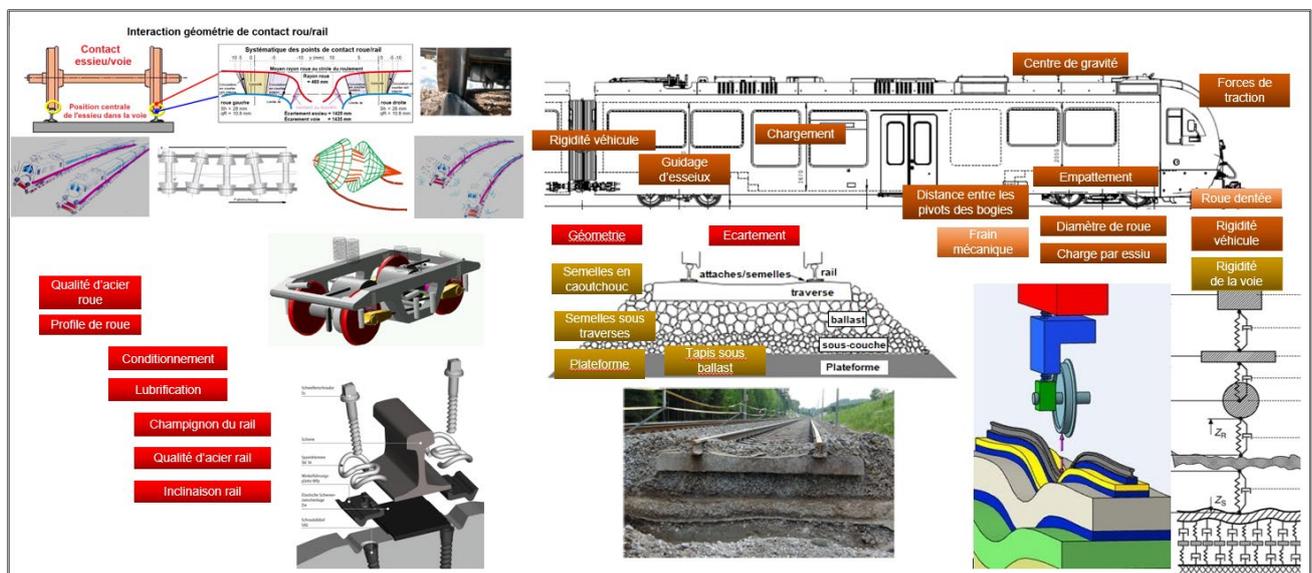


Saisie des bases

Maîtrise de système Interaction matériel roulant – voie ferrée Voie métrique
 Projet: 1 Saisie des bases
 Module: **Objet de livraison 1.2**

Elaboration et réalisation d'un sondage auprès des chemins de fer



Date / Statut:

24.10.2022 / Libéré

Nombre de pages 57

Auteur:

Peter Güldenapfel / KPZ Fahrbahn

Contrôle:

Roland Müller / Gleislauftechnik Müller

Libération:

Martin Siegen / MGBahn

Libération par la maîtrise de système

Version	Responsable	Date
1.0	Technical Board	27.10.2022
1.0	Management Board	31.10.2022

Management Summary

L'objet de livraison 1.2 du projet P1 «Saisie des bases» comporte trois objectifs afin de saisir le savoir des chemins de fer sur l'interaction matériel roulant – voie ferrée:

- 1. L'enquête structurée auprès des chemins de fer sur l'usure et les défauts sur les roues et les rails doit permettre de rassembler les bases nécessaires à l'analyse des relations entre l'évolution des défauts et de l'usure au niveau du contact roue/rail et les caractéristiques de la voie en place, des véhicules en circulation et des zones opérationnelles avec leur tracé caractéristiques.*
- 2. Les résultats rassemblés sont analysés et évalués sommairement en termes de causes et de conséquences. En cas d'incertitude, des entretiens avec les chemins de fer concernés sont prévus.
Les résultats de l'enquête seront mis à disposition des projets P2 – P5 comme base pour la suite des travaux.*
- 3. Les résultats rassemblés sont transmis aux projets P2 – P5 et sont en outre communiqués sous forme appropriée aux chemins de fer interrogés.*

Pour des raisons de capacités, les entretiens personnels initialement prévue ont été remplacé par une enquête écrite. Il s'est avéré que la plupart des chemins de fer ont dû être relancés plusieurs fois pour obtenir des réponses complètes.

L'enquête à laquelle ont répondu 17 chemins de fer membres de RAILplus ainsi que deux compagnies de tram et le Forchbahn a fourni des informations et des enseignements précieux pour le projet Maîtrise de système Interaction matériel roulant / voie ferrée Voie métrique:

- L'usure des roues au niveau du boudin et de la surface de roulement fait partie des formes de défauts les plus fréquentes sur les véhicules, avec une part de 50 %.
- Parmi les formes de dommages aux surfaces de roulement des rails, l'usure des rails et les usures ondulatoires dominant.
- Plus de la moitié des chemins de fer ramènent une augmentation des coûts constatée ces dernières années à une interaction non optimale entre le matériel roulant et l'infrastructure.
- La lubrification des boudins et le conditionnement du champignon de rail doit permettre de réduire les crissements dans les courbes, l'usure des roues et des rails ainsi que la formation d'usures ondulatoires
- Les connaissances relatives au profil des roues et des rails doivent être développées de manière à pouvoir déterminer et appliquer les profils adaptés à l'interaction optimale matériel roulant / voie ferrée.
- Pour la plupart des chemins de fer interrogés, les charges moyennes quotidiennes sur les voies ont nettement augmenté en raison de densifications des cadences et de l'augmentation des charges par essieu.
- Les semelles sous rail souples utilisées aujourd'hui sur les traverses en béton contribuent efficacement à la réduction de la formation d'usures ondulatoires. Ceci au détriment d'une augmentation du bruit. La résolution de ce conflit d'intérêts entre réduction de l'usure et augmentation du bruit grâce à une semelle sous rail optimisée sera un point principal du projet P4.
- La formation et l'instruction des collaborateurs doivent être renforcées afin de créer un langage technique commun dans la « voie métrique », en particulier dans le domaine spécialisé de l'interaction matériel roulant / voie ferrée.
- Le savoir des chemins de fer sur leurs véhicules devrait être approfondi.
- Les spécifications pour l'acquisition de nouveaux véhicules devraient également inclure le comportement dynamique.

Les résultats détaillés du sondage ont été transmis aux projets P2– P5 et forment une base précieuse pour ces-derniers.

Table des matières

1	Situation initiale.....	7
1.1	Objectifs du sondage auprès des chemins de fer	8
1.2	Délimitation	8
1.3	Procédé.....	8
2	Résultats du sondage	9
2.1	Introduction	9
2.2	Evaluation	9
2.3	Compagnies de chemin de fer impliquées	10
2.4	Résultats du sondage Partie générale.....	11
2.5	Résultats questionnaire P2.....	17
2.5.1	<i>Questions générales</i>	<i>17</i>
2.5.2	<i>Graissage des boudins (SKS)</i>	<i>19</i>
2.5.3	<i>Conditionnement du champignon du rail (SKK)</i>	<i>21</i>
2.6	Résultats questionnaire P3.....	24
2.6.1	<i>Questions concernant les appareils de voie</i>	<i>24</i>
2.6.2	<i>Questions concernant l'écartement</i>	<i>24</i>
2.6.3	<i>Questions concernant les profils de roue et de rail</i>	<i>26</i>
2.6.4	<i>Questions concernant l'usure et les défauts sur les roues et les rails</i>	<i>28</i>
2.6.5	<i>Questions concernant les documents pour l'évaluation des défauts aux roues et aux rails ..</i>	<i>31</i>
2.6.6	<i>Questions concernant l'atteinte au confort.....</i>	<i>34</i>
2.6.7	<i>Questions concernant des déraillements.....</i>	<i>35</i>
2.6.8	<i>Questions concernant la spécification des calculs de dimensionnement et des preuves du comportement dynamique</i>	<i>36</i>
2.6.9	<i>Questions concernant la spécification de preuves techniques par essais.....</i>	<i>37</i>
2.6.10	<i>Questions concernant la spécification de la preuve de durabilité en exploitation</i>	<i>38</i>
2.6.11	<i>Inputs pour autres projets.....</i>	<i>38</i>
2.7	Résultats questionnaire P4.....	39
2.7.1	<i>Questions générales</i>	<i>39</i>
2.7.2	<i>Questions concernant le rail</i>	<i>40</i>
2.7.3	<i>Questions concernant les semelles sous rail</i>	<i>42</i>
2.7.4	<i>Questions concernant les traverses et les semelles sous traverse</i>	<i>43</i>
2.7.5	<i>Questions concernant les voies à crémaillère.....</i>	<i>43</i>
2.7.6	<i>Question concernant les rails à gorge</i>	<i>43</i>
2.7.7	<i>Questions concernant l'infrastructure et l'évacuation des eaux</i>	<i>43</i>
2.7.8	<i>Bourrage et meulage.....</i>	<i>45</i>
2.7.9	<i>Surveillance de la géométrie de la voie</i>	<i>45</i>
2.7.10	<i>Questions concernant les défauts dans la voie.....</i>	<i>45</i>
2.7.11	<i>Bruit et vibrations</i>	<i>46</i>
2.7.12	<i>Impact matériel roulant neuf.....</i>	<i>47</i>

2.8	Résultats questionnaire P5.....	48
2.8.1	<i>Mise en évidence des mesures à prendre dans le cadre du projet P5.....</i>	48
2.8.2	<i>Inputs pour autres projets.....</i>	49
2.8.3	<i>Conclusions importantes pour les chemins de fer</i>	50
3	Conclusion.....	51
3.1	Résumé des conclusions les plus importantes	51
4	Répertoires	55
4.1	Révisions	55
4.2	Figures	55
4.3	Tableaux	56
5	Annexe	57
5.1	Annexe A: Questionnaire partie 1 et 2.....	57

1 Situation initiale

Le projet P1 rassemble le savoir-faire de base existant au niveau national et international et identifie les connaissances manquantes. Un sondage dans la branche permet de localiser et de classer les points problématiques et de saisir les données de base sur les conditions d'exploitation. Celles-ci sont d'une grande importance lors de simulations ultérieures et de l'évaluation de l'impact qui en découle.

Le projet P1 Saisie des bases fait partie intégrante de la maîtrise de système matériel roulant / voie ferrée Voie métrique. Ce projet vise à garantir que les connaissances de base nécessaires aux chemins de fer métriques pour réduire l'usure et les défauts sur les roues et les rails soient connues. Les résultats seront concrètement mis en œuvre dans les projets P2 - P5.

Le projet est composé de quatre modules:

- Module 1: Connaissances existantes et possibilités de coopération
- Module 2: Elaboration et réalisation du sondage auprès des chemins de fer
- Module 3: Analyse et évaluation sommaire des résultats du sondage
- Module 4: Transmission des résultats aux projets P2 – P5

Le rapport ci-présent contient les résultats des modules 2 – 4. Les résultats du module 1 sont résumés dans un rapport séparé.

Le rapport recense les défauts et usures des roues et des rails, ainsi que de la superstructure et de l'infrastructure de la voie ferrée, survenus chez les chemins de fer métriques suisses, au moyen d'une enquête systématique. Outre les défauts, les principales caractéristiques du matériel roulant et de la voie ferrée sont également relevées. Le questionnaire est divisé en cinq parties.

Les questions dans la première partie sont générales et concernent avant tout:

- Formes d'usure / de défauts sur roues et rails resp. éléments de la voie ferrée, leur classement en fonction de la fréquence et de l'impact sur l'ensemble du système roue/rail ou matériel roulant / voie ferrée.
- Types et effets du comportement à court et à long terme sur le véhicule et la voie ferrée, ainsi que leurs conséquences.
- Evolution du comportement à court et à long terme au cours des dernières années et causes possibles.
- Utilisation de bases de planification pour la maintenance du système (technique de mesure, évaluation, outils de planification etc.)

Les questions des parties 2 à 5 concernent les aspects des projets P2 à P5.

1.1 Objectifs du sondage auprès des chemins de fer

Les objectifs des modules 2 – 4 selon le mandat du projet sont les suivants:

Module 2:

L'enquête structurée menée auprès des chemins de fer sur l'usure et les défauts sur les roues et les rails permettra de rassembler les bases nécessaires à l'analyse des relations entre l'évolution des défauts et de l'usure au niveau du contact roue/rail et les caractéristiques de la voie et des véhicules en exploitation et des zones d'exploitation avec leur tracé caractéristique.

Module 3:

Les résultats rassemblés dans le module 2 sont analysés dans ce module et évalués sommairement en termes de causes et d'effets. En cas d'incertitudes, des interviews avec les chemins de fer concernés sont prévus.

Les résultats du sondage sont mis à disposition des projets P2 - P6 comme base pour la suite des travaux.

Module 4:

Les résultats rassemblés dans le module 3 sont transmis dans ce module aux projets P2 - P6 et sont en outre communiqués sous une forme appropriée aux chemins de fer ayant participé au sondage.

1.2 Délimitation

Aucune question spécifique par rapport au projet P6 Rentabilité globale n'a été posée lors de l'élaboration du questionnaire, comme le projet P6 est orienté vers l'avenir et doit fournir, sur la base d'un modèle technico-économique élaboré à cet effet, des éléments objectifs pour soutenir les décisions stratégiques des différents acteurs. Pour ce faire, les projets P1 à P5 fournissent les résultats de leurs travaux et essais. Les liens systémiques entre toutes les dimensions économiques sont identifiés et décrits sur cette base afin de permettre le calcul coûts/bénéfices des solutions développées dans les projets P2 à P5.

1.3 Procédé

Le procédé suivant a été choisi pour le sondage:

- Elaboration du questionnaire (partie générale, questions par projet)
- Entrée dans Microsoft Forms
- Envoi aux chemins de fer
- 1^{ère} évaluation du sondage par les groupes de projet
- Résumé des points ouverts
- Evaluation dans les projets
- **Résumé des résultats dans le présent rapport**

2 Résultats du sondage

2.1 Introduction

Pour des raisons de capacité, les entretiens personnels initialement prévus ont été remplacés par une enquête écrite. Il s'est avéré que la plupart des chemins de fer ont dû être relancé plusieurs fois pour obtenir des réponses complètes.

Malheureusement, l'outil de sondage prévu, Microsoft Forms, ne s'est pas révélé très facile d'utilisation. Il était certes possible de créer automatiquement des graphiques pertinents, mais il n'était pas possible d'effectuer des sauvegardes partielles des réponses au sondage.

Les questions n'ont parfois pas été comprises ou n'ont pas été répondues du tout. C'est pourquoi une tentative d'améliorer la qualité des réponses a été effectuée lors d'un deuxième tour.

Malgré ces conditions défavorables, il a été possible de réaliser une évaluation plausible du sondage auprès des chemins de fer interrogés et de collecter de nombreuses informations précieuses pour la suite des travaux dans le cadre des projets P2 - P5, qui profiteront finalement aussi aux chemins de fer.

2.2 Evaluation

L'évaluation du sondage a été effectué par les équipes de projet respectives:

- P1: Questions générales cf. ch. 2.4
- P2: Conditionnement du champignon du rail et lubrification des boudins cf. ch. 2.5
- P3: Rail/roue cf. ch. 2.6
- P4: Rigidité de la voie cf. ch. 2.7
- P5: Matériel roulant cf. ch. 2.8

2.3 Compagnies de chemin de fer impliquées

Le questionnaire a été envoyé aux 20 compagnies membres de RAILplus ainsi qu'aux cinq compagnies de tram et au Forchbahn cf. Tableau 1 :

Membres RAILplus

Chemin de fer	Abréviation
Aare Seeland mobil AG	Asm
Aargau Verkehr AG	AVA
Appenzeller Bahnen AG	AB
Berner Oberland-Bahnen AG	BOB (JB)
Chemins de fer du Jura	CJ
Chemin de fer Lausanne - Echallens - Bercher SA	LEB
Chemin de fer Montreux Oberland bernois SA	MOB
Chemin de fer Nyon-St.Cergue-Morez SA	NStCM
Ferrovie Luganesi SA	FLP
Matterhorn Gotthard Bahn	MGBahn
Regionalverkehr Bern-Solothurn AG	RBS
Rhätische Bahn AG	RhB
Società per le Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi SA	FART
Transports de Martigny et Régions SA	TMR
Transports publics du Chablais SA	TPC
Transports publics Fribourgeois	TPF
Transports Publics Neuchâtelois SA	transN
Transports de la région Morges - Bière - Cossonay SA	MBC
TRAVYS SA	TRAVYS
zb Zentralbahn AG	zb

Autres compagnies

Compagnie	Abréviation
Forchbahn AG	FB
Baselland Transport AG	BLT
Verkehrsbetriebe Zürich	VBZ
Basler Verkehrsbetriebe	BVB
Städtische Verkehrsbetriebe Bern	BERNMOBIL
Transports publics genevois	TPG

Légende:

Questionnaire rempli

Sans réponse

Tableau 1: Chemins de fer interrogés

Des chemins de fer interrogés, 17 membres de RAILplus ainsi que deux compagnies de tram et le Forchbahn ont répondu au sondage (marqués en vert dans le Tableau 1).

2.4 Résultats du sondage Partie générale

Les questions de la partie générale avaient pour but d'obtenir un aperçu rapide des principales formes de défauts et de problèmes sur le matériel roulant et la voie ferrée. Un éventuel approfondissement et des précisions ont été apportés dans les sections consacrées aux projets P1 - P5.

16 chemins de fer ont répondu à la question concernant les types de défauts sur les roues des véhicules qui occasionnent les coûts d'entretien ou les problèmes les plus importants. La répartition par type de défaut proposé est présentée dans la Figure 1. Malheureusement, les données du plus grand chemin de fer métrique de Suisse, le RhB, manquent pour cette question.

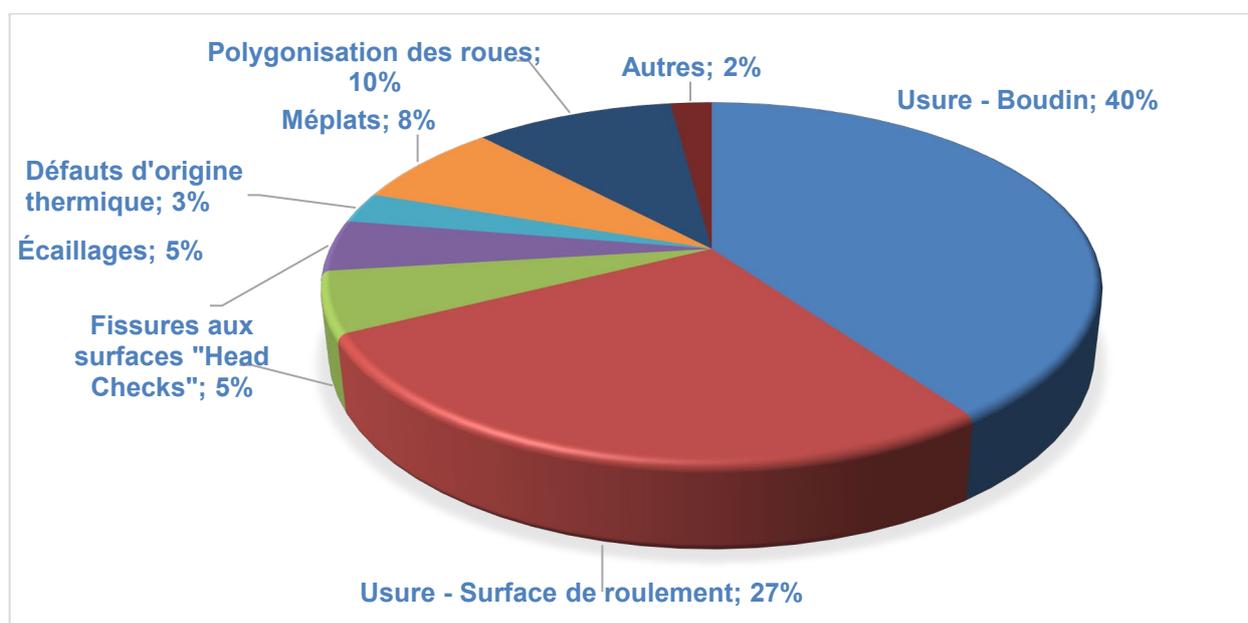


Figure 1: Formes de défauts au matériel roulant

On peut déduire de la Figure 1 que les principales formes de défauts se répartissent entre les 4 types suivants:

- 40 % Usure des boudins
- 27 % Usure de la surface de roulement
- 10 % Polygonisation des roues
- 8 % Méplats

15 chemins de fer indiquent l'usure des roues au niveau du boudin et 12 chemins de fer l'usure des roues au niveau de la surface de roulement comme type de défaut dominant. Ces types de défauts apparaissent donc chez presque tous les chemins de fer. Comme ces données sont relatives à la somme totale des défauts constatés (mesurée par rapport au 100% des 8 types de défauts par chemin de fer), on ne peut pas déduire si des pourcentages élevés indiqués par les chemins de fer pour un certain type de défaut doivent vraiment être interprétés comme indicateur pour une problématique significative. Les ordres de grandeur respectifs dépendent de différents facteurs qui ne sont pas pris en compte dans les résultats présentés ci-dessus. L'indicateur de l'usure de la surface de roulement est la réduction du diamètre de roue en fonction du kilométrage (nombre de kilomètres parcourus pour 1 mm de réduction du diamètre de la roue). Cet indicateur est pris en compte pour les évaluations des projets P3 et P5.

Les résultats concernant les formes de défauts soulèvent les questions suivantes, qui doivent être analysées de manière plus approfondie dans P3 et P5:

- Sur quelles lignes l'usure des roues est-elle dominante ?
- Y a-t-il des dépendances avec la répartition des rayons de courbure ?
- Y a-t-il des dépendances par rapport au type de véhicule en circulation ?
- Y a-t-il des différences entre les bogies porteurs et les bogies moteurs ?
- Y a-t-il des dépendances avec les nuances d'acier des roues ?

15 chemins de fer ont répondu à la question concernant les types de défauts sur les rails qui occasionnent les coûts d'entretien ou les problèmes les plus importants. La répartition par forme de défaut proposée est montrée dans la Figure 2.

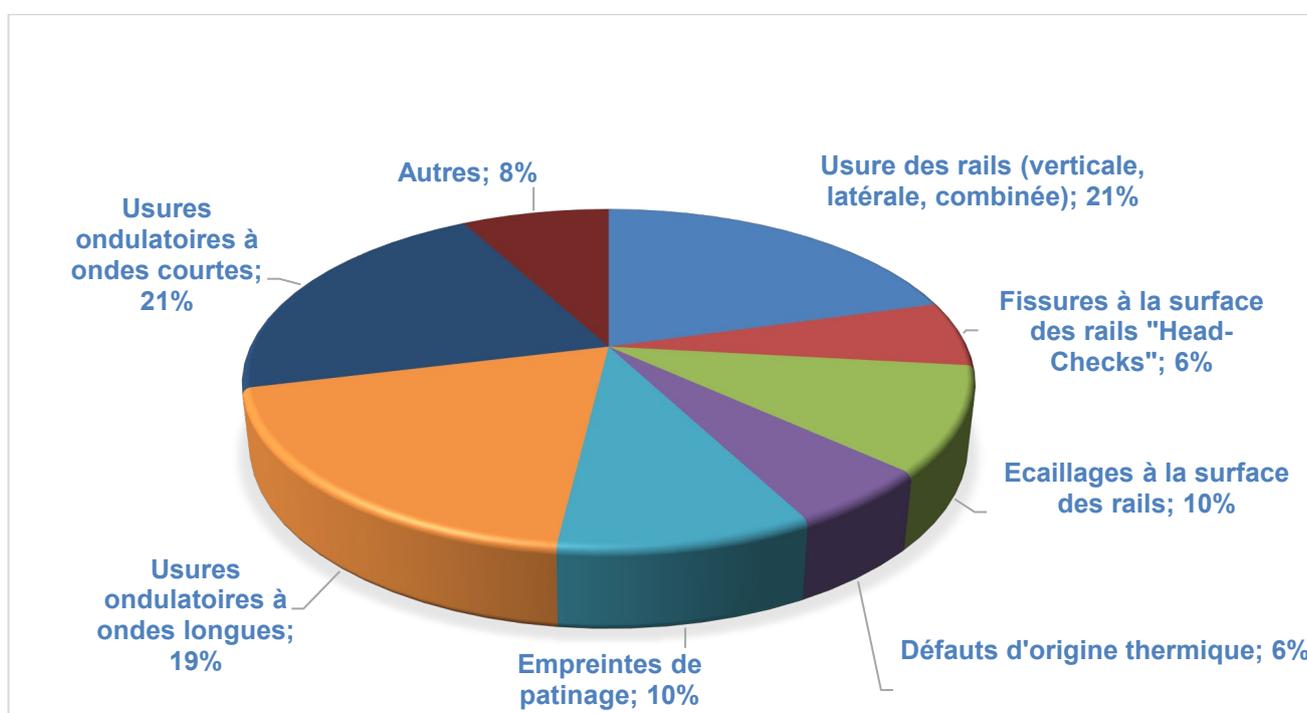


Figure 2: Formes de défauts sur les rails

Contrairement aux véhicules, les formes de défauts constatés sur les surfaces de roulement des rails présentent une répartition large. Les formes de défauts suivantes dominent :

- 21 % Usure des rails
- 21 % Usures ondulatrices à ondes courtes
- 19 % Usures ondulatrices à ondes longues
- 10 % Empreintes de patinage et écaillages à la surface des rails

En raison du fait que les chemins de fer métriques présentent en général des courbes à petits rayons, les annonces concernant les usures ondulatrices à onde courte sont à prendre avec précaution. Dans les courbes étroites, les usures ondulatrices à ondes longues sont fréquentes sur la file intérieure. En revanche, les usures ondulatrices à ondes courtes apparaissant sur les deux files de rails sont plutôt rares chez la voie métrique.

On peut donc retenir que l'usure des rails et les usures ondulatoires à ondes longues sont les principales formes de défauts pour les 15 chemins de fer. Le projet P4 fournit des réponses quant à la répartition sur le rail en intérieur et en extérieur de courbe ainsi que, pour les rails extérieurs, sur l'usure au flanc du rail et sur l'augmentation de l'écartement due à l'usure.

Les résultats concernant les formes de défauts soulèvent les questions suivantes, qui doivent être analysées de manière plus approfondie dans le projet P3:

- Sur quelles lignes l'usure des rails ou les usures ondulatoires à ondes longues sont-elles dominantes ?
- Y a-t-il des dépendances par rapport au tracé (répartition des rayons de courbure) ?
- Y a-t-il des dépendances par rapport aux véhicules en circulation ?
- Y a-t-il des dépendances entre usures ondulatoires à ondes longues et nuance d'acier du rail ?

15 chemins de fer ont répondu à la question concernant les types de défauts sur la superstructure et l'infrastructure, qui causent les plus grands coûts de maintenance resp. le plus de problèmes. Figure 3 montre la répartition par type de défaut proposé.

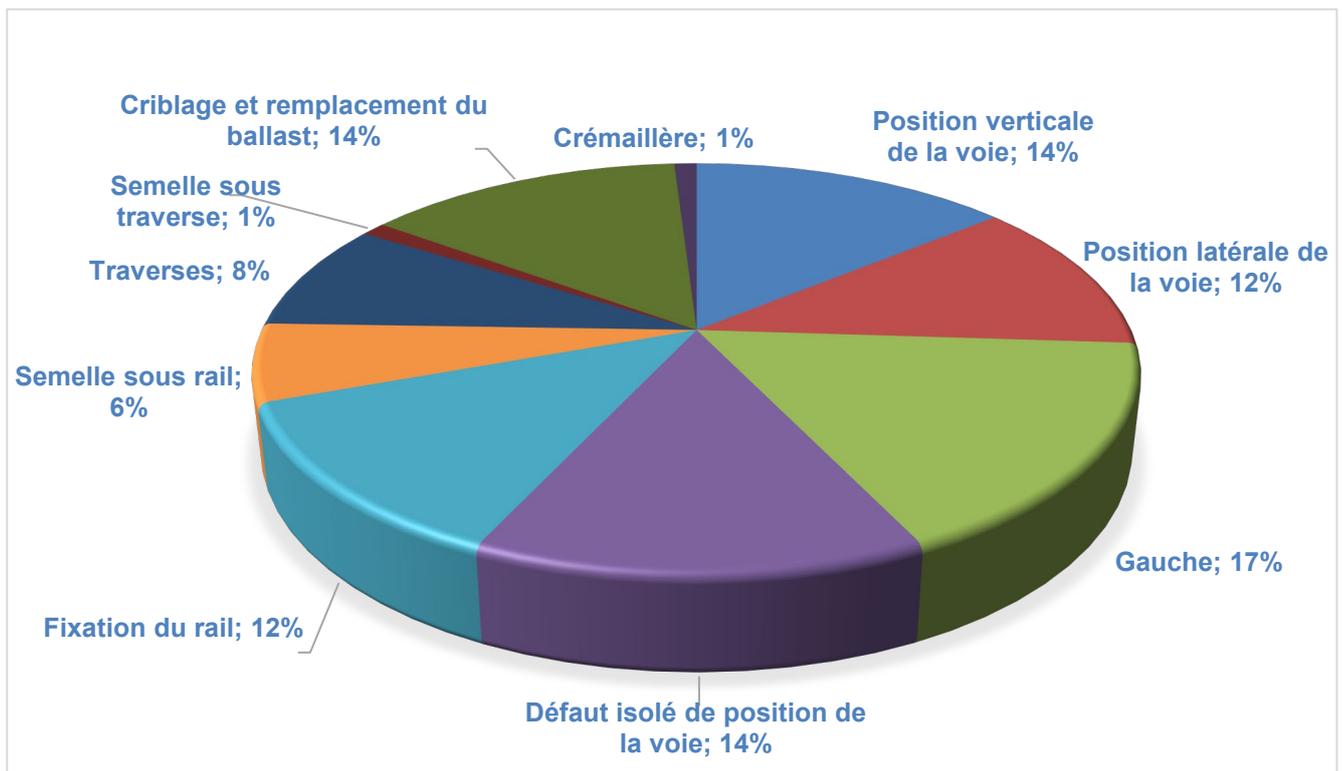


Figure 3: Types de défauts sur la superstructure et l'infrastructure

La répartition des types de défauts sur l'infrastructure et la superstructure est encore plus grande par rapport aux résultats pour les véhicules (Figure 1) et les rails (Figure 2). Les formes de défaut le plus souvent mentionnées sont:

- 17 % Gauche
- 14 % Position verticale de la voie
- 14 % Défaut isolé de position de la voie
- 14 % Criblage et remplacement du ballast
- 12 % Position latérale de la voie
- 12 % Fixation des rails

A première vue d'œil, la conclusion serait qu'à long terme, aucun type de défaut ne se distingue clairement pour le vieillissement de la superstructure et de l'infrastructure. Cependant, avec 57 % au total, les défauts géométriques de la voie (gauche, position verticale et latérale de la voie, défauts isolés) prédominent. Cela indique tout de même une sollicitation accrue par l'interaction matériel roulant / voie ferrée. Les aspects mentionnés correspondent aux phénomènes habituels d'une voie ferrée sollicitée.

Des réponses très hétérogènes ont été donné à la question concernant une augmentation récente des coûts dus à une interaction non optimale entre matériel roulant et voie ferrée. Il n'était pas possible d'en tirer des chiffres quantitatifs plausibles. Il est cependant possible de retenir qualitativement que 11 sur 20 compagnies de chemin de fer citent une interaction matériel roulant / voie ferrée insuffisante comme cause d'une augmentation des coûts cf. Figure 4. Ces réponses soulèvent cependant la question de l'année de référence pour l'évaluation de l'augmentation des coûts. Entre autres, BERNMOBIL et Travys donnent des indications concrètes à ce sujet :

- Chez BERNMOBIL, une usure accrue du congé de roulements a été constaté depuis l'introduction des Combinos.
- A partir de décembre 2015 et suite à l'augmentation du trafic voyageurs avec Be3000 Stadler (acquisition en 2015 et 2016 pour remplacer progressivement les véhicules du type GTW Stadler), TRAVYS a progressivement observé une usure prononcée et anormale sur le matériel roulant et l'infrastructure depuis l'été 2016. Dès 2017, les coûts d'entretien ont augmenté de +40 % pour l'infrastructure et de +65 % pour les roues (reprofilage).

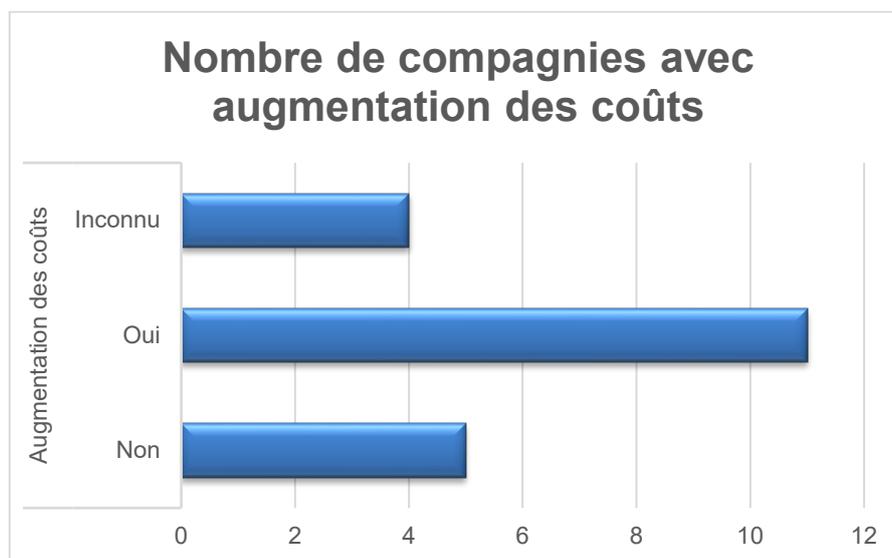


Figure 4: Compagnies avec augmentation des coûts en raison d'une interaction matériel roulant / voie ferrée non optimale

Les entreprises qui n'ont pas enregistré d'augmentation des coûts l'ont généralement justifiée par le fait qu'elles n'ont pas enregistré de changements dans leur parc de véhicules ou dans exploitation durant la période considérée.

Il en va de même pour la question posée concernant l'estimation des coûts annuels supplémentaires pour la voie ferrée et le matériel roulant. Ceux-ci se situent dans une fourchette allant de CHF 10'000 à CHF 980'000 par an. Les raisons invoquées et les valeurs de référence sont, dans la plupart des cas, difficilement compréhensibles. Cette question doit être clarifiée de manière approfondie dans le projet P6 Rentabilité globale.

Il convient notamment d'analyser la dépendances des coûts par rapport aux aspects suivants:

- Influence de l'acquisition de véhicules
- Influence de modifications de la voie ferrée
- Influence de la charge de la voie et de la charge par essieu

Le bruit (général ou dans les courbes) et les vibrations sont clairement au premier plan pour répondre à la question des principaux problèmes de comportement à court terme tels que le bruit, les vibrations, etc. cf. Figure 5.

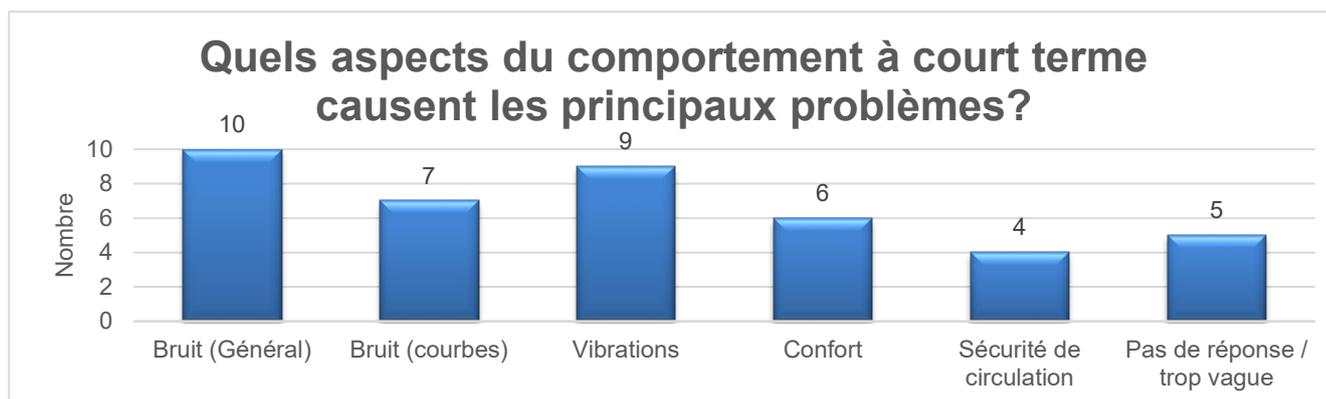


Figure 5: Principaux problèmes du comportement à court terme

Le bruit est généralement perçu dans les courbes étroites sous la forme de crissements, ce qui mène à des réclamations de la part des riverains. Toutefois, Figure 5 ne le montre pas clairement, comme le bruit (général) affecte plus de compagnies que le bruit (virages).

Les vibrations constatées sont indépendantes de la géométrie, il s'agit généralement de phénomènes locaux et ont été indiquées p.ex.

- Aux entrées en crémaillère,
- En alignement,
- Lors du changement aux traverses béton,
- Dans les appareils de voie,
- etc.

Il n'est pas univoque si les problèmes résultent plutôt de l'aspect du bruit ou réellement des vibrations. En règle générale, les vibrations sont gênantes lorsqu'elles se traduisent par des nuisances dans les bâtiments proches des voies ferrées.

Il en résulte les questions suivantes à traiter par P3:

- Relation entre bruit et usures ondulatoires à ondes longues
- Relation entre bruit et répartition des rayons de courbure
- Relation entre vibrations et polygonisation

Les questions suivantes se posent pour P4 :

- Causes des vibrations avec effets provenant de l'infrastructure (traverses en béton, sauts de rigidité, zones de cœur d'aiguillage, joints, défauts des surfaces de roulement des rails,
- Causes du bruit dus aux éléments de la voie ferrée (semelles sous rail, semelles sous traverses, etc.)

38 % des entreprises interrogées utilisent un outil de prévision de l'usure, des défauts et des intervalles de bourrage pour la planification de la maintenance de la voie ferrée, cf. Figure 6.

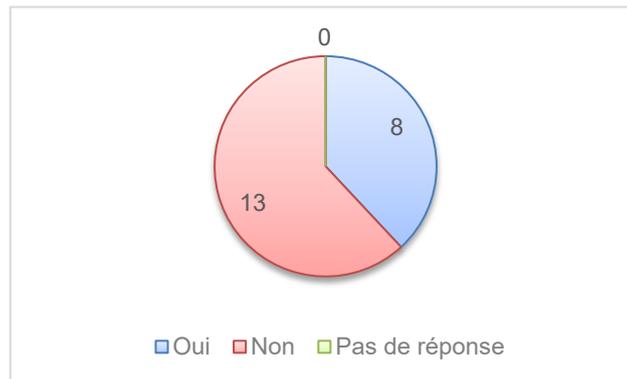


Figure 6: Utilisation d'un outil pour les mesures de maintenance de la voie ferrée

Les réponses vont d'un véhicule de mesure complet de SERSA Diagnostic, du monitoring embarqué sur un train de l'exploitation régulière à de simples moyens de mesure et d'évaluation comme l'appareil Calipri pour mesurer le profil des rails et des roues ou un tableau EXCEL. La plupart des chemins de fer interrogés ont indiqué un retard à rattraper pour disposer d'outils de maintenance modernes couvrant la mesure de l'état actuel jusqu'au pronostic servant de base à la définition de mesures de maintenance appropriées.

Une majorité a répondu par l'affirmative à la question concernant l'existence de processus écrits pour l'entretien des véhicules resp. des voies cf. Figure 7 et Figure 8.

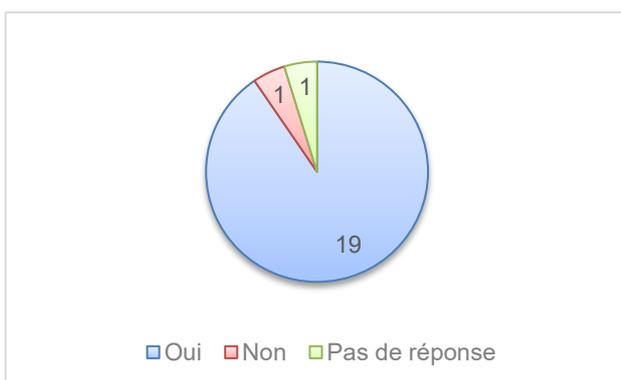


Figure 8: Processus écrit pour l'entretien du matériel roulant

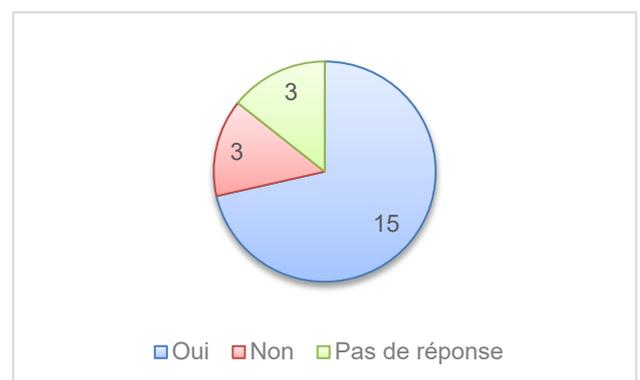


Figure 7: Processus écrit pour l'entretien de la voie

2.5 Résultats questionnaire P2

2.5.1 Questions générales

Les réponses à la question sur la répartition des courbes ont été très variées (cf. *Figure 9*). Au total, 8 chemins de fer n'ont fourni aucun document sur la répartition des courbes. 4 chemins de fer ont fourni des répartitions de courbes avec le nombre de courbes par classe de courbes et 1 chemin de fer avec la longueur totale des courbes par classe de courbes. Les données ont été représentées graphiquement dans un fichier pdf. 1 chemin de fer a également fourni une représentation des lignes basée sur des diagrammes de vitesse, également sous forme de fichiers pdf. Pour 4 compagnies, un logiciel a été développé ultérieurement en collaboration avec la société Innovative Times AG, permettant de représenter le tracé et les lignes de différentes manières en fonction des besoins. Pour ces 4 chemins de fer, les données TopoRail sont disponibles sous forme de tableaux Excel (tracé, profil en long).

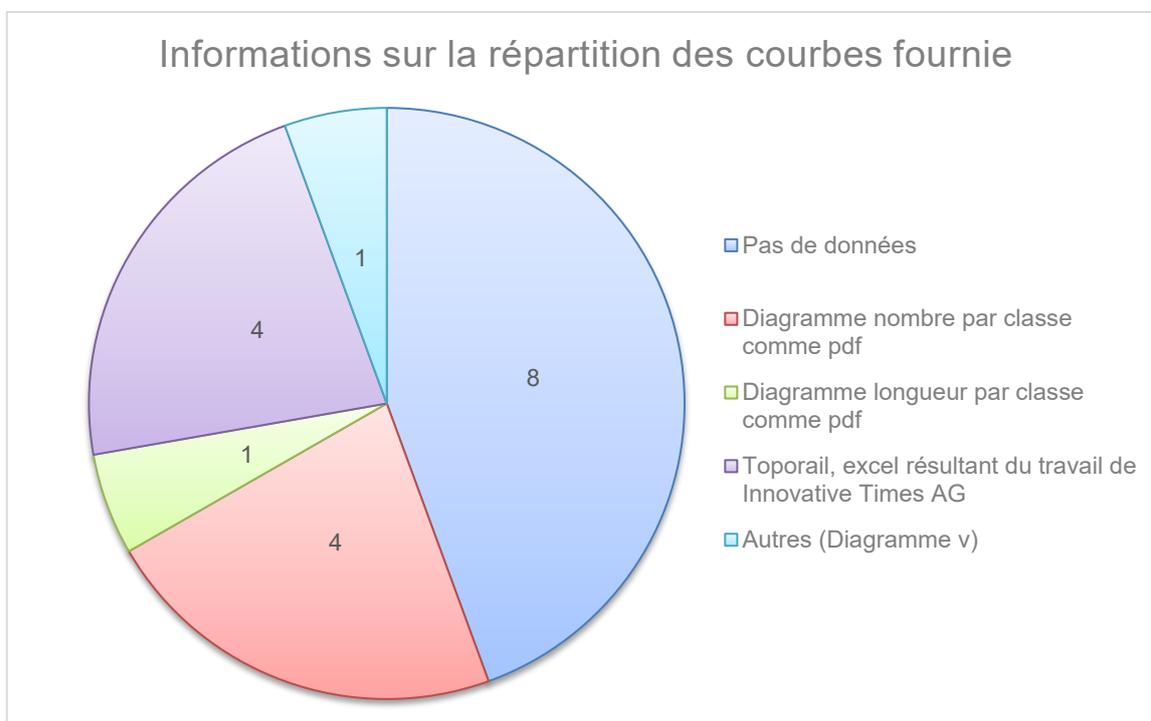


Figure 9: Formats livrés sur la répartition des courbes chez les chemins de fer

Comme l'évaluation et le traitement ultérieur ne sont pas possibles à partir des documents reçus, il a été décidé d'établir cette évaluation à l'aide d'un outil spécifique, de manière uniforme pour tous les chemins de fer cf. *Figure 10*. La condition préalable est que les informations sur la géométrie des voies soient disponibles dans le format de données TopoRail. C'est aujourd'hui le cas pour la plupart des chemins de fer à voie métrique. La figure 10 montre un exemple de répartition des courbes qui a été généré automatiquement avec cet outil. Il est prévu de mettre cet outil à disposition de tous les chemins de fer à voie métrique de Suisse. Les données ainsi générées sont nécessaires pour la suite des travaux, tant dans le projet P2 que dans les projets P3, P4 et P5.

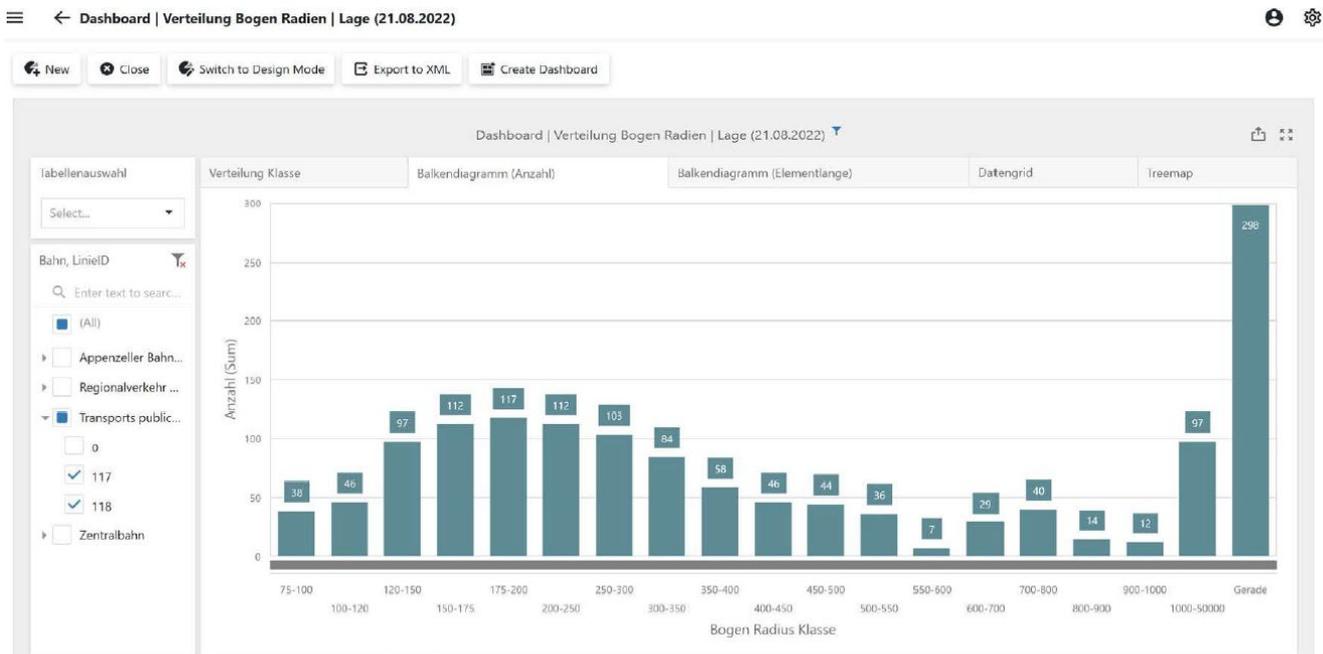


Figure 10: Répartition des courbes exemple TPF (représentation générée par Innovative Times SA)

Comme base pour la description des véhicules qui circulent principalement sur leurs lignes, tous les chemins de fer, à l'exception de deux compagnies, ont fourni de nombreuses esquisses type et fiches techniques correspondantes. Il est possible d'en déduire quelques informations importantes qui peuvent être utilisées pour la suite des travaux dans les projets. De nombreuses données techniques nécessaires à la modélisation et aux simulations et calculs qui en découlent doivent toutefois être demandées au fournisseur des véhicules.

La longueur des tronçons (voie simple/voie double) est connue par tous les chemins de fer qui ont répondu, à l'exception du RBS et du BLT. Le nombre de trains par jour sur les tronçons à voie simple et à voie double est connu par tous les chemins de fer sauf BLT, RBS et RhB.

La répartition entre les sections à voie simple et double peut être résumée comme suit:

Longueur du tronçon	Voie simple	Voie simple et double	Voie double	Pourcentage de voie double (chemins de fer avec voie double)
Total	1151 km	1284 km	133 km	10 %
Moyenne / chemin de fer	67.7 km	71.3 km	13.3 km	24 %
Minimum	0 km (BERNMOBIL)	12.3 km (FLP)	0 km (Différentes compagnies)	2 % (TPC)
Maximum	343 km (RhB)	384 km (RhB)	51 km (BERNMOBIL)	100 % (BERNMOBIL)

Tableau 2: Aperçu tronçons à voie simple et double

2.5.2 Graissage des boudins (SKS)

Tous les chemins de fer utilisent le SKS côté véhicule. Les raisons en sont l'usure des roues et des rails (19 chemins de fer sur 20), le crissement en courbe (13 sur 20), les usures ondulatoires à ondes longues (2 sur 20) et la sécurité contre le déraillement (1 sur 20).

Tous les véhicules sont équipés de SKS, à l'exception de quelques véhicules de manœuvre et des véhicules du Forchbahn. Chez ce-dernier, les véhicules les plus récents (qui assurent la majorité des liaisons) sont équipés de SKS (45 % des compositions). Ce choix est justifié par des raisons économiques.

Les systèmes de lubrification utilisés sont REBS (11), Delimon (5), Beka (2), Sécheron (2), Hausammann (1) ou inconnu (1). Une liste des lubrifiants utilisés se trouve dans les réponses à l'enquête.

Un grand nombre de produits différents sont utilisés pour le graissage des boudins. Parmi eux, on trouve Loclub ECO, Klüber LEA, Sintono Terra SK-RE-LT de Lubcon, Mobil Vectra Oil N°4, Raillub, Tramlub, Sécheron/Becalub. Chez la plupart des chemins de fer, un seul des lubrifiants mentionnés est utilisé. Chez 4 chemins de fer, 2 ou plus de lubrifiants sont utilisés.

La description des documents de commande pour les lubrifiants est en partie connue (fiche technique du fournisseur, fiches de données de sécurité, instructions d'utilisation et de maintenance). Les documents techniques de commande se limitent aux fiches techniques des fournisseurs.

7 chemins de fer indiquent respecter les normes EN 15427-1-2 et 16028, 10 ne le font pas et 3 n'ont pas répondu cf. *Figure 11*.

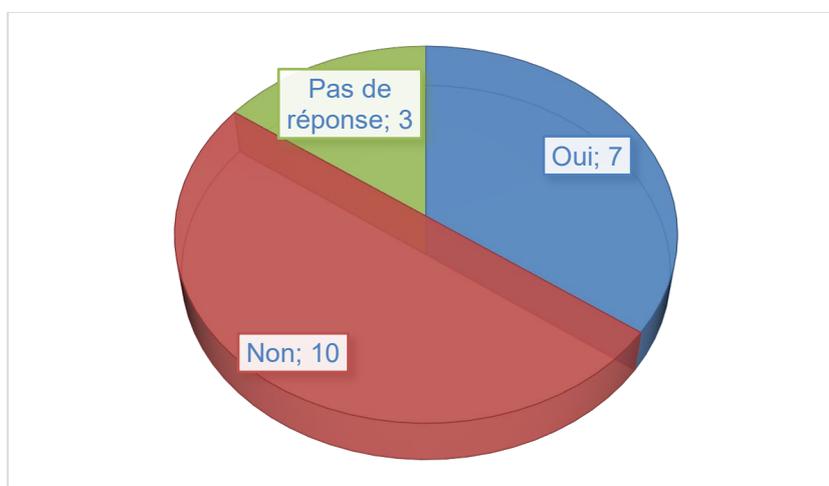


Figure 11: Application EN 15427-1-2 et 16028 pour graissage des boudins chez les chemins de fer

7 chemins de fer suivent le R RTE 49410, 11 ne le font pas et 2 n'ont pas répondu cf. *Figure 12*.

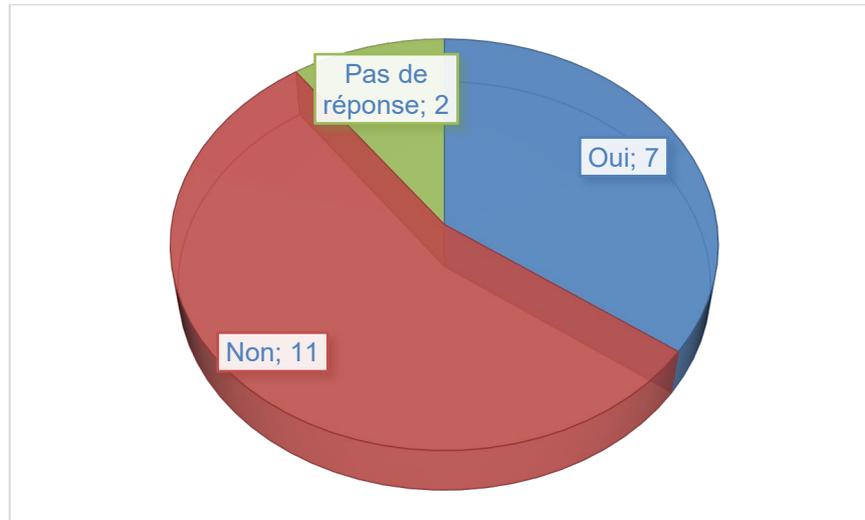


Figure 12: Application R RTE 49410 pour le graissage des boudins chez les chemins de fer

Le nombre d'essieux lubrifiés et leur disposition sur les véhicules peut être tiré de l'évaluation détaillée dans le projet P2. Tous les chemins de fer lubrifient dans les deux sens de circulation. La quantité de lubrifiant appliquée peut dépendre du temps ou de la distance. Les quantités appliquées sont très différentes pour chaque chemin de fer / chaque véhicule et doivent être approfondies dans le cadre du projet P2. Plusieurs entreprises ne peuvent pas répondre à cette question.

3 chemins de fer ne lubrifient pas sur l'ensemble du parcours. Les raisons et les détails de ce choix n'ont pas été communiqués. Les 17 autres chemins de fer lubrifient sur l'ensemble du parcours. 8 chemins de fer ne lubrifient pas en dessous d'un seuil de vitesse défini (5-20km/h). FART et BERNMOBIL lubrifient indépendamment de la vitesse. 10 chemins de fer n'ont pas répondu. Aucune compagnie ne lubrifie uniquement dans les virages, 8 lubrifient également en alignement et 12 n'ont pas répondu à cette question.

Le contrôle du système de lubrification et la vérification de l'effet sur les boudins sont effectués sur les véhicules lors de la maintenance systématique planifiée (19/19) et lors du reprofilage (1). La vérification de l'effet de lubrification sur la voie est effectuée lors d'inspections périodiques des lignes (13/18) cf. Figure 13 ainsi que par la ronde de surveillance (11/18) cf. Figure 14.

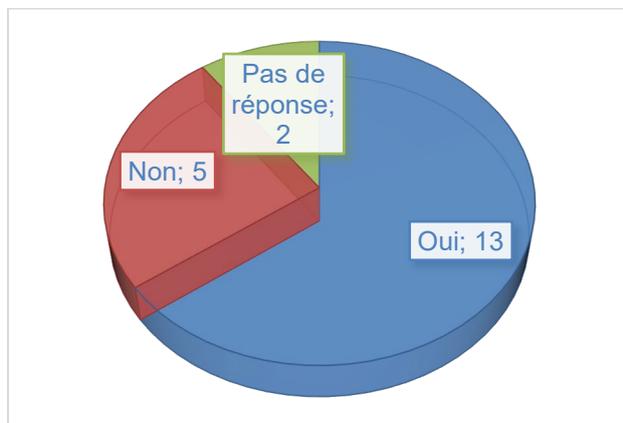


Figure 13: Vérification de l'effet de la lubrification lors d'inspections périodiques



Figure 14: Vérification de l'effet de la lubrification par la ronde de surveillance

Le contrôle du réglage des buses de lubrification s'effectue à l'aide d'une jauge (9), par mesure de la distance entre la buse de lubrification et le boudin (3), automatiquement selon des paramètres définis (1 ; type de mesure inconnu), inspection visuelle et/ou test de pulvérisation (4), selon instructions (2 ; contenu des instructions inconnu).

Le fonctionnement est vérifié par des tests de pulvérisation, les critères sont visuels (positionnement, taille et/ou quantité) ou inconnus. Dans un cas, la preuve du fonctionnement est transférée dans la cabine du conducteur.

Sur aucun tronçon, l'arrêt de la lubrification n'est exigé pour des raisons environnementales. 15 entreprises n'ont pas constaté de dysfonctionnement des circuits de voie imputable au lubrifiant (pontage des joints isolants). Les détails des dysfonctionnements seront analysés dans la suite des travaux du P2.

2.5.3 Conditionnement du champignon du rail (SKK)

De nombreux chemins de fer confondent SKK et SKS. Le questionnaire comportait également quelques imprécisions. Dans le résumé, les réponses du FLP (Ferrovie Luganesi SA) n'ont pas été prises en compte, car ils ont confondu SKS et SKK.

6 chemins de fer utilisent actuellement des systèmes SKK embarqués. Les raisons sont le crissement dans les courbes (6), l'usure des roues et des rails (3) et les usures ondulatoires à ondes longues (2) cf. *Figure 15*. Les informations sur les trains équipés de SKK figurent dans l'évaluation détaillée du P2.

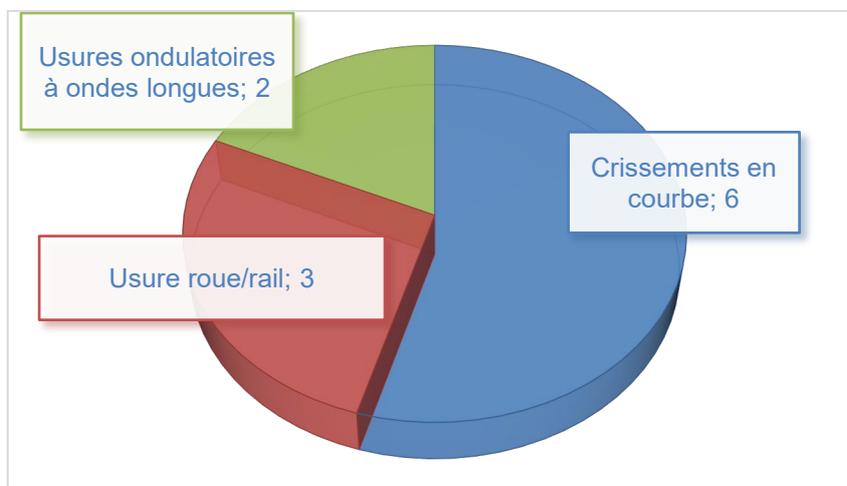


Figure 15: Raisons pour l'application de SKK

3 chemins de fer utilisent le système Bijur-Delimon et les 3 autres le système REBS. L'architecture du système, les éléments et composants, le nombre de pompes par essieu et le débit par course de pompe sont connus pour 3-4 des 6 entreprises équipées de SKK.

BERNMOBIL et le Forchbahn (plus de détails disponibles) utilisent une installation SKK fixe (Moklansa E3S).

Chez les chemins de fer, les produits de conditionnement utilisés pour les installations embarquées sont SINTONO Terra HLK (NLCI 00) et Igralub HeadLub 90.

Les buses vaporisent sur la surface de roulement du champignon du rail. Les justifications sont, si mentionnées, les instructions du fournisseur du système. Les buses sont réglées par mesure, à l'aide d'un gabarit ou visuellement sur la base de la forme de la pulvérisation sur le champignon du rail par des tests de pulvérisation.

Lors de l'entretien, le fonctionnement est vérifié à l'aide d'un test de pulvérisation. Certains chemins de fer effectuent un test visuel en contrôlant la surface pulvérisée et sa position sur le champignon du rail. Le test de pulvérisation est effectué sur une voie en alignement. En particulier dans les courbes avec de très petits rayons, cela ne garantit pas que le produit de conditionnement soit pulvérisé sur les surfaces de contact de la roue et du rail (déport géométrique). Compte tenu de la position des bogies en courbe, le porte-à-faux devrait être nettement plus important sur l'essieu avant que sur l'essieu arrière du bogie. Ce fait doit être examiné par des travaux plus approfondis dans le P2.

Certains chemins de fer ne conditionnent le rail que dans un sens de circulation, d'autres dans les deux sens.

Aucune information n'a été fournie sur les critères d'application ou de contrôle du conditionnement. Cela peut s'expliquer par le fait que la question relative au contrôle du conditionnement n'a pas été posée de manière suffisamment compréhensible.

Le conditionnement est déclenché par des étiquettes RFID (3), manuellement (2), par odométrie (1 ; recalibrage de l'odomètre à chaque gare par GPS) ou inconnu resp. selon le type de tronçon (chez le AB : Tango automatisé, Walzer manuelle) cf. *Figure 16*.

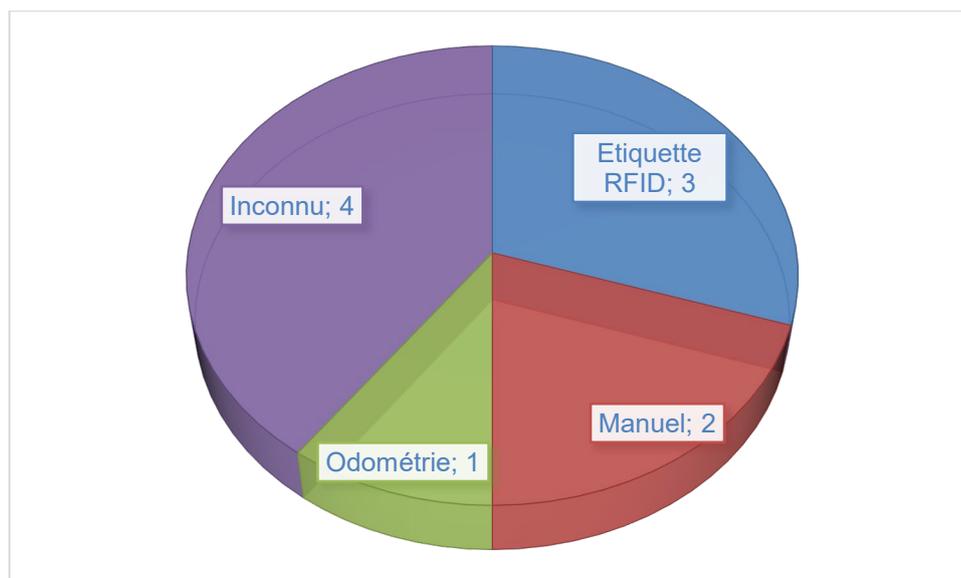


Figure 16: Contrôle du SKK

Les paramètres de l'installation de conditionnement sont décrits pour chaque chemin de fer (nombre de cycles, volume de pulvérisation, temps de pulvérisation...). Le volume spécifique du produit de conditionnement utilisé par km (ml/km) n'est connu que pour deux compagnies. Il manque les paramètres nécessaires pour pouvoir établir des comparaisons entre les différentes applications, tels que la répartition des courbes, les caractéristiques des lignes, etc...

Les améliorations constatées avec l'introduction du SKK varient d'un chemin de fer à l'autre, p.ex. amélioration uniquement pour le bruit. Une évaluation de la réduction du crissement dans les courbes, de l'usure des roues, des défauts aux surfaces de roulement, de l'usure des rails ainsi que des usures ondulatoires est disponible dans l'évaluation détaillée du projet P2. L'un des chemins de fer interrogés ne dispose pas des retours d'information nécessaires pour quantifier d'éventuelles améliorations.

Aucun défaut sur la roue ou le rail lié au conditionnement n'a été constaté ou mis en évidence.

Plusieurs feed-back de mécaniciens de locomotive sont mentionnés dans les résultats. Chez 3 chemins de fer, aucune perturbation n'a été constatée. Chez 3 chemins de fer, des rapports font état de perturbations:

- Immédiatement après introduction, un chemin de fer a constaté des problèmes de traction dans les fortes pentes et avec des trains lourds. Les problèmes sont apparus en cas d'humidité élevée, de pluie et de sur-conditionnement. Ils ont disparu après l'adaptation de la commande du système.
- Un chemin de fer signale des perturbations pendant la période de septembre à novembre, lorsque le rail est humide ou lors de gel.
- Le sablage est plus fréquent chez une compagnie.

Aucun chemin de fer n'a constaté de problèmes de pontage des isolations dus au SKK en exploitation. Le MGB a effectué un test avec une quantité extrême de produit de conditionnement (rapport classé dans la documentation d'homologation du MGB). Les essais ont été réalisés avec le produit HeadLub® 90 et ont examiné le cas d'une dysfonction résultant d'une occupation erronée. Aucune panne de ce type n'est survenue pendant la période d'essai.

Avant la mise en service du SKK, 4 chemins de fer ont effectué des essais de freinage et de traction afin de déterminer la diminution des performances due au SKK. Le MGB et le zb disposent de rapports d'essais. Le MGB dispose en outre d'un rapport d'expertise établi par un expert reconnu par l'OFT. Une compagnie ferroviaire n'a pas effectué d'essais, puisque le fabricant avait validé son installation. Pour un chemin de fer, il n'existe pas de rapport.

Le système SKK a été approuvé par l'OFT pour une compagnie ferroviaire. Tous les chemins de fer sauf un ont effectué un test d'exploitation avant l'introduction du système SKK. 2 compagnies ferroviaires se sont appuyées sur la D RTE 49100 (analyse des risques) pour l'introduction du système SKK. 4 compagnies ferroviaires n'ont pas effectué d'analyse des risques correspondante.

AVA a annoncé son intention de réaliser des tests SKK à l'été 2022.

2.6 Résultats questionnaire P3

Les chemins de fer impliqués utilisent des véhicules variés sur des lignes très différentes. Malgré ces conditions d'utilisation variées, les mêmes conditions en ce qui concerne l'interaction matériel roulant / voie ferrée et roue/rail s'appliquent aux chemins de fer à voie métrique. Ce sondage permet d'obtenir une vue d'ensemble de l'interaction entre la roue et le rail. Il doit ainsi être possible de mettre en évidence les défis communs des chemins de fer, de montrer les différences et d'identifier les lacunes dans les connaissances.

2.6.1 Questions concernant les appareils de voie

Le sondage a révélé qu'aucune traversée-jonction n'est utilisée en courbe chez les chemins de fer à voie métrique (voir *Figure 17*).

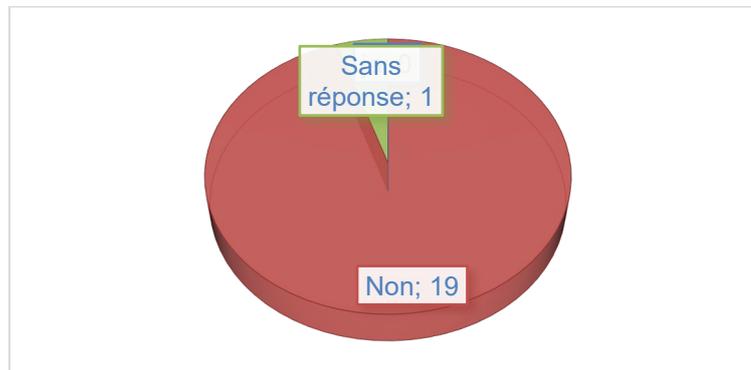


Figure 17: Utilisation de traversées-jonctions en courbe

Sur la base de cette déclaration, il n'y a pas lieu de tenir compte de cette donnée restrictive du tracé et, contrairement aux chemins de fer à voie normale interopérables, il n'en résulte aucune exigence concernant l'interaction géométrique essieu / appareil de voie. Ainsi, conformément à l'état de la technique, les diamètres admissibles des roues des véhicules dépendent uniquement de la charge par essieu. Il n'y a donc aucune restriction concernant les dimensions du boudin liées au diamètre des roues et les dimensions transversales des essieux. Cela suppose toutefois qu'il en soit tenu compte lors de la conception de nouvelles installations ferroviaires.

Chez près de la moitié des chemins de fer, des écaillages apparaissent sur les surfaces de roulement (rail à ailettes, pointe du cœur) dans la zone des cœurs d'appareils de voie, cf. *Figure 18*.

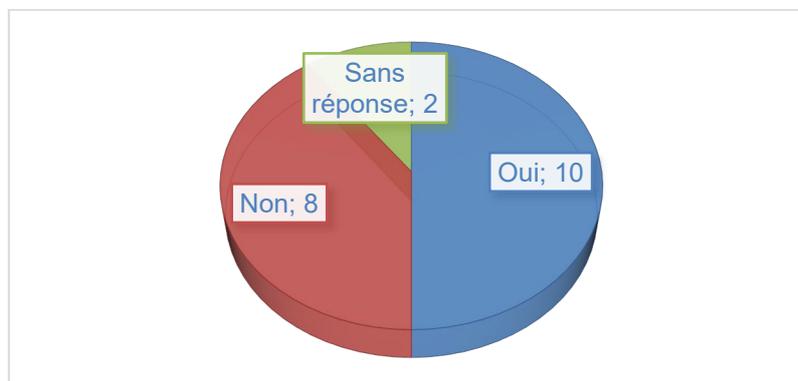


Figure 18: Ecaillages dans la zone du cœur des appareils de voie

2.6.2 Questions concernant l'écartement

Pratiquement tous les chemins de fer n'appliquent pas de surécartement en courbe. Certains chemins de fer n'ont pas compris la question. Un chemin de fer applique un surécartement de 2 mm avec des expériences positives aux endroits avec une usure « importante » (usures ondulatoires).

Sur les tronçons en alignement, l'écartement est réduit lorsque la voie est posée sur des vieilles traverses en bois. La cause en est en partie la déformation permanente des traverses en bois, due au vieillissement. Avec le remplacement des traverses en bois par des traverses en béton, ce problème s'atténuera.

2.6.3 Questions concernant les profils de roue et de rail

Pour l'enregistrement des profils de roues, l'appareil de mesure « Calipri », utilisé par la plupart des chemins de fer, s'est principalement imposé. D'autres systèmes de mesure sont également utilisés, par exemple sur des tours en fosse ou des gabarits.

Les profils de rails sont généralement mesurés par des partenaires externes (meulage ou fraisage des rails). Des appareils de mesure manuels (Railmonitor), des techniques de mesure intégrées dans les trains de meulage ou des véhicules de mesure (ARGE Fahrwegdiagnose) sont utilisés à cet effet.

Les données disponibles sur les roues et les rails sont axées sur l'utilisation lors de la maintenance. Il faut clarifier si ces données peuvent être rendues utilisables pour la recherche sur l'interaction. En particulier en ce qui concerne la mesure des rails, les données sont parfois disponibles uniquement dans une qualité inadaptée (trop d'ondulations dans la zone des surfaces de roulement décisive pour le comportement en courbe). Le P3 met en place une meilleure saisie des données dans ce domaine. Il devrait ainsi être possible de saisir des données sur les roues et les rails dans la qualité requise et de les évaluer à l'aide d'un logiciel approprié pour l'interaction.

Les profils de roues utilisés chez les chemins de fer correspondent majoritairement aux profils selon R RTE 29500 ou ont été développés sur la base de ces profils. Ces profils développés n'ont pas été joints aux documents des chemins de fer et ne peuvent donc pas être évalués.

Les profils de roue connus ne sont pas adaptés aux profils de rail nominaux resp. usés utilisés par les chemins de fer à écartement métrique. Le profil de rail 46E1 (CFF I) est le plus répandu chez les chemins de fer à voie métrique. D'autres profils de rail utilisés sont VST 36 et 54E2 (CFF IV) voir également chapitre 2.7.2. Dans le P3, l'objectif de la recherche doit être de développer les connaissances sur le profil des roues et des rails de telle sorte que les profils adaptés à l'interaction matériel roulant / voie ferrée puissent être déterminés et appliqués.

La plupart des chemins de fer n'utilisent qu'un seul profil de roue (10 chemins de fer n'utilisent qu'un seul profil de roue, 3 chemins de fer utilisent des profils spécialement développés, dont un en raison du trafic mixte rails vignole / rails à gorge, 2 chemins de fer n'ont pas répondu, le reste n'a pas compris la question). La géométrie et la mécanique de contact ont déjà fait l'objet d'études chez certains chemins de fer, mais il n'existe pas encore d'aperçu des expériences et des résultats ce-concernant. L'un des objectifs de la recherche dans le cadre du projet P3 est de pouvoir réaliser des études de géométrie de contact chez les chemins de fer à voie métrique et de développer sur cette base des mesures de mise en œuvre permettant d'améliorer différents aspects de l'interaction roue/rail.

Chez la plupart des chemins de fer, les instabilités de roulement ne posent pas de problème. Lorsque le phénomène se produit, les causes sont connues (par ex. amortisseurs transversaux défectueux, rails usés, roues usées) et des mesures appropriées peuvent être mises en œuvre. L'instabilité de roulement est surtout constatée dans la plage de vitesse maximale. Le cas échéant, ce sont les chemins de fer qui utilisent la plage de vitesse supérieure à 80 km/h qui sont concernés. Environ un tiers des chemins de fer à voie métrique interrogés en font partie, cf. *Figure 19*.

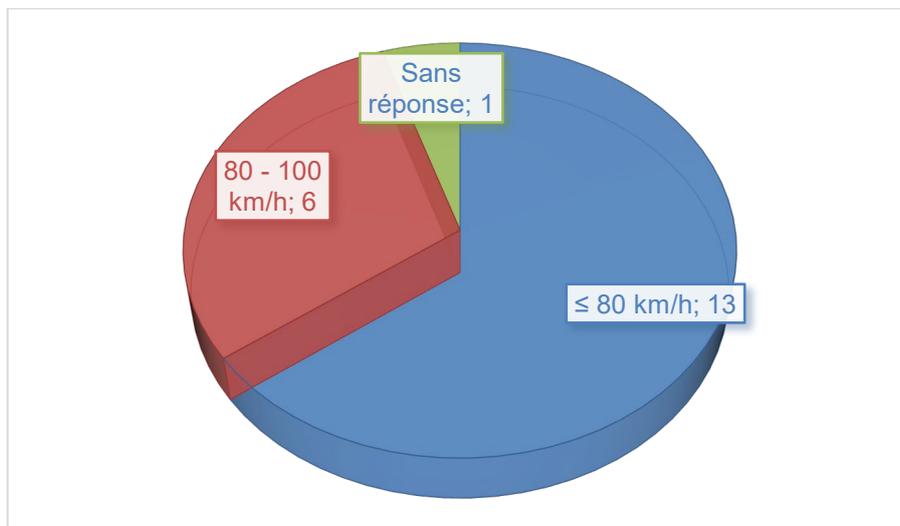


Figure 19: Part de chemins de fer par classe de vitesse

10 ont répondu par « non » et 9 par « oui » à la question de savoir si des études de géométrie de contact avaient été réalisées chez le chemin de fer en raison de problèmes d'interaction (cf. Figure 20).

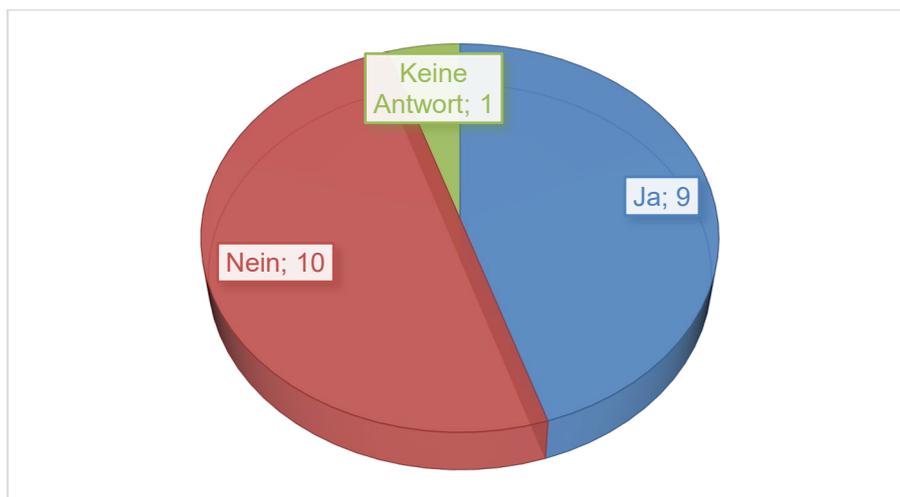


Figure 20: Part de chemins de fer avec études de géométrie de contact

Chez les chemins de fer qui ont répondu « oui », de nouveaux profils de roues ont parfois été développés, des matériaux de roues améliorés ont été proposés ou aucune mise en œuvre n'a eu lieu. Des améliorations ne sont mentionnées que de manière isolée. Aucune modification n'a été apportée aux rails.

Il sera nécessaire que P3 se penche sur les études menées afin d'éviter d'effectuer le travail à double et d'intégrer les connaissances acquises dans les travaux de P3.

2.6.4 Questions concernant l'usure et les défauts sur les roues et les rails

Pour une vue d'ensemble de l'usure et des défauts subis par les roues et les rails, voir les réponses et diagrammes à la section 2.4 Partie générale.

2.6.4.1 Roues

En ce qui concerne l'usure et les types de défauts qui apparaissent sur les surfaces de roulement des roues, les réponses des chemins de fer peuvent être résumées comme suit :

- Un peu moins de la moitié des chemins de fer observent un déséquilibre entre usure des boudins et usure de la surface de roulement. En général, une tendance à la diminution de l'épaisseur des boudins est observée. Toutefois, de grandes différences sont constatées en fonction du type de véhicule. La cause, en particulier des différences d'usure des boudins, n'est pas connue. Dans ce domaine, les recherches menées dans le cadre du P3 doivent permettre de mettre en évidence les relations entre usure des boudins et de la surface de roulement.
- Les creux du profil de roue ne constituent pas un problème majeur chez les chemins de fer. Chez certains chemins de fer, l'évaluation des creux du profil de roue se fait sur la base de contrôles visuels. Chez d'autres chemins de fer, aucun creux ne se forme, comme un reprofilage prématuré s'impose pour d'autres raisons. Un seul chemin de fer a indiqué une cote limite d'usine de 1,5 mm et une cote limite d'exploitation de 2 mm.
- Chez la plupart des chemins de fer, l'usure des surfaces de roulement est plus importante sur les essieux moteurs que sur les essieux porteurs. Cela s'explique en grande partie par le fait que les charges par roue et les entraxes sont plus importants sur les essieux moteurs. Certains chemins de fer sont en mesure de chiffrer la différence:
 - Essieux des bogies moteurs (EBM) env. 80'000 km, essieux des bogies porteurs (EBP) env. 100'000 km,
 - A) Différence EBM/EBP 20 %; B) EBP 2/3 --> EBM 1/3; C) env. facteur 1.5 – 2
 - Les essieux porteurs ne subissent approximativement qu'un tiers de l'usure des essieux moteurs.
 - Sur les ABe 8/12 ZTZ, l'usure des roues motrices représente env. 165 % de celle des roues porteuses, sur les ABe 4/16 STZ env. 200 %.
 - EBP 5 mm/100'000 km, EBM 6.2 mm/100'000 km.
- Chez la majorité des chemins de fer, des méplats apparaissent en raison de roues bloquées. Chez une petite partie des chemins de fer, des fissures thermiques causées par les sabots de frein sont constatées. Cependant, des sillons ou cavités sur la surface de roulement (en raison de l'interaction roue-sabot de freinage) ne se forment que chez un petit nombre de chemins de fer.
- De plus amples informations sur les défauts et l'usure des roues spécifiques aux véhicules sont présentées dans les réponses au P5 au chapitre 2.8. Les défauts dus à la fatigue des contacts de roulement n'apparaissent que chez un nombre restreint de chemins de fer. Il s'agit notamment des essieux moteurs du MGB et des essieux porteurs du Tango du Appenzeller Bahn.

2.6.4.2 Rails

En ce qui concerne l'usure et les défauts qui apparaissent sur les surfaces de roulement des rails, les réponses des chemins de fer peuvent être résumées comme suit:

- Concernant la question de l'usure élevée des surfaces de roulement des rails en intérieur de courbe, 8 chemins de fer ont répondu par oui et 8 par non. En raison des caractéristiques du tracé, les chemins de fer qui ont répondu par oui sont ceux qui disposent d'une part importante de courbes à très faible rayon ($R < 150$ m).
- A la question d'une usure latérale importante des rails en extérieur de courbe, 8 chemins de fer ont répondu par oui et 9 par non. Les faits suivants sont intéressants:
 - Bernmobil répond par oui pour la partie latérale du rail et par non pour le rail en intérieur de courbe. Il devrait en résulter un lien avec les observations faites en bas du tronçon Fischermätteli-Worb.
 - Le RBS répond par oui pour la ligne 6 (Fischermätterli-Worb) en ce qui concerne l'usure latérale du rail et par non pour le rail en intérieur de courbe. Pour justifier sa réponse, le RBS indique qu'une usure importante du flanc du rail y est constatée et que cela est dû à deux profils de roues différents (RBS et BERNMOBIL).
 - En raison des caractéristiques du tracé, les chemins de fer qui ont répondu par oui sont ceux qui disposent d'une part importante de courbes à très faible rayon ($R < 150$ m). Bien que le MGB se situe également dans cette catégorie, ce chemin de fer a répondu par non à cette question. Cela est probablement lié à une lubrification efficace des boudins.
 - Le fait que près de la moitié des chemins de fer enregistrent une usure latérale accrue des rails indique qu'il existe ici un lien avec la lubrification des boudins. Cet aspect devrait être étudié plus en détail dans le cadre du projet P2 (SKS).
- Tous les chemins de fer, à l'exception de deux, ont répondu par non à la question des formes d'usure du champignon du rail sur les tronçons en alignement (par exemple réduction du rayon du champignon du rail $R = 13$ mm). Un des chemins de fer a répondu qu'il n'existait pas de mesures avec Calipri pour les tronçons en alignement. Il faut partir du principe que pour les chemins de fer, l'usure des rails en alignement est secondaire par rapport à celle en courbe. Ceci du point de vue de la maintenance. Les études menées dans le cadre du projet P3 doivent permettre de déterminer si cela s'applique également à l'interaction matériel roulant/voie ferrée.

2.6.4.3 Défaut par effet de traction et de freinage

Les défauts aux surfaces de roulement des rails et des roues causés par l'accélération et/ou le freinage se manifestent par des essieux qui patinent et des roues qui glissent. Ici, ces défauts sont considérés séparément, car ils ont d'autres causes que ceux qui résultent du contact roue/rail en cas de coefficients de frottement élevés et de l'interaction entre la roue et les sabots de frein. Les défauts considérés ici apparaissent surtout en cas de faibles coefficients de frottement dans le contact roue/rail.

Pour les rails, les défauts se manifestent sous la forme d'empreintes de patinage ainsi que de traces de glissement et pour les roues sous forme de méplats. Les réponses des chemins de fer sont présentées dans les *Figure 21* à *Figure 23*.

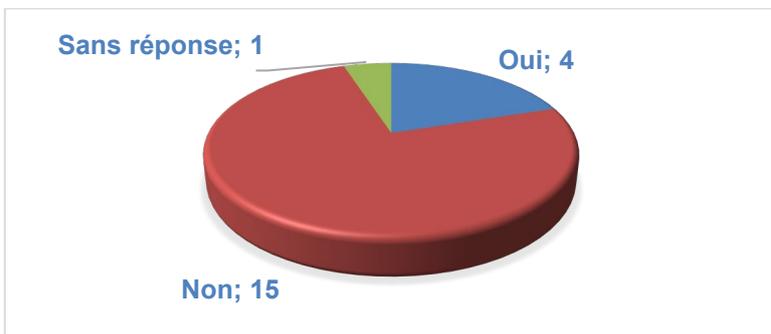


Figure 21 Traces de glissement de roues bloquées sur les surfaces de roulement des rails

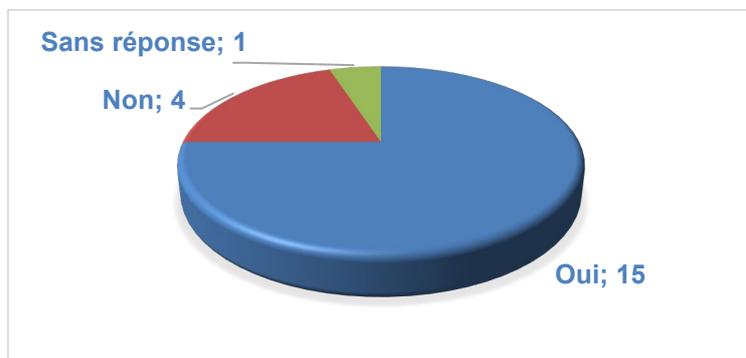


Figure 22: Empreintes de patinage sur les surfaces de roulement des rails

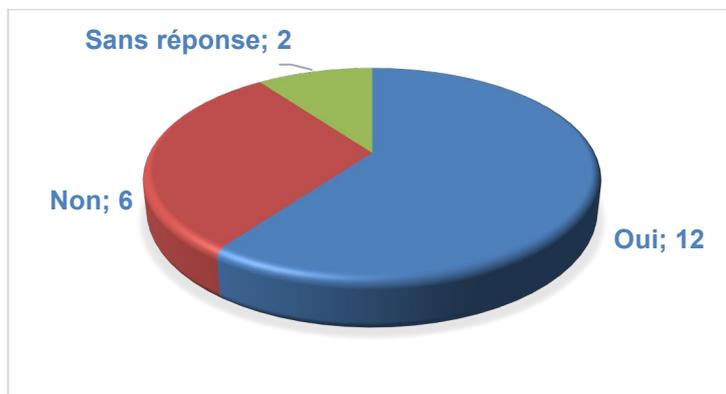


Figure 23: Mélats par roues bloquées

2.6.5 Questions concernant les documents pour l'évaluation des défauts aux roues et aux rails

L'évaluation des défauts à la roue et au rail se limite exclusivement à la zone de la surface de roulement avec contact entre la roue et le rail.

Pour l'évaluation des défauts aux roues et aux rails, lors du contrôle visuel, différents catalogues de défauts sont utilisés. Des normes et des documents relatifs à la voie à écartement normale sont également utilisés. En option, dans le cadre de la recherche, il est prévu d'établir un catalogue des défauts pour la voie métrique.

2.6.5.1 Evaluation des défauts sur les roues

A la question de savoir si l'apparition de fissures thermiques est observée sur les roues freinées à sabots, 12 chemins de fer ont répondu par la négative et 4 par l'affirmative cf. Figure 24.



Figure 24: Apparition de fissures thermiques sur les roues freinées à sabots

Quatre chemins de fer n'ont pas répondu à la question, mais il n'est pas clair s'ils n'ont pas répondu parce qu'ils utilisent d'autres systèmes de freinage. Il faut tenir compte du fait que, pour les 12 chemins de fer mentionnés, aucune distinction n'a été faite entre ceux qui circulent avec et/ou sans freins à sabot. Étant donné que les fissures thermiques sur les surfaces de roulement des roues, contrairement aux fissures dues à la fatigue du contact de roulement (RCF), doivent être évaluées de manière beaucoup plus critique sur le plan de la sécurité, cet aspect doit être pris en compte dans les études ultérieures. Il convient de tenir compte du fait que la distinction entre les fissures dues à la RCF et celles dues aux effets thermiques nécessite des connaissances plus précises.

A la question de savoir si l'apparition de sillons et de cavités sur les surfaces de roulement des roues est observée par l'interaction avec les freins à sabot, 15 chemins de fer ont répondu par la négative et 2 par l'affirmative cf. Figure 25.



Figure 25: Apparition de sillons et cavités sur les surfaces de roulement par freins à sabot

3 chemins de fer n'ont pas répondu à la question, mais il n'est pas clair s'ils n'ont pas répondu parce qu'ils utilisent d'autres systèmes de freinage. Sur la base des expériences faites lors du test d'exploitation du MGB, il a été constaté que l'évaluation de cette question sur la base de contrôles visuels est difficile. En effet, ces effets n'y ont été détectés que lors de l'évaluation géométrique des profils de roues. Sur cette base, des critères plus précis ont pu être définis pour le contrôle visuel. Les aspects de l'influence du contact entre la roue et le rail par les freins à sabot doivent être étudiés de manière approfondie dans le cadre du projet P3. Ceci en particulier pour les chemins de fer qui utilisent des sabots de freinage en matériau composite ou fritté.

A la question de savoir si un ou plusieurs catalogues de défauts sont utilisés pour les roues, 7 chemins de fer ont répondu par la négative et 11 par l'affirmative. Deux chemins de fer n'ont pas répondu (cf. Figure 26).

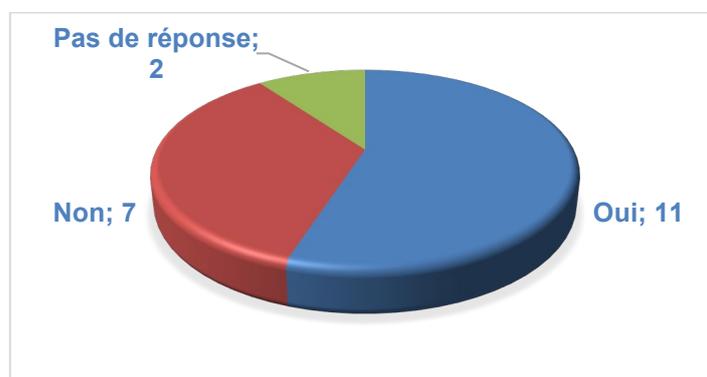


Figure 26: Utilisation de catalogues de défauts pour roues

Parmi les 11 chemins de fer qui ont répondu par l'affirmative, les indications fournies sont variées :

- 6 chemins de fer utilisent le RTE (4 chemins de fer le R RTE 41500, deux chemins de fer le R RTE 41000);
- 1 Le chemin de fer utilise, en plus des indications du RTE, celles du fournisseur des roues ainsi que les réclamations des riverains et des mécaniciens de locomotive
- 1 chemin de fer utilise des documents internes en plus du RTE:
- 4 chemins de fer utilisent des documents internes.
- 1 chemin de fer utilise la norme EN 15313 (uniquement voie normale, contient certains défauts de roues mais pas exhaustive)

Comme parfois, aucun ou différents documents ou supports sont utilisés, il est indispensable d'établir un catalogue de défauts « Roues » pour les chemins de fer à voie métrique. Il s'agit

- d'examiner les documents les plus récents de la voie normale quant à leur pertinence pour la voie métrique et de les reprendre dans la mesure du possible;
- de mettre à profit les expériences des chemins de fer à voie métrique;
- de mettre en place des formations sur les défauts aux roues et leur documentation, adaptées aux différents niveaux (pour nouveaux utilisateurs, périodiquement pour les différents niveaux, etc.).

A la question de savoir si un ou plusieurs catalogues de défauts sont utilisés pour les rails, 7 chemins de fer ont répondu par la négative et 10 par l'affirmative cf. Figure 27.

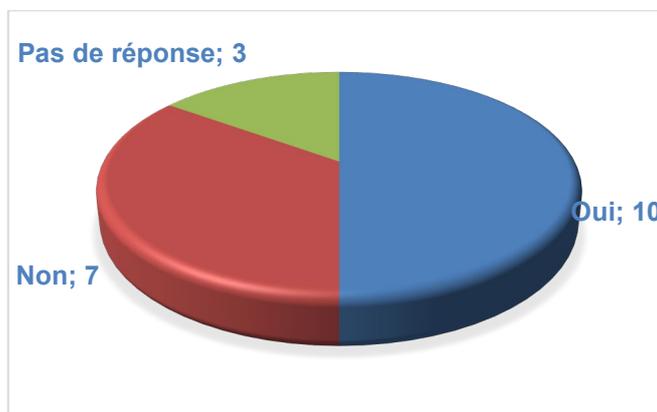


Figure 27: Utilisation d'un catalogue de défauts pour rails

Trois chemins de fer n'ont pas répondu à cette question. L'un de ces 3 chemins de fer est le RhB. Les RhB disposent cependant d'un document, qui est à la disposition de la maîtrise du système (cahier des défauts pour la ronde). Parmi les 10 chemins de fer qui ont répondu par l'affirmative, les indications fournies sont variées:

- 5 chemins de fer renvoient à l'IRS 70712 (UIC), or celle-ci a été remplacée par l'EN 17397-1 (p.ex. remplacée chez les CFF)
- 3 chemins de fer se réfèrent à la R RTE 222.3. Selon les informations de l'UTP, cette RTE a toutefois été retirée avec la mention suivante (la R RTE 222.3 a été retirée sans remplacement le 01.11.2019 du programme RTE. Pour les aspects liés aux défauts des rails, le CEN a publié la SN EN 17397-1 en février 2021).
- Chez un chemin de fer, le personnel de la ronde relève les défauts sur les rails, les consigne dans un fichier Excel et les groupes de service ferroviaire respectifs y remédient en temps voulu. Liste non accessible au public.

Comme certains chemins de fer n'ont pas de documents ou supports ou que les chemins de fer utilisent des documents ou supports différents, il est nécessaire d'établir un catalogue des défauts « rails » pour les chemins de fer à voie métrique. Il s'agit

- d'examiner les documents les plus récents de la voie normale quant à leur pertinence pour la voie métrique et de les reprendre dans la mesure du possible ;
- de mettre à profit les expériences des chemins de fer à voie métrique;
- de mettre en place des formations sur les défauts des rails et leur documentation, adaptées aux différents niveaux (pour nouveaux utilisateurs, périodiquement pour les différents niveaux, etc.).

2.6.6 Questions concernant l'atteinte au confort

A la question de la constatation d'atteintes défavorables au confort et de leurs causes, 5 chemins de fer ont répondu par la négative et 13 par l'affirmative. 2 chemins de fer n'ont pas répondu à la question (cf. Figure 28).

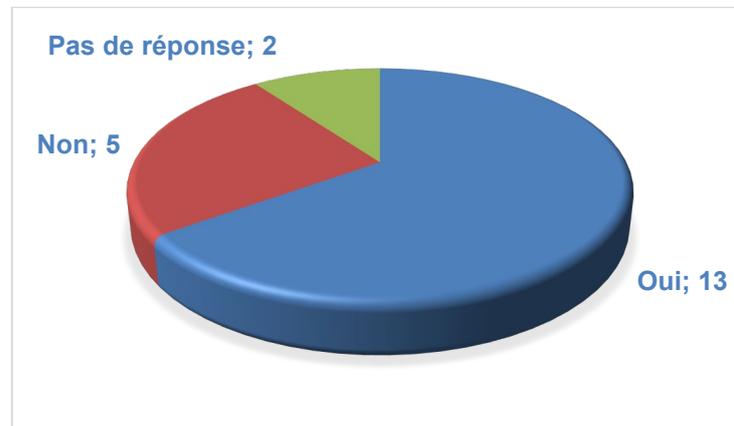


Figure 28: Constatation d'atteinte au confort

Parmi les chemins de fer qui ont répondu par l'affirmative, différentes causes sont évoquées:

- Chez 5 chemins de fer, il existe des nuisances (bruit, battements) lorsque des défauts apparaissent sur les surfaces de roulement des roues (plats, fissures, écaillages, polygones, dépôts de saleté, empreintes). L'un des chemins de fer fait notamment référence à des polygones sur les essieux moteurs et porteurs des rames automotrices/articulées récentes.
- Chez 5 chemins de fer, les déclarations indiquent des formes d'instabilité:
 - instabilité lors de vitesses élevées et d'écartements réduits;
 - des creux trop prononcés mènent à un comportement instable à haute vitesse
 - le comportement défavorable est dû à un kilométrage élevé (modification présumée du profil)
 - constaté sur un véhicule et disparu après le reprofilage. La cause n'a pas été trouvée.
 - le profil des roues a dû être modifié chez un chemin de fer
- Des crissements en courbe sont constatés chez un chemin de fer lorsque le profil de la roue est usé.

Dans l'ensemble, pour la majorité des chemins de fer, le confort est affecté en raison des dégradations au niveau des surfaces de roulement des roues. Chez 5 chemins de fer ou plus, il s'agit en particulier des défauts de circularité des roues. Des formes d'instabilité apparaissent chez les chemins de fer qui sont exploités dans la plage de vitesse supérieure. Il en résulte les défis suivants pour le projet P3:

- Clarifier de manière approfondie les causes de la formation de défauts sur les surfaces de roulement des roues (matériaux, entretien, profils de roue, freins);
- Clarifier de manière approfondie les causes de la formation de formes d'oscillation qui nuisent de manière dominante au confort dynamique, surtout dans la plage de vitesse supérieure.

Il s'avère en outre qu'en cas de mauvais comportement dynamique du véhicule, le contact entre roue et rail n'est pas encore suffisamment pris en compte dans les considérations. Par conséquent, il n'est par exemple pas non plus clair pourquoi des kilométrages plus importants ou des cavités sur le profil de la roue entraînent une diminution du confort. Il reste encore beaucoup à faire en matière de formation et d'analyse.

2.6.7 Questions concernant des déraillements

A la question de savoir s'il existe une liste des déraillements dus à l'interaction mécanique entre roue et rail, 16 chemins de fer ont répondu par la négative et 2 par l'affirmative. 2 chemins de fer n'ont pas répondu à cette question (cf. Figure 29).

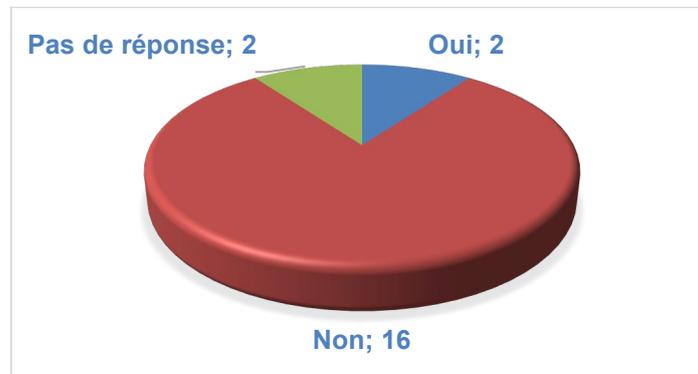


Figure 29: Résumé des déraillements dus à l'interaction roue/rail

Le fait que, chez la plupart des chemins de fer, il n'y ait pas de résumé des déraillements dus au contact roue/rail pourrait être dû aux causes suivantes:

- Il n'existe pas de tels déraillements;
- les déraillements sont dus à d'autres causes (par exemple, aiguillages en position incorrecte, etc.);
- il n'est fondamentalement pas possible de répondre à la question posée en raison de l'état des connaissances chez les chemins de fer à voie métrique concernant l'interaction roue/rail;
- en cas de déraillement, la priorité est donnée à l'enraillement et donc au rétablissement le plus rapide de la disponibilité de l'exploitation. Les ressources ne sont pas disponibles pour l'analyse des causes;
- les systèmes dans lesquels des déraillements se produisent dans la zone roue/rail ne sont pas connus.
- etc.

Pour le projet P3, plusieurs activités découlent des constatations ci-dessus. Celles-ci doivent être intégrées comme option possible dans la proposition de projet et présentées de manière approfondie dans le mandat de projet.

2.6.8 Questions concernant la spécification des calculs de dimensionnement et des preuves du comportement dynamique

A la question de savoir si les spécifications d'acquisition exigent des calculs de conception et de vérification du comportement dynamique, 14 chemins de fer ont répondu par la négative et 4 par l'affirmative. 2 chemins de fer n'ont pas répondu à la question (cf. Figure 30). 2 chemins de fer ont renvoyé au fournisseur du véhicule.



Figure 30: Spécification des calculs de conception et de vérification du comportement dynamique disponibles

L'un des chemins de fer qui a répondu par l'affirmative fait référence au fournisseur du véhicule. Le deuxième de ces chemins de fer énumère à cet effet des exigences de performance (durée de vie de la roue, confort vibratoire, etc.). Il ne s'agit toutefois que d'une part minimale des calculs de vérification. La détermination de la durée de vie des roues nécessite un modèle de véhicule/voie ainsi qu'un tracé sur lequel se basent les calculs. L'un des chemins de fer, qui a toutefois répondu par la négative, affirme que seuls les calculs pertinents pour l'homologation sont spécifiés.

A la question de savoir si les paramètres des véhicules sont disponibles pour effectuer des calculs du comportement dynamique, 12 chemins de fer ont répondu par la négative et 5 par l'affirmative. 3 chemins de fer n'ont pas répondu à cette question cf. Figure 31. On peut supposer que les autres chemins de fer n'ont pas compris le contenu de la question.

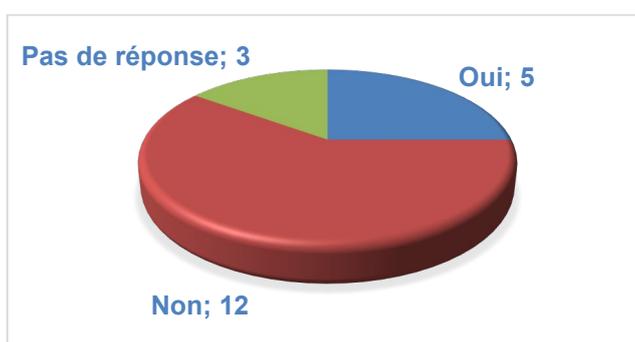


Figure 31: Paramètres des véhicules disponibles pour des investigations du comportement dynamique

Dans l'ensemble, l'hypothèse des experts se confirme: jusqu'à présent, les spécifications des chemins de fer à voie métrique n'exigent pas de calculs de conception et de vérification du comportement dynamique. De plus, les paramètres des organes de roulement devant être déterminés lors de la conception ne sont pas disponibles chez les chemins de fer.

Pour les projets P3 et P5, il est donc nécessaire d'établir une spécification concernant les exigences relatives aux calculs de conception et de vérification du comportement dynamique pour l'acquisition des véhicules. Il s'agira de distinguer d'une part les exigences basées sur la norme EN 14363, les exigences des autorités d'homologation, les exigences en matière de confort et d'autre part le LCC.

Cela permettra à l'avenir, d'une part, de clarifier les exigences posées par les chemins de fer à l'industrie du matériel roulant et, d'autre part, constitue une condition préalable à la maîtrise de l'interaction matériel roulant / voie ferrée et roue/rail. De plus, les résultats issus des calculs de conception et de vérification du comportement dynamique sont des conditions préalables à l'évaluation des futures modifications techniques et d'exploitation conformément à la D RTE 49100.

Pour les véhicules existants, P5 doit déterminer si les données de conception pour les calculs de vérification du comportement dynamique sont disponibles chez le fournisseur des véhicules.

2.6.9 Questions concernant la spécification les essais de vérification

A la question de savoir si des essais dans la voie sont exigés pour la vérification du comportement dynamique dans les spécifications d'acquisition des véhicules, 14 chemins de fer ont répondu par la négative et 3 par l'affirmative. 3 chemins de fer n'ont pas répondu à cette question (cf. Figure 32).

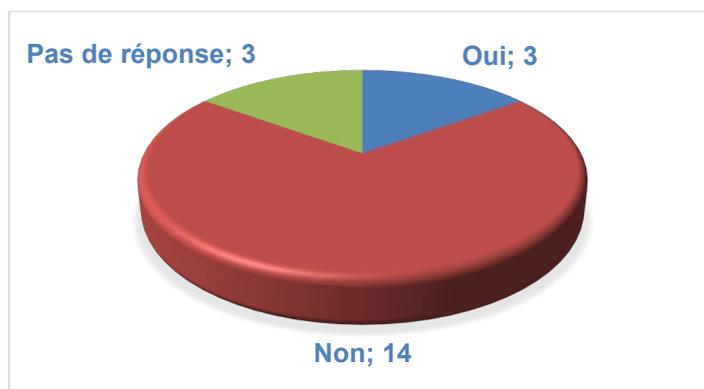


Figure 32: Spécification d'acquisition pour la vérification du comportement dynamique par des essais dans la voie

Pour le projet P3, le but est de passer en revue les spécifications disponibles chez les trois chemins de fer et d'examiner les preuves exigées par l'OFT pour l'homologation dans le domaine de la voie métrique. Par ailleurs, il s'agit de déterminer si ces essais sont suffisants pour répondre aux exigences liées au LCC. En outre, les essais doivent fournir des bases pour la validation des modèles de calcul pour le domaine de la voie métrique.

Le fait que la plupart des chemins de fer ne disposent pas de spécifications pour la réalisation des essais montre qu'il est nécessaire d'agir dans ce domaine pour les projets P3 et P5. Il convient de vérifier si les spécifications déjà existantes sont suffisantes à cet effet.

2.6.10 Questions concernant la spécification de la preuve de durabilité en exploitation

A la question de savoir si des preuves de durabilité en exploitation sont exigées dans les spécifications d'acquisition, 15 chemins de fer ont répondu par la négative et 2 par l'affirmative. 3 chemins de fer n'ont pas répondu à cette question (cf. Figure 33).

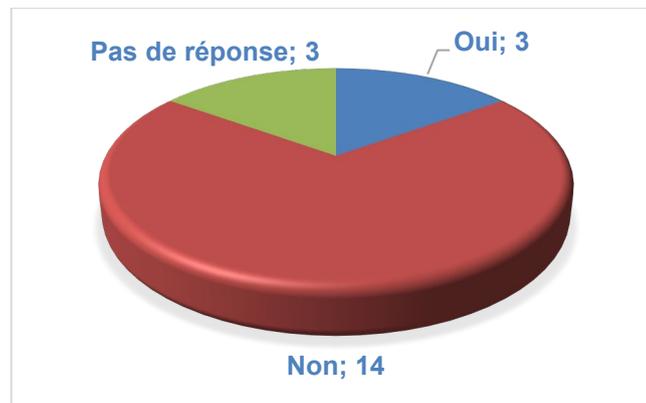


Figure 33: Spécification pour la preuve de durabilité en exploitation disponible

Pour le projet P3, il s'agit d'une part de passer en revue les spécifications disponibles auprès des deux chemins de fer et d'autre part de valider les résultats obtenus sur cette base.

Le fait que la plupart des chemins de fer ne disposent d'aucune spécification pour l'élaboration de preuves de la durabilité en exploitation montre qu'il est nécessaire d'agir dans ce domaine pour les projets P3 et P5. Il convient de vérifier si les spécifications déjà existantes sont suffisantes à cet effet.

2.6.11 Inputs pour autres projets

Un grand nombre de sujets concernant la roue et le rail fournissent des connaissances qui intéressent les projets P2, P4 et P5. Les questions relatives aux spécifications des véhicules alimentent principalement le travail de P5.

2.7 Résultats questionnaire P4

2.7.1 Questions générales

La charge des voies et son évolution sont des paramètres importants pour le dimensionnement de la superstructure et de l'infrastructure. Chez la plupart des chemins de fer interrogés, les charges moyennes quotidiennes sur les voies ont nettement augmenté, parfois elles ont doublé. Les facteurs suivants en sont responsables:

- Cadence augmentée
- Charge par essieu augmentée

La Figure 34 montre de manière impressionnante l'évolution des charges par essieu due à des changements dans l'utilisation des véhicules.

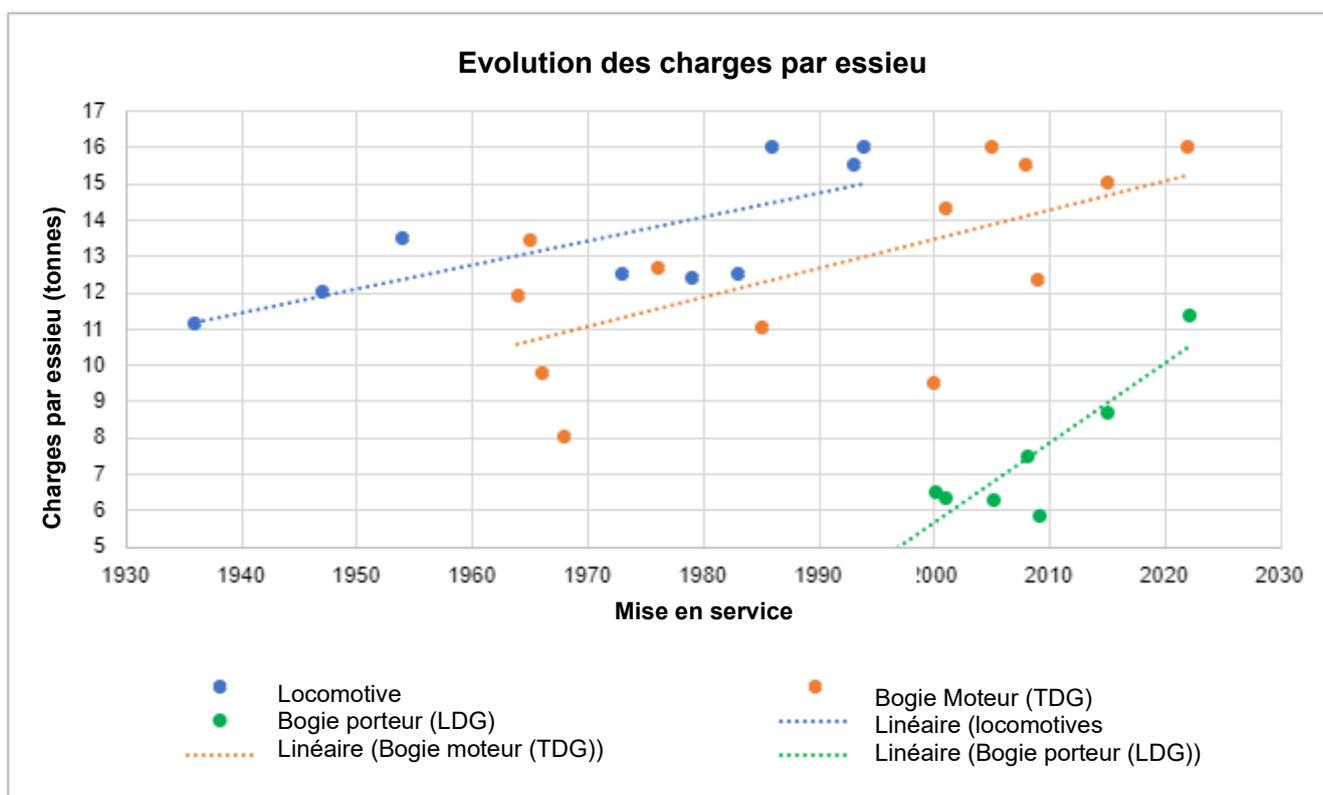


Figure 34: Evolution des charges par essieu

La géométrie des voies est calculée, à quelques exceptions près, à l'aide du logiciel TopoRail développé par les CFF, cf. Figure 35.

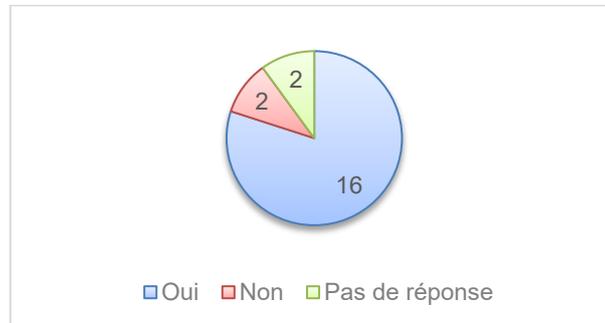


Figure 35: Calcul de la géométrie des voies avec TopoRail

Cette large application simplifie l'échange des données relatives à la géométrie des voies. Ces possibilités ont été utilisées dans le projet P2 pour déterminer la répartition des rayons de courbure. Les compagnies de tramway calculent le tracé selon leurs propres directives et leurs propres outils.

2.7.2 Questions concernant le rail

Chez les chemins de fer à voie métrique, en général, le profil de rail 46 E1 est utilisé (cf. Figure 36). Parfois, pour des raisons de stabilité (terrain naturel meuble et appareils de voie), le profil de rail plus grand 54E2 est utilisé. Les profils de rail plus petits VST 36 et VST sont existants et sont généralement remplacés par le profil de rail plus grand 46E1 lors d'un renouvellement.

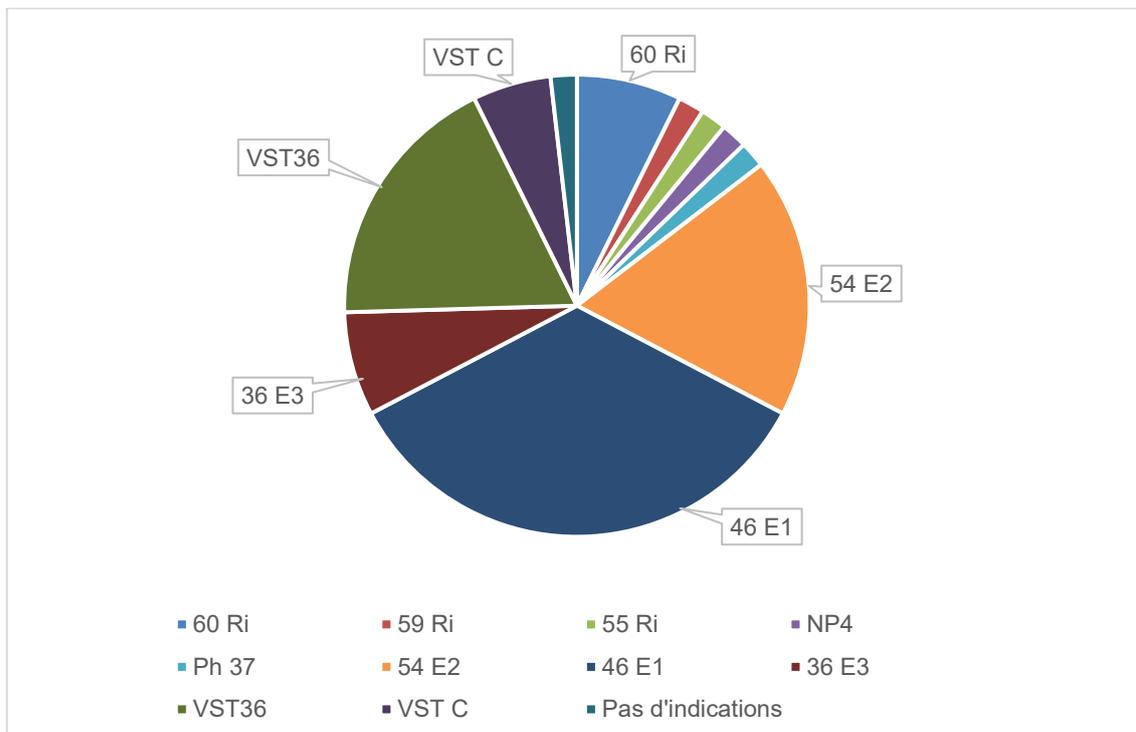


Figure 36: Profils de rail utilisés

Chez les compagnies de tram, le rail à gorge 60 Ri est le plus fréquent.

En règle générale, les rails sont soudés sans joints. Les plus faibles rayons soudés sont d'environ 45 m. cf. Figure 37.

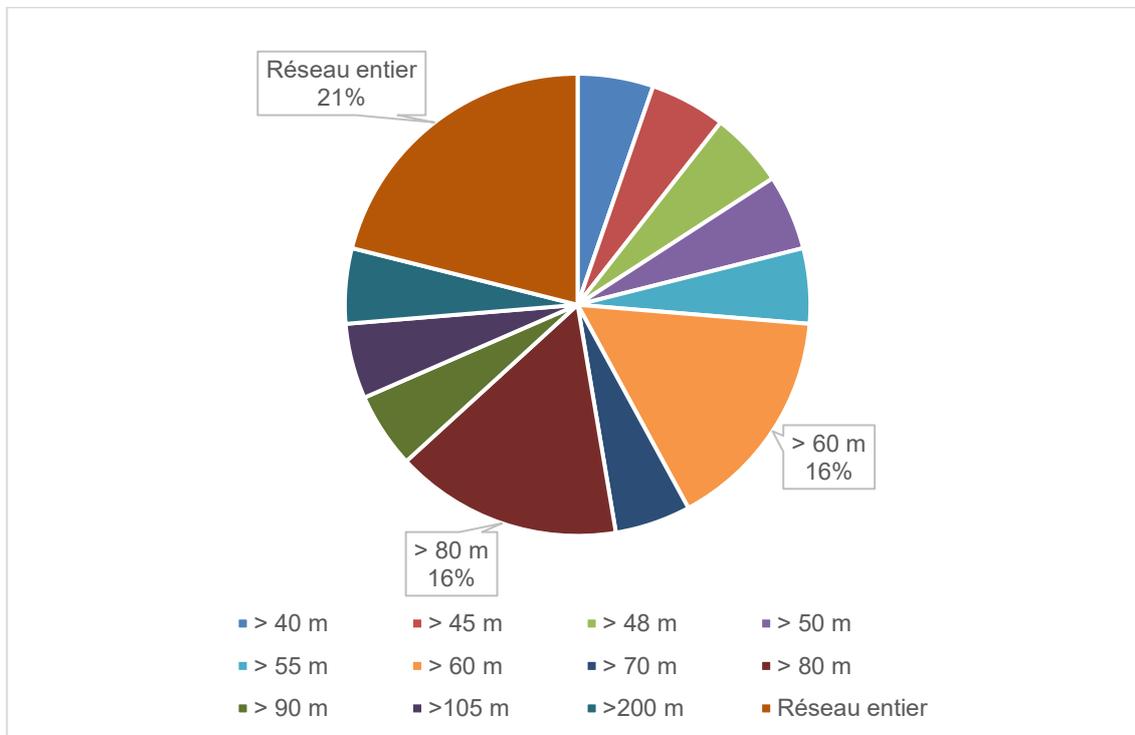


Figure 37: Rayon minimal des voies sans joints

Chez les chemins de fer, les nuances d'acier utilisées varient entre 200 et 400HT cf. Figure 38.

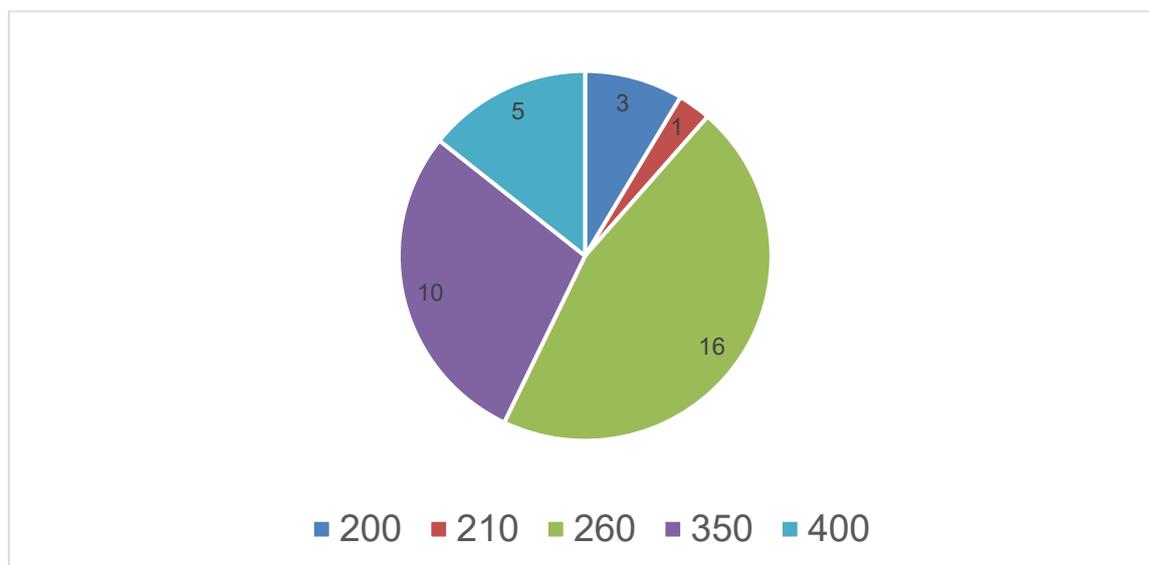


Figure 38: Nuances d'acier utilisées pour les rails

Chez presque tous les chemins de fer, la nuance d'acier R260 est utilisée en règle générale. La nuance d'acier 200 n'est généralement plus utilisée aujourd'hui, mais elle est encore présente dans l'existant. Chez 29% des chemins de fer, la nuance supérieure R350 HT est également installée. 5 chemins de fer ont déjà posé la nuance d'acier encore plus dure R400 HT. L'objectif premier de la nuance d'acier plus dure est de réduire l'usure dans les courbes étroites et les tronçons de voie fortement sollicités. Afin d'éviter de changer fréquemment de nuance d'acier, certains chemins de fer ont adopté une stratégie générale consistant à n'utiliser qu'une seule nuance d'acier, p.ex. 350HT ou 400HT.

En raison des expériences faites jusqu'à présent avec l'utilisation des différentes nuances d'acier pour réduire l'usure des rails, les questions suivantes doivent être clarifiées pour le projet P3 roue/rail:

- Quelle est l'influence de l'augmentation de la qualité de l'acier des rails sur l'usure de la roue ?
- Quelle stratégie (pose en continu de la même nuance d'acier ou pose en fonction du rayon et de la charge) est la plus favorable pour l'usure de la roue ?

2.7.3 Questions concernant les semelles sous rail

La plupart des chemins de fer utilisent les semelles sous rail rigides avec une rigidité de 700 kN/mm cf. Figure 39.

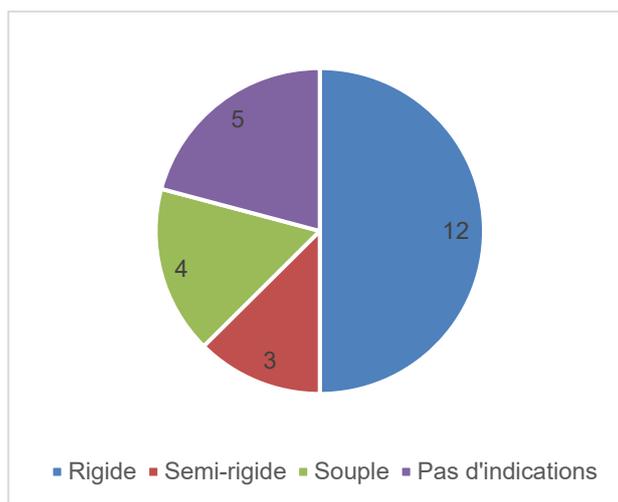


Figure 39: Utilisation des semelles sous rail

Quatre chemins de fer utilisent des semelles sous rail souples avec une rigidité de 85 ou 100 kN/mm sur les traverses en béton, dans le but de réduire la formation d'usures ondulatoires dans les faibles rayons. Comme une augmentation du bruit a été constatée lors de l'utilisation de la semelle sous rail plus souple, certains chemins de fer comme RhB et AB sont passés à l'utilisation de semelles sous rail moyennement rigides d'une rigidité de 200 kN/mm.

Chez différents chemins de fer, la semelle sous rail rigide est souvent utilisée pour des raisons historiques (standard sur traverses en bois). Dans ces cas, il est nécessaire de clarifier l'effet de la rigidité de la semelle sous rail. La résolution du conflit d'intérêt entre réduction de l'usure des rails et augmentation du bruit grâce à une semelle sous rail appropriée sera un point important du projet P4. Dans la plupart des cas, l'usure de la semelle sous rail ne pose pas de problème chez les chemins de fer interrogés. Elles ne sont changées que lors du prochain changement de rails ou du renouvellement de la superstructure.

2.7.4 Questions concernant les traverses et les semelles sous traverse

Les chemins de fer utilisent encore de nombreuses traverses différentes (bois, acier, béton, acier en Y). La tendance va vers la pose de traverses en béton lors de nouvelles constructions. Chez les chemins de fer à crémaillère, des traverses en acier sont posées. Dans les cas particuliers, p.ex. sur les ponts en acier avec fixation directe, on pose également des traverses en bois synthétique.

Les voies avec traverses en acier Y posent souvent des problèmes de maintien du dévers.

Actuellement, l'utilisation de semelles sous traverses est encore peu répandue chez les chemins de fer à voie métrique et si oui dans le cadre d'essais. Là où des semelles sous traverses sont utilisées, il s'agit de semelles rigides.

De nombreux chemins de fer ne connaissent pas les semelles sous traverses et les différences techniques entre les produits (résistance latérale, surface de contact) ou n'y ont pas encore vraiment prêté attention. Chez les chemins de fer qui les ont déjà installées, les semelles sous traverse sont utilisées comme solution standard pour les traverses en béton (accent sur la préservation du ballast), pour optimiser les sauts de rigidité lors de transitions ou dans les faibles rayons et en cas d'infrastructure rigide.

2.7.5 Questions concernant les voies à crémaillère

Parmi les chemins de fer interrogés, cinq ont des lignes à crémaillère. Différents systèmes sont utilisés : Von Roll, Riggerbach, Abt et Strub.

Tous les chemins de fer utilisent des traverses en acier. Chez le MGB, il s'agit de traverses en acier Y. Le soudage sans joints de la crémaillère dépend du système. Avec le système Abt, la crémaillère n'est pas soudée, alors qu'elle l'est avec les systèmes Strub et Von Roll.

2.7.6 Question concernant les rails à gorge

Outre les compagnies de tram, la plupart des autres chemins de fer interrogés disposent aussi de tronçons équipés de rails à gorge. Les profils 59R2 et Ri 60 sont le plus souvent posés. Chez la plupart des chemins de fer, les rails à gorge ne sont utilisés que sur de courts tronçons et le profil des roues n'est pas adapté. Sur les tronçons plus longs (Forchbahn, TransN et AB), des profils de roue adaptés sont utilisés.

2.7.7 Questions concernant l'infrastructure et l'évacuation des eaux

La plupart des lignes des chemins de fer interrogés n'ont pas encore d'infrastructure et datent de l'époque de leur construction. Quatre chemins de fer n'ont jamais dimensionné d'infrastructure (cf. Figure 40).

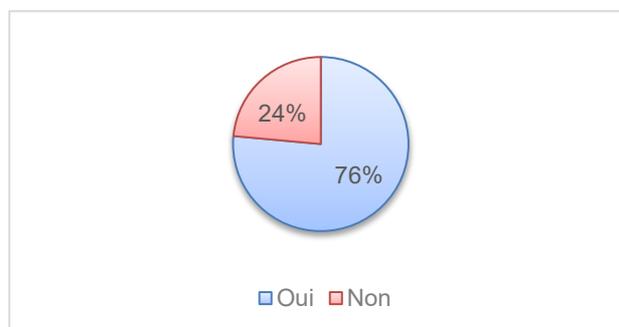


Figure 40: Chemins de fer avec infrastructure

Le pourcentage de voies avec infrastructure est très variable et varie de quelques pour cent à 40 %. Il est intéressant de noter que chez le RhB, aucune infrastructure normée n'est présente dans 90 % des cas, comme aucun problème de portance n'a été rencontré jusqu'à présent et qu'aucune anomalie excessive, comme des remontées de fines ou des zones blanches, n'a été constatée.

Lors de nouvelles constructions, la tendance est à la réalisation de l'infrastructure avec PSS, parfois aussi avec AC-Rail.

Les questions suivantes sont susceptibles d'intéresser le projet P4:

- Comment l'infrastructure optimale doit-elle être dimensionnée par rapport à la rigidité optimale de la voie ferrée ?
- Quand faut-il remplacer une infrastructure existante non définie par une infrastructure normée ?

La plupart des chemins de fer disposent d'évacuations des eaux sous forme de talus, de tranchées et de conduites d'infiltration. Chez environ un tiers des chemins de fer, env. 60 à 80 % des voies disposent d'une évacuation des eaux. Chez les chemins de fer, la majeure partie des tronçons ne dispose pas d'évacuation des eaux cf. Figure 41.

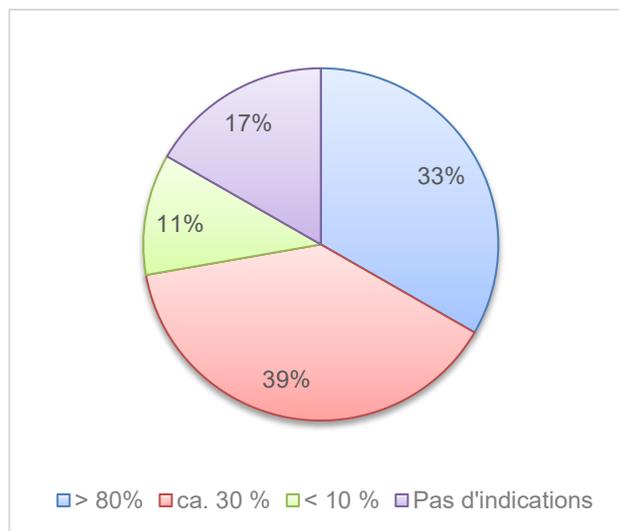


Figure 41: Pourcentage des voies avec évacuation des eaux

2.7.8 Bourrage et meulage

Le cycle de bourrage moyen dépend généralement de la charge et varie entre 4 - 8 ans. Le bourrage est déclenché sur la base d'une évaluation de la géométrie de la voie.

Chez tous les chemins de fer, les rails sont au moins meulés. Chez le MOB, les rails sont en partie aussi fraisés. Le RhB fait également de premiers essais de fraisage des rails dans le tunnel de la Vereina. En règle générale, les travaux sont déclenchés par la formation de défauts du rail, en particulier d'usures ondulatoires (cf. Figure 42).

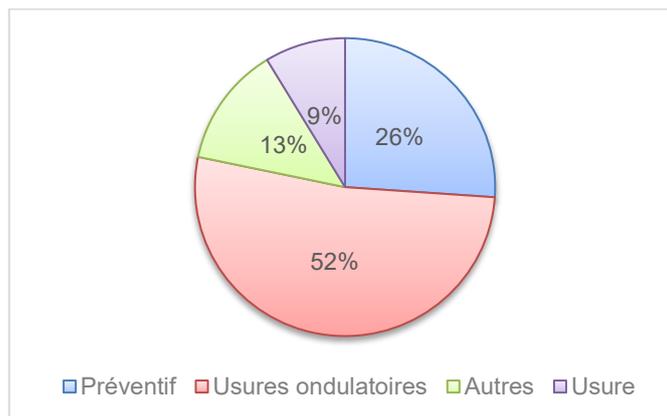


Figure 42: Déclencheur pour travaux de meulage ou de fraisage

Le Forchbahn est le seul chemin de fer à suivre une stratégie de meulage préventive. Les rails y sont systématiquement meulés tous les deux ans. Cinq autres chemins de fer appliquent, au moins partiellement, une stratégie de meulage préventive.

2.7.9 Surveillance des défauts géométriques

Pour la surveillance des défauts géométriques, les plus grands chemins de fer utilisent le véhicule de mesure. Les chemins de fer plus petits effectuent des mesures manuelles ponctuelles et procèdent de plus à une évaluation visuelle.

Les voies sont contrôlées visuellement par le personnel de la ronde toutes les 2 - 4 semaines. Le wagon de mesure mesure l'ensemble de la voie tous les 6 - 24 mois.

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

Lors des inspections effectuées par le personnel de ronde, les irrégularités habituelles sont constatées selon un catalogue de défauts. Sur la base des résultats du sondage, aucun incident notable n'a été signalé.

2.7.10 Questions concernant les défauts géométriques de la voie

En ce qui concerne les défauts constatés dans la voie, la majorité des chemins de fer interrogés ont signalé les suivants :

- Rails: Usures ondulatoires, fissures, formation de lèvres
- Traverses: Principalement fissures dans les traverses en bois
- Fixation des rails: Les défauts sont rares

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

2.7.11 Bruit et vibrations

Plus de 80 % des chemins de fer interrogés ont des problèmes de bruit cf. Figure 43.

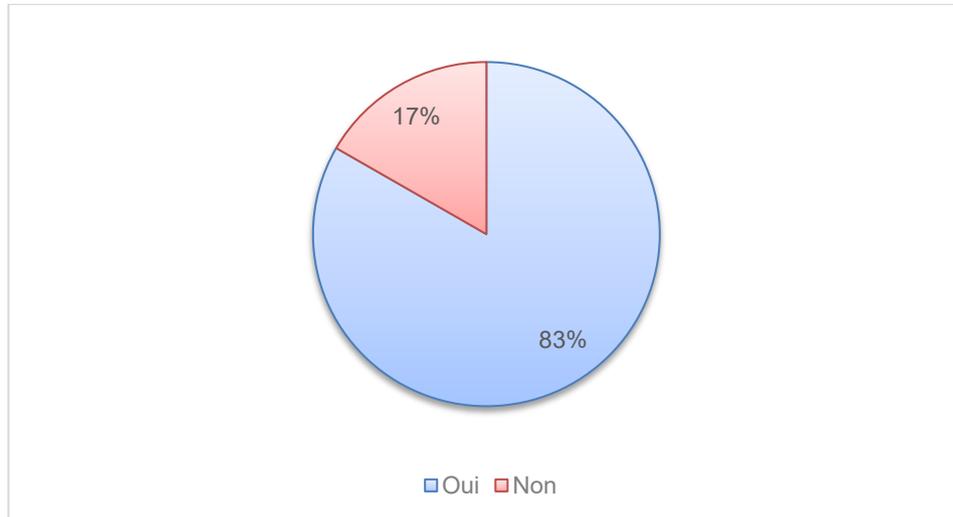


Figure 43: Chemins de fer avec problèmes de bruit

Chez la plupart des chemins de fer, il s'agit de crissements en courbe dans les faibles rayons. Le SKS et le SKK sont utilisés comme mesures possibles. Toutefois, l'effet obtenu n'est pas encore tout à fait clair et confirme le besoin de recherche qui a été démontré dans le projet P2 et en partie dans le projet P4. L'installation d'absorbeurs de bruit de roue et des réductions de vitesse ont été citées comme d'autres mesures efficaces du côté des véhicules.

Plus de la moitié des chemins de fer ont des problèmes de vibrations cf. Figure 44.

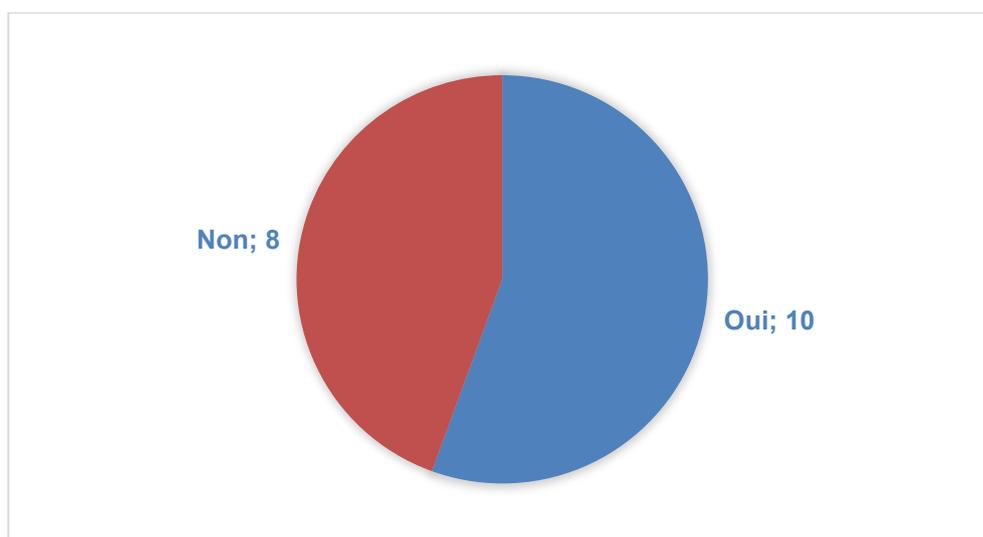


Figure 44: Chemins de fer avec problèmes de vibrations

Il n'existe pas de solution générale efficace contre les vibrations chez les chemins de fer. Des traverses en béton avec semelles sous traverse sont utilisées à titre d'essai. Localement, des tapis sous ballast ont été utilisés avec succès.

En ce qui concerne les semelles sous traverses, il convient de noter que les types autorisés en Suisse ne sont pas conçus pour la protection contre les vibrations. La question se pose de savoir si les chemins de fer utilisent effectivement des USP hautement élastiques/élastiques dans ce cas?

2.7.12 Impact matériel roulant neuf

Chez la plupart des chemins de fer utilisant du nouveau matériel roulant, les défauts ont augmenté, en particulier l'usure des rails et les usures ondulatoires (cf. Figure 45).

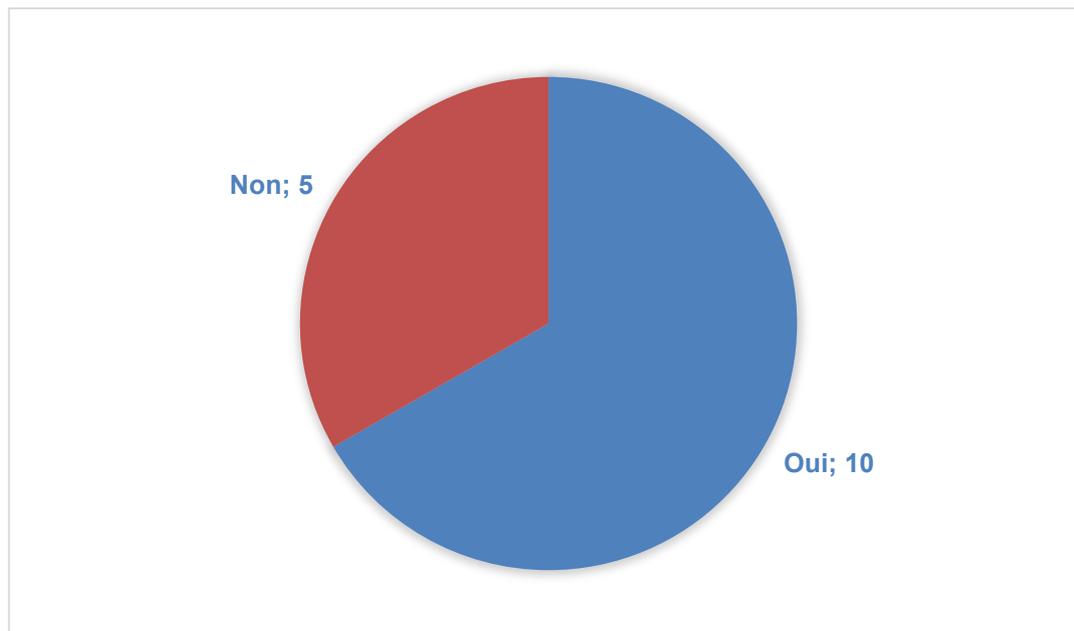


Figure 45: Augmentation des défauts avec l'utilisation de nouveau matériel roulant

2.8 Résultats questionnaire P5

2.8.1 Mise en évidence des mesures à prendre dans le cadre du projet P5

Les principaux enseignements tirés de l'évaluation des questions du sondage Partie P5 (matériel roulant) peuvent être résumés comme suit:

Les chemins de fer n'ont pas pu répondre à toutes les questions. On peut en déduire que des formations chez les chemins de fer seraient judicieuses. Une séance de questions-réponses accompagnée aurait été importante.

Seul le fournisseur peut répondre aux questions techniques détaillées sur les véhicules. De nombreux détails techniques ne sont pas connus des chemins de fer ou n'ont pas été transmis aux chemins de fer.

Les véhicules utilisés par les chemins de fer ont des caractéristiques techniques variées. Une première analyse montre qu'aucun standard n'est identifiable, comme p.ex.

- Freins (sabots, disques)
- Transmission de la force motrice (arbre creux, cardan)
- Liaison bogie – caisse du véhicule (couronne, pivot)
- Type de roue (roues monobloc, roues bandagées, roues résilientes)
- Les matériaux de roues/bandages sont variés, choix pas justifié
- Concept des organes de roulement (Jacobs, classique 2 bogies, 1 bogie et attelé)
- etc.

Une évaluation montre que les concepts de train suivants sont en service cf. Figure 46:

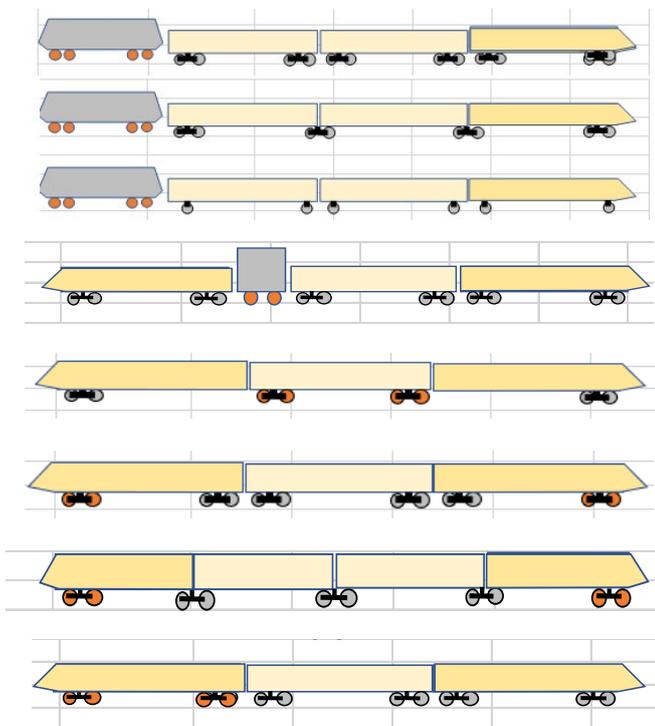


Figure 46: Concepts de train utilisés

Le kilométrage atteint par les roues porteuses/motrices se situe entre 3'000 - 50'000 km/mm d'usure du diamètre de la roue et présente donc une très grande dispersion.

L'empattement des bogies moteurs varie de 1750 - 2980 mm (sur les locomotives). Pour les bogies porteurs, il varie entre 1400 - 2150 mm (dans les bogies jacobson).

Le diamètre des roues motrices varie de 600 mm à 1070 mm (sur les locomotives). Pour les roues porteuses, il se situe entre 580 - 770 mm.

La durée de vie des roues motrices varie entre 74'000 km et 1'000'000 km, celle des roues porteuses est comprise entre 160'000 - 2'000'000 km, ce qui montre également une grande dispersion.

La relation entre l'usure ou les défauts des roues et le tracé de la ligne n'est pas systématiquement saisie et observée chez de nombreux chemins de fer. Les conditions de tracé et leurs effets sur les véhicules ne sont connus que de manière très superficielle.

La charge par essieu à l'état chargé n'a pas été indiquée par de nombreux chemins de fer

En ce qui concerne la traction et le freinage, les chemins de fer n'imposent pas d'exigences concrètes au fabricant. Le fabricant détermine le diagramme ZV p.ex. en fonction des exigences pour le respect des temps de parcours sur les lignes.

Les diagrammes ZV pour les véhicules ne sont pas disponibles chez tous les chemins de fer.

En ce qui concerne le comportement dynamique, les chemins de fer n'imposent aucune exigence au fournisseur. En règle générale, les chemins de fer ne disposent pas des connaissances nécessaires pour répondre aux questions relatives au comportement dynamique.

2.8.2 Inputs pour autres projets

L'évaluation du sondage dans le P5 a permis de mettre en évidence les inputs suivants pour les autres projets:

Input	Concerne projet
La formation doit être renforcée chez les chemins de fer. Des formations dans le domaine du comportement dynamique sont nécessaires.	P8
Le plus simple est de clarifier les questions techniques sur les véhicules directement avec le fournisseur. De nombreux détails ne sont disponibles que par ce chemin.	P1-5
Les messages clés de ce sondage sont intégrés dans « l'Analyse du système interaction matériel roulant », p.ex. <ul style="list-style-type: none"> - Défauts sur roue/rail - Concept d'exploitation - Concepts de trains - Véhicules de référence - Caractéristique des lignes 	P5

Tableau 3: Inputs P5 pour autres projets

2.8.3 Conclusions importantes pour les chemins de fer

La formation et l'instruction des collaborateurs doivent être renforcées afin de développer un langage technique commun dans la "voie métrique", en particulier dans le secteur spécialisé de l'interaction matériel roulant/voie ferrée.

Les connaissances des chemins de fer sur leurs véhicules devraient être approfondies. Les réponses des chemins de fer n'ont p.ex. pas permis de reconstituer les principes des organes de roulement.

Les spécifications pour l'acquisition de nouveaux véhicules devraient également inclure le comportement dynamique.

Les documents techniques des véhicules (rapports, fiches techniques, spécifications, plans etc.) devraient être systématiquement réclamés au fournisseur. Ceux-ci doivent être tenus à jour chez les chemins de fer tout au long de la durée de vie des véhicules.

3 Conclusion

3.1 Résumé des conclusions les plus importantes

Le questionnaire auquel ont répondu 17 chemins de fer membres de RAILplus ainsi que deux compagnies de tram et le Forchbahn a fourni des informations et des enseignements précieux pour le projet maîtrise de système interaction matériel roulant / voie ferrée métrique.

Types de défauts sur le véhicule

L'usure sur le boudin et sur la surface de roulement, avec une part de 50 %, sont les types de défauts les plus fréquents sur le véhicule. Il en résulte les questions suivantes :

- *Sur quelles lignes, l'usure des roues est-il prédominant?*
- *Y a-t-il des dépendances avec la répartition des rayons de courbure ?*
- *Y a-t-il des dépendances avec les types de véhicules en circulation?*
- *Y a-t-il des différences entre bogies porteurs et moteurs?*
- *Y a-t-il des dépendances avec la nuance d'acier des roues?*

Types de défauts sur la voie ferrée

En ce qui concerne les types de défauts sur les surfaces de roulement des rails, l'usure des rails et les usures ondulatoires dominant. Il en résulte les questions suivantes, qui doivent être clarifiées dans le cadre du projet :

- *Sur quelles lignes l'usure des rails ou les usures ondulatoires sont-elles prédominantes ?*
- *Y a-t-il des dépendances avec les conditions de tracé (répartition des rayons des courbure) ?*
- *Y a-t-il des dépendances avec les véhicules en service ?*
- *Y a-t-il des dépendances entre les usures ondulatoires et la dureté des rails ?*

Augmentation des coûts matériel roulant – voie ferrée

Plus de la moitié des chemins de fer attribuent une augmentation des coûts constatée ces dernières années à une interaction non optimale entre matériel roulant et voie ferrée. Dans la plupart des cas, les réponses concernant l'estimation des coûts supplémentaires annuels sont difficilement compréhensibles et doivent être clarifiées dans le projet rentabilité globale. Il s'agit notamment d'analyser les dépendances entre les coûts et les aspects suivants :

- *Influence acquisition matériel roulant*
- *Influence modification de la voie ferrée*
- *Influence des charges de la voie et charges par essieu*

Bruit et vibration

Le bruit et les vibrations sont un sujet d'actualité chez les chemins de fer. Le bruit est généralement perçu dans les faibles rayons sous forme de crissements. Les vibrations sont indépendantes de la géométrie de la voie et sont généralement un phénomène local.

Outils pour les mesures de maintenance de la voie ferrée

Chez la plupart des chemins de fer, il existe un besoin de rattrapage pour un outil de maintenance moderne allant de la saisie de l'état actuel jusqu'au pronostic servant de base pour la définition de mesures d'entretien appropriées.

Détermination de la répartition des courbes

La répartition des courbes, source d'information importante pour la compréhension et les calculs et la simulation de l'interaction matériel roulant / voie ferrée sur le réseau à voie métrique, n'a pas pu être déterminée de manière suffisante lors du sondage. La possibilité d'évaluation à partir de données TopoRail développée par Innovative Times a fait ses preuves chez les premiers chemins de fer et devrait être étendue aux autres.

Lubrification du boudin (SKS)

Tous les chemins de fer utilisent le SKS côté véhicule. L'objectif est de réduire l'usure des roues et des rails, le crissement en courbe et la formation d'usures ondulatoires, et d'améliorer la sécurité contre le déraillement.

Les quantités appliquées pour le lubrifiant sont différentes pour chaque chemin de fer et chaque véhicule et doivent être approfondies dans le cadre du projet P2.

Aucun des chemins de fer interrogés exige une désactivation de la lubrification pour des raisons environnementales. La plupart des chemins de fer n'ont pas constaté de dysfonctionnements des circuits de voie. Les détails des dysfonctionnements seront analysés dans la suite du travail en P2.

Conditionnement du champignon du rail (SKK)

De nombreux chemins de fer confondent SKK et SKS. Des systèmes embarqués sont actuellement utilisés chez 6 chemins de fer. Deux chemins de fer utilisent un système fixe. Comme avec le SKS, le SKK doit permettre de réduire les crissements dans les courbes, l'usure des roues et des rails ainsi que la formation d'usures ondulatoires.

Les améliorations constatées avec l'introduction de SKK varient d'un chemin de fer à l'autre, p.ex. amélioration uniquement pour le bruit. Une évaluation des améliorations fait partie de l'évaluation détaillée dans le projet P2.

Aucun défaut à la roue ou au rail dû au conditionnement n'a été constaté ou mis en évidence.

Certains chemins de fer ont effectué des essais de freinage et de traction avant la mise en service, afin de déterminer les dégradations des performances dues au SKK.

Profils de roue et de rail

Les profils de roue utilisés chez les chemins de fer correspondent majoritairement aux profils selon R RTE 29500 ou ont été développés sur cette base. Les profils de roue connus ne sont pas adaptés aux profils de rail nominaux ou usés utilisés chez les chemins de fer à voie métrique. Chez les chemins de fer à voie métrique, le profil de rail 46E1 est le plus répandu.

L'objectif de la recherche dans le P3 doit être de développer les connaissances sur le profil des roues et des rails de telle sorte que des profils adaptés à l'interaction optimale matériel roulant / voie ferrée puissent être déterminés et utilisés.

Les instabilités de roulement ne posent pas de problème chez la plupart des chemins de fer, car la plupart d'entre eux ne roulent pas dans la plage de vitesse supérieure qui est déterminante à cet égard.

Usure sur roue et rail

Les profils de roue creux ne sont pas un problème majeur chez les chemins de fer. Chez la plupart des chemins de fer, l'usure des surfaces de roulement est plus importante sur les essieux moteurs que sur les essieux porteurs. Cela s'explique en grande partie par le fait que les charges par essieu et les empattements sont plus importants chez les essieux moteurs.

Chez près de la moitié des chemins de fer interrogés, on constate une usure accrue des flancs des rails. Cela indique un lien avec le SKS. Cet aspect doit être examiné de plus près dans le cadre du projet P2.

Documents disponibles pour l'évaluation des défauts sur la roue et le rail

Différents catalogues sont utilisés pour évaluer les défauts sur les roues et les rails. Il faudrait donc, dans le cadre de la recherche, établir un catalogue de défauts pour la voie métrique. Les documents les plus récents de la voie normale devraient être pris en compte et repris dans la mesure du possible. Par ailleurs, les expériences des chemins de fer à voie métrique doivent également être mises à profit.

Spécifications pour les calculs de conception et de vérification du comportement dynamique

Le sondage a confirmé l'hypothèse selon laquelle, jusqu'à présent, les spécifications des chemins de fer métriques n'exigeaient pas de calculs de conception, de vérification et des essais dans la voie relatifs au comportement dynamique et du LCC lors de l'acquisition de véhicules. Celles-ci doivent être établies dans le P3 et le P5. Cela devrait permettre à l'avenir de clarifier les exigences des chemins de fer en ce qui concerne l'interface roue/rail à l'égard de l'industrie des véhicules.

Spécifications relatives aux essais dans la voie

Chez la plupart des chemins de fer, il n'existe pas de spécifications pour la réalisation d'essais. Dans ce cas, il faut vérifier si les preuves exigées par l'OFT pour l'homologation des véhicules à voie métrique sont suffisantes.

Voie ferrée

Chez la plupart des chemins de fer interrogés, les charges moyennes quotidiennes sur les voies ont nettement augmenté en raison de la densification des cadences et de l'augmentation des charges par essieu.

Chez presque tous les chemins de fer, le profil de rail 46E1 avec la nuance d'acier R260 est généralement utilisé. Pour réduire l'usure dans les courbes étroites et les tronçons de voie fortement sollicités, la nuance d'acier supérieure R350HT ou, plus récemment, R400HT est parfois utilisée. Il convient de vérifier avec le P3 l'influence de l'augmentation de la nuance d'acier du rail sur l'usure constatée sur la roue.

Les semelles sous rail souples utilisées aujourd'hui sur les traverses en béton contribuent efficacement à la réduction de la formation d'usures ondulatoires. D'un autre côté, une augmentation du bruit a été constatée pour cette raison. La résolution de ce conflit d'intérêts, à savoir entre la réduction de l'usure et l'augmentation du bruit, grâce à une semelle sous rail optimisée, sera l'un des points forts du projet P4.

Bien que l'on utilise encore aujourd'hui différents types de traverses, la tendance est d'installer des traverses en béton lors de nouvelles constructions. L'utilisation de semelles sous traverses est encore peu connue chez la plupart des chemins de fer. Les potentiels doivent être mis en évidence dans le P4.

La plupart des chemins de fer interrogés ne disposent pas encore d'une infrastructure standardisée ou datent de l'époque de leur construction. Pour le projet P4, les questions suivantes concernant l'infrastructure sont au premier plan :

- *Comment l'infrastructure optimale doit-elle être dimensionnée en termes de rigidité optimale de la voie ferrée ?*
- *Quand faut-il remplacer une infrastructure existante et non défini par une infrastructure normée ?*

Chez les chemins de fer, le cycle moyen de bourrage dépend de la charge et varie entre 4 - 8 ans. Chez tous les chemins de fer, les rails sont au moins meulés. Les déclencheurs de cette opération sont généralement la formation de défauts sur les rails.

Pour la surveillance des défauts géométriques de la voie, les grands chemins de fer utilisent le véhicule de mesure. Les chemins de fer plus petits effectuent des mesures manuelles ponctuelles et procèdent à une évaluation visuelle complémentaire. Les paramètres habituels de la géométrie de la voie selon R RTE 22570 sont surveillés.

Matériel roulant

En ce qui concerne les questions relatives au véhicule, il s'est avéré que celles-ci ne pouvaient être traitées qu'en partie. Les questions techniques détaillées sur les véhicules ne peuvent parfois être répondues que par le fournisseur. On peut en conclure qu'il existe un besoin de formation chez les chemins de fer.

En ce qui concerne les véhicules utilisés, il s'avère que ceux-ci présentent des caractéristiques techniques très variées et que, selon les premières constatations, aucun standard n'est identifiable. Cela concerne p.ex. les freins, la transmission, les types de roues, les matériaux des roues ou le concept des organes de roulement.

Le kilométrage des roues porteuses et des roues motrices présente une grande dispersion. Les diamètres des roues motrices et des roues porteuses varient d'un type de véhicule à l'autre.

Chez de nombreux chemins de fer, la relation entre usure des roues et le tracé de la ligne n'est pas systématiquement saisie et observée. Les conditions de tracé et leurs effets sur les véhicules ne sont connus que de manière très superficielle.

Les messages clés du sondage sur les véhicules sont intégrés dans l'analyse du système Interaction matériel roulant:

- *Défauts sur roue/rail*
- *Concepts d'exploitation*
- *Concepts de trains*
- *Véhicules de référence*
- *Caractéristique des lignes*

Pour les chemins de fer, les principales conclusions sont les suivantes :

La formation et l'instruction des collaborateurs doivent être renforcées afin de développer un langage technique commun dans la "voie métrique", en particulier dans le secteur spécialisé de l'interaction matériel roulant / voie ferrée.

Les connaissances des chemins de fer sur leurs véhicules devraient être approfondies.

Les spécifications pour l'acquisition de nouveaux véhicules devraient également inclure le comportement dynamique.

Les documents techniques des véhicules (rapports, fiches techniques, spécifications, plans etc.) devraient être systématiquement demandés au fournisseur. Ils doivent être tenus à jour chez les chemins de fer pendant toute la durée de vie des véhicules.

4 Répertoires

4.1 Révisions

Rev.	Date	Auteur	Description de la modification
1.0	08.10.2022	Peter Güldenapfel	Version initiale

4.2 Figures

Figure 1: Formes de défauts au matériel roulant.....	11
Figure 2: Formes de défauts sur les rails	12
Figure 3: Types de défauts sur la superstructure et l'infrastructure	13
Figure 4: Compagnies avec augmentation des coûts en raison d'une interaction matériel roulant / voie ferrée non optimale.....	14
Figure 5: Principaux problèmes du comportement à court terme	15
Figure 6: Utilisation d'un outil pour les mesures de maintenance de la voie ferrée.....	16
Figure 7: Processus écrit pour l'entretien du matériel roulant.....	16
Figure 8: Processus écrit pour l'entretien de la voie	16
Figure 9: <i>Formats livrés sur la répartition des courbes chez les chemins de fer.....</i>	17
Figure 10: <i>Répartition des courbes exemple TPF (représentation générée par Innovative Times SA)</i>	18
Figure 11: <i>Application EN 15427-1-2 et 16028 pour graissage des boudins chez les chemins de fer</i>	19
Figure 12: <i>Application R RTE 49410 pour le graissage des boudins chez les chemins de fer.....</i>	20
Figure 13: <i>Vérification de l'effet de la lubrification lors d'inspections périodiques</i>	20
Figure 14: <i>Vérification de l'effet de la lubrification par la ronde de surveillance</i>	20
Figure 15: <i>Raisons pour l'application de SKK</i>	21
Figure 16: <i>Contrôle du SKK</i>	22
Figure 17: <i>Utilisation de traversées-jonctions en courbe</i>	24
Figure 18: <i>Ecaillages dans la zone du cœur des appareils de voie</i>	24
Figure 19: <i>Part de chemins de fer par classe de vitesse</i>	27
Figure 20: <i>Part de chemins de fer avec études de géométrie de contact</i>	27
Figure 21: <i>Traces de glissement de roues bloquées sur les surfaces de roulement des rails</i>	30
Figure 22: <i>Empreintes de patinage sur les surfaces de roulement des rails</i>	30
Figure 23: <i>Plats par roues bloquées.....</i>	30
Figure 24: <i>Apparition de fissures thermiques sur les roues avec sabots de freinage.....</i>	31
Figure 25: <i>Apparition de sillons et cavités sur les surfaces de roulement par freins à sabot.....</i>	31
Figure 26: <i>Utilisation de catalogues de défauts pour roues</i>	32
Figure 27: <i>Utilisation d'un catalogue de défauts pour rails</i>	33
Figure 28: <i>Constatation d'atteinte au confort.....</i>	34
Figure 29: <i>Résumé des déraillements dus à l'interaction roue/rail.....</i>	35
Figure 30: <i>Spécification des calculs de dimensionnement et des preuves du comportement dynamique disponibles</i>	36
Figure 31: <i>Paramètres des véhicules disponibles pour des études du comportement dynamique</i>	36
Figure 32: <i>Spécification d'acquisition pour des preuves techniques par essais disponibles</i>	37
Figure 33: <i>Spécification pour la preuve de durabilité en exploitation disponible</i>	38
Figure 34: <i>Evolution des charges par essieu.....</i>	39
Figure 35: <i>Calcul de la géométrie des voies avec TopoRail</i>	40
Figure 36: <i>Profils de rail utilisés</i>	40
Figure 37: <i>Rayon minimal des voies sans joints.....</i>	41
Figure 38: <i>Nuances d'acier utilisées pour les rails.....</i>	41

Figure 39: Utilisation des semelles sous rail.....	42
Figure 40: Chemins de fer avec infrastructure.....	43
Figure 41: Pourcentage des voies avec évacuation des eaux.....	44
Figure 42: Déclencheur pour travaux de meulage ou de fraisage	45
Figure 43: Chemins de fer avec problèmes de bruit.....	46
Figure 44: Chemins de fer avec problèmes de vibrations.....	46
Figure 45: Augmentation des défauts avec l'utilisation de nouveau matériel roulant	47
Figure 46: Concepts de train utilisés	48

4.3 Tableaux

Tableau 1: Chemins de fer interrogés	10
Tableau 2: Aperçu tronçons à voie simple et double	18
Tableau 3: Inputs P5 pour autres projets	49

5 Annexe

5.1 Annexe A: Questionnaire partie 1 et 2

Partie 1: [SF Interaktion Fzg-Fw Meterspur Umfrage T1 d.docx](#)

Partie 2: [SF Interaktion Fzg-Fw Meterspur Umfrage T2 d.docx](#)