et durable à la superstructure, ce qui prolonge la durée de vie du ballast et les intervalles de bourrage. Les semelles sous traverses élastiques permettent un affaissement plus important des rails sous la charge des roues du train et, par conséquent, une prolongation de la ligne de flexion des rails, ce qui permet d'améliorer la répartition de la charge sur plusieurs traverses. Le prolongement de la ligne de flexion permet de réduire la force d'appui et donc la pression du ballast sous la traverse.

Mode d'action des semelles rigides plastiques

Pour que la couche supérieure de ballast puisse être enrobée de la semelle, la semelle sous traverse doit présenter une certaine plasticité. Les types SLB (SLB 3007 et SLB 2210) appartiennent à la catégorie des semelles sous traverses plastiques. Cet enrobage a également un effet très positif sur la résistance latérale dans la voie. Comme l'ont montré des études du KPZ Fahrbahn, la résistance latérale est plus élevée avec les semelles sous traverses que sans cette possibilité d'enrobage. La résistance latérale plus élevée réduit le risque de déjettements de la voie en été et conduit à une respiration en courbe plus régulière avec moins de dispersion. Pour les semelles plastiques, la surface de contact efficace avec le ballast a été déterminée dans diverses études avec une proportion de l'ordre de plus de 25 %. Sans les propriétés plastiques des semelles, les surfaces de contact sont en général beaucoup plus faibles. Figure 19 présente une comparaison des surfaces de contact sans semelles, avec semelles EVA et PUR (même rigidité) ainsi que la contrainte de contact avec le ballast qui en résulte.

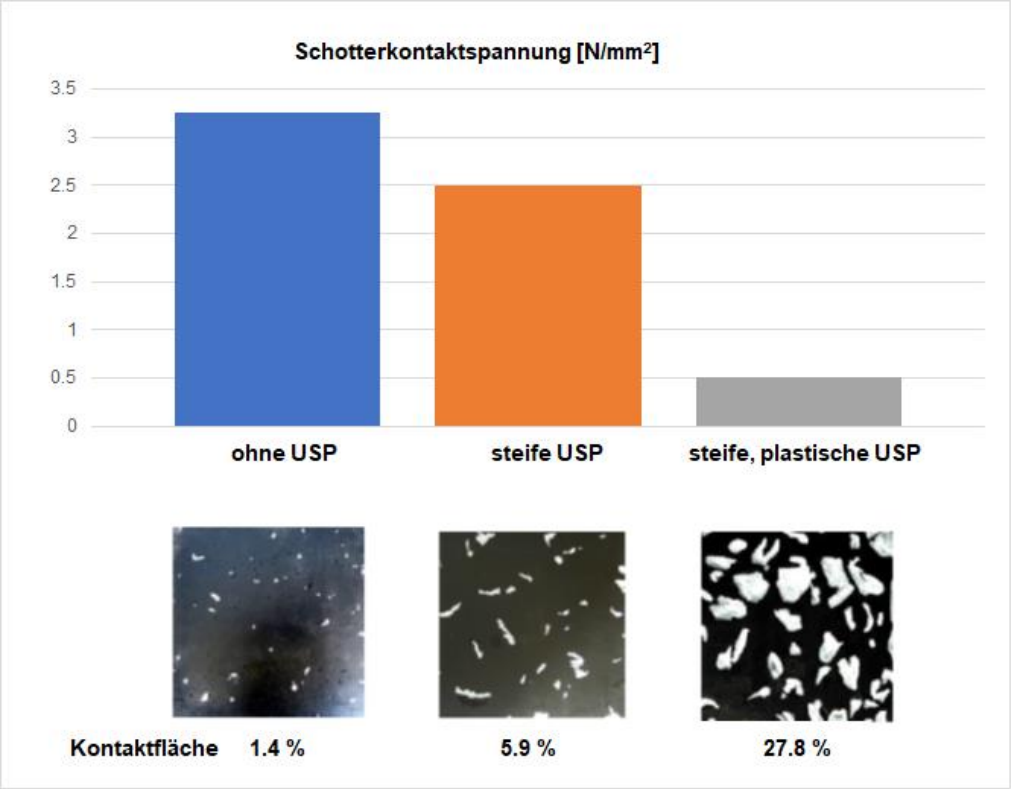

Figure 19: Contrainte de contact du ballast en fonction de la surface de contact

L'utilisation de semelles sous traverses plastiques est fortement recommandée, en particulier dans les courbes étroites et sur les lignes très fréquentées en général, afin de préserver le ballast et d'améliorer le LCC. Le bruits solidien et les vibrations ne sont toutefois pas réduits avec des types de semelles rigides, indépendamment de leurs propriétés plastiques. Pour ce domaine d'application, il faut utiliser des produits hautement élastiques.

Mode d'action des semelles élastiques

Les semelles sous traverses représentent une possibilité peu coûteuse lorsqu'il s'agit d'augmenter l'élasticité de la superstructure. Elles sont placées comme éléments élastiques supplémentaires entre la traverse et le ballast. Grâce à la couche élastique supplémentaire, la ligne de flexion est prolongée, ce qui permet d'activer davantage de traverses pour le transfert de charge (voir Figure 20). Comme on peut le voir, sans semelles, la charge des roues est transférée dans le ballast sur cinq traverses, alors qu'avec une semelle élastique, sept à huit traverses sont activées. Ainsi, la force maximale par point d'appui sous la charge de la roue est nettement réduite, ce qui contribue à préserver le ballast. A long terme, on peut également s'attendre à moins de traverses dansantes, ce qui permet d'obtenir une voie plus homogène. Le taux de détérioration est nettement inférieur à celui d'une voie sans semelles. Les cycles de bourrage peuvent ainsi être prolongés, ce qui se traduit par des coûts LCC plus faibles, tout en assurant une disponibilité plus longue de la voie.

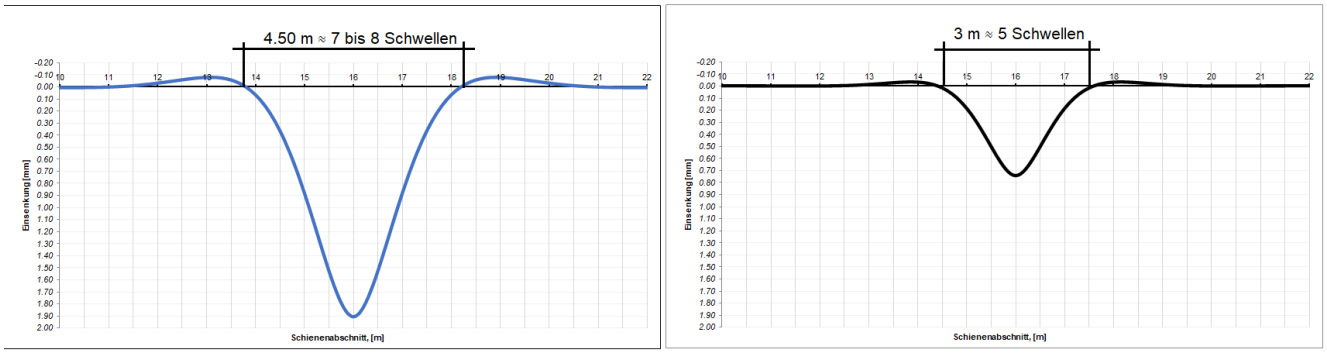

Figure 20: Ligne de flexion sous charge unique avec (bleu) et sans (noir) semelles sous traverses élastiques

Avec des semelles hautement élastiques, les traverses sont en outre dynamiquement découplées du lit de ballast. Pour réduire les émissions de bruit solidien et les vibrations dans les bâtiments, les semelles sous traverses constituent donc une alternative avantageuse aux tapis sous ballast (dans la plage de fréquence supérieure à 50 Hz). L'influence des semelles sous traverses hautement élastiques sur les émissions sonores n'a pas encore été suffisamment testée. Des recherches sont certainement encore nécessaires dans ce domaine. Il est cependant peu probable que la voie s'en retrouve plus silencieuse.

Figure 21: Etat du ballast après 100 mio. de tonnes brutes avec et sans semelle sous traverse

Autres domaines d'application des semelles sous traverses

Les semelles sous traverses à rigidité croissante ou décroissante sont un moyen efficace pour optimiser les transitions de superstructure et d'assurer une bonne répartition des charges dynamiques. Cependant, seules les semelles rigides sont actuellement utilisables sans restriction. L'utilisation de semelles moyennement rigides ou souples doit actuellement toujours être surveillée dans le cadre de tests d'exploitation resp. en accord avec l'OFT. Les semelles plastiques conviennent cependant très bien pour préserver le ballast dans les zones de transition avec les ouvrages d'art ou la voie sur dalle, car les pointes de contraintes dynamiques dues à la modification de la rigidité de la voie sont atténuées par l'augmentation de la surface de contact déjà mentionnée.

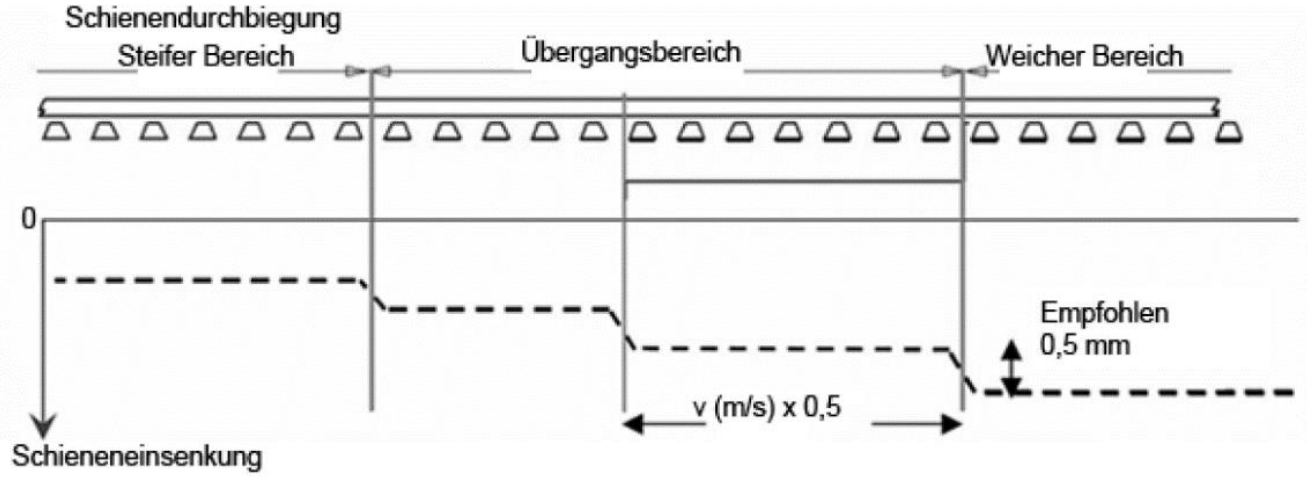

Figure 22: Conception typique d'une transition

Les courbes étroites constituent un autre domaine d'application. En particulier avec les traverses en béton, on observe des usures ondulatoires sur le rail intérieur. Elles augmentent l'usure de la voie, les frais d'entretien et le niveau sonore. Des mesures effectuées chez le BLS (voie normale) ont montré que des semelles rigides combinées à des semelles sous rail souples modifient de manière significative les paramètres dynamiques (p.ex. effet de découplage) du système roue-rail, ce qui entraîne en général une modification des fréquences propres des vibrations des composants de la superstructure et contrecarre apparemment la formation d'usures ondulatoires. Chez la voie métrique, seules des semelles sous rail souples ont pu être observées jusqu'à présent sur une longue période (Täsch-Zermatt, MGB). Elles ont également conduit à une amélioration de la problématique des usures ondulatoires. Une nuance d'acier particulièrement rigide ainsi qu'un conditionnement du champignon du rail ont également tendance à ralentir l'apparition d'usures ondulatoires. La combinaison de traverses en béton avec semelles sous traverses rigides et semelles sous rail souples n'a pas encore été testée à ce jour sur la voie métrique.

Recommandation

Afin d'obtenir une qualité géométrique de la voie constante et de réduire les coûts LCC, sans tenir compte de la protection contre les vibrations, il est recommandé de poser des semelles sous traverses rigides, si possible plastiques, sur toute la longueur d'un tronçon de voie, afin d'éviter des transitions multiples. Les transitions de traverses avec semelles sous traverse à des traverses sans semelles sont contre-productives. L'utilisation de semelles sous traverses améliore généralement la qualité géométrique de la voie. Lorsque l'épaisseur du lit de ballast est réduite (mais > 20 cm), les semelles sous traverses peuvent contribuer à compenser la capacité de répartition de la charge du ballast réduite. Lors de l'utilisation de semelles sous traverses élastiques, il faut toutefois faire attention à la flexion verticale supplémentaire des rails, qui provoque des moments de flexion plus élevés dans les rails. L'outil de calcul Zimmermann V1.3 permet d'apporter une preuve correspondante. En outre, l'usure du ballast et des surfaces latérales des traverses en béton peut être plus importante dans ce cas. Une combinaison de semelles élastiques et de tapis sous ballast n'est pas nécessaire. Les tapis sous ballast combinés à des semelles plastiques sont toutefois tout à fait judicieux, notamment dans les zones de transition avec des ouvrages d'art et des voies sur dalle avec terrain naturel rigide dans la zone de transition. Figure 23 ci-dessous permet de choisir le type de semelle sous traverse approprié en fonction des objectifs et des exigences.

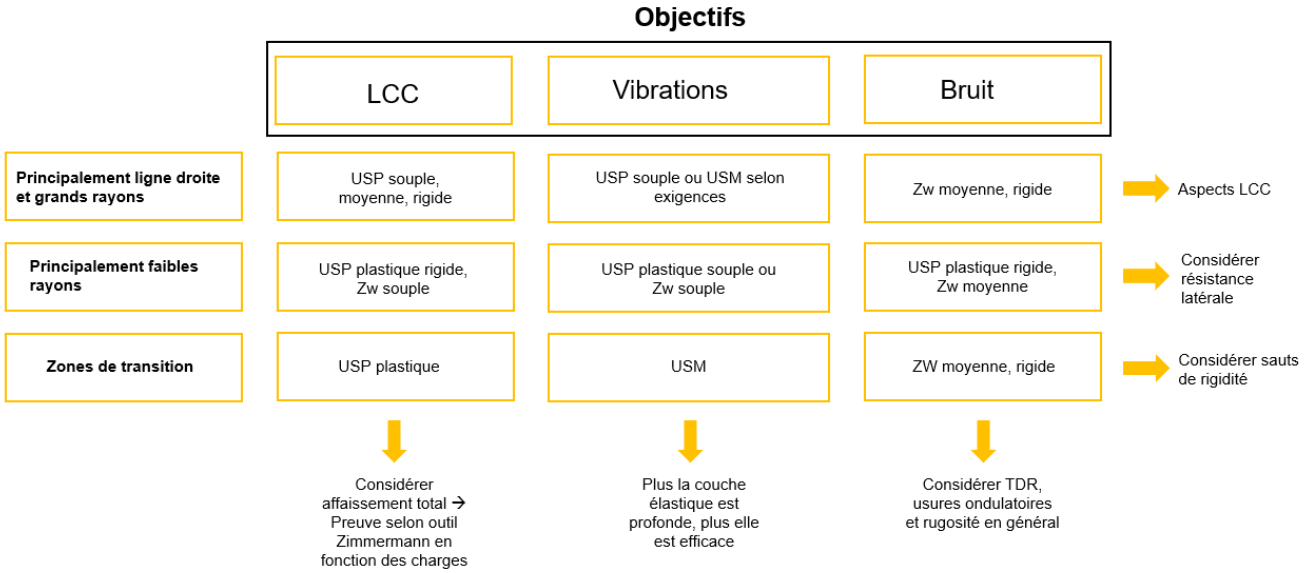

Figure 23: Aide à la planification en fonction des objectifs

3.6 Ballast

Situation:
La voie ferrée avec lit de ballast a fait ses preuves et continue d'être utilisée en priorité. En raison des besoins d'entretien, de la hauteur constructive et de la praticabilité par moyens routiers, les voies sur dalle sont uniquement de plus en plus fréquentes dans les agglomérations et dans les tunnels de grande longueur.

Défauts:
Le ballast usé est généralement reconnaissable sous forme de zone blanche dans le lit de ballast, les causes peuvent être variées. L'une des raisons peut être une épaisseur insuffisante de ballast sur une infrastructure rigide comme un pont (typiquement: 0-15 cm sous la traverse), des usures ondulatoires prononcées entraînent également la destruction du ballast. D'autres causes sont les joints de rails ouverts qui provoquent des chocs importants sur le ballast.

Connaissances:
Le ballast posé dans la forme géométrique prescrite constitue le lit de ballast. Il garantit le support élastique du châssis de la voie et permet de corriger la voie lors des travaux de maintenance. La forme géométrique prescrite du lit de ballast empêche les instabilités du châssis de la voie dues à la charge du trafic et aux influences de la température.

Le ballast est un matériau de superstructure de haute qualité. Il doit résister aux sollicitations dynamiques du trafic ferroviaire et aux intempéries pendant plusieurs décennies.

Selon le groupe de charge, il convient d'utiliser le ballast de classe 1 ou 2. Dans les voies secondaires, il faut utiliser du ballast de classe 2. Souvent, en raison de sa disponibilité et de son coût, on utilise du ballast de classe 1.

Un lit de ballast propre est le composant le plus important du drainage interne de la voie. Cependant, même avec du ballast propre, des problèmes peuvent survenir si la couche de fondation et les conditions externes d'évacuation des eaux ne sont pas correctement dimensionnées ou se détériorent avec le temps (Li et al., 2016) [9].

Recommandation:
Le lit de ballast a fait ses preuves et reste la solution la plus économique en termes de coûts du cycle de vie.

3.7 Semelles sous ballast

Situation
Les chemins de fer ont déjà utilisé des tapis sous ballast à plusieurs reprises. Les raisons sont parfois variées, mais les tapis sous ballast sont principalement utilisés pour réduire les vibrations et augmenter l'élasticité sur un terrain naturel rigide. Il existe également des applications de tapis sous ballast contre les vibrations sur la couche de base en cas de terrain naturel comme infrastructure.

Connaissances
Les tapis sous ballast (USM) sont posés sous le ballast et sont principalement utilisés là où il faut éviter une assise rigide du lit de ballast, p.ex. sur des dalles en béton, des ponts ou dans des tunnels. En raison des grandes surfaces à couvrir, la pose de tapis sous ballast est plus coûteuse. Une pose ultérieure sur des tronçons existants nécessite en outre un démontage complet du lit de ballast. L'utilisation de tapis sous ballast n'est donc économiquement justifiable que dans les cas où, en plus d'une élasticité accrue de la superstructure, une isolation des bruits solidiens est requise. En effet, la séparation continue sous le ballast permet de découpler presque entièrement la voie de l'environnement. La masse élevée du ballast permet un réglage du système vibratoire à basse fréquence, ce qui entraîne une réduction efficace des émissions de bruit solidien vers l'environnement. Il est possible d'obtenir des fréquences propres allant jusqu'à environ 25 Hz. Les vibrations de la voie à moyenne et haute fréquence sont réduites de 13-17 dB, les vibrations de la voie à basse fréquence sont augmentées de 5-15 dB. Si la protection contre les bruits solidiens et les vibrations est un objectif prioritaire, comme p.ex. dans les zones où des habitations sont situées à proximité immédiate, les tapis sous ballast sont également utilisés sur le terrain naturel. Comme les semelles sous traverses souples n'ont pas encore pu s'imposer en Suisse (en raison du manque d'homologation), les USM offrent une

alternative pour compenser les différences de rigidité lors de transitions entre dalles en béton et terrain naturel.

Les chemins de fer à voie métrique suisses utilisent sporadiquement des USM contre les vibrations. Les expériences sont décrites comme fondamentalement positives.

Les règles relatives à l'assurance qualité, à l'homologation de leur conception et aux essais ainsi qu'à l'utilisation des tapis sous ballast sont résumées dans la norme SN EN 17282:2021 Applications ferroviaires - Infrastructure - Tapis sous ballast.

Figure 24: Pose d'un tapis sous ballast

Recommandation:
Les tapis sous ballast représentent une bonne solution pour réduire les vibrations dans les habitations proches. Elles peuvent également être utilisées pour augmenter l'élasticité sur une infrastructure rigide, comme du béton.

3.8 Infrastructure, couche de fondation

Situation:
Chez les chemins de fer à voie métrique, environ 80% de l'ensemble de la voie n'a pas d'infrastructure. Souvent, l'infrastructure date de l'époque de la construction initiale et a plus de 100 ans. La plupart des chemins de fer posent désormais une couche d'étanchéité lors du renouvellement de la voie. Pour les nouvelles constructions, la tendance est à la réaliser une infrastructure en grave PSS ou avec AC-Rail.

Défauts:
Les remontées de fines sont un phénomène récurrent dans l'infrastructure. Les causes peuvent être diverses:

- Pas d'infrastructure ou mauvaise évacuation des eaux
- Infrastructure souvent à grain fin, peu perméable et de mauvaise portance, niveau de la nappe phréatique parfois élevé
- Sauts de rigidité avant ou après points fixes
- 2-3 ans après renouvellement de superstructure, après la pose initiale de traverses en béton.

Les remontées de fines sont dues aux affaissements cycliques du châssis de la voie lors du passage de trains, les fines sont pompées vers le haut à travers le ballast jusqu'à ce qu'elles atteignent la surface à un endroit. Dans le lit de ballast, la pollution du ballast n'est généralement visible que sur une courte longueur, qui constitue généralement la partie visible de l'iceberg. La discontinuité dans le lit de ballast peut alors déjà s'étendre sur une longue distance.

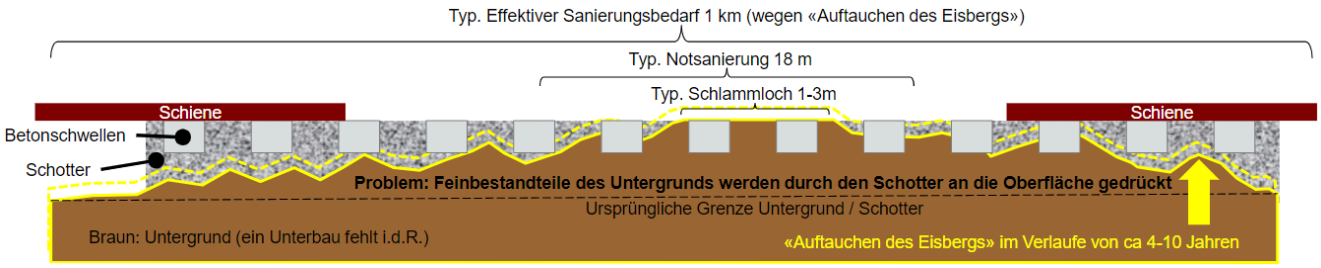

Figure 25: Exemple d'une remontée de fines (zb)[4]

La zone de boue entraîne une diminution de la portance du lit de ballast, ce qui provoque des instabilités et des défauts géométriques de la voie. Dans cette zone, le bourrage n'a qu'un effet à court terme ou peut même conduire à une déconsolidation des parties fines et donc à une réduction supplémentaire de la portance.

La seule solution efficace consiste à renouveler complètement la voie ferrée, y compris l'infrastructure avec couche filtrante sur toute la longueur de la remontée de fines, et à mettre en place un système d'évacuation des eaux efficace.

Connaissances:
Les méthodes de dimensionnement actuelles sont basées sur des modèles statiques. En tenant compte des charges ferroviaires cycliques et dynamiques, les pressions du ballast et les contraintes dans l'infrastructure/le terrain naturel sont déterminées de manière quasi-statique. En réalité, la voie ferrée avec superstructure-infrastructure-terrain naturel subit toutefois une charge variable dans le temps, qui dépend entre autres de la vitesse de circulation. Le comportement de l'infrastructure sous une sollicitation cyclique est très complexe. La charge linéaire (voie ferrée) génère des cycles de charge via les traverses, qui se déploient radialement dans l'infrastructure et génèrent par conséquent des composantes de contraintes verticales et horizontales (contraintes de cisaillement).

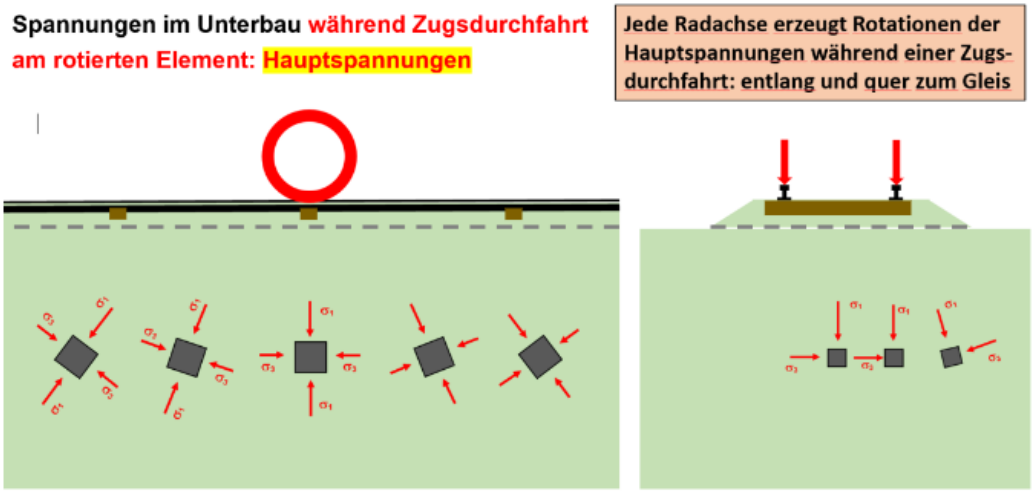

Figure 26: Contraintes principales dans l'infrastructure lors du passage d'un train[5]

[4] Document interne zb
[5] Dr. H.R. Schneider, Allianz Fahrweg, BAV: Internationale Literaturrecherche zum Thema Unterbau bei Bahnstrecken, 18.01.2022 [9]

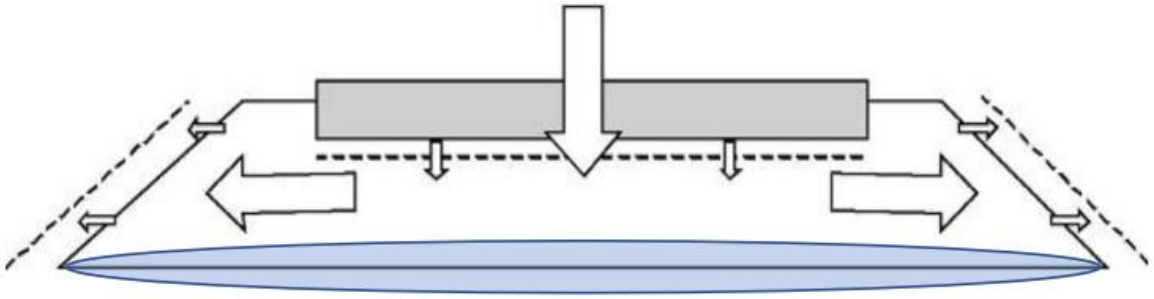

Figure 27: Affaissement et élargissement latéral suite à des chocs verticaux [6]

Des déformations plastiques ou des tassements excessifs du terrain naturel peuvent entraîner la formation de poches de gravier. Si ces poches de gravier se remplissent d'eau et que la possibilité de drainage latéral est limitée, les poches de gravier s'agrandissent et une détérioration accélérée de l'infrastructure se produit.

La structure de l'infrastructure peut être classée en trois catégories.

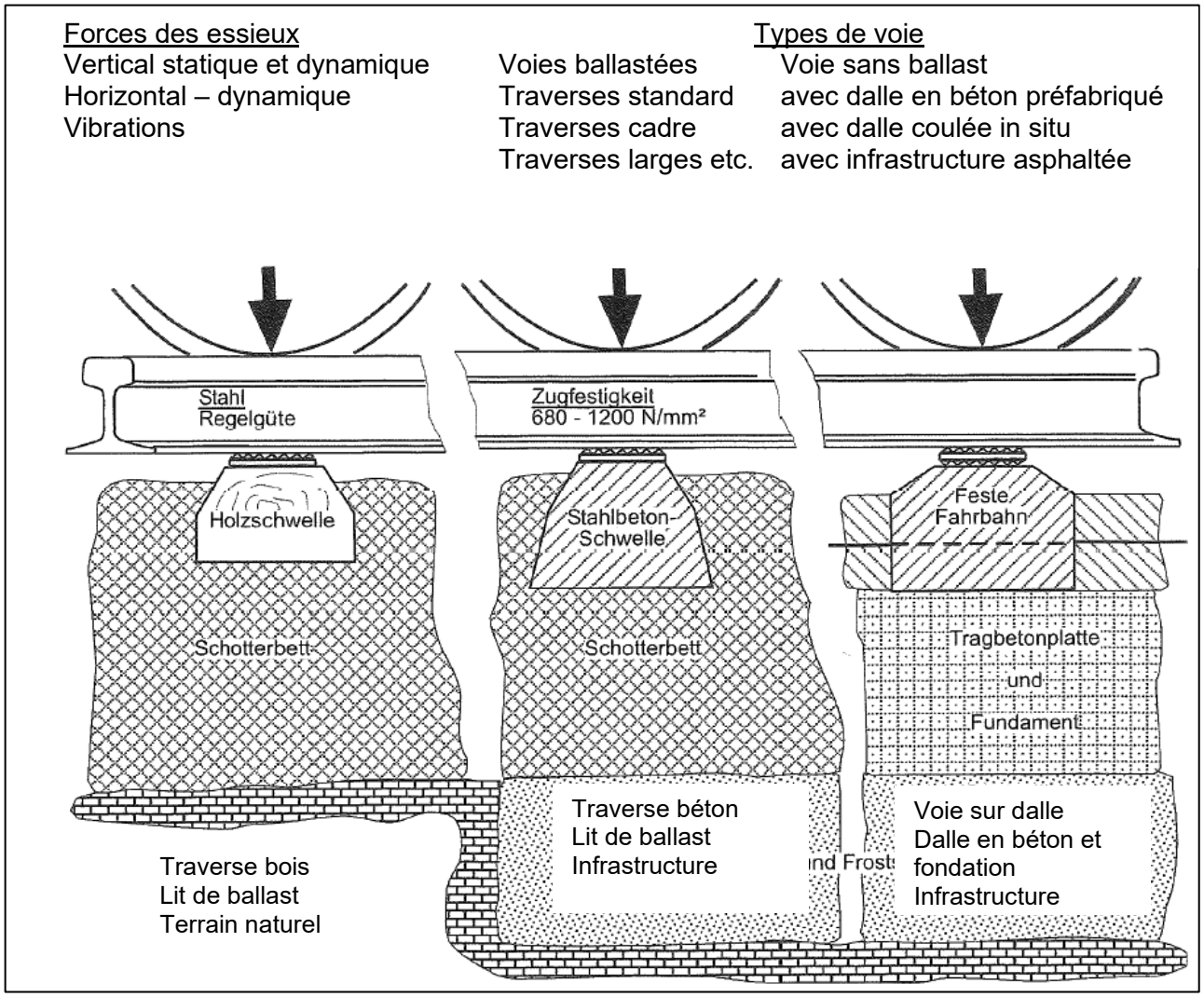

Figure 28: Types de construction de l'infrastructure[7]

[6] Dr. H.R. Schneider, Allianz Fahrweg, BAV: Internationale Literaturrecherche zum Thema Unterbau bei Bahnstrecken, 18.01.2022 [9]

[7] Bernhard Lichtenberger: Handbuch Gleis, Eurailpress 2010

La première catégorie est un lit de ballast posé directement sur le terrain naturel. Il s'agit du type d'infrastructure la plus courante chez les chemins de fer à voie métrique qui a généralement fait ses preuves par le passé. Les RhB en sont un exemple, puisque 90% des tronçons ne disposent pas d'une infrastructure normée et que, malgré cela, on ne constate pas d'anomalies excessives telles que des remontées de boue. Cela est dû en grande partie au sol rocheux et rocailleux. Des études de la TU München laissent supposer que le terrain naturel compacté au fil des ans est souvent détruit lors du remplacement des traverses en bois par des traverses en béton en raison d'une hauteur insuffisante du ballast. Des défauts géométriques de la voie dus à une portance insuffisante et des remontées de fines peuvent en être la conséquence [10].

En raison des exigences croissantes posées à la voie ferrée, notamment suite à des charges plus élevées, la deuxième catégorie, à savoir le lit de ballast avec infrastructure est généralement utilisée pour les nouvelles constructions. Celle-ci est constituée d'une couche de grave PSS ou d'une couche avec AC Rail. L'AC-Rail est plus étanche que la couche de grave PSS et a une très longue durée de vie si le terrain naturel est de bonne qualité (expérience de la DB). Les premiers calculs LCC indiquent que, pour les chemins de fer à voie métrique également, la pose d'AC-Rail est économiquement rentable à long terme en cas de charges plus élevées.

Des mesures effectuées chez le Zentralbahn ont montré qu'avec la deuxième catégorie, l'infrastructure devient plus rigide, ce qui modifie la fréquence propre. Il peut en résulter une augmentation des émissions sonores. L'utilisation de semelles sous les traverses en béton peut améliorer l'élasticité globale. Des recherches supplémentaires doivent être menées pour savoir dans quelle mesure les émissions sonores peuvent être réduites au moyen d'éléments élastiques.

La troisième catégorie est celle de la voie sur dalle, utilisée en partie en agglomération et dans les longs tunnels. Dans ces cas d'application, la praticabilité avec des véhicules routiers, la faible hauteur constructive et le besoin en maintenance resp. les interruptions possibles sont généralement déterminantes pour ce choix.

Il convient d'accorder une attention particulière aux transitions de rigidité, car c'est précisément dans ces zones que les défauts sont les plus fréquentes et entraînent des renouvellements coûteux de la voie ferrée. Figure 22 montre une transition typique. L'utilisation de semelles sous les traverses en béton ou de fondations de différentes rigidités permet d'atténuer les grandes variations de force et les vibrations qui en résultent.

En particulier dans le domaine de la géotechnique ferroviaire, il existe encore de grandes lacunes dans les connaissances. Ces lacunes concernent surtout:

- la complexité des contraintes dans l'infrastructure par rapport aux modèles fréquemment utilisés (par ex. Zimmermann) et
- les influences qui en découlent, car ces contraintes évoluent en permanence sous l'effet de charges dynamiques.

Une partie importante de l'infrastructure est de garantir le maintien de la fonction filtrante. Une fonction filtrante insuffisante entraîne de nombreux problèmes et un besoin important d'assainissement. Les expériences faites par les chemins de fer montrent que si le faux géotextile non-tissé est choisi, il est bouché par des particules fines et l'eau ne s'écoule plus dans l'infrastructure.

Recommandation:
Avant de commencer tout renouvellement de voie, il convient, pour dimensionner l'infrastructure, de connaître l'infrastructure et les défauts qu'elle présentait par le passé.

En raison de la tendance à l'augmentation des charges par essieu et des charges plus élevées sur la voie, il est recommandé au long terme de réaliser une infrastructure solide avec une couche d'étanchéité et de fondation.

Si l'accessibilité est assurée, l'AC-Rail est la solution la plus économique en cas de charges plus élevées.

En cas de passage de traverses en bois à des traverses en béton et de charges plus élevées, il est recommandé d'assainir l'infrastructure.

Lors du renouvellement de la superstructure, il faut s'assurer que couche de base existante ne soit pas touchée ou endommagée.

3.9 Evacuation des eaux

Situation:
En raison de la géographie, l'évacuation des eaux des chemins de fer à voie métrique est souvent réalisé sous forme de talus et de fossés. Une grande partie des lignes n'est actuellement pas drainée, et ce n'est que lors du renouvellement de la voie, généralement en relation avec une couche d'étanchéité, qu'un drainage de la plateforme est réalisé.

Connaissances:
La recherche bibliographique internationale de l'Alliance Voie ferrée voie normale au sujet de l'infrastructure des voies ferrées montre que toutes les publications sont du même avis en ce qui concerne l'évacuation des eaux: L'eau doit être efficacement évacuée de la plateforme. Cela semble être le conseil de dimensionnement le plus important dans toutes les publications [9].

La couche de fondation ne doit pas être contaminée par des particules fines provenant du bas (mud pumping) ou du haut. Les parties fines doivent être filtrées dans une zone restreinte au-dessus de la plateforme et ne doivent pas polluer la couche de base.

Recommandation:
Une évacuation des eaux fonctionnelle est importante et centrale pour atteindre une longue durée de vie de la voie.

L'évacuation des eaux doit être conçue de manière que l'eau ne coule pas dans la voie depuis l'extérieur.

3.10 Voie ferrée Défauts Usure

Situation:
Chez les chemins de fer à voie métrique, les défauts sont principalement les suivants:

- Usure des rails (verticale ou latérale), usures ondulatoires, fissures, formation de lèvres
- Fissures dans les traverses en bois
- Défauts géométriques
- Montées de fines

Dans le cadre du sondage, aucune nouvelle solution n'a été proposée pour réduire les défauts. Les mesures habituelles telles que le meulage ou le changement des rails ou le remplacement des traverses en bois par des traverses en béton sont pratiquées.

Les défauts ont augmenté chez la plupart des chemins de fer lors de l'utilisation de nouveau matériel roulant, en particulier l'usure des rails et les usures ondulatoires.

Connaissances:
Défauts géométriques: les forces dynamiques de contact roue-rail résultant de l'interaction entre le véhicule et la voie sont responsables des tassements locaux de la voie. Lorsque ces tassements locaux varient le long de la voie, des irrégularités géométriques apparaissent, ce qui accentue encore la charge dynamique sur la voie due à l'interaction entre le véhicule et la voie.

Usure: depuis plus d'un siècle, les rails des transports ferroviaires urbains (tramways, métros) sont touchés par une usure périodique de la surface de contact, appelée usure ondulatoire. Lorsqu'un train circule sur une voie touchée par ce phénomène, il en résulte des nuisances sonores et vibratoires importantes, dont le niveau dépasse souvent les valeurs limites prescrites par la loi. Les réseaux urbains sont alors contraints de procéder à des opérations coûteuses et répétées d'abrasion mécanique de la surface des rails par meulage, seul moyen efficace actuellement pour contrôler l'évolution des ondulations. Cette usure a fait l'objet d'études pendant des décennies, principalement axées sur l'analyse des vibrations et de leurs conséquences, plutôt que sur l'analyse temporelle des interactions de contact locales à l'origine de la formation des usures. Pour pallier cette lacune, une approche centrée sur l'analyse tribologique locale du contact roue-rail, appliquée aux cas particuliers d'usures ondulatoires dans les voies en alignement en zone d'accélération et dans les voies en courbe à faible rayon, est proposée. Dans un premier temps, les résultats des analyses tribologiques des surfaces de frottement ont permis, dans les deux cas, de caractériser le cycle tribologique des ondulation constatées. L'influence de la géométrie sur les paramètres, qui ont initialement mené à la formation des usures doit toutefois encore être déterminée. Dans le cas d'usures ondulatoires sur les voies en alignement, un modèle numérique longitudinal bidimensionnel du contact roue-rail a été implémenté afin de compenser le manque d'instrumentation physique du contact. Sous des conditions qui reproduisent l'accélération d'un train, un régime d'instabilité (glissement d'adhésion) se forme naturellement au contact. Il en résulte une induction de températures de contact et de déformations plastiques périodiques de la surface du rail. Ces effets sont comparables aux usures ondulatoires expérimentales évaluées. Dans le cas d'usures ondulatoires en courbe, une instrumentalisation in situ à l'échelle de la roue et du rail (collaboration entre RATP et Railtech) a été implémentée. Ensuite, des déplacements latéraux périodiques, spécifiques aux zones d'usures ondulatoires, ont été identifiés. Comme des essais en laboratoire pour la reproduction de ce type d'usures l'ont prouvé (collaboration Lucchini et Politecnico di Milano), ces glissements latéraux périodiques sont effectivement la cause pour la formation d'usures ondulatoires en courbe [11].

Joints de rail: Parmi les défauts singuliers de la surface de roulement, on trouve notamment les joints isolants, les soudures de rail mauvaises ou usées, les empreintes de patinage, les joints de rail et les squats. En raison de la forme géométrique de cet abaissement, la roue subit par exemple un mouvement d'abaissement puis de remontée lors du passage sur le joint de rail chargé selon Figure 29 avec sa géométrie de contact. A l'endroit de l'abaissement maximal de la roue, l'endroit de la force de contact roue-rail passe du rail 1 au rail 2 (transfert de la roue), puis la roue est à nouveau relevée à sa hauteur initiale. Un processus similaire se déroule lors du passage des cœurs d'appareils de voie.

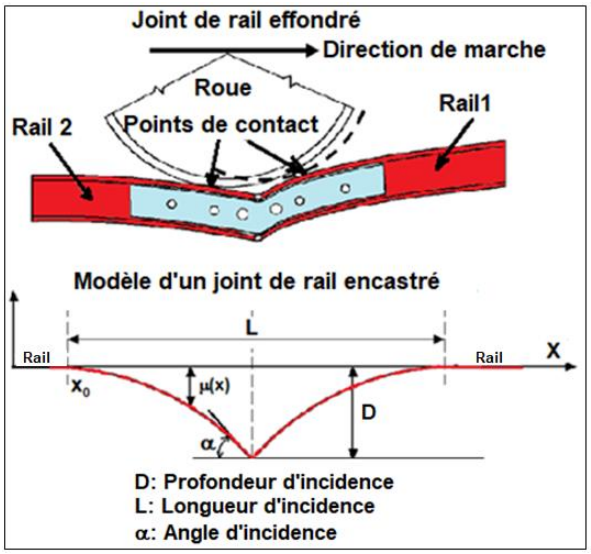

Figure 29*:* Géométrie d'affaissement d'un joint éclissé [8]

[8] Nirmal K Mandal, Manicka Dhanasekar, Yan Quan Sun: Impact forces at dipped rail joints, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit 230(1)

Les joints de rail sont une cause fréquente de forces verticales roue-rail de type P2, qui dépendent de la forme de l'irrégularité, de la rigidité de contact et des caractéristiques de l'infrastructure. Ces forces P2 agissent normalement dans une plage de fréquences de 50 à 100 Hz. Les forces résultent de la charge statique de la roue agissant sur la voie, combinée à la masse non suspendue de la roue et à la masse équivalente de la voie. Les principaux partenaires de construction qui influencent ces forces sont: la charge statique de la roue, la masse non non suspendue, la vitesse du véhicule, l'angle d'affaissement et la rigidité équivalente de la voie, la masse équivalente et l'amortissement de la voie.

$$P_2 = P_0 + 2\alpha V \left[\frac{M_u}{M_u+M_t}\right]^{0.5} \times \left[1 - \frac{C_t\pi}{4[K_t(M_u+M_t)]^{0.5}}\right] \times [K_t M_u]^{0.5}$$

où : P_2 = Force (kN)
P_0 = Charge statique de la roue du véhicule (kN)
M_u = Masse non suspendue du véhicule par roue (kg)
2α = Angle total de l'articulation, normalement 0,01 radians
V = Vitesse du véhicule (m/s)
K_t = Rigidité équivalente de la voie (MN/m)
C_t = Amortissement équivalent de la voie (kNs/m)
M_t = Masse équivalente de la voie (kg)

Figure 30: Formule pour le calcul de la force P2 [12]

Fatigue du contact de roulement RCF: Les paramètres importants du véhicule et de la voie, qui réduisent la tendance à la fatigue du contact de roulement RCF sont:

- Facteurs liés au véhicule: capacité de peu ou pas de possibilité d'orientation radiale des essieux dans les courbes, matériau des roues, profil des roues, masse des essieux montés, forces de traction et de freinage et contrôle du glissement/pivotement lors du freinage et de la traction, insuffisance de dévers, reprofilage fréquent et léger des roues.
- Facteurs liés à la voie : meulage du rail, lubrification, qualité géométrique de la voie (direction), matériau du rail, profil du rail.

La fatigue de contact de roulement se produit le plus souvent sur le rail extérieur des courbes avec rayon moyen à grand ou sur les deux rails en ligne droite.

Recommandations:
Les travaux de recherche actuels indiquent tous qu'il est possible de réduire les usures ondulatoires dans les courbes étroites grâce à l'utilisation de semelles sous les traverses en béton et à l'utilisation de semelles sous rail souples.

3.11 Voie ferrée Bruit, Vibrations

Situation:
Selon le sondage chez les chemins de fer à voie métrique, plus de 80 % des chemins de fer interrogés ont des problèmes de bruit. Chez la plupart des chemins de fer, il s'agit de crissements dans les courbes étroites. Le SKS et le SKK sont appliqués comme mesures possibles. Toutefois, l'effet obtenu n'est pas encore clair et confirme le besoin de recherche.

L'installation d'absorbeurs de bruit sur les roues et la réduction de la vitesse ont également été citées comme mesures efficaces côté véhicule.

Plus de la moitié des chemins de fer ont des problèmes de vibrations. Il n'existe pas de solution générale efficace pour lutter contre les vibrations chez les chemins de fer. Des traverses en béton avec semelles sous traverses sont utilisées à titre expérimental. Localement, des tapis sous ballast ont été utilisés avec succès.

En ce qui concerne les semelles sous traverses, il faut noter que les types autorisés en Suisse ne sont pas conçus pour la protection contre les vibrations. La question se pose de savoir si l'utilisation de telles USP hautement élastiques/élastiques serait judicieuse dans ce cas.

Il faut également tenir compte du fait qu'il est possible que la valeur limite du bruit soit réduite à l'avenir. De plus, les riverains acceptent de moins en moins le bruit en raison de la possibilité de mettre en place de meilleures mesures de protection contre le bruit, comme des murs antibruit, des trains moins bruyants, ...

3.11.1 Bruit

Dans le domaine de la voie métrique, avec des vitesses maximales des trains allant jusqu'à 120 km/h, les nuisances sonores sont principalement dues au bruit de roulement et aux excitations dues aux points singuliers de perturbation de la voie (joints de rails et cœurs d'appareils de voie).

L'utilisation de compteurs d'essieux à la place des joints isolants améliorera significativement la situation au niveau des joints de rails. Aucune solution de réduction du bruit n'est connue à ce jour dans les cœurs d'appareils de voie.

Le bruit de roulement peut être réduit par l'utilisation de freins à disque, de sabots de frein en matériau composite ou fritté pour les véhicules avec freins à sabots, par l'entretien du champignon du rail (meulage en cas d'usures ondulatoires à ondes courtes ou remise en état en cas de défauts de la surface de roulement des rails) ainsi que par l'entretien de la surface de roulement des roues (reprofilage en cas de défauts de la surface de roulement des roues). En outre, il est possible d'installer des murs antibruit aux endroits exposés.

En ce qui concerne le crissement dans les virages, le projet P2 (SKK/SKS), soutenu par le projet P3 (roue/rail), élabore des mesures d'atténuation au niveau de la surface de contact du rail-roue (conditionnement du champignon du rail SKK), de la géométrie de contact et de la mécanique de contact de la roue et du rail, ainsi que des organes de roulement des véhicules. Certains chemins de fer ont également réussi à obtenir des améliorations grâce à des mesures d'amortissement au niveau des roues (absorbeurs de bruit de roue).

Recommandation en matière de bruit:
Selon les expériences actuelles, le bruit sous forme de crissements dans les virages peut être massivement réduit par l'utilisation d'un conditionnement du champignon du rail.

Les vibrations sonores des rails sont réduites par l'utilisation de semelles sous rail plus rigides ou amortissantes. Il faut cependant tenir compte du fait que l'élasticité de la voie diminue en conséquence et que les vibrations peuvent augmenter. Les essais réalisés chez le MGB ont montré que le conditionnement du champignon de rail permettait de réduire, voire d'éliminer, les vibrations sonores du rail.

3.11.2 Vibrations

Les vibrations induites par le trafic (vibrations et bruits solidiens) dans les bâtiments peuvent être très gênantes pour les personnes vivant à proximité de voies ferrées. Les bruits solidiens resp. les vibrations sont des oscillations mécaniques qui se propagent dans un milieu solide ou à sa surface (son dans les corps solides). On parle de vibrations lorsqu'il s'agit de vibrations à basse fréquence que l'homme perçoit avec tout son corps. Les parties du bâtiment mises en vibration émettent des sons qui sont appelés bruits solidiens émis ou bruits aériens secondaires. Des effets secondaires peuvent également se produire, comme p.ex. le tintement de verres.

Les vibrations induites par le trafic sont avant tout un problème de transport ferroviaire. Elles sont plus complexes que le bruit, tant pour les identifier que pour les combattre. Les murs et les fenêtres antibruit n'offrent en revanche aucune amélioration. Les vibrations à côté de la voie entraînent dans le bâtiment deux effets perturbateurs qu'il convient de distinguer : Il s'agit des secousses elles-mêmes, qui se manifestent par des vibrations du sol à chaque passage de train, et du son émis secondairement, qui ne se produit qu'à l'intérieur du bâtiment par la vibration des plafonds et des murs et qui est perçu comme un profond grondement de tonnerre. Ce son rayonné secondairement, également appelé "bruit solidien", doit être distingué du son direct qui pénètre p.ex. dans la maison par les fenêtres. Pour évaluer dans quelle mesure les vibrations sont perceptibles dans les bâtiments, la plage de fréquences de 4 Hz à env. 80 Hz est particulièrement intéressante, le bruit solidien est à prendre en compte dans le domaine ferroviaire en pleine voie entre 40 ... 150 Hz.

L'homme perçoit les vibrations dans les bâtiments sous deux formes (Figure 31). D'une part, sous forme de vibrations perceptibles et, d'autre part, sous forme de bruits solidiens émis par les plafonds et les murs. Les vibrations sont perçues par l'homme via les organes d'équilibre et par la peau. Les vibrations peuvent être perçues dans une plage de fréquences de 1 à 80 Hz. Les vibrations de fréquences supérieures à 80 Hz sont de plus en plus absorbées par les chaussures et les vêtements lorsque les valeurs de pointe sont faibles ; lorsqu'elles atteignent le corps, elles ne pénètrent pratiquement plus dans les couches corporelles adjacentes à la peau. L'introduction par la tête chez une personne allongée constitue une exception, car en raison de la faible couche de tissu au-dessus de la boîte crânienne, il existe une grande sensibilité à environ 50 Hz à 70 Hz, qui diminue à nouveau avec l'augmentation de la fréquence.

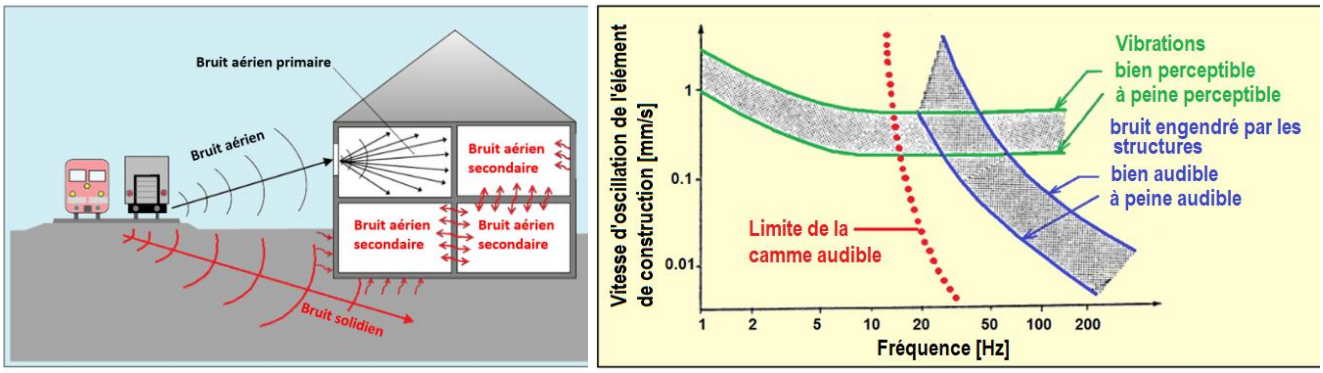

Figure 31 :Propagation du bruit solidien[9] et perception des vibrations et du bruit solidien[10]

[9] Erschütterung im Schienenverkehr/ DB AG

[10] Vortragsband der 3. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für ErdbebenIngenieurwesen und Baudynamik: „Ausbreitung von Erschütterungen im Boden und Bauwerk“ 1988

Propagation des vibrations (cf. Figure 32)

En principe, la propagation des vibrations depuis l'excitation (introduction de la charge – contact roue/rail) jusqu'au lieu des immissions chez les riverains peut être représentée de manière simplifiée comme suit (les facteurs qui influencent le degré des vibrations se trouvent dans les domaines de l'émission et de la transmission (nature du sol, sous-sol) ainsi que dans le domaine des immissions (lieu d'impact avec les fondations et les constructions d'ouvrages)):

- **Source:** Génération des vibrations dans la superstructure par le contact roue/rail
- **Excitation de l'ouvrage:** La superstructure "oscillante" entraîne des vibrations de la structure porteuse, qui sont transmises au terrain naturel par les piliers de la structure porteuse.
- **Propagation dans le terrain naturel:** Depuis le point d'introduction des vibrations dans le terrain (pilier de la structure porteuse), les vibrations se propagent à travers le terrain jusqu'aux objets riverains.
- **Couplage terrain - bâtiment:** Transfert des vibrations du sous-sol vers les bâtiments (fondations).
- **Propagation des vibrations dans le bâtiment:** Propagation des vibrations du point d'introduction (surface, fondation) dans l'ensemble du bâtiment.

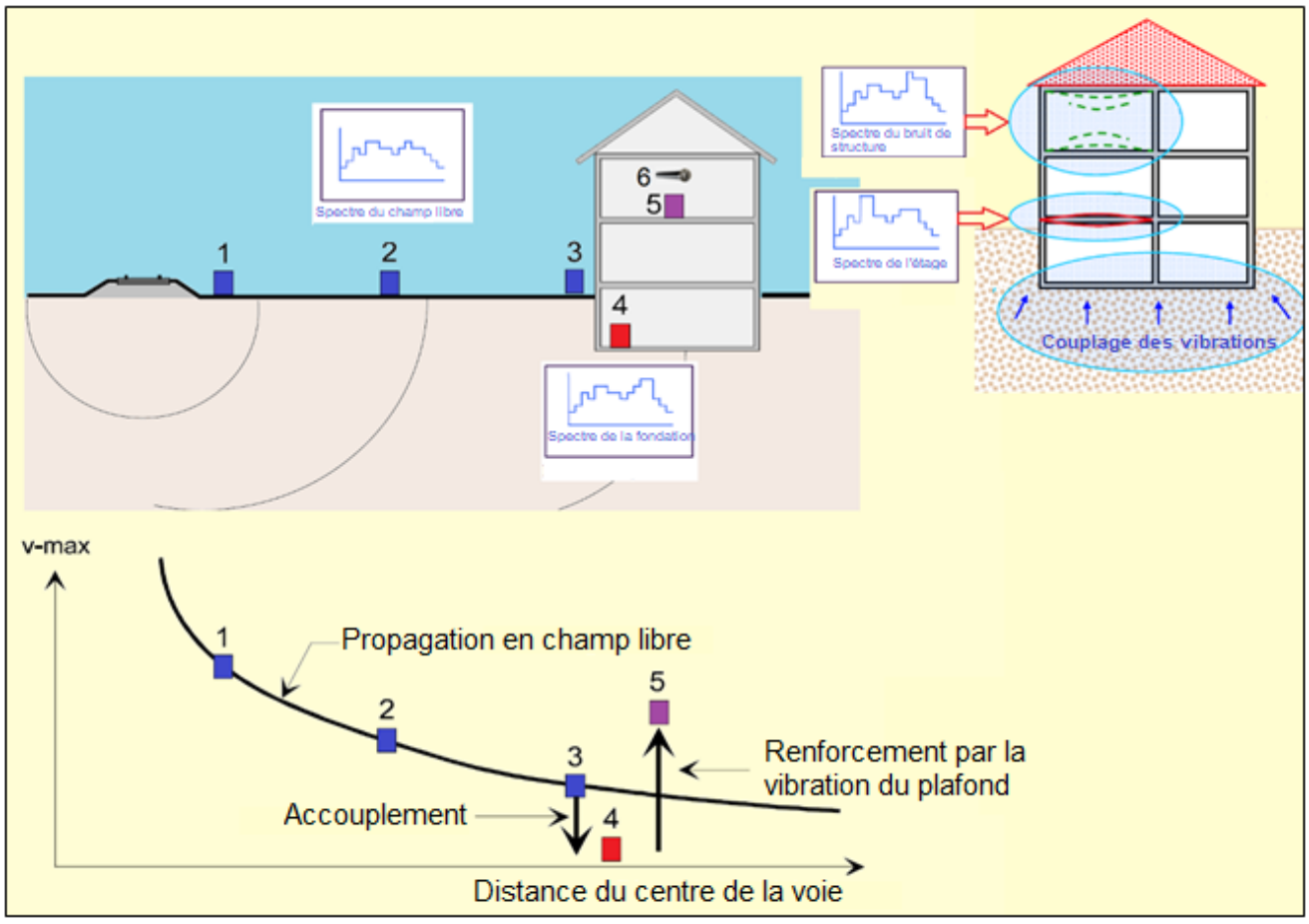

Figure 32: Propagation des vibrations dans le sol et les bâtiments[11]

[11] A. Ziegler, Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr, Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, Springer Vieweg 2017

Pour la propagation des vibrations à travers le sol, la plage pertinente pour les vibrations mécaniques résultant du secteur ferroviaire est définie dans la norme ISO 14837-1 [12]. La gamme de fréquences pertinente pour les vibrations se situe entre 1 et 80 Hz. Figure 33 montre les plages pertinentes pour les vibrations, le bruit solidien et l'émission sonore. Les graphiques montrent qu'il existe une plage de fréquences dans laquelle les trois phénomènes sont pertinents. Celle-ci se situe entre 15 et 80 Hz. Normalement, rien n'est audible en dessous de 20 Hz.

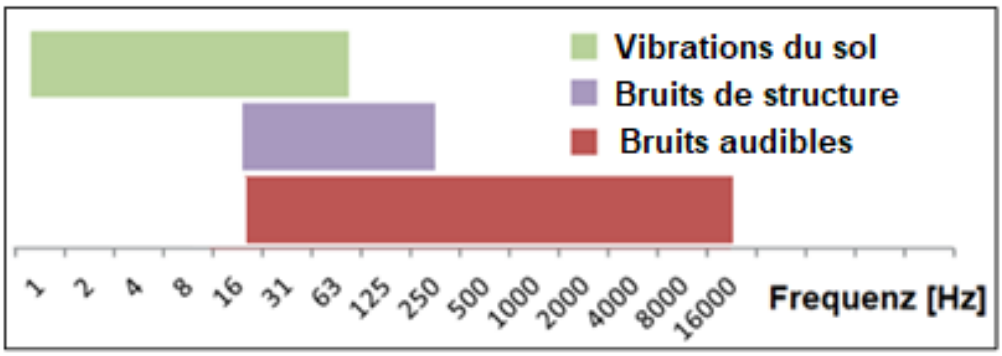

Figure 33: Perception de vibrations mécaniques par l'être humain[12]

Mesures de réduction des vibrations

Pour réduire efficacement les émissions de vibrations, il est possible d'envisager des mesures d'atténuation à la source, c'est-à-dire au niveau du véhicule ou de la superstructure ferroviaire, sur le chemin de propagation des vibrations ou côté récepteur, soit de manière constructive sur des éléments de construction, soit par des supports élastiques dans la zone des fondations du bâtiment (Figure 34). En plus d'une bonne surveillance resp. d'un bon entretien et donc d'une minimisation de la rugosité des roues et des rails, les mesures de réduction des vibrations les plus efficaces reposent sur la modification de l'impédance du sous-système "voie ferrée" par le biais, p.ex. d'appuis élastiques pour les traverses, de tapis sous ballast ou de systèmes masse-ressort (dans les tunnels) ou du sous-système "bâtiment" à l'interface sol de fondation-fondations (p.ex. appuis élastiques pour le bâtiment). L'impédance de la voie ferrée permet d'influencer la fréquence de résonance roue-rail qui lui est associée. Les mesures à la source ont en principe l'avantage que leur effet est bénéfique pour l'ensemble du voisinage et qu'elles sont souvent moins coûteuses. Les mesures à la source peuvent être très efficaces si elles peuvent s'attaquer aux causes de l'augmentation des émissions.

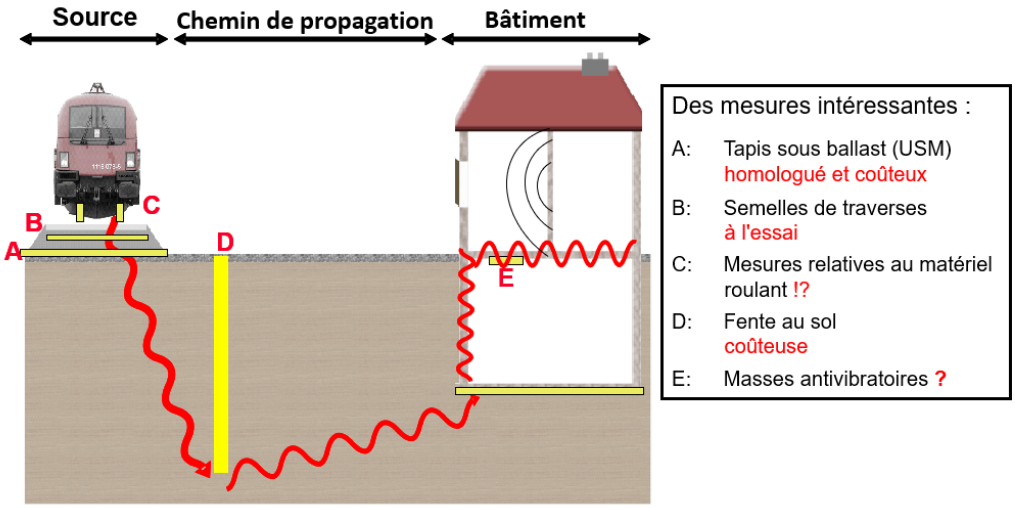

Figure 34: Mesures de réduction des vibrations possibles (Aperçu CFF Roger Müller)

[12] UIC, Railway induced vibrations, state of the art report, November 2017

Problématique des fréquences
La mesure des spectres d'amplitude des vibrations du sol de fondation dues à l'excitation par le trafic ferroviaire permet d'identifier deux plages de fréquences avec des amplitudes déterminantes, en fonction du type de train, de la voie et de la vitesse de circulation:

- Domaine F1: 5 Hz < f < 50 Hz : principalement excitation périodique due à l'écartement des essieux et des traverses ainsi qu'aux défauts géométriques de la voie avec des longueurs d'onde supérieures à 1,2 m;
- Domaine F2: f > 50 Hz : principalement excitation stochastique due au passage des roues et à l'interaction roue-rail.

Alors que les excitations dans le domaine à basses fréquences F1 sont essentiellement responsables des vibrations perceptibles du plafond et des éléments de construction, les amplitudes de vibrations à haute fréquence F2 entraînent la problématique du bruit aérien secondaire.

Avec les vibrations perceptibles du plafond et le niveau de bruit aérien secondaire audible, il faut évaluer simultanément deux perturbations pour les riverains en ce qui concerne l'apport vibratoire à évaluer. D'une part, des vibrations de résonance des plafonds et donc des amplitudes incompatibles dans la gamme de fréquences F1 sont possibles. D'autre part, en particulier lorsque les voies de circulation se trouvent à proximité immédiate de l'ouvrage prévu, les émissions dans le domaine des hautes fréquences (f > 50 Hz) peuvent être particulièrement fortes et conduire à des dépassements des valeurs limites selon la réglementation. La problématique des fréquences existe dans la mesure où les fréquences inférieures à 40 Hz ne peuvent être que difficilement réduites par des mesures en pleine voie. Par exemple, dans cette zone de tracé, un tapis sous ballast de moins de 40 Hz n'a aucun effet, il peut même entraîner une augmentation de la résonance, car pour des raisons physiques, il est difficile de prévoir des mesures efficaces (et peu coûteuses) pour des fréquences < 50 Hz environ. La raison en est que les affaissements deviennent très importants si la fréquence propre, et donc l'efficacité, doit se situer à des fréquences basses.

Recommandation en cas de vibrations:
Les vibrations/oscillations dans la plage de fréquences moyenne à élevée trouvent leur origine dans le contact dur et sans compromis acier-acier-roue-rail, dû à la "rugosité" de la roue et du rail (longueurs d'onde inférieures à 3 m). La rugosité peut être réduite en s'assurant que les roues et les rails sont aussi lisses que possible. Si cette mesure n'est pas suffisante ou si sa mise en œuvre pratique n'est pas possible pour quelque raison que ce soit, il est alors nécessaire de prendre des mesures côté voie ferrée.

3.12 Diagnostic de mesure

Situation
Pour surveiller la géométrie des voies, les grands chemins de fer utilisent le véhicules de mesure. Les chemins de fer plus petits effectuent des mesures manuelles ponctuelles et procèdent à une évaluation visuelle.

Les voies sont contrôlées visuellement par la ronde toutes les 2-4 semaines. Le véhicule de mesure mesure l'ensemble de la voie tous les six mois à tous les deux ans.

Les paramètres géométriques habituels de la voie tels que la direction, le nivellement longitudinal, le dévers, le gauche, l'écartement et le profil du rail (usure) sont surveillés.

Lors d'inspections effectuées par la ronde, les irrégularités habituelles sont constatées conformément au catalogue des défauts. Aucun incident notable n'a été signalé à partir des résultats du sondage.

Véhicule de mesure

Chez les chemins de fer à voie métrique, il n'existe que depuis quelques années la possibilité de parcourir la ligne au moyen d'un véhicule de mesure et de faire mesurer différents paramètres de la voie. Le véhicule de mesure permet de mesurer les valeurs suivantes:

- Dévers
- Ecartement
- Gauche
- Différence de dévers
- Qualité géométrique de la voie
- Tendance de la note de qualité géométrique de la voie
- Profil de rail (usure)
- Usures ondulatoires
- Affaissement de la voie

L'objectif des mesures est d'une part de détecter les écarts par rapport aux valeurs limites et d'autre part d'établir des prévisions à long terme. Cette dernière est d'ailleurs de plus en plus souhaitée resp. exigée par l'OFT.

Les premières expériences montrent que le chariot de mesure permet:

- de détecter à court terme des défauts géométriques de la voie ou d'autres écarts par rapport aux valeurs limites (gauche, ...) et de réagir en conséquence.
- à moyen terme, d'utiliser l'usure des rails, la variation de la qualité géométrique de la voie et, par conséquent, les données comme soutien à la planification des travaux d'entretien tels que le bourrage, le meulage, le changement de rails, etc.
- des prévisions à long terme sur la qualité de l'ensemble du tronçon et leur utilisation pour la planification à long terme des renouvellements de voie.

Le véhicule de mesure permet d'une part d'augmenter la sécurité et d'autre part d'obtenir une stratégie de maintenance à court et à long terme axée sur l'état.

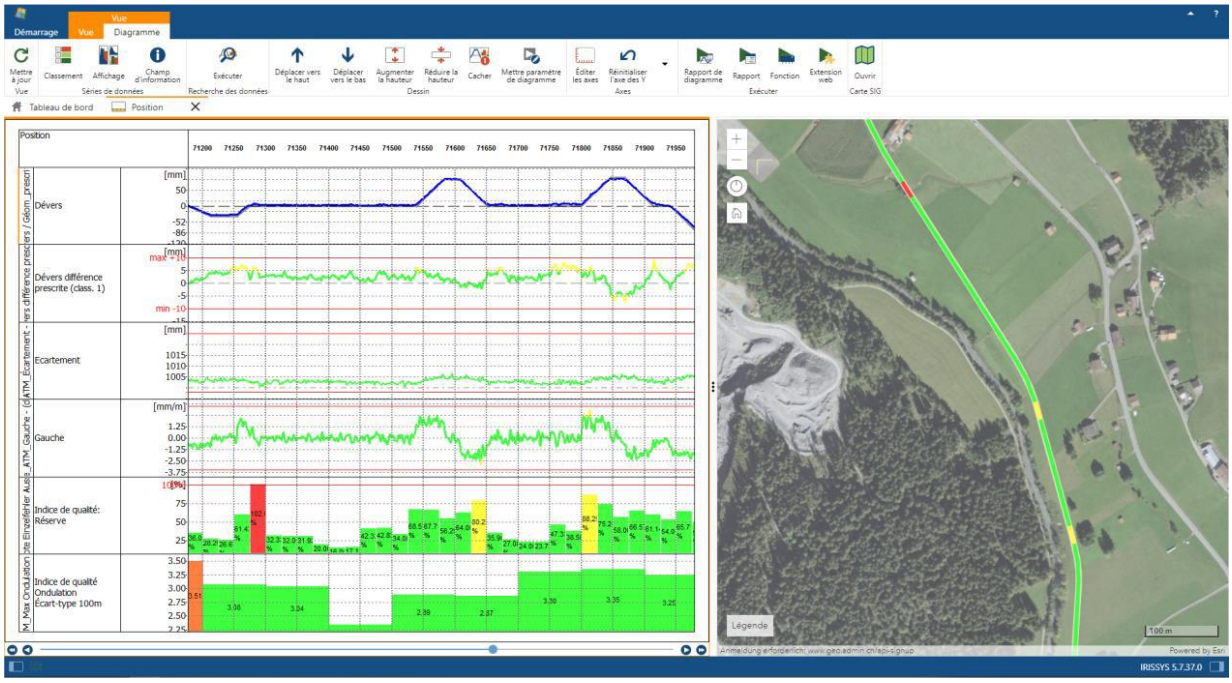

Figure 35: Exemple de visualisation des données de mesures dans le logiciel IRISSYS

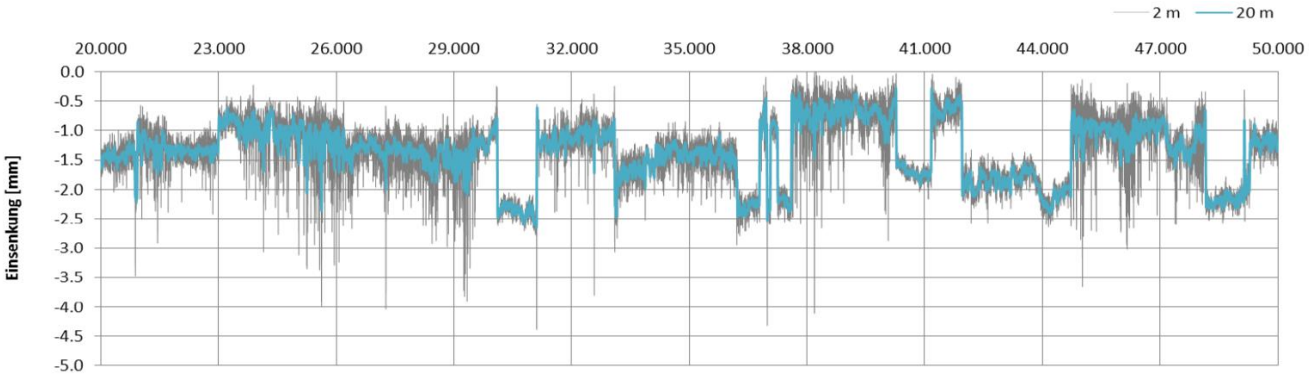

Figure 36: Exemple d'une mesure d'affaissement (densité spectrale de puissance (PSD))

4 Conclusion

4.1 Résumé des principales conclusions

Les charges sur la voie augmentent d'une part en raison des véhicules plus lourds (électronique, confort, marchepieds coulissants (LHand), ...) et de l'augmentation des charges par essieu qui en découle, et d'autre part en raison de la densification de l'horaire. Cela a des conséquences directes sur l'usure des rails et des roues. Pour contrer cette usure accrue, des rails avec des nuances d'acier élevées sont fabriqués et des infrastructures avec une meilleure portance sont construites. Il peut en résulter une augmentation des émissions sonores et des vibrations.
Pour répondre à ces exigences à la voie accrues, il faut en premier lieu une interaction optimale entre le véhicule et la voie. De plus, le corps de la voie doit être adapté de manière optimale aux besoins grâce à des éléments élastiques supplémentaires tels que les semelles sous traverses. La conception sera toujours un compromis entre les différentes exigences telles que le bruit, l'usure, les vibrations, la qualité géométrique, mais aussi les conditions de tracé telles que les rayons étroits et les lignes droites. L'objectif est donc d'utiliser les différents éléments de la voie de manière à répondre au mieux aux exigences de la voie tout en tenant compte de l'économie globale.
Cela nécessite une connaissance approfondie de l'interaction entre les différents éléments de la voie et une grande expérience dans leur utilisation.
Les connaissances nécessaires ne peuvent être obtenues que par la recherche.

5 Répertoires

5.1 Révisions

Rev.	*Date*	*Auteur*	*Description*
1.0	16.10.2022	Stefan Werner, Martin Siegen	Elaboration

5.2 Références

[1]: Bernhard Lichtenberger: Handbuch Gleis, Eurailpress 2010

[2]: Schweizer Norm EN 17397-1, Bahnanwendungen-Schienenfehler-Teil 1: Handhabung von Schienenfehlern, 02.2021

[3] K. Mädler, R. Heyder, DB Systemtechnik, Weiches Rad und harte Schiene oder umgekehrt? Zum Einfluss des Werkstoffes von Rad und Schiene auf den Verschleiss der Kontakt-Partner, Dresden 2015.

[4]: VÖV: D RTE 22540 Fahrbahnpraxis Meterspur und Spezialspur, 15.01.2011

[5]: Eisenmann J.: Stützpunkt-Elastizität bei einer Festen Fahrbahn, ZEV + DET Glas. Ann. 123 (1999) H. 11/12

[6]: Leykauf G., Stahl W.: Untersuchungen und Erfahrungen mit besohlten Schwellen, EI Heft 6/2004.

[7]: Leykauf G., Mattner L.: Elastisches Verformungsverhalten des Eisenbahnoberbaus, EI Heft 3/1990.

[8]: UIC IRS 70713-1 Under Sleeper Pads (USP) – Recommendations für Use, Ed. No. 1 June 2011

[9]: Dr. H.R. Schneider, Allianz Fahrweg, BAV: Internationale Literaturrecherche zum Thema Unterbau bei Bahnstrecken, 18.01.2022

[10]: Johannes Martin Mack, Untersuchungen zum Schichtübergang Unterbau-Schotter unter Berücksichtigung verschiedener Oberbaukonfigurationen, TU München, 2022

[11]: Nishant Kumar, Claudia Kossman, Stephan Scheriau and Klaus Six: An efficient physical-based method for predicting the long-term evolution of vertical railway track geometries

[12] ISO 14837-1 - 2005-07 Mechanische Schwingungen - Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr - Teil 1: Allgemeine Anleitungen.

5.3 Figures

Figure 1: Définitions de la voie ferrée....5
Figure 2: Gauche mouvement sinusoïdal du véhicule dans la voie en raison de la différence des rayons de roulement....7
Figure 3: Guidage des essieux....8
Figure 4: Diagramme coefficient d'adhérence – glissement (collection R. Müller)....9
Figure 5: Modèles véhicule – voie (gauche voie ferrée détaillée, droite voie ferrée pour élaboration des preuves)....10
Figure 6: Longueurs d'onde des défauts géométrique de la voie selon EN 13848-1....11
Figure 7: Différents points de vue lors de l'évaluation de la géométrie de la voie pour le véhicule et la voie ferrée (collection R. Müller)....12
Figure 8: Relations de la superstructure dynamique....14
Figure 9: Les quatre principaux types d'interaction véhicule - voie (collection R. Müller)....15
Figure 10: Distinction entre les différents types d'examen pour l'homologation des caractéristiques dynamiques des véhicules selon EN 14363....16
Figure 11: Plage de tracé et comportement des véhicules qui y sont attendus selon EN 14363....17
Figure 12: Etablissement des preuves pour l'interaction véhicule - voie ferrée (calcul et essai, collection R. Müller issue des travaux de l'ORE SVA B176)....18

Figure 13: Usures ondulatoires à ondes courtes – 2201 19
Figure 14: Usures ondulatoires à ondes longues sur le rail en intérieur de courbe....20
Figure 15: Usure latérale excessive – 2203 21
Figure 16: usure verticale excessive – 2204 22
Figure 17: Influence de la dureté de l'acier sur l'usure des rails 23
Figure 18: Equilibre des forces fixation des rails Source: Stefan Werner, KPZ Fahrbahn....24
Figure 19: Contrainte de contact du ballast en fonction de la surface de contact 29
Figure 20: Ligne de flexion sous charge unique avec (bleu) et sans (noir) semelles sous traverses élastiques....30
Figure 21: Etat du ballast après 100 mio. de tonnes brutes avec et sans semelle sous traverse....30
Figure 22: Conception typique d'une transition....31
Figure 23: Aide à la planification en fonction des objectifs 32
Figure 24: Pose d'un tapis sous ballast....34
Figure 25: Exemple d'une remontée de fines (zb)....35
Figure 26: Contraintes principales dans l'infrastructure lors du passage d'un train....35
Figure 27: Affaissement et élargissement latéral suite à des chocs verticaux 36
Figure 28: Types de construction de l'infrastructure 36
Figure 29: Géométrie d'affaissement d'un joint éclissé 39
Figure 30: Formule pour le calcul de la force P2 [12]....40
Figure 31 :Propagation du bruit solidien et perception des vibrations et du bruit solidien 42
Figure 32: Propagation des vibrations dans le sol et les bâtiments 43
Figure 33: Perception de vibrations mécaniques par l'être humain 44
Figure 34: Mesures de réduction des vibrations possibles (Aperçu CFF Roger Müller)....44
Figure 35: Exemple de visualisation des données de mesures dans le logiciel IRISSYS 46
Figure 36: Exemple d'une mesure d'affaissement (Densité spectrale de puissance (PSD))....47

5.4 Tableaux

Tableau 1: Différents modèles véhicule – voie ferrée selon l'objectif....13
Tableau 2: Valeurs indicatives pour le module d'élasticité en fonction de la qualité de portance....27
Tableau 3: Cas d'application principaux pour semelles sous traverses....27
Tableau 4: Classification des modules d'élasticité statique des semelles sous traverse [8]....28
Tableau 5: Module d'élasticité minimal des semelles sous traverse en fonction de l'infrastructure (Leykauf G. [5])....28