



État de la recherche et nécessité de recherche dans le domaine du bruit ferroviaire

Prof. Dr. Ulrich Weidmann, EPF Zurich

Prof. Dr.-ing. Markus Hecht, TU Berlin

Markus Maibach, infras AG

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IVT Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
Institute for Transport Planning and Systems



État de la recherche et nécessité de recherche dans le domaine du bruit ferroviaire

Prof. Dr. Ulrich Weidmann
ETH Zürich
Institut für Verkehrsplanung
und Transportsysteme
HIL F13.1
Stefano-Franscini-Platz 5
8093 Zurich

Prof. Dr.-Ing. Hecht
TU Berlin
Institut für Land und Seever-
kehr
Fachgebiet Schienenfahrzeuge
(Sekt. SG14)
Salzufer 17-19
D-10587 Berlin

Markus Maibach
INFRAS
Binzstrasse 23
8045 Zurich

Téléphone : +41 44 633 33 50
Fax : +41 44 633 10 57
weidmann@ivt.baug.ethz.ch

Téléphone : +49 (0)30 314-
25150
Fax : +49(0)30 314-22529
markus.hecht@tu-berlin.de

Téléphone : +41 44 205 95 08
markus.maibach@infrass.ch

Décembre 2015, image de couverture : fb1visuals / Andi Leemann et Jeri Peier

Résumé

Ce rapport présentera l'état actuel de la recherche en matière de bruit ferroviaire et traitera des différents facteurs d'influence sur la diffusion du bruit ferroviaire. La prise en compte des parties prenantes sous la forme d'un atelier a permis de confronter les différentes perspectives des acteurs concernés. Des tendances en seront déduites, qui serviront de base à l'évaluation des approches de recherche les plus prometteuses en vue de réduire le nombre de personnes touchées par le bruit ferroviaire.

Mots-clés

Bruit ferroviaire, assainissement du bruit, bruit ferroviaire, recherche de l'administration, bruit des chemins de fer

Suggestion de citation

Weidmann, U., M. Hecht und M. Maibach (2015)_Stand der Forschung und Forschungsbedarf im Bereich Eisenbahnlärm, IVT; EPF Zurich

Sommaire

1	Projet	1
1.1	Situation initiale.....	1
1.2	Objectifs du projet.....	1
1.3	Conditions marginales et délimitation.....	2
1.4	Démarche	3
1.5	Organisation du projet	5
2	État de la recherche en matière de bruit ferroviaire.....	6
2.1	Aperçu.....	6
2.2	Infrastructure.....	7
2.3	Matériel roulant.....	17
3	Facteurs d'influences sur l'évolution du trafic ferroviaire	30
3.1	Aperçu.....	30
3.2	Évolution des facteurs environnementaux.....	31
3.3	Marché du matériel roulant.....	44
3.4	Exploitation de l'infrastructure.....	47
3.5	Développements spatiaux et sociétaux.....	47
4	Inclusion des parties impliquées	49
4.1	Cercle de participants.....	50
4.2	Résultats	51
4.3	Résultats des travaux de groupe.....	55
5	Analyse du statu quo de systèmes partiels ferroviaires et différenciation des prestations de transports	61
5.1	Analyse du trafic	61
5.2	Analyse du matériel roulant	63
5.3	Analyse des infrastructure ferroviaires	68
6	Analyse d'efficacité des champs de recherche.....	71
6.1	Tendances	71
6.2	Détermination des champs de recherche.....	72

7	Programme de recherche	74
7.1	Développement continu du système global pour wagons de marchandises	75
7.2	Superstructure optimisée en termes de LCC, bruit et de secousses	76
7.3	Réduction des crissements dans les virages par ajustement radial des jeux de roue	78
7.4	Réduction des secousses individuelles	79
7.5	Jeu de roues applicable dans la pratique et optimisé contre le bruit	80
7.6	Innovation dans les machines de construction ferroviaire.....	82
8	Bibliographie	84

1 Projet

1.1 Situation initiale

En 2000, 265 000 personnes étaient exposées à du bruit ferroviaire nocif ou gênant en Suisse. Pour les protéger, un concept global en vue de réduire le bruit sera mis en œuvre jusqu'en 2015 sur la base de la Loi fédérale du 24 mars 2000 sur la réduction du bruit émis par les chemins de fer (LBCF). Ce concept comprend des mesures concernant le matériel roulant, la construction de murs anti-bruit et l'installation de fenêtres anti-bruit. Cela permettrait de protéger entre 160 000 et 170 000 personnes du bruit, sous respect global des délais et en restant largement en-dessous de l'estimation initiale des frais.

L'objectif minimal, formulé dans la loi, concernant le nombre de personnes à protéger (degré de protection) d'au moins deux tiers n'est toutefois juste pas atteint avec 60 – 64 %.

C'est pourquoi le parlement n'est pas entré en matière quant à une réduction du crédit de bruit dans le cadre de la consultation relative à la vue d'ensemble FTP (loi ZEB). Le parlement a demandé à ce que les moyens financiers restants soient utilisés en vue d'atteindre une amélioration de la protection contre le bruit.

En vue d'élargir la palette de mesures disponibles, la révision de la loi sur la réduction du bruit prévoit notamment des soutiens à l'investissement et à la recherche dans ce domaine (art. 10a LCBF).

Selon l'art. 16 al. 1 de la Loi fédérale sur l'encouragement de la recherche et de l'innovation (LERI), la recherche de l'administration est celle que l'administration fédérale initie et dont elle a besoin pour obtenir les résultats nécessaires à l'exécution de ses tâches. Tombe sous la définition de recherche de l'administration toute recherche scientifique initiée par l'administration fédérale parce que ladite recherche est d'intérêt public dans le contexte de l'activité administrative.

1.2 Objectifs du projet

L'objectif de la recherche de l'administration est de pouvoir compenser, lors de futurs accroissements du trafic ferroviaires, les hausses de bruit dues à l'augmentation du trafic par une réduction des émissions sonores par train. Pour ce faire, outre l'utilisation de mesures déjà développées et éprouvées relatives à la lutte contre le bruit, un élargissement du portefeuille de mesures est nécessaire dans le cadre de la réduction dans le domaine des chemins de fer.

En vue de développer le portefeuille de mesures, l'OFEV aimerait soutenir activement le développement de mesures anti-bruit et encourager les recherches allant dans ce sens. Pour ce faire, une évaluation et priorisation de thèmes de recherche potentiels dans le domaine du bruit des chemins de fer est nécessaire.

Ce rapport fournit un aperçu de l'état de la recherche dans le domaine du bruit ferroviaire et en déduit le principal besoin de recherche. Il met en exergue les domaines de recherche devant être traités en premier lieu en vue d'une réduction du bruit efficace, de sorte que les moyens de recherche puissent être utilisés de manière appropriés.

Mandant

Le mandant est l'Office fédéral de l'environnement, représenté par Christoph Wenger.

Mandataire

Le mandataire est l'Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), représenté par le Prof. Dr. Ulrich Weidmann. En tant que mandataires subordonnés à l'IVT, l'Institut für Land und Seeverkehr, Fachgebiet Schienenfahrzeuge de la TU Berlin et l'Infras AG sont inclus dans le projet.

1.3 Conditions marginales et délimitation

Les thèmes de recherche peuvent provenir des domaines de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée, et se trouver à un stade de développement, d'essai, adaptation ou d'autorisation. Dans ce contexte, les champs thématiques suivants ne font pas partie de la recherche de l'administration sur le bruit ferroviaire et ne doivent donc pas être pris en compte dans l'évaluation :

mesures anti-bruit spécifiques qui s'appliquent au chemin de propagation du son, tels que p. ex. les murs ou fenêtres anti-bruit,

le développement de systèmes d'incitation à l'utilisation de technologies pauvres en émission sonore,

les aspects de santé (effet de dose, jour / nuit, aspects de psychologie de l'environnement),

développement continu de méthodes et technologies à frais améliorés / bilan d'utilité concernant la réduction des secousses dans le domaine ferroviaire et

Évaluation de la politique de lutte contre le bruit - effets, forces / faiblesses de mesures prises jusqu'ici.

1.4 Démarche

Les séquences de travail suivantes ont été formées pour le traitement de l'étude :

1.4.1 AP 1 « State of the art » dans la recherche en matière du bruit ferroviaire

Analyse de la littérature concernant l'état de la technique en matière de lutte contre le bruit dans le domaine ferroviaire ; identification et classification de lacunes de recherche ; déduction de premières idées de recherche prometteuses

1.4.2 AP 2 Détermination des facteurs d'influences sur l'évolution du trafic ferroviaire

Évaluation de l'évaluation des paramètres pertinents pour le bruit des chemins de fer. Pour cela, des pronostics et études existants ont été analysés. Un sondage des acteurs du marché n'était pas prévu, à l'exception de l'atelier AP 3. Des développements dans les domaines suivants ont été analysés :

Évolution du marché : développements quantitatifs des différents segments du marché et domaines pertinents pour le bruit du secteur ferroviaire

Innovation technique : développements techniques essentiels prévisibles, notamment pour les chapitres véhicules et infrastructure

Stratégies des acteurs du marché pertinents : stratégies dans les domaines de la circulation, des véhicules et infrastructure des acteurs du marché pertinents

Influences politiques : décisions politiques nationales et internationales prises ou prévisibles et tendances dans la politique du bruit

Aspects socio-économiques : évolution du trafic ferroviaire, de ses véhicules et de l'infrastructure ferroviaire, influences pertinentes du changement démographique et sociétal et de l'évolution économique prévisible, notamment des flux de personnes et de marchandises

1.4.3 AP 3 Inclusion des parties prenantes

Inclusion des parties prenantes du secteur des chemins de fer dans le cadre d'un atelier. Seules des instances disposant de leurs propres visions en vue d'une réduction du bruit, tels que des

exploitants d'infrastructure, propriétaires de matériel roulant, etc. ont été inclus. Les parties concernées uniquement de façon passive, telles que les entreprises de chemin de fer sans leur propre matériel roulant, n'ont pas été prises en compte, afin que le nombre des instances impliquées reste gérable. Les options d'action des instances en vue d'une réduction des émissions sonores ont été évaluées. Les idées et projets de recherche propres aux parties prenantes ont alors été prises en compte. De plus, les idées de recherche d'AP 1 ont été évaluées sous l'angle de leur faisabilité, du point de vue des parties impliquées. Les tendances d'AP 2 ont par ailleurs été discutées avec les parties impliquées. De plus, les premières bases sur les tendances à déterminer à partir d'AP 4 ont été évaluées du point de vue des parties impliquées.

1.4.4 AP 4 Analyse du statu quo des systèmes partiels ferroviaires

Un aperçu du statu quo des systèmes partiels essentiels pertinents en terme de bruit des chemins de fer est donné. Il s'agit là de l'exploitation, ainsi que du matériel roulant actuellement utilisé en Suisse et l'infrastructure :

L'analyse du trafic (exploitation) se penche sur les différents facteurs d'influence relatifs au bruit (notamment la gestion locale/temporelle du trafic, l'accélération, la vitesse) quant à leur influence sur les potentiels de réduction du bruit.

L'analyse du matériel roulant prend en compte le matériel roulant de détenteurs de véhicules, aussi bien suisses qu'étrangers. Une différenciation du matériel roulant à l'aide de diverses catégories par rapport aux propriétés techniques relatives au bruit est alors effectuée.

L'analyse des infrastructures ferroviaires est effectuée en vue de la conception technique, notamment le type et l'état de la superstructure, des instructions d'entretien et des procédés d'entretien utilisés, ainsi que des paramètres de traçage et des éléments de raccordement des rails utilisés.

1.4.5 AP 5 Différenciation des prestations de circulation et déduction de tendances

Dans l'AP 5, une différenciation des prestations de circulation des chemins de fer, différenciée selon le type de trafic, a lieu dans un premier temps (circulation de personnes et de marchandises). Un pronostic quant à la composition du matériel roulant et des formes de superstructures est ensuite émis avec pour horizon 2020+, sur la base des principales tendances dans le domaine du matériel roulant. Cette ossature sert de base à l'évaluation de la pertinence des différents thèmes.

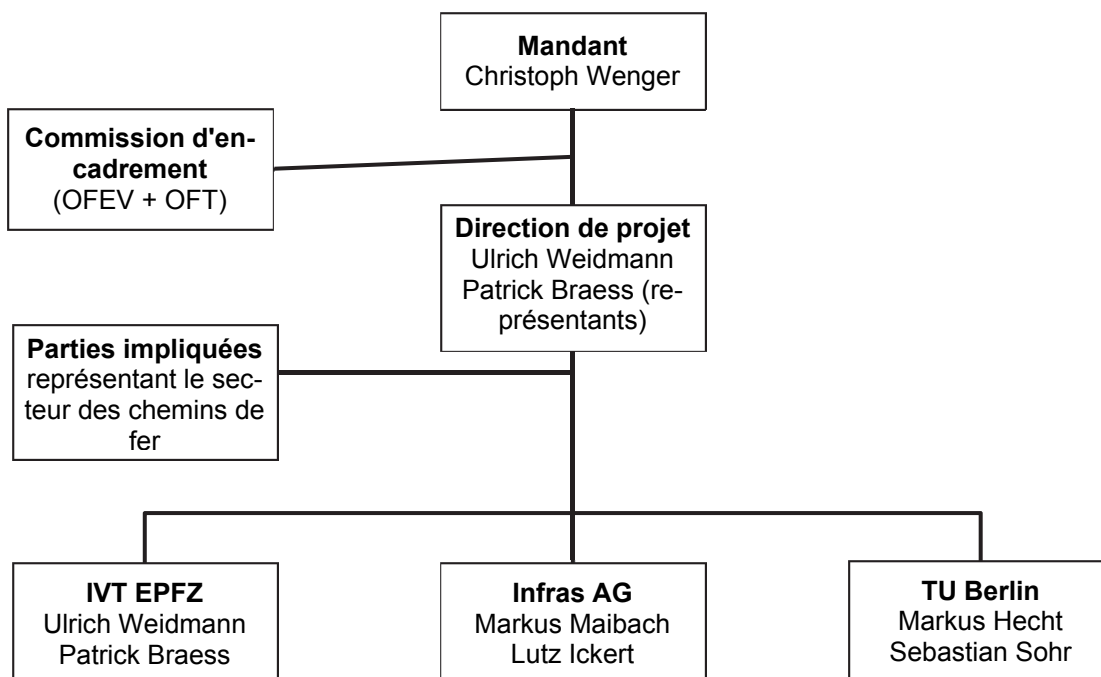
1.4.6 AP 6 Déduction d'un programme de recherche

À partir des résultats d'AP 2 à AP 5, les 5 à 7 domaines thématiques du secteur ferroviaire connaissant l'augmentation de bruit la plus significative, donc à l'origine de la plus grande nuisance sonore pour les personnes, sont déterminés. Les besoins en recherche future sont déduits dans ces domaines thématiques, sur la base de l'état actuel de la recherche nationale et internationale déterminé dans AP 1. Ces besoins de recherche seront mis en œuvre à travers des propositions de projets de recherche pour un horizon allant jusqu'à 2020. Le projet du programme de recherche sera discuté et ajusté avec une commission d'encadrement composée de représentants de l'Office fédéral de l'environnement et de l'Office fédéral des transports, dans le cadre d'un atelier d'une demi-journée.

1.4.7 AP 7 Rapport

Résumé des résultats dans un rapport final, y compris les fiches d'information pour les différents segments partiels de la demande de trafic.

1.5 Organisation du projet



2 État de la recherche en matière de bruit ferroviaire

2.1 Aperçu

Ce passage traitera de l'état actuel de la recherche en matière de bruit ferroviaire, divisé en infrastructure et matériel roulant. L'aperçu suivant montre les différents facteurs de bruit.



Image 1 : aperçu des sources de bruit, propre représentation

2.2 Infrastructure

Au niveau de l'infrastructure, les émissions sonores surviennent à trois endroits différents : sur les tronçons en pleine voie, aux nœuds de transports (gares et dépôts), ainsi que lors de l'entretien des installations. Sur les tronçons en pleine voie, il s'agit de distinguer le bruit influencé de manière déterminante par les composantes de superstructure existantes (chap. 2.2.1), et les « Hot Spots », c.-à-d. des environnements où des éléments spéciaux (ponts, aiguilles, jointures, etc.) créent le bruit (chap. 2.2.2).

2.2.1 Voie régulière

La voie se compose des éléments suivants : ballast, traverses, les couches intermédiaires et les rails. Toutes les composantes ont été soumises à des recherches intenses, le plus souvent toutefois en rapport avec la durabilité et les coûts de cycle de vie. Étant donné que la voie et son entretien représentent de toute façon une part considérable des dépenses de l'exploitation ferroviaire, les exploitants d'infrastructure n'acceptent souvent une optimisation par rapport au bruit que lorsque celle-ci n'engendre pas une hausse des frais. Ci-après, nous allons analyser plus précisément les différents éléments et discuter de l'état actuel de la recherche. Les éléments de superstructure sont traités en section, du bas vers le haut.

Couche sous ballast

Le trafic n'occasionne pas uniquement du bruit aérien, mais également du bruit se propageant dans les solides. Celui-ci peut se propager vers les bâtisses avoisinantes par le sol et y stimuler des pièces de construction et créer ainsi un bruit aérien secondaire (voir illustration 1 : création de bruit aérien secondaire, source : designhaus, Berlin). Illustration 1 : création de bruit aérien secondaire, source: designhaus, Berlin

Des couches sous ballast sont placées entre la plate-forme et le ballast. Les couches sous ballast ont pour but de réduire la transmission d'oscillation et de vibrations. Les études se contredisent actuellement quant à l'efficacité en termes de réduction du bruit aérien direct desdites couches. Ainsi, selon [DB Netze, 2012], aucun effet sur la résonance sonore directe n'a pu être prouvé, tandis que [Prose, 2015] laisse supposer que les couches sous ballast entraîneraient même une augmentation du niveau de pression acoustique. Une des raisons pourrait être le fait que couches sous ballast entraînent une augmentation de la rugosité des rails. Des recherches supplémentaires sont nécessaires ici.

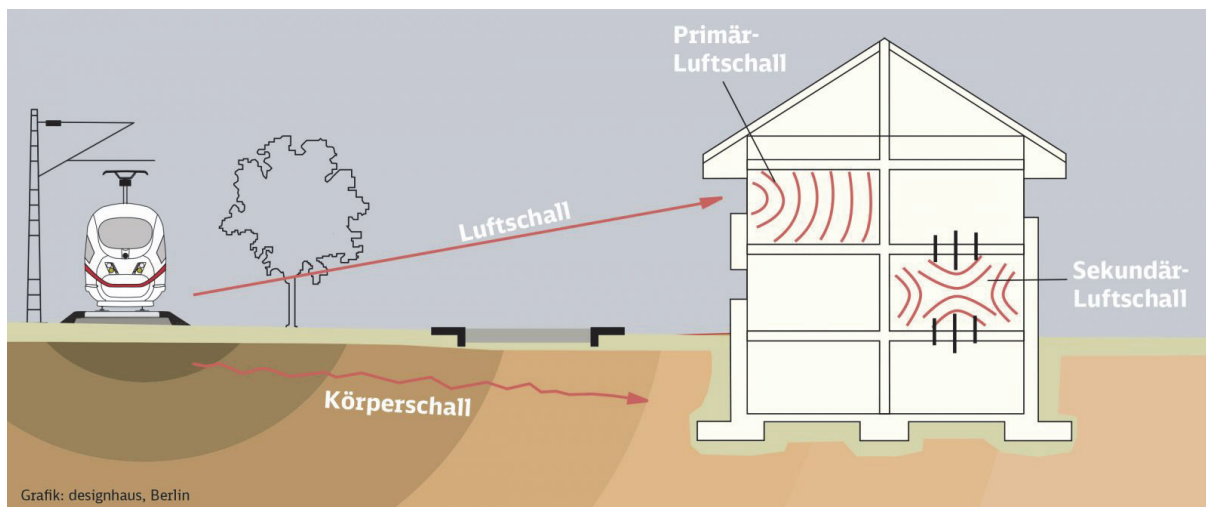


Illustration 1 : création de bruit aérien secondaire, source: designhaus, Berlin

Ballast

Le ballast se compose de roche différente selon les pays. La question de savoir si les différences entre les types de roche ont une influence sur le bruit n'a pas encore été examinée. Les exploitants d'infrastructure ne disposent toutefois pas d'un grand choix en la matière. Comme il s'agit d'un produit en vrac, ce sont surtout les frais de transport qui influencent le prix. Ainsi, c'est la longueur des trajets de transport et les propriétés techniques qui déterminent le choix du fournisseur.

Afin d'améliorer la stabilité de la position de la voie, il existe des procédés pour coller le ballast en fonction du rembourrage et l'orientation de la voie. Cela devrait en même temps augmenter l'absorption du son dans une certaine mesure et avoir ainsi un effet de réduction du bruit. Les procédés existants ne sont toutefois utilisés qu'à titre d'essai ou dans une mesure très limitée. Par ailleurs, la durabilité du bon positionnement de la voie serait plus déterminante dans la décision de coller le ballast. Les essais n'ont pas pu prouver des diminutions ou augmentations de niveau significatives [DB Netze, 2012]

Traverses

Différents types de traverses sont utilisés en Suisse : bois, acier, béton et, à titre d'essai, également du plastique (BLS). Des voies de roulement rigides sont également utilisées dans des tunnels ou sur des ponts. Chaque type de traverse a ses domaines d'application idéaux et présente des avantages et inconvénients différents. Les études existantes se contredisent quant à l'influence sur la formation du bruit : En fonction des mesures, les traverses en béton sont soit de quelque 2 dB(A) plus bruyantes [Fendrich, 2013] ou tout aussi bruyantes que d'autres

types de traverses. Les conditions marginales variables sont souvent problématiques lors des mesures.

En raison du long cycle de vie d'une voie, la durabilité a une influence considérable sur les frais de cycle de vie. Par durabilité, on entend d'une part la durée de vie maximale et, d'autre part, le maintien durable d'une bonne position de la voie, de sorte que les mesures d'entretien ne doivent être planifiées qu'à des grands intervalles. Les considérations économiques et les conditions marginales techniques sont ainsi déterminantes pour le choix du type de traverse. La hauteur de construction des traverses en béton demeure p. ex. plus élevée que celle de traverses en bois. Changer de type de traverse peut donc avoir des conséquences financières considérables. Ainsi, les traverses en béton ne pourront souvent être utilisées qu'une fois la semelle de tunnel abaissée, si cela est structurellement possible. La hauteur de construction est également déterminante dans la zone des gares, afin de garantir une entrée de plain-pied. Comme l'on est alors souvent en présence de passages piétons souterrains, un rabaissement de la voie n'est pas possible, de sorte que l'utilisation de traverses en béton sur des installations existantes nécessiterait un relèvement du quai entier.

Des traverses avec des patins réducteurs d'attrition sont de plus en plus souvent installées en Suisse. C'est déjà le standard de construction dans d'autres pays. Un des principaux avantages est la plus grande stabilité des voies. Le semelage des traverses est vu comme bénéfique en ce qui concerne les secousses, tandis qu'on présume qu'il a des conséquences négatives sur le bruit diffusé dans l'air en raison du découplage. Des recherches supplémentaires sont ici nécessaires.

Rails

Les rails font partie des produits les plus uniformes dans la construction de voies ferrées. La production des rails constituant un processus très cher et exigeant, il n'existe que très peu de laminoirs pour acier de rails en Europe et au monde. Le réseau CFF n'utilise que les profils 46E1 (CFF I), 54E1 (CFF IV) et 60E1 (CFF VI) ou 60E2 (CFF VI). Les changements de profils de rails des dernières années ont pour la plupart été engendrés par l'augmentation de la dureté, ce qui réduit l'usure.

Afin de déterminer l'influence sur la forme des rails et la création de bruit, les CFF ont testé des profils de rails asymétriques. L'idée était que le changement de forme réduirait l'excitabilité acoustique du rail. Aucune influence n'a toutefois pu être constatée lors de l'examen. Dans le 6e programme-cadre de recherche de l'UE [UE 2008] également, le profil de rail VA71b nouvellement développé par Voestalpine a été testé. Le profil de rail plus lourd (par rapport à

un 60E1) a donné lieu à des résultats équivoques : suivant la vitesse et le matériel roulant, l'on a pu constater des diminutions, mais aussi des augmentations du niveau.

Une approche qui fonctionne est l'utilisation d'absorbeurs de l'âme du rail et de protections de l'âme du rail. Le mode de fonctionnement de ces éléments fixés sur le rail est variable. Les absorbeurs de l'âme du rail servent à modifier la fréquence propre au rail par leur masse et à réduire ainsi la stimulation du rail. Les protections de l'âme du rail agissent comme des murs anti-bruit miniatures fixés directement à la source et qui empêchent ainsi de manière anticipée la propagation du son. L'efficacité de ces mesures dépend du matériel roulant et atteint une réduction maximale de 3 dB [DB Netze, 2012].

Dans le cadre du projet de recherche franco-allemand STARDAMP, un procédé de laboratoire de détermination du potentiel de réduction du bruit d'absorbeurs de rails a été développé [STARDAMP, 2015]. Le procédé se caractérise par le fait qu'il ne nécessite pas de tests coûteux sur le terrain pour déterminer l'efficacité d'absorbeurs de rails de manière objective et à un prix raisonnable en laboratoire.

Selon l'expérience des ÖBB, l'utilisation d'absorbeurs d'âmes de rail peut accélérer la formation d'ondulations de glissement, notamment dans les courbes. La possibilité de la corrosion par fissure et, en conséquence, la possibilité de la fracture du champignon de rail, n'ont pas encore été étudiées.

Les effets du meulage de rails seront plus amplement expliqués au chapitre 2.2.3 Entretien et construction.

2.2.2 Emplacements individuels locaux

L'examen d'emplacements locaux générant du bruit est d'une grande importance. Le bruit peut dépasser le seuil dit de réveil¹ à ces emplacements, de sorte que des mesures ciblant l'optimisation globale de la superstructure se révèlent insuffisantes à ces endroits.

Jointures de rails

¹ L'ouïe constitue l'organe d'alerte et de communication le plus important de l'homme. C'est pourquoi, à l'inverse de l'œil et ses paupières qui le protègent contre les stimuli lumineux, il ne peut se fermer aux impulsions sonores. C'est la raison pour laquelle les sons environnants sont constamment perçus, aussi bien à l'état de veille qu'à l'état de sommeil, et incitent le cerveau à les traiter. À l'état de sommeil, le bruit est perçu comme danger à partir du seuil dit de réveil et la conscience est mise en marche, ce qui entraîne le réveil.

Suivant le chemin de fer, les rails peuvent être laminés jusqu'à des longueurs de 120 m. Pur des raisons de transport et de déchargement, ces rails longs sont souvent coupés pour être transportés aux lieux de montage respectifs. Sur place, les rails sont généralement à nouveau soudés, le plus souvent à l'aide d'un procédé de soudage alumino-thermique, en raison de sa flexibilité. Sur des chantiers plus importants et industrialisés, c.-à-d. lorsqu'une plus grande précision et une qualité plus élevée sont demandées, tel que dans le trafic à grande vitesse, des machines portables de soudage par résistance par fusion de rails sont également utilisées.

Chaque jointure, soudée ou non, représente une interruption de la continuité du rail et donc de la marche du véhicule. Il s'agit de distinguer trois types de jointures de rail :

- en cas d'exécution correcte et bonne finition, les jointures soudées ne sont pas pertinentes en termes de bruit. Une jointure soudée constitue malgré tout toujours un point faible dans la voie. Le procédé de soudage entraîne des modifications structurelles dans l'acier, qui peuvent créer des défauts du rail et rendre une jointure à nouveau pertinente en termes de bruit.
- Les jointures d'isolation servent la signalisation de voie libre et font partie du dispositif de sécurisation. Les diamètres de perçage des éclisses isolées ne permettent aucun mouvement, celles-ci étant de surcroît collées.
- D'autre part, il existe des jointures de dilatation, qui n'empêchent pas la dilatation en longueur en cas de charge thermique et contribuent ainsi la détente des forces longitudinales du rail. Les joints de dilatation n'apparaissent que sur des arcs de voie normale de rayons réduits ($R < 300$ m). Le règlement prévoit que les voies métriques peuvent souder tous les rayons de courbure. Des travaux de recherche sont actuellement en cours à ce sujet [Bopp, 2014].

En ce qui concerne les jointures d'isolation, il existe deux approches. Les jointures d'isolation obliques sont censées aider le passage d'un rail à un autre, passant d'une charge ponctuelle à une charge en ligne. En pratique, il existe cependant des problèmes quant à la durabilité des jointures d'isolation obliques, des tensions trop fortes pouvant apparaître dans les extrémités pointues des rails coupés² dans un angle de 60 degrés. La renonciation complète à la signalisation de voie libre par circuits de voie constitue l'option la plus avantageuse et attendue à long terme. De cette manière, on pourra également renoncer à l'utilisation de jointures d'isolation.

² Seule le champignon de rail est coupé de manière oblique, l'âme et le pied continuent d'être coupés à angle droit, afin de transmettre les forces de pression longitudinales.

Aiguilles

Les aiguilles constituent forcément une interruption de la continuité de la voie. Il existe la possibilité d'une optimisation utilisant des cœurs mobiles et permettant ainsi un passage continu, à l'instar des lames d'aiguilles. En raison de leur prix élevé d'acquisition et d'entretien, les aiguilles à cœurs mobiles sont actuellement utilisées uniquement sur des tronçons à grande vitesse. Le surcoût est dû aux moteurs supplémentaires nécessaires au positionnement du cœur. La zone du cœur doit par ailleurs être équipé d'un chauffage d'aiguille, afin d'éviter des perturbations en hiver. Les avantages sont l'usure réduite du cœur, la marche plus calme du véhicule, ainsi que la réduction des émissions sonores. La recherche actuelle s'efforce actuellement surtout trouver une manière de rendre les cœurs rigides plus résistants. Pour ce faire, de nouveaux alliages allongeant la durée de vie des cœurs sont développées. Ceci a un effet positif sur la durée de vie, sans pour autant réduire le bruit et donne lieu à une recherche sur la géométrie du point de transition du cœur d'aiguille.

À certains endroits, les aiguilles de protection peuvent être remplacées par des dispositifs contre le déraillement, mais cela intéresse en premier lieu les exploitants d'infrastructure, car les coûts d'entretien des aiguilles sont élevés. Cela n'est pas possible partout, en raison du règlement. Pour les voies peu utilisées (p. ex. les voies de stationnement pour sous-stations mobiles), il existe la possibilité de modifier l'aiguille de sorte que le cœur soit remplacé par un rail continu. La voie ne peut alors pas être empruntée sans nouvelle modification dans la déviation.

Ponts

Les ouvrages d'art du trafic ferroviaire représentent une grande part des actifs. Leur durée de vie est le plus souvent estimée à 100 ans, de sorte que de nombreuses anciens ponts en acier à tracé ouvert sont en état et servent aujourd'hui encore. Un train qui passerait dessus pourrait exciter la structure, ce qui créerait bien plus de bruit encore. Étant donné que les ponts en acier diffèrent dans leur construction, il n'existe pas de solution globale. Chaque pont doit être examiné individuellement. Dans de nombreux cas, des absorbeurs sonores permettent de réduire les fréquences de vibration propre [DB Netze, 2012], comme c'est le cas pour les absorbeurs de l'âme du rail. Avec une capacité de charge et un gabarit ferroviaire suffisants, une voie de fer ballastée peut découpler la voie de la structure porteuse et réduire ainsi l'excitation en oscillation, les couches sous ballast permettant de renforcer encore cet effet positif. Chez les nouveaux ponts en acier, une voie de ballast continue et un découplage à la construction portante correspondent à l'état de la technique, des solutions spéciales (rail encastré) étant parfois utilisées.

Dispositifs de freinage stationnaires

Dans les gares de marchandises, les wagons sont poussés par-dessus une rampe de triage et accouplés en nouveaux trains sur différentes voies de destination en passant par plusieurs aiguilles. Afin de compenser les différences de poids et les propriétés de marche des différents wagons et placer correctement l'aiguille, les wagons de marchandises sont freinés par des freins de voie avec poutre de friction pour réduire le choc de tamponnement. Le processus de freinage peut causer des grincements aigus de haute fréquence qui portent très loin et peuvent représenter une nuisance sonore considérable pour les riverains.

Lors de l'installation de modificateurs de frottement, les roues de wagon de marchandise sont enduites d'un lubrifiant. Cela réduit considérablement la fréquence des grincements de rails. La technique est éprouvée et déjà utilisée par plusieurs gares de triage. L'utilisation de freins en céramique sur les poutres de freinage peut également réduire les grincements.

Courbes de faible rayon

Lors du passage de courbes de faible rayon, il se peut que le boudin de la roue extérieure avant du premier véhicule (le plus souvent une locomotive ou une motrice) touche le rail. Dans ce cas, la conicité des roues ne suffit pas à compenser la différence de longueur entre le rail intérieur et extérieur et des grincements ou craquements pouvant atteindre des niveaux de bruit élevés peuvent survenir. Cela dépend du véhicule et des bogies, qui seront approfondis au chapitre 2.2. Au niveau de l'infrastructure, des dispositifs de graissage des flancs de rail et des installations de conditionnement de champignons de rail peuvent considérablement réduire les émissions sonores. Il existe également des dispositifs qui humidifient les rails avec de l'eau. Peu importe qu'elles utilisent du lubrifiant ou de l'eau, ces installations restent fixes et ne peuvent diminuer les bruits que dans un périmètre réduit. L'effort d'entretien reste non négligeable, mais l'usure diminue dans ces zones (pour les dispositifs de graissage des flancs de rail).

2.2.3 Entretien et construction

De par leur importante utilisation de machines, l'entretien et la construction d'infrastructures ferroviaires entraîne des émissions sonores considérables, surtout la nuit, dans les interruptions du trafic et dans les intervalles d'entretien. L'étendue totale annuelle sur des tronçons

libres reste toutefois minime. Suivant la catégorie de lignes, un bourrage³ a lieu en moyenne tous les 5 ans. Le traitement préventif des rails n'est actuellement pas encore entièrement automatisé, puisque l'usure dépend de la charge du train, du type de matériel roulant et des paramètres de superstructure. Dans les zones de gares, des efforts d'entretien accrus dus à des réparations d'aiguilles et des coupures de voies constituent un potentiel de nuisance non négligeable. Tous les 25 à 30 ans, il faut prévoir des travaux de transformation plus importants, qui s'étendent sur une plus grande période et constituent ainsi une plus grande charge.

Traitement des rails (poncer, raboter, fraiser)

Le rail est le point de contact direct lors de l'interaction entre le matériel roulant et la superstructure. Il est exposé à d'importantes charges et tensions, ce qui entraîne aussi bien des usures que des défauts du rail. Le trafic croissant, les plus grandes forces de propulsion et l'augmentation des charges d'essieu sollicitent d'autant plus les rails, ce qui demande des mesures de maintien de plus en plus fréquentes. Différentes techniques de traitement se sont établies pour les différents dommages. Celles-ci peuvent être divisées parmi les catégories suivantes : poncer, raboter, fraiser.

Le fraisage et le rabotage permettent un plus grand enlèvement de matière de la surface du rail. Cela peut s'avérer nécessaire, p. ex. dans le cas de head-checkings, lorsqu'une propagation des fissures avancée est constatée. La méthode est relativement lente et peut donc uniquement être effectuée durant les interruptions du trafic. Bien que l'important enlèvement de matériel réduit considérablement la quantité résiduelle de profil à disposition de l'usure, c'est parfois la seule méthode pour pouvoir continuer à utiliser les rails, sans qu'ils doivent immédiatement être remplacés ou qu'il existe un risque de bris de rail.

Comme l'angle de ponçage des meules peut être réglé librement, le ponçage rotatif peut s'utiliser de manière très flexible. Les rails usés peuvent ainsi retrouver leur profil idéal et continuer d'être utilisés, ce qui a des effets positifs sur la LCC du rail. Le ponçage oscillant selon le principe de la brique de ponçage permet d'obtenir les meilleurs résultats en termes de qualité acoustique de la surface du rail et est donc utilisé pour le ponçage acoustique. Le procédé High-Speed-Grinding (HSG), plus récent, permet le meulage des rails à des vitesses pouvant aller jusqu'à 80 km/h. Cela permet d'utiliser les trains de ponçage des rails le plus souvent

³ Le trafic peut détériorer l'état de la voie au cours du temps, ce qui peut entraîner des pertes de confort et une plus grande usure. Un bourrage permet de remettre la voie dans l'état souhaité et de combler le ballast autour des traverses avec des des pics de bourrage.

dans les horaires normaux, évitant ainsi de devoir prévoir des interruptions ou des travaux de nuit. L'enlèvement de matière est toutefois réduit par rapport à d'autres procédés.

Les différents défauts de rail possibles ont différentes répercussions sur le bruit. Les head checkings n'ont p. ex. aucune influence sur les émissions sonores. À l'inverse, les ondulations sur la surface de roulement entraînent une forte excitation du rail par la roue en déplacement. Le ponçage régulier permet de réduire la formation d'ondulations. Tandis que le meulage entraîne une augmentation de la rugosité de surface et du bruit diffusé dans l'air dans un premier temps, le seuil d'émission descend en-dessous de la valeur initiale après un nombre correspondant de passage de trains. Des recherches sont actuellement en cours à l'EPF Zurich [IWF, 2015] en vue de réduire l'augmentation initiale du bruit après un ponçage.

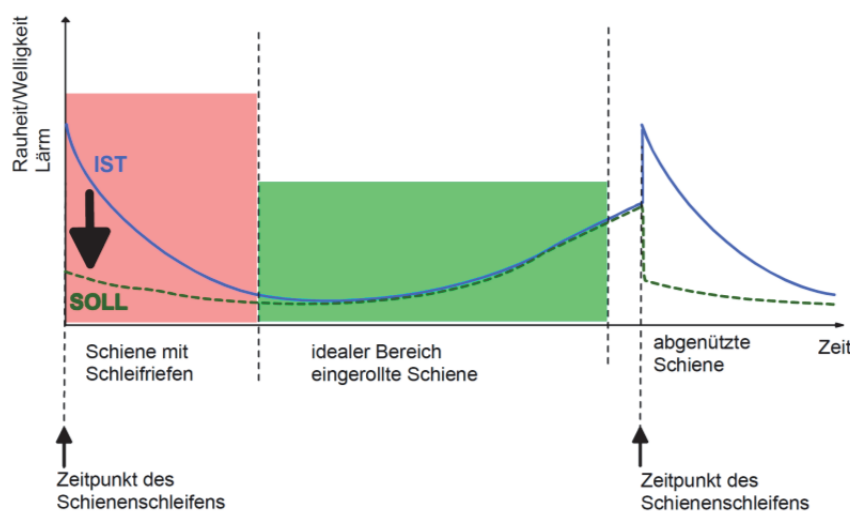


Image 2 : Évolution de la rugosité du rail [IWF,2015]

En observant l'efficacité par classe de véhicule, l'on constate que le ponçage acoustique des rails permet la plus importante réduction de bruit chez les voitures de chemin de fer à frein à disque. Au cours des années, le niveau de pression acoustique augmente de manière disproportionnée par rapport au transport de marchandises [Image 3]. Cela montre toutefois également que les répercussions du ponçage acoustique sur le bruit du transport acoustique sont marginales et ne contribuent donc pas à réduire le bruit sur les tronçons affectés au transport de marchandises. Seule une utilisation à grande échelle de systèmes de freinage à faible émission sonore sur des wagons de marchandises pourrait permettre au ponçage acoustique de déployer son efficacité maximale.

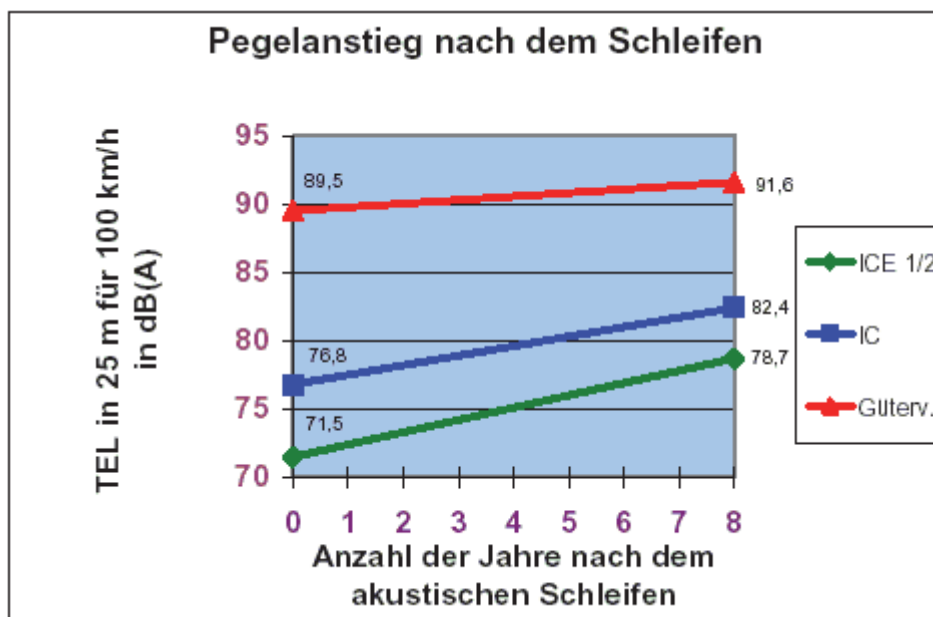


Image 3 : Évolution du niveau de pression sonore par catégorie de véhicule [EuKo 2003]

Unités de maintenance mobiles (MIE)

Les unités de maintenance mobiles sont des véhicules ferroviaires permettant d'effectuer des travaux sur la superstructure sous le véhicule. Le dispositif de sécurité est nettement réduit dans ce cas, car les ouvriers des chemins de fer ne peuvent pas se retrouver par mégarde sur des voies fréquentées avoisinantes. Les travaux peuvent être effectués à l'abri des précipitations et l'éclairage disponible assure une haute qualité du travail. Les murs latéraux des unités de maintenance mobiles peuvent être déployés sans toucher le gabarit ferroviaire voisin. Les travaux de maintenance sur les aiguilles et les coupures de voies peuvent ainsi être effectués dans un cadre protégé. Le confinement permet également de réduire les émissions sonores pour les riverains. Les unités de maintenance mobiles ont jusqu'ici été uniquement utilisées à titre d'essai sur le réseau suisse.

Outils à batterie

Avec la hausse de production de piles, leur prix a considérablement baissé au cours de ces dernières années. Par ailleurs, une densité énergétique plus élevée les rend nettement plus compactes, ce pourquoi, depuis quelques années, il existe également des versions électriques de nombreuses machines de construction de voie ferrée, tels que des agrégats de bourrage manuel, des visseuses et perceuses de rails. Non seulement, cela réduit les émissions sonores, mais améliore en même temps les conditions de travail des ouvriers des chemins de fer. Il faut partir du principe que la gamme d'offres s'élargira encore à l'avenir.

2.3 Matériel roulant

Ci-après, vous trouverez un aperçu des mesures prises au niveau des véhicules en vue de réduire les émissions sonores émanant de véhicules ferroviaires. Le chapitre est divisé en mesures sur le châssis en vue de réduire les bruits de roulement et de virage d'une part et les mesures prises sur les locomotives et matériels moteur ferroviaires en vue de réduire les bruits de propulsion et d'arrêt.

À des vitesses moyennes, le bruit de roulement constitue la composante sonore dominante. Des bruits dus aux virages s'y ajoutent dans des courbes de faible rayon. Dans ce cas, les crisements tonaux en courbe sont perçus comme particulièrement dérangeants. Dans le domaine de basses vitesses, c'est le bruit de propulsion qui domine. Plus le bruit de roulement est réduit grâce à des mesures prises sur le châssis, plus le bruit de propulsion apparaît comme fort. À des vitesses élevées, le bruit de passage du train est dominé par le bruit aérodynamique. Les autres types de bruit ferroviaire sont les bruits de freinage, de démarrage (patinage), de triage, de stationnement / et d'immobilisation.

2.3.1 Mesures sur le châssis

Le bruit de roulement est particulièrement problématique dans le cas des trains de marchandise, car ceux-ci sont bien plus bruyants que les trains de voyageurs. C'est pour cette raison que l'accent de ce chapitre est mis sur les mesures de réduction du bruit de roulement des wagons de marchandise. Les particularités des trains de voyageurs seront approfondies à la fin de ce chapitre. Les mesures de réduction présentées sont par principe valables pour tous les types de véhicules ferroviaires.

Le bruit de roulement est le produit de forces alternatives qui agissent lors du roulement de la roue sur le rail et qui entraînent une oscillation du véhicule ferroviaire et de l'infrastructure. Le bruit de roulement se compose essentiellement de la résonance sonore de la roue, du rail et de la traverse. Dans ce contexte, il devient évident que les mesures prises au niveau du véhicule réduisent uniquement la composante du bruit de roulement diffusée par la roue, dans la mesure où ladite mesure n'agit pas sur le processus de génération d'oscillations. Au cas où la composante provenant de l'infrastructure domine le bruit de roulement, les mesures prises sur le véhicule sont moins efficaces et inversement. Cela met également en évidence la difficulté de fournir une indication claire quant au potentiel de réduction d'une mesure, puisqu'elle ne vaut que dans les conditions marginales de la mesure ou du calcul et peut donc varier selon les études. La résonance de la roue domine le bruit de roulement environ à partir de 1 kHz. L'ouïe est particulièrement sensible dans cette zone.

Il existe différentes approches pour réduire le bruit de roulement et nous allons les présenter ci-après. Il est d'une part possible de réduire la production d'oscillations. Le bruit de roulement est essentiellement animé par la rugosité combinée de la roue et du rail. La rugosité progressive de la surface de roulement des roues est influencée par le système de freinage. Les défauts de forme de roue, telles que les méplats, constituent un autre mécanisme de génération sonore du côté du véhicule. Une forme de construction de roue optimisée contre le bruit englobe différentes possibilités d'optimisation acoustique de la roue. Celles-ci influencent l'excitabilité de la roue, les formes d'oscillation et la résonance sonore. Elles comprennent la géométrie, le diamètre et les matériaux des roues. Une autre possibilité de réduction est de diminuer l'amplitude d'oscillation des roues en augmentant l'amortissement de la roue à l'aide d'amortisseurs de roues. L'augmentation de l'amortissement est également possible en appliquant une couche réduisant la propagation sonore. En dernier lieu, il est possible d'empêcher la propagation du bruit émis. Cela peut se faire à l'aide de jupes de roues ou de bogies. La transmission du bruit massique dans la structure est réduite en découplant le bogie de la structure. Un bogie optimisé de wagon de marchandises, qui combinerait plusieurs de ces mesures, permettrait une réduction considérable du bruit de roulement.

Système de freinage

Le système de freinage influence la rugosité de la surface de roulement des roues et donc l'excitation d'oscillation. Les semelles en fonte rendent la surface de roulement plus rugueuse que des semelles K et LL ou des freins à disque. Sur des rails lisses, le remplacement de semelles en fonte par des semelles K et LL entraîne une réduction du bruit de roulement d'environ 10 dB [BMVBS (2013)]. Le remplacement des semelles en fonte accélère toutefois l'usure des roues. Dans le projet EuropeTrain, une augmentation maximale de 260 % de l'usure des roues due à l'utilisation de semelles LL a été constatée [UIC B 126/RP 43 (2013)].

Sur des rails lisses, le remplacement de semelles en fonte par des freins à disque entraîne également une réduction du bruit de roulement d'environ 10 dB [Lutzenberger, S und Gutmann, C (2013)]. Étant donné que les freins à disque n'agissent pas sur la surface de roulement des roues, ils n'entraînent pas d'augmentation de l'usure. Une diminution supplémentaire du bruit de roulement peut être obtenue par l'utilisation de freins à disque grâce à une forme de roue optimisée (voir sous-chapitre **Roue optimisée contre le bruit**, page 19). Un autre avantage des freins à disque par rapport aux freins à sabot est l'absence de timonerie de freinage cliquettante. Les freins à disque existent sous forme de freins à disque de roue ou de disque de frein d'essieu. Un des avantages de freins à disque de roue est qu'ils peuvent, lorsqu'ils sont suffisamment influencés par les amortisseurs de points d'assemblage, amortir encore la roue et contribuer ainsi à une diminution supplémentaire du bruit de roulement [Wiemers, M (2004)].

Pour des raisons de gabarit ferroviaire, un diamètre de disque de frein plus grand peut par ailleurs être choisi pour les freins à disque de roue par rapport aux disques de frein d'essieu.

À petite vitesse, le cliquetis de la timonerie de freinage des freins à sabot présente une source de bruit supplémentaire. À grande vitesse, celui-ci est couvert par le bruit de roulement amplifié. L'absence de cliquetis permet un potentiel de réduction sonore pouvant aller jusqu'à 2 dB à petite vitesse.

Le cliquetis peut être empêché par l'utilisation d'unités de freins à sabot sans timonerie de freinage. La CFCB de Knorr-Bremse ou la BFCB de Faiveley Transport sont des exemples de tels systèmes.

Une autre possibilité de réduire le cliquetis est l'utilisation de douilles en plastique dans la timonerie de freinage. Celles-ci offrent un plus grand amortissement et sont plus légères que les douilles en métal [Faigle (2014)].

Prévention de méplats et entretien des roues

Les défauts de surface de roulement incitent l'oscillation du véhicule et de l'infrastructure. Un méplat significatif d'un point de vue acoustique crée, pendant le trajet, un bruit de battement dépendant de la vitesse. Dans le cas de roues rugueuses, cette composante sonore est largement couverte par le fort bruit de roulement. Le bruit causé par des méplats peut devenir audible au contact de roues lisses avec des rails lisses. Les méplats peuvent être causés par le blocage des roues en cas de freinage trop brusque, ainsi que par un freinage par frein de voie dans des gares de triage. Jusqu'ici, les méplats ont été éliminés pour des raisons de sécurité et non pas pour des motifs acoustiques. Des recherches sont encore nécessaires quant à l'effet acoustique des méplats, p. ex. quant à la relation entre la longueur des méplats et l'émission sonore.

L'apparition de méplats peut être réduite par l'utilisation d'un dispositif antidérapant (usuel dans le transport de personnes, mais pas pour les wagons de marchandises). Dans le service de manœuvre, l'apparition de méplats peut être diminuée par le graissage des sabots ou par des sabots à deux faces.

Les méplats existants et significatifs d'un point de vue acoustique peuvent être supprimés par tournage des roues. Afin de pouvoir prendre cette mesure le plus tôt possible après l'apparition du méplat, un système de surveillance est nécessaire pour reconnaître les méplats significatifs d'un point de vue acoustique.

Roue optimisée contre le bruit

Une roue optimisée contre le bruit permet d'intervenir à plusieurs endroits sur le processus de création sonore. L'excitabilité de la roue peut être diminuée, par exemple en déplaçant les modes de roue vers une zone de fréquence moins significative d'un point de vue acoustique. Une densification de l'âme réduit également l'excitabilité de la roue par l'augmentation de la raideur [Wiemers, M (2004)]. Il est également possible de réduire la résonance sonore, par exemple par des disques de roue perforés ou des roues à rayons.

Chez les roues freinées par des sabots, comme elles sont usuelles sur les wagons de marchandises, la jante de la roue est soumise à une charge thermique élevée lors du freinage. Afin de pouvoir résister à cette charge durablement et sans élargissement des moyeux et empêcher le gauchissement de la roue, les roues ont une forme de cloche. Cette forme n'est toutefois pas idéale en termes de résonance sonore. Une section symétrique de la roue (âme droite) permet de découpler les modes radiaux, qui peuvent être légèrement excités par les forces émanant du contact roue/rail, des modes axiaux présentant une meilleure résonance sonore. L'utilisation de freins à disque permet d'optimiser la géométrie de la roue dans ce sens.

Une manière possible de réduire la résonance sonore de la roue est la réduction de la surface résonante en utilisant des roues plus petites. Cet effet est quelque peu diminué par le filtre de contact défavorable en raison de la surface de contact réduite [Lutzenberger, S et Gutmann, C (2013)]. En raison de la fiche UIC 510, il a été jusqu'ici impossible d'utiliser des roues plus petites en présence de charges élevées sur les essieux. La TSI Wagon (2013) actuellement en vigueur permet toutefois un plus petit diamètre de roue. L'usure accrue due à la vitesse de rotation plus élevée, ainsi que la plus forte propension à la formation d'ondulations sur la surface de roulement peuvent également se révéler comme problématiques. Afin d'éviter une augmentation du bruit de roulement au cours du temps en raison de la plus forte polygonation, un contrôle acoustique des roues et éventuellement un reprofilage plus fréquent peuvent être nécessaires.

Les roues plus petites de wagons de marchandises sont par exemple utilisées sur la « chaussé roulante » (CR). Il s'agit de véhicules de transport de camions avec un diamètre de roues de 360 mm. Les stations de surveillance suisses montrent un vaste éventail des niveaux de passage des véhicules CR, entre 76 et 96 dB(A); il existe donc aussi bien des véhicules relativement silencieux que très bruyants [Attinger, R (2013)].

Amortisseurs de roues

L'acier ne présente qu'un amortissement très faible. C'est pourquoi différents fabricants (p. ex. Schrey & Veit, GHH-Radsatz GmbH, Bochumer Verein (BVV), Luchini RS) ont développé différents systèmes d'amortissement des oscillations de roues. Le terme d'amortisseurs de

roues comprend ici les amortisseurs de bruits de roues, les bagues d'amortissement, les amortisseurs d'enjoliveurs et amortissement à l'aide de constrained layer (= couche contrainte). Les amortisseurs de roues soustraient de l'énergie au système par dissipation et/ou friction. Suivant leur construction, les amortisseurs de roues amortissent les oscillations des roues en direction radiale et/ou axiale. Suivant le système, il existe différentes méthodes d'attache, les amortisseurs de roues pouvant par exemple être coincés dans la jante ou vissés sur l'âme de la roue. Les amortisseurs de roues, dont le mécanisme d'amortissement est basé sur des polymères, ne peuvent pas être efficacement utilisés sur des roues équipées de freins à sabot. La charge thermique élevée lors du freinage endommage les polymères. Il existe des systèmes sans polymères, par exemple le système Hypno®damping de Luchini RS, qui se prêtent également à l'utilisation sur des wagons de marchandises équipés de freins à sabot [Lucchini RS (2015)].

Le potentiel des amortisseurs de roues afin de réduire le bruit de roulement dépend de l'état de la roue et de la superstructure. L'utilisation d'amortisseurs de roues fait surtout sens lorsque le bruit de roulement est dominé par la résonance des roues. Le potentiel moyen de réduction du bruit de roulement par des amortisseurs de roues est estimé à environ 2,5 dB(A). Les amortisseurs de roues peuvent par ailleurs réduire les crissements de courbes. Une réduction de 10 à 15 dB(A) peut être atteinte ici. Les crissements de freins de voies avec poutre de friction dans les gares de marchandises sont également réduits par des amortisseurs de roues. Les d'amortisseurs de roues ne sont utilisés que rarement dans le transport de marchandises, un exemple étant les wagons du train de mine RWE.

Revêtement / par peinture d'amortissement

Une autre manière d'augmenter l'amortissement de la roue et/ou du bogie est d'appliquer un revêtement d'amortissement. Un exemple de revêtement réduisant les émissions sonores appliqué sur les roues des wagons de marchandises est le revêtement anti-usure « RELEST® Protect Wheel » de la BASF Coatings GmbH. Selon la BASF, la réduction sonore s'élève à 2,4 dB. Un autre exemple est le revêtement viscoélastique « Syope » de Lucchini RS [Lucchini RS (2015)].

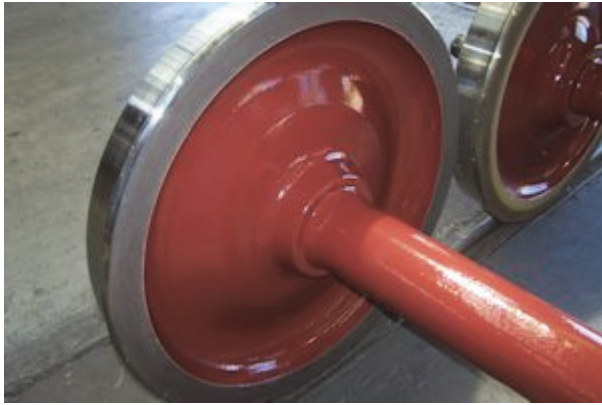


Image 4 : exemple de revêtement des roues source: BASF-Coatings

Le projet Low-Noise-Train des CFF et ÖBB a notamment examiné l'effet d'un revêtement anti-bruit sur un bogie de wagon de marchandises. Sur le train d'essai, le revêtement de bogie a seulement permis d'atteindre une réduction minimale et non significative du bruit de roulement [Barth, M et Presle, G (2009)]. Il reste à examiner si une réduction plus importante du bruit de roulement peut être atteinte par l'application d'un autre revêtement de bogie.

L'application d'un revêtement d'amortissement constitue une mesure simple de réduction du bruit de roulement. Sur les véhicules existants, elle peut par exemple être effectuée à l'occasion d'une révision totale. Le revêtement doit nécessairement être éliminé pour le contrôle des fissures qui doit être effectuée tous les 4 à 6 ans selon les directives EVIC. L'élimination peut se faire par sablage, après quoi un nouveau revêtement doit être appliqué. Afin d'éviter l'élimination coûteuse du revêtement lors du contrôle des fissures de l'essieu-axe, des essieux-axes creux pourraient être utilisés pour un contrôle des fissures à l'ultrason, comme dans le trafic à haute vitesse.

Jupes anti-bruit sur les roues / le bogie

Les jupes de roue et bogie protègent la roue ou le bogie et diminuent le bruit aérien. Il faut veiller à ce que les jupes n'agissent pas elles-mêmes comme sources de bruit lorsqu'elles sont incitées à osciller et résonnent. Cet effet peut être évité par une fixation élastique des jupes et du matériel anti-bruit. Les jupes anti-bruit sans revêtement absorbant reflètent le son et le redirigent vers le lit de ballast absorbant. Un revêtement absorbant, qui soustrait encore de l'énergie au champ sonore, est recommandé. Afin d'atteindre un effet de protection satisfaisant, il faut veiller à maintenir un entrefer aussi petit que possible entre la jupe et le champignon des rails. Voilà pourquoi une combinaison de jupes anti-bruit et d'un mur anti-bruit bas (nSSW) s'avère très efficace.

Bien que les jupes anti-bruit sur les roues ou le bogie sont examinées dans le cadre de plusieurs projets de recherche, il n'existe pas encore de jupes anti-bruit autorisées. Des points critiques lors de l'autorisation sont la détection de boîtes chaudes, la sécurité anti-incendie et le respect du gabarit ferroviaire. L'adaptation à l'hiver doit également être donnée. Les jupes anti-bruit compliquent par ailleurs l'essai de frein. La détection, lors de l'utilisation de jupes anti-bruit, de propriétés pertinentes sous l'angle de la sécurité pourrait être rendue possible par un système de diagnostic moderne, tel que par exemple Cargo CBM.

L'effet de réduction d'une jupe anti-bruit sur les roues ou le bogie sans revêtement absorbant s'élève à environ 1 à 2 dB [Barth, M et Presle, G (2009); Lutzenberger, S et Gutmann, C (2013); Hemsworth, B et Jones R R K (2000)]. Un revêtement absorbant des jupes anti-bruit entraînerait théoriquement un effet de réduction supplémentaire. La combinaison de jupes anti-bruit et d'un mur anti-bruit bas a permis, selon la vitesse de marche, d'atteindre une réduction du niveau maximal pouvant aller jusqu'à 8 dB(A) à une distance de 25 m [Jones, C J C et Hardy, A E J et Jones R R K et al. (1996)]. Cette source indique que l'effet de la jupe seule s'élève à 5 dB(A). La réduction théoriquement possible d'une construction optimisée de jupe anti-bruit et mur anti-bruit bas avec des surfaces insonorisées a été calculée à environ 10 à 18 dB(A) [Johannsen, K (2005)].

Bogie de wagon de marchandises optimisé

Le bogie Y25 actuellement utilisée de manière standard dans le transport de marchandises n'a connu qu'un développement minime pendant des décennies. Pour les nouveaux wagons, il est recommandé d'utiliser un bogie de wagon de marchandises optimisé et correspondant à l'état actuel de la technique. Un bogie optimisé permettrait de réduire considérablement le bruit. Il permettrait par ailleurs de contribuer à atteindre une plus grande efficacité énergétique et réduction de l'usure par un meilleur comportement de roulement.

Une approche possible d'optimisation est la suspension primaire du bogie. Le bogie Y25 dispose d'un amortissement qui dépend de la charge. Le bogie LEILA dispose d'un amortisseur hydraulique et d'une suspension en caoutchouc. Contitech a développé la Gigabox, une suspension visco-élastique. La Gigabox se compose de ressorts en caoutchouc avec un amortissement hydraulique et d'une unité de roulements à rouleaux coniques. Elle permet une meilleure inscription radiale des roues dans les courbes, ce qui réduit encore les crissements de courbe. En collaboration avec Tatravagonka, le bogie ASB (Advanced Suspension Bogie) a été développé où la Gigabox a été utilisée. Avec ce bogie, le bruit de passage est réduit de 2 dB(A) [Kure, G; Skiller, J; et al. (2007)]. La Gigabox n'est toutefois pas autorisée. Une meilleure inscription radiale des roues dans les courbes peut également être atteinte en utili-

sant des ancrages croisés, tels qu'on les trouve sur le bogie LEILA et le TVP 2007 de Tatra-vagonka Poprad. D'autres bogies de wagons optimisés sont le DRRS25L du constructeur de wagons Niesky, le LN25 de Axiom Rail, le Y27LPG de Transtec Vetschau et le RC25NT de ELH.



Image 5 : palier et guidage d'essieu alternatifs : Gigabox ; source : ContiTech

Particularités du transport de voyageurs

Le bruit de roulement occasionné par des trains de voyageurs représente un problème moins important par rapport aux wagons de marchandises considérablement plus bruyants. Les riverains de tronçons ferroviaires avec des courbes à faible rayon se plaignent souvent du crissement en virage émanant du transport de voyageurs. Les crissements en virage sont perçus comme particulièrement dérangeants en raison de leur caractère tonal et leur volume sonore élevé. Les crissements en virage apparaissent surtout dans des courbes de voies d'un rayon $R < 500$ m et chez les chemins de fer à $R < 200$ m [Krüger, F (2013)].

Le crissement en virage est causé par un glissement par à-coups (collé/glissé) périodique de la surface de roulement sur le rail, lors du passage dans des courbes à faible rayon. Il émane surtout de la roue avant à l'intérieur de la courbe. La roue à l'extérieur de la courbe est guidée par le boudin, ce qui évite le glissement par à-coups. Le glissement par à-coups entraîne des oscillations de flexion axiales propres de la roue et du rail. Les fréquences rayonnées se situent en général entre 1,2 et 4 kHz [Krüger, F (2013)].

Les mesures de réduction du crissement en virage peuvent soit éliminer la cause (mesures primaires) ou réduire le bruit de crissement (mesures secondaires). Les mesures primaires sont préférables aux secondaires. Des jeux de roues à rayon réglable peuvent être utilisés sur

le matériel roulant comme mesure primaire contre le crissement en virage. Le réglage du jeu de roues dans la courbe permet d'éviter des angles d'approche trop importants entre la roue et le rail et empêche donc le glissement par à-coups. Les amortisseurs de roues constituent une mesure secondaire. Ceux-ci doivent être adaptés aux oscillations de flexion axiales propres de la roue. L'usure de la roue modifie la fréquence propre de la roue au cours du temps, de sorte que les amortisseurs de roue doivent par ailleurs être à bande suffisamment large.

2.3.2 Mesures sur les locomotives et véhicules de propulsion

À des vitesses moyennes, le bruit de roulement constitue également la composante sonore dominante chez les locomotives et véhicules de propulsion. Il existe toutefois une série d'autres sources sonores, qui dominent surtout à l'arrêt et à petite vitesse. Ces sources sonores comprennent la transmission, le moteur, le convertisseur, le générateur, les agrégats d'aération, le compresseur et la climatisation. Les wagons non propulsés peuvent également présenter des agrégats sonores tels que des dispositifs de climatisation ou de refroidissement. L'émission sonore des sources susmentionnées dépend souvent de la vitesse de marche. Elle comprend souvent des composantes tonales (p. ex. ventilateur, transmission) perçues comme particulièrement dérangeantes. Les bruits à composantes impulsives, tel que l'échappement du condensat lors de la génération d'air comprimé, sont également perçus comme particulièrement dérangeants.

Il existe différentes manières d'approcher la réduction du bruit des agrégats. Les boîtiers des agrégats devraient être conçus de manière à réduire au maximum la diffusion sonore. La diffusion sonore des surfaces oscillantes peut par exemple être réduite par l'utilisation de plaques perforées. La disposition élastique des agrégats permet de réduire la transmission de bruit massique. Ce faisant, il s'agit de veiller à éviter de créer des ponts acoustiques, tels que des tuyaux oscillants, par découplage. D'autres possibilités de réduction sonore sont l'utilisation de matériaux absorbants, le montage de silencieux et l'isolation des agrégats. L'ajout de matériaux absorbants soustrait de l'énergie au champ sonore (insonorisation). L'utilisation de matériaux absorbants est conseillée surtout à des endroits avec des niveaux de pression acoustique élevés, comme par exemple le compartiment moteur. Sur les chemins de fer, les matériaux absorbants ne doivent pas se salir et doivent répondre aux exigences de protection contre les incendies. L'isolation des agrégats empêche la propagation du bruit diffusé dans l'air (isolation acoustique). Il est recommandé de combiner l'isolation acoustique avec l'insonorisation. Aussi bien l'isolation que l'insonorisation du bruit diffusé dans l'air sont les plus efficaces dans les hautes fréquences. Pour réduire les basses fréquences, un plus grand compartiment, qui est rarement disponible, est généralement nécessaire. Un moyen d'insonoriser les basses fréquences dans un petit compartiment est d'utiliser des silencieux en spirale (guide

d'air dans une spirale en tôle), tel qu'utilisé lors de la transformation de la locomotive diesel Blue Tiger de la Havelländische Eisenbahn [Hecht, M et Czolbe, C (2008)]. Une autre approche repose sur la génération d'un champ sonore opposé par une source sonore secondaire (anti-bruit, Active Noise Cancellation). En pratique, l'anti-bruit peut surtout être utilisé pour réduire les basses fréquences (grandes longueurs d'ondes, comparées aux mesures des sources sonores) et en présence de volumes réduits et de champs sonores facilement reproductibles, comme p. ex. dans des canaux ou des tuyaux [Möser, M (2012)]. En ce qui concerne les hautes fréquences, seule la stabilisation de petites zones spatiales est possible, comme par exemple des protecteurs anti-bruit actifs. Dans les canaux, seules les ondes planes peuvent se propager à des basses fréquences. Ces ondes peuvent être facilement réduites par de l'anti-bruit, comme il est utilisé par les silencieux actifs. Il est particulièrement efficace d'intervenir dans le processus de création du bruit et d'optimiser les sources sonores de manière constructive sous l'angle de l'acoustique. Cela n'implique pas forcément une nette réduction du niveau de pression acoustique moyen de toutes les fréquences. La réduction du caractère tonal et / ou impulsif d'un bruit permet de réduire efficacement son aspect dérangeant. Il existe par exemple des ventilateurs, transmissions et compresseurs optimisés contre le bruit, qui peuvent être utilisés dans le trafic ferroviaire. Les véhicules stationnés ne nécessitent pas la pleine puissance de tous les agrégats. Cela offre la possibilité de réduction sonore à l'aide d'une exploitation des agrégats optimisée contre le bruit, qui baisserait simultanément la consommation d'énergie. Il est par exemple possible d'utiliser les ventilateurs à vitesse réduite, de n'enclencher la climatisation que lorsque la température passe au-dessus / en-dessous d'un certain seuil et de minimiser la pression du compresseur [Isert, N et Lutzenberger, S (2014)].

Afin de réduire le bruit de démarrage, de stationnement / d'arrêt il est primordial d'identifier la/les source(s) sonore(s) dominante(s). La source de bruit dominante varie selon la construction du véhicule et son état de marche (démarrage, maintien forcé, passage en courbe, freinage, arrêt), c'est pourquoi il n'existe pas de recette simple de réduction de l'émission sonore totale. Une gestion acoustique accompagnant la construction peut aider dans l'optimisation acoustique de locomotives et véhicules de propulsion. L'utilisation conséquente d'une gestion acoustique durant la production pourrait permettre une réduction considérable au prix le plus bas. La mise en place de mesures de réduction sonore est toujours plus coûteuse une fois que le véhicule est déjà construit.

Ci-après, vous trouverez un choix de moyens de réduction des émissions sonores émanant des sources de locomotives et véhicules de propulsion. Une attention particulière est donnée aux moyens qui ne sont pas encore utilisés de manière standardisée.

Agrégats de ventilation et de refroidissement

Les véhicules de propulsion nécessitent un refroidissement intensif. Les véhicules électriques ont un débit d'air de refroidissement d'environ $3 \text{ m}^3/(\text{sMW})$ et les véhicules diesel d'environ $30 \text{ m}^3/(\text{sMW})$. Les agrégats d'aération et de refroidissement sont utilisés entre autres pour des moteurs, des générateurs, des transformateurs, des moteurs auxiliaires et des batteries. Les composantes bruyantes notables sont le ventilateur (bruit du flux d'air et de la rotation des pales) ainsi que l'aspiration et l'échappement de l'air.

Un ventilateur axial optimisé contre le bruit a été développé dans le cadre du projet EcoQuest [Voith (2012)]. La réduction du diamètre de turbine et l'optimisation des profils de pales et de la géométrie ont permis d'atteindre une diminution de 6 dB(A) du niveau sonore total spécifique et de 10 dB(A) du niveau de la fréquence de passage des pales. L'optimisation du système de refroidissement (p. ex. le réglage du ventilateur) a permis d'atteindre une diminution du niveau sonore de 3 dB(A). Le système de refroidissement optimisé ainsi que des silencieux passifs supplémentaires sur la grille de calandre ont été montés sur le prototype de locomotive Gravita 15L BB. Les mesures passives ont permis d'atteindre une réduction de 3 dB(A) dans les essais en marche et à l'arrêt. Une diminution supplémentaire de 3 dB(A) a pu être obtenue grâce au ventilateur optimisé. Le système de refroidissement développé permet non seulement de réduire le bruit, mais également d'économiser de l'énergie.

L'équipe de recherche Leiser Verkehr (trafic silencieux) a également étudié les moyens de réduction des bruits de ventilation des véhicules ferroviaires à propulsion [Michel, U; et al. (2004)]. L'utilisation de ventilateurs silencieux, d'un revêtement insonorisant et de silencieux de coulisses pour l'aspiration et l'échappement d'air a permis de réduire de 9 dB(A) le niveau sonore du système de refroidissement d'une rame et de 15 dB(A) le niveau sonore d'une tour de refroidissement d'une locomotive électrique.

L'émission sonore d'agrégats de ventilation et de refroidissement déjà existants peut être minimisée par insonorisation. Un exemple de réduction efficace de bruits de ventilation sur des locomotives diesel sont les locomotives BlueTiger de la Havelländische Eisenbahn [Hecht, M et Czolbe, C (2008)]. L'utilisation de jalousies absorbantes sur l'entrée et la sortie d'air de refroidissement a permis d'atteindre une isolation d'insertion de 8-14 dB(A) dans les hautes fréquences. Un exemple de locomotive électrique optimisée contre le bruit est la famille Lok2000 des CFF [Hecht, M et Zogg, H (1995)]. L'utilisation de silencieux d'absorption a permis de réduire le bruit de ventilation de 10 dB au point normal à l'arrêt.

Transmission

Les mouvements alternatifs survenant lors de l'engrènement entraînent un bruit massif de la roue dentée, bruit qui est ensuite transmis au boîtier de transmission par les arbres et les paliers. Les bruits de transmission contiennent une composante tonale à la fréquence d'engrènement. Ils peuvent dominer le bruit de passage à faible vitesse.

Les transmissions peuvent être construites de manière optimisée contre le bruit. Une réduction du module (= taille des dents) et un agrandissement de l'angle d'inclinaison peuvent avoir un effet de réduction sonore. Le potentiel de réduction est estimé à jusqu'à 5 dB(A). Il faudrait veiller à utiliser des transmissions optimisées contre le bruit sur les nouvelles constructions.

Compresseur / génération d'air comprimé

Les bruits de compresseur sont surtout notables à l'arrêt. Des compresseurs à piston sont généralement utilisés pour la génération d'air comprimé. L'air comprimé est généré par des coups de piston, ce qui produit des bruits percutants. Une autre source de bruit est l'échappement fortement impulsif du condensat du séchage de l'air.

Les bruits du compresseur peuvent être réduits par l'utilisation de compresseurs optimisés. Les compresseurs à vis génèrent de l'air comprimé en continu, ce qui évite l'apparition de bruits percutants. En comparaison avec un compresseur à piston, un compresseur à vis peut présenter une réduction du niveau sonore singulier dépendant de la fréquence allant jusqu'à 10 dB(A). Il en résulte une réduction estimée à environ 5 dB(A) sur toute la bande de fréquences.

Knorr-Bremse a développé un compresseur à piston sans huile optimisé en termes d'acoustique et d'oscillations. Il transmet jusqu'à 65 % moins d'oscillations vers la caisse de véhicule et est nettement moins bruyant que des compresseurs conventionnels [Knorr-Bremse (sans date)].

Les bruits lors de l'échappement du condensat peuvent être réduits par l'utilisation de silencieux.

Interrupteurs principaux à air comprimé

Le fait d'actionner un interrupteur principal à air comprimé crée une étincelle qui est éteinte par air comprimé. Ce processus est très bruyant. Le bruit de commutation peut être réduit par isolation des interrupteurs principaux à air comprimé. Une alternative est de remplacer les in-

terrupteurs principaux à air comprimé par des interrupteurs principaux à vide, dont l'actionnement ne génère pas d'étincelle. Des interrupteurs principaux à vide sont déjà utilisés sur des nouveaux véhicules pour des raisons de coûts.

Collecteurs de courant

L'écoulement de collecteurs de courant entraîne des bruits aérodynamiques qui deviennent notables à des vitesses élevées. Étant donné que la source de bruit se situe sur le toit du véhicule, les murs anti-bruit de hauteur moyenne sont inefficaces. En Europe, le niveau de pression sonore maximal généré par des collecteurs de courant s'élève à 85 dB(A) à 25 m de distance à une vitesse de 300 km/h [Marshall, T et Fenech, B A et Greer, R (2013)]. L'optimisation aérodynamique des collecteurs de courant permet d'atteindre une réduction de 10 dB et plus. Au Japon, l'optimisation acoustique des collecteurs de courant pour le trafic à grande vitesse représente un thème de recherche important. L'optimisation de la forme et l'utilisation de matériaux de couverture poreux permettraient de produire des collecteurs de courant 15 à 20 dB(A) plus silencieux que ceux utilisés actuellement en Europe [Ikeda, M et Mitsumoji, T ; et al. (2010)].

3 Facteurs d'influences sur l'évolution du trafic ferroviaire

3.1 Aperçu

Outre les développements techniques (v. chapitre 2), ce chapitre analysera les facteurs économiques, spatiaux, sociétaux et politiques, comme le montre l'image ci-après.

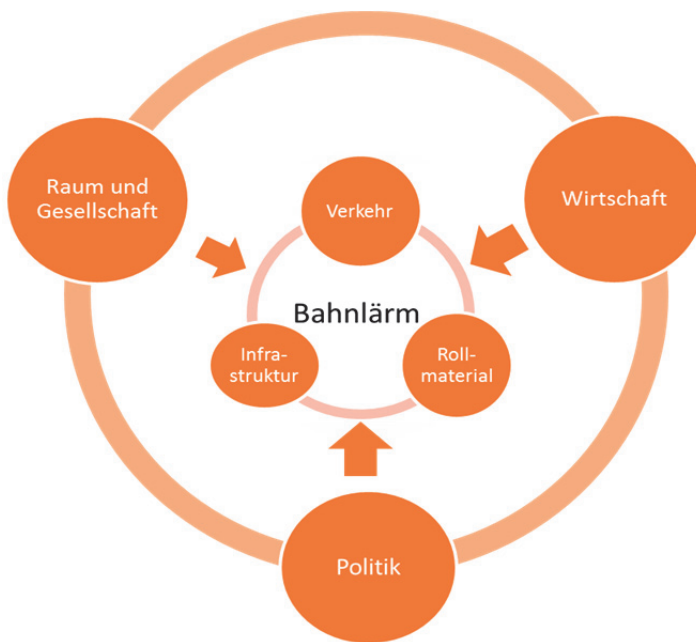


Image 6 : Facteurs d'influence du bruit de gare

Il faut souligner que de nouvelles perspectives de trafic pour la Suisse sont actuellement en cours d'élaboration jusqu'en 2040 (ARE) et que les pronostics officiels sont par conséquent tendanciellement dépassés. Cela vaut particulièrement pour le transport de voyageurs. Des nouvelles perspectives ont en revanche été élaborées pour le transport de marchandises (INFRAS/VÖV 2012). Les explications ci-après se fondent sur les bases disponibles.

3.2 Évolution des facteurs environnementaux

3.2.1 Population, économie politique et demande de transports

Dans le domaine d'influence de la population et de l'activité professionnelle, l'on prévoit une croissance de la population en Suisse et d'un maintien de l'effet de la structure d'âge. Par ailleurs, la croissance prévue de la population mondiale et le potentiel d'exportation qui en découle pour les produits suisses sont également importants pour le transport de marchandises.

À la base de l'évolution de la population en Suisse se trouve notamment la croissance continue de la population active (mot-clé libre circulation des personnes). Il existe ici un rapport étroit avec le développement économique qu'une telle évolution de la population active présume pour pouvoir garantir la compétitivité de l'industrie suisse.

Facteurs population et activité professionnelle		
Mots-clé	Évolutions	Rapport avec le transport de marchandises
Valeurs	Société libéralisée Accent sur le social et l'environnement	seulement indirectement par la consommation
Individualisation	Délimitation Produits individualisés	Atomisation des produits finis Flexibilisation des produits précurseurs
Comportement de consommation	sur demande (24 heures sur 24 : à toute heure du jour et de la nuit) Conscience de qualité croissante	Rapidité Flexibilité
Styles de vie	Société de loisirs Valeur croissante du travail	seulement indirectement par l'activité professionnelle

Tableau 1 *Évolutions et rapport avec le transport de marchandises chez les principaux facteurs d'influence dans les domaines de la population et de l'activité professionnelle (source INFRAS 2012)*

Une des questions centrales de l'économie politique est le développement futur de la globalisation. Les pronostics prévoient une tendance à la stagnation dudit développement. Cela entraîne notamment un écoulement des processus de concentration, c.-à-d. que la production proche des ventes avec des conséquences (partielles) de report pour l'Europe prend une importance de plus en plus grande. Les valeurs ajoutées vont toutefois continuer à diminuer,

mais de plus en plus souvent sous forme de concentration continentale du rapport spatial avec l'ensemble de la chaîne de valeur ajoutée.

Facteur économie politique		
Mots-clé	Évolutions	Rapport avec le transport de marchandises
Globalisation	Production proche des ventes dépendant de la valeur ajoutée	Renforcement du trafic continental Produits précurseurs continuant à provenir d'outre-mer
Processus de production	Produits de base versus produits finaux Approvisionnement des stocks et répartition	Systèmes Hub and Smoke Fiabilité
Valeur ajoutée	concentrée sur les chaînes continentales Suisse : dernier maillon de la chaîne	Suisse : quasiment pas de changements Effet de structure de marchandises (produits en vrac ou à la pièce)
Matières premières	Renchérissement Substitution Sécurité d'approvisionnement	Reculs partiels Transformation des processus de transport
Énergie	Perspectives énergétiques de la Confédération Recul des besoins en carburants fossiles ⁴	Recul de volume (notamment importation) Transformation des processus de transport
Intensités de transport	ralentissement dans les produits en vrac baisse continue dans le domaine des produits à la pièce	effet inhibant les développements économiques

Tableau 2 *Évolutions et rapport au transport de marchandises pour les principaux facteurs dans le domaine de l'économie politique (source INFRAS 2012)*

Les évolutions quantitatives suivantes peuvent en être déduites.

⁴ selon les perspectives énergétiques de la Confédération ; message officiel Union Pétrolière

Évolution des données directrices importantes			
	ex-post 1995 - 2010	Pronostic 2010 - 2020	Pronostic 2020 - 2020
Population	+0,7 % p.a.	+0,7 % p.a.	+0,6 % p.a.
Population active	+0,9 % p.a.	+0,4 % p.a.	-0,1 % p.a.
Productivité	+0,8 % p.a.	+1,0 % p.a.	+1,7 % p.a.
Produit intérieur brut	+1,8 % p.a.	+1,7 % p.a.	+1,6 % p.a.
Importations	+4,2 % p.a.	+4,7 % p.a.	+3,0 % p.a.
Exportations	+5,0 % p.a.	+4,0 % p.a.	+3,1 % p.a.

Tableau 3 *Autre développement des données directrices importantes dans les domaines de la population, de l'activité professionnelle et de l'économie politique (INFRAS 2012)*

Dans le domaine d'influence des transports, l'évolution des valeurs des marchandises et des intensités de transport des différents groupes de produits revêt une importance centrale. Les valeurs des marchandises vont continuer d'augmenter, mais uniquement pour des pondérations de marchandises spécifiques décroissantes. Une tendance à la baisse continue des intensités de transport à long terme est attendue, étant donné que la croissance économique augmente plus rapidement que l'émergence correspondante, même s'il existe des exceptions spécifiques aux groupes de marchandises et types de trafic. Les *transports de marchandises en vrac*, notamment dans le transport intérieur, présenteront des intensités largement inchangées, pour des valeurs de marchandises également inchangées. Une exception sont les intensités des *transports de produits à la pièce dans le domaine des matériaux collectés*, qui continueront d'augmenter en raison de la consolidation, le regroupement et les processus de transport combinés.

Le split modal se caractérise par une plus grande répartition des tâches parmi les modes de transport sur la base d'offres intermodales. Au niveau de la politique des transports, aucune détérioration de la position de base envers les chemins de fer n'est attendue.

Facteur transport		
Mots-clé	Évolutions	Rapport avec le transport de marchandises
Intensités de transport	ralentissement dans les produits en vrac poursuite de la croissance dans le domaine des produits à la pièce	effet ralentissant sur les développements économiques
Politique des transports	Organisation du marché libéralisée Maintien régulateur Expansion d'infrastructure restreinte Optimisation du taux d'utilisation des capacités Encouragement de la co-modalité	Effets de productivité chemins de fer Processus de transport intermodaux Capacités routières limitées
Production, logistique, technologie	Caractéristique de produits à la pièce Consolidation/regroupement Offres intermodales/OSS Information en continu Logistique éco-compatible	Processus de transport intermodaux La fiabilité avant la rapidité Qualité de transport

Tableau 4 : *Évolutions et rapport avec le transport de marchandises chez les principaux facteurs influençant le domaine des transports (source INFRAS 2012)*

Conclusion

- La demande envers les chemins de fer va continuer d'augmenter ;
- Entre 2010 et 2030, il faut s'attendre à des taux de croissance allant jusqu'à 50 % de la performance de transport du transport public de voyageurs, selon les perspectives de transports revues de l'ARE (2012) ;
- Dans le transport de marchandises sur rails (INFRAS 2012), les taux de croissance des tonnes-kilomètres se situent à 35 % pour le transport intérieur et à 39 % pour le trafic d'importation/exportation. Le trafic de transit (surtout le trafic à travers les Alpes) dépend beaucoup des conditions-cadres de la politique des transports. Selon les pronostics de l'OFT et compte tenu des effets de la NLFA et du couloir 40 tonnes, les taux de croissance du trafic à travers les Alpes entre 2009 et 2030 (tonnages, selon INFRAS 2011) s'élèvent à :

- +50 % pour le trafic des wagons complets
- +87 % pour le trafic combiné non accompagné
- +39 % pour les CR (selon le besoin d'atteindre les objectifs de transfert, les taux de croissance peuvent être nettement plus élevés ici également).

3.2.2 Politique des transports et de l'environnement

La planification concernant le développement des chemins de fer et la mise en œuvre correspondante de la rénovation du matériel roulant est particulièrement déterminante pour le bruit ferroviaire. Les éléments suivants jouent alors un rôle important :

Suisse

- L'acceptation du projet FAIF assure le financement aussi bien des développements futurs de l'infrastructure que du programme d'assainissement des chemins de fer.
- Le projet de développement PRODES définit le concept d'offres et donc l'utilisation de sillons du trafic ferroviaire jusqu'en 2030. Des utilisations de sillons détaillées existent surtout pour le transport de marchandises. Dans le transport de voyageurs, les nécessités des cantons dans le domaine des transports régionaux jouent également un rôle important.
- Le paquet de mesures supplémentaire contre le bruit ferroviaire approuvé par le Conseil fédéral en 2012 a amené des nouvelles valeurs-limites pour les wagons de marchandises. Ainsi, les wagons de marchandises bruyants (semelles en fonte) ne pourront plus circuler sur le réseau ferroviaire suisse. En combinaison avec d'autres mesures, cela fait passer le nombre de personnes protégées d'un bruit excessif de 170 000 à près de 220 000. Le Conseil fédéral a décidé des mesures complémentaires suivantes :
 - Aux endroits où un nombre spécialement élevé de personnes est exposé à du bruit ferroviaire, des mesures de protection des sons émis par les rails devront être prises et les rails devront être maintenus lisses par ponçage.
 - Les espaces non protégés entre les murs anti-bruit existants devront être comblés, si cela améliore sensiblement l'effet.
 - D'autres ponts en acier devront être assainis.
 - Le Conseil fédéral veut encourager financièrement le développement, les essais et l'autorisation de matériel roulant et de composantes d'infrastructure particulièrement silencieuses.

UE / étranger

La base est la directive sur le bruit ambiant (2002/49/CE). Dans son livre blanc sur les transports de 2011, l'UE a reconnu le bruit des transports comme un problème sérieux. Compte tenu du fait que 50 % du transport ferroviaire est transfrontalier, l'UE a également renforcé certains éléments, tels que p. ex. Élaboration de cartes de bruit et plans d'action, prise en compte du bruit dans les prix de sillons, développement continu des valeurs limites pour wagons (TSI Noise), essai et autorisation de semelles LL, développement de ERTMS (freins moteur) et le co-financement de nouveaux wagons avec blocs de freins plus silencieux (jusqu'à 20 %).

La base de l'assainissement du bruit en Allemagne est la directive sur le soutien de mesures d'assainissement du bruit sur les voies déjà existantes des chemins de fer fédéraux. Les éléments du soutien sont :

- Le programme pilote et innovant « Leiser Güterverkehr »
- Le projet lié « Lärmreduzierter Güterverkehr durch innovative Verbundstoff-Bremsklotzsohlen »
- Le système de prix des sillons en fonction du bruit (laTPS)
- Le programme de conjoncture II : essai de techniques innovantes
- Le programme spécial protection contre le bruit du rail

Conclusion

- De manière générale, la sensibilité politique face au bruit ferroviaire a augmenté. Cela vaut en particulier pour les efforts faits en vue de réduire le bruit du transport de marchandises.
- La transformation des wagons de marchandises pour les équiper de semelles de frein silencieuses est un objectif primordial au niveau international. En comparaison, l'assainissement des wagons de marchandises est nettement plus avancé en Suisse. L'assainissement est terminé du côté des CFF et en bonne voie chez les détenteurs privés.
- La politique de transfert entraîne l'augmentation de la concurrence entre sillons et donc des exigences envers le trafic mixte s'écoulant quotidiennement (fréquences des trains, vitesses, circulation nocturne).

3.2.3 Évolution infrastructure et trafic

Développements de l'infrastructure

L'image suivante montre les développements concrets de l'infrastructure prévus selon le projet FAIF (OFT 2015). Sur la base de celui-ci, l'OFT a développé le concept PRODES en collaboration avec les CFF.

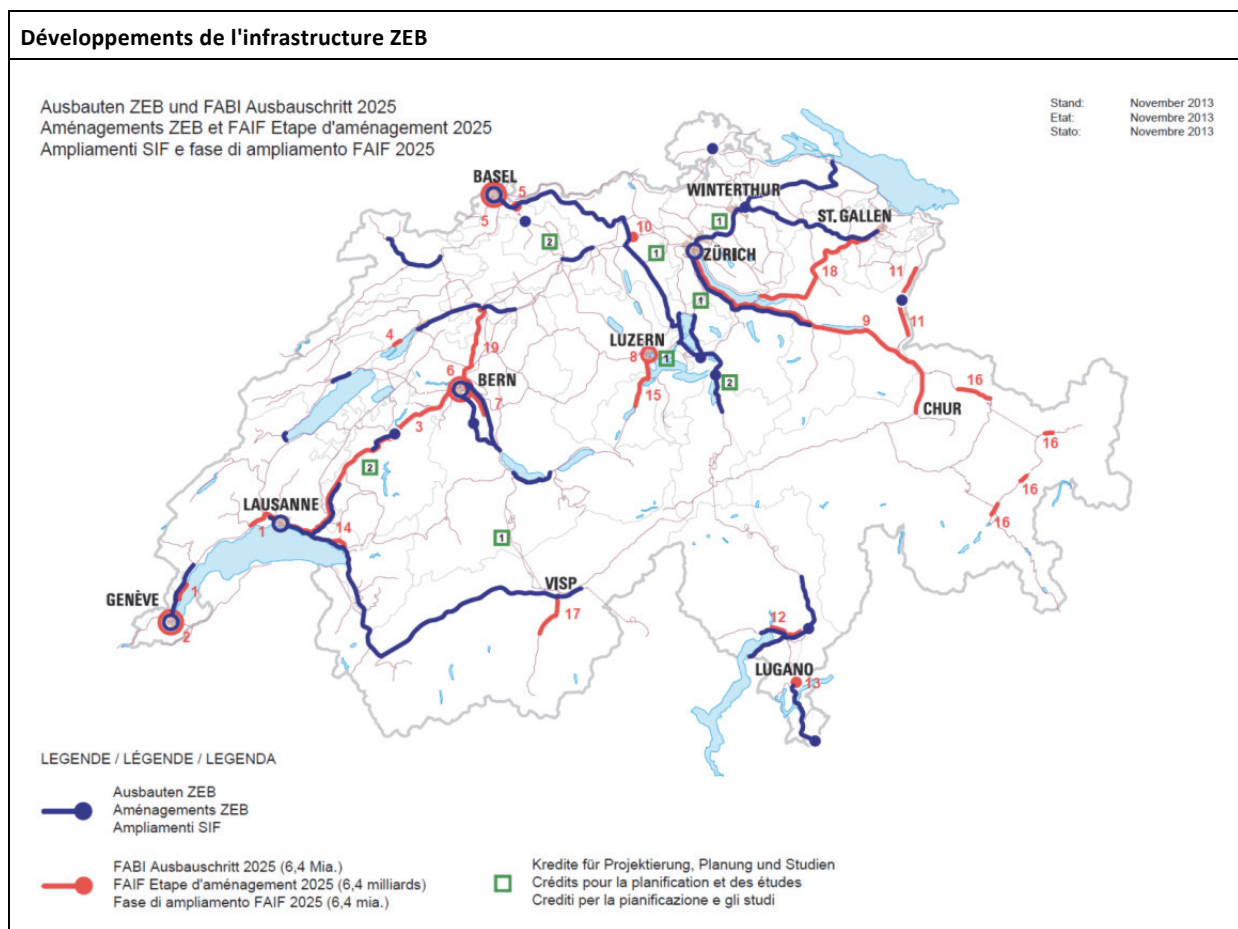


Image 7 : développements de l'infrastructure selon FAIF/ZEB

Sillons transport de marchandises⁵

La demande totale découle de la somme des sillons de transit nécessaires et des deux types de sillons intérieurs / d'importation / d'exportation. L'utilisation de sillons suivante a été déterminée à partir des pronostics.

Pronostic UTP

Sur la base des pronostics d'INFRAS/IVT (2012), deux scénarios ont été examinés (tendance, transfert accru vers le rail) et le besoin suivant a été déterminé.

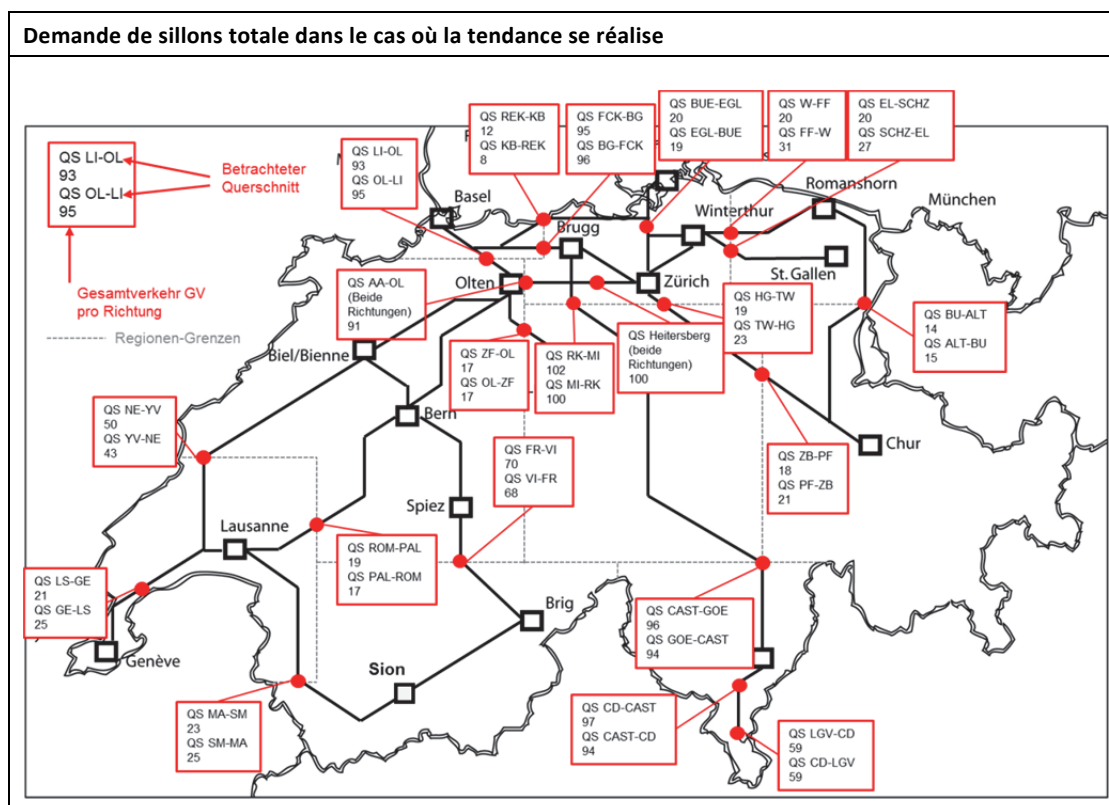


Image 8 : Demande de sillons en 2030 par jour pour trafic intérieur / d'importation / d'exportation et de transit dans le cas où la tendance se réalise

⁵ Pour le transport de voyageurs, il n'existe pas de chiffres comparables.

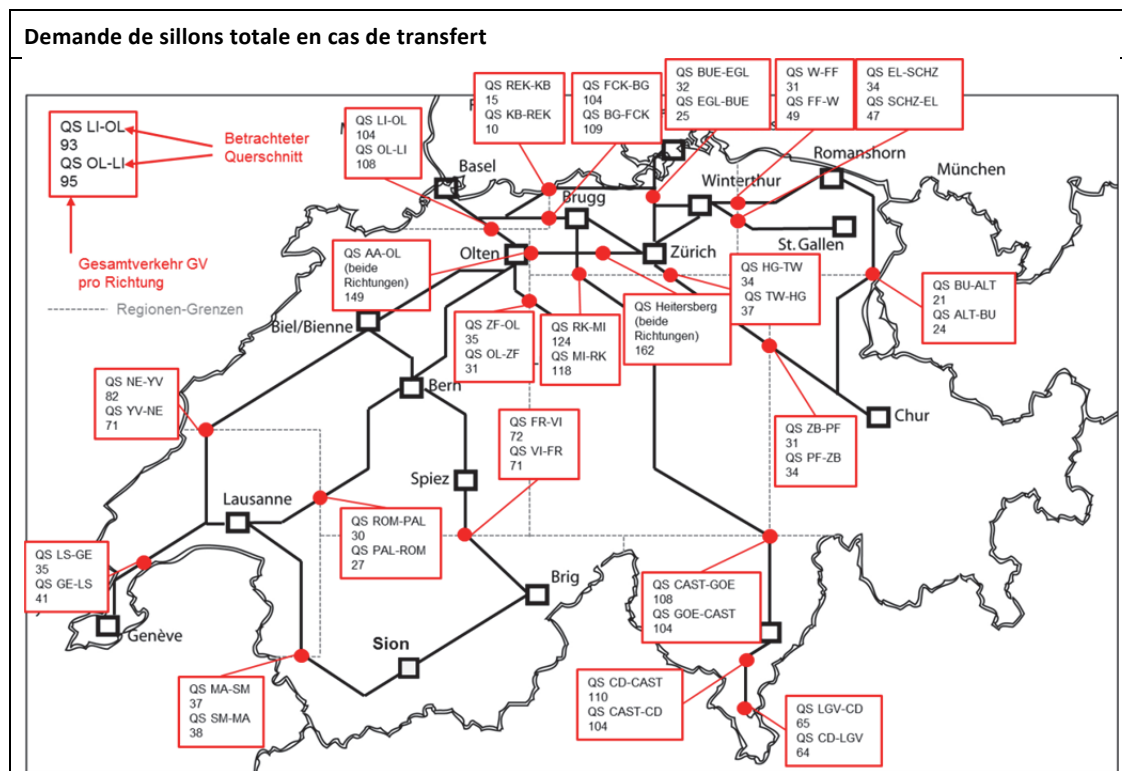
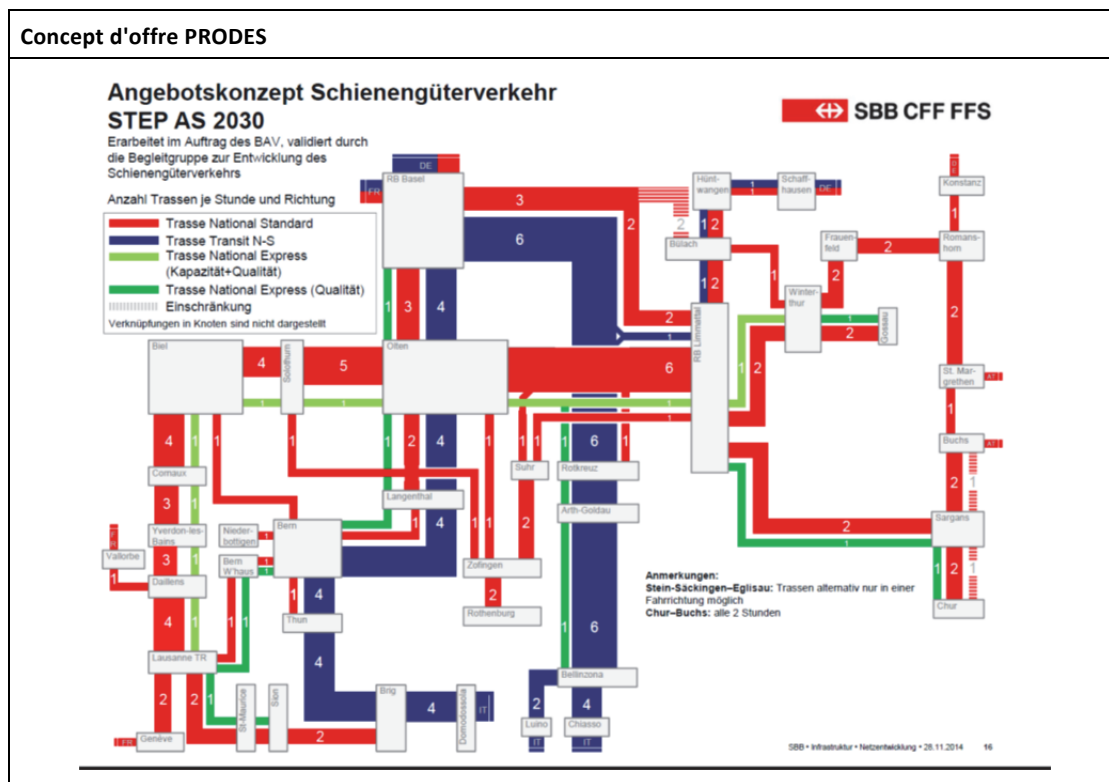


Image 9 : Demande de sillons en 2030 par jour pour trafic intérieur / d'importation / d'exportation et de transit en cas de transfert

Concept d'offre PRODES

Les analyses de PRODES prévoient l'offre de sillons suivante dans le transport de marchandises en 2025 :



1010 : Offre de sillons du concept de référence transport de marchandises source CFF / AG transport de marchandises

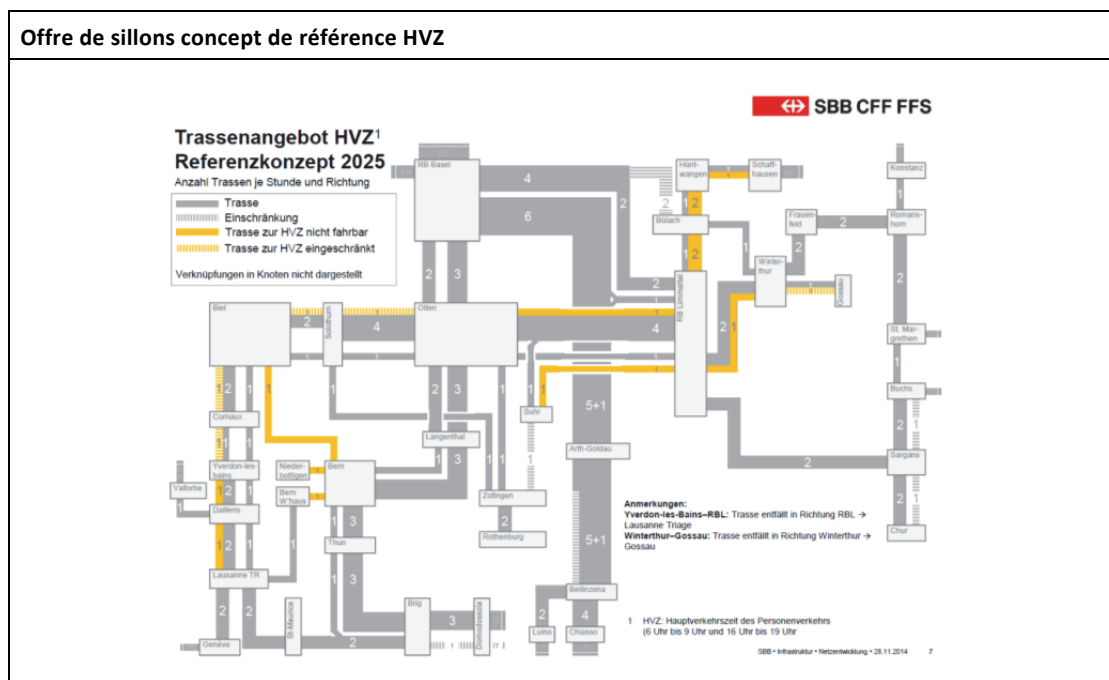


Image 11 : Offre de sillons concept de référence HVZ source CFF / AG transport de marchandises

Points centraux d'exploitation et infrastructure pour le transport de marchandises

Un groupe de travail de la Confédération (sous la direction de l'OFT) a retenu les points centraux du transport de marchandises sur la base des concepts d'offre. Ceux-ci peuvent être résumés comme suit :

- Terminaux : Bâle nécessite un grand terminal trimodal avec fonction de porte de transfert. La réalisation de la porte de transfert Limmattal est laissée activement ouverte et pour cette dernière, un échelonnement selon les besoins du marché est nécessaire. D'autres capacités sont nécessaires dans les régions suivantes : Vaud, Gäu, Zurich Ouest et Est, Suisse orientale, Suisse du Nord-Ouest.
- Exigences qualitatives : il s'agit de distinguer le trafic urgent (aussi bien en saut de nuit que de jour) du trafic moins urgent. L'accent principal de croissance est placé sur les transports urgents.
- Gares de triage : l'objectif est une nouvelle concentration sur un petit nombre de gares de triage. Les triages doivent être répartis aussi continuellement que possible sur la journée. La gare de triage Limmattal, complétée par Lausanne et Bâle, sert de plaque tournante au transport de marchandises intérieur.
- Longueur de train : les trains TPWCI circulent avec une longueur de train de 550 à 750 m, les autres trains (y compris le trafic à travers les alpes) avec une longueur de 750 m.
- Types de sillon : il en existe deux :
 - sillon standard avec vMax 100 km/h (moyenne 60), une longueur de train de 750 m et une masse remorquable de 1600 t
 - sillon express avec vMax 120 km/h (moyenne 80), une longueur de train de 750 m et une masse remorquable de 800 t
- Il existe un sillon express par heure et direction entre
Lausanne et la gare de triage Limmattal – Gossau
Bâle – Olten – Berne – Lausanne
Olten / gare de triage Limmattal – Tessin
Lausanne – Sion
gare de triage Limmattal – Coire
Toutes les autres relations sont dénuées de sillons express, afin de permettre une utilisation de sillons flexibles par toutes les catégories de train.

L'image suivante montre un projet de l'objectif visé en termes d'installations de transport de marchandises dans le cadre de PRODES.

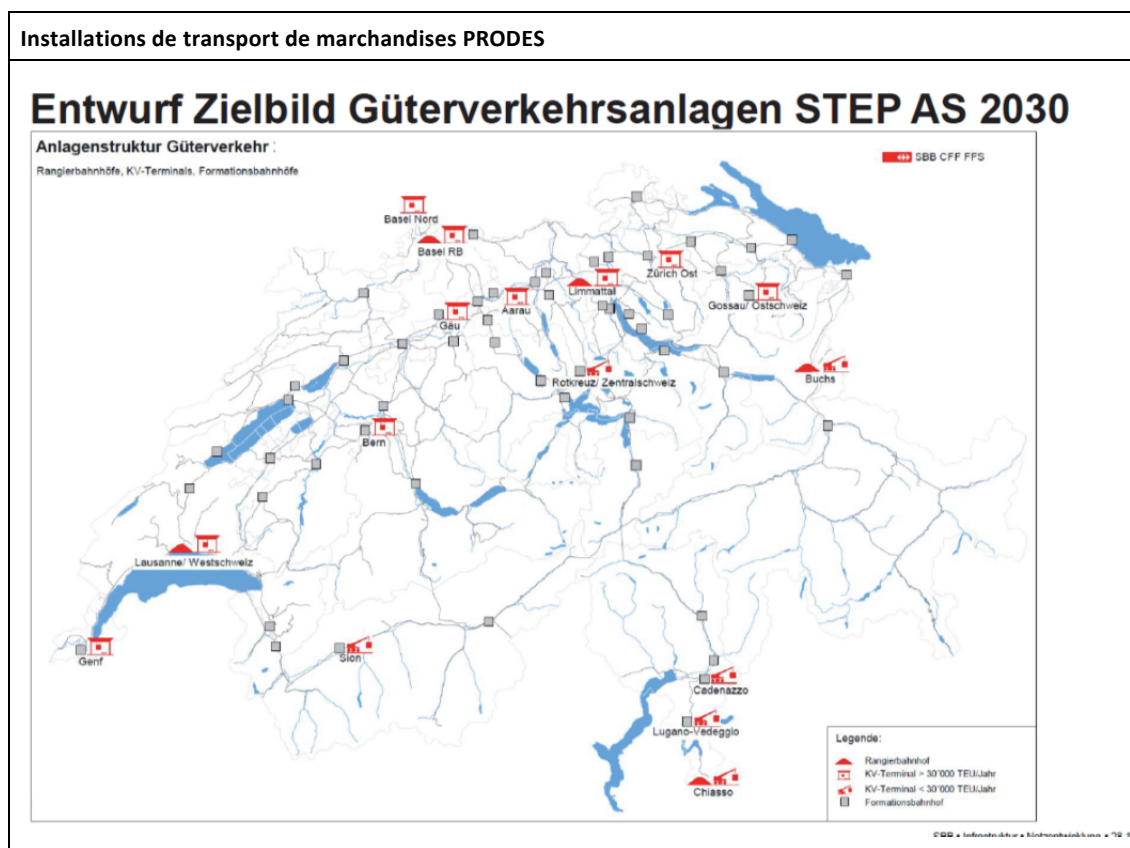


Image 12 : installations de transport de marchandises PRODES source SBB / AG transport de marchandises

Évolution du transport de voyageurs

Les tests suivants peuvent être retenus (base CFF 2014) :

- L'Office fédéral de la statistique a revu à la hausse le scénario de croissance de la population et prévoit une population suisse de 10 millions de personnes pour 2040. Une tendance à la hausse des taux de croissance dans les transports de personnes est donc à prévoir. Les chiffres définitifs seront connus à la fin 2015 (perspectives des transports ARE).
- Les nouvelles lignes ferroviaires entraînent une augmentation du différentiel de vitesse entre les transports de voyageurs et de marchandises. La pression d'aller plus vite monte donc pour le transport de marchandises, ce qui peut être réalisé par des sillons express sur les axes principaux de transport.
- La plus importante dynamique en termes de hausse de volume de trafic est prévue dans les zones d'agglomération (surtout la densification la journée), en raison de

l'augmentation de fréquence des nouveaux concepts de trains de banlieue. Le concept de trains de banlieue 2G de la Communauté de transport zurichoise prévoit par exemple un train interne (à 1 étage) et un train externe (à 2 étages).

- En raison des grandes charges auxquelles est exposé le matériel roulant aux heures de pointe, des anciennes compositions de matériel roulant continueront d'être utilisées. Celles-ci ont cependant été assainies en termes de bruit.

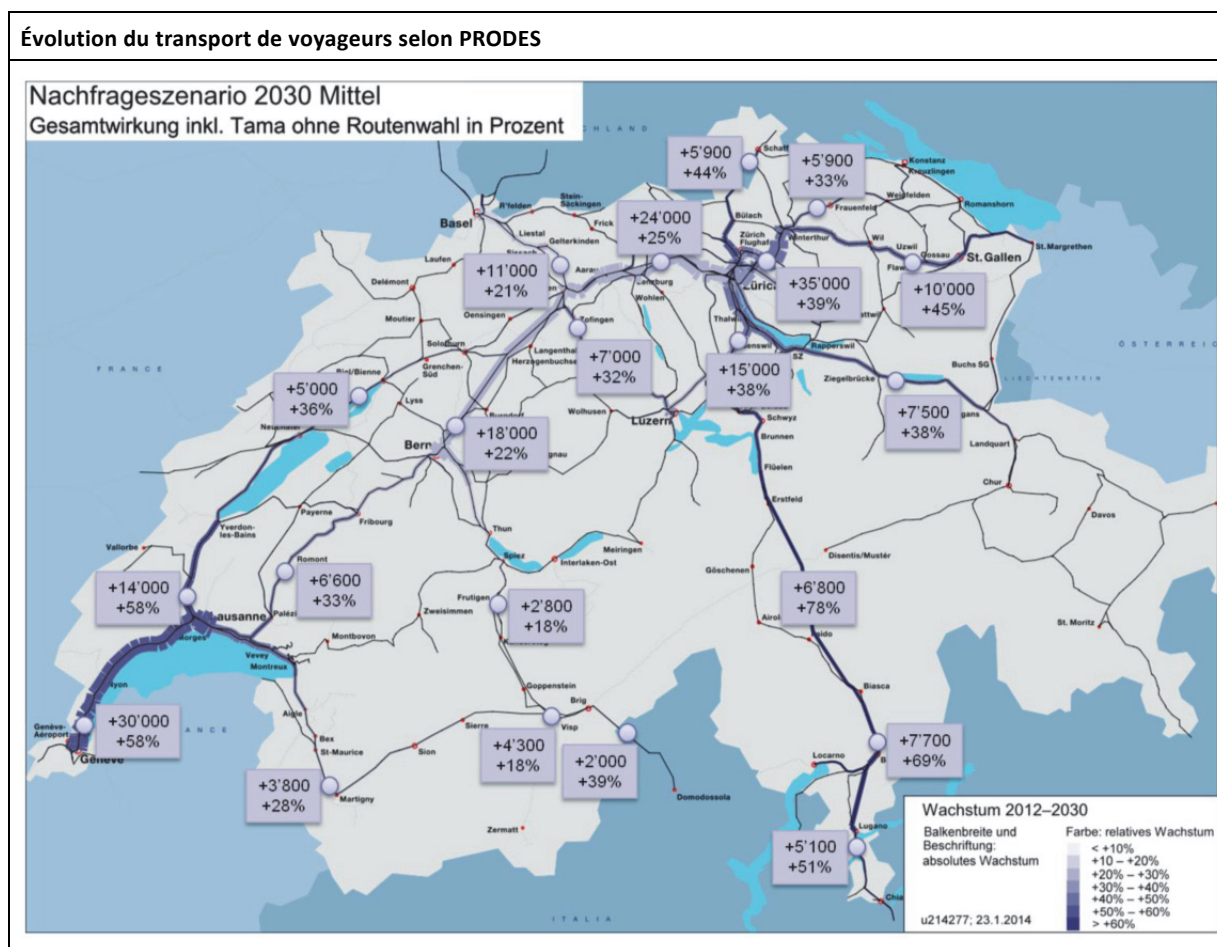


Image 13 : hausses attendues du transport de voyageurs 2012-2030 selon PRODES

Les bases d'exploitation détaillées ne sont pas encore connues. Le plan des transports longue distance est en revanche disponible, sur lequel figurent les améliorations d'offres nécessaires sur les axes principaux (voir également Image 15).

Conclusion

- L'augmentation du volume de trafic dans le domaine des transports de voyageurs et de marchandises entraîne une nouvelle hausse de la demande de sillons et donc des fréquences des trains. La plus importante hausse de volume de trafic est prévue dans les zones d'agglomération (surtout une plus grande densité en cours de journée).
- Dans le domaine des transports de voyageurs, la demande de trafic est couverte par les concepts d'offre PRODES. Le besoin de sillons dans les transports de voyageurs augmente par rapport à aujourd'hui. Les concentrations spatiales et la distinction entre sillons standard et express entraînent une plus grande concentration en termes de bruit (axes de trafic principaux, plus forte utilisation marginale quotidienne).
- La concentration des installations de chargement dans le trafic combiné et dans les gares de triage entraîne une plus grande nuisance sonore (bruit de transbordement) – particulièrement dans les zones d'habitation. Au vu de la dynamique du marché des produits à la pièce et du haut degré de flexibilité nécessaire en termes de temps, une augmentation du bruit aux heures creuses est également probable. D'un autre côté, il faut partir du principe que les trains du trafic combiné sont équipés de freins à disque et réduisent ainsi le problème sonore.
- La charge sonore augmentera sur les principaux corridors de transport en raison des fréquences de trafic. D'autre part, l'achèvement des tunnels de base (Gotthard, Ceneri) entraîne une réduction sonore dans certaines régions de montagne. En fonction du développement des gares centrales, des réductions sonores peuvent également avoir lieu dans le réseau du trafic à courte distance (concerne surtout le transport de voyageurs).

3.3 Marché du matériel roulant

Évolutions pertinentes en matière de bruit

- D'un point de vue écologique, l'évolution sera généralement influencée par le bruit et les besoins énergétiques. Il existe en principe des synergies entre ces deux thèmes.
- Les nouvelles locomotives (30 locomotives hybrides) et les nouveaux wagons seront optimisés en terme de consommation énergétique et contre le bruit. C'est pourquoi le programme de transformation des anciens wagons et l'utilisation d'un matériel roulant plus ancien est beaucoup plus sensible. Sans le soutien d'un financement étatique, l'élimination d'anciens wagons est impossible.

- Prolongement de la durée de vie par assainissement. CFF Cargo a assaini l'ensemble de la flotte de wagons plats à quatre essieux pour grumes et tubes d'acier et prolongé leur durée de vie de 20 ans. Les wagons plats à quatre essieux sont moins bruyants que ceux à deux essieux.
- Les instructions concernant les émissions sonores des wagons de marchandises (surtout la législation suisse et allemande) ont une influence déterminante sur le développement de la performance sonore du matériel roulant. Le rythme de transformation des wagons de marchandises internationaux (trafic d'importation / d'exportation et de transit) est un paramètre décisif. D'ici fin 2015, le matériel roulant suisse sera assaini en termes de bruit. Des murs et fenêtres anti-bruit ont par ailleurs été installés à des endroits particulièrement exposés. En 2013, le parlement a décidé qu'à partir de 2020, les dispositions relatives au bruit valant actuellement pour les nouveaux wagons s'appliqueront également aux véhicules plus anciens. Cela revient de fait à une interdiction de circuler pour les wagons de marchandises bruyants sur le réseau ferroviaire suisse. Cela concerne particulièrement les chemins de fer et détenteurs de wagons étrangers.

Le contrat de coalition prévoit de réduire de moitié le bruit des chemins de fer d'ici 2020. Pour ce faire, tous les wagons de marchandises anciens et bruyants devront soit être assainis par transformation des semelles de freinage, soit remplacés par des nouveaux wagons de marchandises silencieux. Il s'agit d'environ 180 000 wagons de marchandises pour un coût de près de 300 millions d'euros. S'y ajoutent des frais d'exploitation de plusieurs centaines de millions d'euros. Si moins de la moitié des wagons de marchandises est silencieuse lors de l'évolution prévue en 2016, des mesures réglementaires doivent être mises en œuvre. Pour un taux de réalisation de 100 %, la réduction du bruit par transformation s'élève à 10 dB(A), ce qui correspond à une réduction de moitié du bruit ferroviaire.

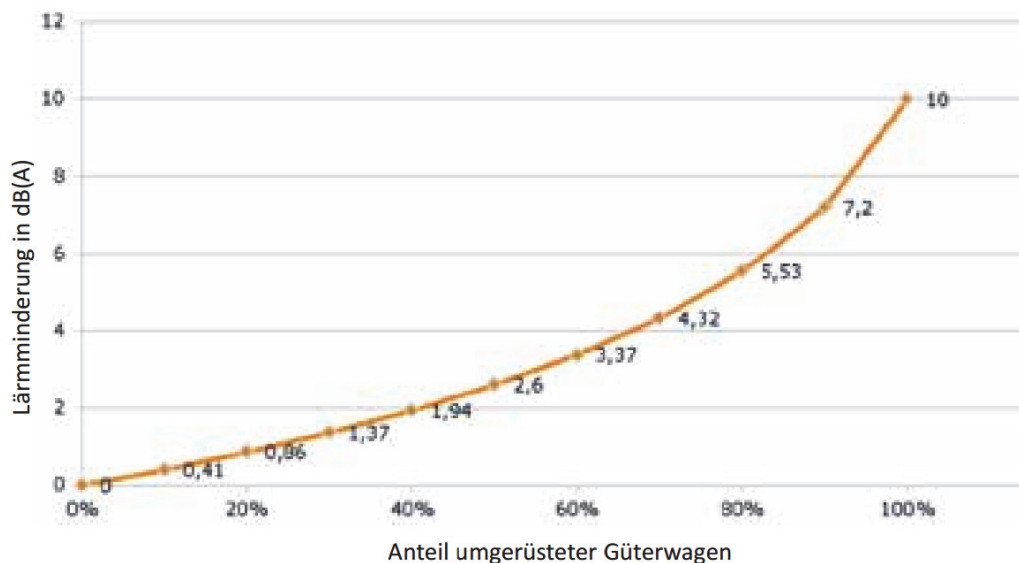


Image 14 : réduction du bruit en fonction de la part de wagons de marchandises transformés (source : DB Netz AG)

- En Allemagne, les prix de sillons dépendants du bruit incitent à transformer les wagons de marchandises existants et à les équiper de technologies de réduction du bruit telles que des semelles en matériau composite, puisqu'un bonus est prévu pour les wagons de marchandises transformés et qui respectent les valeurs-limites de bruit.

Évolution du marché

- À l'avenir également, le marché du matériel roulant continuera d'être hautement spécialisé avec peu d'exploitants. C'est pourquoi une baisse significative du prix du matériel roulant est peu probable.
- Les relations de propriété pourraient s'avérer plus complexes. La chaîne de valeur ajoutée producteur-intermédiaire-propriétaire-ETR va se diversifier.
- Sur la base des scénarios d'évolution de la Confédération, les pronostics de trafic relatifs aux transports ferroviaires de voyageurs jusqu'en 2030 prévoient une croissance de près de 60 pour cent. La demande connaîtra une valeur supérieure à la moyenne dans les agglomérations urbaines et aux heures de pointe. Pour les transports de marchandises, il faut s'attendre à une croissance d'un ordre de grandeur similaire. Le projet de financement et développement de la structure ferroviaire FAIF devra mettre à disposition les capacités nécessaires en étapes de développement échelonnées dans le temps.

3.4 Exploitation de l'infrastructure

- **Maintien de l'infrastructure** : le maintien de l'infrastructure gagnera en importance au cours des années à venir. Il se peut que cela entraîne d'une part plus de courses d'évitement, mais d'autre part également un assainissement du bruit spatialement déterminable.
- **Bruit de construction** : les assainissements d'installations existantes en cours de fonctionnement constitueront un grand défi. Ceux-ci impliquent normalement des constructions à des heures nocturnes, qui sont sensibles au bruit.
- Une première étape de développement 2025 (FAIF) apporte des améliorations au sein des zones d'agglomérations urbaines et dans le trafic d'agglomération du réseau urbain suisse, ainsi que dans le transport de marchandises national. Les mesures suivantes sont prévues :
 - Développements dans les régions des villes de Genève, Berne et Lausanne
 - Des voies supplémentaires à l'entrée de la gare de Bâle ainsi que la séparation des flux à Pratteln.
 - Élimination du goulet d'étranglement Holligen et 3ème voie entre Gümligen et Münsingen dans la région bernoise, ainsi que des aménagements entre Rapperswil et Mägenwil dans le canton d'Argovie.
 - Construction d'un tunnel à voie double entre Gléresse et Douanne
 - Développements entre Bellinzone et Tenero
 - Des voies de stationnement, de rebroussement et de dépassement à Lugano, sur les tronçons Lausanne – Genève, Zurich – Coire, ainsi que dans la région de Lies-tal / Gelterkinden

3.5 Développements spatiaux et sociétaux

- Le développement spatial et le développement des infrastructures de transport vont de pair. Le raccordement à des infrastructures de transport est un facteur déterminant dans le développement d'une agglomération.
- La densification voulue de la zone d'agglomération augmente d'une part les potentiels pour les transports publics dans les zones d'agglomération, mais entraîne d'autre part une densification des constructions et une augmentation de la population concernée. En harmonie avec les nouvelles méthodes de construction – optimisées contre le bruit

– il existe également des moyens de gérer le nombre potentiellement plus grand de personnes touchées.

- Il faut généralement retenir que la pollution sonore perd en importance comparée aux nuisances sonores. Les nuisances ponctuelles sont toujours davantage prise en considération. C'est pourquoi le bonus de bruit pourrait se voir exposé à de plus vives critiques à l'avenir.
- La sensibilisation et l'information seront un thème central à l'avenir, en vue d'augmenter le taux d'acceptation face au bruit. Le bruit va augmenter, notamment pour satisfaire les besoins de mobilité en croissance constante.

4 Inclusion des parties impliquées

Le 3 mars 2015, un atelier a eu lieu à l'EPF Zurich, lors duquel les différentes parties impliquées dans le trafic ferroviaire ont été conviées. Y ont été invités et sont venus des représentants des fabricants de wagons, des propriétaires de wagons, de l'OFEV, de l'OFT, des hautes écoles, ainsi que des exploitants d'infrastructure, environ 30 participants au total. Le projet de recherche a été présenté et l'état actuel de la recherche a été illustré à l'aide de quelques exposés d'introduction. Monsieur Markus Maibach a présenté les facteurs d'influence sur le développement du trafic ferroviaire (voir chapitre précédent). Monsieur Dr. Jakob Oertli a ensuite présenté les perspectives actuelles et les développements en cours aux CFF.

Les participants avaient été priés de préparer une brève contribution quant à leur vision de la situation. Il est devenu clair que la réduction du bruit ferroviaire tient au cœur de tous, mais que les participants doivent faire face à des obstacles différents. L'après-midi, ces thématiques ont été discutées de manière plus approfondie au sein de trois groupes (infrastructure, matériel roulant, autres). Les sous-chapitres suivants représentent les résultats des travaux de groupe.

4.1 Cercle de participants

Les personnes suivantes ont participé à l'atelier.

Office fédéral de l'environnement	Dr. Christoph Wenger, chef de section division juridique
Office fédéral des transports, division des infrastructures	Dr. Ruedi Sperlich, responsable suppléant Dr. Robert Attinger
Infrastructure CFF	Dr. Jakob Oertli, assainissement du bruit Michael Hafner, assainissement du bruit
CFF Cargo	Jens Erik Galdiks, responsable technique de flotte
SOB	Christian Schlatter, infrastructure gestion des installations
ÖBB Infrastruktur AG	Dr. Günter Dinhobl, gestion des tronçons et développement des installations
Railcargo Austria	Alfred Pitnik, services d'achat, des installations et de gestion Norbert Buttinger, avoies
Union des transports publics UTP	Martin Strobel, ressort technique
VAP, Cargorail	Markus Vaerst, ressort technique
AAE	Dietmar Gilliam, responsable autorisation et assainissement Hanno Schell, responsable technique
Hupac Intermodal	Michael John, Business Manager Rolling Stock Development
Ferriere Cattaneo	Dr. Eugenio Moro, responsable technique
Josef Meyer Rail AG	Jose Luis del Rio, gérant
EMPA	Dr. Jean Marc Wunderli, lutte contre le bruit
Mandataire	Prof. U. Weidmann EPF/IVT (accueil) Dr. Dirk Bruckmann, EPF/IVT Patrick Braess, EPF/IVT Prof. Dr. Markus Hecht, TU Berlin Sebastian Sohr, TU Berlin Jenny Böhm, TU Berlin Markus Maibach, INFRAS (modération, procès-verbal)

4.2 Résultats

4.2.1 Déclarations des participants

Infrastructure CFF

Les représentants de CFF infrastructure résument leurs déclarations dans le cadre d'une présentation (v. annexe). La présentation portera sur les thèmes suivants :

Proposition 1 : création d'un environnement, d'une plateforme pour la recherche (national - international), afin de coordonner les différents thèmes de recherche et d'assurer le transfert du savoir-faire (entre les différents acteurs de la recherche et entre la science et l'industrie) et

Proposition 2 : traiter de thèmes concrets :

- Optimisations de voies à partir de Go-Leise, exemples
 - Développement continu des semelles sous rail
 - Attache optimisée contre le bruit
 - Serrage contrôlé des rails
- Rugosité des rails
 - Causes de la rugosité accrue des rails
 - Garantie qualité
- Crissements dans les virages, p. ex. Courbe viennoise
- Choc d'aiguille, p. ex. ensemble avec le projet CFF « Upgrade Weiche »
- Jointures de rails
- Crissements de freinage
- Conduite dynamique, orientation adaptative
- Utilisation de tronçons par des wagons de marchandises optimisés

OFT

- Les thèmes centraux sont :
 - Trafic nocturne et bruit
 - Développement du matériel roulant (la technologie existe, comment la réaliser ?)
 - Entretien et effets du bruit, ou synergies avec des assainissements du bruit
 - Infrastructure : réaction des éléments élastiques au bruit et aux secousses

- La recherche doit présenter un haut degré d'efficacité. La mission du parlement s'oriente clairement vers la réduction d'exposition de personnes excessivement dérangées par le bruit ferroviaire. Le critère de la proportionnalité joue ici un rôle central.
- Les exigences envers la protection sonore vont augmenter. Un effet à grande échelle est attendu. C'est pourquoi les mesures relatives au matériel roulant sont au premier plan. La relation entre l'effet de traction et le bruit de roulement constitue un important thème de recherche.

CFF Cargo

- Les techniques existent en principe. La priorité sera ici de trouver un voie de migration idéal (technologies transitoires et états finaux). Ainsi, la semelle LL constituerait p. ex. une technologie transitoire typique. Il faut ici tenir compte des technologies d'autorisation, différentes selon les pays (facteur de dépenses et de complexité).
- Le programme de recherche devra également prendre en compte le transport de marchandises dans le futur (p. ex. les nouveaux bogies, l'optimisation des locomotives, l'automation - l'attelage automatique ; les nouveaux systèmes logistiques).
- Au vu des problèmes dans le domaine de la rentabilité, des formes de financement innovantes devraient être analysées.

SOB

- Dans le cas des chemins de fer à voie métrique, c'est moins le bruit causé par le transport de marchandises et plutôt le transport de voyageurs (p. ex. la double traction) qui est au premier plan. Le bruit de construction revêt également une grande importance pour les travaux d'entretien. Cela vaut également pour le bruit émanant des installations de stationnement de véhicules. Le programme de recherche devrait éclaircir cette interface vers le bruit industriel.
- Autres thèmes importants :
 - Choix du matériel
 - Voie métrique et distance de freinage sur des pentes de forte déclivité
 - Voies sans lacunes dans des courbes à faible rayon
 - Conditionnement du champignon du rail

VöV

- Le tram et la voie métrique devraient être pris en compte à leur juste valeur par la recherche.

- Le groupe spécialisé VÖV se penche actuellement sur le graissage des boudins et des vaporisateurs contre les crissements, ainsi que des voies soudées sans jointures.
- Les interfaces entre l'infrastructure et le matériel roulant sont d'une grande importance. Le système entier doit être pris en considération (p. ex. le dimensionnement du champignon du rail, les dispositifs d'aération, l'attelage automatique).

VAP

- Les solutions autofinancées (rentables) devraient avoir un grand poids dans les thèmes de recherche.
- Le développement de nouveaux véhicules (approche systématique) est une grande priorité selon VAP.
- VAP peut apporter des retours du point de vue des clients.

Infrastructure ÖBB

- ÖBB est un acteur important de la recherche relative à l'infrastructure et a publié ses propres articles dans une publication ETR. Actuellement, des travaux de recherche sont en cours dans les domaines des courbes de voies, de la détection du bruit, de la météorologie et de la propagation du son, ainsi que des méplats et des répercussions du bruit.
- Aucun autre bond significatif (moins 10 dB(A)) n'est actuellement attendu après la mise en œuvre des technologies connues (semelle K, semelle LL).
- Les questions d'optimisation des systèmes et de rentabilité (p. ex. couches, tailles des roues) et la combinaison de mesures au niveau de l'infrastructure et du matériel roulant deviennent centrales.
- ÖBB peut fournir une contribution de mis en réseau dans le cadre du programme de recherche suisse.

Rail Cargo Austria

- RCA se tourne vers l'Allemagne et la Suisse concernant les priorités en matière de transformation de la flotte. Dans d'autres pays (notamment en Europe de l'est), la problématique du bruit n'en est pas une. C'est un défi donc d'autant plus grand de vouloir répondre aux diverses exigences (et procédures d'autorisation) sur un marché international.
- Pour RCA, l'infrastructure en tant que thème de recherche est centrale.

J. Meyer Rail AG

- Le développement du bogie LEILA doit être poursuivi.
- JM effectue sa propre recherche dans le domaine de l'optimisation contre le bruit de la superstructure des wagons de gravier.
- Les thèmes de recherche suivants sont importants :
 - Optimisation des coûts (bruit versus conséquences financières et possibilités de financement) ;
 - Améliorer le diagnostic d'infrastructure et le matériel roulant en termes de bruit ;
 - Jupes anti-bruit
- J. Meyer Rail AG peut apporter du savoir pratique et des programmes d'essais.

AAE

- La transformation vers des nouveaux systèmes de freinage est en cours. Outre la semelle K, la semelle LL et les freins à disque sont au centre de l'attention. AAE développe également des nouveaux bogies équipés d'amortisseurs en caoutchouc. Il est important que la recherche reste neutre en termes de technologie.
- AAE est très sceptique concernant la disposition à innover de l'industrie au vu des faibles perspectives de rentabilité du transport de marchandises ferroviaire. Outre les technologies mentionnées, les frais relatifs à des économies de bruit supplémentaires devraient augmenter. La question de leur financement se pose donc. La recherche doit obligatoirement se pencher sur les conséquences financières (LCC : frais de transformation directs, frais ultérieurs d'entretien, etc.).
- Des potentiels d'économie peuvent apparaître chez les systèmes d'orientation adaptatifs (bogie).
- D'autres thèmes importants sont les systèmes d'incitation et de mesure du bruit, qui peuvent saisir séparément le bruit du véhicule et celui de l'infrastructure.

F. Cattaneo

- Pour le matériel roulant, l'optimisation de différents paramètres doit être prise en compte. C'est pourquoi la recherche devrait poursuivre une approche systématique.
- Les semelles K et LL constituent un grand pas. La prochaine étape sont les freins à disque, mais avec des conséquences financières correspondantes. Le chemin technologique doit être analysé de manière dynamique.

Hupac

- Depuis 1999, la première acquisition de wagons se fait exclusivement avec des semelles K. L'assainissement d'environ 800 wagons sera terminé chez Hupac en 2015. La flotte de Hupac sera lors équipée à 98 % de semelles K. En ce qui concerne les coûts, le seul paiement du bonus bruit de la Suisse permet d'atteindre une neutralité entre wagons à semelles K et GG.
- Un développement continu (potentiel de réduction -2,5 dB, 2 dB supplémentaires) peut être atteint avec de nouveaux revêtements. Les objectifs futurs sont également la minimisation du poids élevé et la réduction des coûts d'investissement. Les wagons à freins à disque doivent prévoir des frais LCC réduits, sans soutien à l'investissement.

empa

- Le rapport entre le bruit et l'entretien est central, notamment du point de vue de la santé (p. ex. Bruits de réveil en raison de travaux de construction).
- Interventions ponctuelles versus questions de système : le programme de recherche devrait éclairer le système dans son ensemble, sans se perdre dans des détails.
- L'infrastructure en tant que thème de recherche est centrale.

4.3 Résultats des travaux de groupe

4.3.1 Infrastructure

Modération : D. Bruckmann (procès-verbal) / P. Braess

Transfert du savoir

Le groupe de travail considère comme primordial de rassembler les connaissances disponibles en matière de réduction du bruit. L'organisation doit se faire à l'aide d'une plate-forme de savoir dans une haute école.

Thèmes de recherche

- Les mesures de réduction du bruit au niveau de l'infrastructure devraient être effectuées en premier lieu par des améliorations des éléments de voie existantes. Pour toutes les mesures de réduction du bruit, les coûts de cycle de vie (LCC) doivent également être pris en compte. Pour cette raison, les éléments de voie complémentaires, tels que des amortisseurs d'âme de rail ou des murs anti-bruit bas sont vus d'un œil plutôt critique, puisqu'ils augmentent les frais d'entretien de la voie et peuvent comprendre également des aspects critiques de sécurité (p. ex. amortisseurs d'âme de rail dans les courbes).
- Des travaux de recherche sont par conséquent nécessaires dans le domaine de l'optimisation des éléments de voie existants (couche de rail, traverse, fixation des rails). Celle-ci peut porter sur les différents composants, mais aussi sur l'interaction entre les composants. La conception exacte et l'objectif d'optimisation (bruit ou LCC) dépend fortement des conditions ambiantes, puisque les éventuels frais supplémentaires découlant d'une superstructure sensible au bruit ne se justifient que dans des zones sensibles au bruit.
- Un autre domaine de recherche est la rugosité des rails. Des procédés de mesure permettant une mesure efficace de la rugosité sur l'ensemble du réseau doivent être développés dans ce domaine. Il faudrait par ailleurs déterminer l'efficacité de différents procédés et stratégies de meulage, afin de permettre un meulage des rails optimisé contre le bruit.
- En ce qui concerne les crissements dus aux virages, il s'agit d'examiner un éventuel compromis possible entre les installations au niveau des véhicules et l'infrastructure, Cela notamment dans le contexte d'une utilisation mixte du réseau par différentes entreprises de transport par rail (ETR), ce qui rend plus difficile d'équiper les véhicules de dispositifs de graissage des boudins de manière cohérente.
- Il est également important de poursuivre la recherche et la mise en œuvre dans le domaine du soudage complet de la voie dans les courbes à faible rayon. Avec l'élimination des joints de rail, une source de bruit supplémentaire disparaîtrait. En même temps, les LCC de la superstructure serait réduite à ces endroits.
- Les CFF infrastructure et SOB ne voient pas de besoin de recherche dans d'autres domaines. Il existe peu de personnes touchées dans les alentours des gares de triage.

4.3.2 Matériel roulant

Modération : Prof. M. Hecht / J. Böhm (procès-verbal)

Il existe un besoin de recherche en matière de réduction du bruit, aussi bien pour les wagons de marchandises que pour les locomotives. Lorsque les wagons de marchandises deviennent moins bruyants, la locomotive passe en effet au premier plan des expositions et est alors notamment à l'origine de réactions de réveil. La réduction du bruit des locomotives ne constituait toutefois pas le point central de la discussion, puisque aucun fabricant de locomotives n'était présent. De manière générale, le bruit des wagons de marchandises peut être diminué en réduisant la propension aux oscillations (p. ex. des surfaces de roulement moins rugueuses en remplaçant la semelle GG, amélioration des propriétés de roulement grâce à une meilleure suspension), en diminuant l'oscillation et la diffusion (p. ex. amortissement du jeu de roues ou du bogie, nouvelle géométrie des roues par freins à disque, roues plus petites) et en réduisant la propagation du bruit massique par découplage et amortissement. Le point central de la discussion était la technologie de freinage. Dans ce cadre, les besoins de recherche / problématiques suivants ont été discutés :

- Semelle K/LL :
 - Semelle de freinage préservant la roue : la plus forte usure des semelles LL et K par rapport à la semelle GG et les frais d'exploitation plus élevés qu'elle entraîne pénalisent une transformation. Il y a là un besoin de trouver une semelle de freinage préservant la roue, facilement interchangeable et qui ne rend pas la surface de roulement plus rugueuse.
 - Procédure d'autorisation : l'autorisation individuelle longue et coûteuse de chaque développement des semelles de freinage est problématique. Il existe le désir d'un programme d'autorisation plus simple, basé sur un modèle de calcul harmonisé.
- Freins à disque : l'on dispose encore de peu de connaissances sur les détériorations des roues (p. ex. effritement). Une optimisation du matériel est également envisageable.
- Changement du comportement de freinage : le remplacement des freins pneumatiques par des freins électropneumatiques ou électriques permettrait de préserver le matériel au freinage et de raccourcir la distance de freinage. Ce système requiert un approvisionnement énergétique électrique.

D'autres thèmes qui ont surgi au cours de la discussion :

- Preuve de l'efficacité des mesures de réduction du bruit : de nombreuses technologies de réduction du bruit des transports de marchandises sont déjà connues (voir présentation), mais leur efficacité n'est pas clairement déterminée. Les données relatives au

potentiel de réduction varient parfois considérablement. Il existe ici un besoin de recherche afin de déterminer l'efficacité à des conditions marginales définies et pertinentes pour l'exploitation.

- Questions de financement : un problème central de l'utilisation des nouvelles technologies de réduction sonore sont les frais liés. Les domaines de recherche suivants se sont cristallisés
 - Modèles de financement pour mesures de réduction du bruit
 - Reprise de la technologies d'autres domaines (. ex. freins à disque camions)
 - La standardisation des systèmes de roues et de freins pour toute l'Europe pourrait mener à des coûts de produits moins importants et plus de concurrence entre les producteurs
 - Refinancement des mesures de réduction sonore par considération commune des thèmes de l'usure et du bruit, ou de l'efficacité énergétique et du bruit
- Communication entre fabricant et client : le manque d'échange entre le fabricant et le client a été critiqué, ainsi que le manque de précision des nouvelles technologies qui en découle. La recherche pourrait servir ici d'intermédiaire.

4.3.3 Système global / autres thèmes

Modération : M. Maibach

- Relation système infrastructure - matériel roulant : les thèmes doivent être considérés dans le cadre du système véhicule-voie (basé sur la technologie roue-rail). Les thèmes peuvent être par exemple
 - le conditionnement du champignon du rail
 - l'allocation des causes de bruit : répartition sonore sur les différents éléments déclencheurs
- Relation système questions d'optimisation :
 - Les questions principales sont :
 - a) Comment la valeur ajoutée créée par l'optimisation d'autres domaines (capacité, qualité des services, sécurité) peut-elle être utilisée pour compenser ou réduire les répercussions sonores nécessaires ?
 - b) Dans quel domaine des synergies permettant également de réduire le bruit pourraient-elles être créées ?
 - Bruit et vitesse : influence de l'adaptation des vitesses des transports de voyageurs et de marchandises (TV-TM) et potentiels à laisser circuler de jour les

transports de marchandises. Le potentiel devrait toutefois être faible en raison des processus logistiques. Il faut plutôt s'attendre à ce que des transports de marchandises plus rapides fassent plus de bruit.

Possibilités de prélèvements : prix du sillon

- Bruit et entretien : comment les mesures d'entretien peuvent-elles simultanément être combinées avec des mesures d'assainissement du bruit ? Quelle est la manière la moins bruyante de gérer les répercussions sonores de travaux d'entretien (nocturnes) ?
Mesure : directives d'exploitation, plans d'entretien du bruit d'infrastructure
- Bruit et activité non-stop ou nocturne dans des zones sensibles : comment optimiser les sillons (p. ex. regroupement) pour assurer une circulation aussi silencieuse que possible ?
Mesure : directives d'exploitation, prix du sillon
Les interdictions concrètes (p. ex. d'une exploitation seulement avec des freins silencieux) présentent peu de potentiel. La marge de manœuvre opérationnelle sera probablement faible.
- Relation système bruit-usure :
 - Commande de freinage et essai de freinage automatique
 - Équipement de systèmes de contrôle de trains (p. ex. Points de contrôle des charges de roues) avec focalisation sur le bruit pour reconnaître les méplats sur les roues (qui augmentent également l'usure)
 - Approfondissements des relations entre l'usure e le bruit et possibilités de prise en considération dans le prix du sillon
- Développement d'instruments d'analyse (outils) pour la prise en compte de la relation au système :
 - Effets des mesures de protection contre le bruit sur les coûts LC et autres paramètres
 - Effets d'autres optimisations sur le bruit
- Questions de délimitation du programme de recherche :
 - Les trams / lignes urbaines ne font pas l'objet de recherches, car l'accent politique est mis sur le bruit ferroviaire (du transport de marchandises)
 - Bruit industriel (machines de construction, terminaux, etc.) : la pertinence doit être clarifiée, les interfaces (notamment construction/entretien) doivent être prises en compte
 - Bruit des triages : inclusion orientée vers la pertinence
- Interconnexion du projet de recherche : est souhaitable, afin d'atteindre une renommée internationale et entretenir le transfert de connaissances. Il serait judicieux d'établir une plate-forme de connaissance, en premier lieu les hautes écoles (p. ex. empa).

4.3.4 Connaissances

Connaissances pour le projet de recherche

- L'accent du projet de recherche doit être mis sur l'efficacité : cibler les thèmes pertinents et les intégrer systématiquement ; concentrer et relier.
- Le projet de recherche ne doit pas être axé uniquement sur les aspects techniques et notamment prendre en compte les relations économiques (répercussions de coûts, financement). Les résultats de recherche doivent être économiquement intéressants, c.-à-d. que des moyens potentiels d'atteindre cet objectif doivent être examinés.
- Les questions relatives au système présentent un haut degré de pertinence. Elles doivent être suffisamment prises en compte (interactions avec d'autres thèmes ; niveau national - à l'étranger).
- Les travaux de recherche en cours et l'interconnexion de recherche doivent être présentés.
- Le rapport avec les systèmes de surveillance doit être clarifié.

Suite des démarches

- La communauté de travail évaluera les résultats et en examinera la pertinence pour la Suisse à l'aide d'une série de critères. Les informations relatives aux personnes concernées et à la pénétration du marché sont centrales.
- Il s'agira également d'examiner les contacts bilatéraux avec des fabricants de locomotives (qui n'étaient pas représentés dans l'atelier).
- Les participants à l'atelier auront l'occasion de donner leur feedback quant au projet du rapport final (moment : automne 2015).

5 Analyse du statu quo de systèmes partiels ferroviaires et différenciation des prestations de transports

5.1 Analyse du trafic

Sur la base des analyses de tendances du chapitre 3, ce chapitre concrétisera les piliers quantitatifs pour l'horizon temporel 2025. Pour l'analyse du trafic et surtout pour en déduire une évolution de celui-ci, une série de tronçons ferroviaires CFF sur des axes de trafic principaux a été sélectionnée, dont les sillons et l'évolution du matériel roulant entre 2015 et 2025 est prévisible et qui peut ainsi servir à déduire une évaluation qualitative de l'évolution du bruit. La liste ci-après montre la série de lignes sélectionnées et le nombre de sillons des différentes lignes selon l'horaire actuel, divisées en transports de voyageurs et de marchandises.

	Trassen 2015 in Trassen pro Tag						
	Personenverkehr			Güterverkehr			
	Fern	Regio	Total	WLV	UKV	Rola	Total
Lausanne-Triage - Genève La Praille	216	0	216	9	1	0	10
Palézieux - Fribourg	72	36	108	4	0	0	4
St. Maurice - Sion	72	54	126	27	0	0	27
Spiez - Wengi-Ey Abzw.	54	36	90	15	36	15	66
Cornaux - Biel	72	36	108	41	1	0	41
Sissach - Hauenstein-Basistunnel - Olten	216	108	324	29	35	15	80
Stein-Säckingen - Brugg AG Nord	72	36	108	46	52	0	98
Henschiken - Rotkreuz	0	72	72	0	0	0	0
Mägenwil - Gruemet	324	36	360	52	2	0	54
Olten Ost - Aarau	252	36	288	63	2	0	66
Aarburg-Oftringen Süd - Zofingen	162	36	198	9	0	0	9
Eglisau - Bülach	54	108	162	22	6	0	28
Thalwil - Pfäffikon SZ	144	144	288	20	0	0	20
Pfäffikon SZ - Ziegelbrücke	144	72	216	18	0	0	18
Winterthur - Gossau SG	108	54	162	12	0	0	12
Winterthur - Romanshorn Süd	72	72	144	8	0	0	9
Pollegio Nord / Biasca - Bellinzona	54	216	270	26	62	0	88
Lamone-Cadempino (bif) / Vezia - Balerna per Smistamento (bif)	18	90	108	19	24	0	43
Cadenazzo - Luino	0	108	108	2	35	0	37
Total	2'106	1'350	3'456	422	258	30	711

Image 15 : aperçu des sillons, transports de voyageurs et de marchandises

Les indications qualitatives suivantes se réfèrent à la série respective de tronçons sélectionnés et ne s'applique pas à l'ensemble du réseau CFF. Les indications se fondent sur les bases de planification actuelles des CFF. La projection pour les sillons horaires se base sur 18 h d'exploitation par jour pour toutes les lignes. Le calcul des transports de marchandises a été con-

verti pour les trains selon le tonnage, en estimant le poids d'un train de marchandises à 1 500 tonnes (indépendamment du mode).

L'image ci-dessus montre que le transport de marchandises utilise, par jour, environ 17 % des quelque 4 000 sillons des lignes sélectionnées. La proportion du trafic longue distance s'élève à environ 50 % et celle du trafic régional à environ 33 %. Il faut souligner ici que la division en transports longue distance et régionaux s'est faite sous l'angle du matériel roulant. Cela est nécessaire afin d'en déduire une évolution du bruit. Le matériel roulant a la plus grande influence sur le bruit d'un train. Cela signifie que les intercités, les interrégios et régio-express sont comptés parmi les transports longue distance, parce que leurs matériels roulants respectifs sont similaires. Les trains régionaux, les trains de banlieue et les trains de banlieue accélérés sont regroupés dans le trafic régional pour des raisons techniques liées au matériel roulant.

Évolution attendue du volume de trafic entre 2015 et 2025 (en %, arrondi)							
	Entwicklung Verkehrsaufkommen 2015 bis 2025 in %						
	Personenverkehr			Güterverkehr			
	Fern	Regio	Total	WLV	UKV	Rola	Total
Lausanne-Triage - Genève La Praille	0%	100%	33%	20%	0%	0%	20%
Palézieux - Fribourg	0%	0%	0%	25%	0%	0%	15%
St. Maurice - Sion	0%	33%	15%	10%	0%	0%	9%
Spiez - Wengi-Ey Abzw.	0%	0%	0%	45%	10%	66%	33%
Cornaux - Biel	0%	100%	33%	33%	0%	0%	30%
Sissach - Hauenstein-Basistunnel - Olten	0%	0%	0%	10%	10%	66%	20%
Stein-Säckingen - Brugg AG Nord	0%	0%	0%	45%	100%	0%	75%
Henschiken - Rotkreuz	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mägenwil - Gruemet	0%	200%	20%	60%	-75%	0%	55%
Olten Ost - Aarau	2%	300%	30%	25%	25%	0%	30%
Aarburg-Oftringen Süd - Zofingen	0%	200%	40%	25%	0%	0%	25%
Eglisau - Bülach	0%	0%	0%	20%	60%	0%	30%
Thalwil - Pfäffikon SZ	0%	0%	0%	20%	0%	0%	20%
Pfäffikon SZ - Ziegelbrücke	0%	0%	0%	20%	0%	0%	20%
Winterthur - Gossau SG	25%	60%	33%	25%	0%	0%	25%
Winterthur - Romanshorn Süd	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pollegio Nord / Biasca - Bellinzona	33%	0%	10%	60%	90%	0%	80%
Lamone-Cadempino (bif) / Vezia - Balerna per Smistamento (bif)	100%	60%	66%	70%	90%	0%	85%
Cadenazzo - Luino	100%	100%	100%	33%	90%	0%	90%
Total	5%	40%	20%	33%	66%	66%	50%

Image 16 : évolution du volume de trafic entre 2015 et 2025 (base PRODES, calculs INFRAS)

La base de l'estimation de l'évolution des sillons dans les TV et TM est le concept de référence ZEB et PRODES 2025 (état au 08.2014). L'Image 16 montre que les sillons de transports de voyageurs et de marchandises vont augmenter dans les 10 ans de 2015 à 2025. L'augmentation du transport de voyageurs se présente comme suit. Les sillons pour matériel

roulant longue distance augmentent d'environ 5 % sur tous les tronçons sélectionnés. Les sillons des trains régionaux et avant tout des trains de banlieue augmentent dans le même intervalle de temps de quelque 40 %. Les plus grands aménagements concerneront l'axe principal est-ouest (Olten – Aarau), le prolongement par la NLFA via Luino et le tronçon Genève – Lausanne. Sur les tronçons sélectionnés, au total près de 18 % de sillons en plus seront disponibles pour le transport de voyageurs en 2025.

L'évolution des transports de marchandises aura lieu à un niveau absolu plus bas. Comme déjà mentionné, la proportion des TM sur tous les sillons utilisés des tronçons choisis s'élève à 17 % en 2015. Au total, les transports de marchandises disposeront de 50 % de sillons en plus par jour en 2025 par rapport à aujourd'hui. Le volume des transports par wagons complets augmente environ d'un tiers et le trafic combiné d'environ deux tiers. La CR augmente également, à un niveau absolu très bas, d'environ deux tiers. Dans l'ensemble, deux tiers des sillons supplémentaires de deux régions se libéreront. Sur l'axe nord-sud au Tessin et entre Bâle et Zurich (porte de transfert Limmattal).

Deux facteurs principaux déterminent l'estimation qualitative de l'évolution du bruit ferroviaire. Ce sont le changement d'offre par types de trains dépendant de la vitesse (nombre de sillons différenciés par transports longue distance et régionaux) et le progrès technique du matériel roulant au cours de la période examinée (renouvellement de flotte) Le changement d'offre est traité ici dans ce chapitre. Le matériel roulant sera traité au chapitre suivant.

5.2 Analyse du matériel roulant

5.2.1 Composition matériel roulant

De nos jours, l'estimation exacte du renouvellement de flotte est uniquement possible dans le transport de voyageurs. Dans le domaine des transports de marchandises, le renouvellement de la flotte varie entre les différentes entreprises de transport et tractionnaires. L'élargissement de l'offre prévu d'ici 2025 est en revanche connu. Le tableau suivant fournit un aperçu des changements attendus du matériel roulant dans les transports de voyageurs et de marchandises.

Évolution du matériel roulant par catégories de train			
	Aujourd'hui	PRODES 2025	Principal changement
TV Régio	CFF Régio Dosto Re 420 LION RABe 523 Re 460 — locomotive de ligne	Regio-Dosto (3x100) 300 m Véhicule unitaire 75 m / (1 pièce) / 75 m Véhicule unitaire 75 m / (2 pièces) / 150 m Véhicule unitaire 75 m / (3 pièces) / 225 m Véhicule unitaire à deux étages 150 m / (1 pièce) / 150 m Véhicule unitaire à deux étages 100 m / (2 pièces) / 200 m Véhicule unitaire à deux étages 150 m / (2 pièces) / 300 m	Aujourd'hui déjà, le transport de voyageurs est bien plus silencieux que le transport de marchandises. À l'avenir, le trafic régional (trains de banlieue) circulera plus souvent à deux étages et à des vitesses plus élevées, ce qui entraînera également une augmentation du bruit. D'un point de vue technique, tous les véhicules seront équipés de semelles K, qui réduisent le bruit.
TV longue distance	RABDe 500 — ICN RABe 503 — SBB ETR 610 Wagons EuroCity Bpm 51 — voitures ferroviaires Re 460 — locomotive de ligne	ICN 1 étage 400 m FV-Dosto 300 m (version IC) IPV ETR610/HGZ 1 étage 400 m ICN 1 étage 400 m FV-Dosto 400 m (version IC) IC2000 Dosto 15 pièces 393 m	Les trains parcourant des longues distances circuleront plus rapidement sur les nouveaux tronçons aménagés. Les freins à disque existent déjà presque partout. Les semelles en fonte seront interdites à partir de 2020.
TM TCNA	Rs, wagon plat à quatre essieux sans bords latéraux Wagons-poche pour semi-remorques Ks, wagon plat à deux essieux	Wagons-poche pour semi-remorques Rs, wagon plat à quatre essieux sans bords latéraux	Les wagons de marchandises à deux essieux seront remplacés en premier lieu. Actuellement déjà >60 % de freins silencieux (semelle K et LL) ; tous les wagons de marchandises seront silencieux en 2025. Les semelles en fonte seront interdites à partir de 2020.
TM TWC (types de wagons principaux)	Habbiillns, wagon couvert à quatre essieux avec parois coulissantes et cloisons verrouillables Hbbillns 38 Pal Habbiillns, wagon couvert à deux essieux avec parois coulissantes et cloisons verrouillables Eanos, wagon ouvert à quatre essieux pour produits en vrac	Habbiillns, wagon couvert à quatre essieux avec parois coulissantes et cloisons verrouillables Hbbillns 38 Pal Habbiillns, wagon couvert à deux essieux avec parois coulissantes et cloisons verrouillables Eanos, wagon ouvert à quatre essieux pour produits en vrac	Les wagons de marchandises à deux essieux seront remplacés en premier lieu. Actuellement déjà >60 % de freins silencieux ; tous les wagons de marchandises seront silencieux en 2025. Les semelles en fonte seront interdites à partir de 2020.

Évolution du matériel roulant par catégories de train			
	Aujourd'hui	PRODES 2025	Principal changement
	Snps, wagon plat à quatre essieux et ranchers fixes Rilns Wagon plat à quatre essieux avec bâches coulissantes Uacs Wagon-silo à quatre essieux et déchargement pneumatique Wagon-silo à deux essieux et déchargement pneumatique	Snps, wagon plat à quatre essieux et ranchers fixes Rilns Wagon plat à quatre essieux avec bâches coulissantes Uacs Wagon-silo à quatre essieux et déchargement pneumatique Wagon-silo à deux essieux et déchargement pneumatique	
TM CR	Véhicules à plancher surbaissé avec un diamètre de roue très faible	Véhicules à plancher surbaissé avec un diamètre de roue très faible	Actuellement déjà >60 % de freins silencieux ; tous les wagons de marchandises seront silencieux en 2025. Les semelles en fonte seront interdites à partir de 2020

Tableau 5 Composition du matériel roulant par catégories de trains

Dans les transports de voyageurs, cela signifie principalement une augmentation de trains de banlieue et de régions. P. ex. dans les régions de Zurich et de Genève, où les compositions touchent déjà à leurs limites en termes de capacité. La dynamique de renouvellement de flotte des trains de banlieue, combinée à un accroissement de capacité (passage de véhicules à un étage à véhicules à deux étages), est probablement la plus importante dans les agglomérations en rapide croissance entre les espaces métropolitains. Des renouvellements de flotte ponctuels sont à prévoir sur les lignes de trafic longue distance. P. ex. la production actuellement en cours de trains à deux étages sur l'axe est-ouest via Berne pour décharger les tronçons à forte demande Genève-Lausanne et Berne-Zurich-Winterthur. En raison des grandes charges auxquelles est exposé le matériel roulant aux heures de pointe, des compositions de matériel roulant plus anciennes continueront d'être utilisées. L'élargissement de l'offre connaît actuellement une croissance plus rapide que la flotte, ce qui entraîne une charge plus importante. Les vitesses, qui influencent également le bruit, seront augmentées sur les nouveaux tronçons.

Dans le domaine particulièrement bruyant des transports de marchandises, le parlement a décidé en 2013 qu'à partir de 2020, les dispositions relatives au bruit jusqu'alors uniquement valables pour les nouveaux wagons (valeurs-limites plus strictes) s'appliqueront également aux véhicules plus anciens. Cela revient de fait à une interdiction de circuler pour les wagons de marchandises bruyants sur le réseau ferroviaire suisse. Cela concerne particulièrement les

chemins de fer et détenteurs de wagons étrangers. L'on peut ainsi partir du principe que la flotte entière de wagons de marchandises sur rails suisse sera prochainement renouvelée.

La déduction qualitative, aussi bien en matière de transport de voyageurs que de marchandises, se limite ainsi à la seule question de savoir si le développement technique (semelles plus silencieuses, renouvellement de flotte) du matériel roulant peut compenser le bruit croissant occasionnée par l'élargissement de l'offre (plus de sillons, vitesses plus élevées). Il est à prévoir que les trains circuleront plus silencieusement, mais à une fréquence plus élevée. Bien que cela constitue une évolution réjouissante du point de vue des émissions sonores, la charge à laquelle sont exposées les zones d'habitation concernées augmentera. Il faut donc partir du principe que sur les tronçons concernés par l'élargissement de l'offre, la charge liée au bruit augmentera également. Le développement technique en matière d'assainissement du matériel roulant ne sera pas en mesure de compenser la hausse de fréquence des nuisances sonores entraînée par l'élargissement de l'offre.

5.2.2 Analyse de l'émission sonore

Dans le Tableau 6, la représentation de la distance parcourue des chemins de fer sur le réseau suisse en 2012 est divisée en trafic régional, longue distance et de marchandises. Bien que le transport ferroviaire de marchandises représente une proportion relativement faible de la distance parcourue d'environ 13 % (réseau entier), il constitue néanmoins une source essentielle d'émissions sonores, comme démontré ci-après.

	Distance parcourue [train-km]	Distance parcourue [%]
Trafic régional	120 787,000	55
Trafic longue distance	69 699,000	32
Transport de marchandises	27 720,000	13
Total	218 206,000	100

Tableau 6 : distance parcourue des trains sur le réseau suisse en 2012 [chiffres de l'OFS]

Le rapport annuel 2014 de surveillance du bruit ferroviaire en Suisse [Office fédéral des transports OFT (2015)] montre que les émissions sonores du transport de marchandises est bien plus élevé que celles du transport de voyageurs. Pour les trains de voyageurs, la

moyenne annuelle de niveaux de passage (TEL (80 km/h)) a été mesurée à 78-83 dB(A). Depuis 2003, une diminution de > 5 dB a été atteinte dans le transport de voyageurs. Pour les trains de marchandises, la moyenne annuelle de niveaux de passage (TEL (80 km/h)) a été mesurée à 88-93 dB(A). La diminution s'élève seulement à 2 dB depuis 2003. La situation est rendue encore plus difficile par le fait que le transport de marchandises, déjà bruyant en soi, circule majoritairement de nuit. En 2014, la proportion du transport de marchandises aux émissions sonores nocturnes était de 65 à 95 % aux endroits de mesure. La nécessité d'agir persiste encore en particulier dans le domaine de la réduction du bruit occasionné par le transport de marchandises.

La proportion actuelle de wagons de marchandises silencieux (semelles K ou freins à disque) en Suisse s'élève à > 60 % ; un remplacement complet des semelles en fonte permettrait une réduction des niveaux de passage actuels de 4-5 dB [Office fédéral des transports OFT (2015)]. Ce scénario devrait être réalisé d'ici 2020, lorsque l'interdiction de wagons de marchandises équipés de semelles en fonte entre en vigueur. Au cas où les émissions sonores du transport de voyageurs ne continuerait pas de baisser et qu'aucune mesure supplémentaire de réduction sonore ne serait entreprise, le niveau de passage des trains de marchandises sera en moyenne environ 5 à 6 dB plus élevé que celui des trains de voyageurs.

Avec la réduction de la proportion de wagons à marchandises à semelles en fonte et l'interdiction en 2020, et à condition que les rails soient lisses, d'autres sources de bruit revêtiront une importance croissante dans le transport de marchandises. Du côté des véhicules, il s'agira-là surtout de facteurs dus à des défauts de roues, tels que des méplats, et des émissions sonores émanant des locomotives.

L'Image 17 illustre par exemple l'historique des niveaux d'un train de marchandises composé de wagons équipés de semelles en fonte et semelles K, circulant à une vitesse de 80 km/h. À chaque extrémité du train se trouvent deux locomotives Traxx conformes à la STI de la série 185. On peut reconnaître que les émissions sonores des locomotives sont insignifiantes par rapport à celles des wagons équipés de semelles en fonte, tandis que les locomotives sont plus bruyantes que les wagons à semelles K. Les locomotives possèdent par ailleurs également des sources de bruit situés plus haut, telles que des ouvertures d'aération ou des superstructures en toiture. Pour ces sources de bruit, les murs anti-bruit bas ou mi-hauts ne représentent pas des obstacles. Lors du passage d'une locomotive, le niveau de pression sonore monte très rapidement pour des zones d'émission proches. Cette propriété doit être vue d'un œil critique, particulièrement de nuit et sous l'angle de réactions de réveil.

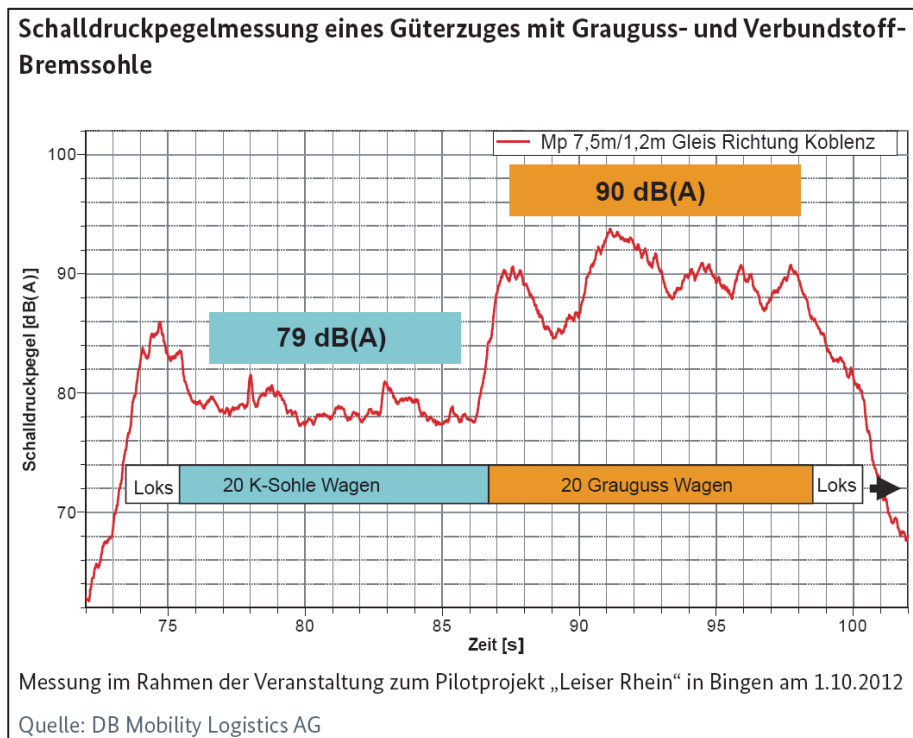


Image 17 : historique des niveaux d'un train de marchandises [BMVBS (2013), p. 41]

Les mesures entreprises sur les wagons de marchandises ne suffisent donc pas pour réduire globalement le bruit des transports de marchandises sur rails, les locomotives devant également devenir nettement plus silencieuses par rapport à aujourd'hui. La STI Bruit 2014 [STI Bruit (2014)] prévoit toutefois des valeurs-limites plus élevées pour le bruit de passage de locomotives que pour le bruit de passage de wagons de marchandises.

5.3 Analyse des infrastructures ferroviaires

Lors de l'analyse des infrastructures ferroviaires, il faut tenir compte du fait que les changements structurels d'une superstructure de 30-40 ans n'évoluent que très lentement. L'avantage est l'absence de détériorations soudaines. En même temps, les nouvelles connaissances ne peuvent être implémentées que très lentement, que ce soit dans le domaine de la qualité de la voie, des émissions sonores ou de la rentabilité.

De 2010 à 2012, la gestion des installations et des voies de l'infrastructure CFF a défini et systématisé sa stratégie de superstructure jusqu'en 2030, au moyen du projet «Éléments standard CFF». L'objectif était d'attribuer à des catégories de tronçons, classés selon leur utilisation et les classes de rayons, une superstructure standardisée qui serait homogène, fonctionnelle, durable et donc rentable en fonction de l'utilisation prévue. Les images suivantes illustrent la forme de superstructure souhaitée, l'état actuel et leur degré de réalisation.

Il en ressort clairement que la préférence est donnée à une superstructure composée de traverses en béton et d'un profil de rail 60E1 pour les tronçons fortement utilisés. Sur les tronçons secondaires, les traverses en acier avec le profil de rail 54E2 sont les plus rentables. Cela est notamment le cas parce que les traverses en acier réagissent mieux aux tassements, ce qui rendrait nécessaire un assainissement de l'infrastructure en cas de remplacement par des traverses en béton.



Image 18 : stratégie relative à la superstructure [RTE I 22211(2014)]

Schwellenart heute

Quelle: DFA

D. Winklehner, I-AT-FB-AMM, 04.06.2014

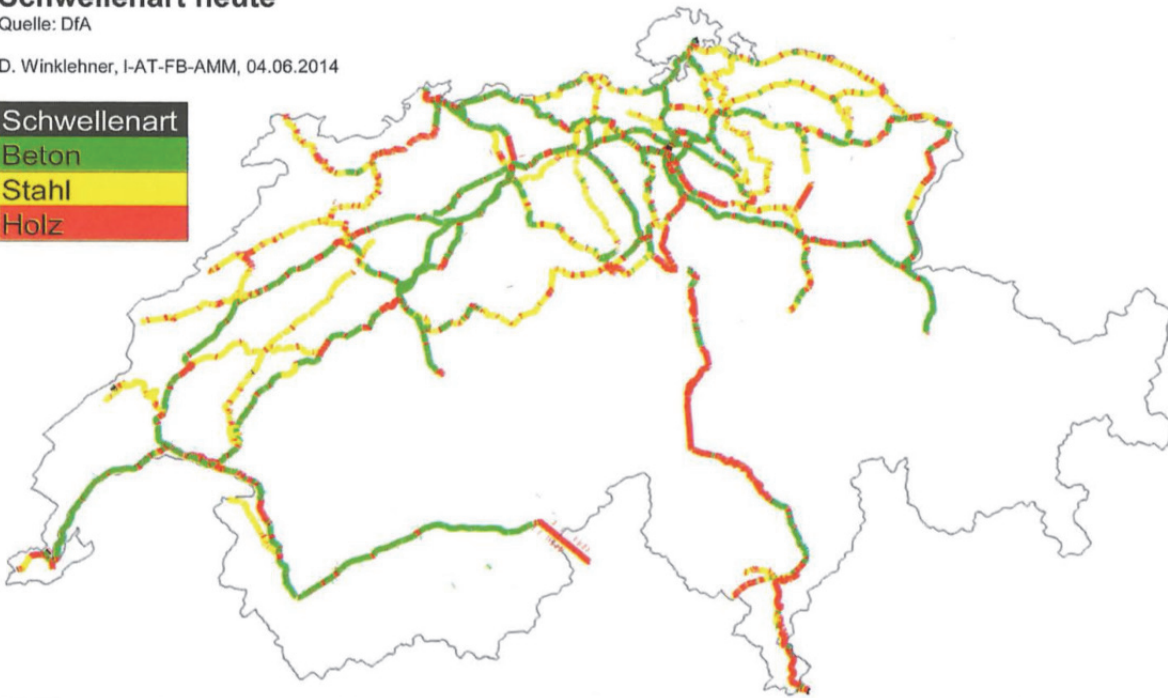


Image 19 : forme de superstructure actuelle [Winklehner (2015)]



Oberbau Vergleich IST mit Strategie: Über 50% ist bereits im Sinne der Strategie...

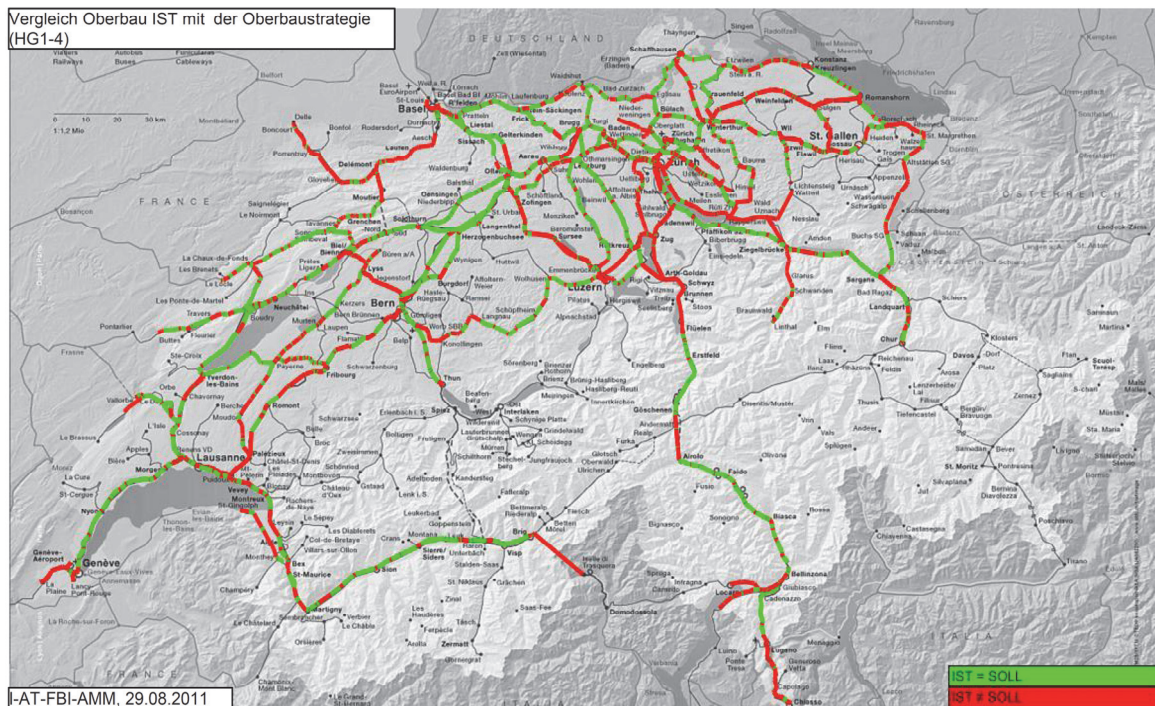


Image 20 : comparaison entre l'état actuel et l'état visé de la stratégie de superstructure voie [Holzfeind (2014)]

6 Analyse d'efficacité des champs de recherche

Ce chapitre a pour objet l'examen des champs de recherche discutés plus haut quant à leur efficacité. Les tendances principales du chapitre précédent sont d'abord brièvement résumées. Ces tendances sont prises en compte dans l'évaluation, par la pondération de la portée des différentes mesures. Un programme de recherche approprié est ensuite élaboré à partir des mesures les plus efficaces.

6.1 Tendances

6.1.1 Transports

- Le transport de voyageurs va augmenter, en raison de la croissance de la population et des besoins accrus de mobilité.
- Le développement économique, l'automatisation et l'augmentation de l'efficacité de production vont mener à une augmentation du volume du trafic de marchandises.
- Les insuffisances au niveau de l'infrastructure et des sillons existants entraîneront une augmentation du volume de trafic nocturne.

6.1.2 Matériel roulant

- Bien que, comparé au transport de voyageurs, le transport de marchandises ne représente qu'une faible proportion de la distance parcourue, il constitue néanmoins la source essentielle des émissions sonores et ce même après l'implémentation complète des semelles de frein en matière composite en 2020.
- Un passage à des freins à disque chez les nouveaux wagons de marchandises contribuerait à considérablement réduire le bruit de ceux-ci. Actuellement, seulement un petit nombre de wagons de marchandises est équipé de freins à disque au moment de leur acquisition et cela souvent que lorsqu'ils sont subventionnés par l'État.
- Une fois que tous les wagons de marchandises sont équipés de semelles de frein en matière composite, les autres sources de bruit deviendront plus apparentes (locomotives, défauts des formes de roues et crissements dans les virages, et autres).

6.1.3 Infrastructure

- La stratégie des CFF vise à utiliser une superstructure composée de traverses en béton sur les tronçons fortement utilisés, en raison de faibles coûts de cycle de vie. Les traverses en béton sont généralement plus bruyantes.

- L'acceptation de murs à des fins de lutte contre bruit baisse, car les riverains souhaitent d'une part être exposés à moins de bruit, mais aimeraient d'autre part bénéficier d'une vue dégagée.
- Les émissions sonores réduites du matériel roulant font apparaître plus fortement les coups isolés et crissements dans les virages, qui causent alors des réactions de réveil.

6.2 Détermination des champs de recherche

Les champs de recherche discutés au chapitre 2 devraient être évalués quant à leur efficacité. Une efficacité élevée résulterait du produit d'un potentiel de réduction sonore estimé et d'une grande diffusion. Image 21 ci-après comprend les différents champs de recherche. Le potentiel de réduction sonore a été estimé.

Le développement continu du système de wagons de marchandises présente le plus haut degré d'efficacité, si l'on prend en compte son potentiel de réduction sonore et sa diffusion. Cela signifie qu'une amélioration du système des wagons de marchandises dans ce champ de recherche permettrait de protéger un grand nombre de personnes. Il existe toutefois également des champs de recherche, comme p. ex. une superstructure optimisée contre le bruit qui ont un potentiel de réduction sonore allant « seulement » jusqu'à 4 dB(A), mais dont la portée touche l'ensemble du réseau ferroviaire. D'autres mesures, comme p. ex. la réduction de crissements dans les virages, présentent un potentiel considérable de réduction du niveau de pression sonore, mais n'ont qu'une signification locale.

Les autres champs de recherche figurent dans l'image ci-après. Ceux-ci seront plus amplement décrits au chapitre suivant. La ligne diagonale dessinée constitue le produit de la portée et du potentiel de réduction sonore estimé et représente donc la limite d'efficacité. Elle peut être déplacée parallèlement et peut entraîner un nombre plus ou moins important de champs, suivant le nombre de champs thématiques souhaités.

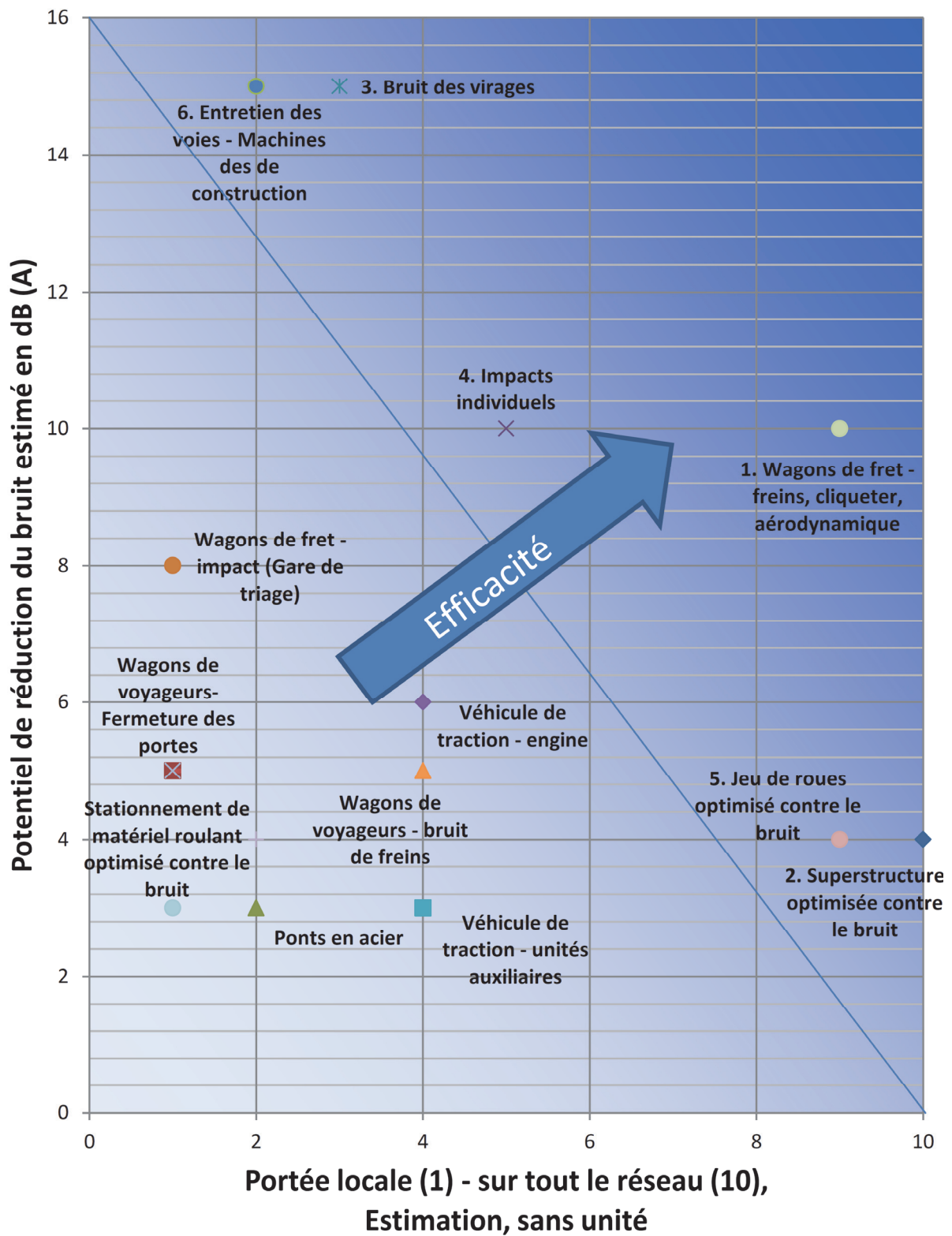


Image 21 : analyse d'efficacité des champs de recherche

7 Programme de recherche

Le présent rapport a pour objectif de déterminer les champs thématiques qui présentent l'augmentation ou charge de bruit la plus significative, afin d'en déduire un programme de recherche pouvant contribuer le plus efficacement à la réduction du bruit. Cette étude a contribué à la mise en évidence de l'état actuel de la recherche et à l'organisation d'un atelier des parties impliquées. Comme le montrent les chapitres respectifs, le thème du bruit est présent aussi bien dans la recherche que dans l'économie et il existe un vaste consensus quant à la nécessité d'agir.

Tous les participants sont conscients qu'un des plus grands atouts des chemins de fer est leur image publique de système de transport durable et écologique. Si le transport de voyageurs sur rails ne devait pas parvenir à continuer d'assurer une prestation durable à haut niveau, l'acceptation actuellement importante de la population baissera et celle-ci donnera la priorité à d'autres modes de transport. Le fort esprit novateur et surtout la vitesse élevée d'implémentation des innovations du transport motorisé individuel (mots-clés électromobilité et conduite autonome) représente une forte concurrence pour le système des chemins de fer.

En particulier la prise en considération des détenteurs de véhicules lors de la rencontre des parties impliquées a mis en évidence le fait que la lenteur à laquelle des mesures de réduction du bruit sur le matériel roulant sont mises en œuvre n'est pas due à la mauvaise volonté éventuelle des acteurs responsables, mais plutôt à la situation économique des transports de marchandises sur rails. Les innovations et techniques qui permettraient de réduire considérablement les émissions sonores ne manquent donc pas. Cela fait des décennies que des bogies et freins à disque silencieux (qui ne rendent pas la surface de roulement plus rugueuse) sont développés et qui, s'ils équipaient tout le parc de véhicules, feraient apparaître une grande partie de la discussion autour du bruit comme obsolète. Rien que la transformation relativement bon marché des wagons à marchandises pour les équiper de semelles LL occasionne déjà des frais d'entretien qui ne peuvent être répercutés sur les clients.

Face à la forte concurrence, les transitaires réagissent très sensiblement aux variations du budget des coûts. La réduction de moitié du prix du pétrole au niveau mondial en 2014 a entraîné l'annulation de commandes de sillons et le report partiel et autant que faire se peut du transport de marchandises sur la route. Les détenteurs de véhicules ont ainsi les mains liées. Les investissements dans les transformations, le remplacement et les nouvelles acquisitions de matériel roulant ont pour conséquence de compromettre la rentabilité ou la compétitivité de l'exploitation.

C'est le rôle de la politique d'assurer durablement les conditions-cadre correspondantes, si l'objectif de transfert lui tient vraiment à cœur. Le développement, avançant grands pas, d'un véhicule autonome aura notamment une grande influence sur le transport de marchandises. Lorsque, d'ici 15 ans, les marchandises seront transportées de A à B de manière autonome, automatique, silencieuse et efficace, l'assemblage de trains dans le transport de wagons à charges simples avec attelages à vis fera figure d'anachronisme qui réjouira peut-être les nostalgiques, mais ne représentera plus un concurrent sérieux dans le marché des transports. Afin que le fret ferroviaire reste compétitif, il faut non seulement des innovations, mais également des conditions cadres pour favoriser l'implémentation de mesures.

Il existe néanmoins de nombreux domaines dans lesquels la poursuite de la recherche serait judicieuse. La plupart des approches visent une réduction du bruit à long terme (p. ex. superstructure silencieuse, développement continu du système wagons de marchandises). Il ne faut pas s'attendre à une recherche rapide et bon marché capable d'amener une réduction du bruit. Les champs de recherche sont présentés par ordre d'efficacité afin de protéger le plus grand nombre possible de personnes concernées du bruit.

La durée indiquée ainsi que les coûts sont des estimations et présentent donc un grand niveau d'incertitude. Elles servent à donner une idée approximative et se fondent sur les réflexions des auteurs quant à l'étendue des investigations à prévoir. En ce qui concerne le potentiel de réduction du bruit, il faut absolument éviter de simplement additionner les valeurs de réduction des différentes mesures proposées, puisque l'échelle des décibels est logarithmique.

7.1 Développement continu du système global pour wagons de marchandises

Comme déjà expliqué dans les chapitres précédents, il existe déjà une vaste gamme de mesures de rééquipement des wagons de marchandises. L'utilisation de ces mesures comporte toutefois généralement des inconvénients, qu'il s'agisse de coûts d'investissement plus élevés, LCC plus élevé, prise de poids, obstacles à l'entretien, etc. L'ancien système limite l'optimisation acoustique du wagon de marchandises. Il serait donc judicieux de repenser totalement le système. L'acoustique ne sera alors qu'un aspect parmi d'autres. Celui-ci ne devra toutefois pas être négligé si le wagon de marchandise veut être durable. L'application de nouvelles technologies échoue souvent en raison du manque d'alimentation énergétique des wagons de marchandises.

L'initiative d'avenir 5L se penche notamment sur des concepts de développement continu de wagons de marchandises. Le développement d'un prototype n'est toutefois pas encore en vue pour l'instant. Dans le domaine de l'acoustique, tout tourne autour de l'optimisation acous-

tique des composantes de systèmes. Un objectif exigeant et durable devrait être défini en matière d'émissions sonores. La compatibilité avec l'ancien système doit alors être assurée. Le nouveau système ne doit pas être moins fiable ou robuste que l'ancien. La rentabilité doit être prise en compte et les coûts probablement plus élevés doivent être compensés par des frais d'exploitation plus bas. L'optimisation acoustique doit entraîner une augmentation du prix du wagon de marchandise de 5 % au maximum. Les approches d'optimisation acoustique concernent notamment le jeu de roues (voir chapitre 0), le bogie, le découplage de la structure, des freins à disque compacts avec dispositif antiblocage ainsi qu'un meilleur aérodynamisme, afin de réduire la résistance à l'avancement et le bruit aérodynamique, notamment à des vitesses élevées.

Il faudrait s'occuper non seulement du bruit, mais également de l'optimisation de l'utilisation énergétique, de l'usure, du poids, de l'exploitation, etc. Les idées pour un wagon de marchandises durable prévoient notamment des roues plus petites, des vitesses plus élevées, des wagons de marchandises plus longs, une alimentation énergétique pour équipements de télématique (suivi des wagons et chargements, entretien orienté vers l'état réel), etc.

Sur la base de la recherche déjà effectuée, une recherche et une vaste discussion des concepts (généraux) élaborés jusqu'ici se présente dans un premier temps. Pour cela, l'ensemble des acteurs participant à la chaîne de transport devrait exprimer leurs intérêts.

Durée [années]	Portée	Potentiel de réduction maximal	Coûts
15	Sur tout le réseau	10 dB	75 millions CHF ⁶

7.2 Superstructure optimisée en termes de LCC, bruit et de secousses.

La stratégie de superstructure des CFF prévoit clairement d'équiper à l'avenir les tronçons principaux et donc les plus utilisés de traverses en béton, dans la mesure où cela n'est pas déjà le cas. Sous l'angle des coûts de cycle de vie (LCC), il s'agit-là de la superstructure la plus rentable pour les tronçons fortement utilisés. Les effets sur le bruit et les secousses ne sont

⁶ On part du principe que 15 000 wagons de marchandises suisses existants devront être remplacés par les nouveaux modèles optimisés d'un point de vue acoustique. Une augmentation maximale de 5 % du prix neuf actuel (100 000 CHF) d'un wagon de marchandises est prévue.

pas pertinents pour la stratégie de superstructure. Seule la prise en considération des 3 facettes peut toutefois amener une solution optimale. Si, comme c'est actuellement le cas, seuls les coûts de cycle de vie sont pris en compte, la superstructure entraîne des émissions sonores et des secousses plus importantes. Tandis que les tentatives de maîtriser le problème à l'aide d'absorbeurs d'âme du rail, d'écrans d'âme du rail, de murs anti-bruit (bas), de couches sous ballast, etc. ont pour effet de baisser les émissions, les LCC de la voie (et des éventuelles constructions anti-bruit) augmentent considérablement.

L'objectif de la recherche devrait être une superstructure silencieuse et sans vibrations avec des LCC faibles. Étant donné que la voie représente la majeure partie des immobilisations des exploitants d'infrastructure, une recherche exhaustive et à long terme est dans l'intérêt de toutes les entités participantes. Il faut une analyse systématique des différentes composantes de superstructure (profil de rail, attache, couche, type et forme de la traverse en béton, semelage des traverses, etc.) et de l'entretien (bouchage et meulage) selon les règles de bonne pratique scientifique.

Souvent, plus d'un seul paramètre différait lors des essais faits jusqu'ici (p. ex : semelage de traverses ou autres couches, mais à des endroits de mesure avec des terrains différents). Les conclusions faites concernant l'efficacité en termes de bruit et secousses n'étaient donc pas transférables, voire même contradictoires par rapport à d'autres emplacements et mesures). Cela était le plus souvent dû au temps et moyens financiers limités à disposition, forçant une conclusion « rapide » quant à l'efficacité de telle ou telle mesure.

Il serait judicieux, dans ce contexte, de disposer d'une association internationale de recherche qui coordonnerait et évaluerait de manière centralisée les essais et mesures. Ce serait le seul moyen d'obtenir des conclusions scientifiques fiables, qui décriraient les interactions complexes entre les composants de superstructure. L'influence des différents matériels roulant ne devrait alors pas non plus être négligée. La démarche suivante serait judicieuse :

mandater un coordinateur central auprès d'une instance de recherche nationale. En cas d'insécurité de planification, cela permettrait d'assurer une qualité élevée de recherche. L'échange avec les chemins de fer permet de former un groupement de recherche national qui coordonne, harmonise et évalue la recherche. Cette instance serait également responsable pour toute la Suisse de l'échange international.

Les parties impliquées (EVU, EIU, offices fédéraux, etc.) sont régulièrement informées quant à l'état actuelle de la recherche et invitées à participer à l'échange. Il faut prendre en compte tous les facteurs d'influence et déterminer leur influence et interactions (couches sous ballast, USP, traverses, terrain, couches, profil de rail, rugosité du rail, matériel roulant).

Durée [années]	Portée	Potentiel de réduction maximal	Coûts
8 – 10	Sur tout le réseau	3-5 dB	20 millions CHF

7.3 Réduction des crissements dans les virages par ajustement radial des jeux de roue

Les crissements tonaux dans les virages dans les courbes à faible rayon constitue une grande nuisance, surtout dans le transport de voyageurs mais aussi dans le transport de fret, comme le montre le chapitre 2.2.1. En Suisse, cette problématique se présente surtout dans les tronçons secondaires très sinueux. Les mesures de réduction peuvent concerner aussi bien le matériel roulant que l'infrastructure. De manière générale, il est judicieux d'intervenir dans le processus de génération sonore le plus tôt possible, ce qui signifie que le mieux est d'éviter ou de diminuer la génération elle-même. Les crissements dans les virages n'apparaissent qu'à partir d'un certain angle de contact entre la roue et le rail. L'ajustement radial des jeux de roue dans les courbes est une approche efficace pour éviter les crissements dans les virages, puisqu'elle permet d'éviter le dépassement de l'angle de contact critique. Un autre avantage de l'ajustement radial dans les courbes est la réduction de la résistance au roulement et donc de l'usure roue-rail et de la consommation d'énergie. Différents systèmes actifs et passifs d'ajustement radial ont déjà été développés. Ceux-ci ne sont toutefois pas très demandés, en raison du manque d'incitations. Le besoin de recherche est surtout vu dans la comparaison des technologies existantes, leur évaluation économique, l'examen de leur applicabilité au matériel roulant respectif et le développement d'incitations.

- Recherche de technologies possibles et de leur applicabilité sur des véhicules existants ou neufs.
- Examen des technologies au moyen de simulations numériques pour déterminer l'efficacité en termes de réduction des crissements dans les virages et de potentielles économies énergétiques et réduction de l'usure. Prise en considération du comportement

en présence de forces longitudinales (forces de traction et de freinage) en vue d'éviter les faux réglages.

- Évaluation économique des technologies examinées.
- Recommandation d'une / de plusieurs technologies adaptées sur la base de résultats de simulation et de l'évaluation économique.
- Installation des technologies recommandées dans des véhicules d'essai et examen de leur utilité en termes de réduction des crissements dans les virages.
- Élaboration d'incitations et/ou obligations en vue d'une application effective des technologies, p. ex. système de prix de sillons dépendant de l'usure, valeurs-limites pour les crissements dans les virages, programmes de transformation, etc.

Durée [années]	Portée	Potentiel de réduction maximal	Coûts
5	Local	15 dB	4-12 millions CHF ⁷

7.4 Réduction des secousses individuelles

Les secousses les plus diverses, pouvant avoir un grand effet négatif sur la perception du bruit ferroviaire, surviennent en masse précisément dans les zones à forte habitation des gares. Il s'agit de secousses d'isolation pour la signalisation de la voie ferrée dans les circuits de voie, de lacunes de cœurs d'aiguilles, ainsi que de secousses intermittentes en raison de faibles rayons. De nuit, le seuil de réveil n'est pas dépassé par les bruits de roulement purs, qui augmentent progressivement sur un tronçon normal, avant de diminuer à nouveau, mais ce sont les secousses individuelles qui dépassent le seuil de réveil.

Plusieurs projets de recherche sont actuellement en cours à ce sujet (projet CFF « Weiche », EPF Zurich « lückenlos verschweisste Gleise in engen Bögen »), qui devraient être soutenus et renforcés. Par ailleurs, les aiguilles de protection pourraient être remplacées par des dispositifs anti-déraillement, ce qui suppose toutefois des changements normatifs. Une recherche correspondante devrait être nécessaire ici, afin de justifier une adaptation des normes. Les démarches suivantes devraient être entreprises :

⁷ On prévoit des coûts supplémentaires de 400 CHF par bogie.

- Soutien financier ou création d'une nouvelle instance, qui coordonne l'élimination de secousses individuelles auprès d'une entreprise d'infrastructure ferroviaire.
- Reconnaissance de la secousse individuelle en tant que problème dû au seuil de réveil.

Durée [années]	Portée	Potentiel de réduction maximal	Coûts
10	Local	10 dB	2 Mil. CHF

7.5 Jeu de roues applicable dans la pratique et optimisé contre le bruit

Pour les jeux de roues, les exigences de sécurité sont critiques, car elles ne peuvent pas être exécutées de manière redondante et un manquement entraînerait un déraillement. Pour pouvoir être autorisés, les développements doivent respecter les normes et exigences de rigidité en vigueur. Lors du développement des jeux de roues, les aspects tels que LCC, usure et fatigue sont au premier plan (p. ex. [Ghidini, A ; Durif, M (2015)]). L'acoustique n'est en revanche pas prise en compte. Une optimisation systématique des roues sous l'angle acoustique semble toutefois judicieux, puisque les jeux de roues sont facilement remplaçables, que le remplacement n'entraîne pas d'obstacles à l'entretien et qu'aucune composante supplémentaire n'est introduite dans le système.

Le problème de projets de recherche relatifs à l'optimisation acoustique de jeux de roues résidait jusqu'ici souvent dans le fait que les résultats n'étaient pas applicables. Une nouvelle investigation de roues optimisées contre le bruit devrait reposer sur les résultats et simulations recueillis jusqu'ici, sans perdre de vue l'aspect pratique. L'applicabilité et la possibilité d'homologation effectives doivent avoir au moins la même priorité que l'effet de réduction.

Les points de vue sous lesquels la roue peut être optimisée acoustiquement sont :

- Excitabilité plus faible :
augmentation de l'impédance d'entrée par augmentation de la rigidité. Une augmentation de la rigidité déplace par ailleurs vers le haut les fréquences de résonance, vers une bande de fréquences moins notable.
- Amplitudes d'oscillation plus faibles :
 - Optimisation de la forme de roue. Une section symétrique entraîne un couplage plus faible des modes.

- Amortissement de l'oscillation, p. ex. revêtement amortissant.
- Diffusion plus faible
- Roues perforées ou des roues à rayons (surface réfléchissante réduite et court-circuit acoustique dans les basses fréquences). L'évacuation de la chaleur lors du freinage doit être assurée.
- Diamètre de roue réduit (surface réfléchissante réduite). Les modes sont par ailleurs déplacés vers une bande de fréquence plus élevée. Il faut veiller à respecter la charge thermique lors du freinage. L'utilisation croissante du système de freinage à récupération pourrait constituer une solution. Pour les roues plus petites, l'évolution de la rugosité et la polygonation devraient être examinées. Les mesures fortement disparates du bruit de roulement de véhicules de CR indiquent des grandes différences entre les roues. Les répercussions des tensions mécaniques plus élevées en raison de la surface de contact réduite de la roue sur la solidité et la fatigue du matériau de la roue et du rail pourraient également faire l'objet d'une recherche.
- Protection de la roue, p. ex. par des disques de frein de roues.

Estimation du temps nécessaire :

Modélisation de jeux de roues optimisés contre le bruit, variation de paramètres : 3 a

Fabrication et examen de prototypes : 2 a

Autorisation d'un / de plusieurs jeux de roues appropriés : 2 a

Outre la praticabilité, la question des frais est également pertinente. Le prix d'achat des nouveaux jeux de roues ne devrait pas être considérablement plus élevé que celui des jeux de roues conventionnels. Une introduction obligatoire pour les nouveaux wagons et un échange obligatoire pour les véhicules existants pourrait être une alternative éventuellement envisageable. Il faut veiller à ce que les LCC du nouveau jeu de roues ne soient en aucun cas plus élevés que ceux des jeux de roues actuellement utilisés.

Durée [années]	Portée	Potentiel de réduction maximal	Coûts
7	Sur tout le réseau	4 dB	12 millions CHF ⁸

7.6 Innovation dans les machines de construction ferroviaire

Un argument récurrent dans le secteur des chemins de fer prétend que le bruit de machines de construction de voie n'est pas pertinent, puisqu'il a tellement rarement lieu au même endroit. Cet argument n'est toutefois pas pertinent, puisque même si l'événement est rare, il s'étend sur une longue période (suivant la machine de construction de voie, entre 30 minutes et 5 heures) et survient de nuit de surcroît. C'est pourquoi la charge émanant de machines de construction de voie est très importante.

Les émissions sonores des machines de construction ferroviaire ne sont actuellement limitées que sur les passages supérieurs. Ils y sont assimilés aux véhicules les plus bruyants, soit les locomotives diesel. Dans le mode de travail, ce sont surtout les associations professionnelles qui s'efforcent de rendre les conditions de travail plus tolérables à l'aide de protection acoustique personnelle, le plus souvent de casques anti-bruit. D'un point de vue technique, la production de machines de construction ferroviaire est le plus souvent dénuée de mesures de réduction du bruit. En termes de réduction du bruit, les nouvelles machines de construction ferroviaire sont au niveau des machines de construction routière des années 50 et 60. La combinaison de composants standard avec l'hydrostatique diesel, notamment dans le châssis et dans la structure, occasionne souvent un important bruit inattendu. Les connaissances en matière d'acoustique sont faibles, aussi bien du côté des fabricants que des clients (entreprises de construction de voie, privés ou partiellement encore sociétés de chemins de fer elles-mêmes, p. ex. RhB). Les machines elles-mêmes atteignent souvent des volumes de plus de 100 dB(A) en marche. La vitesse de travail est souvent faible, les machines de nettoyage de ballast opérant typiquement entre 60 à 100 m/h. Dans la phase de montage et de démontage, la machine peut être utilisée jusqu'à 1 h au même endroit.

Un autre problème est la perception des dispositifs d'alarme acoustiques pour les collaborateurs. En raison du bruit élevé des machines et des casques antibruit, le dispositif d'alarme acoustique doit être particulièrement perçant et donc bruyant.

⁸ L'on prévoit 15 000 wagons de marchandise et des coûts maximum de 200 CHF par jeu de roues pour une optimisation acoustique.

Il existe déjà des versions de machines de bouchage moins bruyantes au Japon, mais qui ne peuvent être utilisées sans modifications en Europe, en raison de la différence des gabarits et fonctions. L'isolation sonore permet de réduire le niveau de pression sonore à 70 dB(A) à une distance de 25 m.

Il existe également des machines de compactage électriques plus silencieuses. La ligne de contact de la voie ne peut toutefois pas toujours être utilisée comme source d'énergie, puisque celles-ci sont souvent désactivées lors d'arrêts de voies, lorsque d'autres travaux nécessitant une désactivation sont effectués sur des tronçons voisins.

Des recherches sont nécessaires aussi bien en matière de réduction sonore de la technologie de propulsion, le plus souvent diesel-hydrostatique, que des étapes de travail, tels que le bourrage, le tamisage de ballast, l'aménagement du ballast à l'aide de chaînes de convoyage, le compactage, etc. Les premiers efforts de recherche devrait permettre d'atteindre une réduction de 10 dB(A) des machines les plus bruyantes (machines de nettoyage de ballast et de bourrage). L'utilité de la réduction sonore des machines de construction ferroviaire est encore renforcée par la réduction potentielle du volume sonore des dispositifs d'alarme mentionnés plus haut.

Durée [années]	Portée	Potentiel de réduction maximal	Coûts
5	Local	15 dB	4-30 millions CHF ⁹

⁹ En partant d'une utilisation d'environ 20 machines de construction de voies ferrées sur le réseau suisse, une optimisation acoustique occasionnerait des coûts supplémentaires de CHF 1,5 millions par machine.

8 Bibliographie

- Adler, K et Hauff, C et Pardey, A (2015) Gleisbaustellensicherung – aktuelle Entwicklungen, Eisenbahningenieur – EI 05/2015, p. 18
- ARE (2012) : Ergänzungen zu den schweizerischen Verkehrsperspektiven bis 2030, Berne
- Attinger, R. (2013) Besprechung « Monitoring Eisenbahnlärm Konzept Schweiz », présentation, Office fédéral des transports OFT, Berne.
- Barth, M et Presle, G (2009) Projekt Low Noise-Train – Ergebnisse und Ausblick, ETR novembre 2009
- Bopp, B. (2014) Das Verhalten von lückenlos verschweissten Gleisen (LVG) in engen Radien der Meterspur, dissertation, EPF Zurich
- OFT (2015) Documentation des bases de planification PRODES étape d'aménagement 2030 <http://www.bav.admin.ch/fabi/04578/?lang=de>
- BMVBS (2013) Lärmschutz im Schienenverkehr – Alles über Schallpegel, innovative Technik und Lärmschutz an der Quelle, Berlin
- Office fédéral des transports OFT (2015) Suivi de l'évolution du bruit ferroviaire – rapport annuel 2014
- Czolbe, C. et P. Huber (2014) Lärmprognosen mit messtechnischem Input aus dem Oberbau.
- DB Netze (2012) Schlussbericht : Innovative Massnahmen zum Lärm- und Erschütterungsschutz am Fahrweg.
- EU (2008) In-field measurements of the influence of voestalpine VA71b rail on railway noise, EU-Forschungsrahmenprogramm No. FP6-516420
- CoEu (2003) Avis sur les stratégies européennes et les priorités en matière de réduction du bruit ferroviaire, Commission européenne 2003
- Faigle (2014) : <http://www.faigle.com/produkte-loesungen/branchenloesungen/waggonbau-schienenfahrzeuge/buchsen-zum-bremsgestaenge-von-drehstellen-fuer-gueterwaggons.aspx>, accès : 22.04.2015
- Fendrich, L. (2013) Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Springer Vieweg
- Gessner, R (2002) Schienenverkehrslärm – Senkung der Rad/Schiene-Geräusche; EI – Eisenbahningenieur (53) 23-25.
- Ghidini, A; Durif, M (2015) In search of longer wheel life, Railway Gazette International, Juli 2015, p.60-61
- Hecht, M et Czolbe, C (2008) BMU-Projekt Lärminderungsmaßnahmen an drei Großdiesellokomotiven BlueTiger, ZEVrail Glasers Annalen 132 (2008), p. 11-12
- Hecht, M et Zogg, H (1995) Lärmdesign moderner Triebfahrzeuge am Beispiel der Lok2000-Familie

- Hemsworth, B et Jones R R K (2000) Silent freight Project – Final report
- Infras (2011) Effets de la mise en service de la NLFA sur l'atteinte de l'objectif du transfert du trafic marchandises, sur mandat de l'OFT, Berne / Zurich
- Infras/OFC (2012) Analyse et pronostic de marché du fret ferroviaire 2030, sur mandat de l'UTP, Berne/Zurich
- IWF (2015) Optimierung der Schienepflege zur Reduktion der Lärmemissionen im Schweizer Eisenbahnnetz, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, EPF Zurich
- Johannsen, K (2005) Der Einfluss der Oberflächenimpedanz auf das Abstrahlverhalten eines Schürze-Niedrigschallschirm-Systems, dissertation TU Berlin
- Frein Knorr (sans date) compresseur sans huile : <http://www.knorr-bremse.com/media/documents/railvehicles/de/09-P-1181-DE-01neu.pdf>, accès : 07.05.2015
- Krüger, F (Hrsg.) (2013) Kurvengeräusche – Messung, Bewertung und Minderungsmaßnahmen, Éditions Erich Schmidt
- Kure, G; Skiller, J; et al. (2007) Gigabox – Integration der Gummifeder mit hydraulischer Dämpfung in das Radsatzlagergehäuse; 37e congrès « Véhicules modernes sur rails »
- Lucchini RS (2015) The low noise wheels : http://www.lucchinirs.it/media/prodotti_innovativi/The_low_noise_wheels.pdf, accès : 28.04.2015
- Lutzenberger, S et Gutmann, C (2013) Ermittlung des Standes der Technik der Geräuschemissionen europäischer Schienenfahrzeuge und deren Lärmmindeungspotenzial mit Darstellung von Best-Practice-Beispielen
- Marshall, T et Fenech, B A et Greer, R (2013) Derivation of Sound Emission Source Terms for High Speed Trains Running at Speeds in Excess of 300 km/h, Proceedings of the 11th International Workshop on Railway Noise, Udevalla, Sweden 2013
- Matisa (2015) http://www.matisa.ch/en/matisa_b20.html, date d'accès : 24.07.2015
- Prose (2015) Lärmauswirkung von Unterschottermatten, Bericht 04-03-01039
- STARDAMP (2015) Starnberg, M., Asmussen, B. et Stangl, M. STARDAMP – Ein einfaches Laborverfahren zur Bewertung der Wirkung von Schienendämpfern, ZEVrail 139 (2015), p. 276 ss.
- Thompson, David (2009) Railway Noise and Vibration, Elsevier Verlag
- STI Bruit (2014) ORDONNANCE (UE) n° 1304/2014 DE LA COMMISSION du 26 novembre 2014 relative à la spécification technique de l'interopérabilité du système partiel « véhicules — bruit » modifiant la décision 2008/232/CE et abrogeant la décision 2011/229/UE
- UIC B 126/RP 43 (2013) Braking Questions – Synthesis paper on the EuropeTrain operation with LL-brake blocks – Management Summary

Voith (2012) Vorsprung durch Forschung. Das Projekt Ecoquest, brochure,
http://www.voith.com/en/1962_d_2012-07-31-g2283-ecoquest_d_screen.pdf, accès
06.05.2015

Wiemers, M (2004) Einfluss von Steifigkeit und Dämpfung bei Eisenbahnrädern,
insbesondere von Güterwagenrädern, auf die Schallabstrahlung, dissertation TU Berlin