

Livrable 2025 P4 4.1

Maîtrise de système Interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique

Projet: 4 Rigidité de la voie

Module: 3 Vadémécum Voie ferrée – Application des bonnes pratiques relatives aux produits ferroviaires concernant les cas d’application déterminants pour les chemins de fer à voie métrique

Vadémécum Voie ferrée



ID:	RAILPlusSF-00129	Livrable inclus dans l’objectif détaillé de l’OFT
Date / Statut:	19.05.2026 / Validé	Nombre de pages 48
Niveau de confidentialité	Public	
Auteur:	Albin Gehrigier / Appenzeller Bahnen AG Dr Matthias Landgraf / evias rail consulting	
Vérifié:	Markus Barth / RAILplus Martin Siegen / Matterhorn Gotthard Bahn	
Approuvé:	Martin Siegen / Matterhorn Gotthard Bahn Lysandre Pasquier / Transports publics fribourgeois David Baer / Matterhorn Gotthard Bahn	

Synthèse

Pour les chemins de fer à voie métrique, choisir des composants de la voie ferrée selon une approche économique est un levier essentiel pour optimiser les coûts du cycle de vie et garantir la stabilité du système. Face à la diversité des stratégies en matière de composants, aux exigences croissantes en termes de disponibilité et de durabilité ainsi qu'aux ressources limitées, il est nécessaire de disposer d'une base décisionnelle solide et harmonisée. Le présent vadémécum rassemble les conclusions issues de retours d'expérience, d'analyses et de simulations menées dans le cadre de la maîtrise de système « Interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique ». Il s'adresse aux spécialistes chargés de prendre des décisions stratégiques et opérationnelles concernant la voie ferrée.

Les études montrent que le choix de la qualité des rails, du type de traverses et des semelles exerce une influence déterminante sur la rentabilité, la qualité de marche et les coûts de maintenance. Les rails à haute résistance permettent de réduire l'usure ainsi que les coûts d'entretien de la surface des rails, tandis que des concepts optimisés de traverses et de semelles diminuent sensiblement la charge sur l'infrastructure et la dynamique du système. Les résultats mettent en évidence l'importance d'une stratégie coordonnée en matière de composants, intégrant à la fois les aspects techniques et économiques.

Les recommandations ci-après constituent le cœur de la stratégie élaborée en matière de composants. Elles fournissent aux chemins de fer des orientations claires sur la manière dont un choix ciblé des matériaux et une optimisation coordonnée du système peuvent diminuer les coûts du cycle de vie, accroître la sécurité d'exploitation et réduire la maintenance tout en la rendant plus prévisible. La stratégie prend en compte les différents profils de lignes, les charges et les exigences d'exploitation propres aux chemins de fer, offrant ainsi une base pratique pour les décisions d'investissement et d'entretien.

- **Stratégie en matière de qualité des rails**
 - **R400HT**: pour les courbes serrées (rayon inférieur à 300 m) afin de réduire l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues et l'usure dynamique.
 - **R350HT**: pour les rayons intermédiaires (rayon compris entre 300 et 600 m) ou dans le cadre d'une stratégie à qualité unique («UniRail») sur les tronçons comportant de nombreuses courbes.
 - **R260**: pour les tronçons droits (rayon supérieur à 600 m) et les lignes moins sollicitées.
 - Un profil de rail uniforme **46E1** est recommandé. Le profil de la roue et celui du rail doivent être adaptés l'un à l'autre.
- **Stratégie en matière de traverses**
 - **Traverses en béton avec semelles**: il s'agit des traverses standard pour les lignes soumises à d'importantes charges (plus de 5000 TB/j). Elles améliorent la position de la voie et réduisent l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues ainsi que la sollicitation du ballast.
 - **Traverses en acier**: elles sont utilisées sur les lignes soumises à de faibles charges (moins de 5000 TB/j) ou lorsque l'épaisseur du lit de ballast est limitée. Elles sont économiques, mais ne conviennent pas aux vitesses élevées.
- **Semelles**
 - Les **semelles souples (85 kN/mm)** présentent des avantages du point de vue de l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues et de la transmission verticale des charges.
 - Les semelles rigides (700 kN/mm) réduisent le bruit (grincement des rails). Afin d'équilibrer les avantages et les inconvénients respectifs des deux solutions, il est recommandé d'utiliser des **semelles moyennement rigides (200 kN/mm)**.
 - Dans les zones sensibles au bruit et en présence d'exigences spécifiques, il est possible d'utiliser des **semelles rigides (700 kN/mm)**. Il convient cependant de les éviter autant que possible dans les courbes (rayon inférieur à 300 m) en raison de l'apparition accrue de l'usure ondulatoire à ondes longues (et du bruit qui en résulte).

En complément, il est recommandé de mettre en place des outils numériques pour la surveillance de l'état ainsi que les analyses du cycle de vie et d'harmoniser les stratégies en matière de composants.

La durabilité et l'utilisation efficace des ressources restent des principes directeurs fondamentaux. Des informations complémentaires issues de simulations et d'essais en exploitation en cours sur l'interaction entre le véhicule et la voie ferrée sont attendues et seront intégrées dans la mise à jour du vadémécum.

Table des matières

1	Introduction	6
1.1	À propos de la maîtrise de système	6
1.2	Situation initiale	6
1.3	Finalité, objectif et délimitation	6
1.4	Définitions	7
1.4.1	<i>Termes de la voie ferrée</i>	<i>7</i>
1.5	Bibliographie	8
1.5.1	<i>État de la technique en matière de rigidité de la voie.....</i>	<i>8</i>
1.5.2	<i>Application et recommandations découlant des résultats de la classification des éléments standard de la voie métrique</i>	<i>8</i>
1.5.3	<i>Fiches d'information sur les composants de la voie ferrée et leurs effets</i>	<i>8</i>
1.5.4	<i>Connaissances de base sur l'interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique (état: 2023).....</i>	<i>9</i>
1.5.5	<i>Catalogue des dommages Voie ferrée et catalogue des dommages Interaction – Surfaces de contact roue et rail.....</i>	<i>9</i>
2	État des lieux	10
2.1	Problèmes soulevés par l'enquête.....	10
2.2	Composants de la voie ferrée.....	10
2.3	Mesures visant à réduire l'usure.....	11
2.4	Détermination des décisions et mesures techniques et économiques nécessaires	11
3	Facteurs de coûts.....	12
3.1	Rapport entre les besoins d'investissement annuels dans le renouvellement et dans l'entretien	12
3.2	Coûts de construction.....	13
3.2.1	<i>Structure de la voie ferrée</i>	<i>13</i>
3.2.2	<i>Coûts des matériaux des éléments de la voie ferrée dans la superstructure ballastée</i>	<i>14</i>
4	Les éléments de la voie ferrée et leurs effets	16
4.1	Rail.....	16
4.2	Point d'appui	16
4.3	Traverse.....	18
4.4	Ballast	19
4.5	Infrastructure / terrain naturel	20
4.6	Rigidité de la voie – transitions sur la voie ferrée.....	22
5	Gestion des installations	25
5.1	Gestion stratégique et opérationnelle des installations	25
5.2	Gestion des informations sur la voie ferrée (gestion de données d'actifs)	26
5.3	Stratégies de maintenance.....	28
5.4	Planification du renouvellement.....	28
6	Influence des composants de la voie ferrée	31
6.1	Conclusions des modèles de simulation.....	31
6.2	Conclusions : rail et appui de rail.....	34
6.3	Conclusions: traverse, ballast et terrain naturel.....	35
7	Recommandations pour la stratégie en matière de composants	37

8	Optimisation grâce au choix des composants et à la maintenance	41
8.1	Optimisation grâce au choix des composants.....	41
8.2	Optimisation grâce à la maintenance	43
8.3	Potentiels d'optimisation futurs grâce à des innovations.....	45
9	Perspectives	46
10	Listes.....	47
10.1	Références.....	47
10.2	Figures.....	47
10.3	Tableaux	48

1 Introduction

1.1 À propos de la maîtrise de système

L'interaction entre le véhicule et la voie ferrée est déterminante pour la sécurité d'exploitation, la rentabilité et l'impact environnemental des chemins de fer à voie métrique. Au cours des dernières années, les problèmes dans ce domaine se sont multipliés, notamment une usure excessive des roues et des rails, une augmentation des émissions de bruit ainsi que des restrictions de disponibilité des véhicules. Ces difficultés entraînent une hausse des coûts de maintenance et nuisent à l'efficacité du système dans sa globalité.

Afin de répondre de manière méthodique à ces problématiques techniques et opérationnelles complexes, l'Office fédéral des transports (OFT) a confié à RAILplus AG la maîtrise temporaire du système « Interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique ». L'objectif de cette initiative à l'échelle de la branche est de développer, sur la période 2022-2027, une approche coordonnée qui, grâce à l'acquisition ciblée de connaissances, à la mise en œuvre de mesures techniques et à l'élaboration de recommandations pratiques, pose les bases d'une optimisation durable de l'interface entre le véhicule et la voie ferrée.

Dans le cadre de cette maîtrise de système, les lacunes existantes en matière de connaissances sont analysées, les connaissances techniques sont consolidées et de nouvelles compétences sont développées, notamment au moyen d'offres de formation et de formats d'apprentissage numériques. Les connaissances acquises sont par exemple intégrées dans les ouvrages de référence en matière de technique ferroviaire (RTE) de l'Union des transports publics (UTP) et mises à la disposition de tous les chemins de fer à voie métrique ainsi que d'autres parties intéressées.

Les centres Voie métrique nouvellement créés sont une solution amenée à succéder à la maîtrise temporaire du système Interaction, qui restera en place jusqu'en 2027.

Ces centres préservent les connaissances acquises dans le cadre de la maîtrise de système, les transfèrent dans la pratique opérationnelle des chemins de fer et apportent à ces derniers conseil et soutien. De surcroît, ils encouragent les échanges au sein de la branche, assurent le transfert de connaissances et garantissent le développement continu des connaissances.

1.2 Situation initiale

Les charges exercées sur la voie ferrée des chemins de fer à voie métrique ont considérablement augmenté ces dernières années, sous l'effet de charges par essieu plus élevées, d'une cadence horaire plus dense, d'une traction accrue et d'une plus grande rigidité des bogies. Cette évolution entraîne une usure accrue des roues, de la superstructure et de l'infrastructure, et en fin de compte une dégradation de la qualité de la position de la voie ainsi qu'une augmentation du bruit et des vibrations. Parallèlement, les exigences en matière d'impact environnemental, de protection contre le bruit et de limitation des vibrations se renforcent, en particulier dans les zones résidentielles sensibles.

Une enquête menée auprès des chemins de fer à voie métrique a mis en évidence des défis techniques et économiques majeurs. Parmi ceux-ci figurent l'augmentation des coûts de maintenance, le manque de connaissances et l'insuffisance de bases de données sur l'interaction entre le véhicule et la voie ferrée, ainsi que la nécessité de mieux maîtriser les coûts du cycle de vie.

La maîtrise de système véhicule/voie ferrée à écartement métrique avec le sous-projet P4 « Rigidité de la voie » a été lancée afin de relever ces défis de manière ciblée. Son objectif est d'améliorer la rentabilité globale du système voie ferrée/véhicule. Les connaissances ainsi acquises ont été regroupées de manière structurée dans le présent vademécum et constituent une base pratique pour l'évaluation et la sélection des éléments de la voie ferrée. Le contenu s'appuie sur les documents mentionnés à la section 1.5 qui sont considérés comme établis, sans qu'il soit procédé à des citations directes.

1.3 Finalité, objectif et délimitation

Le vademécum Voie ferrée est un outil pratique destiné à la sélection et à l'évaluation économiques d'éléments de la voie ferrée du point de vue du système global véhicule/voie ferrée. Il rassemble les connaissances acquises dans le cadre de la maîtrise de système et les traduit en recommandations

d'actions concrètes. Il s'adresse aux spécialistes de la planification, de la construction, de l'exploitation et de la maintenance, et en particulier à la gestion des installations Voie ferrée. Le présent vadémécum aide les gestionnaires d'infrastructure à prendre des décisions éclairées, à optimiser les coûts du cycle de vie et à garantir la qualité du système à long terme.

Il vise à documenter l'état actuel des connaissances, mettre en évidence les lacunes existantes, formuler des recommandations pour l'application et le développement de standards et créer une base pour la poursuite des travaux de recherche et de développement. Son contenu s'appuie sur les travaux menés dans le cadre de la maîtrise de système véhicule/voie ferrée à écartement métrique.

L'objectif est d'optimiser les coûts du cycle de vie de la voie ferrée, d'améliorer la planification de la maintenance, de garantir la qualité du système à long terme et de développer des stratégies à court comme à long terme sur la base des connaissances actuelles.

La présente version constitue la première publication du vadémécum Voie ferrée en 2025. Une édition mise à jour avec les conclusions finales du sous-projet P4 suivra en 2026. En complément, un rapport final détaillé intitulé « Voie ferrée des chemins de fer à voie métrique / Conclusions du sous-projet Rigidité de la voie » sera publié.

Le vadémécum se concentre sur les voies ferrées ballastées dans le cadre d'une exploitation par adhérence des chemins de fer à voie métrique. Toutefois, les connaissances et recommandations présentées peuvent dans de nombreux cas être transposées aux lignes à crémaillère et à d'autres types de voies ferrées.

1.4 Définitions

1.4.1 Termes de la voie ferrée

<u>Infrastructure</u>	L'infrastructure désigne la partie située sous la couche de base et comprend la couche d'étanchéité, la couche de fondation et la couche de transition.
<u>Superstructure</u>	La superstructure désigne la partie du corps de voie au-dessus de la couche de base et comprend les rails, les traverses, les attaches de rails et le ballast.
<u>Terrain naturel</u>	Le terrain naturel est le terrain ou la roche que l'on trouve sous la superstructure ou l'infrastructure. L'infrastructure et le terrain naturel constituent la fondation de la voie.
<u>Voie</u>	La voie comprend toutes les parties d'installation nécessaires à l'exploitation du chemin de fer.
<u>Voie ferrée</u>	Voie franchie par des véhicules ferroviaires et influencée par le passage de ces derniers. La voie ferrée comprend l'infrastructure et la superstructure, ainsi que l'évacuation et la sortie des eaux.

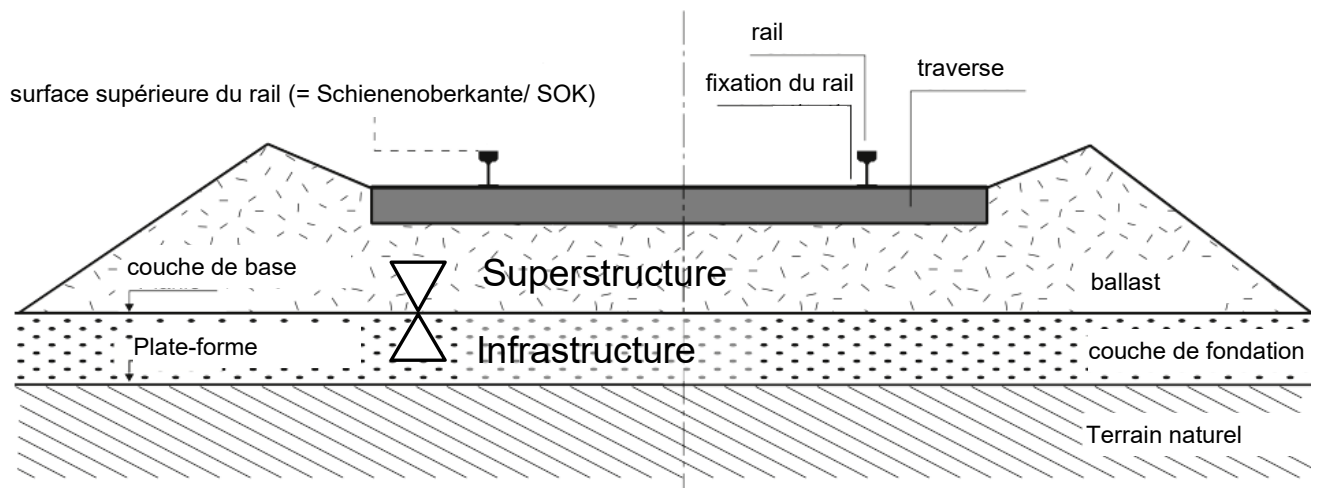


Figure 1: termes de la voie ferrée [1]

1.5 Bibliographie

Cette section offre un aperçu structuré de tous les documents pertinents ayant servi de base à la rédaction du présent document. Elle prend en compte aussi bien les documents internes que les sources accessibles au public. Les documents cités contiennent des informations essentielles qui ont contribué au fondement technique et à la formulation de conclusions dans le cadre du projet «Rigidité de la voie».

1.5.1 État de la technique en matière de rigidité de la voie

Le document « Etat de la technique rigidité de la voie » est un rapport technique rédigé dans le cadre du projet « Rigidité de la voie » au début de la maîtrise de système. Il sert de référence centrale pour la situation actuelle et l'évolution des chemins de fer à voie métrique concernant les propriétés mécaniques de la voie ferrée et leurs effets sur l'exploitation, la maintenance et l'environnement.

Ce rapport constitue une base essentielle pour déterminer les besoins en matière de recherche dans le cadre du projet. Il montre que des approches de recherche ciblées sont nécessaires, en particulier dans le domaine de l'interaction entre la voie ferrée et le véhicule ainsi que dans l'évaluation des effets du bruit et des vibrations, afin de développer les connaissances existantes et de promouvoir des solutions pratiques.

1.5.2 Application et recommandations découlant des résultats de la classification des éléments standard de la voie métrique

Dans le cadre de la tâche systémique, de nouveaux éléments standard ont été développés et mis en place de manière méthodique, spécifiquement pour la voie métrique. Le rapport correspondant décrit la méthodologie employée pour définir ces éléments standard à partir des données historiques relatives à la maintenance et aux installations. L'objectif est de segmenter le réseau en tronçons comparables présentant un comportement à l'usure similaire, afin d'optimiser les stratégies de maintenance et de permettre la réalisation d'analyses de rentabilité. Les éléments standard constituent ainsi une base pour des évaluations uniformes et des processus décisionnels transparents dans la gestion de l'infrastructure. La méthodologie a été élaborée à partir des données et des retours d'expérience de cinq chemins de fer et doit être adaptée en continu afin de tenir compte des nouvelles connaissances et des nouveaux matériaux.

1.5.3 Fiches d'information sur les composants de la voie ferrée et leurs effets

Les fiches d'information établies dans le cadre de la tâche systémique constituent un outil de travail interne du projet « Rigidité de la voie ». Des fiches d'information spécifiques ont été créées pour tous les éléments de la voie ferrée, tels que les rails, les traverses, le ballast, etc., ainsi que pour leurs effets sur le bruit, l'usure, la position de la voie et les vibrations. Elles présentent dans un premier temps un aperçu des connaissances existantes, de la situation actuelle et de l'état de la technique, tant d'un point de vue général que spécifique à la voie métrique. Les besoins en matière de recherche sont ensuite identifiés du point de vue du projet « Rigidité de la voie ». Une partie de ces besoins fait l'objet d'un

traitement dans le cadre du projet, soit directement dans les fiches d'information, soit dans des documents complémentaires.

L'objectif des fiches d'information est de constituer une base structurée pour la poursuite des activités de recherche et de développement dans le domaine de la rigidité de la voie. Elles servent à la fois d'ouvrage de référence et d'aide à la décision pour les spécialistes internes au projet.

1.5.4 Connaissances de base sur l'interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique (état: 2023)

Ce document présente les connaissances de base sur l'interaction entre le véhicule et la voie ferrée qui ont été établies au début de la maîtrise de système en 2023. Il offre un aperçu structuré des aspects techniques, opérationnels et économiques de l'interaction sur voie métrique. Son contenu s'appuie sur les conclusions de la tâche systémique et sur des recherches internationales. Il est publié par l'Union des transports publics (UTP) et sert de base à l'élaboration du règlement D RTE 29051.

1.5.5 Catalogue des dommages Voie ferrée et catalogue des dommages Interaction – Surfaces de contact roue et rail

Dans le cadre de la maîtrise de système « Interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique », deux autres documents ont été élaborés par RAILplus en complément au présent vadémécum. Le catalogue des dommages Voie ferrée [2] est élaboré parallèlement au vadémécum, leurs contenus respectifs étant étroitement liés. Il offre un aperçu méthodique des dommages typiques aux éléments de la voie ferrée des chemins de fer à voie métrique et sert de base à l'évaluation de l'état, à la planification de la maintenance et à la gestion stratégique de l'infrastructure. Le catalogue des dommages Interaction – Surfaces de contact roue et rail [3] se concentre quant à lui sur les défauts des rails en lien avec l'interaction entre la roue et le rail. Ce document est également élaboré par RAILplus et complète l'examen de la voie ferrée en tenant compte des sollicitations dynamiques et des interactions au niveau des surfaces de contact.

2 État des lieux

2.1 Problèmes soulevés par l'enquête

En 2022, une vaste enquête [4] a été menée auprès de 17 chemins de fer membres de RAILplus, de deux entreprises de tramways et de l'entreprise Forchbahn, qui a depuis rejoint RAILplus. L'objectif était d'identifier les plus grands défis et les principales lacunes dans les connaissances en matière de voie ferrée. Les principales conclusions sont résumées ci-après.

- Augmentation des charges : la plupart des chemins de fer enregistrent une nette augmentation des charges quotidiennes moyennes des voies, due à une densification de la cadence ainsi qu'à des charges par essieu plus élevées.
- Augmentation des coûts due à l'interaction des systèmes : plus de la moitié des chemins de fer attribuent l'augmentation constatée des coûts de maintenance à une interaction sous-optimale entre les véhicules et la voie ferrée.
- Problématique du bruit : environ 80% des chemins de fer signalent des problèmes de bruit, en particulier un crissement dans les courbes serrées, ce qui donne lieu à des plaintes de la part des riverains. Un bruit général sans cause clairement identifiable est également mentionné.
- Types de dommages : l'usure du rail et l'usure ondulatoire à ondes longues sont les principales formes de dommages observées sur la table de roulement. En outre, environ la moitié des chemins de fer fait état d'une usure accrue sur les flancs des rails, ce qui indique un graissage insuffisant des boudins. La maintenance des rails est principalement conditionnée par l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues, celle-ci influant de manière déterminante sur les besoins en travaux de meulage et la fréquence des interventions.
- Recensement non uniforme des dommages : il n'existait jusqu'à présent aucun catalogue de dommages uniforme et méthodique pour la voie métrique, ce qui rendait difficile l'évaluation comparative et la documentation structurée des dommages. Avec le catalogue des dommages Voie ferrée et le catalogue des dommages Interaction – Surfaces de contact roue et rail, deux documents de référence complets élaborés par RAILplus sont désormais disponibles pour la première fois. Ils constituent la base d'un recensement et d'une évaluation standardisés des dommages dans le cadre de la maîtrise de système « Interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique » et proposent en outre une méthodologie uniforme pour la gestion de l'infrastructure.

Ces résultats confirment la nécessité d'une approche structurée de la planification et de l'évaluation des voies ferrées, telle qu'elle est préconisée dans le présent vadémécum.

2.2 Composants de la voie ferrée

L'enquête [4] révèle qu'en 2022, la plupart des chemins de fer utilisaient le profil de rail 46E1 et la qualité d'acier R260. Depuis quelques années, des aciers à haute résistance tels que l'acier R350HT ou R400HT sont également utilisés de manière sporadique sur des tronçons fortement sollicités ou dans des courbes serrées.

Les traverses en béton sont de plus en plus utilisées dans les constructions nouvelles, bien que différents types de traverses soient encore présents. Les semelles sous traverse sont encore peu répandues. La rigidité des semelles varie considérablement, de 85 kN/mm à 200 kN/mm et jusqu'à 700 kN/mm.

La plupart des chemins de fer ne disposent pas d'une infrastructure standardisée ; dans de nombreux cas, l'infrastructure d'origine datant de la construction est encore utilisée. Le cycle de bourrage est compris entre quatre et huit ans, en fonction de la charge. Le meulage des rails est effectué par tous les chemins de fer, principalement pour corriger les défauts de surface.

Les grands chemins de fer surveillent la position de la voie à l'aide de wagons de mesure, tandis que les petits chemins de fer effectuent des mesures manuelles ponctuelles et des évaluations visuelles. La surveillance est réalisée selon les paramètres usuels énoncés dans le règlement R RTE 22570.

Les traverses en acier sont réputées économiquement avantageuses pour des niveaux de charge faibles à intermédiaires et présentent, y compris en fin de vie, une valeur résiduelle en tant que matière première. Les traverses en bois présentent de bonnes propriétés en termes de rigidité de la voie ferrée,

de bruit et de vibrations, mais ne conviennent pas aux charges élevées et s'usent plus rapidement, en particulier dans les environnements humides. Ces traverses étant imprégnées de substances polluantes, leur élimination exige des ressources financières et humaines importantes.

2.3 Mesures visant à réduire l'usure

Afin de réduire l'usure des roues et des rails et d'améliorer la protection contre le déraillement, tous les chemins de fer misent sur des systèmes embarqués de graissage des boudins (SKS). Certains chemins de fer utilisent en outre le conditionnement du champignon du rail (SKK) afin de réduire le crissement dans les courbes, l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues et l'usure. L'efficacité de ces mesures varie en fonction du chemin de fer et des conditions d'utilisation.

2.4 Détermination des décisions et mesures techniques et économiques nécessaires

Les défis présentés dans les sections précédentes montrent clairement que la voie ferrée des chemins de fer à voie métrique est aujourd'hui soumise à des tensions techniques, économiques et opérationnelles complexes. Les résultats de l'enquête [4] révèlent non seulement une augmentation des charges et des dommages, mais aussi un manque de structuration dans le recensement et l'évaluation de l'état des voies ferrées. De surcroît, il existe d'importantes différences dans les techniques utilisées, les stratégies de maintenance déployées et la disponibilité des données.

À cela s'ajoute un manque de connaissances techniques spécifiques au sein des chemins de fer. Ces connaissances existent en Europe, mais ne sont jusqu'à présent pas suffisamment exploitées.

Dans ce contexte, il apparaît clairement qu'il est urgent de disposer d'une base structurée et transversale pour l'évaluation et la sélection des éléments de la voie ferrée. Le présent vadémécum comble cette lacune en présentant de manière méthodique les composants pertinents, leurs effets et leur potentiel d'optimisation pour la voie métrique. Il crée ainsi une base technique commune pour les gestionnaires d'infrastructure, les planificateurs, les gestionnaires d'installations de la voie ferrée et les responsables de la maintenance.

Les chapitres suivants s'appuient sur cette base et montrent comment le choix ciblé des composants, des stratégies de maintenance coordonnées et une gestion stratégique des installations peuvent améliorer à la fois les coûts du cycle de vie et la qualité du système. Le présent vadémécum constitue donc non seulement un ouvrage de référence, mais aussi un outil stratégique pour le développement de la voie ferrée à écartement métrique.

3 Facteurs de coûts

La voie ferrée compte parmi les parties d'installation les plus coûteuses dans l'infrastructure. La maîtrise de système véhicule/voie ferrée à écartement métrique a pour objectif de fournir aux chemins de fer à voie métrique des solutions pratiques permettant une réduction significative des coûts du cycle de vie. L'analyse ci-après met en lumière les principaux facteurs de coûts de la voie ferrée et sert de base aux décisions stratégiques en matière de gestion de la maintenance. Elle repose sur les données concrètes de certains chemins de fer à voie métrique, mais reflète les structures et les défis typiques que l'on rencontre dans l'ensemble du domaine de la voie métrique. Elle offre ainsi une base solide pour la définition de recommandations générales et l'identification des mesures à mettre en place.

Dans le présent contexte, seule la voie ferrée en pleine voie, y compris l'infrastructure, est prise en compte, le but étant d'identifier les principaux facteurs de coûts et de mettre en évidence les potentiels d'optimisation. Les aspects tels que l'évacuation des eaux, la stabilisation de la banquette, le cheminement des câbles, le service hivernal et l'entretien de la végétation ne sont pas pris en compte. L'analyse se base sur des projets actuels du Matterhorn Gotthard Bahn, des Chemins de fer rhétiques et des Chemins de fer appenzellois. Les prix au mètre de voie sont donnés à titre indicatif et ne sont pas directement transposables aux chemins de fer à voie métrique, car des facteurs tels que la situation géographique, l'infrastructure et la technologie choisie ont une influence considérable à cet égard. Les coûts liés aux difficultés d'exploitation ne sont pas pris en compte.

3.1 Rapport entre les besoins d'investissement annuels dans le renouvellement et dans l'entretien

La majeure partie des investissements dans la voie ferrée d'un chemin de fer à voie métrique est consacrée au renouvellement. Compte tenu de cette part importante, il est particulièrement recommandé de fonder la planification du renouvellement sur des données tenant compte des aspects techniques et économiques. Dans ce contexte, le potentiel d'influence sur les coûts totaux grâce à une planification ciblée est particulièrement élevé.

Les investissements présentés dans la **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** illustrent les dépenses consacrées à la maintenance et au maintien de la substance d'un chemin de fer à voie métrique de taille moyenne. Le rapport entre les besoins d'investissement pour le maintien de la substance (80%) et la maintenance (20%) est plus élevé pour le chemin de fer examiné que ce n'est généralement le cas pour les chemins de fer à voie normale dans les régions DACH. Habituellement, la maintenance est plus importante. Cette situation s'explique par le rattrapage actuel dans le domaine du maintien de la substance et par le remplacement moindre des rails qui en résulte. De plus, d'importantes différences ont été constatées dans la stratégie de meulage au sein des chemins de fer RAILplus examinés.

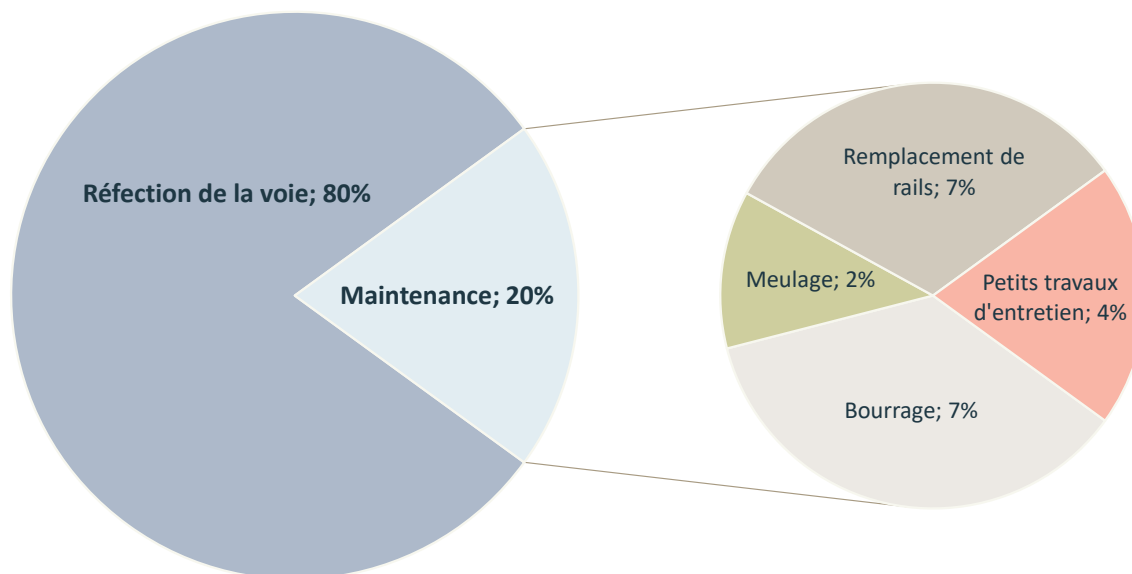


Figure 2: fonds investis dans la voie ferrée d'un chemin de fer à voie métrique membre de RAILplus

Le moyen le plus prometteur de réduire les coûts de maintien de la substance consiste à augmenter la durée de vie tout en planifiant un renouvellement en fonction de l'état. Une augmentation de la durée de vie jusqu'à un optimum économique requiert une qualité initiale élevée (substance), combinée à une stratégie de maintenance également axée sur l'état. Les coûts des mesures de maintenance pertinentes (bourrage, meulage, etc.) ne représentent qu'une petite partie des coûts totaux. Cependant, les effets d'une stratégie de maintenance optimisée sur la rentabilité peuvent être significatifs. Afin de minimiser les coûts à l'échelle du système global du point de vue du coût du cycle de vie, des mesures continues et des descriptions de l'état sont nécessaires.

Dans la branche des chemins de fer à voie métrique, les outils de gestion stratégique et opérationnelle des installations doivent encore être développés et mis en place. Ce document présente des approches concrètes permettant de réduire les coûts du cycle de vie et d'améliorer la rentabilité des mesures grâce à un choix ciblé des composants et à des stratégies de maintenance coordonnées.

3.2 Coûts de construction

3.2.1 Structure de la voie ferrée

Trois types d'infrastructure ont particulièrement fait leurs preuves dans la construction nouvelle et le renouvellement de la voie ferrée à écartement métrique:

- couche d'étanchéité bitumineuse (béton bitumineux de type AC RAIL 16 ou AC RAIL 22);
- couche d'étanchéité en grave PSS¹ (couche de protection de la plate-forme);
- absence d'infrastructure (pas de couche d'étanchéité).

Le choix de la couche d'étanchéité ou de l'infrastructure influe sur les machines utilisées ainsi que le type d'interdiction de voie lors du renouvellement de la voie ferrée. La pose d'une couche d'étanchéité bitumineuse nécessite une interdiction totale et continue. En revanche, si une couche d'étanchéité en grave (PSS) est utilisée ou s'il s'agit d'un simple renouvellement de la superstructure, les travaux peuvent être effectués au cours d'interdictions de nuit. La pose de PSS au cours d'interdictions de nuit est techniquement réalisable, mais souvent peu pertinente d'un point de vue économique en raison du

¹ «Le matériau appelé grave PSS pour des raisons historiques est une grave sans liant résistante au gel, relativement imperméable, constituée d'agrégats minéraux solides, durables et de granulométrie continue...» (DE-OCF, DE 25, chiffre 4.3.9)

rendement de pose limité. Un inconvénient majeur réside dans la fragmentation temporelle du déroulement des travaux, qui peut nuire à la stabilité du processus et rendre difficile l'obtention d'une qualité d'exécution uniforme sur toute la longueur de la transformation, en particulier au niveau des transitions. En l'absence d'infrastructure, le ballast est directement posé sur le terrain naturel. Ce procédé a fait ses preuves sur les sols portants, à condition que le terrain naturel soit déjà exempt d'eau ou qu'une évacuation des eaux efficace soit assurée. L'eau étant considérée comme la principale cause des dommages à la voie ferrée, un terrain naturel sec et bien drainé augmente la durabilité de la voie ferrée. Dans le même temps, ce type d'aménagement présente un risque accru de discontinuités de rigidité et de remontées de boue, ce qui peut altérer la position de la voie.

Les méthodes automatisées de construction de voies ferrées, telles que le système TYREX, entraînent des coûts plus élevés que les méthodes conventionnelles, notamment lors d'un assainissement de l'infrastructure. Ces coûts résultent de l'utilisation intensive de machines au regard de la prestation à effectuer pour réaliser les travaux de transformation. Une comparaison directe des coûts est toutefois difficile, car les restrictions d'exploitation, les durées d'interdiction et les conditions logistiques ne sont pas prises en compte dans les prix indicatifs. La pose conventionnelle d'une couche d'étanchéité bitumineuse assure certes un niveau de qualité élevé, mais elle est plus coûteuse qu'un renouvellement de la superstructure avec criblage du ballast, lequel se distingue par une grande disponibilité. Le choix de la longueur totale de la transformation influe sur la rentabilité et la logistique du procédé de construction. Des longueurs de transformation plus grandes permettent une utilisation plus efficace des ressources, notamment en ce qui concerne l'utilisation des machines.

Les spécifications en vigueur des DE-OCF exigent souvent la pose d'une couche d'étanchéité bitumineuse (cf. également la section 4.5). **Sur un terrain naturel portant, assurant la fonction filtrante et non sensible à l'altération, en particulier vis-à-vis du gel, une couche d'étanchéité et de fondation n'est pas impérativement nécessaire d'un point de vue économique. Dans de telles conditions, il convient de s'interroger sur l'assainissement général de l'infrastructure.**

Le choix de la procédure de transformation doit donc tenir compte non seulement des exigences techniques, mais aussi des conditions d'exploitation et économiques, une approche qui a déjà fait ses preuves pour les chemins de fer à voie normale. Dans ce contexte, il semble judicieux que les gestionnaires d'infrastructure ou les centres Voie métrique réexaminent les stratégies existantes.

3.2.2 Coûts des matériaux des éléments de la voie ferrée dans la superstructure ballastée

Les coûts totaux de la superstructure se composent essentiellement des rails, des traverses (y compris les semelles), du ballast ainsi que du transport et de la manutention (construction des voies) (cf. la Figure 3). Les coûts des rails et des traverses sont largement comparables au sein des chemins de fer RAILplus. A contrario, les coûts du ballast varient en fonction de la disponibilité locale et de la distance de transport.

Les variantes de qualité supérieure, telles que les nuances d'acier à rail plus durs ou les traverses avec semelles, engendrent des coûts supplémentaires modérés d'environ 4% du coût total, mais peuvent s'avérer rentables grâce à un entretien réduit et une durée de vie plus longue. Dans l'ensemble, il apparaît que la haute qualité des composants et de l'exécution est rentable à long terme.

Lorsque des qualités d'aciers à rail à haute résistance sont utilisées, par exemple de l'acier R400HT, il convient de veiller à une géométrie de contact optimale entre la roue et le rail. C'est à cette condition seulement que l'utilisation d'aciers à roue et à rail à haute résistance peut aboutir à une réduction de l'usure et des dommages RCF sur l'élément en vis-à-vis.

Dans ce contexte, une recommandation générale en faveur de nuances à haute résistance semble judicieuse, notamment en vue d'une meilleure stabilité du profil et d'une durée de vie plus longue. Les recommandations détaillées concernant le choix des matériaux pour les rails sont présentées à la section 7 Recommandations pour la stratégie en matière de composants.

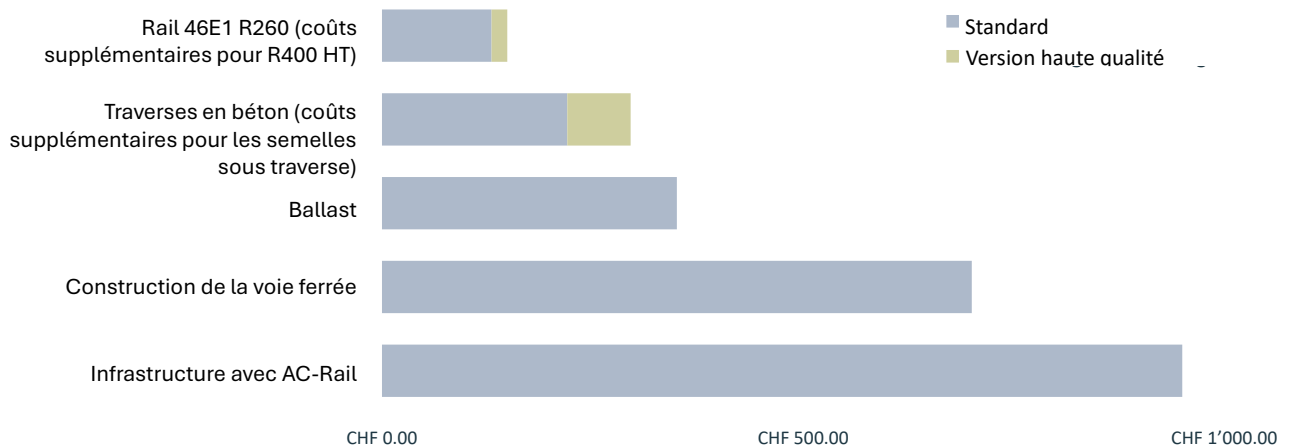


Figure 3: prix au mètre de voie des composants de la superstructure ballastée avec une construction des voies conventionnelle [CHF/m linéaire]

Pour les voies à écartement métrique, on utilise aujourd'hui principalement le profil de rail 46E1 dans trois nuances d'acier. La différence de prix entre les nuances d'acier à rail R260 et R350HT est d'environ 5,5%. La différence de prix entre les nuances R400HT et R260 est d'environ 15,5%². Si l'on tient compte des coûts du cycle de vie, ces différences s'atténuent en faveur des nuances à haute résistance.

Sur les lignes à crémaillère en Suisse, seuls les profils 36E3 et 46E1 sont utilisés en raison de l'altitude définie de la crémaillère par rapport au niveau supérieur du rail, qui exclut techniquement toute variation locale du profil.

Le choix des traverses s'appuie sur des critères techniques et économiques. Les traverses en béton avec semelles entraînent un surcoût d'environ 35 à 50 francs suisses par traverse³, mais offrent des avantages du point de vue de la maintenance. Plus la charge augmente, plus la rentabilité des traverses avec semelles augmente, car elles présentent une durée de vie plus longue et des coûts de maintenance réduits, en particulier sur les lignes fortement sollicitées.

Le choix du ballast dépend de la qualité, de la granulométrie, du type de roche et de la distance de transport. Le retraitement du ballast usagé, par exemple lors du criblage du ballast ou à l'atelier, est écologiquement judicieux, mais n'est rentable qu'en grandes quantités. En cas d'utilisation de matériaux recyclés, il est essentiel que le ballast réponde aux exigences requises, notamment en matière de forme des grains, de résistance et de perméabilité à l'eau. Le ballast recyclé ne peut être utilisé que s'il répond aux exigences techniques et convient à l'application concernée.

La Figure 3 montre clairement que les coûts d'assainissement de l'infrastructure font considérablement augmenter les coûts de renouvellement. Dans le cadre de la planification d'un renouvellement, il convient donc d'évaluer si un assainissement de l'infrastructure est nécessaire ou si le sol existant présente déjà une portance suffisante. Une comparaison avec la voie normale montre que les assainissements de l'infrastructure y sont nettement moins fréquents, une observation qui peut servir d'orientation générale pour la voie métrique.

² Prix selon le contrat-cadre pour les livraisons jusqu'au 31 août 2021 pour les chemins de fer membres de RAILplus

³ Prix selon le contrat-cadre 2024-2028 pour les chemins de fer membres de RAILplus

4 Les éléments de la voie ferrée et leurs effets

La voie ferrée en tant que système global se compose d'une infrastructure et d'une superstructure. Les différents composants de ce système, tels que les rails, les semelles/points d'appui, les traverses, le ballast et l'infrastructure ont une influence considérable sur les performances, la durabilité et la rentabilité de la voie ferrée. Les forces agissant sur la voie, notamment celles liées à la masse, à la vitesse et à l'accélération des véhicules, sont transmises par le rail aux traverses, puis au ballast et à l'infrastructure. Une interaction optimisée entre ces composants permet une répartition uniforme de la charge, réduit l'usure et le bruit et prolonge la durée de vie tout en diminuant les coûts de maintenance. Le choix de composants appropriés est donc un levier essentiel pour l'optimisation des coûts du cycle de vie. Dans le cadre du projet « Rigidité de la voie » de la tâche systémique, l'influence des différents composants sur le bruit, l'usure, les vibrations et la position de la voie a été étudiée. Ce chapitre décrit l'état actuel des éléments de la voie ferrée utilisés et leurs effets sur les quatre réponses du système dans le domaine de la voie métrique.

Un examen approfondi de l'influence des composants de la voie ferrée (conclusions tirées de la maîtrise de système) ainsi que des recommandations d'optimisation par le choix des composants et la maintenance sont présentés aux chapitres 6 et 8. Dans la pratique actuelle, différents éléments de la voie ferrée sont utilisés en fonction des exigences d'exploitation, des conditions locales et des objectifs stratégiques des gestionnaires d'infrastructure.

4.1 Rail

Le rail est un élément central de la transmission de la force entre le véhicule et la voie ferrée. Ses propriétés influent directement sur l'usure, le bruit et la durée de vie du système.

Les principaux dommages aux rails des chemins de fer à voie métrique sont l'usure ondulatoire à ondes longues («corrugation»), l'usure («wear»), les empreintes de patinage ainsi que l'écaillage («flaking») et les ébréchures («spalling » et « shelling») de matériau à la surface des rails. L'usure ondulatoire à ondes longues apparaît principalement sur le rail de la file basse dans les courbes serrées, tandis que l'usure se produit à la fois sur les côtés et sur le champignon des deux rails.

Le profil 46E1 est aujourd'hui principalement utilisé sur les voies métriques, car le profil 36E3 utilisé à l'origine n'est pratiquement plus disponible. Le profil 54E2 est également utilisé dans les zones d'aiguilles ou sur les terrains naturels meubles. En ce qui concerne la qualité d'acier, les chemins de fer utilisent les qualités R260, R350HT et, dans les zones particulièrement sollicitées, la qualité R400HT. Les rails sont généralement soudés sans joints, même dans les rayons serrés jusqu'à 40 m. Les joints isolants sont de plus en plus remplacés par des compteurs d'essieux.

L'expérience acquise en exploitation montre également que, même sur les voies métriques, les qualités d'acier à haute résistance telles que les qualités R350HT et R400HT peuvent réduire l'usure et limiter l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues. «À condition que la géométrie de contact entre la roue et le rail soit optimale, l'utilisation d'aciers à haute résistance pour les roues et les rails peut réduire l'usure et les dommages RCF sur l'élément en vis-à-vis.»[5] Cela a également été confirmé pour les voies métriques. Il convient toutefois de noter que les aciers plus durs sont davantage sensibles aux entailles, en particulier en cas de charge thermique.

4.2 Point d'appui

Les traverses en béton UTP-EM2 sont généralement équipées du système de fixation des rails W 14. Dans le système W 14, le point d'appui est constitué du crampon élastique SKI 14 et des plaques de guidage Wfp 14, et les semelles. Les semelles sous rail, également appelées «railpads», sont placées entre le patin du rail et la traverse et jouent un rôle central dans la superstructure. Elles répartissent uniformément les charges des roues, réduisent les tensions locales et protègent la surface des traverses des effritements. De plus, elles contribuent à l'amortissement des vibrations et ont un effet positif sur la durée de vie des traverses, du ballast et des systèmes de fixation. Lors du remplacement des rails, il est généralement déconseillé de réutiliser les semelles, compte tenu des charges élevées et des sollicitations mécaniques importantes. Leur fonction est déterminante pour la stabilité du système.

La rigidité verticale indiquée en kN/mm est la caractéristique principale de la semelle. Pour les traverses en béton, les chemins de fer à voie métrique utilisent généralement des semelles d'une rigidité de

85 kN/mm (souples), 200 kN/mm (moyennement rigides) et 700 kN/mm (rigides). Les semelles souples augmentent l'élasticité de la superstructure et améliorent la répartition de la charge sur plusieurs traverses. Elles permettent de réduire l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues dans les courbes serrées, mais s'accompagnent d'un faible taux de décroissance du bruit, ce qui peut avoir un impact négatif sur les émissions de bruit. Les semelles rigides assurent un couplage élevé entre le rail et la traverse et contribuent à réduire le bruit, mais présentent une capacité d'amortissement réduite vis-à-vis des vibrations à haute fréquence. Les semelles rigides étaient auparavant les plus utilisées, en particulier pour les traverses en béton. Les semelles moyennement rigides constituent un compromis et sont utilisées lorsque la protection contre le bruit et la réduction de l'usure sont toutes deux requises. À ce jour, l'expérience avec des semelles moyennement rigides est encore limitée ; leur potentiel pour la réduction du bruit et le comportement du système est actuellement à l'étude.

L'expérience en exploitation montre en outre que les semelles souples (85 kN/mm) ont certes des effets positifs sur la répartition de la charge et le ralentissement de l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues grâce à leur grande élasticité, mais elles permettent également davantage de mouvement au niveau du point d'appui, ce qui peut accentuer l'usure des systèmes de fixation et des traverses. Si des semelles souples sont utilisées, il convient donc d'étudier l'emploi de crampons élastiques avec une force de maintien accrue. **Les semelles moyennement rigides (200 kN/mm) sont en revanche considérées comme un compromis approprié entre élasticité, amortissement et durabilité et sont recommandées pour une utilisation sur la voie métrique.**

Un aperçu des effets attendus avec les semelles est présenté à la Figure 4 ci-après.







Paramètres	CI rigide	CI souple
Amélioration (augmentation) du taux de décroissance de la voie		
Réduction du bruit		
Réduction des sollicitations du ballast et des traverses		
Réduction de l'usure ondulatoire		
Meilleure répartition de la charge sur plusieurs traverses		
Durée de vie prolongée du système de fixation		

Figure 4: effets de la rigidité des semelles

Le choix de la semelle dépend en grande partie des caractéristiques de la ligne, des exigences d'exploitation et de la combinaison avec d'autres composants tels que les semelles sous traverse et les crampons élastiques. Les systèmes de fixation modernes sont équipés d'une protection anti-basculement intégrée afin de soulager les crampons élastiques lorsque les forces transversales sont élevées, en particulier dans les courbes serrées. De nouvelles combinaisons de semelles souples et de crampons élastiques renforcés donnent de bons résultats en matière d'émissions de bruit sur voie normale. Il reste à déterminer si ces résultats peuvent être transposés à la voie métrique. De plus, la température, la précontrainte, la charge par essieu et le vieillissement influent sur le comportement mécanique des semelles.

Les spécialistes parlent parfois de semelles à haut pouvoir d'amortissement. Il ne s'agit pas d'un type de semelles distinct, mais de variantes à pouvoir d'amortissement accru au sein de l'éventail de types existant. Ces semelles combinent une rigidité définie avec un meilleur amortissement des vibrations et donnent de premiers résultats positifs en matière d'émissions de bruit et de comportement du système sur voie normale. Les produits adaptés à sur la voie métrique sont en cours d'évaluation.

Il est également établi que, dans le cadre de l'exploitation des chemins de fer à voie métrique, le rail de la file haute peut se redresser (basculer) dans les courbes serrées. Bien que les rails soient généralement posés avec une inclinaison nominale de 1:20 (parfois aussi de 1:40), celle-ci peut varier considérablement en exploitation dans les courbes serrées, pouvant atteindre des inclinaisons de 1:35, 1:50, 1:100, voire des inclinaisons négatives. Selon l'état actuel des connaissances, le basculement et le surécartement irréversible dans les courbes serrées sont dus au point d'appui. Dans l'attente d'études détaillées, il convient de veiller à ce que le point d'appui soit correctement fixé. La boucle centrale du crampon élastique doit être serrée de manière à laisser un jeu maximal de 0,5 mm par rapport au rail.

Malgré ces modifications, la table de roulement présente encore souvent une inclinaison d'environ 1:20 en raison de l'usure. Ce phénomène fait l'objet d'études en cours dans le cadre de la tâche systémique. Les réflexions actuelles sur la nouvelle conception de l'écartement de la voie, le surécartement et le profil asymétrique des rails reposent toutefois sur l'hypothèse qu'à l'avenir, l'écartement de la voie et l'inclinaison effective des rails pourront être maîtrisés de manière ciblée dans l'exploitation et que les modifications indésirables pourront être évitées.

Sur la base de ces conclusions, une analyse de la situation du point d'appui est en cours. Dans ce cadre, des poses d'essai pour différents concepts de point d'appui sont en préparation. Celles-ci comprennent des semelles en plastique de haute qualité ainsi que des crampons élastiques présentant une force de maintien accrue. L'objectif est d'améliorer la stabilité de la fixation des rails et de limiter efficacement à l'avenir les modifications indésirables de l'inclinaison des rails, en particulier dans les courbes serrées.

4.3 Traverse

La traverse joue un rôle central dans la superstructure ballastée: elle répartit uniformément les forces verticales et horizontales issues du contact roue-rail dans le lit de ballast, garantit le maintien de l'écartement de la voie et contribue à la stabilité de la position de la voie. Aujourd'hui, différents types de traverses sont utilisés par les chemins de fer à voie métrique: en bois, en acier, en acier en Y, en béton, en bois artificiel et en plastique. Si les traverses en bois ont longtemps été largement utilisées en raison de leur élasticité et de leur facilité de mise en œuvre, elles sont de plus en plus remplacées par des traverses en béton pour des raisons écologiques et en raison de leur durée de vie limitée. Les traverses en béton offrent une longue durée de vie et une grande stabilité, mais nécessitent une infrastructure portante et, en raison de leur rigidité, ont tendance à favoriser l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues dans les courbes serrées, ce qui entraîne indirectement des émissions de bruit.

Les traverses en acier en Y se caractérisent par une grande rigidité du panneau de voie et sont particulièrement adaptées aux rayons serrés. Cependant, leur grande rigidité rend la maintenance difficile, car le bourrage conventionnel n'a qu'une efficacité limitée. D'une part, la mobilité élastique de la traverse est très restreinte durant le bourrage; d'autre part, sa géométrie particulière, notamment la position décalée des appuis de rails, rend difficile le compactage ciblé du ballast sous les points d'appui.

Les traverses en bois artificiel (FFU) conviennent techniquement pour des domaines d'application spécifiques (par exemple pour les ponts), mais leur utilisation comme traverses standard de ligne n'est pas rentable en raison des coûts d'investissement élevés qui y sont associés. La Figure 5 montre une comparaison des potentielles traverses standard de ligne (traverse en béton, traverse en béton avec semelle, traverse en acier, traverse en bois, traverse en plastique). Les traverses en plastique sont actuellement en phase d'essai. Leur comportement dans le temps, notamment en termes de résistance au déplacement transversal et de stabilité de l'écartement, n'a pas encore été suffisamment étudié pour la voie métrique.

	Durée de vie	Répartition des charges (besoin de bourrage)	Interaction (besoin de meulage)	Respiration de la voie en courbe QVW	Coûts (investissement)
Traverse en béton	Neutre	Neutre	Négatif	Négatif / Neutre	Positif
En béton avec semelle sous traverse	Positif	Positif	Positif	Positif / Positif	Neutre
Traverse en acier	Positif	Neutre	Neutre	Négatif / Neutre	Neutre
Traverse en bois	Négatif	Positif	Positif	Négatif / Négatif	Neutre
Plastique	Indéterminé	Positif	Indéterminé	Indéterminé	Indéterminé


■ Neutre
 👍 Positif
 👎 Négatif
 ? Indéterminé
  Besoins actuels en matière de recherche

Figure 5: avantages et inconvénients des types de traverses de ligne utilisés dans l'exploitation par adhérence

La semelle sous traverse est un élément central de la traverse en béton. Cet élément élastique ou plastique (au sens de la propriété mécanique « plastique » du terme, et non de la matière plastique), situé sous la traverse, améliore la répartition de la charge, augmente la résistance au déplacement transversal et contribue à réduire l'usure ondulatoire à ondes longues. Les traverses en béton avec semelles offrent donc l'avantage de réduire considérablement les travaux de meulage nécessaires par rapport aux traverses en béton conventionnelles. De plus, elles contribuent à ménager le ballast en augmentant la surface de contact entre la face inférieure de la traverse et la couche supérieure du ballast. L'utilisation accrue des traverses en béton avec semelles permettra d'étudier plus en détail ces effets dans les années à venir sur le réseau à voie métrique grâce à l'analyse des données de mesure.

Certains chemins de fer à voie métrique utilisent déjà de plus en plus de traverses en béton avec semelles, mais seules des semelles rigides étaient posées jusqu'à présent. Les premiers essais avec des variantes élastiques en cours depuis 2024. Les semelles particulièrement souples présentent un comportement plus régulier en matière de respiration de la courbe sur voie normale et pourraient également contribuer à l'avenir à réduire le rayon limite sur voie métrique. Selon le règlement RTE 22541, une respiration régulière latérale de la courbe de 20 mm est autorisée pour les rayons inférieurs à 200 m. Les premières conclusions indiquent que les traverses en béton avec semelles plastiques permettraient un comportement régulier en matière de respiration de la courbe, même pour des rayons de 100 m. Cette hypothèse fait actuellement l'objet d'études plus approfondies.

4.4 Ballast

Le ballast est une roche concassée à arêtes vives qui se caractérise par sa grande résistance à la compression, à l'abrasion et aux intempéries. Dans la superstructure, il sert à assurer la stabilité horizontale et verticale de la position de la voie, répartit les charges sur une surface admissible pour le terrain naturel, garantit l'évacuation des eaux et permet la réalisation des travaux d'entretien. Les types de roches typiques sont le basalte, la diabase, le granit, la roche métamorphique et la grauwacke. Afin de répondre aux exigences requises, le ballast est classé selon une courbe granulométrique idéale. Les spécifications techniques sont définies selon les normes SN EN 13450 et VSS 70110. Pour les chemins de fer à voie métrique, les recommandations du règlement RTE 21110 s'appliquent, selon lesquelles il convient d'utiliser du ballast de classe 1, 2 ou RC (ballast recyclé) en fonction du groupe de charges.

La qualité du ballast a une influence directe sur la durée de vie de la voie. Une proportion élevée de fines à la livraison peut avoir un impact négatif sur la qualité de la voie et son évolution dans le temps. Le respect des exigences techniques, notamment concernant la forme des grains, la résistance et la perméabilité à l'eau, doit être garanti, en particulier pour le ballast traité. Un ballast présentant une

angularité insuffisante peut nuire à la stabilité de la position de la voie et réduire la résistance au déplacement transversal, ce qui le rend impropre à une utilisation comme ballast pour la voie ferrée.

Afin de préserver le ballast, des éléments élastiques peuvent être posés au-dessus du lit de ballast, par exemple des semelles sous rail souples ou des semelles sous traverse plastiques. Ces deux approches augmentent la répartition de la charge ou la surface de contact et peuvent ralentir le vieillissement du ballast. Dans un souci de préservation des ressources, il est recommandé de réutiliser le ballast déposé pour le préballastage si c'est techniquement possible.

4.5 Infrastructure / terrain naturel

La structure de la voie se compose de différentes couches (cf. la Figure 1). L'infrastructure est particulièrement importante pour la stabilité et la fonctionnalité de la voie ferrée : elle assure des fonctions de portance et d'évacuation des eaux et influe considérablement sur la durée de vie de l'installation de voies.

L'infrastructure désigne la partie située sous la couche de base et comprend la couche d'étanchéité, la couche de fondation et la couche de transition. Le terrain naturel est le terrain ou la roche que l'on trouve sous la superstructure ou l'infrastructure. La limite entre l'infrastructure et le terrain naturel est appelée plate-forme.

L'infrastructure est une couche située sous le lit de ballast qui assure la fonction de portance et d'évacuation des eaux. Elle répartit les charges verticales découlant du contact roue-rail dans le terrain naturel, protège la voie ferrée contre les dommages causés par le gel et évacue l'eau de manière ciblée. Une portance ou une évacuation des eaux insuffisante peut avoir des conséquences graves, allant des tassements aux défauts de la position de la voie en passant par des remontées de boue. En particulier pour les chemins de fer à voie métrique, l'infrastructure a souvent évolué au fil du temps. C'est ainsi qu'environ 80% des lignes ne présentent pas de structure normalisée. Lors des renouvellements, on utilise aujourd'hui de plus en plus souvent une couche de protection de la plate-forme (PSS) ou une couche d'étanchéité bitumineuse (AC RAIL).

Le choix de l'infrastructure dépend de la géologie, de la charge et des conditions d'exploitation. La construction routière avec le système AC RAIL se compose d'une couche de fondation perméable à l'eau et d'une couche d'étanchéité bitumineuse imperméable à l'eau. Elle offre une portance et une durée de vie élevées, mais nécessite des durées d'interdiction plus longues lors de la pose. La PSS est plus facile à poser, même pendant les nuits, mais elle est moins durable. Dans les deux cas, une évacuation efficace des eaux est essentielle car elle empêche l'humidité de pénétrer dans le terrain naturel et évite la perte de portance qui en résulte. La couche d'étanchéité doit être posée avec une pente transversale, idéalement dans le sens du dévers, afin de minimiser les épaulements de ballast et éviter les écoulements de ballast.

Une attention particulière doit être accordée aux discontinuités de rigidité, par exemple dans la transition d'une voie ballastée à une voie sur dalle ou lorsque les conditions du terrain naturel sont variables. De telles transitions peuvent entraîner une usure accrue du ballast, voire des ruptures de rails. Des mesures ciblées, telles que l'utilisation de traverses avec semelles ou la gradation de la rigidité de l'infrastructure, permettent de réduire ces effets. La rigidité statique de la voie doit être aussi régulière que possible ; les mesures d'affaissement effectuées à l'aide du wagon de mesure fournissent des informations précieuses à cet égard (cf. la section 4.6).

Lors des renouvellements, il est indispensable d'effectuer une étude préalable du terrain naturel. Selon la déformabilité de la plate-forme, différentes mesures sont nécessaires, allant du remplacement des matériaux à l'utilisation de micropieux en passant par la mise en place de colonnes ballastées.

Les exigences relatives à la déformabilité de la plate-forme⁴ sont clairement définies dans les DE-OCF ad art. 25, DE 25, chiffre 4.3.3: «*Si le module de déformation M_{E1} sur la plate-forme est inférieur à 15 MN/m² pour une nouvelle construction ou à 6 MN/m² pour un projet de maintenance, il faut prendre des mesures d'amélioration de la plate-forme.*» Cette exigence souligne l'importance d'une étude

⁴ Les termes «infrastructure», « terrain naturel », « couche de base » et « plate-forme » sont expliqués dans la Figure 1.

minutieuse du terrain naturel, en particulier lors de renouvellements où la portance varie souvent considérablement.

Les essais de plaque ou les sondages de pression **sur la couche de base** sont les méthodes les plus pertinentes pour le dimensionnement de l'infrastructure. Une prudence particulière s'impose pour les voies ferrées existantes sans infrastructure normalisée : la couche supérieure du sol est souvent compactée depuis des dizaines d'années (« hard pan » – une couche de sol fortement consolidée avec une portance élevée) et doit être préservée autant que possible lors des renouvellements. **Indépendamment du fait que l'infrastructure présente une couche d'étanchéité ou non, une évacuation des eaux fonctionnelle doit dans tous les cas être assurée. Sans cela, la performance durable de la voie ferrée ne pourra pas être garantie.**

Dans le cadre de l'étude de l'infrastructure, il convient toujours d'examiner différentes variantes en mettant au point et en évaluant de manière méthodique tout un éventail de mesures possibles, allant des solutions minimales aux solutions maximales en passant par des solutions intermédiaires. Cette approche, qui est généralement appliquée pour les voies normales, permet une évaluation différenciée en termes d'utilité, de rentabilité et de faisabilité technique. Elle évite de choisir systématiquement la solution techniquement la meilleure, mais aussi la plus coûteuse, une approche qui est encore fréquente aujourd'hui au sein des chemins de fer à voie métrique. Au lieu de cela, des mesures plus économiques qui sont suffisamment fonctionnelles, répondent également aux exigences d'exploitation et présentent souvent une meilleure rentabilité peuvent également être mises en œuvre.

4.6 Rigidité de la voie – transitions sur la voie ferrée

En raison des changements de système inévitables, les transitions sur la voie présentent toujours des discontinuités dans les affaissements verticaux. Si elles ne sont pas réalisées correctement, ces discontinuités entraînent une réduction importante de la durée de vie de la superstructure et donc une augmentation des coûts d'entretien et du coût du cycle de vie. Dans les cas extrêmes, un entretien insuffisant peut même entraîner des problèmes déterminants pour la sécurité.

Les relations essentielles des affaissements verticaux de la voie sont décrites ci-après et les aspects qui doivent impérativement être pris en compte lors de la conception des transitions sur la voie ferrée sont exposés.

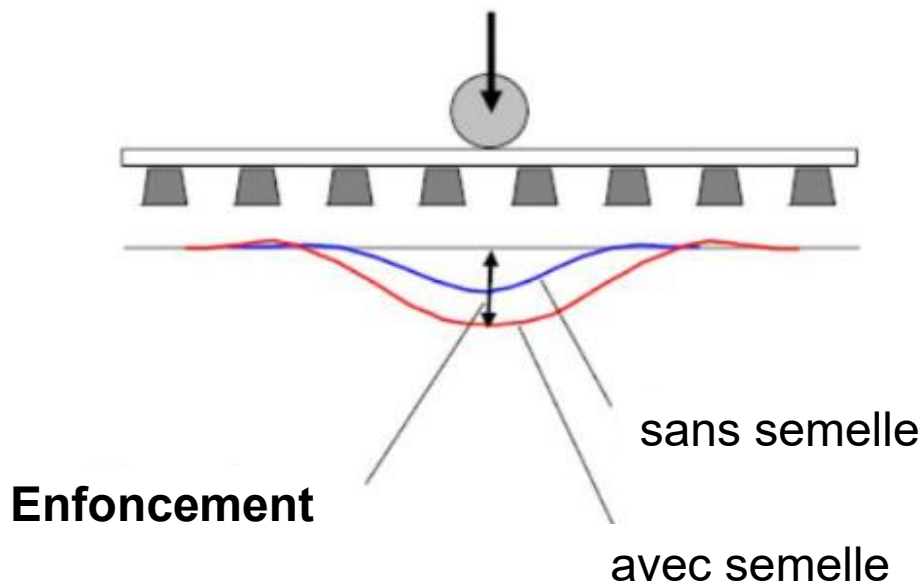


Figure 6: affaissement avec et sans semelles

En général, on vise une déflexion (affaissement vertical de la voie sous charge et comme mesure de la rigidité de la voie ferrée) d'environ 1 mm sous une charge par essieu de 20 t (DE-OCF ad art. 31, feuille n° 4N). Pour les chemins de fer à voie métrique, cela correspond approximativement à un affaissement quasi statique de 1,0 à 1,5 mm pour une charge par essieu de 16 t. Les points d'appui élastiques ont tendance à produire des affaissements à ondes longues, ce qui réduit les forces de contact entre la roue et le rail. D'ordinaire, l'affaissement ne doit pas dépasser environ 2 mm pour 16 t.

Les exemples présentés dans le Tableau 1 à Tableau 3 montrent les affaissements calculés selon Zimmermann, qui ont été déterminés à l'aide de l'outil de calcul correspondant [6] pour les paramètres spécifiés.

Tableau 1: calcul de l'affaissement selon Zimmermann avec une charge par essieu de 16 t, un entraxe des essieux de 2,4 m, semelle = 700 kN/mm

Type de traverse	Sans spécifique	infrastructure	PSS / AC RAIL
Traverse en bois	1,0 – 1,7 mm		
Traverse en acier	1,1 – 1,8 mm		1,0 – 0,9 mm
Traverse en Y	1,5 – 2,6 mm		1,4 – 1,2 mm
Traverse en béton	1,1 – 1,8 mm		1,0 – 0,9 mm
Traverse en béton avec semelle	1,4 – 2,0 mm		1,3 – 1,2 mm

Tableau 2: calcul de l'affaissement selon Zimmermann avec une charge par essieu de 12 t, un entraxe des essieux de 2,0 m, semelle = 700 kN/mm

Type de traverse	Sans spécifique	infrastructure	PSS / AC RAIL
Traverse en bois	0,8 – 1,3 mm		
Traverse en acier	0,8 – 1,4 mm		0,6 – 0,8 mm
Traverse en Y	1,2 – 2,1 mm		0,9 – 1,1 mm
Traverse en béton	0,8 – 1,4 mm		0,6 – 0,8 mm
Traverse en béton avec semelle	1,0 – 1,6 mm		0,9 – 1,0 mm

Tableau 3: calcul de l'affaissement selon Zimmermann avec une charge par essieu de 12 t, un entraxe des essieux de 2,0 m, semelle = 100 kN/mm

Système	
Voie sur dalle LVT	1,1 – 1,3 mm
Voie sur dalle LVT HA	1,5 – 1,9 mm

Les résultats des calculs présentés dans les tableaux précédents indiquent les affaissements totaux pour différentes configurations de voie ferrée. En complément, les contributions possibles de différents éléments à l'affaissement sont présentées ci-après.

- Semelle sous rail
 - Souple 0,2 mm
 - Rigide 0,0 mm
- Semelle sous traverse
 - Rigide 0,2 mm
- Lit de ballast 0,5 mm
- Tapis sous ballast
 - Cstat = 0,06 N/mm³ -> 0,6 mm
 - Cstat = 0,1 N/mm³ -> 0,3 mm
- Terrain naturel 0,0 – 5,0 mm

L'élément ayant le plus grand impact sur l'affaissement est le terrain naturel. Afin de réduire au maximum les différences de tassement et donc les coûts d'entretien, il est nécessaire d'avoir une bonne infrastructure portante.

Auparavant, plusieurs traverses en bois étaient installées dans la zone de transition afin d'obtenir une transition uniforme entre les traverses en acier et les traverses en béton. L'utilisation de traverses en béton avec semelles rend ces traverses en bois supplémentaires superflues.

Dans le domaine ferroviaire, les discontinuités et les affaissements ne sont jamais totalement évitables pour des raisons liées au système. Il est toutefois essentiel d'en minimiser les effets. Limiter la différence d'affaissement à 0,5 mm entre les tronçons contigus permet de réduire considérablement les effets dynamiques causés par les différentes charges des roues et vitesses de circulation. L'un des objectifs centraux de toute conception de transition est donc de réduire autant que possible les différences de tassement, en particulier aux endroits où la voie est adjacente à des points fixes.

Le dimensionnement et la conception structurelle des transitions entre la superstructure ballastée et les systèmes de voie sur dalle ou entre différents systèmes sans ballast doivent être conformes aux normes suisses applicables. La norme SN EN 16432-2 [7] en particulier définit les exigences techniques à satisfaire. Souvent, les transitions se produisent aux endroits suivants:

- changement de système de superstructure;
- changement de système d'infrastructure;
- superstructure ballastée ↔ voie sur dalle;
- pleine voie ↔ pont;
- voie ↔ aiguille.

Ces changements de système entraînent des différences de rigidité et donc des affaissements variables sur la voie.

Une construction correcte des transitions doit satisfaire aux exigences suivantes :

- réduction des influences dynamiques afin de diminuer l'usure et la charge;
- gradation des discontinuités de rigidité afin d'éviter les transitions brutales;
- minimisation des variations de tassements qui entraînent des discontinuités et des forces accrues;
- longueur optimale de la zone de transition, en fonction du changement de système et des conditions locales.

L'objectif est toujours d'obtenir une transition qui cause le moins de tassements possible et maintienne la stabilité de la géométrie de la voie à long terme.

Au niveau de la transition entre les systèmes de voie sur dalle et en cas de différences d'affaissement des rails, il est recommandé que chaque zone de rigidité ait une longueur minimale de v (en m/s) \times 0,5 (en s) [7].

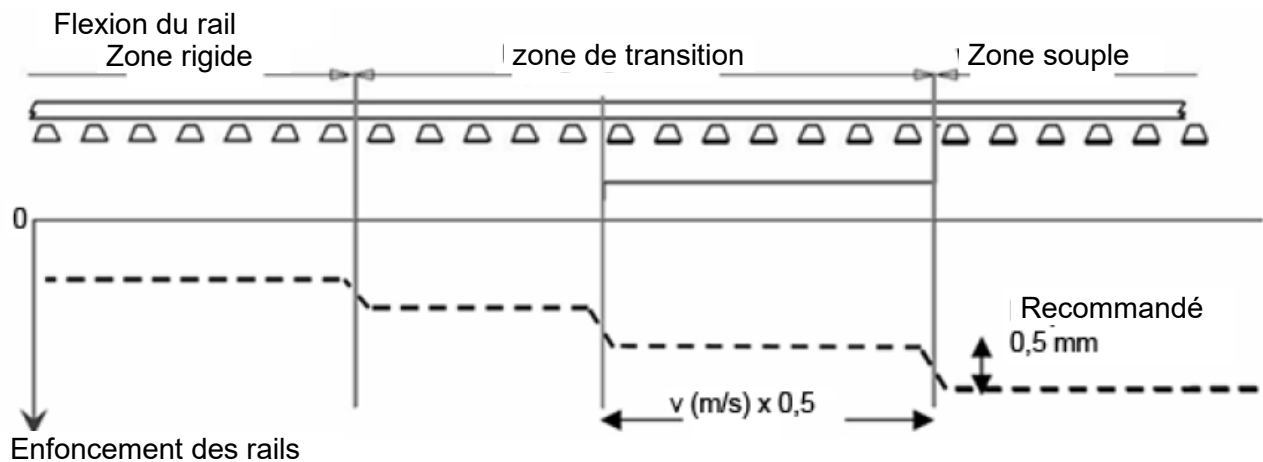


Figure 7: affaissement du rail au niveau d'une transition sur la voie ferrée [8]

Pour la réalisation de la construction, une cale inversée en béton maigre, en béton caverneux ou en gravier rond 32/50 est mise en place. Afin d'éviter tout tassement ultérieur, la pose doit être effectuée par couches (environ 30 cm) avec un compactage soigneux. La cale doit être la plus plate possible; une inclinaison de 1:3 doit être respectée. De plus, un dispositif de retenue du ballast d'une longueur d'au moins 2 m doit être installé à l'extrémité des auges ballastées, par exemple sur les ponts, pour éviter les écoulements de ballast.

5 Gestion des installations

La gestion des installations dans le domaine de la voie ferrée consiste à utiliser efficacement les ressources disponibles. Elle vise à optimiser la rentabilité tout au long du cycle de vie – de la planification stratégique à l'évaluation de l'état sur la base de données, en passant par la mise en œuvre opérationnelle. Les coûts du cycle de vie (LCC) se composent de l'amortissement, de la maintenance et des coûts liés aux difficultés d'exploitation.

Tandis que les coûts d'amortissement peuvent être répertoriés assez facilement en fonction de l'investissement et de la durée d'utilisation, la prévision des coûts de maintenance nécessite une combinaison faite de cycles de travail documentés et d'analyses basées sur des données de mesure. Les coûts liés aux difficultés d'exploitation résultent des restrictions imposées dans l'exploitation normale et doivent impérativement être pris en compte lors de la planification des mesures afin d'atteindre un équilibre entre le coût du travail et la qualité de l'exploitation.

L'état d'une installation décrit l'écart actuel par rapport à la fonctionnalité idéale, tandis que la substance représente le rapport entre l'âge de l'installation et la durée d'utilisation atteignable. Ces deux paramètres influent mutuellement l'un sur l'autre et doivent être considérés conjointement afin de permettre une évaluation stable et significative. Un état critique pour la sécurité résulte de la fixation d'une valeur limite technique: si celle-ci n'est pas atteinte, la fonctionnalité de l'installation n'est plus garantie. L'état d'une installation peut être amélioré à moindre coût grâce à une maintenance ciblée, tandis que la restauration de la substance nécessite généralement un réinvestissement coûteux qui immobilise des ressources à long terme. Une note d'état intégrée peut aider à répartir les ressources budgétaires de manière ciblée, en particulier au niveau du réseau, où la structure de la substance est déterminante. Il convient de noter qu'une telle note peut, selon sa pondération, refléter davantage l'âge que l'état réel des installations.

5.1 Gestion stratégique et opérationnelle des installations

On distingue en principe la gestion stratégique et la gestion opérationnelle des installations (Figure 8). La gestion stratégique des installations poursuit des objectifs à l'échelle du réseau, tels que la planification budgétaire et le développement de stratégies basées sur le coût du cycle de vie. Elle repose sur une approche descendante avec des éléments standard qui représentent des configurations typiques (par exemple, des tronçons de voie avec des conditions limites définies).

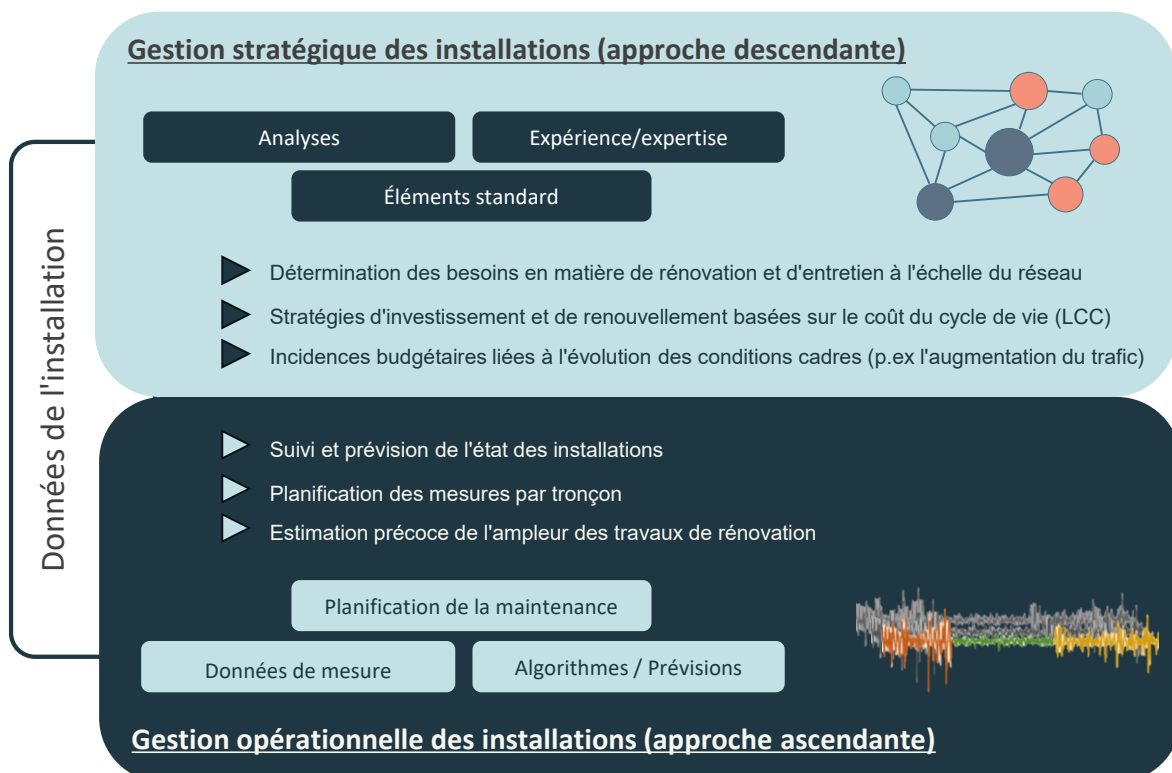


Figure 8: aperçu de la gestion stratégique et opérationnelle des installations

Ces éléments standard permettent une évaluation standardisée des coûts du cycle de vie et des cycles de maintenance (Figure 9). Pour l'élément standard «voie métrique», les paramètres pertinents pour les coûts sont notamment le groupe de charges, l'inclinaison longitudinale (déclivité), le rayon des courbes, le type de traverses, le profil de rail, la qualité de l'acier à rail, l'infrastructure et l'évacuation des eaux. Des durées d'utilisation et des cycles de maintenance types sont déterminés pour chaque combinaison de ces paramètres sur la base de données historiques et des connaissances d'experts.

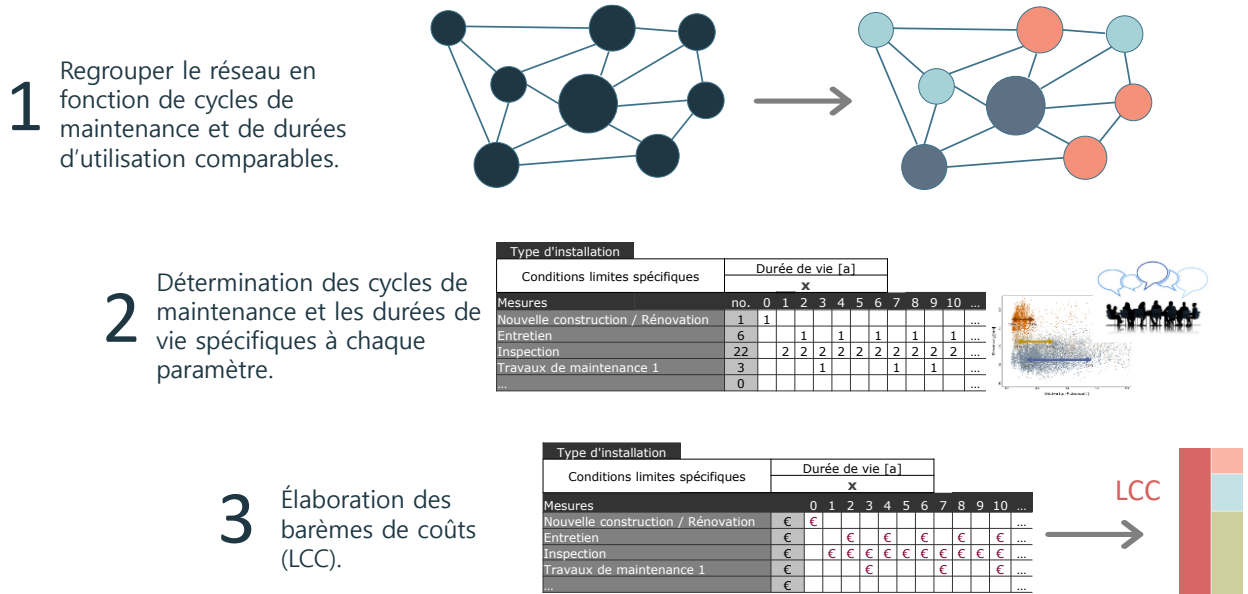


Figure 9: établissement d'éléments standard

Des prévisions budgétaires et des stratégies à l'échelle du réseau peuvent ainsi être élaborées sans qu'il soit nécessaire d'analyser chaque tronçon individuellement. L'utilisation d'éléments standard permet une évaluation efficace, comparable et évolutive de l'infrastructure, mais ne remplace pas l'examen détaillé des différents tronçons.

La gestion opérationnelle des installations repose quant à elle sur une approche ascendante et s'appuie sur la collecte et l'évaluation de données de mesure. Seul le recensement de l'état réel de chaque tronçon permet d'établir une stratégie de maintenance durable et adaptée aux besoins. Les installations qui font l'objet d'une maintenance cohérente et de haute qualité atteignent une durée d'utilisation nettement supérieure à celle des installations exploitées au seul seuil des interventions critiques pour la sécurité. La stratégie de maintenance choisie influe donc directement sur l'évolution de la substance et la rentabilité à long terme.

Les systèmes de mesure modernes, tels que les véhicules d'auscultation de la voie et la surveillance embarquée (On Board Monitoring – OBM), fournissent des données en continu qui peuvent être traduites en mesures concrètes au moyen d'analyses de séries temporelles. L'objectif est d'obtenir des prévisions spécifiques aux composants, qui permettent une planification adaptée aux besoins et maximisent la disponibilité de l'infrastructure.

5.2 Gestion des informations sur la voie ferrée (gestion de données d'actifs)

Une gestion efficace des installations repose sur la mise en relation des données d'installations (données de base) et des données de mesure. Les données d'installations décrivent les propriétés statiques d'un tronçon (par exemple, superstructure, infrastructure, tracé, équipements) et sont essentielles pour contextualiser les informations d'état. Les données historiques ne sont souvent disponibles que sous une forme analogique et doivent être numérisées pour permettre une évaluation complète de la substance.

Les données de mesure servent à effectuer un relevé de l'état et peuvent être collectées visuellement ou par des moyens mécaniques. Les évaluations visuelles sont subjectives et peu reproductibles, tandis que les mesures mécaniques (par exemple, position de la voie, écartement de la voie) offrent

une base objective et prévisible. Une prévision pertinente est possible à partir de trois ou quatre points de mesure, c'est pourquoi une mesure régulière, au moins une fois par an, est recommandée.

La consolidation de toutes les données s'effectue via une plate-forme de données reposant sur un cadre de référence unique (par exemple, kilométrage, sections transversales géoréférencées). Le traitement des données suit un processus clair: les informations pertinentes doivent être répertoriées, enregistrées, reliées de manière logique, analysées et enfin visualisées (Figure 10). C'est l'unique manière de créer une base solide pour les décisions stratégiques et opérationnelles. La plate-forme doit être suffisamment flexible pour intégrer des données provenant de différentes sources et dans différents formats, y compris des données historiques et analogiques.

Le groupe de travail RAILplus « Gestion des installations » travaille actuellement à l'acquisition stratégique d'un logiciel de gestion des installations. Il élabore également dans ce contexte les bases d'une gestion structurée des informations relatives à la voie ferrée. L'objectif est de créer une structure de données uniforme et pratique qui intègre à la fois des informations actuelles et historiques et les rende utilisables pour la prise de décisions stratégiques et opérationnelles.

Il existe en outre une spécification découlant de la maîtrise de système Interaction pour le recensement, l'analyse et l'évaluation des profils de roues et de rails [6].

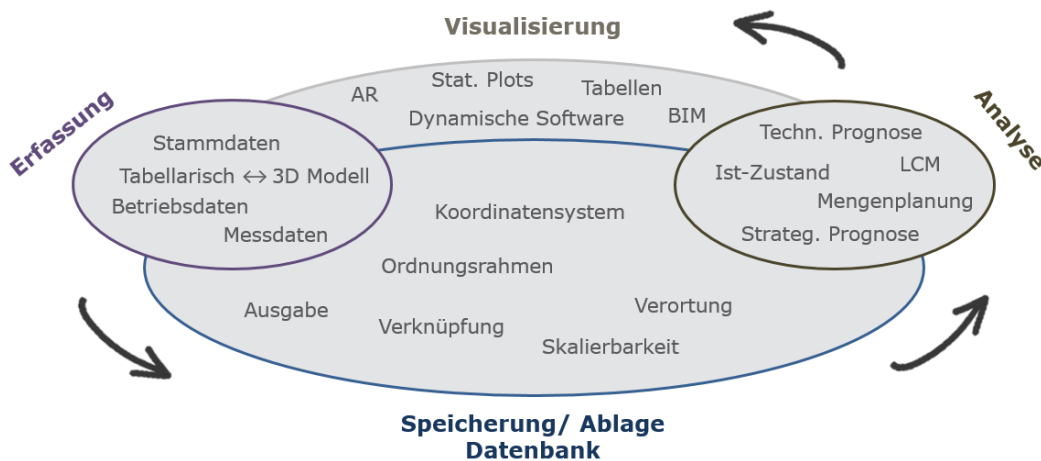


Figure 10: outils de recensement, d'enregistrement, d'analyse et de visualisation des données dans la gestion des installations

5.3 Stratégies de maintenance

Les stratégies de maintenance peuvent être divisées en mesures correctives et préventives.

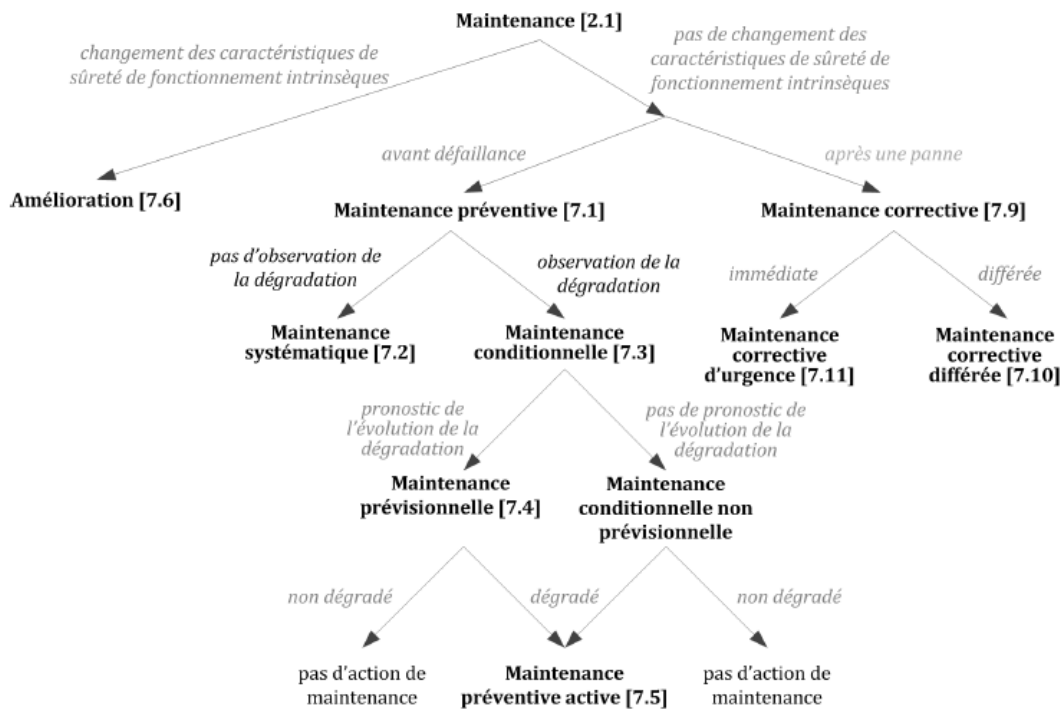


Figure 11: types de maintenance selon la norme SN EN 13306

La maintenance corrective est réactive, elle intervient après l'identification de défauts et s'accompagne d'une indisponibilité importante. La maintenance préventive vise à éviter les dommages et comprend des mesures prédéfinies (cycliques) et des mesures axées sur l'état.

La maintenance axée sur l'état repose sur des mesures continues et permet une planification spécifique aux composants. Les modèles de prévision tels que les analyses de régression aident à prévoir l'état futur et à planifier des mesures en temps opportun. La précision dépend fortement de l'exactitude du positionnement des données de mesure; un recalage précis est dès lors indispensable.

L'analyse technique est effectuée sur la base de sections (par exemple tous les 25 cm), mais doit être transposée dans des concepts de maintenance par ligne. Il convient à cet égard de tenir compte des aspects liés à l'exploitation et à la construction, des constructions spéciales (ponts, aiguilles, etc.) et des ressources disponibles.

Une prévision précoce permet de regrouper plusieurs tronçons en un ensemble de mesures plus vaste, une approche appelée «clustering». Dans ce cas, les différents tronçons sont entretenus ensemble, même si cela entraîne localement des interventions légèrement anticipées ou retardées. Le «clustering» permet d'optimiser les coûts, l'utilisation des machines et du personnel, à condition que les limites critiques pour la sécurité ne soient pas dépassées.

5.4 Planification du renouvellement

La planification du renouvellement répond à la question centrale suivante : à partir de quand la maintenance courante devient-elle non rentable ? L'objectif est d'atteindre une durée d'utilisation aussi longue que possible grâce à un régime de maintenance optimisé, sans que les coûts de maintenance croissants ne dépassent les économies réalisées grâce à l'amortissement prolongé.

On utilise pour cela la courbe dite d'annuités (Figure 12) qui représente la somme de l'amortissement et des coûts de maintenance au fil du temps.

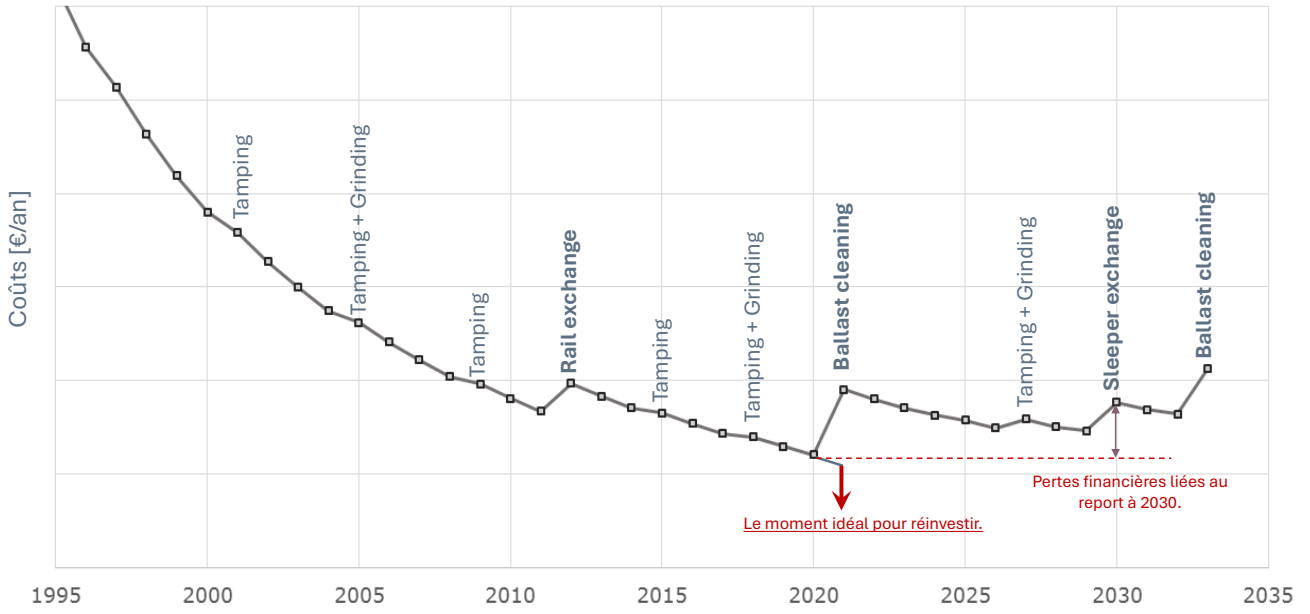


Figure 14: tracé de la courbe d'annuités du tronçon spécifique

6 Influence des composants de la voie ferrée

Ce chapitre présente les composants de la voie ferrée pertinents dans le domaine de la voie métrique, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. En outre, il formule notamment des recommandations pour l'utilisation et la sélection de composants spécifiques dans des conditions limites spécifiques. Ces recommandations générales s'appliquent, dans le cadre de la maîtrise de système, aux voies continues de la pleine voie en exploitation par adhérence. Les zones spécifiques (transitions, aiguilles, ouvrages d'art, etc.) devraient être traitées et complétées à moyen terme, par exemple par les centres de compétence Voie métrique. Il convient alors de tenir compte du fait que les effets étudiés dans le cadre de «P4 Rigidité de la voie» peuvent être influencés à des degrés divers par le choix des composants de la voie ferrée. Les effets, notamment en matière de bruit (tant le «crissement et grincement en courbe» que le «chant du rail») et d'usure du rail, sont notamment influencés par le tracé et la combinaison des profils roue/rail. Il existe donc un lien indirect avec le choix des composants de la voie (Figure 15).

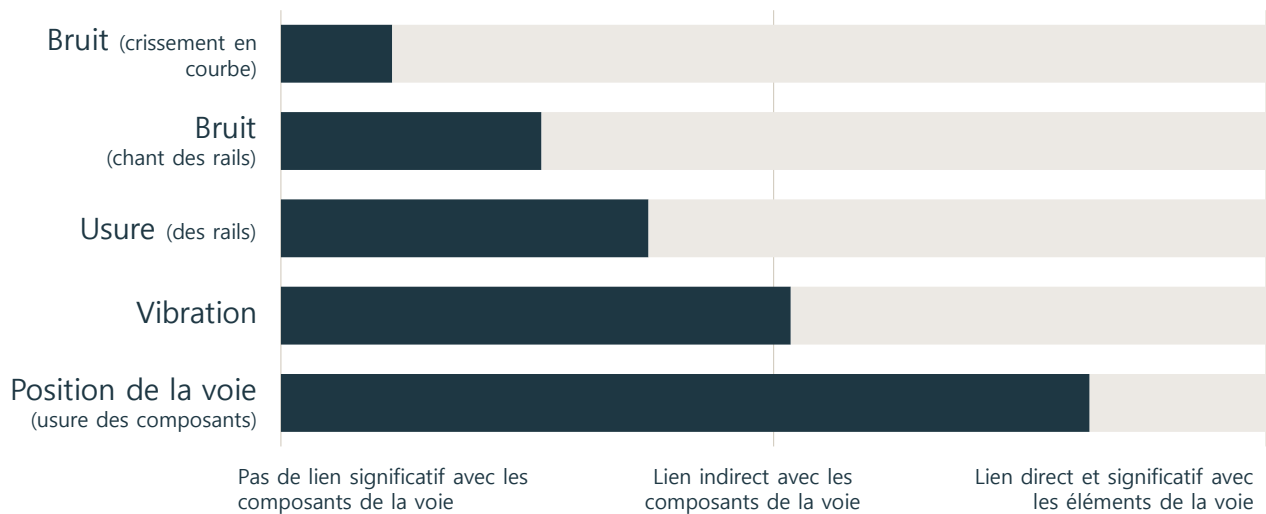


Figure 15: liens et possibilités d'influence des effets en fonction du choix des composants de la voie

6.1 Conclusions des modèles de simulation

Différents modèles sont élaborés au sein de RAILplus, et plus particulièrement du sous-projet «P4 Rigidité de la voie», le but étant de pouvoir quantifier l'influence des composants choisis sur le comportement de la voie ferrée. De manière générale, on peut distinguer les modèles de voie ferrée qui simulent l'usure et le bruit à la surface des rails et les modèles qui évaluent le comportement du terrain naturel en fonction des différentes caractéristiques du sol de fondation. Y sont étudiés les effets des différents composants de la voie ferrée sur l'usure du rail, le bruit produit (en particulier le crissement dans les courbes) et la stabilité à long terme de la position de la voie. La Figure 16 présente un aperçu des modèles ainsi que les questions initiales et les conclusions.





		Questions centrales	Connaissances
Statique <small>Paramètres fixes, hypothèses simplifiées concernant les charges</small>	 Usure quasi-statique de la surface des rails	<ul style="list-style-type: none"> ③ Choix de la nuance d'acier des rails ③ Influence de la charge par essieu/de l'entraxe ? ③ Profil nominal vs profil d'usure ? ③ L'élargissement de la voie est-il judicieux ? 	<ul style="list-style-type: none"> ☆ Pertinence dans les courbes serrées avec rayon < 150 m ☆ La réduction de la rigidité de guidage de l'essieu Cx peut avoir une influence positive sur l'angle d'attaque → l'indicateur d'usure TG/A s'en trouve réduit, mais les forces longitudinales sont légèrement augmentées ☆ L'indicateur d'usure TG/A est généralement légèrement inférieur avec le profil de roue RAILplus 25 (boudin de la roue plus étroit)
	 Usure dynamique de la surface des rails	<ul style="list-style-type: none"> ③ Choix de la nuance d'acier des rails ③ Couche intermédiaire optimale ? ③ Influence de la charge par essieu/de l'entraxe ? ③ Profil nominal vs profil d'usure ? ③ L'élargissement de la voie est-il judicieux ? 	<ul style="list-style-type: none"> ☆ Réduction de l'usure pour un angle d'attaque < 10 mrad ☆ Pas d'usure dynamique significative pour des rayons R > 300 m ☆ La longueur d'onde est corrélée à la vitesse d'exploitation ☆ L'élasticité de la voie a une influence → des conclusions détaillées sont attendues début 2026 ☆ La géométrie du profil influence l'apparition de l'usure ondulatoire / des polygones
Dynamique <small>Prise en compte des charges variables dans le temps et des forces d'interaction</small>	 Modèle de bruit (accent mis sur le crissement en courbe)	<ul style="list-style-type: none"> ③ La chaussée peut-elle réduire le crissement en virage grâce au choix des matériaux ? ③ Si oui, quels matériaux faudrait-il utiliser ? 	<ul style="list-style-type: none"> ☆ D'après l'état de la connaissance actuel, les composants de la voie n'ont pas d'influence significative sur l'apparition et l'intensité du crissement en courbe
	 Modèle du sol de fondation	<ul style="list-style-type: none"> ③ Comportement à long terme de la voie sur différents types de sol ? ③ La réfection de la plate-forme est-elle suffisante lorsque le sol de fondation est de mauvaise qualité et se trouve à une profondeur importante ? ③ Les éléments élastiques de la superstructure peuvent-ils réduire les contraintes induites ? 	<ul style="list-style-type: none"> ☆ Influence significative des véhicules (charge et entraxe des essieux) et des vitesses sur les contraintes de cisaillement dans le ballast («Abe 100» environ 11 % de moins que «Komet») ☆ Une superstructure rigide (semelles sous rail rigides, traverses en béton sans semelle) génère jusqu'à +50 % de contraintes verticales sur le ballast ☆ Pics de contrainte pour PSS (Planumsschutzschicht = Une couche de protection de la plate-forme) d'un facteur 0,89 par rapport à AC RAIL ; meilleur drainage de l'eau avec AC RAIL non pris en compte

Figure 16: aperçu des modèles de simulation de la voie ferrée, des objectifs et des conclusions

Pour les simulations relatives à l'usure dynamique, virtual vehicle (ViF) a élaboré des modèles de systèmes multicorps avec des corps de roues et de rails flexibles, complétés par des calculs par éléments finis et calibrés à l'aide de données de mesure issues de l'exploitation (entre autres MGB et zb). Les études portant sur l'usure dynamique, et donc sur l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues, montrent que ce mécanisme est essentiellement déterminé par l'interaction des propriétés dynamiques structurelles du véhicule et de la voie ferrée. Pour la voie, cela signifie que ses propriétés élastiques et dynamiques influent directement sur le taux de croissance. Les simulations montrent que l'usure ondulatoire à ondes longues apparaît dans les courbes des chemins de fer à voie métrique lorsque les mouvements transversaux sont suffisamment importants. Ceux-ci sont quant à eux essentiellement déterminés par l'angle d'attaque des essieux. Si la valeur limite critique d'environ 10 mrad est dépassée, le taux de croissance de l'usure dynamique augmente considérablement.

Du point de vue de la voie ferrée, les propriétés qui interviennent dans la dynamique structurelle du système roue-rail sont particulièrement importantes. Les simulations montrent clairement que la longueur des ondes de l'usure ondulatoire à ondes longues dépend exclusivement de la vitesse et non du rayon de la courbe. En revanche, le taux de croissance peut être influencé à la fois par des mesures prises au niveau du véhicule (par exemple, la commande active des essieux) et par des interventions ciblées sur la voie.

D'après les simulations, la longueur et le taux de croissance des ondes de l'usure ondulatoire à ondes longues peuvent être influencés de manière ciblée par la modification des propriétés dynamiques structurelles des composants du véhicule et de la voie. Il apparaît ainsi clairement que les modifications des paramètres de la voie, comme la rigidité et l'amortissement de certains éléments tels que les rails, les semelles ou le ballast, ont un effet sur le comportement du système et peuvent modifier l'ampleur de l'usure dynamique. Des résultats détaillés sur la qualité optimale des rails et l'influence des types de traverses et de semelles sur l'usure dynamique sont attendus pour le début d'année 2026.

Les simulations révèlent en outre que l'usure dynamique ne se développe plus de manière significative dans les courbes à grand rayon ($R > 300$ m). Il s'agit là d'un résultat dynamique structurel qui signifie pour la voie qu'aucune mesure particulière n'est nécessaire dans ces rayons du point de vue de l'usure dynamique.

Dans le cadre du **modèle de sol de fondation** élaboré par Baugrund Dresden, des études des paramètres relatifs au sol de fondation et à la voie ferrée ont été réalisées à l'aide de modèles par éléments finis en deux et trois dimensions afin d'évaluer la sollicitation du terrain naturel et la répartition de la charge au sein de la superstructure des voies métriques.

Au cours de la première phase, la stabilité dynamique des voies a été étudiée selon l'aide à la planification DB InfraGO AG [10]. Pour un sol de fondation de qualité moyenne, les simulations montrent presque un doublement des déformations par cisaillement, et donc une sollicitation du terrain naturel, lorsque la vitesse passe de 50 km/h à 100 km/h. Une influence significative a également été démontrée pour la charge par essieu et l'entraxe des véhicules. Ainsi, les déformations par cisaillement dans le terrain naturel augmentent d'environ 11% lors de l'utilisation du véhicule «Komet» étudié, en raison de la charge par essieu et de l'entraxe des essieux plus élevés par rapport au véhicule «ABe 100». Pour un sol de fondation de mauvaise qualité, aucune des variantes étudiées ne permettait de satisfaire aux exigences de stabilité dynamique jusqu'à une profondeur de 3 m. Les résultats des simulations concordent ainsi avec les conclusions géotechniques du MGB, selon lesquelles, si le terrain naturel est de très mauvaise qualité, il n'est pas possible d'obtenir une stabilité durable de la position de la voie sur ce terrain naturel sans travaux d'amélioration techniques. Si cette preuve de stabilité dynamique ne peut être apportée, il faut s'attendre à des tassements cumulatifs prévisibles au cours de la durée d'utilisation, ce qui augmentera le nombre de travaux de bourrage nécessaires et, par conséquent aussi les coûts de maintenance. Dans de tels cas, outre la pose d'une couche PSS ou d'une couche AC RAIL, des mesures approfondies d'amélioration du terrain naturel (par exemple, des colonnes ballastées) sont nécessaires pour garantir l'absence de tassement à long terme. La rentabilité de ces mesures doit être évaluée au cas par cas.

Au cours de la deuxième phase, l'influence de différents composants de la voie ferrée sur la répartition verticale des contraintes a été analysée à l'aide de modèles 3D par éléments finis spécialement développés pour la voie métrique. Les résultats montrent qu'une structure de voie ferrée rigide (semelles sous rail rigides combinées à des traverses en béton sans semelles) répartit les charges de manière nettement moins favorable qu'une structure de voie ferrée élastique (semelles souples et traverses en béton avec semelles) : les contraintes normales verticales au niveau du bord supérieur du ballast augmentent jusqu'à 50%, la rigidité du ballast sous la traverse (répartition du ballast) jusqu'à 97% (Figure 17). La majeure partie de ces contraintes accrues est absorbée par le lit de ballast. Il en résulte une sollicitation plus importante des grains et donc une détérioration potentielle de la position de la voie, ce qui réduit la durée d'utilisation de la voie et augmente les travaux de bourrage nécessaires en raison de la destruction du ballast et des tassements irréguliers.

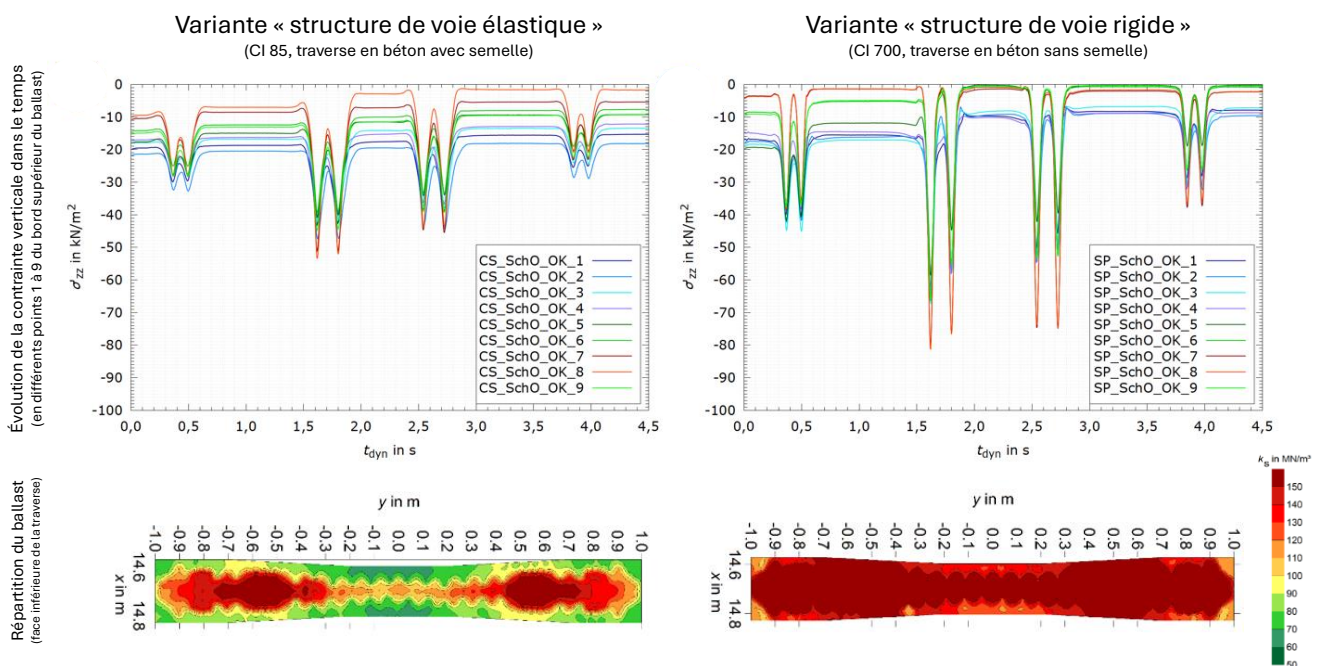


Figure 17: contraintes verticales et répartition du ballast selon l'élasticité de la voie ferrée; simulations par Baugrund Dresden

De plus, des charges par essieu plus élevées entraînent également une augmentation des contraintes normales dans le sens vertical. Aucun lien de dépendance n'a pu être démontré entre les contraintes et la vitesse, ce qui s'explique par l'hypothèse d'un modèle de charges en mouvement mais non stimulées. De même, l'entraxe des essieux n'a eu aucune influence notable; deux résultats qui ne sont que partiellement transposables dans la réalité. Les pics de contrainte maximaux sont inférieurs d'un facteur de 0,89 pour la couche PSS par rapport à la couche AC RAIL, mais le modèle n'a pas pu tenir compte de l'évacuation plus favorable de l'eau avec la couche AC RAIL.

De plus amples informations et d'autres conclusions tirées des modèles de simulation sont disponibles dans les livrables des différents sous-projets.

6.2 Conclusions : rail et appui de rail

La qualité des rails n'a pas d'influence directe sur le phénomène du crissement dans les courbes. **Un profil de rail uniforme, tel que le profil 46E1 recommandé, a quant à lui un effet positif, car il permet une harmonisation cohérente avec le profil de roue sur l'ensemble du réseau.** Pour les courbes dont le rayon est inférieur à 300 m, il est préférable d'utiliser des qualités d'acier à haute résistance, car ces aciers réduisent l'usure, en particulier l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues, et donc indirectement le bruit (Figure 18).

En ce qui concerne les vibrations, il n'existe à l'heure actuelle aucun lien significatif entre le profil ou la qualité des rails et les vibrations produites. Grâce à sa ligne de flexion plus importante, le profil 54E2 peut avoir un effet positif sur la transmission des charges et donc sur la position de la voie, mais ce profil de rail plus grand entraîne des contraintes accrues, ce qui augmente le risque de déjettement de la voie dans les courbes serrées. Bien qu'il n'y ait pas de lien direct entre la qualité de l'acier et le comportement de la voie, les qualités d'acier supérieures ont un effet indirect favorable, car elles réduisent l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues et donc les sollicitations excessives associées sur les composants de la voie ferrée.

	Profil du rail		Qualité du rail			Point d'appui, semelles sous rail		
	46 E1	54 E2	R 260	350 HT	400 HT	Très élastique	Elastique	Rigide
Bruit (crissement en courbe)	+	-	X	X	X	X	X	X
Bruit	+	-	B	+	++	-	+	++
Usure (des rails)	+	-	B	+	++	++	+	-
Vibration	X	X	X	X	X	++	+	-
Position de la voie (usure des composants)	B	+	X	X	X	++	+	+

++ influence très positive + influence positive ? aucune conclusion générale possible X aucun lien significatif B cas de base - influence négative -- influence très négative

Figure 18: effets du choix des rails et des appuis de rails

Les simulations de voie ferrée réalisées par ViF ne permettent pas de conclure à une influence notable des différentes semelles sur le phénomène de crissement dans les courbes. En général, des semelles plus rigides transmettent d'avantage de vibrations et permettent donc une diminution du bruit découlant du contact roue-rail, ainsi que le chant des rails. À l'inverse, les semelles souples ont des effets positifs sur l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues, en particulier dans les courbes, ce qui contribue indirectement à la réduction du bruit. Elles entraînent également un découplage partiel des vibrations des rails et des roues, retardant significativement l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes

longues [11]. Les semelles souples offrent également d'autres avantages, tels que la réduction de l'usure des traverses et un meilleur amortissement des charges appliquées. Il en résulte une réduction de la charge transférée au lit de ballast et au terrain naturel. Cependant, les semelles souples réduisent la durée d'utilisation des systèmes de fixation, car elles entraînent un mouvement accru au niveau du point d'appui. C'est particulièrement notable avec le profil de rail 54E2, dont le rapport hauteur/largeur contribue à une direction défavorable des forces.

6.3 Conclusions: traverse, ballast et terrain naturel

D'après les simulations de voie ferrée réalisées par ViF, le lien entre les différents types de traverses et le crissement dans les courbes peut être considéré comme non significatif (Figure 19). En ce qui concerne le bruit (chant des rails), les traverses en béton avec semelles présentent un comportement positif par rapport aux traverses en béton sans semelles, tandis que les traverses en acier génèrent davantage de bruit en raison de leur densité élevée. Les traverses en bois ont quant à elles un effet positif sur le bruit à proximité de la voie en raison de leur faible densité, mais elles présentent un faible taux de décroissance du bruit et donc une propagation accrue du bruit [12]. De plus, les traverses avec semelles ont des effets positifs dans les courbes, car elles réduisent l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues et donc indirectement le bruit.

S'agissant de l'usure du rail, il n'existe à l'heure actuelle aucun lien direct significatif avec le type de traverse. Néanmoins, les semelles sous traverse empêchent l'apparition de défauts d'appui partiels, ce qui limite l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues. L'influence des types de traverses sur les vibrations est globalement faible, mais les traverses en béton avec semelles souples ont un effet particulièrement positif dans la réduction des vibrations.

Les traverses en béton avec semelles élastoplastiques (rigides) sont celles qui offrent la plus grande stabilité de la position de la voie. Elles contribuent à réduire la destruction du ballast et augmentent la durée d'utilisation de la voie ferrée. De plus, les traverses avec semelles élastoplastiques présentent une meilleure résistance au déplacement transversal dans les courbes serrées que les traverses en béton sans semelles ou avec semelles élastiques [13]. Par rapport aux traverses en bois, les traverses en béton assurent un meilleur maintien de l'écartement de la voie. Les traverses en acier en Y se caractérisent par la rigidité de leur cadre, mais posent dans la pratique des problèmes en termes de stabilité de position et de faisabilité des mesures de maintenance (bourrage).

	Type de traverse					Ballast		Infrastructure / terrain naturel	
	Bois	Béton sans semelle	Béton avec semelle souple	Béton avec semelle rigide	Acier	Lit de ballast	Tapis sous ballast	Bon	Mauvais
Bruit (crissement en courbe)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bruit	+	B	++	+	--	X	X	X	X
Usure (des rails)	+	-	+	+	+	X	X	X	X
Vibration	+	-	++	+	+	B	++	+	-
Position de la voie (usure des composants)	-	-	+	++	+	B	+	++	--

++ influence très positive + influence positive ? aucune conclusion générale possible X aucun lien significatif B cas de base - influence négative -- influence très négative

Figure 19: effets du choix des traverses, du ballast et du terrain naturel

À l'heure actuelle, il n'existe pas de lien direct significatif entre le ballast, l'infrastructure ou le terrain naturel et le crissement dans les courbes, le bruit ou l'usure du rail. Néanmoins, les tapis sous ballast

ont un effet positif avéré sur la réduction des vibrations dans des zones spécifiques telles que les transitions, les tunnels ou les constructions de ponts spéciales, à condition qu'ils soient correctement dimensionnés. De surcroît, ils peuvent y améliorer le comportement de la voie et réduire l'usure des composants (Figure 19).

L'état de l'infrastructure est un facteur décisif dans le cadre des coûts du cycle de vie (LCC) d'une voie ferrée. Une infrastructure en mauvais état peut entraîner des tassements hétérogènes et la remontée de particules fines dans le lit de ballast, ce qui détériore la position de la voie et augmente considérablement l'usure des composants. De plus, un terrain naturel dont la portance est insuffisante a un impact négatif sur les valeurs de vibration, ce qui peut avoir des répercussions à long terme sur l'infrastructure.

7 Recommandations pour la stratégie en matière de composants

La stratégie en matière de composants a été élaborée afin de traduire les multiples conclusions techniques des simulations et des analyses détaillées en recommandations d'actions claires et orientées vers la pratique. L'objectif était de parvenir à un équilibre entre une conception techniquement optimale et une mise en œuvre pratique et économique avec le moins de composants différents possible. Il en résulte une stratégie robuste et standardisable qui répond à la fois aux exigences d'exploitation et aux processus d'approvisionnement et de maintenance des chemins de fer. Le choix des composants appropriés pour la construction nouvelle de voies dépend principalement de trois facteurs clés: la charge, le rayon de la courbe et la qualité du terrain naturel (Figure 20). Une interprétation méthodique de ces paramètres permet d'obtenir une superstructure économique, durable et robuste qui tient compte à la fois des exigences d'exploitation et des coûts du cycle de vie.

En ce qui concerne la catégorie de charge (tonnes brutes par an), il convient de faire la distinction suivante: sur les tronçons soumis à une charge élevée, supérieure à 5000 TB/j, les traverses en béton avec semelles sont recommandées, car elles présentent une portance élevée, un amortissement des vibrations efficace et un comportement optimisé à long terme de la voie. En dessous de 5000 TB/j, les traverses en acier constituent une alternative économique, car elles sont suffisamment dimensionnées pour des charges de trafic modérées et peuvent présenter des coûts d'approvisionnement et d'élimination moins élevés en fonction du marché (le prix de l'acier peut être soumis à d'importantes fluctuations de prix). Les traverses en acier peuvent donc également constituer une alternative économiquement intéressante, en particulier sur les tronçons droits, même pour des charges allant jusqu'à environ 7000 TB/j.

Le profil 46E1 est recommandé pour tous les rails. Le choix de la qualité des rails et de la rigidité des semelles sous rail est déterminé en grande partie par le rayon de la courbe. Au sein des chemins de fer à voie métrique, l'usure dynamique se présentant sous la forme d'usure ondulatoire à ondes longues est la principale raison pour laquelle des travaux de meulage sont réalisés. Il est donc essentiel de lutter contre ce phénomène, notamment en utilisant des qualités d'acier à rail supérieures. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser des rails haute résistance de qualité R400HT dans les rayons serrés de moins de 300 m, qui sont particulièrement concernés par l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues. Dans les rayons supérieurs à 600 m, il est possible d'utiliser des rails de qualité R260. Dans la zone intermédiaire (rayon compris entre 300 m et 600 m), il peut être judicieux d'utiliser la qualité de rail R350HT si un nombre croissant de head checks se produit. Un tel choix permettrait de prévenir ce type de défaut, comme cela est d'usage au sein des chemins de fer à voie normale jusqu'à des rayons de 1500 m.

En ce qui concerne les semelles sous rail, il convient d'utiliser en principe des semelles moyennement rigides, car elles réduisent la rigidité verticale et diminuent ainsi l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues ainsi que la sollicitation des traverses et du ballast. Si ce n'est pas possible dans les zones sensibles au bruit, il est recommandé d'utiliser des semelles rigides. La qualité des semelles et des crampons élastiques utilisés revêt également une importance particulière. Outre la rigidité statique [kN/mm], il convient de veiller à utiliser des matériaux plastiques de haute qualité et des moyens de fixation appropriés, en particulier dans les rayons serrés. Il est avéré que les différences dans la qualité des matériaux et les caractéristiques constructives des semelles et des crampons élastiques ont un impact sur la torsion du rail, l'inclinaison du rail qui en résulte et l'usure. Des essais complets seront menés en 2026 sur le terrain, auprès de plusieurs chemins de fer à voie métrique, afin de tester de manière méthodique différents concepts de semelles et de moyens de fixation. Les conclusions de ces essais seront intégrées à l'avenir dans des recommandations standardisées pour la structure de la voie ferrée dans les courbes.

La qualité du terrain naturel est le troisième facteur d'influence déterminant. Sur les portions de terrain naturel portantes, aucune mesure supplémentaire n'est généralement nécessaire, à condition que la capacité d'évacuation des eaux soit garantie de manière durable. En revanche, lorsque la qualité du terrain naturel n'est pas bonne, des améliorations constructives telles qu'une couche de protection de la plate-forme (PSS) ou des couches bitumineuses porteuses telles que l'AC RAIL sont nécessaires pour réduire les tassements et garantir la portance et la capacité d'évacuation des eaux à long terme.

Charge	$\geq 5'000 \text{ TBC/j (N1/E1 \& N2/E2 \& N3/E3)}$		$< 5'000 \text{ TBC/j (N4/E4)}$
	Traverse en béton avec semelle		Traverse en acier
Rayon	$R \geq 600\text{m}$	$600\text{m} \geq R \geq 300\text{m}$	$300\text{m} \geq R$
Profil du rail	46E1		
Qualité du rail	R260	R 350HT	R 400HT
Semelle sous rail	Rigidité moyenne (200 kN/mm) [Dans les zones sensibles au bruit : rigidité élevée (700 kN/mm)]		
Terrain naturel	Bon		Mauvais
Mesure d'amélioration	Aucune mesure*		PSS ou AC Rail

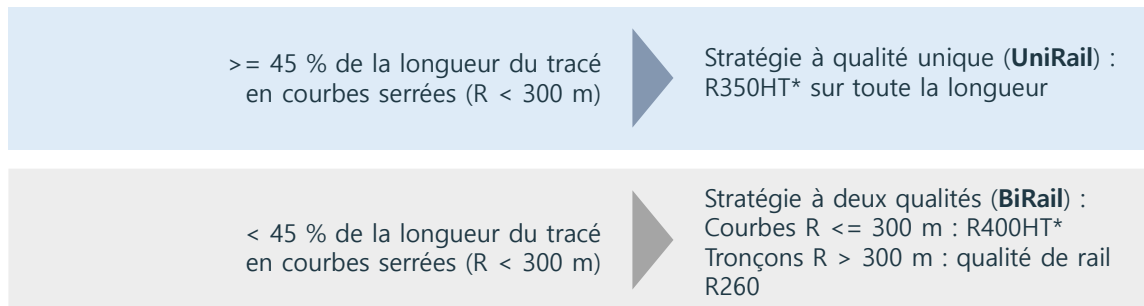
*Le (r)établissement de la capacité de drainage devrait au moins avoir lieu.

Figure 20: stratégie générale en matière de composants dans le cadre d'un renouvellement

Le choix du profil de rail (d'usure) en cours d'élaboration dans le cadre du «sous-projet P3 Rail/roue» joue également un rôle dans le profil de rail à choisir. Si un profil d'usure doit être rectifié et qu'il doit ensuite subir le moins de modifications possible (usure supplémentaire) sous l'effet de l'exploitation, l'utilisation de la qualité R400HT plutôt que R350HT peut également être pertinente du point de vue de l'interaction. Dans tous les cas, outre les considérations relatives au profil, la combinaison des matériaux de la roue et du rail doit également être optimisée pour l'utilisation de qualités à haute résistance.

Pour l'application pratique des chemins de fer, la répartition des rayons spécifique à chaque ligne est également prise en compte dans le cadre de l'élaboration de la stratégie en matière de composants (Figure 21). Sur les lignes présentant une proportion élevée ($\geq 45\%$ de la longueur de la ligne) de courbes serrées, il peut être judicieux, d'un point de vue économique et logistique, de déployer une stratégie à qualité unique (désignée «UniRail») et d'utiliser des qualités d'acier à rail à haute résistance sur toute la longueur. Sur la base des conclusions du sous-projet P3, la qualité de rail R350HT est recommandée dans le cadre d'une stratégie à qualité unique.

Différenciation en fonction du tracé :



*En cas d'utilisation de qualités d'acier à haute résistance pour les rails, il convient d'optimiser la combinaison des profils et des matériaux roue/rail.

Figure 21: différenciation des lignes pour l'élaboration de la stratégie relative à la qualité d'acier à rail selon les lignes

Si une stratégie en matière de composants formulée de manière générale (Figure 20) constitue une base pertinente, elle n'est toutefois que partiellement suffisante pour la mise en pratique. Les chemins de fer à voie métrique suisses présentent une grande diversité de conditions d'exploitation et de topographie, qui ont une incidence directe sur les exigences imposées aux composants de la voie ferrée. Définir une stratégie générale ne suffit donc pas. Il est essentiel de l'évaluer également pour chaque entreprise ferroviaire et en fonction de chaque ligne. Sans cela, il est impossible de formuler une recommandation techniquement solide et économiquement optimale.

L'une des principales raisons de cette approche spécifique à chaque ligne réside dans les différents niveaux de charge (TB/j). La charge annuelle en tonnes brutes détermine en grande partie l'utilisation de traverses en béton avec semelles ou l'utilisation de traverses en acier (Figure 20). Les données de charge nécessaires à cet effet ont été collectées de différentes manières. Les chemins de fer comportant plusieurs lignes soumises à des charges très différentes (RhB, MOB, AB, RBS, TPF, zb) ont fait l'objet d'une collecte de données spécifique pour chaque ligne. Tous les autres chemins de fer sont représentés par une valeur moyenne basée sur la charge à l'échelle du réseau selon les données WDI (interface web pour les données de l'infrastructure, OFT). Toutes les charges actuelles ont été augmentées de 20% dans le cadre de l'élaboration des stratégies afin de tenir compte de l'augmentation du trafic attendue dans les années à venir (à moins que les chemins de fer aient déjà communiqué des prévisions de charges futures).

La répartition des rayons sur chaque ligne est tout aussi importante, car elle influe directement sur le choix de la qualité des rails (Figure 21). Les données d'entrée de cette répartition spécifique des rayons de tous les chemins de fer se réfèrent aux travaux des différents sous-projets de la maîtrise de système et sont représentées dans l'outil «Innovative Times». La répartition des courbes des chemins de fer suivants n'a pas encore été déterminée et ne figure donc pas encore dans la classification stratégique spécifique à chaque ligne: BDWM Transport AG (BD), Bière-Apples-Morges (BAM), Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi (FART), Wynetal- und Suhrental-Bahn (WSB).

La Figure 22 et la Figure 23 ci-après présentent les recommandations spécifiques aux lignes pour la qualité des rails («BiRail», «Unirail») et la stratégie en matière de traverses («traverses en béton avec semelles», «traverses en acier»). La charge prise en compte et la répartition des rayons de la ligne spécifique sont également représentées. L'objectif est notamment de mettre en évidence les lignes qui sont proches du seuil de 45% de la longueur de la ligne comportant des rayons serrés (< 300 m). Ce seuil a été choisi comme valeur de référence technique pour la définition d'une stratégie claire et solide. Pour des raisons pratiques, notamment en matière de logistique et d'approvisionnement, il peut toutefois être judicieux d'attribuer également à la stratégie «UniRail» des lignes présentant une proportion légèrement inférieure de courbes serrées, si celle-ci est déjà appliquée sur d'autres lignes de la même entreprise ferroviaire.

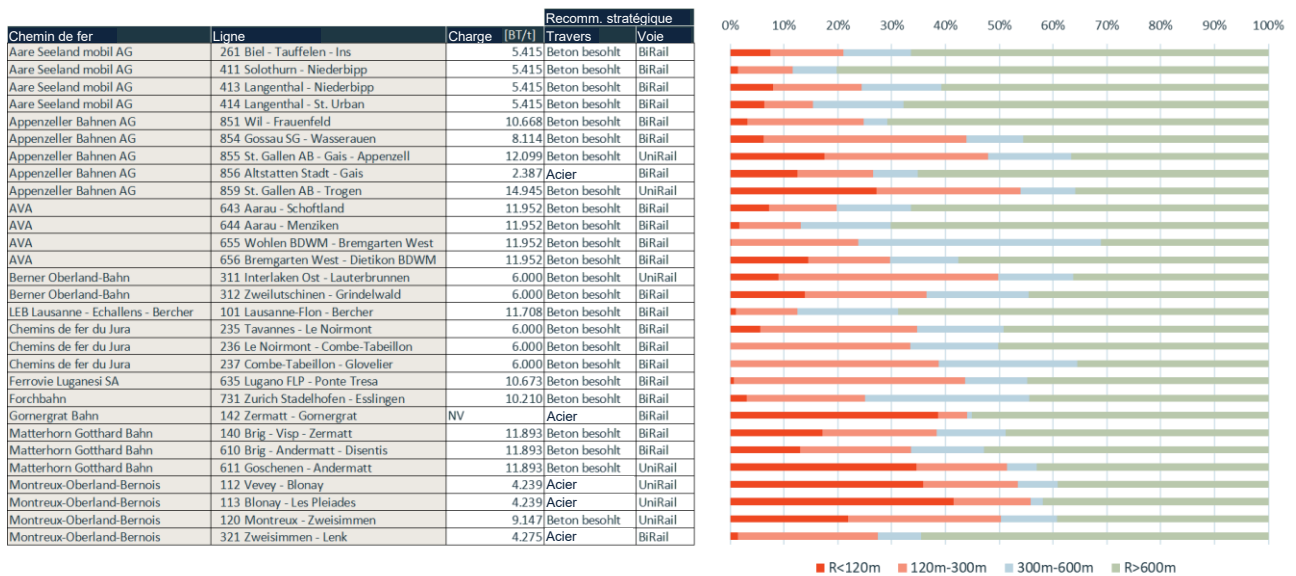


Figure 22: détermination des recommandations spécifiques aux lignes pour la qualité des rails et le type de traverses, page 1 sur 2

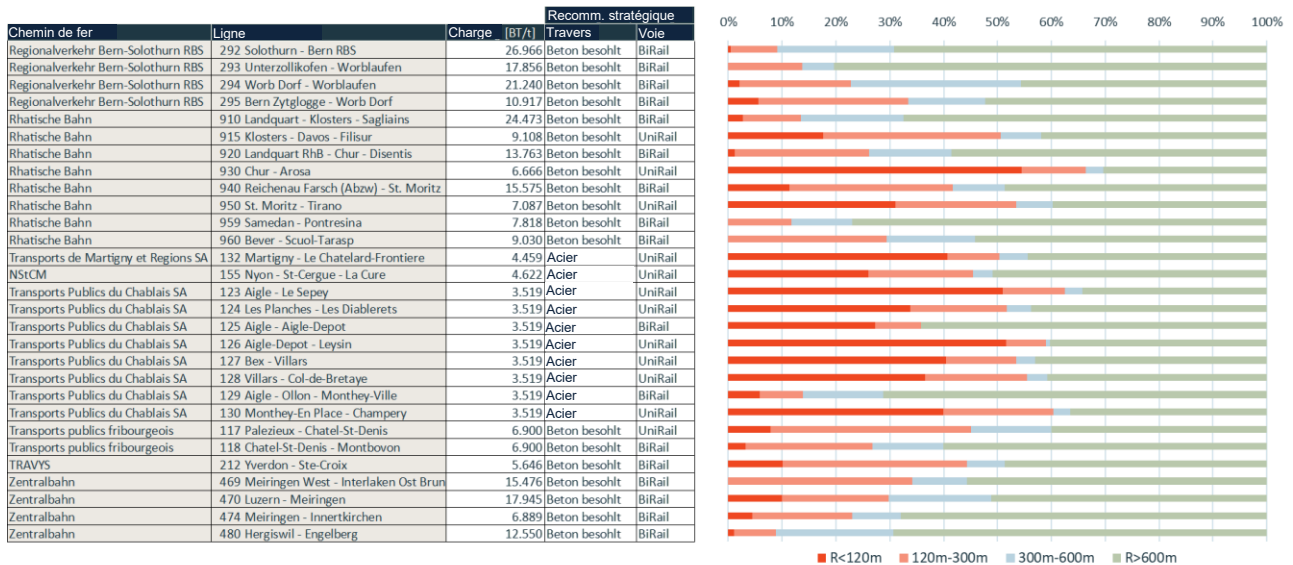


Figure 23: détermination des recommandations spécifiques aux lignes pour la qualité des rails et le type de traverses, page 2 sur 2

L'exemple du chemin de fer Montreux Oberland bernois (MOB) montre l'importance d'une stratégie en matière de composants qui soit spécifique aux lignes. Le réseau du MOB comprend plusieurs lignes aux caractéristiques très diverses (Figure 22). Sur le tronçon Vevey–Les Pléiades, plus de 50% de la longueur de la ligne comporte des courbes serrées dont le rayon est inférieur à 300 m. En conséquence, une stratégie «UniRail» est recommandée ici, tandis qu'elle n'est pas pertinente pour le tronçon Zweisimmen–Lenk, car environ 25% seulement de la longueur du tronçon présente des courbes serrées. Des différences similaires apparaissent également dans la stratégie relative aux traverses, car trois des quatre lignes du MOB présentent une charge légèrement supérieure à 4000 TB/j, ce qui amène à recommander l'utilisation de traverses en acier, tandis que la ligne Montreux–Zweisimmen est soumise à une charge beaucoup plus élevée, les traverses en béton avec semelles constituant alors le choix optimal. Cet exemple montre qu'au sein d'une entreprise ferroviaire, plusieurs stratégies différentes en matière de composants peuvent être judicieuses et nécessaires selon les lignes. Une stratégie généralisée pour toutes les lignes d'une entreprise ne tiendrait pas suffisamment compte des différences techniques spécifiques et pourrait conduire à des décisions erronées ou à des solutions non rentables. En revanche, une approche spécifique à chaque ligne permet de déterminer les composants essentiels de manière différenciée, techniquement fondée et optimisée sur le plan de l'exploitation, en fonction des sollicitations réelles de chaque ligne.

Sur la base de ces stratégies spécifiques à chaque ligne, une stratégie multi-qualités («BiRail») est recommandée pour 73% de l'ensemble du réseau à voie métrique. Elle se caractérise par l'utilisation de la qualité R400HT dans les courbes serrées (rayon inférieur à 300 m) et de la qualité R260 dans les autres zones. Pour le reste du réseau, une stratégie «UniRail» avec une utilisation systématique de la qualité R350HT est recommandée en raison de la fréquence accrue des courbes. Concernant l'utilisation de différents types de traverses, la pose de traverses en béton avec semelles est recommandée pour 89% du réseau à voie métrique du point de vue de la charge, tandis que pour les 11% restants, la traverse en acier constitue la solution optimisée.

8 Optimisation grâce au choix des composants et à la maintenance

Du point de vue du sous-projet «P4 Rigidité de la voie», des optimisations devraient être réalisées compte tenu de l'ensemble du cycle de vie de la voie. Des potentiels d'optimisation dans le cadre du choix des composants (construction nouvelle, renouvellement et remplacement de composants) et des mesures et stratégies de maintenance sont donc également présentés ci-après sur la base des conclusions disponibles. Sont également mentionnés ici les potentiels d'innovation possibles, dont les domaines d'application devraient être étudiés et analysés plus en détail à moyen terme.

8.1 Optimisation grâce au choix des composants



Afin de garantir une adaptation optimale entre le profil de roue et le profil de rail, il est recommandé d'utiliser le profil de rail uniforme 46E1. Un profil de rail asymétrique est actuellement développé et testé dans le cadre du projet P3 Roue/rail. Ce profil pourrait être utilisé à l'avenir pour les rayons inférieurs à 200 m afin d'optimiser la géométrie de contact entre la roue et le rail. La question de savoir s'il est judicieux d'utiliser un profil de rail optimisé en termes d'usure et, le cas échéant, également asymétrique dans les lignes droites reste ouverte. Une fois l'adéquation technique clarifiée, la rentabilité de ces mesures devra être examinée. *(État actuel de la recommandation, en concertation avec le projet P3 – Roue/rail de la maîtrise de système «Interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique»)*



Pour tous les tronçons de voie, tant en alignement qu'en courbe, il est recommandé d'appliquer un écartement continu de 1003 mm. Cela permet d'éviter un rétrécissement de l'écartement en dessous de 1000 mm. L'utilisation d'acier à rail à haute résistance de la qualité R400HT (ou R350HT) dans les courbes dont le rayon est inférieur à 300 m permet de réduire considérablement l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues et donc l'usure dynamique. La stratégie relative aux qualités de rails est définie en fonction des chemins de fer et des lignes, compte tenu de la répartition des rayons. Sur les tronçons à tracé droit (rayon supérieur à 600 m), l'utilisation de la classe de qualité R260 est recommandée. Si une stratégie à qualité unique est recommandée pour des raisons liées à la logistique et à l'approvisionnement, elle doit être mise en œuvre avec la qualité R350HT afin d'éviter une utilisation excessive de la qualité R400HT dans les tronçons droits. Des recommandations détaillées à ce sujet sont fournies à la section 7. *(État actuel de la recommandation, en concertation avec le projet P3 – Roue/rail de la maîtrise de système «Interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique»)*



Si des influences verticales récurrentes sont observées sur la voie au niveau des joints de soudure, en particulier lorsque les amplitudes acceptables sont dépassées, la stratégie de soudage doit également être remise en question à moyen terme. Les évaluations statistiques de Loidolt & Marschnig [14] suggèrent que les soudures aluminothermiques entraînent beaucoup plus souvent des déformations du cordon de soudure («weld battering») que les soudures par étincelage. Une explication possible du phénomène décrit est la zone d'influence thermique plus grande. Celle-ci peut entraîner localement une réduction de la dureté du champignon du rail et donc une usure accrue. Au vu des faits et des données disponibles, il convient d'évaluer si le soudage par étincelage peut également être utilisé comme procédé alternatif d'un point de vue technique et économique pour la voie métrique.



Le choix de l'inclinaison de pose des rails (1:20 ou 1:40) n'influe que très peu sur la géométrie de contact lors de l'utilisation de profils de roues optimisés en termes d'usure. Afin d'uniformiser la fixation des rails et d'améliorer l'interaction entre la roue et le rail, une inclinaison de pose uniforme de 1:20 est recommandée. (État actuel de la recommandation, en concertation avec le projet P3 – Roue/rail de la maîtrise de système «Interaction véhicule/voie ferrée à écartement métrique»)



Les semelles souples (85 kN/mm) présentent des avantages en termes d'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues et de transmission verticale des charges, tandis que les semelles rigides (700 kN/mm) réduisent le bruit (chant des rails). Afin d'équilibrer les avantages et les inconvénients des deux solutions, il est recommandé d'utiliser des semelles moyennement rigides (200 kN/mm). Dans les zones sensibles au bruit et en cas d'exigences formulées dans ce sens, il est possible d'utiliser des semelles rigides (700 kN/mm). Il convient cependant de les éviter autant que possible dans les courbes (rayon inférieur à 300 m) en raison de l'apparition accrue de l'usure ondulatoire à ondes longues (et du bruit qui en résulte).



Pour les zones soumises à d'importantes charges, l'utilisation de traverses en béton avec semelles plastiques est recommandée par défaut. Cette mesure améliore de manière significative la qualité de la position de la voie à long terme, ce qui augmente la durée d'utilisation. De plus, elle réduit l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues. L'utilisation de semelles sous traverse entraîne une réduction significative des pressions de contact entre la traverse et le ballast, prolongeant ainsi la durée d'utilisation du ballast.



Lorsque les charges sont faibles (< 5000 TB/j, indice de charge NC4/PM4 selon les DE-OCF) ou si l'épaisseur du lit de ballast est insuffisante, les traverses en acier peuvent constituer une alternative économique. En raison de leurs flancs étroits, la transmission de la charge est ponctuelle, ce qui entraîne des pressions superficielles très élevées au niveau des bords des traverses. Si les charges sont élevées, cela peut entraîner une fragmentation du ballast et une détérioration rapide de la position de la voie. En outre, les traverses en acier ne sont adaptées que dans une certaine mesure aux vitesses élevées.



L'utilisation de tapis sous ballast s'avère judicieuse dans des conditions limites spécifiques, par exemple dans le contexte de tunnels ou de discontinuités de rigidité. Il n'est pas possible de formuler ici une recommandation générale. Dans tous les cas, il est toutefois nécessaire de procéder à un dimensionnement en tenant compte des conditions spécifiques.



Dans le cadre d'une mesure de renouvellement, il convient de vérifier systématiquement si une amélioration de l'infrastructure est nécessaire et si la fonction d'évacuation des eaux de la voie ferrée est garantie. Si le sol est suffisamment porteur (cf. les DE-OCF), un assainissement de l'infrastructure s'avère généralement peu rentable.



L'utilisation d'une couche PSS ou d'une couche AC RAIL dépend en grande partie des conditions techniques et organisationnelles, telles que les durées d'interdiction ou les procédures de transformation. La couche AC RAIL est utilisée en cas d'interruption totale et de niveau de charge élevé, la couche PSS en cas de brèves interruptions du trafic.



Un tracé optimisé réduit la sollicitation de la voie ferrée et prolonge sa durée de vie. Il est recommandé de choisir un tracé aussi tendu que possible et de respecter les valeurs limites en situation normale selon les DE-OCF afin de garantir un équilibre entre la dynamique de marche et l'entretien. En règle générale, les rayons inférieurs à 200 m sont à éviter. Les changements de direction brusques dans le tracé de la voie doivent être évités, car ces profils de dévers, appelés «oreilles de chat», entraînent des forces roue-rail accrues et une usure. Il est donc impératif de prévoir des courbes de transition harmonieuses et des rampes de dévers régulières. Dans le cas de traverses en acier en Y, il convient de tenir compte de la perte de dévers possible et de la compenser par des travaux de bourrage ciblés.

8.2 Optimisation grâce à la maintenance



L'objectif prioritaire de la gestion des installations consiste à optimiser les coûts du cycle de vie, à garantir la pérennité de l'infrastructure et à planifier les mesures de maintenance et de renouvellement en fonction des besoins. Pour atteindre ces objectifs, il est recommandé de recenser de manière méthodique toutes les données pertinentes relatives à l'entretien. La structure et l'étendue des données recensées doivent suivre les recommandations du groupe de travail IRISSYS. Cela comprend notamment les paramètres suivants: ligne (nom), ligne (numéro), km de, km à, type de maintenance (bourrage, meulage des rails, pose de rails, pose de traverses, renouvellement de la superstructure, assainissement de l'infrastructure, nettoyage du ballast, évacuation des eaux), date de début, date de fin.



Une planification optimisée de la maintenance est généralement recommandée, ce qui inclut notamment le traitement des surfaces de bourrage et des rails sur la base de données de mesure. L'objectif de cette recommandation est d'optimiser la durée d'utilisation des différents composants ainsi que de l'ensemble de l'installation. La mise en œuvre d'une mesure appropriée en temps opportun permet d'éviter que l'usure progressive de certains composants n'entraîne une surcharge et par conséquent une usure significative d'autres composants de la voie.



Il est recommandé de mettre en place une stratégie optimisée de traitement de la surface des rails, y compris dans les lignes droites, car cela contribue à réduire les sollicitations dues aux irrégularités à la surface des rails (par exemple, usure ondulatoire à ondes longues, joints de soudure). Une telle stratégie permet de protéger les semelles, les traverses et le lit de ballast des sollicitations excessives. Un traitement rigoureux de la surface des rails contribue à la stabilité de la position de la voie et prolonge considérablement la durée d'utilisation de la voie. De plus, la restauration du profil des rails permet de maintenir un profil de rail conforme, ce qui est essentiel pour une combinaison optimisée des profils roue/rail.



Des études menées auprès des chemins de fer à voie métrique ont montré qu'avec des profils de roue usés, donc dits d'usure, des exigences minimales concernant la forme du profil des rails doivent être établies pour garantir une conicité équivalente et ainsi une qualité de marche sûre et confortable à des vitesses élevées. Des spécifications relatives à la conicité pour le traitement des rails sont élaborées à cet effet dans le cadre du projet P3 de la maîtrise de système.



En ce qui concerne le reprofilage dû à l'usure ondulatoire à ondes longues sur le rail de la file basse dans les courbes serrées, un seuil d'intervention (SRE) de 0,08 mm de profondeur est recommandé selon l'état actuel des connaissances. En fonction des caractéristiques de la ligne et des conditions limites d'exploitation, il n'est pas toujours possible de respecter cette valeur dans la pratique sur certaines lignes avec les bogies actuellement utilisés. Il est explicitement indiqué qu'une valeur de crête à crête de 0,2 mm ne doit en aucun cas être dépassée, car le risque d'endommagement s'en trouverait significativement accru.



Une usure importante des semelles sous rail a notamment été observée ponctuellement dans les courbes. Cette usure peut être détectée grâce à la mesure de l'écartement de la voie ou de l'inclinaison des rails effectuée par le véhicule de mesure de la voie et, lorsque des séries temporelles sont disponibles, elle peut également faire l'objet de prévisions. La mise en œuvre de mesures appropriées permet d'effectuer une planification précoce, et ainsi d'éviter de manière préventive une sollicitation excessive du système.

En comparaison avec les mesures stationnaires de DB Systemtechnik, il a été démontré que les mesures d'écartement de la voie effectuées avec le véhicule de mesure de la voie métrique détectent de manière fiable l'écartement de la voie soumis à des charges. Toutefois, en raison de la disposition du système de mesure, le sens de marche du wagon de mesure peut entraîner de légers écarts. Dans la mesure où les conditions organisationnelles le permettent, il est recommandé d'effectuer la mesure de l'écartement de la voie en amont. Si c'est impossible, les mesures doivent toujours être effectuées dans

le même sens de marche afin de garantir la reproductibilité. Cela s'applique également aux autres paramètres qui dépendent du sens de marche.



La capacité d'évacuation des eaux de la voie ferrée doit être garantie à tout moment. Les problèmes structurels au niveau du lit de ballast et de l'infrastructure peuvent être détectés à l'aide de différents procédés automatisés (analyse spécifique de la position de la voie, géoradar, wagon de mesure de l'affaissement). Si ces dommages structurels sont détectés trop tard, il n'est généralement plus possible de mettre en œuvre des mesures de maintenance, et des travaux de renouvellement (partiel) doivent être réalisés.



Un graissage ciblé des flancs des rails (via le système de graissage des boudins, SKS) contribue de manière significative à réduire l'usure des roues et des rails, en particulier dans les courbes serrées. Un graissage excessif peut toutefois entraîner la projection de graisse sur le plan de roulement et altérer la traction. À l'inverse, un graissage insuffisant a des répercussions importantes sur la durée de vie des composants. Les gestionnaires d'infrastructure sont donc tenus de contrôler régulièrement le film lubrifiant sur les flancs des rails. Le graissage initial avec de la graisse SKS sur la face de roulement est recommandé aussi bien lors de la pose de nouveaux composants qu'après des interdictions de voies prolongées.

De plus, il a été constaté que les systèmes existants sur voie métrique ne garantissent actuellement pas un équilibre fiable entre graissage excessif et graissage insuffisant. Compte tenu de ces conclusions, la mise en œuvre d'un graissage adapté aux besoins est nécessaire à moyen terme. Cela signifie que la quantité de lubrifiant et les intervalles de graissage doivent être adaptés aux caractéristiques de la ligne, aux conditions de traction actuelles, aux émissions de bruit ou aux influences climatiques. Des études et des essais sont actuellement menés à ce sujet dans le cadre du projet «P3».



En complément, l'utilisation du conditionnement du champignon du rail (SKK) est recommandée, en particulier dans les courbes serrées où l'on observe une importante usure dynamique ou un haut niveau de bruit. Le conditionnement du champignon du rail réduit le frottement dans la zone de contact roue/rail, diminue l'apparition de l'usure ondulatoire à ondes longues et contribue à réduire le crissement dans les courbes. Les résultats des essais en exploitation réalisés dans le cadre de la maîtrise de système et au sein de RAILplus montrent des réductions significatives du bruit et de l'usure. L'efficacité du produit dépend du dosage correct et de l'adaptation aux conditions de la ligne. Le projet «P3» a par ailleurs démontré la rentabilité élevée de l'utilisation du conditionnement du champignon du rail.

8.3 Potentiels d'optimisation futurs grâce à des innovations



Les études menées jusqu'à présent sur voie normale indiquent que les semelles à haut pouvoir d'amortissement (variantes de semelles moyennement rigides ayant un pouvoir d'amortissement spécifiquement accru) permettent une transmission optimisée de la charge tout en atténuant le bruit. Les domaines d'application et la rentabilité dans le cadre de la voie métrique doivent encore faire l'objet d'essais sur le terrain.



Dans les courbes à rayon serré, des forces transversales et des charges dynamiques élevées s'exercent sur le point d'appui, ce qui peut entraîner un basculement du rail, une modification de son inclinaison et une usure accrue.

Si des semelles sont utilisées, il est généralement recommandé d'utiliser des matériaux de haute qualité et, le cas échéant, d'optimiser la force de maintien. Des études et des essais sur le terrain sont prévus pour 2026. L'objectif est de développer un concept de fixation standardisé pour les rayons serrés qui stabilise la géométrie de la voie, réduit l'usure et diminue durablement les coûts du cycle de vie.



À l'avenir, les traverses en plastique pourraient constituer une alternative pour les tronçons soumis à des charges moyennes à faibles. Les traverses en plastique recyclé, en particulier, contribuent positivement aux objectifs de durabilité. Des traverses en plastique ont été installées récemment sur certains tronçons à voie métrique. Une analyse détaillée est nécessaire pour évaluer les domaines d'application techniques potentiels ainsi que leur rentabilité.



Les irrégularités à la surface des rails ont un impact direct sur la durée de vie de la voie ferrée et sur la sollicitation des autres composants. Afin de garantir la qualité à long terme, des travaux préparatoires ont été lancés en vue de l'élaboration d'une stratégie de traitement de la surface des rails sous la forme d'un règlement RTE. Cette stratégie offre un potentiel d'optimisation considérable et doit être poursuivie de manière rigoureuse afin de garantir une qualité élevée et constante des installations et, par conséquent, la stabilité du système.



Grâce à des analyses innovantes des données de mesure des voies, il est possible d'évaluer et de prévoir l'état des différents composants. Ces composants comprennent, par exemple, les semelles sous rail, les traverses, le lit de ballast ainsi que l'infrastructure et le terrain naturel. De telles analyses sont déjà utilisées par les chemins de fer européens à voie normale et pourraient également être élaborées et intégrées à moyen terme dans la planification de mesures pour les chemins de fer à voie métrique.

9 Perspectives

Le présent vadémécum constitue une base solide pour un choix économiquement pertinent des composants de la voie ferrée et présente d'ores et déjà des conclusions détaillées issues d'analyses et de la pratique. Les résultats des simulations, études et essais en exploitation en cours sur l'interaction véhicule/voie ferrée seront complétés d'ici la fin de la tâche systémique.

Ce vadémécum participe à améliorer la disponibilité de l'infrastructure en formulant des recommandations visant à réduire l'usure et à stabiliser la position de la voie. Les stratégies en matière de composants et les bases techniques exposées dans le présent document constituent le fondement d'une prise de décision harmonisée pour les chemins de fer à voie métrique. Dans le même temps, il est nécessaire d'approfondir les analyses du coût du cycle de vie (LCC), notamment au regard des potentiels d'optimisation qui seront développés dans le cadre des centres Voie métrique afin d'augmenter durablement la rentabilité globale.

Un autre axe prioritaire concerne le développement des réglementations. Le règlement RTE relatif au traitement des rails doit être activement poursuivi, car les conclusions montrent l'importance d'un entretien rigoureux des surfaces pour la durée de vie et le coût du cycle de vie. Il convient en outre d'examiner avec l'industrie les potentiels d'innovation présentés dans ce vadémécum, par exemple les systèmes de fixation optimisés et les composants élastiques, et de les concrétiser si nécessaire.

L'application rigoureuse et le développement continu du vadémécum constituent dès lors un levier essentiel pour atteindre les objectifs du système. Ceux-ci vont de l'augmentation de la disponibilité à l'encouragement à innover et à développer les compétences techniques dans le domaine de la voie métrique, en passant par la standardisation de solutions techniques.

10 Listes

10.1 Références

- [1] Kohler Michael, Trag- und Stabilitätsverhalten. Kursunterlagen des CAS Eisenbahn Fahrbahn, 27.10.2023
- [2] Gehriger Albin, RAILplus / AB: *Schadenskatalog Fahrbahn*. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00062, 10.11.2025
- [3] Alessandro Bianchi, RAILplus/Rhätische Bahn & Roland Müller, Gleislauftechnik Müller: *Schadenskatalog Interaktion – Kontaktflächen Rad und Schiene*. Technischer Bericht, RAILplusSF-00066, 18.04.2025
- [4] Güldenapfel Peter, Railplus / KPZ Fahrbahn: *Grundlagenscanning Umfrage Bahnen*. Technischer Bericht, 14.10.2022
- [5] Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt: *Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung. Bericht 36 (2023). Untersuchung und Auswirkung des Verschleissverhaltens neuer Rad-Schiene-Paarungen*, Februar 2023
- [6] Werner Stefan, RAILplus / Railvision Sàrl: *Anleitung Berechnungstool Zimmermann. Bedienungshinweise und Hintergrundinformationen*, 12.10.2025
- [7] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), SN EN 16432-2:2017 *Bahnanwendungen - Feste Fahrbahn-Systeme - Teil 2: Systementwurf, Untersysteme und Komponenten*, 1.11.2017
- [8] Schulz Olaf, Keller Steffen. SBB: FB 400 – 0060 *Planungsassistent Übergänge Fahrbahn SBB*, 01.03.2023
- [9] Schuler Lukas, RAILplus / RBS: *Spezifikation für die Erfassung, Auswertung und Bewertung von Rad- und Schienenprofilen*. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00004, 04.10.2024
- [10] DB InfraGO AG: *Planungshilfe „Rechnerisches Verfahren zur Bewertung der dynamischen Stabilität“*. Leitfaden, 2018
- [11] Auer Florian, TU Graz: *Zur Verschleissreduktion von Gleisen in engen Bögen*. Dissertationsschrift, 7. Juni 2010.
- [12] Van Damme Bart; Cugnoni Joël; Nardin Raphaël; Crausaz Vincent, Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD): *Experimental and numerical track system evaluation: Methodology for finding optimal components*. Forschungsbericht im Auftrag BAFU/OFT, 31.10.2023.
- [13] Quirchmair Martin; Steiner Ekkehard; Augustin Andreas; Kumar Nishant, Getzner Werkstoffe GmbH / Universität Innsbruck: *Gleislagestabilität – Was tun, wenn's drückt? – Teil 2*. Fachartikel, ZEV Rail, Ausgabe 06/07, 2025.
- [14] Loidolt Markus, Marschnig Stefan, Graz University of Technology: *Weld battering of thermite welds and flash butt welds based on statistical evaluations*. Artikel, Engineering Failure Analysis, Februar 2025.

10.2 Figures

Photo de couverture: RAILplus	
Figure 1: termes de la voie ferrée [1].....	8
Figure 2: fonds investis dans la voie ferrée d'un chemin de fer à voie métrique membre de RAILplus	13
Figure 3: prix au mètre de voie des composants de la superstructure ballastée avec une construction des voies conventionnelle [CHF/m linéaire].....	15
Figure 4: effets de la rigidité des semelles	17
Figure 5: avantages et inconvénients des types de traverses de ligne utilisés dans l'exploitation par adhérence.....	19
Figure 6: affaissement avec et sans semelles.....	22
Figure 7: affaissement du rail au niveau d'une transition sur la voie ferrée [8].....	24
Figure 8: aperçu de la gestion stratégique et opérationnelle des installations	25
Figure 9: établissement d'éléments standard.....	26
Figure 10: outils de recensement, d'enregistrement, d'analyse et de visualisation des données dans la gestion des installations	27

Figure 11: types de maintenance selon la norme SN EN 13306	28
Figure 12: représentation schématique des fonctions de coûts dans le suivi des annuités.....	29
Figure 13: finalisation du cycle spécifique d'une phase de projet pour la planification d'un renouvellement	29
Figure 14: tracé de la courbe d'annuités du tronçon spécifique.....	30
Figure 15: liens et possibilités d'influence des effets en fonction du choix des composants de la voie	31
Figure 16: aperçu des modèles de simulation de la voie ferrée, des objectifs et des conclusions	32
Figure 17: contraintes verticales et répartition du ballast selon l'élasticité de la voie ferrée; simulations par Baugrund Dresden.....	33
Figure 18: effets du choix des rails et des appuis de rails	34
Figure 19: effets du choix des traverses, du ballast et du terrain naturel	35
Figure 20: stratégie générale en matière de composants dans le cadre d'un renouvellement.....	38
Figure 21: différenciation des lignes pour l'élaboration de la stratégie relative à la qualité d'acier à rail selon les lignes	38
Figure 22: détermination des recommandations spécifiques aux lignes pour la qualité des rails et le type de traverses, page 1 sur 2.....	39
Figure 23: détermination des recommandations spécifiques aux lignes pour la qualité des rails et le type de traverses, page 2 sur 2.....	40

10.3 Tableaux

Tableau 1: calcul de l'affaissement selon Zimmermann avec une charge par essieu de 16 t, un entraxe des essieux de 2,4 m, semelle = 700 kN/mm	22
Tableau 2: calcul de l'affaissement selon Zimmermann avec une charge par essieu de 12 t, un entraxe des essieux de 2,0 m, semelle = 700 kN/mm	23
Tableau 3: calcul de l'affaissement selon Zimmermann avec une charge par essieu de 12 t, un entraxe des essieux de 2,0 m, semelle = 100 kN/mm	23