

# **1 Solutions de rentabilité dans le système véhicule-voie ferrée**

*Par Markus Barth (RAILplus SA) avec compléments d'Yves Putallaz (IMDM)*

## **1.1 Remarques liminaires concernant la rentabilité globale du système**

Le mandat système temporaire «Interaction véhicule-voie ferrée métrique» confié par l'OFT a pour principal objectif de «... mettre à la disposition des entreprises de chemin de fer à voie métrique, gestion coordonnée et intégrée des connaissances liées à l'interaction à l'appui, des solutions leur permettant d'améliorer de manière significative la rentabilité globale du système véhicule-voie ferrée. Il convient de réduire les coûts dans les sous-systèmes de l'infrastructure et du transport tout en évitant de futures augmentations dans ce contexte.»

Le mandat système a maintenant absorbé près d'un tiers du temps imparti pour l'analyse de la situation réelle, la compilation des connaissances disponibles et la révélation des premières solutions.

L'article ci-dessous doit en ce sens dégager une synthèse facile à lire permettant d'identifier les leviers déterminants, et déjà connus aujourd'hui, de la rentabilité globale du système véhicule-voie ferrée et de révéler des solutions d'après les connaissances disponibles.

Afin de pouvoir saisir et situer le contexte, il convient d'obtenir préalablement une vue des mécanismes de financement, des enjeux techniques et des principes de gestion d'actifs (inhérents aux véhicules et à la voie ferrée).

## **1.2 Financement des chemins de fer à voie métrique (sous-systèmes de l'infrastructure et du matériel roulant)**

Le présent chapitre récapitule les principaux aspects du financement des chemins de fer à voie métrique. Le module de connaissances «Le financement des véhicules et des voies» [366] permet d'examiner en détail la question.

### **1.2.1 Financement du trafic (matériel roulant inclus)**

Les commanditaires du trafic régional voyageurs sont la Confédération et les cantons. L'offre de transport est définie par les commanditaires et les indemnités nécessaires sont négociées avec eux. Tous les cantons disposant d'un point d'arrêt sur leur territoire participent au financement d'une ligne du TRV. L'OFT prend en charge une partie des indemnités pour chaque canton et participe ainsi à la commande du TRV.

Les commanditaires paient sous forme d'indemnités les coûts qui ne peuvent pas être couverts par les produits de la clientèle. C'est la raison pour laquelle l'objectif dans le TRV est d'atteindre un résultat équilibré sur la base d'une précision de planification aussi élevée que possible. Les bénéfices ne sont pas l'objectif du compte prévisionnel, sinon les pouvoirs publics devraient payer des indemnités plus élevées.

Les commanditaires versent les indemnités au titre de la convention d'offre TRV sur la base d'une offre et non pas l'indemnité réellement nécessaire en fin d'année. Si les coûts et les recettes s'écartent de l'offre (prévisionnelle), il en résulte des pertes et des bénéfices. Les pertes et les bénéfices sont affectés aux réserves légales (art. 36 LTV) et ainsi compensés.

Sur la base du calcul rétrospectif de l'année précédente, une offre est établie pour la prochaine période d'horaire (deux ans) et transmise en avril. L'offre est négociée et les commanditaires déterminent l'étendue de l'offre jusqu'en août. Ensuite, l'entreprise établit l'offre finale pour les indemnités selon l'offre déterminée.

Les investissements entraînent des coûts subséquents, d'exploitation, d'emprunt et d'amortissement par exemple, qui sont intégrés dans la convention d'offre avec les commanditaires et qui doivent être payés sous forme d'indemnités. C'est la raison pour laquelle il existe des directives à respecter lors de la mise en œuvre. Si les directives ne sont

pas respectées, l'entreprise n'est dans le pire des cas pas indemnisée pour les coûts subséquents.

Tous les investissements dans les véhicules doivent être approuvés par les commanditaires. Ils font partie intégrante du plan d'investissement obligatoire à remettre dans le cadre de la convention d'offre. À la demande des commanditaires, une approbation explicite est nécessaire en complément pour les gros investissements dans le matériel roulant existant ou les ateliers. Lorsqu'il s'agit de nouveau matériel roulant, une approbation explicite est toujours nécessaire pour l'acquisition de moyens d'exploitation.

Dans le TRV, les ETF financent les investissements par des prêts sur le marché des capitaux. Les commanditaires du TRV paient les coûts subséquents liés aux investissements, pour autant qu'une approbation ait été accordée conformément à l'art. 19 OITRV. L'investissement est remboursé avec les amortissements annuels pendant toute la durée d'utilisation de l'installation via les indemnités. Les prêts sur le marché des capitaux entraînent des frais d'intérêts. Les frais d'intérêts peuvent également être revendiqués comme des indemnités. Les prêts sont remboursés avec les fonds d'amortissement.

#### **Conclusion 1**

En tant que commanditaires du TRV, la Confédération et les cantons financent les coûts subséquents non couverts des acquisitions de véhicules et de la maintenance tout au long du cycle de vie. Ils financent donc directement les coûts d'acquisition plus élevés dus à des conceptions de véhicule préservant la voie ferrée et les coûts de maintenance supplémentaires dus à une interaction véhicule-voie ferrée non optimale (usure).

### **1.2.2 Financement de l'infrastructure ferroviaire**

L'infrastructure ferroviaire est entièrement financée par la Confédération via le fonds d'infrastructure ferroviaire (FIF). Le FIF est alimenté en grande partie par l'impôt fédéral. Chaque canton verse des contributions forfaitaires au FIF.

Le FIF finance le maintien de la substance, l'exploitation et l'aménagement de l'infrastructure ferroviaire.

Donc en plus de la voie ferrée, l'infrastructure comprend l'ensemble des constructions, installations et équipements qui doivent être utilisés en commun dans le cadre de l'accès au réseau.

Le FIF paie sous forme d'indemnités les coûts qui ne peuvent pas être couverts par les recettes de l'infrastructure. C'est la raison pour laquelle l'objectif dans l'infrastructure est d'atteindre un résultat équilibré sur la base d'une précision de planification aussi élevée que possible. Les bénéfices ne sont pas l'objectif du compte prévisionnel, sinon les pouvoirs publics devraient payer des indemnités plus élevées. Le FIF paie les indemnités d'exploitation de l'infrastructure sur la base de la convention sur les prestations conclue et non pas l'indemnité réellement nécessaire en fin d'année. En revanche, le FIF paie les amortissements et les investissements non activables réellement encourus en fin d'année. Si les coûts et les recettes d'exploitation s'écartent du plan, il en résulte des pertes et des bénéfices. Les pertes et les bénéfices sont affectés aux réserves légales (art. 67 LCdF) et ainsi compensés.

Les fonds d'investissement proviennent du FIF et font partie des investissements quadriennaux du gestionnaire d'infrastructure (GI) dans le cadre d'une convention sur les prestations conclue avec la Confédération.

Le gestionnaire d'infrastructure reçoit des indemnités d'amortissement pour les installations existantes et des indemnités pour les investissements non activables (INA) issus de projets. Si les besoins en investissement sont supérieurs aux amortissements, des «prêts conditionnellement remboursables» sont accordés en complément par le FIF.

Les investissements sont financés par le FIF au moment où ils sont réalisés. Les GI ne peuvent pas financer l'infrastructure ferroviaire en dehors du FIF. Les investissements doivent être inclus dans la planification des investissements qui fait partie de la convention sur les prestations ou dans une modification de programme.

En principe, les prêts du FIF ne doivent pas être remboursés et il n'y a pas de frais d'intérêt. En cas de désaffectation ou d'aliénation, les prêts doivent toutefois être remboursés (art. 29 LSU).

Les investissements et les coûts d'exploitation doivent être intégrés en temps voulu dans la convention sur les prestations. Cela peut être jusqu'à cinq ans avant la date concernée. Les fonds pour la convention sur les prestations 2025-2028 sont fixés à l'automne 2023.

En cas d'adaptations du plan d'investissement pendant la durée de validité de la convention sur les prestations, des adaptations du programme doivent être convenues en temps utile. Elles ne doivent pas entraîner une augmentation du montant d'investissement convenu sur l'ensemble de la période de validité de la convention sur les prestations.

Les adaptations des coûts d'exploitation pendant la durée de validité de la convention sur les prestations entraînent une perte (coûts supplémentaires) ou un gain (coûts moindres). Ces coûts ne peuvent être adaptés que dans le cadre de la prochaine convention sur les prestations.

### **Conclusion 2**

La Confédération finance les coûts non couverts de l'infrastructure ferroviaire tout au long du cycle de vie. Elle finance donc les coûts d'acquisition plus élevés de la voie ferrée du fait d'une approche fondée sur le cycle de vie (meilleure qualité initiale) de même que les coûts de maintenance supplémentaires dus à une interaction véhicule-voie ferrée non optimale (usure) ou à un renouvellement tardif associé aux durées de vie plus courtes induites par un entretien insuffisant (amortissements).

### **1.2.3 Contraintes souveraines**

Depuis les années 1970, la stratégie de l'UE consiste à favoriser la modernisation des chemins de fer en tentant d'ouvrir à la concurrence des structures d'entreprise se distinguant essentiellement par leur caractère de monopole en raison de leur intensité capitalistique et de leur poids économique national. Cette stratégie a engendré, à plus ou moins grande échelle selon le pays, une refonte du secteur ferroviaire dont les principales tendances sont les suivantes:

- séparation des gestionnaires d'infrastructure des entreprises de transport ferroviaire gérée avec plus ou moins de rigueur selon le pays;
- délocalisation des services proches de l'exploitation tels que la fabrication des aiguilles (Suède), la maintenance de l'infrastructure (Pays-Bas comme exemple extrême) et la maintenance des véhicules.

Cette partition vise à isoler les activités de faible intensité capitalistique aux spécifications plus simples, à les ouvrir à la concurrence et à inciter le secteur ferroviaire à fournir des prestations plus économiques. Aucune mesure visant à introduire des associations systémiques techniques spécifiques n'a été prévue dans le cadre de la privatisation. Certains acteurs augmentent de ce fait leur rentabilité au détriment des autres, notamment des bailleurs de fonds publics. La somme des optima particuliers n'étant pas égale à l'optimum global, le comportement économique individuel des acteurs ne tend pas à l'optimisation de l'ensemble du système ferroviaire. Cette problématique se ressent en particulier dans l'interaction entre véhicule et voie ferrée et se renforce sous l'effet de connaissances techniques qui peuvent s'avérer lacunaires. Les premiers mécanismes de pilotage tels que le système de tarification des sillons en fonction de leur usure ont été mis en place sur voie normale, le but étant d'intervenir sur le plan réglementaire.

En Suisse, les chemins de fer à voie métrique se caractérisent avant tout par un grand nombre d'entreprises intégrées avec des réseaux pour la plupart non reliés entre eux et des flottes de véhicules plus ou moins homogènes. La diversité de la voie métrique se reflète également dans les spécificités des réseaux concernant la topographie, leur principale finalité (trafic urbain, tourisme ou desserte de base) et donc leur poids économique national. Les technologies utilisées à cet égard sont donc très variées (succession des trains à une cadence rapide, fortes accélérations, rayons étroits, déclivités élevées, voies à crémaillère, etc.). Il

existe en outre un certain nombre de différences technologiques héritées du passé qui rendent difficile l'utilisation conjointe de solutions par différents chemins de fer à voie métrique, lesquels ont tous en commun la séparation financière du transport et de l'infrastructure (même au sein des entreprises intégrées). Les différents mécanismes de financement décrits aux points 2.1 et 2.2 impliquent aussi diverses situations financières initiales au sein des entreprises du secteur à voie métrique. Les transports sont soumis à une pression financière de plus en plus forte, en particulier sur les lignes peu empruntées. Ces dernières années, les commandes de matériel roulant sont devenues plus coûteuses en raison des exigences accrues et de la situation de monopole sur le marché des fournisseurs. Les hautes exigences en matière de performance et les frais de personnel élevés en entreprise entraînent encore un durcissement de la pression des coûts.

Dans le secteur de l'infrastructure, le financement de l'infrastructure ferroviaire (FIF) est un instrument qui permet jusqu'à aujourd'hui un financement complet suffisant, voire approprié de la voie ferrée. Il convient de mentionner en l'occurrence que l'investissement (renouvellement total de la voie ferrée) est en pratique mieux financé que l'exploitation de l'infrastructure (compte de résultat avec travaux de maintenance tels que bourrage, meulage, etc.). Cela peut empêcher l'atteinte de la durée d'utilisation prévue au cours du cycle de vie en raison d'un entretien insuffisant et nécessiter la prise en considération d'un réinvestissement anticipé.

### **Conclusion 3**

En plus du TRV et de l'infrastructure, la Confédération finance au total près de trois quarts des coûts non couverts pour les chemins de fer à voie métrique. Voilà pourquoi le plus grand intérêt se manifeste en la matière pour une optimisation du système global grâce à une approche fondée sur le cycle de vie.

#### **1.2.4 Point de vue des gestionnaires d'infrastructure**

Les gestionnaires d'infrastructure (GI) visent l'équilibre entre les recettes et les coûts à court, moyen et long termes:

- d'une part, les recettes découlant de la convention sur les prestations et de la vente de sillons;
- d'autre part, les coûts de l'exploitation, de la surveillance, de la maintenance et du renouvellement de l'infrastructure.

L'activité de gestion de l'infrastructure étant généralement largement subventionnée, la recherche d'efficacité est principalement motivée par la pression exercée par l'autorité commanditaire lors de la négociation des conventions sur les prestations. Parmi les mesures d'optimisation de la performance (à qualité donnée) que les gestionnaires d'infrastructure prennent en règle générale figurent:

- la diminution de l'usure de l'infrastructure afin de prolonger sa durée de vie tout en maintenant les coûts de maintenance au minimum;
- la recherche d'un juste équilibre entre les dépenses de maintenance et de renouvellement, autrement dit l'optimisation des coûts liés au cycle de vie des composants et le maintien de la valeur d'une infrastructure de qualité (âge relatif moyen pondéré).

La diminution de l'usure dépend de la qualité initiale de la voie ferrée et des répercussions physiques des véhicules sur celle-ci, répercussions essentiellement déterminées par l'interaction entre les deux éléments, c.-à-d. au premier chef par la configuration des organes de roulement et leur liaison avec les caisses.

L'équilibre entre investissement et maintenance dépend de l'adéquation technique et économique de la politique de maintenance (typologies et rythme d'entretien, durée de vie) et des technologies utilisées.

### **1.2.5 Point de vue des entreprises de transport ferroviaire**

Les activités en TRV étant aussi largement subventionnées, la recherche d'efficacité est principalement motivée par la pression exercée par les commanditaires (cantons) lors de la négociation des offres TRV. En plus des deux possibilités d'optimisation des gestionnaires d'infrastructure, les entreprises de transport ferroviaire peuvent poser trois exigences (supplémentaires) à qualité de service donnée:

- améliorer le confort en cours de route (accès sans marche, installations de climatisation);
- mettre en œuvre une répartition optimisée du matériel roulant et du personnel afin de maximiser le nombre de trains-kilomètres produits et de minimiser les frais de personnel; cela passe notamment par l'acquisition de trains à forte capacité d'accélération et la réduction générale des temps de parcours avec augmentation de la vitesse jusqu'à application des vitesses maximales;
- réduire les coûts de maintenance et d'amortissement du matériel roulant, par des acquisitions moins coûteuses (priorité aux amortissements) à court terme ou par une optimisation des coûts liés au cycle de vie (priorité à la gestion du cycle de vie) à long terme, ce qui a un impact direct d'une manière ou d'une autre sur la configuration des organes de roulement.

### **1.2.6 Point de vue de l'industrie du matériel roulant**

Stadler Rail AG détient un monopole de fait sur les véhicules à voie métrique. Sur le plan juridique, des appels d'offres publics sont réalisés, mais dans la plupart des cas, aucun second fournisseur ne soumet une proposition. Cette situation de monopole ne favorise ni l'efficacité ni l'esprit d'innovation. Compte tenu de la taille très réduite des lots et du risque fondamental de perdre dans le même temps le fournisseur monopolistique, la question de savoir s'il ne faudrait pas chercher de nouvelles formes de collaboration se pose. À cela s'ajoutent une réutilisation maximale des technologies existantes et l'introduction de la logique industrielle d'une plateforme de produit pour le matériel roulant à voie métrique, toujours dans le but d'améliorer sensiblement la rentabilité tout au long du cycle de vie dans le secteur du matériel roulant. La normalisation et la standardisation jouent alors un rôle important, en particulier dans le cas des organes de roulement susmentionnés (pour les principales applications: voie rapide, sinueuse, à crémaillère).

## **1.3 Observation globale du système**

### **1.3.1 Contexte véhicule-voie ferrée sous l'angle de l'interaction**

La connaissance du comportement interactif du système roue-rail et de ses répercussions fait depuis toujours l'objet de recherches motivées à chaque fois par la garantie de la sécurité, la modification des conditions d'utilisation (grande vitesse, charges lourdes) mais aussi les répercussions en termes d'usure (rentabilité et disponibilité) et d'impact environnemental (bruit et vibrations).

Avec l'augmentation des vitesses, des charges par essieu et de l'utilisation de véhicules hautes performances, les chemins de fer nationaux à voie normale ont misé de plus en plus sur la coopération après la seconde guerre mondiale. Dans le cadre de l'UIC, divers comités ORE (Office de recherches et d'essais de l'UIC) ont cherché les réponses aux principales questions liées à la sécurité, à la vitesse, à la standardisation et au bruit. Avec la réforme des chemins de fer au niveau européen (séparation transport/infrastructure) et la création de nouvelles compétences, ces activités entre les entreprises de chemin de fer ont majoritairement pris fin et ont été transférées au secteur industriel et aux hautes écoles.

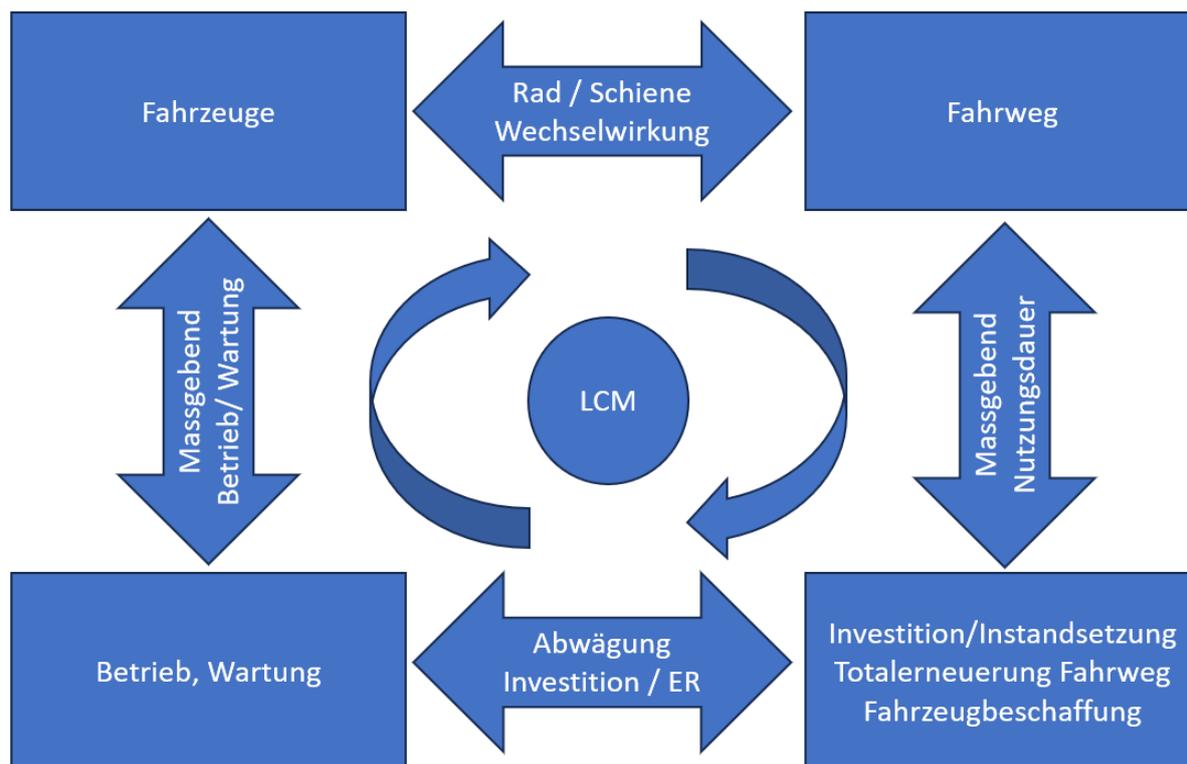


Figure 1: interdépendances dans le cadre de l'observation globale du système véhicule-voie ferrée

Pour les chemins de fer à voie métrique, la nécessité de l'optimisation économique roue-rail s'est longtemps avérée secondaire. Les défis techniques ponctuels roue-rail ont été abordés intégralement en collaboration avec le secteur industriel, souvent avec des solutions pragmatiques couronnées de plus ou moins de succès. Des connaissances approfondies de l'interaction roue-rail n'étaient pas nécessaires en raison de l'absence courante de défis à relever.

L'évolution du secteur ne s'est pas limitée aux chemins de fer à voie métrique. L'horaire cadencé et la demande croissante ont entraîné une augmentation de la fréquence des dessertes ferroviaires et du nombre de places disponibles à bord (longueurs de train). Dans le même temps, les exigences de qualité et de sécurité liées aux véhicules ont été revues à la hausse (climatisation, équipement passager, vitesse maximale, sécurité en cas de collision, etc.), ce qui a entraîné une augmentation notable du poids des véhicules. Des temps de parcours cadencés restreints ont nécessité l'utilisation de véhicules aux puissances motrices élevées et à forte capacité d'accélération et de décélération.



Figure 2: le MGB est l'un des chemins de fer les plus exposés à l'usure accrue

Sous la pression des coûts exercée auprès des entreprises de transport, les véhicules ont été améliorés au cours de leur cycle de vie, ce qui a conduit à des configurations optimisées pour sous-système avec moins d'essieux et des charges par essieu nettement plus élevées. Parmi les exemples les plus représentatifs figurent ici les automotrices articulées, les véhicules à caisses semi-portées et les véhicules à bogies jacobs.

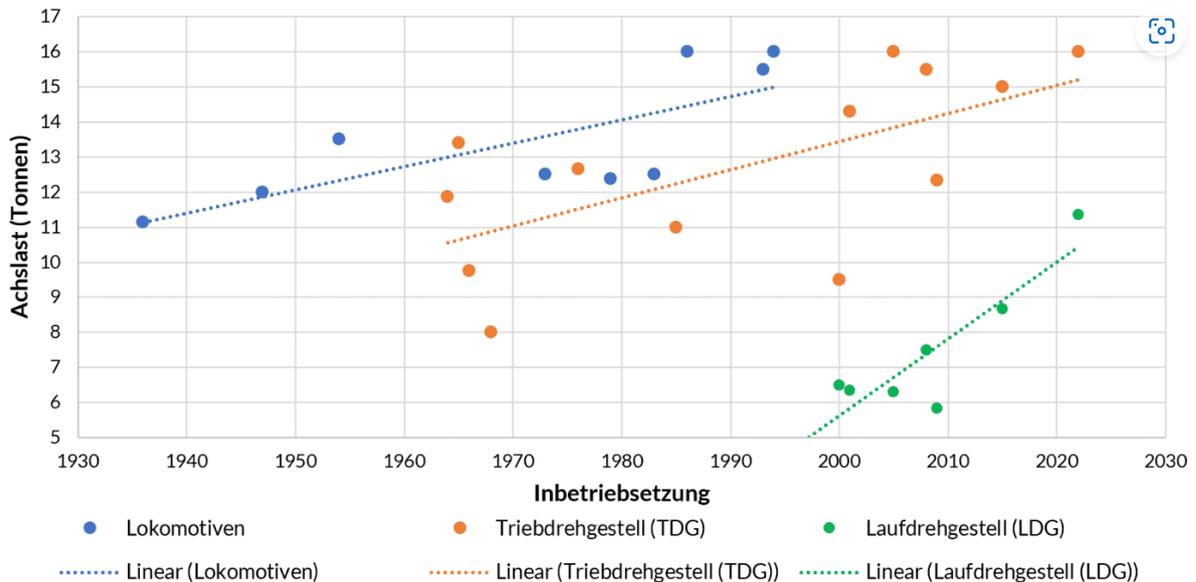


Figure 3: évolution des charges par essieu sur le matériel roulant à voie métrique

L'augmentation générale des charges par essieu se renforce sous l'effet du dimensionnement des véhicules pour des vitesses plus élevées, qu'il s'agisse ou non d'une nécessité opérationnelle. Les exigences liées à des vitesses plus élevées engendrent souvent des entraxes plus importants au niveau des bogies et/ou des raccords plus rigides entre les essieux et les organes de roulement.

Les évolutions de la configuration des véhicules ont généralement entraîné une usure croissante et des dommages au niveau des roues et des rails sur les chemins de fer dont les rayons de courbure sont inférieurs à 250 m. On a utilisé des matériaux de roue plus résistants pour tenter de remédier à cette problématique au niveau des véhicules tandis que les constructeurs de voies ferrées ont essayé de maîtriser l'usure en utilisant des profils de rail plus grands et plus résistants (moment d'inertie des surfaces, qualité de l'acier) et une superstructure de traverses en béton. La procédure a alors manqué de véritable coordination interactive. En conséquence, les profils de roue et de rail actuellement utilisés et figurant dans les réglementations s'appliquant à la voie métrique ne s'adaptent pas les uns aux autres et ne conviennent donc pas à une circulation sans usure excessive dans ces courbes serrées.

#### **Conclusion 4**

Les chemins de fer présentant des rayons de courbure étroits (inférieurs à 250 m) et des charges par essieu élevées (environ 16 t) sont particulièrement concernés par l'usure croissante roue-rail.

### **1.3.2 Structure des connaissances interactives sur la voie métrique**

Avec la hausse rapide du nombre d'exigences liées aux véhicules et à la voie ferrée, le besoin de connaissances quant aux divers chemins de fer à voie métrique a radicalement changé. L'Office fédéral des transports a donc demandé une maîtrise temporaire du système «Interaction véhicule-voie ferrée métrique» en raison de la forte usure constatée par certains chemins de fer à voie métrique. Le défi est d'identifier les mécanismes d'usure et de dégradation, de proposer des solutions et d'accroître ainsi la rentabilité globale. L'analyse de la situation et l'élaboration de solutions nécessitent des connaissances techniques étendues et une grande expérience pratique, compétences rares à la fois en Suisse et en Europe qui doivent être transposées sur voie métrique. Les connaissances acquises et les résultats obtenus sont mis à la disposition de l'ensemble du secteur en continu.

## **1.4 Cycle de vie des véhicules et de la voie ferrée**

### **1.4.1 Quelques principes de gestion du cycle de vie**

Une optimisation du système global doit se mesurer au résultat économique total du système véhicule-voie ferrée. Les véhicules et la voie ferrée étant des systèmes d'une très longue durée de vie, ils nécessitent une gestion durable dans un souci d'optimisation des coûts liés au cycle de vie. Ce cycle de vie s'étend de l'acquisition (conception, matérialisation) à l'élimination en passant par l'exploitation (utilisation opérationnelle, maintenance et remise en état).

Concernant les véhicules, environ 80% des coûts de leur cycle de vie sont fixés lors de leur conception (configuration/planification). C'est également à ce stade que se décide la conception de l'organe de roulement à l'aide des principaux facteurs d'influence interactifs que sont la charge par essieu et le type de construction des organes de roulement, lesquels ne pourront plus être modifiés pour un coût raisonnable pendant la durée de vie résiduelle des véhicules.

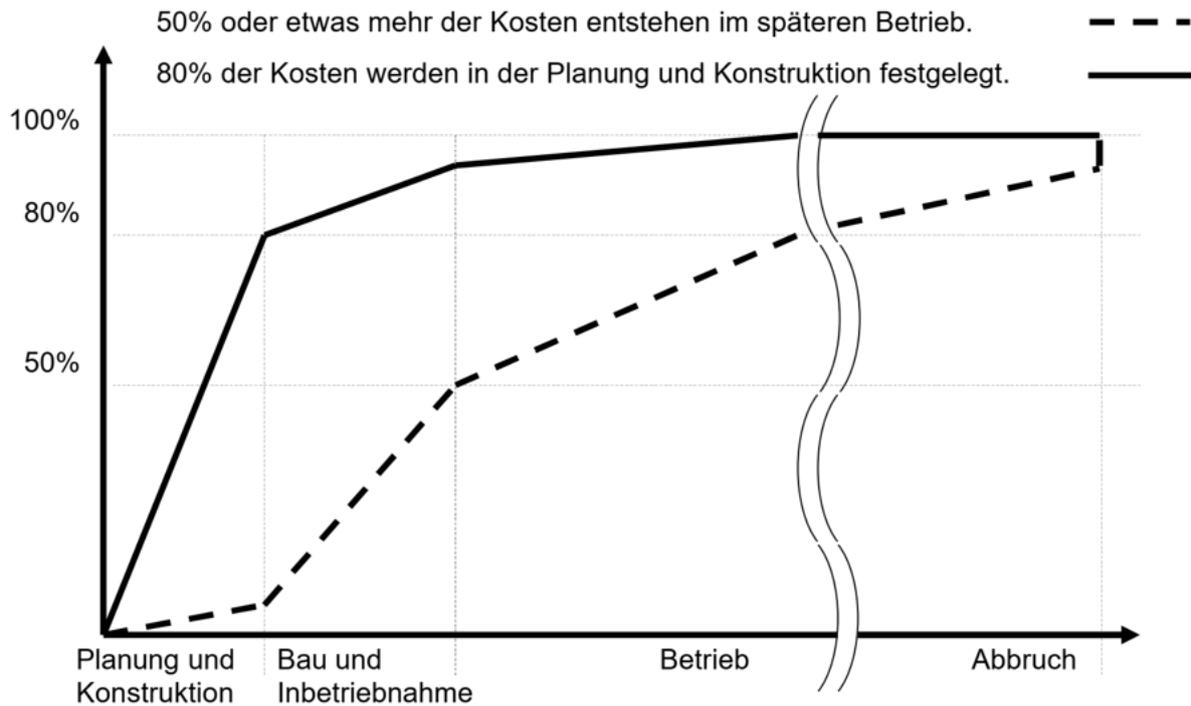


Figure 4: définition et répartition des coûts inhérents au cycle de vie des véhicules (image: eduRail)

#### **Conclusion 5**

Concernant les véhicules, environ 80% des coûts de leur cycle de vie sont fixés lors de leur conception, de même que, par conséquent, les principales données d'influence interactives comme la charge par essieu et le type de construction des organes de roulement.

Concernant la voie ferrée aussi, les décisions conceptuelles (système d'infrastructure, traverses) sont prises dès le début de sa durée de vie. Et comme la qualité de la pose, elles influent également à long terme sur l'interaction. En plus de la conception, la maintenance revêt une importance capitale tout au long du cycle de vie. Le principal objectif est de maintenir la voie ferrée en état d'utilisation le plus longtemps possible. Sa durée d'utilisation théorique doit être atteinte et, si possible, dépassée. Pour ce faire, les travaux de maintenance nécessaires doivent être effectués régulièrement. Les rails doivent notamment être meulés (correctement) et la position de la voie doit être ajustée à l'aide de bourrages, le but étant d'éviter tout dommage consécutif.

#### **Conclusion 6**

Concernant la voie ferrée, des décisions importantes quant aux coûts subséquents au cours de son cycle de vie sont prises lors de sa conception (infrastructure, type de traverses). Il convient de procéder à la maintenance nécessaire (meulage régulier des rails et ajustement de la position de la voie par bourrage) pour atteindre la durée d'utilisation théorique.

Dans le cadre de l'observation économique globale du système véhicule-voie ferrée, le défi à relever est l'influence mutuelle exercée à toutes les étapes par les cycles de vie respectifs des véhicules et de la voie ferrée, que ce soit lors de la conception, de la matérialisation dans le cadre de la mise en œuvre ou encore de la prise des décisions relatives à l'utilisation, la maintenance et la remise en état. Il doit y avoir une coordination mutuelle permanente au sein du système global.

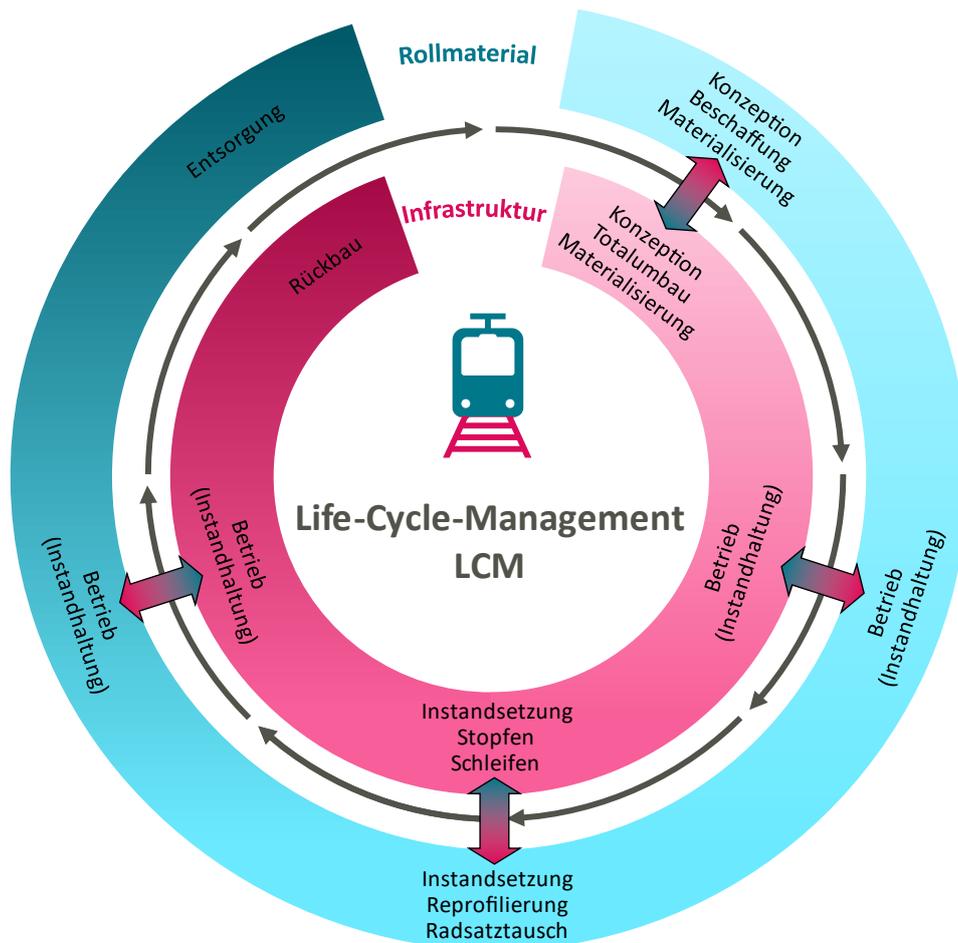


Figure 5: influence mutuelle exercée par chaque décision prise au cours des cycles de vie respectifs des véhicules et de la voie ferrée

### **Conclusion 7**

Une influence mutuelle est exercée à toutes les étapes par les cycles de vie respectifs des véhicules et de la voie ferrée, que ce soit lors de la conception, de la matérialisation dans le cadre de la mise en œuvre ou encore de la prise des décisions relatives à l'utilisation, la maintenance et la remise en état. Il doit y avoir une coordination mutuelle permanente au sein du système global.

La Figure 1 et la Figure 5 mettent en lumière les conflits d'objectifs mais aussi les intérêts communs qui en découlent entre les sous-domaines des véhicules et de la voie ferrée. Ces points doivent être expliqués dans les sous-domaines des véhicules et de la voie ferrée ci-après.

## **1.4.2 Sous-domaine des véhicules**

### **1.4.2.1 Principes**

Concernant les véhicules, 80% des coûts de leur cycle de vie sont définis dès la planification et la configuration, ce qui signifie qu'il convient d'accorder une très grande importance à leur conception, laquelle doit être optimisée en fonction de leurs futures conditions d'utilisation et de leurs besoins. Le succès de cette optimisation des acquisitions dépend en grande partie des critères suivants:

- les conditions d'utilisation doivent être suffisamment connues;
- les répercussions des différentes configurations sur les coûts liés au cycle de vie doivent être connues (connaissance des interactions entre autres);

- l'investissement et les éventuels coûts supplémentaires de l'optimisation du système dans le cadre de l'acquisition et de l'exploitation doivent pouvoir être financés (incitations financières);
- le temps nécessaire à l'optimisation doit être accordé dans le processus d'acquisition;
- les directives souveraines doivent permettre l'optimisation ou pouvoir être appliquées pour un coût raisonnable;
- le secteur industriel des véhicules doit pouvoir proposer les configurations nécessaires.

En général, l'acquisition entraîne des coûts uniques élevés indépendamment du nombre de d'unités commandées. Les acquisitions de composants auprès des sous-traitants s'effectuant en fonction du projet clientèle, les petites quantités commandées ont alors aussi un effet négatif sur les coûts. Ce n'est qu'à partir d'une cinquantaine d'unités commandées que les fabricants s'attendent à des économies d'échelle significatives. Ces quantités ne sont normalement pas atteintes pour les chemins de fer à voie métrique même si la construction est réalisée sur des plateformes de véhicule. Les individualisations sur demande de l'ET limitent encore la taille des lots de production. Lors de commandes ultérieures, si des adaptations sont prévues sur des éléments déterminants pour la sécurité, les économies d'échelle se perdent également. Les appels d'offres lancés selon les règles de l'OMC pour les acquisitions de matériel roulant exigent par ailleurs des connaissances spécifiques.

L'exploitation des véhicules engendre des coûts liés au cycle de vie tels que les amortissements, les intérêts et la maintenance. Concernant la maintenance, ce sont surtout les coûts des organes de roulement qui nous intéressent ici.

### **Conclusion 8**

Concernant les véhicules, la taille réduite des lots entraîne des coûts uniques élevés lors de l'acquisition et de l'approvisionnement en pièces de rechange ainsi qu'un travail d'ingénierie très important du côté des entreprises de chemin de fer. Concernant l'interaction, les organes de roulement devraient reposer sur une plateforme stable pour les applications déterminantes prévues.

#### **1.4.2.2 Concepts de véhicule et organes de roulement**

Parmi une multitude de concepts de véhicule théoriquement réalisables pour la voie métrique, 12 concepts réalistes de train ont été établis dans le cadre du mandat système (Figure 6). Avec un total de 6 compositions avec locomotive, 2 trains avec modules de traction et 4 rames automotrices présentant chacune un concept d'organes de roulement différent, il est possible de dresser un tableau complet de ce qui s'avère techniquement raisonnable.

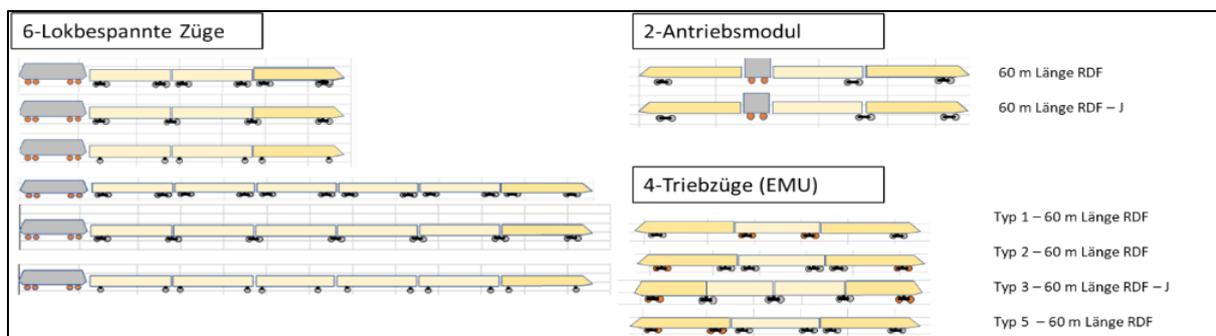


Figure 6: différents concepts de train (image: RAILplus/RSE)

Les organes de roulement de tous les véhicules disponibles aujourd'hui sont, à une exception près, équipés d'un guidage d'essieu rigide. Les rigidités longitudinales exercent généralement une force d'environ 10 kN/mm ou plus et ne permettent donc aucun ajustement radial des essieux dans les courbes. Ces organes de roulement ne sont donc pas adaptés à une circulation sans usure excessive sur des voies présentant des rayons de courbure étroits à moyens.

## Conclusion 9

Les organes de roulement des véhicules disponibles aujourd'hui sont équipés de guidages d'essieu rigides et ne permettent donc aucun ajustement radial des essieux dans les courbes. Ils ne sont donc pas adaptés à une exploitation sans usure excessive dans des courbes plus serrées.

Par le passé, les solutions les plus diverses ont été mises au point pour la voie normale afin d'obtenir des ajustements radiaux ou du moins d'apporter une aide en ce sens. La Figure 7 présente une vue d'ensemble des différentes solutions. Outre les solutions proprement dites, c'est aussi leur sensibilité à la géométrie de contact roue-rail ainsi qu'à la force ou au glissement de traction qui s'avère essentielle.

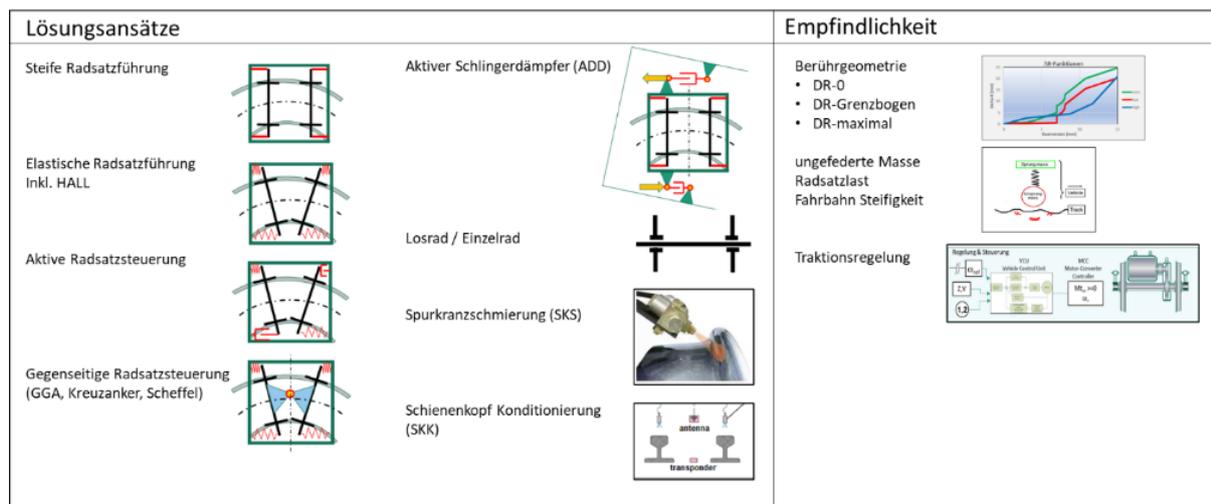


Figure 7: variantes pour le guidage d'essieu au niveau des bogies (image: RAILplus/RSE)

Nous distinguons en principe le guidage d'essieu rigide (aujourd'hui cas typique pour la voie métrique), les solutions passives telles que les guidages d'essieu élastiques (palier de guide d'essieu hydraulique inclus), les essieux à commande mutuelle ainsi que les roues libres ou isolées. Dans la solution des essieux à commande mutuelle, les deux essieux sont assortis d'un couplage mutuel, de sorte que l'essieu arrière soutient l'essieu avant dans la position radiale. Les forces d'adhérence de l'essieu arrière génèrent l'énergie ou les forces nécessaires à l'ajustement de l'essieu avant. D'autres solutions de roues libres ou isolées à commande active ne doivent pas être abordées ici pour des raisons de rentabilité de leur développement et de leur mise en place. En général, les solutions passives (sauf essieux à commande mutuelle) présentent communément l'inconvénient de perdre leur fonction d'autorégulation en cas de géométrie de contact rudimentaire et inadéquate et de ne plus assurer une commande suffisante notamment sous l'effet des forces dynamiques de traction ou de freinage. Pour les systèmes actifs, dont l'acquisition et la maintenance sont nettement plus coûteux, il reste la commande active d'essieu, laquelle pilote les essieux en position radiale ou semi-radiale en fonction du rayon de courbure. Concernant les rayons de courbure étroits sur voie métrique et les limites de construction des organes de roulement disponibles, il convient de partir du principe qu'il est impossible de réaliser un ajustement radial complet partout même avec une commande active.

Le graissage des boudins de roue et le conditionnement du champignon de rail visent exclusivement à limiter l'usure et les dommages en réduisant les coefficients de frottement au niveau du boudin et de la surface de roulement. Les roues avancent toutefois en formant un angle par rapport au rail ou glissent sur le champignon de la file de rails intérieurs et extérieurs. Mais les forces d'adhérence étant limitées par le coefficient de frottement significativement réduit, elles diminuent l'usure et éliminent les mécanismes à plus haute fréquence dans le contact roue-rail.

Il serait trop long de saluer ici en détail les nombreuses conceptions décrites d'organes de roulement. Outre la charge déterminante par essieu, il convient de considérer l'attention portée

à l'écartement des essieux au niveau du bogie et la capacité d'ajustement radial dans des courbes serrées. L'indice de positionnement radial est utilisé pour décrire la qualité de la marche dans des courbes relativement serrées.

Les différences entre les rayons de roulement sur les surfaces de roulement coniques des deux roues du même essieu déterminent le guidage des essieux dans la courbe. La configuration de la voie est telle que le boudin de la roue extérieure de la courbe sur l'essieu avant suit le rail extérieur de la courbe dans le virage. La roue extérieure de la courbe devant parcourir une plus longue distance que la roue intérieure, elle devrait présenter un diamètre plus grand. Les surfaces de roulement coniques créent une différence entre les rayons de roulement, laquelle implique que la roue extérieure de la courbe franchisse le virage sur un diamètre de roue plus grand que la roue intérieure. Cette différence permet de soutenir l'essieu lors du passage du virage, réduisant ainsi l'usure de la roue et du rail. L'objectif serait que l'essieu se positionne dans le virage de sorte à pouvoir le franchir uniquement en roulant (sans glisser). Dans le cas contraire, l'avancée du boudin et le glissement des surfaces de roulement entraîneront une usure de la roue et du rail. Les empattements courts au niveau des bogies permettent de réduire significativement l'usure dans les courbes contrairement aux empattements plus importants. En revanche, s'il est nécessaire de maîtriser des vitesses de circulation élevées, les empattements courts au niveau des bogies et les guidages d'essieu souples entraînent des instabilités. Il s'agit d'un conflit d'objectifs qu'il convient d'éliminer sous l'angle technique s'il s'avère vraiment nécessaire de maîtriser simultanément des vitesses de circulation élevées et un passage fréquent sur des courbes serrées.

#### **Conclusion 10**

Moins les essieux peuvent s'ajuster radialement et plus l'empattement au niveau du bogie est important, plus l'usure de la roue et du rail est élevée dans les courbes. Le paramètre déterminant pour le niveau d'usure d'un train est le produit de la charge par essieu et de l'empattement au niveau de l'organe de roulement.

#### **1.4.2.3 Aciers de roue**

La sollicitation des matériaux au point de contact roue-rail a nettement augmenté ces dernières années en raison des accélérations et des charges par essieu plus élevées. Les aciers de rail comme les aciers de roue atteignent leur limite de résistance. Ainsi, les prestations kilométriques séparant deux opérations de reprofilage des roues se réduisent et les frais de maintenance augmentent parfois considérablement.

Les sollicitations excessives des surfaces de roulement des roues s'accompagnent également de défauts de circularité périodiques, surtout dans des courbes serrées. De plus, des fissures apparaissent sur les surfaces de roulement suite à la fatigue du contact de roulement. L'absence d'action rapide sous la forme d'une rotation en surrégime des essieux entraîne des dommages en profondeur et des ruptures dans le matériau. Comme pour les rails, le reprofilage devient alors de plus en plus difficile et coûteux. Il existe des chemins de fer à voie métrique sur lesquels un essieu ne pouvait tourner que deux ou trois fois en surrégime avant de devoir être remplacé. Cela se révèle particulièrement coûteux pour les organes de roulement à crémaillère, lesquels disposent d'une réserve d'usure plus faible en raison de l'engrènement. Dans l'ensemble, trouver le bon équilibre en maintenance constitue un défi. D'une manière ou d'une autre, l'usure et la fatigue du contact de roulement deviennent un facteur de coût déterminant pour les essieux.

Une plus grande rigidité de la voie ferrée favorise la formation d'une ovalisation de la roue entraînant ensuite une augmentation des forces dynamiques exercées sur les roues et la voie ferrée. Les aciers recherchés présentent généralement une résistance relativement importante à la fatigue du contact de roulement et à l'usure. Les aciers plus durs présentent des avantages pendant l'exploitation contrairement aux aciers plus tendres. Ils permettent de réduire considérablement les coûts de maintenance (prestations kilométriques plus élevées) tout en n'augmentant que légèrement les coûts d'acquisition. Aucun effet négatif dû à une telle amélioration des qualités de l'acier au niveau des roues n'a jusqu'alors été déploré sur la voie ferrée et en particulier sur les rails.

### Conclusion 11

L'amélioration des qualités des matériaux de roue a un effet positif sur la prestation kilométrique et retarde la formation de polygones. Aucun effet négatif n'a été déploré sur la voie ferrée à ce jour.

#### 1.4.2.4 Profils de roue

Les profils de roue associés à l'écartement des voies, aux profils de rail et à l'inclinaison de pose du rail (conicité équivalente) exercent une influence déterminante sur la qualité de marche à des vitesses de circulation relativement élevées en ligne droite. Une très haute conicité équivalente peut entraîner une instabilité à des vitesses relativement élevées. Elle peut aussi exercer en même temps une influence positive sur le franchissement d'un virage grâce à une différence élevée entre les rayons de roulement des roues en courbe. Il existe donc une contradiction physique entre un bon franchissement des courbes et la maîtrise simultanée de vitesses de circulation élevées. La maîtrise de cette contradiction pose des exigences particulières quant à la configuration de l'organe de roulement et à la géométrie de contact roue-rail.

Lors de la configuration des organes de roulement, les profils de roue doivent donc être adaptés au raccordement de l'organe de roulement, à l'articulation de l'essieu, aux résistances à l'alésage et aux éléments amortisseurs. Un amortissement trop important complique à son tour le positionnement radial de l'organe de roulement en courbe et génère une usure supplémentaire. De plus, la vitesse de 120 km/h doit être maîtrisée confortablement et en toute sécurité sur les tronçons prévus à cet effet.

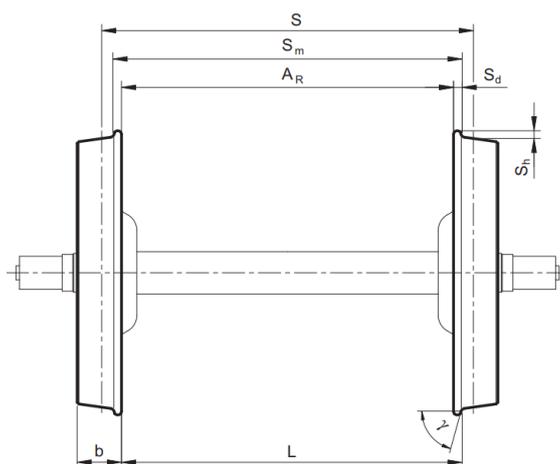


Figure 8: essieu des entreprises de chemin de fer à voie métrique (image: UTP R RTE 29500)

Il existe aujourd'hui différents profils de roue sur la voie métrique. Ils sont définis du point de vue de l'interaction géométrique dans la réglementation R RTE 29500 «Standardisation Essieux et branchements, voie métrique». L'un des profils de roue définis dans cette réglementation est le W98. De nombreuses entreprises de chemin de fer à voie métrique utilisent ce profil de roue ou un profil dérivé et légèrement modifié (également référencé W98). Ces profils de roue ne sont toutefois pas adaptés de manière optimale en termes d'usure au contact roue-rail et sont notamment inappropriés en cas de franchissement de courbes relativement serrées.

L'optimisation des profils de roue ne constituait pas un objectif à atteindre à l'époque de l'élaboration de la R RTE 29500. Il était alors envisagé de procéder à l'adaptation de ce profil de roue après les études visant à définir la cote qR. Cependant, cette question n'a pas encore été abordée dans le secteur et fait aujourd'hui partie intégrante du mandat système Interaction véhicule-voie ferrée métrique. Ces travaux reposent sur les résultats partiellement positifs que certaines entreprises de chemin de fer à voie métrique ont déjà obtenus avec des profils d'usure alternatifs. En l'occurrence, il faudra également aborder la question de la fragilisation des boudins. Plus la cote diminue, plus la conicité équivalente peut être réduite, ce qui augmente la distance de sécurité par rapport à l'instabilité des organes de roulement. Par

analogie, un écartement plus important entraîne aussi une conicité équivalente plus faible, ce qui signifie que plus la conicité est faible, plus l'essieu a de jeu sur la voie. Des conicités plus basses favorisent la stabilité du véhicule à des vitesses relativement élevées et allègent les exigences posées aux organes de roulement à cet égard. Dans les plages de vitesse relativement élevées (plus de 80 km/h), il faudrait donc d'abord augmenter l'écartement à 1003-1005 mm avant de réduire la cote et donc d'altérer ensuite la rentabilité du franchissement d'une courbe (usure).

#### **Conclusion 12**

Les profils de roue associés à l'écartement des voies, aux profils de rail au point de contact roue-rail et à l'inclinaison de pose du rail déterminent les propriétés de la marche en ligne droite mais aussi l'usure en courbe. Les profils de rail disponibles et les profils de roue courants ne sont pas optimaux en termes d'usure et doivent mieux s'adapter les uns aux autres pour une meilleure rentabilité dans les différents champs d'utilisation. Il convient en particulier de développer ou de perfectionner des profils d'usure.

#### **Conclusion 13**

Sur des tronçons empruntés à des vitesses relativement élevées (plus de 80 km/h), il faudrait augmenter l'écartement à 1003-1005 mm afin d'accroître la distance de sécurité par rapport à l'instabilité du véhicule en marche et de ne pas altérer le franchissement d'une courbe par d'autres mesures (p. ex. réduction de la cote).

### 1.4.3 Sous-domaine de la voie ferrée

#### 1.4.3.1 Principes

Concernant la voie ferrée également, près de 50% des coûts de son cycle de vie sont générés lors de l'investissement. Plus de 50% des coûts de son cycle de vie sont liés à l'exploitation (meulage, bourrage, remplacement de composants). Les coûts d'investissement de la superstructure ferroviaire se répartissent par tiers entre les rails, les traverses (y compris la fixation des rails) et le ballast de la voie. Les coûts d'investissement des rails sont proportionnels au poids au mètre des rails et à leur qualité, aux coûts des traverses pour la cote spécifique et à ceux du ballast pour la section transversale du ballast.

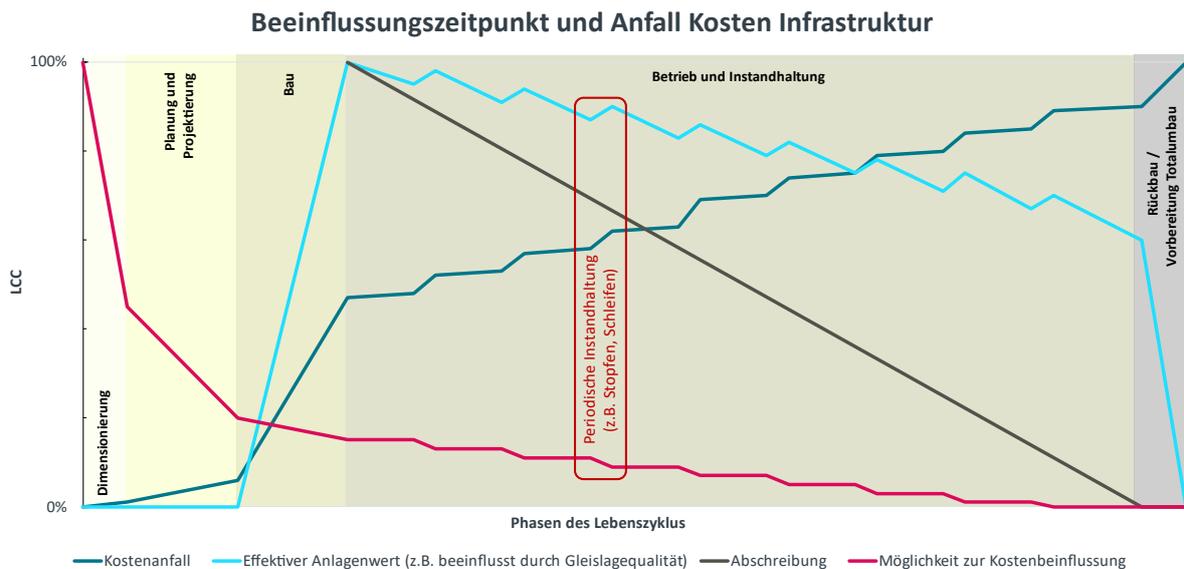


Figure 9: représentation schématique de l'apparition et de l'influence des coûts d'infrastructure ainsi que de l'amortissement et de la valeur effective des installations tout au long du cycle de vie

Les coûts d'investissement augmentent généralement avec la vitesse maximale définie sur la ligne ferroviaire et dépendent de la force statique prévue aux roues. Le système de voie ferrée (superstructure et infrastructure) doit être adapté à l'utilisation prévue ici aussi. Il convient en outre d'accorder une très grande attention à la qualité de la construction car l'infrastructure ne peut plus être remplacée et les traverses et le ballast ne peuvent plus l'être qu'à très grands frais. Le dimensionnement de la voie ferrée et sa qualité initiale représentent une part significative des coûts annuels tout au long du cycle de vie.

Le succès économique du dimensionnement de la voie ferrée dépend en grande partie des critères suivants:

- les conditions d'utilisation (charges) doivent être connues;
- les répercussions des différentes configurations de la voie ferrée sur les coûts liés au cycle de vie doivent être connues;
- l'investissement et les éventuels coûts supplémentaires de l'optimisation du système grâce à une approche fondée sur le cycle de vie dans le cadre de l'acquisition et de l'exploitation doivent pouvoir être financés;
- le temps nécessaire à l'optimisation du système de voie ferrée doit être accordé dans le processus d'acquisition;
- les directives souveraines doivent permettre l'optimisation ou pouvoir être appliquées pour un coût raisonnable;

- le secteur industriel de la voie ferrée doit proposer les technologies de maintenance nécessaires pour permettre également la mise en œuvre des stratégies LCM sur la voie (collecte des données d'état, meulage, fraisage et plus encore);
- pour une qualité optimisée en fonction du cycle de vie, il faut avoir à disposition les interruptions du trafic et les systèmes de surveillance de la qualité correspondants.

De manière générale, la construction des chemins de fer à voie métrique entraîne des coûts uniques élevés en raison de l'étude de projet, de la PAP ainsi que de l'organisation et de la logistique des chantiers sur terrain difficile. À cela s'ajoutent les frais très variables du service de remplacement du train. Ceux-ci se répartissent directement sur toute la longueur de transformation prévue. Plus les longueurs sont importantes, moins ces coûts uniques sont élevés. Les contraintes dans lesquelles la transformation peut avoir lieu sont en lien direct avec ces coûts. La transformation sans interruption du trafic la nuit est la plus coûteuse tandis que celle ayant lieu sur une longueur supérieure à 1000 m dans le cadre d'une interruption totale du trafic est la moins coûteuse. Les conditions de transformation influent directement sur la qualité des travaux effectués. Les interruptions totales du trafic augmentent durablement la qualité initiale de la voie ferrée et influent donc directement sur le niveau de qualité initiale induisant une durée d'utilisation plus longue (environ 20%). Comme pour les véhicules, un allongement de la durée d'utilisation peut induire une réduction massive des coûts liés au cycle de vie.

Pour atteindre ou dépasser la durée d'utilisation prévue, il convient de réunir au préalable, au niveau de la voie ferrée, tant la qualité initiale que la qualité du produit, la résistance pendant toute la durée d'utilisation et la maintenance adéquate.

Comme pour les acquisitions de véhicule, la construction de la voie ferrée pour les chemins de fer à voie métrique s'effectue également conformément aux souhaits de la clientèle. Plus la quantité commandée (longueur de transformation) est faible, plus les coûts de préparation de la production sont proportionnellement importants. L'acquisition des composants (rails/traverses) est souvent effectuée conjointement chez RAILplus, ce qui permet une économie d'échelle. Les individualisations de la voie ferrée sur demande de l'ET limitent toutefois les tailles de lot de production. La compréhension du système que représente la voie ferrée, notamment des répercussions financières des décisions à prendre, nécessite des connaissances spécifiques. Tous les GI n'ont pas la possibilité de recourir à des gestionnaires des installations (de voie ferrée) spécialisés disposant du savoir-faire requis à cet égard. De plus, prévoir le moment économiquement adéquat pour le renouvellement de la voie ferrée métrique et parvenir à coordonner les acquisitions en vue des transformations constituent un défi, les instruments de diagnostic n'étant toujours qu'à l'étude et les instruments économiques devant encore être mis à disposition pour la voie ferrée.

L'exploitation de la voie ferrée engendre des coûts liés au cycle de vie tels que les amortissements, les intérêts, la maintenance et la remise en état. L'investissement et la maintenance répondent au principe des vases communicants. Les investissements génèrent une voie ferrée de qualité et l'entretien assure une longue durée de vie, conditions sine qua non de toute rentabilité. Il convient de ne pas croire à tort que davantage d'entretien permet de prolonger la durée de vie dans le cadre d'une approche fondée sur le cycle de vie. Il est certes possible de préserver plus longtemps la voie grâce à des mesures de maintenance (coûteuses), mais cela ne permet pas de compenser sur le plan économique les manquements liés à la conception et à la qualité du produit ou à un entretien (autrefois) négligé. L'entretien correspond à un exercice obligatoire important à réaliser tout au long du cycle de vie, l'exercice libre consistant alors à atteindre l'optimum économique entre conception, bonne qualité du produit et entretien.

### Schematische Entwicklung der LCC über die Betriebsdauer einer Anlage

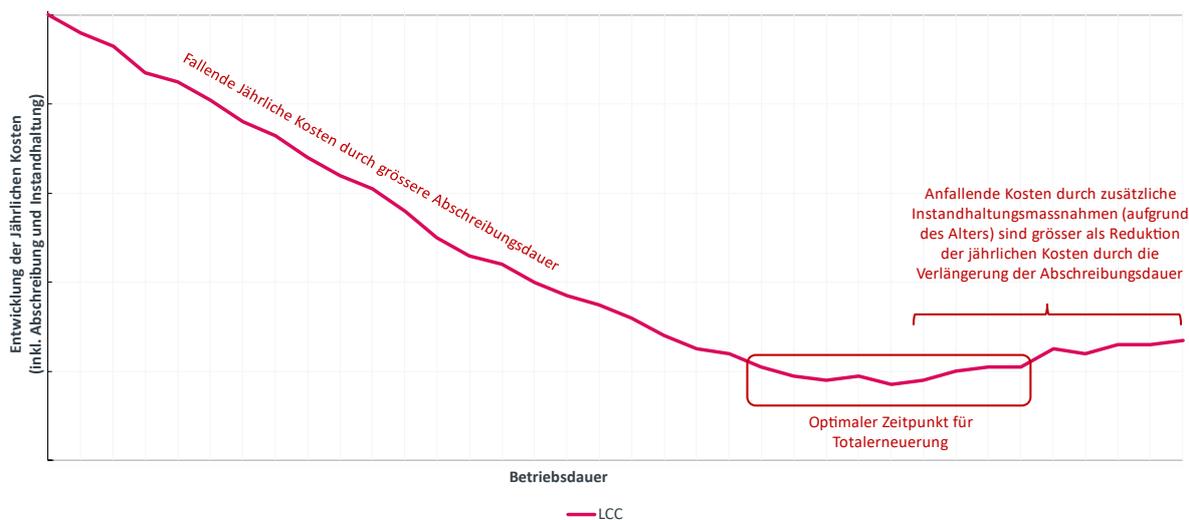


Figure 10: exemple de définition du moment optimal pour le renouvellement

La question de savoir si un renouvellement d'envergure de la voie ferrée est nécessaire n'est pas purement technique. Il s'agit plutôt de trouver le moment le plus propice sur le plan économique pour les mesures de maintenance. Cette estimation est l'une des tâches centrales dans le cadre de la gestion des installations de l'infrastructure de la voie ferrée dans le cadre d'une approche fondée sur le cycle de vie. L'objectif est atteint notamment grâce à un calcul dynamique de la rentabilité pendant toute la durée d'utilisation. Il est alors possible de calculer le moment de réinvestissement optimal sur le plan économique et d'éviter ainsi une augmentation des coûts de maintenance. D'un point de vue économique, il convient de noter qu'une longévité et une résistance accrues de l'infrastructure de la voie entraînent en principe une hausse initiale des coûts de (ré)investissement en raison de la nécessité de respecter le caractère conforme de l'infrastructure, des traverses en béton, de la semelle des traverses ainsi que d'une qualité supérieure des matériaux utilisés pour les rails, etc. À plus long terme, il en résulte toutefois une diminution de la probabilité de défaillance, une réduction des coûts de maintenance et une augmentation de la durée d'utilisation, d'où des coûts plus avantageux liés au cycle de vie à condition qu'aucune modification majeure entraînant un désinvestissement anticipé ou un défaut de maintenance induisant une dégradation prématurée du produit ne soit apportée à la voie ferrée au cours de sa durée d'utilisation.

#### **Conclusion 14**

Une conception de la voie ferrée et des matériaux adaptés à une interaction optimale et associées à une qualité initiale élevée engendrent, dans le cadre d'une maintenance et d'une remise en état appropriées, une longue durée d'utilisation fiable et donc le meilleur système de voie ferrée sur le plan économique.

Outre le renouvellement (réinvestissement), il est utile d'examiner la maintenance de manière plus approfondie.

Les principales mesures d'entretien de la voie ferrée sont les suivantes:

- le meulage des rails (pour éliminer les dommages se présentant généralement sous forme de fissures et pour créer la géométrie souhaitée du champignon de rail afin d'optimiser le contact roue-rail);
- le bourrage de la superstructure ballastée pour définir la position du châssis de voie et éliminer les cavités;
- le remplacement de composants (rails, semelles, fixations, cœurs, demi-changements);
- la garantie de la fonctionnalité des dispositifs d'évacuation des eaux.

### 1.4.3.2 Meulage des rails

Le grand avantage du système roue-rail est la faible résistance au roulement de la roue sur le rail. En raison des surfaces de contact limitées et des tensions très élevées qui en découlent, la roue et le rail nécessitent des matériaux devant résister à de fortes sollicitations (sur la surface d'une pièce de cinq centimes). Des tensions élevées pouvant largement dépasser  $1000 \text{ N/mm}^2$  peuvent apparaître, surtout lors du franchissement des courbes. Les sollicitations, notamment lors du franchissement d'un virage, sont alors si fortes du fait de la superposition de la force normale et d'une force tangentielle élevée que la roue et le rail peuvent subir une déformation plastique au niveau des zones de contact. Des fissures peuvent alors se former dans des zones proches de la surface, s'étendre dans certaines conditions et provoquer des dommages plus importants au niveau des surfaces de roulement. Cela se produit notamment lorsque des forces tangentielles (forces d'adhérence dues au franchissement d'une courbe, force de freinage et forces de traction) doivent être absorbées en plus des forces normales (appui de la roue).

Les fortes sollicitations des rails entraînent différents types de défauts de rail comme des écaillages importants au niveau des joues de roulement des rails, des taches ovales, des fissures à la surface des rails, des head checks, des effritements, des squats, des ondes et des empreintes de patinage.

Les expériences tirées de la pratique sur voie normale montrent que les virages à forte sollicitation présentant des rayons de courbure plus importants sont soumis à une fatigue du contact de roulement. Suite à une élimination insuffisante de l'usure, les fissures se propagent de plus en plus jusqu'à la rupture des rails. Pour cette raison et du point de vue de la rentabilité (faible enlèvement de matière lors du meulage des rails), ces fissures doivent être éliminées à un stade précoce. Concernant les rayons de courbure plus étroits, les ondes de glissement sur le rail intérieur génèrent une sollicitation accrue des composants et une altération rapide du positionnement de la voie avec destruction du ballast et sollicitations nettement accrues de l'infrastructure. Outre le ballast et l'infrastructure, les destructions concernent en premier lieu les éléments les plus coûteux de la voie ferrée.

Voilà pourquoi les rails plus fortement sollicités, à savoir en particulier les rails présentant ondes de glissement et head checks, doivent être régulièrement meulés. À titre indicatif, on peut partir du principe qu'il faudrait meuler la file intérieure tous les trois ans environ (en fonction de la charge), parfois même tous les ans dans les courbes serrées à forte sollicitation (tout dépend de la charge exercée). Le meulage cyclique selon des directives stratégiques reposant sur des analyses des coûts du cycle de vie conduit ainsi à une durée de vie optimale des rails et à une destruction minimale des composants de la superstructure et de l'infrastructure.

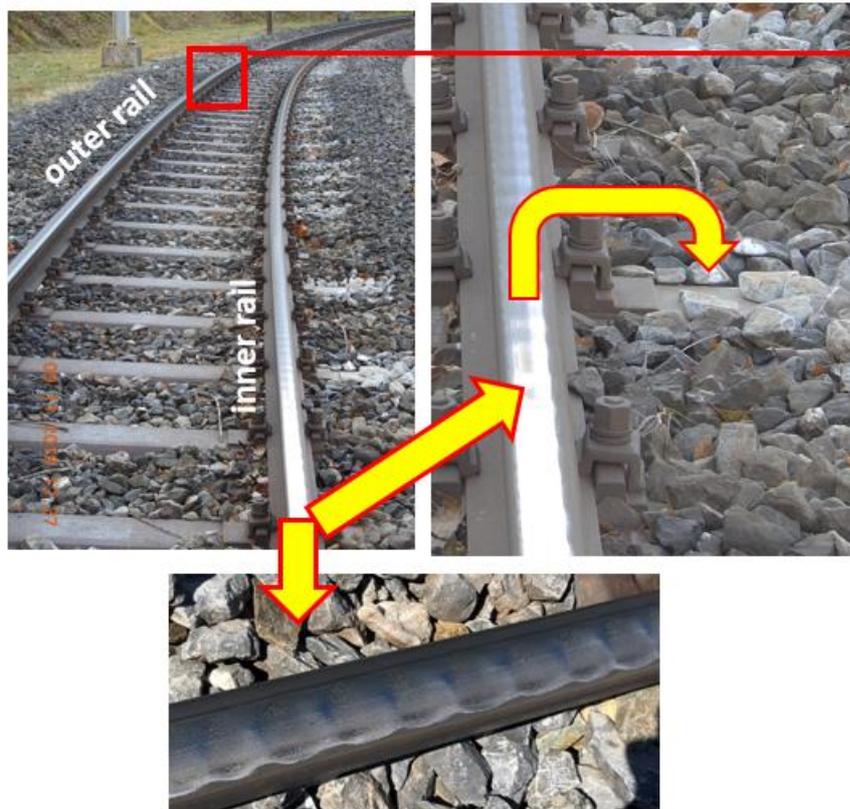


Figure 11: formation d'ondes de glissement dans la file intérieure avec destruction des rails et du ballast (image: Roland Müller)

À un stade précoce, ces défauts des rails peuvent être éliminés par meulage avec un train de meulage. Le meulage préventif doit être effectué avant que les fissures n'atteignent 0,2 mm de profondeur et qu'elles ne progressent (s'enfoncent) dans le rail. Le meulage des rails empêche en outre la sollicitation dynamique du véhicule et de la voie. Sinon, la charge vibratoire résultant de cette sollicitation peut entraîner une détérioration accélérée du rail, de sa fixation, de la traverse et du ballast. L'élimination des irrégularités des surfaces de roulement par meulage cyclique des rails contribue à améliorer le confort de conduite et à réduire les émissions de bruit et de vibrations du trafic ferroviaire. Il s'agit donc d'une mesure très économique.

#### **Conclusion 15**

Le meulage préventif régulier des rails pendant toute leur durée de vie:

- augmente la durée de vie des rails, des fixations et des traverses;
- prolonge les cycles de traitement de la voie en préservant le ballast et l'infrastructure;
- améliore le confort de roulement des véhicules;
- réduit les nuisances sonores.

Le meulage des rails s'avère très économique si la mesure est correctement appliquée et assortie d'une exécution de grande qualité.

Par exemple, les ondes de glissement apparaissant sur le champignon du rail provoquent une augmentation de la force aux roues d'environ 50% à 80 km/h lors du passage d'une voiture présentant une charge par roue de 5 t dont 15% sans suspension primaire (masse non suspendue). L'application de la loi de puissance de la compression du ballast engendre une altération plus de deux fois (2,16 fois) plus rapide de la qualité du positionnement de la voie en partant de la puissance 2 (optimiste) (ou plutôt de la puissance 3). Cela correspond à une réduction de moitié du cycle de bourrage associée à des nuisances sonores massives.

Le meulage des rails neufs (après remplacement) sert à éliminer la couche périphérique du rail à faible teneur en carbone qui s'est formée au cours du processus de fabrication ainsi que les dommages apparaissant sur la surface de roulement suite à la tenue du chantier. Le meulage des rails neufs permet en outre de créer une ornière de guidage régulière.

De manière générale, il convient de mentionner qu'il n'existe pas encore à l'heure actuelle d'ouvrage de référence en matière de technique ferroviaire (RTE) sur le meulage des rails à voie métrique. Celui-ci doit être élaboré d'après les futures conclusions à tirer du mandat système Interaction.

Après le meulage des rails, il convient de noter que le film lubrifiant permettant le graissage des boudins de roue fait défaut, surtout dans les courbes serrées, et qu'il doit être réappliqué avant toute mise en service afin d'éviter une usure excessive de la joue de roulement, et en particulier des boudins de roue, jusqu'à ce que le graissage des boudins de roue des véhicules permette de réappliquer une couche suffisante de film lubrifiant. Quelques rares virages franchis sans lubrification ont déjà montré que des boudins de roue peuvent immobiliser des flottes entières de véhicules en très peu de temps.

#### **Conclusion 16**

Après le remplacement ou le meulage des rails, il est indispensable de procéder à une lubrification initiale des flancs des rails dans les rayons étroits afin d'atteindre la prestation kilométrique prévue pour les essieux (boudins) et la durée de vie des rails.

#### **Profils spéciaux (profils asymétriques par meulage des rails)**

Sont entendus par profils spéciaux les profils de rail s'écartant de la géométrie transversale symétrique des nouveaux rails laminés. Des profils spéciaux sont utilisés pour influencer la position du point de contact de la roue sur le rail afin d'agir sur le guidage d'essieu (en particulier dans les courbes de petit rayon), de réduire l'usure et de prévenir la fatigue du contact de roulement. Des profils spéciaux peuvent être mobilisés lors du meulage de rails neufs ou dans le cadre du meulage préventif. Selon la modification apportée au profil, il convient de vérifier si un fraisage ne constitue pas une solution plus économique ou si les rails ne peuvent pas être livrés directement dans un profil spécial. La faisabilité et la rentabilité sont examinées dans le cadre du mandat système Interaction.

#### **Réduction du bruit par meulage des rails**

La réduction du bruit ferroviaire est une question qui gagne également en importance pour les chemins de fer à voie métrique. En garantissant une surface de roulement des rails continuellement plane dans le sens longitudinal de la voie, le meulage régulier des rails contribue activement à la réduction des émissions sonores atmosphériques et structurelles.

##### **1.4.3.3 Bourrage (définition du positionnement de la voie)**

Le bourrage permet de ramener la voie dans sa position géométriquement correcte.

Une fois suffisamment soulevé, le châssis de voie est redressé et stabilisé par bourrage avant que des appuis ne soient redéfinis sous les rails (appui des traverses en deux points là où les rails reposent sur les traverses). Ces deux appuis (de ballast) par traverse permettent d'éviter toute instabilité de la position telle qu'elle peut être provoquée par le balancement des traverses (appui en un point entre les rails). Dans des cas extrêmes, le balancement des traverses peut faire apparaître des signes manifestes de fatigue sur les rails et provoquer leur rupture au niveau des fissures. En règle générale, un bourrage cyclique est effectué tous les cinq à dix ans.

C'est un fait bien connu: les taux d'altération du positionnement de la voie sur certains tronçons sont comme des empreintes digitales. La qualité atteinte sur un tronçon lors de son renouvellement détermine sa tenue à long terme. Un tronçon en mauvais état se démarque par la suite pendant toute sa durée de vie par une maintenance complexe et coûteuse (bourrage). La qualité initiale et le taux d'altération reflètent l'adéquation des composants de la voie à la charge courante. Mais la qualité subit alors également l'influence décisive des

méthodes et machines utilisées lors de l'élaboration de la plateforme et de la superstructure. Il apparaît donc que l'infrastructure (y compris l'évacuation des eaux) et la superstructure forment à elles deux un système cohérent à optimiser dans son ensemble.

La condition sine qua non d'un positionnement réussi de la voie est une infrastructure solide avec un bon dispositif d'évacuation des eaux et un lit de ballast non pollué afin que l'angle de frottement entre les grains de ballast ne soit pas réduit par la pollution. Dans le cas contraire, les particules fines agissent comme un film lubrifiant ayant une incidence défavorable sur la répartition de la charge. Le bourrage ne tient pas suffisamment longtemps et constitue un gaspillage financier.

#### **Conclusion 17**

Une infrastructure et une superstructure de grande qualité permettent de parvenir à un positionnement de grande qualité de la voie. Un ajustement et un bourrage réguliers permettent de réduire les forces dynamiques à l'œuvre et de contribuer ainsi à garantir la position, la durée de vie prévue et un cycle de vie optimal.

#### **1.4.3.4 Remplacement de composants: rails et traverses**

De manière générale, et en particulier en cas de lubrification insuffisante des boudins de roue, le rail extérieur s'use beaucoup plus au niveau de la joue de roulement dans les rayons relativement étroits. Même avec un bon entretien, il est parfois nécessaire de remplacer les rails au cours du cycle de vie de la voie, idéalement à la moitié ou au tiers d'un point de vue économique. En parallèle, les semelles en plastique situées entre les rails et les traverses doivent être remplacées afin de rétablir l'élasticité du système. Le remplacement individuel des traverses est généralement loin d'être rentable sauf si la voie doit continuer à être exploitée pendant un certain temps à un faible niveau de qualité d'importance secondaire.

#### **1.4.3.5 Garantie de la fonctionnalité des dispositifs d'évacuation des eaux**

Un positionnement stable de la voie suppose une infrastructure stable. L'eau proche de la surface peut détremper les sols ou l'infrastructure et donc en réduire la portance. Des installations d'évacuation des eaux sont indispensables au niveau de la voie ferrée. La tâche des installations d'évacuation est d'absorber les eaux météoriques et d'extraire l'eau non combinée du sol existant, laquelle doit être évacuée par la voie la plus rapide. Pour les installations d'évacuation également, les mesures préventives visant à maintenir une voie sèche sont d'une importance capitale. Elles impliquent notamment le contrôle de la végétation sur le tronçon ainsi que la maintenance des installations d'évacuation à disposition.

#### **Conclusion 18**

L'eau est l'ennemi numéro un de la voie ferrée. Sans une retenue viable de l'eau, les meilleures mesures prises dans le cadre d'une approche fondée sur le cycle de vie restent sans effet.

## **1.5 Solutions visant à assurer la rentabilité globale dans le système véhicule-voie ferrée**

### **1.5.1 Remarque liminaire**

Les solutions proposées ci-après reflètent l'état des connaissances actuelles tirées des recherches nationales et internationales ainsi que des travaux réalisés jusqu'à présent dans le cadre du mandat système Interaction voie métrique. La maîtrise du système a constitué une tentative de compilation et de mise à disposition des connaissances actuelles compte tenu de la rentabilité globale du secteur de la voie métrique. Les solutions proposées doivent être examinées en fonction de leur application concrète afin que l'optimisation économique puisse être pleinement mise en œuvre.

En principe, il convient de mentionner que les connaissances relatives à une gestion durable des actifs des sous-systèmes des véhicules et de la voie ferrée constituent une condition préalable à un système global rentable. Chaque sous-système sans exception doit fonctionner de manière économique en soi avant que l'optimisation du système global puisse être abordée et que les résultats financiers escomptés puissent être atteints.

### **1.5.2 Solutions visant à assurer la rentabilité dans le sous-système des véhicules**

#### **1.5.2.1 Conception conjointe des organes de roulement**

Le Contrôle fédéral des finances (CDF) identifie également un important potentiel d'économie dans la coordination des investissements dans le matériel roulant et, par conséquent, dans les coûts liés au cycle de vie (voir le rapport d'audit transversal sur l'acquisition de matériel roulant par les chemins de fer [«Querschnittsprüfung der Beschaffung von Rollmaterial bei den Bahnen»] du 17 août 2018). La coordination des délais et des appels d'offres conjoints pour le renouvellement des flottes TRV (stratégie coordonnée des flottes) permettraient de former des tailles de lot plus rentables et de mettre durablement en œuvre les conclusions tirées du mandat système Interaction. Il convient en outre de viser une harmonisation technique. En ce qui concerne l'interaction, il s'agit en premier lieu de standardiser la conception globale des véhicules et les concepts d'organes de roulement tout en tenant notamment compte du dimensionnement des charges par essieu, des types de bogies, des profils et des matériaux de roue ainsi que des concepts d'entraînement. Aujourd'hui, il existe grosso modo six concepts (théoriques) d'organes de roulement pour les chemins de fer à adhérence. D'autres s'y ajoutent pour les chemins de fer à crémaillère.

Les organes de roulement actuels des chemins de fer à voie métrique ne sont généralement pas construits de manière adaptée aux courbes. Les charges par essieu augmentent en permanence et se rapprochent de plus en plus du seuil des 16 t (brutes). À partir d'une charge par essieu d'environ 13 t, les signes d'usure majeurs commencent à se manifester dans les classes de rayons inférieures à 250 m.

#### **Solution 1: plateforme conjointe dédiée aux organes de roulement**

Il s'agissait de développer une plateforme d'organes de roulement économiquement viable et stable à long terme pour les chemins de fer à adhérence et à crémaillère en impliquant les commanditaires, l'industrie des véhicules et les chemins de fer à voie métrique et en s'appuyant sur les conclusions tirées du mandat système.

#### **1.5.2.2 Matériaux des organes de roulement**

Dans le cadre du choix des matériaux, on peut aujourd'hui partir du principe que les hautes qualités d'acier des roues peuvent trouver à s'appliquer de la manière la plus économique.

#### **Solution 2: matériaux de roue de grande qualité**

Les chemins de fer à forte usure en raison de rayons de courbure étroits devraient se pencher, pour des raisons économiques, sur l'utilisation de roues en acier de très haute qualité.

### 1.5.2.3 Maintenance des véhicules

La standardisation des concepts d'organes de roulement simplifiera considérablement la gestion des connaissances et des pièces de rechange. La gestion conjointe des connaissances et des pièces de rechange est une condition préalable à l'augmentation de la rentabilité globale. La connaissance détaillée des interactions dans ce contexte ne fait pas partie de l'activité principale des entreprises de transport et pourrait également être gérée de manière centralisée.

#### **Solution 3: gestion conjointe des connaissances relatives à la maintenance des véhicules**

Les conclusions tirées du mandat système révéleront de grands avantages économiques dans le domaine de la maintenance des véhicules si les connaissances peuvent être mises en pratique. Ces connaissances devraient être approfondies et mises à jour dans le cadre d'un cluster de compétences.

Pour pouvoir effectuer une maintenance active, préventive ou conditionnelle des essieux tout au long du cycle de vie, il est indispensable de disposer de connaissances en temps réel sur (l'évolution de) l'état des profils de roue. Jusqu'au niveau des plus petits rayons de courbure, l'influence des profils de roue et de rail revêt une grande importance pour le contact roue-rail et donc pour l'usure attendue des roues et des rails. Une base de données unique des essieux pourrait améliorer la précision des informations, augmenter la qualité des données, garantir la possibilité d'appliquer les connaissances relatives à l'interaction et donc augmenter durablement la rentabilité.

#### **Solution 4: base de données unique des essieux**

Les prestations kilométriques maximales des essieux dépendent du moment adéquat pour le reprofilage et du profil de roue conforme à l'utilisation prévue. Une base de données unique des essieux, associée aux connaissances requises, pourrait améliorer la précision des informations, augmenter la qualité des données, garantir la possibilité d'appliquer les connaissances relatives à l'interaction et donc augmenter durablement la rentabilité.

### 1.5.2.4 Véhicules en exploitation

Les véhicules lourdement motorisés équipés de systèmes de régulation de la traction parfaitement conçus incitent à transmettre, dans le cadre de l'exploitation, les forces maximales sur les rails au prix de valeurs de glissement accrues, que cela soit concrètement nécessaire ou non. Circuler avec des valeurs de glissement accrues entraîne une usure nettement plus importante de la roue et du rail.

#### **Solution 5: réduction du glissement**

Pour les nouveaux véhicules assortis d'exigences élevées en matière de traction et d'accélération (max.  $0,8 \text{ m/s}^2$ ), il faudrait éviter les groupes d'entraînements pour des raisons liées au cycle de vie et examiner le recours à des essieux entraînés supplémentaires (par exemple des bogies booster). Pour les véhicules disponibles dont la performance de traction est suffisante, il faudrait envisager de limiter le glissement (éventuellement avec demande consciente de la part du personnel des locomotives).

### 1.5.3 Solutions visant à assurer la rentabilité dans le sous-système de la voie ferrée

#### 1.5.3.1 Conception de la voie ferrée

Les coûts d'investissement représentant une grande partie des coûts liés au cycle de vie de la voie ferrée, l'allongement de la durée de vie des composants de la voie doit être mis au premier plan.

Les dépenses initiales élevées lors du réinvestissement (PAP, installations de construction, etc.) et la nécessité d'une grande qualité de construction (état initial) conduisent à privilégier, pour des raisons de rentabilité, les grands lots de construction avec interruption toujours totale du trafic.

Une structure standard de la voie ferrée selon D RTE 22540 (4.1 avec couche de base HMT) est également la solution la plus économique à long terme selon les connaissances actuelles.

Outre une bonne évacuation des eaux et une infrastructure conforme aux normes, il s'avère qu'une couche d'étanchéité, s'agissant d'AC Rail, est préférable d'un point de vue économique puisqu'il s'agit d'augmenter au maximum la durée de vie totale de la voie ferrée.

#### **Solution 6: structure de la voie ferrée**

Une structure standard de la voie ferrée selon D RTE 22540 avec couche de base HMT est préférable du point de vue du cycle de vie.

L'écartement des voies ne devrait pas être inférieur à 1000 mm. Sur les tronçons rectilignes enregistrant des vitesses supérieures à 80 km/h, un écartement de 1002-1004 mm devrait être garanti afin de pouvoir assurer la stabilité du véhicule même en cas de configurations roue-rail défavorables. Dans le cas contraire, l'apparition soudaine d'un véhicule instable peut entraîner des mesures d'urgence coûteuses sur les véhicules et la voie.

#### **Solution 7: écartement des voies en ligne droite**

Sur les tronçons rectilignes enregistrant des vitesses supérieures à 80 km/h, un écartement de 1002-1004 mm devrait être garanti afin d'éviter des mesures coûteuses de stabilisation des véhicules.

#### 1.5.3.2 Matériaux de la voie ferrée

Pour les charges moyennes à relativement élevées pour lesquelles l'utilisation de traverses en béton est en principe plus économique, il faudrait impérativement utiliser la semelle de traverse pour des raisons de cycle de vie. En cas de charges plus faibles et de rayons étroits inférieurs à 250 m, la prudence est de mise lors de l'utilisation de traverses en béton (rigidité de la voie ferrée). Le système global de la superstructure devrait alors être particulièrement bien adapté. En cas de charges plus faibles et dans des courbes très étroites, l'utilisation de traverses en acier ou en bois peut être tout à fait rentable pour l'ensemble de l'ouvrage (encore à l'étude dans le cadre du mandat système).

#### **Solution 8: traverses**

Si des traverses en béton sont utilisées, l'infrastructure doit correspondre aux prescriptions standard et seules des traverses avec semelle devraient être utilisées (indépendamment du lieu de montage). Cela vaut également pour les aiguilles posées sur des traverses en béton sur lesquelles il convient d'appliquer différentes rigidités pour la semelle.

En cas de faibles charges liées à des rayons étroits, des traverses en bois ou en acier peuvent être envisagées.

Concernant les rails, le profil standard 46E1 figure certainement au premier plan d'un point de vue économique. En cas d'utilisation de profils plus grands, il convient de prêter une grande attention à l'écartement des voies et au contact roue-rail afin de ne pas produire une usure excessive ou une instabilité des véhicules.

Dans les courbes, l'utilisation de rails de qualité 350 HT en général et 400 HT en dessous de 250 m est la plus économique. Si la file intérieure doit malgré tout être meulée en raison de

l'apparition (retardée) d'ondes de glissement, il convient de noter que la file extérieure n'est pas automatiquement rectifiée pour correspondre au nouveau profil.

Comme mentionné précédemment, le meulage cyclique des rails revêt une grande importance économique. Dans les courbes, il convient toutefois de veiller à ce que les profils d'usure établis dans la file extérieure ne soient pas éliminés et remis à l'état neuf. Ce n'est pas optimal d'un point de vue économique, le couple roue-rail tentant de rétablir ce profil d'usure. La file intérieure avec formation d'ondes doit en revanche être traitée. Des propositions pour des profils de rail optimaux sont en cours d'élaboration.

#### **Solution 9: qualité des rails**

Dans les virages, il convient d'utiliser un rail haute qualité de 350 HT (moins de 250 m = 400 HT). Ces qualités de l'acier favorisent une rentabilité globale optimale, dans la mesure où les rails extérieurs ne sont pas reprofilés ou du moins pas dans le nouveau profil.

### **1.5.3.3 Maintenance de la voie ferrée**

Lors de la maintenance de la voie ferrée, un calendrier optimal et stable avec une qualité d'exécution élevée est le meilleur garant de la rentabilité grâce à la stabilité dans l'exécution des travaux et à l'allongement de la durée d'utilisation.

#### **Solution 10: planification stable et grande qualité d'exécution**

Une planification stable à long terme de l'entretien et du renouvellement, associée à une bonne gestion de la qualité, augmente considérablement la rentabilité.

Bourrage et meulage périodiques sont indiqués et doivent être effectués au moment adéquat pour des raisons économiques.

#### **Solution 11: bourrage et meulage**

Le bourrage et le meulage sont les mesures de maintenance périodiques les plus importantes pouvant garantir ou prolonger la durée de vie et sont donc la condition préalable à une rentabilité élevée.

Un diagnostic régulier de la voie ferrée et la gestion des actifs qui en découle aident à apprécier la précision des prévisions et donc à définir les mesures adéquates à prendre au moment opportun (moment le plus économique) sur la voie ferrée.

#### **Solution 12: diagnostic unique et base de données de la voie ferrée**

Le moment le plus économique pour effectuer la maintenance et le renouvellement de la voie ferrée doit pouvoir être prévu et fournir les éléments nécessaires concernant l'ampleur des travaux. Un diagnostic et une base de données uniques de la voie ferrée, associés aux connaissances requises, améliorent la précision des informations, augmentent la qualité des données, garantissent la possibilité d'appliquer les connaissances relatives à l'interaction et donc accroissent durablement la rentabilité globale.

## 1.5.4 Solutions globales

### 1.5.4.1 Courbes particulièrement étroites

Dans les virages (les plus) serrés, seules les nouvelles configurations d'organes de roulement avec une commande active des essieux pourront circuler sans usure excessive. Il reste à déterminer si cela fait sens d'un point de vue économique global. Quoi qu'il en soit, les solutions de modernisation des bogies et/ou les nouveaux profils roue-rail calmeront certes la situation mais sans en éliminer les causes. Pour les chemins de fer présentant de nombreux rayons inférieurs à 250 m et des rampes allant jusqu'à 45‰, le conditionnement du champignon de rail depuis les véhicules est disponible à court et moyen termes afin d'obtenir rapidement des améliorations économiques. Une autre condition préalable est que le graissage des boudins de roue garantisse la présence d'un film lubrifiant durable sur la joue de roulement des rails extérieurs de la courbe.

#### **Solution 13: conditionnement du champignon de rail et graissage des boudins de roue**

Pour réduire les phénomènes d'usure des roues et des rails, il est possible d'utiliser à court ou moyen terme le conditionnement du champignon de rail depuis le véhicule pour les chemins de fer comptant de nombreuses courbes serrées. Un bon fonctionnement du système de graissage des boudins de roue est obligatoire.

### 1.5.4.2 Profils roue-rail

Les profils roue-rail actuels (exemple W98 pour 46E1 et 54E2) ne sont pas compatibles à l'état neuf en termes d'usure. Il convient de développer des profils d'usure pour différents domaines d'application (nombreuses courbes, lignes droites empruntées avec une vitesse accrue).

#### **Solution 14: conservation des profils naturels d'usure**

Jusqu'à ce que les profils d'usure roue-rail soient optimisés, les rails extérieurs présentant des profils d'usure naturels ne doivent pas être meulés à l'état neuf. De plus, il faut si possible éviter d'installer des rails 54E2 dans les courbes et prévoir un écartement suffisant (1004 mm) dans les lignes droites. Pour les roues des véhicules circulant sur des lignes sinueuses, il existe des premiers profils d'usure qui pourraient être utilisés pour des essais d'exploitation.

### 1.5.4.3 Solutions des directives souveraines

#### **Solution 15: directives souveraines (LCdF, OCF, DE-OCF, OARF)**

Les prescriptions souveraines doivent également contenir des mécanismes de commande pour garantir la rentabilité globale véhicule-voie ferrée et ne pas se limiter à la garantie de la sécurité. Les détails techniques doivent être réglés dans les RTE (voir solution 17).

#### **1.5.4.4 Gestion des connaissances**

Les hypothèses établies au début du traitement du mandat système Interaction véhicule-voie ferrée métrique se confirment au fur et à mesure, avec l'obtention également de nouvelles connaissances. Les connaissances disponibles et les nouveautés sont la clé d'une approche économique globale. Ces connaissances doivent être mises à jour, étendues et, le cas échéant, transférées dans le secteur. Les solutions suivantes sont indiquées à cet effet:

##### **Solution 16: savoir-faire roue-rail**

Pour les chemins de fer à voie métrique, il faut mettre en place un centre de compétences roue-rail qui reprenne les conclusions tirées du mandat système, les met à jour, les développe et assure le conseil aux chemins de fer.

##### **Solution 17: RTE**

Le transfert prévu des nouvelles connaissances dans les RTE doit être poursuivi avec rigueur. Selon l'état actuel des connaissances, les nouvelles RTE ci-dessous doivent notamment être établies:

- RTE Conditionnement du champignon du rail, voie métrique
- RTE Graissage des boudins de roue, voie métrique
- RTE Meulage des rails, voie métrique

Les RTE disponibles doivent être mises à jour à l'aune des nouvelles connaissances.