

**Maîtrise de système – Interaction Véhicule/Voie ferrée à
écartement métrique**

**Projet P2
Conditionnement du champignon du rail / Lubrification du
boudin**

Rapport final

**Module 1
Vue d'ensemble du système, des produits et de la mise en œuvre**

Novembre 2022

Historique des versions

Version	Date	Vérifié par	Description
1.0	05.08.22		Structure du rapport
2.0	29.09.22		Rapport préliminaire
3.0	18.11.22		Rapport final

Rédaction

Nom	Entreprise	Détails de la contribution
Nikolaus RITTER	zb Zentralbahn AG	Structure et conclusion du document
Nicole DÖRR, Andreas TRAUSMUTH	AC2T research GmbH	Structure du document, rédaction des paragraphes 1 à 4 et 6, collaboration à la rédaction des paragraphes 5 et 7 à 9
Gerald TRUMMER	Virtual Vehicle Research GmbH	Collaboration à la rédaction des paragraphes 5 et 7 à 9
Prof. Roger LEWIS, Ben WHITE	University of Sheffield	Collaboration à la rédaction des paragraphes 5 et 7

Remerciements

Une partie de ce travail a été réalisée à la Virtual Vehicle Research GmbH à Graz, en Autriche. Les auteurs remercient le ministère fédéral autrichien de la protection du climat (BMK, Österreichische Bundesministerium für Klimaschutz), le ministère fédéral autrichien du Numérique et des Entreprises (BMDW, Österreichische Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort), le Land de Styrie (département 12) et le ministère autrichien de promotion économique de Styrie (SFG, Steirische Wirtschaftsförderung) pour leur soutien dans le cadre du programme COMET K2 Competence Centers for Excellent Technologies. Le programme est géré par l'Association autrichienne pour la promotion de la recherche (FFG, Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH).

Autorisations

Version	Responsable	Date
1.0	Technical Board	27.10.2022
1.0	Management Board	31.10.2022

Sommaire

1	Préambule	5
2	Domaine d'application et objectifs du module 1.....	7
3	Organisation du rapport.....	8
4	Résumé des résultats obtenus dans le P1.....	9
5	Vue d'ensemble du système (Module 1.1).....	11
5.1	Résumé des connaissances actuelles de SKK et de SKS, y compris les règlementations connues (Livrable 1.1.1)	11
5.1.1	Connaissances existantes des systèmes de SKK et de SKS dans la littérature scientifique.....	11
5.1.1.1	Introduction	11
5.1.1.2	Adhérence et frottement dans le contact roue/rail.....	13
5.1.1.3	Gestion des frottements	15
5.1.1.4	Produit de SKK.....	18
5.1.1.5	Recherche sur le terrain à propos des produits de SKK	20
5.1.1.5.1	Effet des usures ondulatoires.....	20
5.1.1.5.2	Effet sur les forces de contact.....	23
5.1.1.6	Tests de laboratoire sur les produits de SKK - effet sur l'adhérence.....	25
5.1.2	Normes, directives et réglementations existantes.....	29
5.1.3	Mécanisme de production du bruit.....	30
5.1.3.1	Crissements en courbe.....	30
5.1.4	Mécanisme d'usure et de détérioration du contact roue/rail	35
5.1.4.1	Approche statistique.....	35
5.1.4.2	Approche mécanique de contact	36
5.1.4.3	Approche hybride	39
5.1.5	Modélisation et simulation	41
5.1.5.1	Forces d'adhérence.....	41
5.1.5.2	SKK, couche du troisième corps et contamination.....	42
5.1.5.3	Rugosité de surface	47
5.1.5.4	Usure	48
5.1.6	Gestion du frottement des rails intérieurs et/ou extérieurs	48
5.2	Situation des connaissances inexistantes dans le module 1.1 (livrable 1.1.2).....	49

	5.3	Principaux résultats du module 1.1	50
6		Vue d'ensemble des produits (module 1.2).....	51
	6.1	Liste et évaluation (pour/contre) des produits de SKK et de SKS actuellement disponibles en Suisse et à l'étranger (Livrable 1.2.1).....	51
	6.1.1	Les produits de SKK et de SKS.....	51
	6.1.2	Performances du SKK et de la SKS	52
	6.1.3	Impact environnemental du SKK et de la SKS.....	52
	6.1.4	Interactions possibles entre SKK et SKS.....	54
	6.2	Situations des connaissances inexistantes dans le module 1.2.....	55
	6.3	Principaux résultats du module 1.2	55
7		Mise en œuvre opérationnelle.....	56
	7.1	Liste et évaluation (pour/contre) des systèmes embarqués utilisé à l'échelle nationale et internationale (livrable 1.3.1).....	56
	7.1.1	Systèmes d'application embarqués pour le SKK et la SKS.....	56
	7.1.2	Méthodes de mesure pour l'évaluation du SKK et de la SKS.....	57
	7.1.3	Facteurs d'influence sur l'effet du SKK et de la SKS	63
	7.1.4	Propagation ou portée des produits de SKK.....	63
	7.1.4.1	Propagation.....	63
	7.1.4.2	Rémanence ou capacité de rétention	64
	7.1.4.3	Consommation d'énergie.....	65
	7.1.4.4	Usure et fatigue des contacts roulants.....	66
	7.1.4.5	Formation d'usure ondulatoire	68
	7.1.4.6	Réduction du bruit	68
	7.1.4.7	Angle d'attaque	69
	7.1.4.8	Glissement	71
	7.1.4.9	Environnement.....	71
	7.1.4.10	Echelle pour la variation du produit.....	74
	7.1.5	Exemples d'utilisation de SKK et de SKS	75
	7.2	Localisation des connaissances manquantes dans le module 1.3.....	76
	7.3	Principaux résultats du module 1.3	76
8		Résumé et conclusion	78
9		Perspectives et recommandations	82

Résumé du rapport

Le « Module 1 - Vue d'ensemble du système, des produits et de la mise en œuvre » s'inscrit dans le cadre du projet programme « Maîtrise de système – interaction Véhicule/Voie ferrée à écartement métrique » plus précisément dans le projet « P2 – Conditionnement du champignon du rail / Lubrification du boudin ».

Le module 1 comprend l'ensemble des connaissances existantes et accessibles sur les systèmes, les lubrifiants et les systèmes embarqués pour le conditionnement du champignon de rail (SKK) et la lubrification des boudins des roues (SKS) des voies ferrées à écartement métrique. Pour cela, des publications scientifiques, des rapports techniques, des fiches de données sur les produits et la sécurité, des normes, des directives, des expertises, des retours d'expérience, ont été rassemblés, étudiés et analysés pour définir leur application au chemin de fer à écartement métrique.

Les objectifs du module 1 est de fournir des bases nécessaires pour les travaux des modules et projets suivants :

- Récapitulatif des règles de l'art et identification des connaissances manquantes (sous-module « 1.1 Vue d'ensemble du système »)
- Identification des performances du SKK et de la SKS sur la base des connaissances existantes (sous-module « 1.2 Vue d'ensemble des produits »)
- Identification des performances des systèmes embarqués sur la base des connaissances existantes et application des connaissances issues du module 1.1 et 1.2 dans le contexte d'écartement métrique (sous-module « 1.3 Mise en œuvre »)

Le résultat de cette recherche est l'établissement d'un inventaire des connaissances existantes (accessibles) et manquantes dans le domaine des voies à écartement métrique :

- Le contact roue/rail est un système tribologiques soumis aux frottements, à l'usure et à la fatigue
- La SKS est principalement utilisée pour réduire l'usure des roues au niveau des boudins et du rail au niveau du champignon. Le SKK est principalement utilisé pour la réduction du bruit. Il peut également contribuer à réduire la formation d'usure à court terme (ex : usure ondulatoire) et à long terme (essai opérationnel chez MGBahn). La SKS demande un faible coefficient de frottement alors que pour le SKK, les coefficients sont définis afin d'obtenir la réduction de bruit ou d'usure souhaitée, sans oublier de garantir les distances de freinage de sécurité et de répondre aux exigences de traction. Habituellement les graisses utilisées pour le SKK et la SKS sont des graisses dites « molles »
- Du côté des normes, des directives et des réglementations : les normes EN 15427 (parties 1-1 et 2-1), EN 16028 et R RTE 49410 concernent les produits de SKS et leurs applications. Des normes comparables pour le SKK n'existent actuellement que sous forme de spécifications techniques (CEN/TS 15427, parties 1-2 et 2-2). Une R RTE sur le SKK manque actuellement. Il n'existe pas de norme se rapportant spécifiquement aux voies métriques. On peut toutefois partir du principe que ce qui est appliqué pour la voie normale est également applicable, par analogie, pour la voie métrique

- Le coefficient de traction ou d'adhérence dépend de plusieurs facteurs: l'usure, le type et la quantité de SKS et SKK, la température, l'eau, le sable (pour le freinage), les feuilles et autres débris pour ne citer que les plus importants
- Les principaux facteurs d'influence sur la performance de SKK et de SKS sont notamment : les conditions de contact roue/rail lié à l'état de la ligne et du véhicule (vitesse, usure, angle d'attaque, glissement, ondulation), l'environnement (température, humidité, couches d'oxyde, pollution) et la variation de la qualité du produit
- Les paramètres qui décrivent la performance de SKK et de SKS sont notamment : la propagation le long du rail ou la portée sur le rail (pick-up/carry-down), le maintien de la qualité et de l'efficacité, la consommation d'énergie, l'usure, la fatigue des contacts de roulement, la formation d'usure ondulatoire, la réduction du bruit
- Il existe des méthodes de mesure pour l'évaluation tribologique (principalement le frottement) de la SKS et du SKK tout au long de la chaîne d'essai, des tribomètres (ex : banc d'essai à double disques) aux essais à échelle réelle jusqu'aux essais sur le terrain. Toutefois, il s'agit généralement de méthodes individuelles. Des normes sur la caractérisation tribométrique sont en cours de rédaction et se trouvent dans les normes EN 15427 (parties 1-1 et 2-1) pour la SKS et CEN/TS 15427 (partie 1-2 et 2-2) pour le SKK
- Le bruit généré par le contact roue/rail est dû au roulement sur les lignes droites ainsi qu'au glissement transversal des roues et aux contacts des boudins en courbes. Le bruit en courbe est généré par la vitesse de glissement, les caractéristiques modales de la roue (y compris l'amortissement), la charge verticale, la position de contact (latérale) et le frottement. Ce dernier dépend de nombreux paramètres déjà mentionnés ci-dessus
- Les modèles simulant le contact roue/rail sont utilisés principalement pour calculer les forces d'adhérence, et dans une moindre mesure le SKK (couche supplémentaire entre la roue et le rail), la pollution due à l'exploitation ferroviaire comme les oxydes de fer, la pollution saisonnière et locale comme les feuilles mortes. D'autres modèles se concentrent sur les effets de la rugosité de la surface et de la température ou considèrent la perte de matériau d'usure et de fatigue
- Une recherche de marché a mis en évidence 170 produits qui font référence au SKK et SKS, dont environ 70% pour une utilisation en SKK. Les normes, directives et fiches techniques se concentrent sur des propriétés typiques des lubrifiants tels que l'aspect, la couleur, la consistance, la viscosité, la protection contre la corrosion, la compatibilité avec les élastomères, l'inflammation et le comportement au feu. Les caractéristiques pertinentes pour le ferroviaire sont la réduction de l'usure et du bruit, le coefficient de frottement et la biodégradabilité, qui ne sont que partiellement disponibles
- Une recherche de marché a mis en évidence 7 fabricants de systèmes d'application embarqués
- Il n'y a pas de normes, directives ou de règlements qui traitent les exigences pour le SKK et la SKS spécifiquement pour la voie à écartement métrique

Abréviations dans le cadre de la maîtrise de systèmes

AAR	Association of American Railroads
AOA	Angle of attack (Français : Angle d'attaque)
SKK	Conditionnement du champignon du rail ou agent de conditionnement du champignon du rail
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung
COF, CoF	Coefficient of friction (Français : Coefficient de frottement)
DIN	Deutsches Institut für Normung, DIN-Norm
DOF	Degree of freedom (Français : degré de liberté)
EN	Norme européenne
FL	Flange lubrication / lubricant (Français : SKS)
FM	Friction modifier (Français : Modificateur d'adhérence)
GDU	Grease distribution unit (Français : système d'application de graisse)
HPF	High positive friction modifier
HPT	High pressure torsion test rig (Français : banc d'essai de torsion à haute pression)
SKS	Lubrification des boudins ou lubrifiant pour boudins
LCF	Low coefficient friction modifier
MBD	Multi-body dynamics (Français : dynamique multi-corps)
MTM	Mini traction machine, Mini machine de traction
μ	Coefficient de frottement (Anglais : Coefficient of friction)
RAILplus	RAILplus – Die Meterspurigen (RAILplus AG)
RCF	Rolling contact fatigue (Français : fatigue des contacts roulants)
RTE	Regelwerk Technik Eisenbahn, Règlement Technique Ferroviaire
TOR-FM	Top of rail friction management (Français : SKK)
UIC	International Union of Railways, Union Internationale de Chemin de Fer
VHPF	Very high positive friction modifier (Français : Améliorateur de traction)

Traduction des termes dans le cadre de la maîtrise de systèmes

Angle of attack	Angle d'attaque
Base body	Corps principal dans un système tribologique (par ex : rail)
Coefficient of friction (COF)	Coefficient de frottement, coefficient de friction
Corrugation	Usure ondulatoire
Counter-acting body	Contre-corps dans un système tribologique (par ex : roue)
Creep, creepage	Glissement
Flange lubrication (FL)	Lubrification du boudin
Friction	Frottement
Friction modifier (FM)	Modificateur d'adhérence
Lubricating medium	Lubrifiant
Onboard	Embarqué, lié au véhicule
Rolling contact fatigue (RCF)	Fatigue des contacts roulants
Slip	Glissement
Third body, third layer	Troisième corps, couche entre la roue et le rail
Top of rail friction management	Conditionnement du champignon du rail
Wayside	Chemin de fer, côté ligne, côté rail, sur rail, fixe
Wear	Usure
Wheel	Essieu (roue)

1 Préambule

RAILplus - Die Meterspurigen (RAILplus AG) est la plateforme de coopération entrepreneuriale des chemins de fer métriques de suisses, composée actuellement de 20 exploitants ferroviaires. Dans le cadre de ce programme, des projets sont développés conjointement afin de réduire les coûts de développement et d'accélérer les progrès. Dans ce contexte, le projet « Maîtrise de système - Interaction Véhicule/Voie ferrée à écartement métrique » aborde les points suivants:

- Lister des défis et les connaissances existantes, localiser les manques de connaissances et les développer
- Approches de solutions de développement du véhicule et de l'infrastructure optimaux avec des recommandations qui tiennent compte des conditions d'exploitation respectives
- Elaboration de Regelwerk Technik Eisenbahn (RTE) correspondantes et développement de la réglementation nationale

« Maîtrise de système – Interaction Véhicule/Voie ferrée à écartement métrique » est organisé en six projets interconnectés:

- P1 : Analyse des connaissances existantes
- **P2 : Conditionnement du champignon du rail / Lubrification du boudin**
- P3 : Bases du contact roue/rail
- P4 : Rigidité de la voie
- P5 : Véhicules
- P6 : Rentabilité globale

L'utilisation de nouveau matériel roulant dont les charges à l'essieu sont plus élevées et dont les bogies sont moins adaptés en courbe, et l'évolution de la superstructure (par exemple les traverses en béton) augmentent considérablement l'usure des roues et des rails ainsi que le crissement en courbe. C'est pourquoi, le projet P2 mettra l'accent sur l'identification des mécanismes sous-jacents et sur le développement de contre-mesures adaptées. Les principes fondamentaux du conditionnement du champignon du rail (SKK) et de la lubrification des boudins des roues (SKS) des voies métriques sont mise en place afin d'optimiser et d'évaluer l'utilisation combinées de ces deux systèmes à l'échelle du réseau. Seuls les systèmes embarqués pour l'application d'agents de conditionnement et de lubrifiants du contact roue/rail sont pris en compte.

La partie P2 est divisée en différents modules de la façon suivante:

- **Module 1 : Vue d'ensemble des systèmes, des produits et de leur application**
- Module 2 : Base juridique pour le SKK et la SKS
- Module 3 : Réduction du bruit par le SKK et la SKS
- Module 4 : Réduction de l'usure grâce au SKK
- Module 5 : Bases scientifiques du SKK et de la SKS
- Module 6 : Synthèse, conclusion et mise à disposition de modules pour une RTE de SKK et une RTE de SKS s'appliquant aux voies métriques
- Module 7 : Utilisation du SKK dans les tronçons très raides (option)

➤ Module 8 : Conditionnement / lubrification en fonction des besoins (option)

Ce document a été développé en coopération entre RAILplus AG, Virtual Vehicle Research GmbH, l'Université de Sheffield et AC2T research GmbH (AC²T). Les connaissances acquises dans le module 1 du P2 constituent la base des activités ultérieures dans les modules suivants de ce projet et des autres projets du programme de Maîtrise du système.

2 Domaine d'application et objectifs du module 1

Le module 1 établit une « Vue d'ensemble du système, des produits et de leur application ». Celui-ci rassemble toutes les connaissances existantes (accessibles) concernant le système, les produits lubrifiants et les systèmes embarqués, pour le conditionnement du champignon du rail et la lubrification du boudin de la roue des voies métriques. Pour cela, des publications scientifiques (simulations, expériences, études sur le terrain), des rapports techniques, des fiches de données des produits et de données de sécurité, des normes, des directives, des expertises, des retours d'expérience, des témoignages, ont été rassemblés, étudiés et analysés pour définir leur application au chemin de fer à écartement métrique. Le résultat de cette recherche est un inventaire de connaissances existantes (accessibles) et inexistantes (inaccessibles) dans le domaine des voies métriques. Les résultats seront résumés dans un rapport et serviront de base des travaux dans les modules suivants du projet P2. Aucun travail analytique ou expérimental n'est prévu dans le module 1.

L'objectif du module 1 est de fournir des données d'entrée pour les modules et projets suivants du programme « Maîtrise de système – Interaction roue/rail écartement métrique ». Plus précisément:

- Récapitulatif des règles de l'art et identification des connaissances manquantes
- Évaluation des performances des produits de SKK et de SKS sur la base des connaissances existantes
- Évaluation des performances des systèmes embarqués sur la base des connaissances existantes et utilisation des connaissances des parties 1.1 et 1.2 du module 1 dans le contexte d'écartement métrique

Le rapport de ce module 1 sera un résumé de connaissances pertinentes et de connaissances manquantes sous forme d'un rapport préliminaire, puis d'un rapport final.

3 Organisation du rapport

En outre, ce rapport comprend 4 livrables (selon la demande du projet P2):

- Livrable 1.1.1 : « Résumé des connaissances actuelles de CRR et SKS (y compris les réglementations connues) dans le module 1.1 »

Au chapitre 5.1

- Livrable 1.1.2 : « Détermination des connaissances manquantes dans le module 1.1 sur le SKK et la SKS »

Au chapitre 0

- Livrable 1.2.1 : « Liste et évaluation (pour/contre) des produits de SKK et de SKS disponibles en Suisse et à l'étranger »

Au chapitre 6.1

- Livrable 1.3.1 : « Liste et évaluation (pour/contre) des systèmes embarqués utilisés à l'échelle nationale et Internationale »

Au chapitre 7.1

4 Résumé des résultats obtenus dans le P1

Le livrable 1.2 du projet P1 « Analyse de base » avait trois objectifs visant à recenser les connaissances actuelles sur l'interaction roue/rail des compagnies de chemin de fer:

1. Grâce à la consultation auprès des compagnies de chemin de fer au sujet de l'usure et la détérioration au contact roue/rail, analyser la relation entre ces phénomènes, les caractéristiques de la voie ferrée (zone d'exploitation, état de la voie, géométrie) et le matériel roulant.
2. Les résultats obtenus sont analysés et évalués en fonction des causes et des conséquences. En cas d'ambiguïté, des entretiens avec les compagnies de chemin de fer concernées sont prévus. Les résultats de l'enquête sont mis à la disposition aux projets P2 à P6 pour servir de base d'autres travaux.
3. Les résultats obtenus sont transmis aux projets P2 à P6 et communiqués aux compagnies de chemin de fer qui ont participé à l'enquête.

La consultation en personne initialement prévue a été remplacée par une consultation écrite pour des raisons de capacité. Il s'est avéré que la plupart des compagnies de chemin de fer ont dû être contactées à plusieurs reprises pour obtenir des réponses complètes.

Les réponses des 17 compagnies de chemins de fer membres de RAILplus, de deux exploitants de tramways et de Forchbahn AG, ont fourni de précieuses informations et connaissances pour le projet « Maîtrise de système - interaction Véhicule/Voie ferrée à écartement métrique »:

- L'usure du boudin et de la surface de roulement de la roue sont les formes les plus fréquentes des dommages subit par les véhicules, avec une proportion de 50%.
- L'usure ondulatoire et l'usure des rails dominant parmi les types de dommages les plus fréquent des surfaces de roulement des rails.
- Plus de la moitié des compagnies de chemin de fer qui ont répondu constatent, ces dernières années, une augmentation des dépenses qu'ils attribuent à une mauvaise performance de l'interaction roue/rail.
- La lubrification du boudin des roues et le conditionnement du champignon du rail devront réduire les bruits en courbe, l'usure des roues et du rail ainsi que la formation d'usure ondulatoire.
- La connaissance du profil de roue et de rail doit être développée de manière à pouvoir déterminer les profils les plus adaptés à une interaction roue/rail optimale ;
- Pour la plupart des chemins de fer interrogés, les charges journalières (moyennes) des voies ont considérablement augmenté en raison de l'augmentation de la fréquence du trafic et des charges sur les essieux.
- Les semelles souples utilisées aujourd'hui sur les travers en béton contribuent efficacement à la réduction des usures ondulatoires, au détriment d'une augmentation du bruit. La solution de ce conflit d'intérêt (réduction de l'usure et augmentation du bruit) avec des semelles optimisées sera une priorité dans le projet P4 qui traite le sujet la rigidité de la voie.
- La formation des employés doit être renforcée afin de créer un langage technique commun pour la « voie métrique », en particulier dans le domaine de l'interaction roue/rail.

- Les compagnies de chemin de fer doivent approfondir la connaissance de leur matériel roulant.
- Les spécifications pour l'achat de nouveaux matériel roulant devraient également inclure les technologies actuelles.

Les résultats détaillés de l'enquête ont été transmis aux projets P1 à P5 et P2 à P6 et constituent une base précieuse de travail.

Pour le projet « P2 – Conditionnement du champignon du rail / Lubrification du boudin », les principales conclusions qui peuvent être tirées :

Lubrification des boudins des roue (SKS)

Toutes les compagnies de chemin de fer utilisent la SKS embarquée. L'objectif est de réduire l'usure des roues et des rails, le bruit dans les courbes et les usures ondulatoires, ainsi que d'améliorer la sécurité en cas de déraillement.

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

Aucune des compagnies de chemin de fer interrogées n'exige l'arrêt de la lubrification pour des raisons environnementales. La plupart des compagnies n'ont pas constaté de défaillance du circuit de voie. Le détail des autres dysfonctionnements seront analysés dans la suite du travail du P2.

Conditionnement du champignon du rail (SKK)

Beaucoup de compagnies de chemin de fer confondent SKK et SKS. Les systèmes embarqués de SKK sont actuellement utilisés sur six lignes. Deux autres lignes utilisent un système en voie, donc des installations fixes. Le SKK, tout comme la SKS, vise à réduire les bruits en courbe, l'usure des roues et des rails ainsi que la formation d'usure ondulatoire.

Les améliorations constatées lors de la mise en œuvre de la SKK varient d'une compagnie de chemin de fer à l'autre, par exemple, une amélioration uniquement pour le bruit. Le projet P2 contiendra une analyse détaillée des améliorations observées.

Aucun dommage aux roues et au rail causé par la mise en œuvre de SKK n'a été constaté.

Certaines compagnies de chemin de fer ont effectué des essais de freinage et de traction avant la mise en service afin de déterminer les effets indésirables sur la performance causés par le SKK.

5 Vue d'ensemble du système (Module 1.1)

5.1 Résumé des connaissances actuelles de SKK et de SKS, y compris les réglementations connues (Livrable 1.1.1)

5.1.1 Connaissances existantes des systèmes de SKK et de SKS dans la littérature scientifique

5.1.1.1 Introduction

Le terme « tribologie » est issu de deux termes grecs, « tribein » qui signifie frotter ¹ et « logos » qui est utilisé pour désigner la science. La tribologie est donc l'étude du frottement, de l'usure et de la lubrification et peut être considérée comme la science des surfaces interagissant en mouvement relatif les unes par rapport aux autres ². Le mot « tribologie » a été utilisé pour la première fois en 1966 dans le cadre du « Rapport Jost », rédigé par un groupe de chercheurs et de représentants de l'industrie ³ au Royaume-Uni. La tribologie est aujourd'hui considérée comme un domaine multidisciplinaire qui a une grande importance dans diverses spécialités de l'ingénierie et des sciences naturelles.

Un système tribologique consiste en un corps principal, par exemple un rail, qui est en contact avec le corps opposé, par exemple, une roue, voir la Figure 1 ci-dessous. Le corps principal et le corps opposé sont sollicités l'un par rapport à l'autre et présentent un mouvement relatif l'un par rapport à l'autre, par exemple un contact glissant pur ou un contact de glissement roulement. La plupart des systèmes tribologiques sont lubrifiés, c'est-à-dire qu'il y a un lubrifiant entre le corps principal et le corps opposé, par exemple, le SKK et le SKS. Le système tribologique prend également l'environnement en compte. Celui-ci contribue considérablement aux caractéristiques de frottement et d'usure, généralement la température et l'humidité.

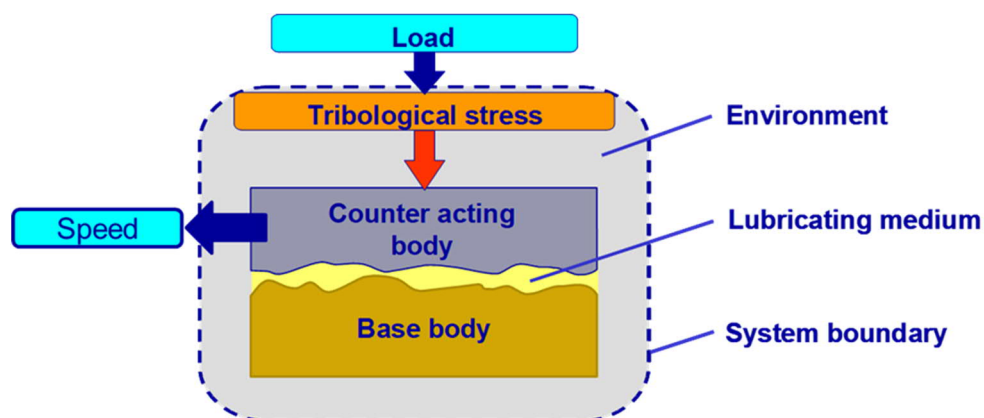


Figure 1 : Schéma représentant un système tribologique ⁴

¹ Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W. (2014) 'Engineering Tribology', Engineering Tribology: Fourth Edition, pp. 1–852. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07515-4>.

² Tabor, D. (1979) 'History of tribology: D. Dowson'. Elsevier.

³ Jost, H.P. (1966) Lubrication: Tribology; Education and Research; Report on the Present Position and Industry's Needs (submitted to the Department of Education and Science by the Lubrication Engineering and Research) Working Group. HM Stationery Office.

⁴ Dörr, N. (2022) 'Condition Monitoring – The lubricant as information carrier. Lecture at TU Wien.

La rugosité de la surface est définie comme les irrégularités de la surface résultant du processus de production. En métrologie de surface, on utilise le principe de filtre passe-haut qui laisse passer les hautes fréquences, donc les faibles longueurs d'onde pour obtenir la rugosité d'une surface mesurée. En tribologie, les surfaces rugueuses s'usent généralement plus rapidement et ont des coefficients de frottement plus élevés que les surfaces lisses.

La Figure 2 illustre les principaux facteurs à prendre en compte lorsqu'on aborde une question tribologique, et ce, peu importe le secteur d'industrie.

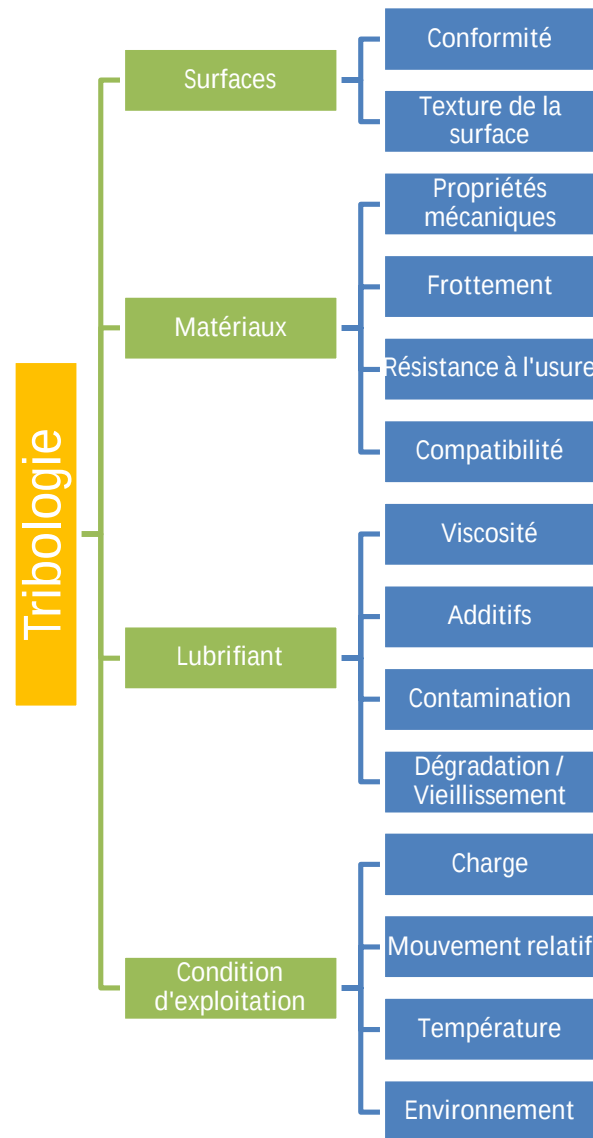


Figure 2 : Facteurs importants à prendre compte lors du traitement d'une problème tribologique ⁵

Ce chapitre recense des écrits, des recherches et d'autres travaux qui contribuent à la compréhension de la gestion du phénomène de frottement et d'usure à l'interface roue/rail des voies métriques. Les écrits recensés porteront principalement sur cette interface.

⁵ Nejadhamzeeigilani, M. (2021) The Effect of Gasoline as a Contaminant on the Tribology of Lubricants within the Valve Train System.

5.1.1.2 Adhérence et frottement dans le contact roue/rail

Ce chapitre introduit brièvement les bases de la tribologie du contact roue/rail pour permettre une meilleure compréhension de l'adhérence et du frottement dans cette interface. On appelle interface l'aire entre deux corps solides, dans ce cas, il s'agit des deux corps solides respectivement la roue et le rail.

Le frottement peut être décrit comme la résistance que l'on rencontre lorsqu'un corps se déplace tangentiellement sur un autre corps. Le rapport entre la force de frottement appliquée au contact et la force normale est appelé coefficient de frottement, comme indiqué dans l'équation 1 :

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \text{ avec } \mu \text{ coefficient de frottement (sans unité); } F_f \text{ force de frottement (N); } F_N \text{ force normale (N)}$$

Cependant, le contact roue/rail n'est pas un simple contact de glissant, mais un contact de glissant roulant. Donc les forces de traction et de freinage doivent également être prises en compte. La Figure 3 montre les forces exercées à l'interface roue/rail lors de l'application d'une force de traction sur le système.

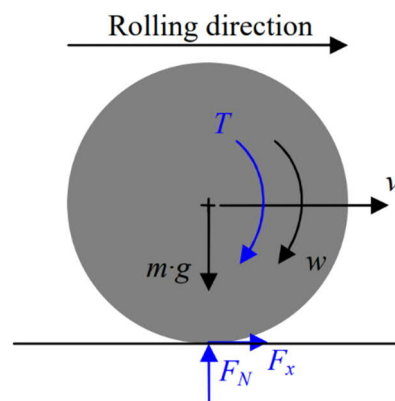


Figure 3 : Schéma de force du contact roue/rail ⁶

Comme le montre la Figure 3, lorsque le couple de traction est appliqué au centre de la roue, celle-ci se déplace selon la vitesse angulaire (w) et la vitesse linéaire (v). Le couple de traction appliqué produit une force longitudinale tangentielle appelée force de traction (F_x). Le rapport entre la force de traction (F_x) et la force normale (F_N) au contact est connu sous le nom de coefficient de traction ou d'adhérence (f) comme vu dans l'équation 2 :

$$f = \frac{F_x}{F_N}$$

Dans le contact roue/rail, il y a un contact de roulement et de glissement car la roue tourne plus vite ou plus lentement que le roulement pur. Le glissement est le glissement causé par une vitesse circonférentielle disproportionnée par rapport à la vitesse linéaire. Le glissement est caractérisé par un pourcentage de la vitesse relative par rapport à la vitesse moyenne de la roue, on considère un roulement pur à mesure que l'on se rapproche de 0 %, et un

⁶ Arias-Cuevas, O. "Low Adhesion in the Wheel-Rail Contact Investigations towards a better understanding of the problem and its possible countermeasures," The University of Sheffield, 2010.

glissement pur lorsque la roue est à l'arrêt, voir la Figure 4⁷. Ce cas est toutefois extrême car on considère que le contact se fait dans une plage de glissement généralement inférieure à 3%. Par conséquent, une zone de glissement dite « slip » et une zone d'adhérence dite « stick » apparaissent au contact, ce qui correspond à un état de roulant-glissant⁸.

La Figure 4 montre la courbe de traction qui illustre la relation entre le coefficient d'adhérence et le glissement. On constate que plus le coefficient d'adhérence augmente, plus la part de glissement (« slip ») augmente et la part d'adhérence (« stick ») diminue simultanément. Le point où la courbe du coefficient d'adhérence forme un plateau est appelé point de saturation et seules les conditions de glissement se produisent au contact.

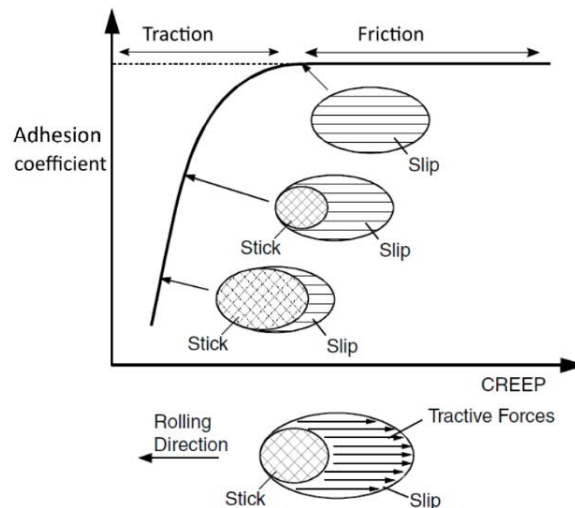


Figure 4 : Représentation de la courbe de traction théorique de Carter et des zones de glissement (Slip) et d'adhérence (Stick) de la surface de contact

Dans certains documents, le terme de coefficient de traction est utilisé au lieu de coefficient d'adhérence, ce qui est probablement dû au fait que les études sont généralement effectuées dans des conditions de traction, c'est-à-dire que les roues accélèrent sur les rails. En principe, le coefficient d'adhérence et le coefficient de traction peuvent être utilisés de la même façon sans perte de précision, bien qu'il soit étrange de décrire les performances de freinage d'un véhicule ferroviaire en fonction du coefficient de traction⁶ ci-dessus. Pour cette raison, certains auteurs ont utilisé le terme coefficient d'adhérence dans leurs recherches sur le freinage. Les termes adhésion et traction peuvent donc être utilisés de façon interchangeable tout au long du présent rapport, mais, dans la mesure du possible, le terme coefficient d'adhérence est utilisé pour désigner les opérations de traction et de freinage.

⁷ Olofsson, U. and Lewis, R. (2006) 'Tribology of the wheel-rail contact', Handbook of railway vehicle dynamics, pp. 121–141.

⁸ Galas, R. and Hartl, M. (2017) 'Friction Modification within Wheel-Rail Contact.

Le Tableau 1 indique les limites de coefficient d'adhérence les plus faibles qui sont jugées satisfaisantes par divers chemins de fer dans différents pays. Il convient de noter que la valeur limite dépend des véhicules utilisés et des réglementations locales. La notice UIC 544-1⁹ fixe une valeur minimum du coefficient d'adhérence à 0.15 pour la conception du frein en phase de freinage. Cette valeur se trouve également dans différentes autres réglementations. Pour les trains équipés de locomotives la valeur limite de traction est en partie nettement plus élevée.

	Coefficient d'adhérence pour le freinage	Coefficient d'adhérence pour la traction
Stockholm Public Transport	0.15	0.18
United Kingdom	0.09	0.2
Netherlands	0.07	0.17
Amtrak (USA)	Non spécifié	0.25

Tableau 1 : Limites de coefficient d'adhérence entre la roue et le rail pour différents chemins de fer dans différents pays¹⁰

5.1.1.3 Gestion des frottements

Comme le suggère le nom « gestion des frottements », il s'agit du processus de mesures visant à contrôler le frottement entre la roue et le rail. La gestion du frottement dans le contact roue/rail a pour but d'améliorer l'efficacité, la sécurité, la réduction du bruit et des vibrations et, à long terme, de réduire l'usure de la roue et du rail et, finalement, les coûts de maintenance.

Les substances citées dans un rapport de Harmon et Lewis¹¹ servent à contrôler le frottement et/ou l'usure dans le contact roue/rail. Les produits de conditionnement du champignon du rail, appelés conditionneur du champignon du rail (SKK), sont destinés à diminuer le coefficient de frottement à partir d'un niveau élevé de contact sec et le maintenir à un niveau « intermédiaire » optimal. Si le coefficient de frottement est trop bas, il a un effet négatif sur la traction et le freinage, au contraire, s'il est trop élevé, il peut provoquer une fatigue excessive du contact de roulement et de l'usure. Ces substances peuvent être divisées en trois catégories :

- Graisses/lubrifiants¹²
- Modificateur de frottement (FM)
- Améliorateurs de traction

⁹ UIC-Merkblatt 544-1 – Bremse – Bremsleistung, 2014

¹⁰ Magel, E.E. (2017) 'A Survey of Wheel/Rail Friction'. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.21949/1503647>.

¹¹ Harmon, M. and Lewis, R. (2016) 'Review of top of rail friction modifier tribology', Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces 10(3), pp. 150–162. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/17515831.2016.1216265>.

¹² Hinweis: In der Schmierstoffchemie werden Schmierstoffe in Abhängigkeit von ihrer Konsistenz in gasförmige, flüssige, halbfeste und feste Schmierstoffe unterteilt. Öle und Fette sind demnach Arten von Schmierstoffen.

Les produits de SKK ¹³ peuvent être classés dans les catégories suivantes en fonction de leur nature ou de leur composition ¹⁴:

- « TOR lubricants » (non secs, donc à base d'huile ou de graisse)
- « TOR-FM » (sec, donc à base d'eau)

Les graisses et les lubrifiants ¹² sont généralement appliqués à l'interface entre la roue et le boudin et sont parfois appelés modificateurs de frottement à faible coefficient (Low Coefficient Friction Modifier, LCF). Dans ce domaine, ils sont utilisés comme lubrifiants pour boudins de roue (SKS). Ils assurent généralement un coefficient de frottement inférieur à 0,1 ce qui permet de réduire l'usure et le bruit ⁸.

Certains produits SKK, comme le HPF (High Positive Friction Modifier), permettent de maintenir le coefficient de frottement à un niveau intermédiaire compris entre 0,2 et 0,4. Les produits SKK doivent également présenter une tendance positive dans la courbe de traction, comme illustrer dans la Figure 5 ¹⁵. Le SKK est conçu pour produire une caractéristique de frottement positive (« positive Friction »), c'est-à-dire une évolution positive de la traction au fur et à mesure que le glissement augmente, empêchant ainsi les vibrations de type « stick-slip » (secousses) dans le contact, qui entraînent un bruit excessif et la formation d'usure ondulatoire.

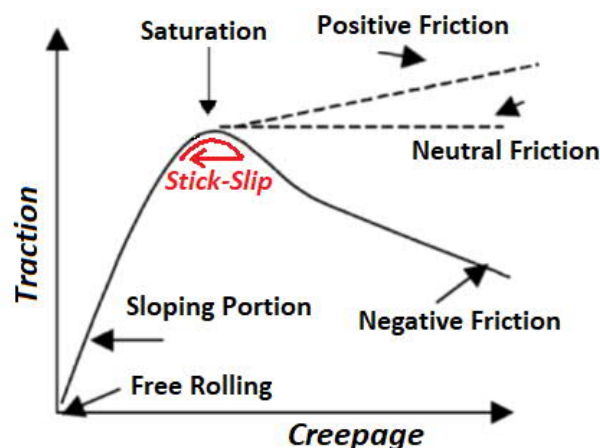


Figure 5 : Diagramme Glissement-Traction illustrant la différence entre les caractéristiques de frottement positifs et négatifs ¹⁵

Les améliorateurs de traction tels que le sable, augmentent généralement l'adhérence au sein du contact roue/rail afin d'obtenir une meilleure traction et un meilleur freinage dans certaines conditions. Cela se traduit par un coefficient de frottement supérieur à 0,4. Ces produits sont appelés Very High Positive Friction Modifier (VHPF). ⁸

¹³ Hinweis: SKK-Produkte (TOR-FM) wird in diesem Bericht als allgemeiner Begriff verwendet und gilt daher sowohl für trocknende als auch für nicht trocknende Produkte.

¹⁴ Stock, R. et al. (2016) 'Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application', Wear, 366–367, pp. 225–232. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2016.05.028>.

¹⁵ Eadie, D.T., Kalousek, J. and Chiddick, K.C. (2002) 'The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena', Wear, 253(1–2), pp. 185–192. Verfügbar auf: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00098-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00098-4).

La Figure 6 montre les zones typiques du contact roue/rail dans lesquelles le SKK et la SKS sont appliqués. Il convient de noter que, sur un chemin de fer à écartement métrique, la lubrification des boudins (ligne verte), s'étend dans ce schéma trop loin dans la surface de roulement du rail et devrait plutôt être appliquée exclusivement sur le flanc du champignon du rail. Sur la Figure 6, le SKK est appliqué uniquement sur la surface intérieure du rail en courbe. Dans la littérature, il est parfois indiqué que le SKK devrait être appliqué sur les deux surfaces de roulement du rail (ce point sera abordé plus en détail au cours de ces travaux de recherche P2).

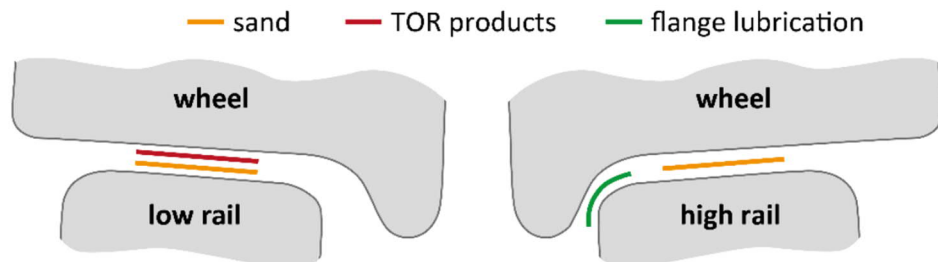


Figure 6 : Représentation schématique des zones typiques de l'application de SKK et de SKS pour la gestion du frottement ⁸

Ce rapport traite également de la lubrification du contact entre le boudin et le flanc du champignon du rail, où l'usure peut être réduite à l'aide de graisse ou d'huile, Figure 7. Les conditions de contact entre le boudin et le flanc du champignon du rail sont exigeantes, car ce contact présente une pression de contact et un glissement élevé par rapport au contact entre la surface de roulement et le champignon du rail.

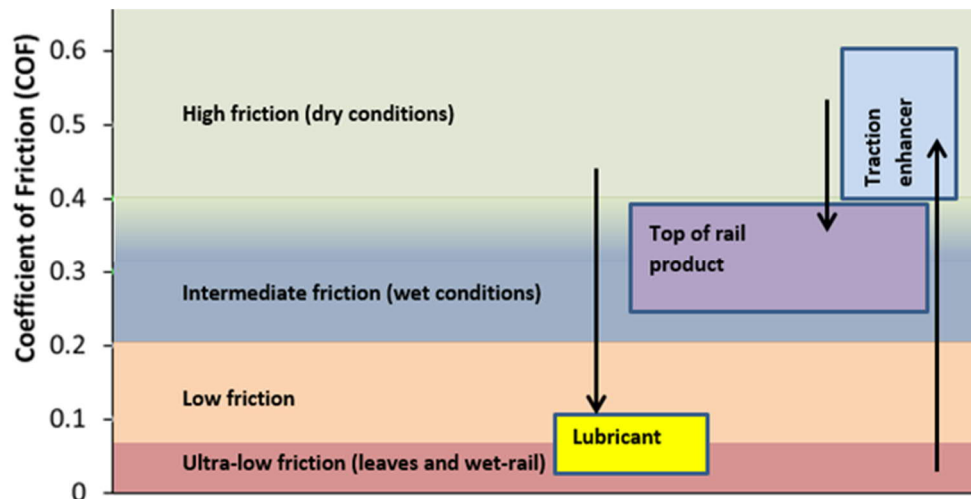


Figure 7 : Plage de coefficient de frottement préférentielles de différents produits pour la gestion du frottement ¹⁶

¹⁶ White, B., Lee, Z. S. and Lewis, R. (2022) "Towards a Standard Approach for the Twin Disc Testing of Top-Of Rail Friction Management Products," Lubricants, 10(6), p. 124.

La graisse lubrifiante est souvent utilisée pour lubrifier le contact entre le boudin et le flac du champignon du rail lorsqu'un train franchit une courbe. La graisse lubrifiante contribue ainsi à protéger la roue et le rail d'une usure excessive et peut également contribuer à la réduction du bruit. Dans les systèmes fixes (en voie), la graisse est généralement appliquée automatiquement sur le champignon du rail au début de la courbe par un dispositif de lubrification au sol (Système d'application de graisse, Grease distribution Unit, GDU, Figure 8). Une quantité différente de graisse est appliquée en fonction du nombre d'essieux du train en approche. La graisse passe par les orifices de l'applicateur, puis est absorbée par les boudins des roues qui passent et lubrifient ainsi la longueur de la courbe ¹⁷. Ce rapport se limite toutefois aux dispositifs embarqués, là où les huiles et les graisses à faible consistance sont les plus utilisées.

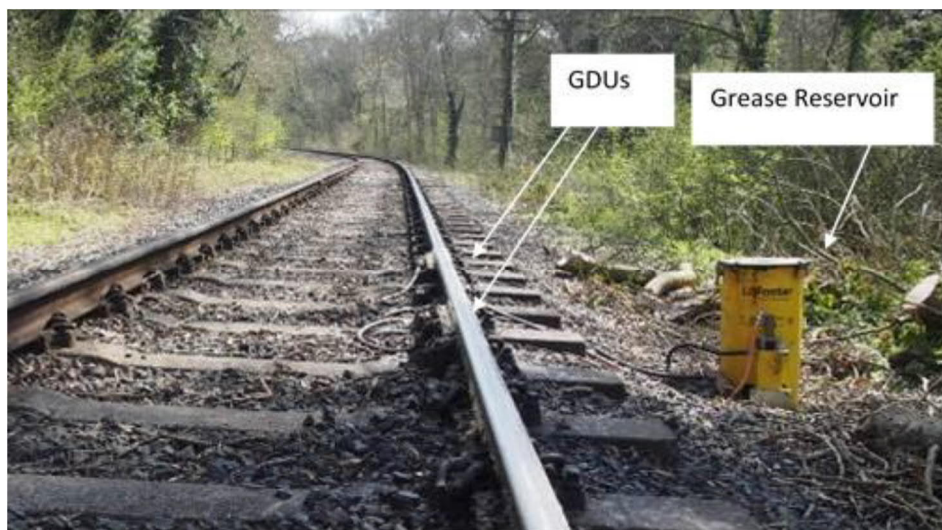


Figure 8 : Système typique d'application de graisse en voie ¹⁸

5.1.1.4 Produit de SKK

Comme indiqué dans le paragraphe 5.1.1.3, les produits SKK varient dans leur forme, leur composition et leur utilisation. Auparavant, certains des produits de SKK utilisés étaient sous forme de bâtonnets solides (lubrifiants solides). Une étude publiée en 1992 a montré que de tels produits étaient capables de modifier la courbe de traction au contact roue/rail d'une pente négative à une pente positive. La principale difficulté des SKK sous forme de bâtonnets solides réside dans la maîtrise de la quantité de produit appliqué au contact roue/rail ¹⁹. Aujourd'hui, les produits de SKK sont disponibles sous forme solide ou liquide.

Les SKK sont généralement appliqués sur la surface de roulement du champignon du rail de différents tronçons de voie à l'aide de systèmes embarqués à bord du train. L'un des aspects les plus importants lorsqu'on considère les modificateurs de coefficients de frottement est leur

¹⁷ Lewis, S.R., Lewis, R., Evans, G. and Buckley-Johnstone, L. E. (2014) "Assessment of railway curve lubricant performance using a twin-disc tester," *Wear*, 314(1-2), pp. 205–212.

¹⁸ Temple, P.D., Harmon, M., Lewis, R., Burstow, M.C., Temple, B. and Jones, D. (2018) "Optimisation of grease application to railway tracks". *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 232(5). Disponible sur <https://doi.org/10.1177/0954409717734681>.

¹⁹ Kalousek, J. and Johnson, K.L. (1992) 'An Investigation of Short Pitch Wheel and Rail Corrugations on the Vancouver Mass Transit System', *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 206(2), pp. 127–135. Disponible sur: https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1992_206_226_02.

composition, car la présence d'une couche intermédiaire, appelée troisième corps, sur la surface de contact, peut nuire à l'efficacité du produit SKK. Les couches formées naturellement sur les surfaces de contact se composent généralement de résidus d'usure, d'oxydes et d'autres impuretés. Elles peuvent être attribuées au troisième corps, comme illustré à titre d'exemple dans la Figure 9. Il est donc important que les produits de SKK puissent fonctionner dans toutes sortes d'utilisations et de conditions environnementales.

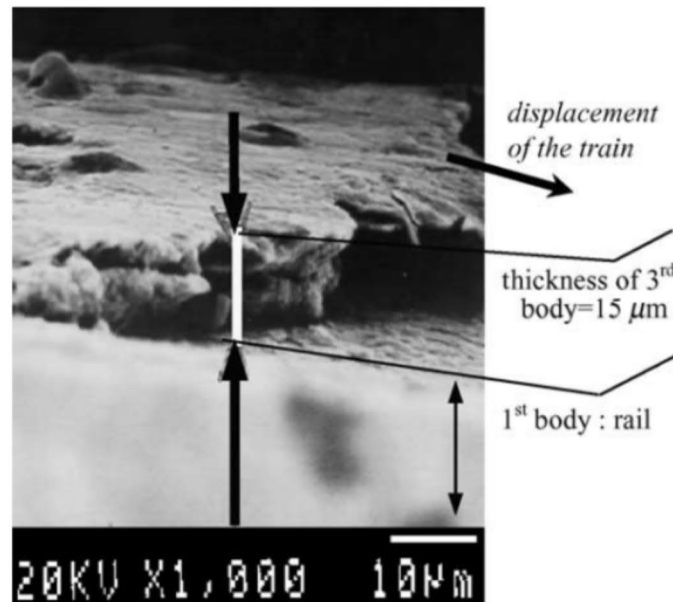


Figure 9 : Section métallographique d'un rail et d'une couche de troisième de corps ²⁰

Le Tableau 2 liste les fonctions des différents composants d'un SKK. La Figure 5 montre qu'une pente négative de la courbe de traction peut entraîner des oscillations « stick-slip », qui provoquent des bruits et la formation d'usure ondulatoire. Il est donc important que les produits de SKK puissent apporter des caractéristiques de frottement positives pour éviter les usures ondulatoires ^{15,21}.

²⁰ Descartes, S., Desrayaud, C., Niccolini, E. and Y. Berthier, Y. (2005) "Presence and role of the third body in a wheel/rail contact". *Wear*, 258(7-8), pp. 1081-1090. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.068>.

²¹ Eadie, D.T., Elvidge, D., Oldknow, K., Stock, R., Pointner, P., Kalousek, J. and Klauser, P. (2008) 'The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling', *Wear*, 265(9-10), pp. 1222-1230. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2008.02.029>.

Composant	Rôle
Huile de base	Transporter et distribuer le produit de SKK sur la roue et le long du rail.
Agent liant/ épaississant	Adhérer à la surface de contact. Epaissir l'huile pour contrôler la viscosité et les propriétés d'écoulement
Particules pour la modification du frottement (Particles for friction modification, PFM)	Modifier les caractéristiques de frottement et le niveau d'adhérence pour qu'ils deviennent positifs
Lubrifiant solide	Réduire le coefficient de frottement entre les surfaces de contact
Agent de mouillage	Réduire la tension superficielle des liquides, tout en assurant une meilleure adhérence du produit de SKK sur la surface du rail
Autres additifs	Par exemple : antioxydant (pour prévenir l'oxydation), agent antibactérien (pour prévenir l'accumulation naturelle de bactéries), agent de rétention (pour augmenter la durée de vie)

Tableau 2 : Vue d'ensemble des fonctions des composants utilisés dans les produits de SKK

5.1.1.5 Recherche sur le terrain à propos des produits de SKK

Ce chapitre traitera de la littérature et des études qui se basent sur des recherches sur le terrain plutôt que sur des recherches en laboratoire.

5.1.1.5.1 Effet des usures ondulatoires

L'utilisation de produit de SKK peut contribuer à diminuer et atténuer la formation d'usure ondulatoire. Une étude a montré que jusqu'à 85% des voies du Skytrain de Vancouver présentaient des usures ondulatoires en raison d'un mauvais alignement des essieux, de la génération de vibrations de type stick-slip et d'un mauvais contact roue/rail ¹⁹.

Les usures ondulatoires se forment sur les surfaces de contact de l'interface roue/rail et varient en termes de mécanisme, de localisation et de longueur d'onde. Par exemple, les usures ondulatoires de courte longueur d'onde se produisent souvent sur le rail intérieur des courbes à cause de vibrations stick-slip. Une étude d'Eadie et al., explique l'apparition d'usure ondulatoire de faible amplitude par deux mécanismes : d'une part les irrégularités des surfaces de la roue et du rail, d'autre part l'évolution de la courbe de traction après le point de saturation. Ce dernier est généralement causé par des vibrations de type stick-slip, qui peuvent être attribuées à une caractéristique de frottement négative après le point de saturation, ce qui entraîne à son tour la formation de petites taches sur les surfaces de contact. Au fur et à mesure que les taches se développent et s'accumulent, elles se transforment usure ondulatoire qui peuvent provoquer des bruits typiques, de l'usure et crissements. Des exemples de taches typiques des usures ondulatoires sont illustrés dans la Figure 10 et la Figure 11.

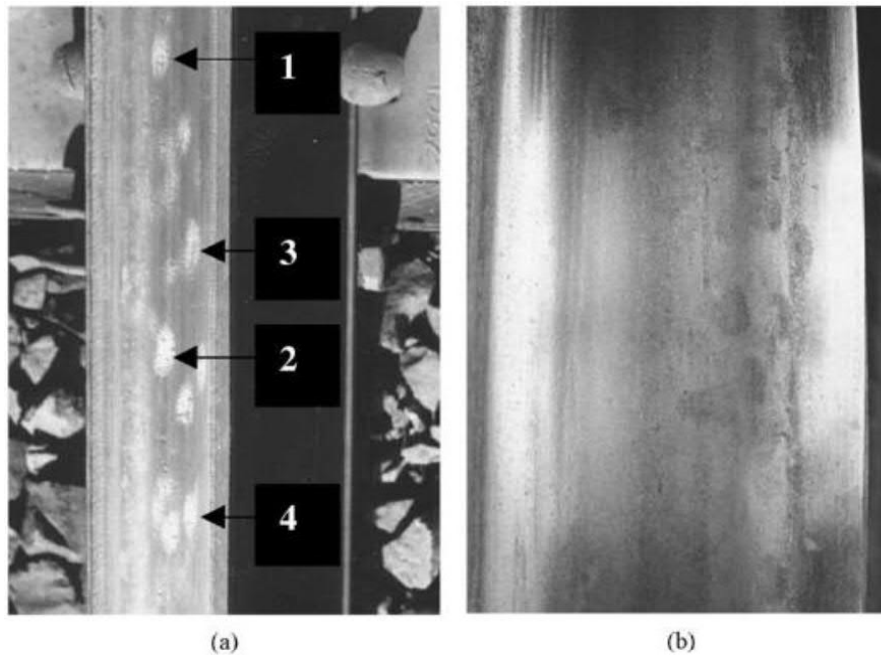


Figure 11 : (a) taches brillantes (1 à 4) sur le rail et (b) taches sombres sur la roue représentant les zones de glissement Stick-Slip ¹⁵



Figure 10 : Taches brillantes sur le rail et taches sur la roue représentant les zones de glissement Stick-Slip (source : zb Zentralbahn AG)

Deux études de cas ont approfondi les hypothèses relatives à la formation des usures ondulatoires par des essais sur le terrain. L'une des études menées en Asie a montré que l'application du SKK sur 25 % des roues réduisaient la fréquence du besoin de meulage des rails de 1 semaine à 6 mois. Cependant, d'autres modifications ont été apportées dans cette étude, le SKK n'est donc pas la seule variable et n'est pas non plus la seule raison de ce résultat positif. Néanmoins, il a été conclu que le SKK joue un rôle essentiel dans la réduction de la formation d'usure ondulatoire.

Une deuxième étude portant sur deux lignes de métro léger aux États-Unis a montré que le SKK réduisait de manière significative la formation d'usure ondulatoire. L'une des lignes a été exploitée sans SKK pendant 4 ans et présentait des usures ondulatoires nettement plus importantes que la ligne exploitée pendant 10 ans avec SKK ¹⁵.

Une autre étude menée en Espagne a montré que l'utilisation de SKK permettait de maintenir l'amplitude usures ondulatoires à un niveau constant pendant 19 mois. Cependant, après cette période, l'application du SKK a été stoppée, ce qui a entraîné une augmentation de l'amplitude des usures ondulatoires, renforçant ainsi l'hypothèse selon laquelle le SKK réduit la croissance de celles-ci. Ces tests ont été réalisés sur une courbe de 250 m de long, avec des mesures relevées tous les 20 m ²².

Une étude réalisée en 2008 a examiné l'effet du produit de SKK, Keltrack™, sur trois systèmes différents : un de métro souterrain européen, un système ferroviaire de banlieue européen et un métro japonais, appelés respectivement en système A, système B et système C. Chacune de ces études de cas présentait des matériels roulants, des caractéristiques de voie et de courbe différentes. Le rayon de courbure variait entre 40 et environ 230 m, la vitesse entre 30 et 50 km/h, le volume de trafic entre 1500 et 6720 essieux/jour, les charges par essieu entre 6 et 16 tonnes et les diamètres de roue entre 650 et 900 mm. Comme le montre la Figure 12, la différence de taux de croissance de l'usure ondulatoire entre les essais avec et sans SKK est significative dans chacun des trois cas. Le système A a connu le plus grand changement, le SKK réduisant d'un facteur 11 le taux de croissance des usures ondulatoires ²³.

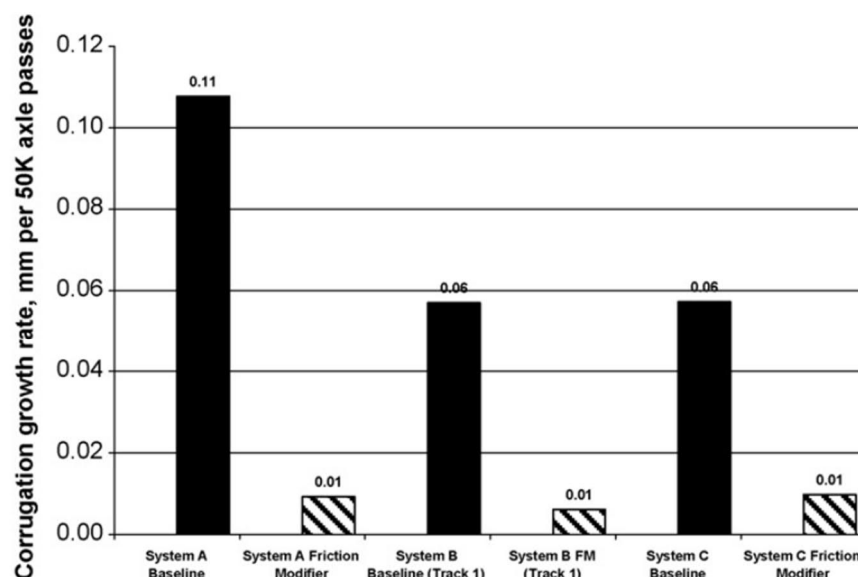


Figure 12 : Comparaison des taux de croissance des usures ondulatoires de trois systèmes ferroviaires avec et sans SKK *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

²² Egana, J.I., Vinolas, J. and Gil-Negrete, N. (2005) 'Effect of liquid high positive friction (HPF) modifier on wheel-rail contact and rail corrugation', *Tribology International*, 38(8), pp. 769–774. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2004.11.006>.

²³ Eadie, D.T., Santoro, M., Oldknow, K. and Oka, Y. (2008) "Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation in curves". *Wear*, 265(9-10), pp.1212-1221. Verfügbar auf <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808001427>.

5.1.1.5.2 Effet sur les forces de contact

Dans une étude de Tomeoka et al.²⁴, le coefficient de frottement de deux courbes, l'une sans application de SKK donc dans des conditions sèches et l'autre avec application de SKK. Le SKK utilisé réduit le coefficient de frottement des deux courbes respectivement de 58% et 70%. Pour ce faire, le produit de SKK a été pulvérisé par le train précédent, de sorte qu'il y ait une couche suffisante de SKK sur le rail pour le passage du train suivant.

L'étude de Eadie et al.²³, cité précédemment au paragraphe 5.1.1.5.1, s'est intéressée aux variations du coefficient de frottement sur un certain nombre de passages, afin de comparer les performances de SKK et d'autres lubrifiants couramment utilisés. Comme le montre la Figure 13, l'utilisation de SKK pour la file haute (rail extérieur) et la file basse (rail intérieur) en courbe a permis de réduire le coefficient de frottement et de la stabilisé à environ 0,35. En comparaison, la même expérience mais avec l'application de lubrifiant exclusivement sur la file basse a montré une réduction du coefficient de frottement sur la file basse uniquement. Cependant, l'étude a également révélé que les valeurs de frottement du rail intérieur n'étaient pas stables pendant toute la durée d'essais¹⁵. Le coefficient de frottement de 0,35 est décrit par certains chercheurs comme le coefficient de frottement optimal pour le contact roue/rail^{11,14}.

²⁴ Tomeoka, M., Kabe, N., Tanimoto, M., Miyauchi, E. and Nakata, M. (2002) 'Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication', *Wear*, 253(1–2), pp. 124–129. Verfügbar auf: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00091-1).

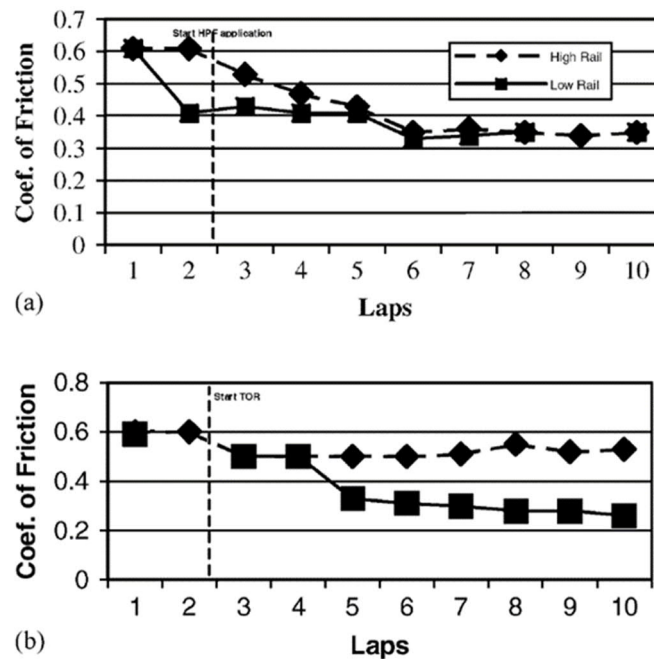


Figure 13 : Effet du a) SKK et du b) Lubrifiant sur les coefficients de frottement des rails extérieurs et intérieurs pour 10 passages ¹⁵

Une autre étude réalisée sur le terrain utilisant un tribomètre manuel a montré que les deux agents de SKK utilisés (un produit commercial appelé Friction Modifier 1 et un agent SKK spécialement conçu appelé Friction Modifier 2) réduisaient le coefficient de frottement de 0,55 et 0,42 à une plage se situant entre 0,13 et 0,22 selon l'application, voir Figure 14 ²⁵.

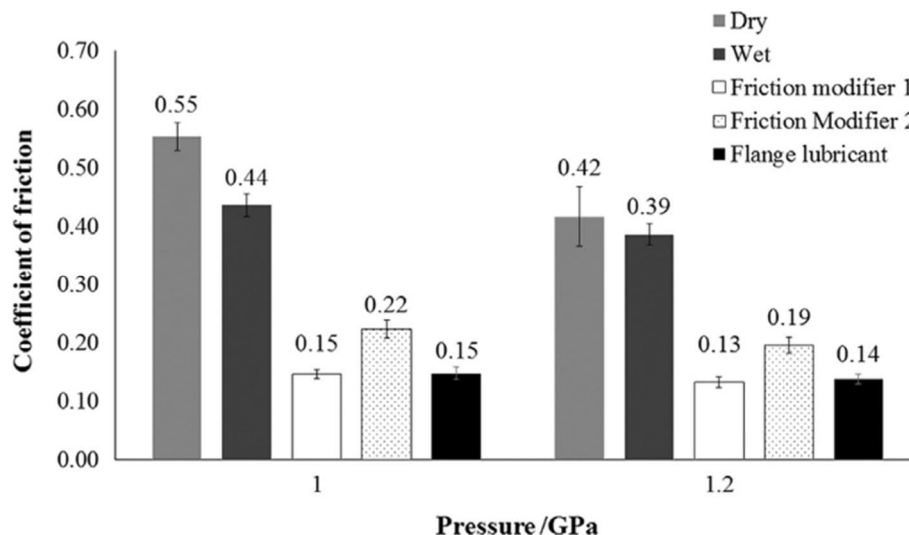


Figure 14 : Représentation du coefficient de frottement moyen pour différents scénarios de contact roue/rail *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

²⁵ Areiza, Y.A., Garcés, S.I., Santa, J.F., Vargas, G. and Toro, A. (2015) 'Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer', Tribology International, 82 Part B, pp. 274–279. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2014.08.009>.

5.1.1.6 Tests de laboratoire sur les produits de SKK - effet sur l'adhérence

Ce chapitre traite principalement des travaux de recherche menés en laboratoire.

Dans une étude de Matsumoto et al.²⁶ la machine d'essai à deux disques a été utilisée pour étudier l'effet dans le temps du SKK (Keltrack™ HPF spray) sur l'adhérence. Ces tests ont également été réalisés afin de comprendre la consommation de SKK à différents taux d'application et donc différentes quantités appliquées. La Figure 15 illustre le taux d'application utilisé dans cette étude et son effet sur le coefficient de traction.

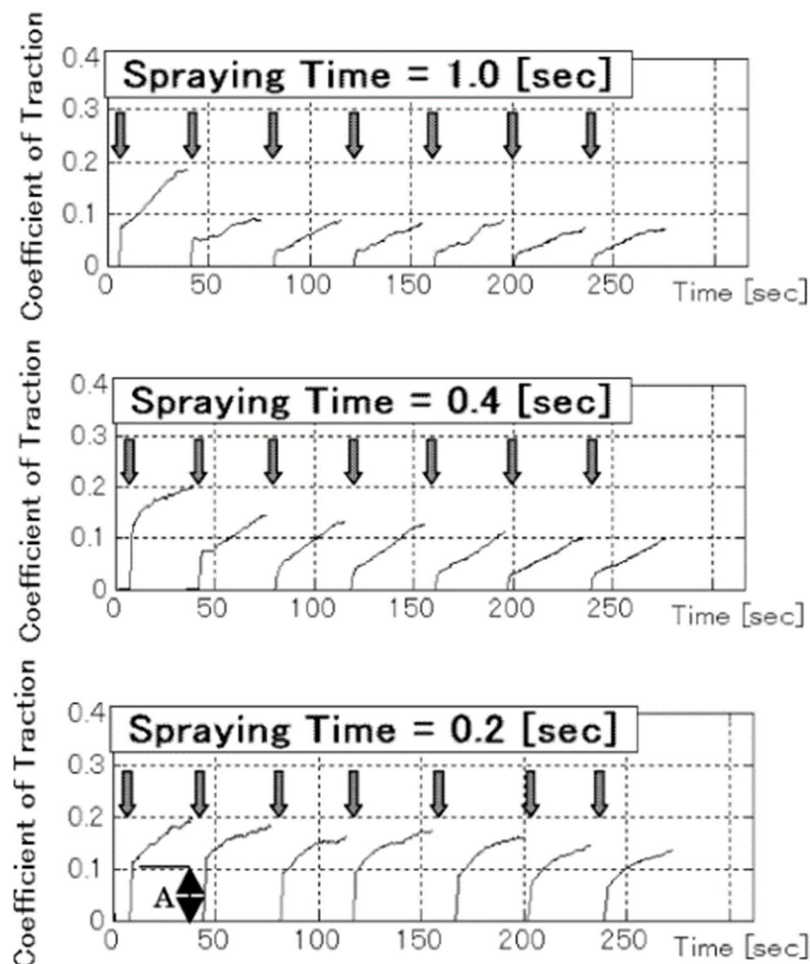


Figure 15 : Coefficient de traction lors de l'application de SKK sur différentes durées de pulvérisation *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

²⁶ Matsumoto, K., Suda, Y., Iwasa, T., Fujii, T., Tomeoka, M., Tanimoto, M., Kishimoto, Y. and Nakai, T. (2004) 'A method to apply friction modifier in railway system', JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 47(2), pp. 482–487.

Comme le montre la Figure 16, l'étude a révélé que la quantité de SKK (entre 0,2 et 0,4 seconde de temps de pulvérisation) a un effet significatif sur le coefficient de traction en fonction du glissement. Il existe cependant un point d'équilibre à partir duquel une quantité plus importante de SKK n'a plus d'effet significatif sur le coefficient de traction, ce qui s'est produit entre les temps de pulvérisation de 0,4 et 1 seconde²⁶. Cela pourrait être dû au fait que le contact était saturé de SKK.

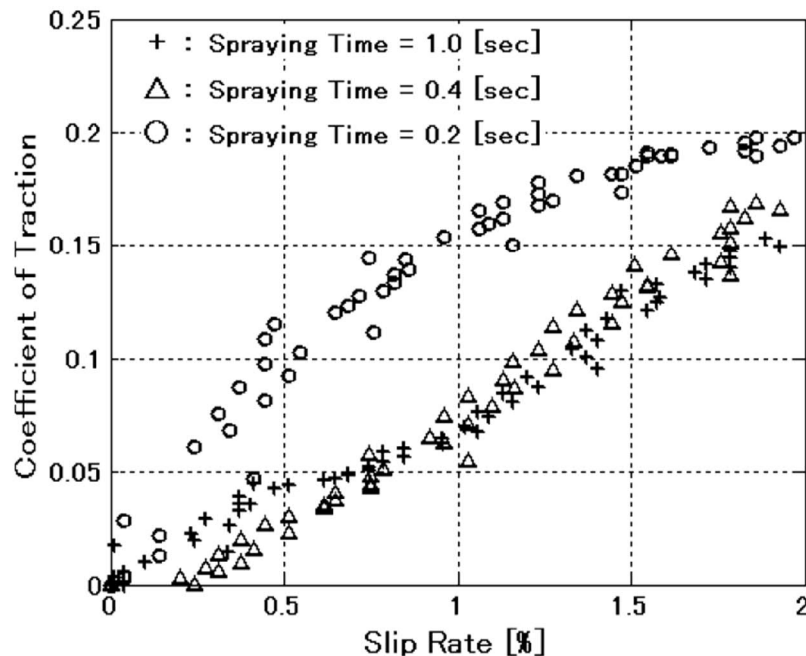


Figure 16 : Courbe de traction pour différents temps de pulvérisation ou quantités d'application *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

L'étude a également révélé que le taux de glissement avait une incidence sur la consommation de SKK appliqué. Plus le glissement est important, plus le temps nécessaire pour atteindre le coefficient de traction maximal est court. Il a donc été conclu que différents facteurs liés au taux glissement, tels que le rayon de la courbe et la vitesse du train, doivent être pris en compte pour calculer la quantité de SKK nécessaire à appliquer²⁵.

Une autre étude portant sur l'interaction du SKK avec les oxydes et du SKK avec la graisse a montré que le SKK peut être utilisé pour contrôler les frottements dans le contact roue/rail, malgré la large variation de concentration en oxydes de fer entre 0% et 80% dans le SKK. L'étude a également montré que, malgré la concentration plus élevée d'oxyde de fer, l'effet des particules de SKK était plus important que celui des particules d'oxyde de fer²⁷. Cela peut s'expliquer par la théorie selon laquelle le coefficient d'adhérence est principalement influencé par des particules plus résistantes à l'usure.

Les résultats de l'étude, qui a analysé l'effet de la teneur en graisse du SKK sur l'adhésion, sont présentés dans la Figure 17. Cette étude a montré qu'une faible augmentation de la concentration de graisse lors de l'interaction avec le SKK peut entraîner une période d'équilibre prolongée avant qu'une augmentation rapide de l'adhésion ne se produise. Cependant, des pourcentages plus élevés de matières grasses maintiendraient le niveau d'adhésion trop bas

²⁷ Lu, X., Cotter, J. and Eadie, D.T. (2005) 'Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface', *Wear*, 259(7–12), pp. 1262–1269. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2005.01.018>.

et 60 mg de graisse ont même donné des résultats similaires à ceux des expériences portant uniquement sur la graisse ²⁷. Par conséquent, l'effet de la graisse sur les propriétés tribologiques des SKK, et des tribofilms qui en résultent, peut être associé aux propriétés lubrifiantes de la graisse et à son impact négatif sur l'adhérence entre les SKK et les surfaces en acier.

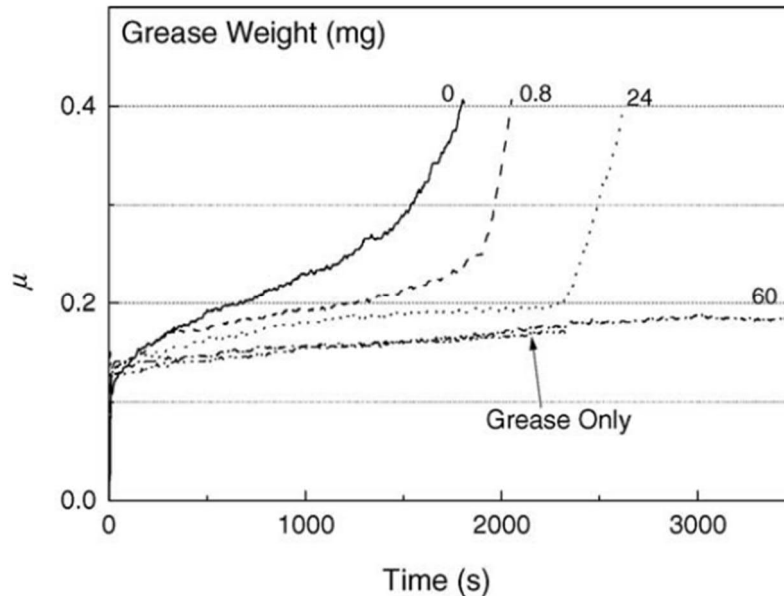


Figure 17 : Influence de la teneur en graisses (0 à 60 mg) du SKK sur le frottement en fonction de la durée de l'essai Fehler! Textmarke nicht definiert.

Dans une étude réalisée par Liu et Meehan en 2016 ²⁸, avec une machine d'essai à deux disques, une vitesse de rotation et un angle d'attaque modifiés, il a été constaté que le coefficient d'adhérence, pour les essais à sec, diminuait à mesure que la vitesse de roulement passait de 100 à 800 tr/min, tandis que le coefficient d'adhérence pour les SKK à base d'huile, désignés par OFM1 et OFM2 dans la Figure 18, augmentait légèrement.

²⁸ Liu, X. and Meehan, P.A. (2016) 'Investigation of squeal noise under positive friction characteristics condition provided by friction modifiers', Journal of Sound and Vibration, 371, pp. 393–405. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2016.02.028>.

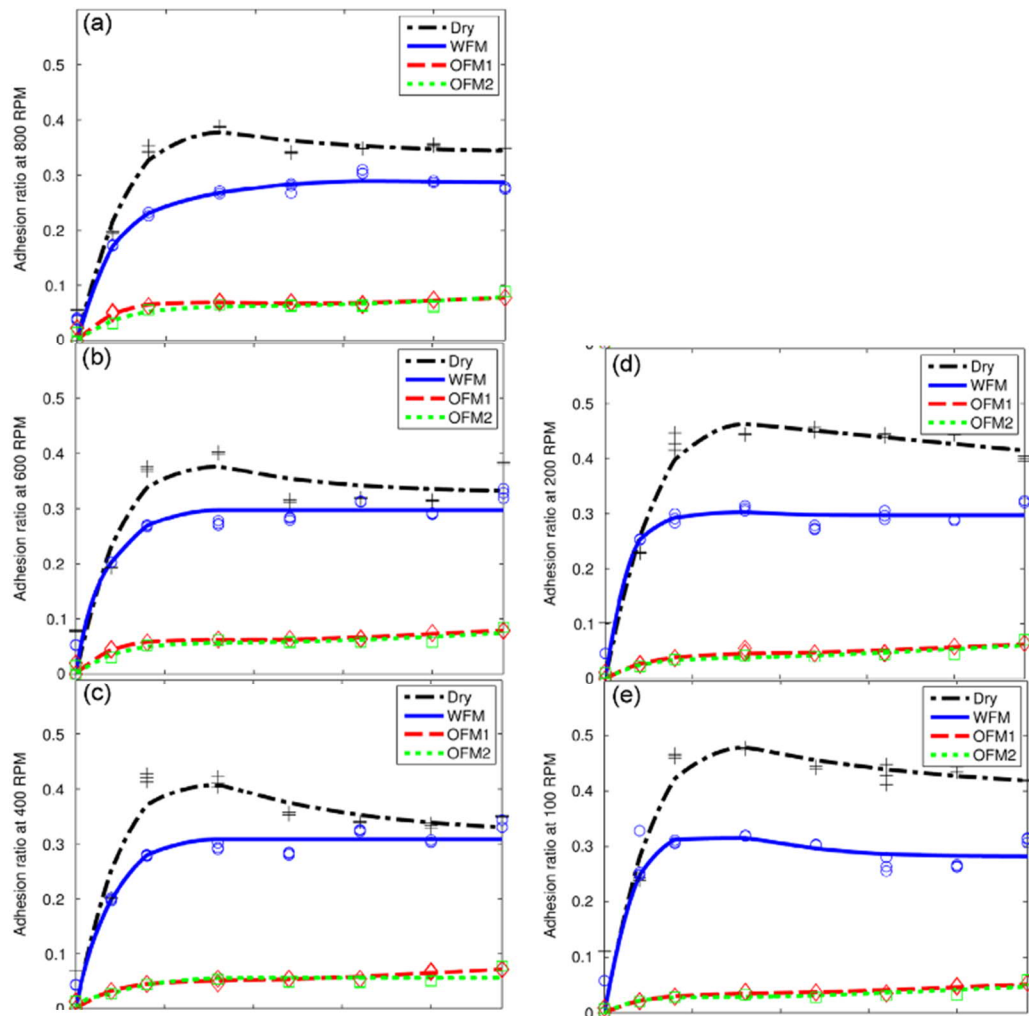


Figure 18 : Courbe de traction (ici : adhérence en fonction de l'angle d'attaque) dans différentes conditions de contact (sec, SKK à base d'eau et SKK à base d'huile) à différentes vitesses de rotation : (a) 800tr/min ; (b) 600 tr/min ; (c) 400 tr/min ; (d) 200 tr/min ; (e) 100 tr/min *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

5.1.2 Normes, directives et réglementations existantes

Dans les normes EN15427 et CEN/TS 15427 se trouve des spécifications techniques de la gestion du frottement entre la roue et le rail (références indiquées pour DIN) :

- EN 15427-1-1, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 1-1 : Équipement et Application - Lubrifiant pour boudin de roues ²⁹
- CEN/TS 15427-1-2, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 1-2 : Équipements et application - Matériaux de la surface du rail ³⁰
- CEN/TS 15427-1-3, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 1-3 : Équipements et application - Matériaux pour restauration d'adhérence ³¹
- EN 15427-2-1, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 2-1 : Propriétés et caractéristiques - Lubrification des boudins de roues ³²
- CEN/TS 15427-2-2, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 2-2 : Propriétés et caractéristiques - Matériaux de la surface du rail ³³
- CEN/TS 15427-2-3, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 2-3 : Propriétés et caractéristiques - Matériaux pour restauration d'adhérence ³⁴

En résumé, il n'existe actuellement aucun test de laboratoire normalisé et obligatoire pour les SKS et les modificateurs d'adhérence (SKK), bien que le comité européen de normalisation (CEN) soit en cours d'élaborer une norme couvrant tous les produits de gestion du frottement, voir ci-dessus. Les annexes des normes EN 15427-2-1 et EN 15427-2-2 décrivent des méthodes d'essai avec la machine d'essai à deux disques et la Mini Traction Machine (MTM), mais leur mise en œuvre n'est indiquée qu'optionnelle.

La norme BS EN 15427 ³⁵ est une norme britannique qui se réfère à l'application de SKS, mais il n'y a pas d'équivalent pour l'application des modificateurs de frottements comme indiqué ci-dessus pour la version allemande. La norme BS EN 16028 ³⁶ est une norme britannique pour les lubrifiants destinés aux applications par système embarqué et aux systèmes fixes en voie. La version allemande correspondante est la norme DIN EN 16028 :2012-10. Elle se réfère à la lubrification des boudins de roues et a été abrogée et remplacée par la norme DIN EN 15427-2-1.

²⁹ EN 15427-1-1, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 1-1 : Équipement et Application - Lubrifiant pour boudin de roues

³⁰ CEN/TS 15427-1-2, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 1-2 : Équipements et application - Matériaux de la surface du rail

³¹ CEN/TS 15427-1-3, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 1-3 : Équipements et application - Matériaux pour restauration d'adhérence

³² EN 15427-2-1, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 2-1 : Propriétés et caractéristiques - Lubrification des boudins de roues

³³ CEN/TS 15427-2-2, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 2-2 : Propriétés et caractéristiques - Matériaux de la surface du rail

³⁴ CEN/TS 15427-2-3, Applications ferroviaires - Gestion du frottement roue/rail - Partie 2-3 : Propriétés et caractéristiques - Matériaux pour restauration d'adhérence

³⁵ BSI, "EN 15427- Railway applications — Wheel / rail friction management — Flange lubrication." 2010.

³⁶ BSI, "EN 16028 Railway applications — Wheel / rail friction management — Lubricants for trainborne and trackside applications." 2012.

La norme AS541³⁷ est une norme australienne qui traite de l'application de lubrifiant sur la table de roulement des rails.

La R RTE 49410³⁸ est une réglementation suisse qui définit les spécifications des produits de SKS et les quantités de lubrifiant, ainsi que la maintenance des voies à écartement normal du réseau de chemin de fer en Suisse. Il n'existe pas de R RTE spécifique aux voies métriques, ni au SKK ni au SKS.

Il existe une directive britannique de Network Rail qui définit les exigences minimales pour les lubrifiants dans les courbes³⁹. La norme détaille les propriétés du lubrifiant et prescrit deux tests de laboratoire pour analyser la pompabilité et les propriétés d'usure/ de rétention du lubrifiant. Bien que les tests et les exigences minimales s'appliquent aux lubrifiants pour courbes, un procédé similaire pourrait également être appliquée aux SKK.

Les directives pour la mise en œuvre et la mesure de la gestion du frottement sur la surface de roulement des rails se trouvent dans⁴⁰ et⁴¹.

En principe, on peut supposer que les gestionnaires d'infrastructures, par exemple ÖBB, disposent de directives plus ou moins complètes sur les SKK et/ou travaillent à l'élaboration de telles directives, plus de détails au point 7.1.4.9.

5.1.3 Mécanisme de production du bruit

5.1.3.1 Crissements en courbe

Le crissement en courbe s'ajoute au bruit de roulement et de démarrage lorsqu'un train franchit une courbe de rayon $R < 100b$ (b étant l'empattement du bogie). Au passage d'un train à 10m d'une courbe serrée se produit, dans la plage de fréquences comprises entre 250 Hz et 5 kHz, un niveau de bruit pouvant atteindre 110 dB(A). En général, le crissement en courbe est plus gênant qu'un bruit à large bande passante (ex : bruit aérodynamique) de même niveau à cause de sa tonalité. Le crissement en courbe est dû au fait que le sens de roulement des deux essieux d'un wagon ou d'un bogie ne coïncide pas avec le sens de la voie. Cela entraîne un glissement au niveau de la surface de contact roue/rail et des oscillations de la roue (en raison du phénomène stick-slip). Celles-ci conduisent à des tonalités élevées et sont responsables des émissions de bruit. Les modes axiaux des roues sont les plus importants. Le rail est certes stimulé par la même force, mais grâce à sa mobilité réduite, les vibrations et donc l'émission de bruit est plus faible. C'est pourquoi la roue est l'élément clé des émissions sonores^{42,43,44}.

³⁷ Daly, P. (2017) "Rail Gauge Corner Lubrication Management – for friction levels and measurement," RISSB Rail Industry Safety And Standards Board.

³⁸ R RTE 49410 (2018) Spurkranzschmierung – Eisenbahnfahrzeuge – Normalspur

³⁹ "NR/L3/TRK/3530/A01- Curve Lubricants." Network Rail, 2012.

⁴⁰ Reiff, R. "Best Practices Update for Friction Control Including Implementing Top-of-Rail Friction Control."

⁴¹ Tournay, H. "Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues" Int. heavy Haul Assoc., p. 484, 2001.

⁴² Müller, G., and Möser, M. (Eds.) (2017) „Luftschall aus dem Schienenverkehr“. Springer Berlin Heidelberg.

⁴³ Thompson, D. (2008) "Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control". Elsevier.

⁴⁴ Rudd, M.J. (1976) "Wheel/rail noise – Part II: Wheel squeal". Journal of Sound and Vibration, 46, pp. 381–394.

Rudd ⁴⁴ a identifié les possibles effets d'excitation causés par le phénomène stick-slip dans le contact roue/rail:

- Glissement latéral au contact de roulement roue/rail
- Frottement du boudin sur le flanc du champignon du rail
- Glissement longitudinal au contact de la surface de roulement roue dû au glissement différentiel

Cette instabilité provoque une décroissance des caractéristiques de frottement, ce qui conduit aux crissements en courbe, voir la Figure 5. De plus :

- Le couplage des modes entraîne une instabilité et les crissements en courbe
- Comme l'ont montré Ding et al. ⁴⁵, la masse et le coefficient d'amortissement du rail peuvent également provoquer une instabilité et un crissement en courbe ⁴⁶

Un mode propre de roue soumis à une vitesse d'oscillation latéral constante V_0 et à une force de frottement caractérisée par un coefficient de frottement de Coulomb statique/dynamique présentera des oscillations stables proches de sa fréquence propre tant que l'amortissement interne de la roue est inférieur à la valeur critique. Un modèle de frottement plus réaliste avec un frottement décroissant lors du glissement sera instable et générera des vibrations à croissance exponentielle pour des valeurs d'amortissement de la roue inférieures à une certaine valeur critique. La vitesse de glissement dépend de l'angle d'attaque (rapport rayon/empattement = R/e) et devient critique pour $R/e < 100-150$. Pour $e=2m$, cela signifie que dans les courbes avec $R < 200-300m$, les crissements sont probables. Le crissement en courbe se produit surtout sur la roue intérieure avant. Le boudin de la roue extérieure avant se met en contact avec le rail. Les crissements en courbe et le contact de la roue avec le rail peuvent se produire simultanément. Les paramètres déterminants sont : la vitesse de glissement, les caractéristiques des modes propres de la roue (y compris son amortissement), la charge verticale, la position de contact (latérale) et le frottement (SKK). Ce dernier dépend également de nombreux paramètres : la température, l'humidité et la nature de la surface. Il en résulte que le crissement en courbe est un mécanisme chaotique dont la probabilité d'occurrence varie considérablement selon les jours, voire les heures de la journée ⁴⁴. Voir le Tableau 3.

⁴⁵ Ding, B., Squicciarini, G. and Thompson, D.J. (Sept. 2016) "Effects of rail dynamics and friction characteristics on curve squeal". Journal of Physics: Conference Series, 744(1), p. 012146, IOP Publishing.

⁴⁶ Ding, B., Squicciarini, G., and Thompson, D. (2019) "Effect of rail dynamics on curve squeal under constant friction conditions". Journal of Sound and Vibration, 442, pp. 183-199.

Parameter	Vincent et al. (2006)	Stefanelli et al. (2006)	Jiang et al. (2012)	Fourie (2011)
Curve radius	60 m & 75 m	199 m	284 m	1000 m
Sound pressure	X	X	X	X
Squeal frequency	X	X	X	X
Train speed	X	X	X	X
Wheelset angle-of-attack	X	X	X	
Wheelset lateral position	X	X	X	
Wheel modes	X	X		
Modal damping of wheel modes	X	X		
Air temperature		X	X	
Rail temperature		X		
Air humidity		X	X	
Moisture on rails		X		
Vertical and lateral track forces			X	X

Tableau 3 : Principaux paramètres pris en compte dans les essais sur le terrain ⁴⁷

Un deuxième mécanisme (couplage des modes) a été recherché pour expliquer le crissement (beaucoup plus rare), qui se produit dans des conditions qui ne peuvent pas être expliquées par la théorie traditionnelle de la "caractéristique de frottement décroissante" (voir également la section 5.1.1.3). L'excitation latérale due aux forces d'adhérence n'entraîne pas seulement un mouvement latéral, mais fait également intervenir un degré de liberté vertical qui, à son tour, fait varier les forces d'adhérence. Ce système peut devenir instable et provoquer des crissements, même si les forces de frottements sont constantes (c'est-à-dire qu'elles ne diminuent pas). L'excitation de ce mécanisme dépend également de plusieurs facteurs : l'angle d'attaque, la vitesse de glissement, les propriétés modales de la roue et le frottement. L'influence de l'amortissement n'est pas claire, une augmentation de l'amortissement de la roue peut avoir un effet positif ou négatif.

Deux types de modèles ont été développés pour identifier les modes de roue potentiellement instables:

- Modèles linéarisés dans les plages de fréquences (les parties réelles positives des valeurs propres indiquent des conditions instables)
- Solution directe avec une constante temporelle

La modélisation comprend la dynamique de la roue et un modèle de contact avancé incluant le glissement latéral, longitudinal et de rotation (instable) avec des caractéristiques de frottement décroissantes. La dynamique de la voie n'est généralement pas prise en compte. Les recherches en cours portent sur différents modèles de contact et différentes conditions initiales qui conduisent à des résultats de crissements différents. Par exemple, des études⁴⁵ paramétriques réalisées utilisant des modèles de simulation ont montré que le rayon de la courbe est le paramètre dominant et que la roue intérieure avant tend vers une fréquence de crissement dominante inférieure à celle de la roue extérieure avant. Lors de ces études, les roues arrière n'ont pas été soumises à des forces latérales saturées et n'ont donc pas provoqué de crissements.

⁴⁷ Fourie, D.J. (2018) "Railway wheel squeal as a result of unsteady longitudinal and spin creepage". Doctoral thesis, University of Pretoria.

Les mesures de crissement dans les courbes peuvent être effectuées en laboratoire à l'aide d'un banc d'essai à double disques (twin-disk). Au cours de 30 dernières années, de nombreuses campagnes de mesure ont été menées en laboratoire (banc d'essai à rouleaux), y compris des courbes de frottement décroissantes (humide, sec, huile, etc.) avec et sans traction. Cependant, il y a beaucoup de résultats contradictoires qui en résultent. En général, le crissement a été mesuré en relation avec des caractéristiques de frottement décroissantes. Par exemple, Hsu et al. ⁴⁸ décrivent cette méthode et la comparent à des modèles de calcul.

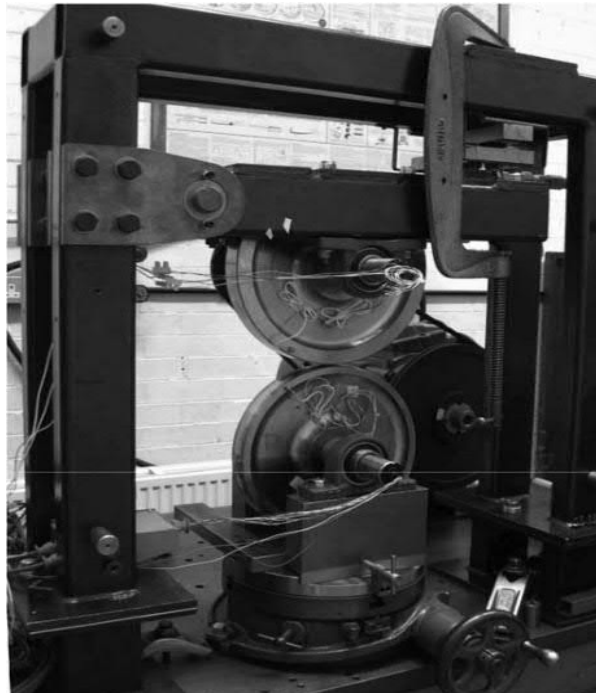


Figure 19 : Vue d'ensemble d'un banc d'essai à double disques *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

Les amortisseurs des roues peuvent réduire le crissement dans les courbes. On trouve dans le commerce des absorbeurs accordés, des absorbeurs acoustiques constitués d'un empilement de languettes métalliques et de matériaux élastiques, des suspensions annulaires et des roues élastiques (résilientes), mais ils ne peuvent pas fonctionner avec le couplage de modes. L'effet stick-slip peut être réduit par le conditionnement du champignon du rail (SKK), mais il reste des exceptions en raison de l'apparition d'un couplage de modes ou d'un comportement de frottement incontrôlé ^{49,50}. Le bruit peut également être réduit par une conception optimisée du matériel roulant et des voies. Il est ainsi possible de concevoir de grands rayons de courbure ou un empattement réduit. Une commande radiale des essieux dans le bogie est également une mesure possible pour réduire le crissement dans les courbes. La combinaison de plusieurs actions de ce type est probablement la plus efficace.

⁴⁸ Hsu, S.S., Huang, Z., Iwnicki, S.D., Thompson, D.J., Jones, C.J., Xie, G. and Allen, P.D. (2007) "Experimental and theoretical investigation of railway wheel squeal". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 221(1), pp. 59-73.

⁴⁹ DB Netz AG (2012) „Innovative Maßnahmen zum Lärm und Erschütterungsschutz am Fahrweg“, Schlussbericht vom 15.06.2012. Bericht im Rahmen des Konjunkturprogramm II für das Vorhaben „Einzelmaßnahmen zur Lärm- und Erschütterungsminderung am Fahrweg“.

⁵⁰ Thompson, D. (2008) "Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control". Elsevier.

Pour déterminer l'effet d'une mesure de réduction de bruit, il faut tenir compte du fait que le crissement en courbe se produit de manière aléatoire et qu'une mesure d'atténuation ne peut qu'en retarder l'apparition. Les bruits en courbe peuvent se produire à certains moments et dans certaines conditions, l'amplitude peut varier et la fréquence dominante peut changer. Pendant les mesures, les rails ne doivent pas être mouillés. Ces mesures sont effectuées conformément à la norme DIN EN 3095⁵¹. En raison de l'apparition aléatoire des crissements en courbe, il est nécessaire de faire la moyenne des résultats sur une période plus longue. Les résultats peuvent être présentés sous la forme d'une distribution cumulée des niveaux - fréquences avant et après l'installation d'une mesure de réduction du bruit en courbe. La Figure 20, ci-dessous, montre les niveaux maximaux mesurés (filtrés par bande dans la plage de 2 kHz à 10 kHz) sur la voie ferrée Berliner Ringbahn (petite ceinture de Berlin) avant et après l'installation d'un système de conditionnement du champignon de rail^{42, 50, 51}.

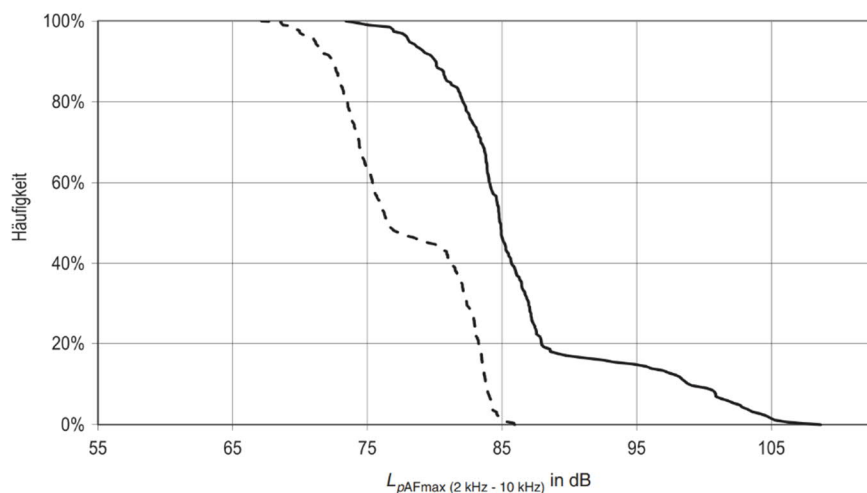


Figure 20 : Distribution de fréquence de niveau cumulée des niveaux L_{pAFmax} filtrés dans la gamme de fréquences de 2 kHz à 10 kHz, mesurés sur le périphérique de Berlin (RingBahn) pour des vitesses supérieures ou égales à 80 km/h : avant installation des mesures anti-bruit (ligne pleine), après installation des mesures anti-bruit (ligne pointillée) *Fehler! Textmarke nicht definiert.*, *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

⁵¹ EN ISO 3095:2013 – Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen.

5.1.4 Mécanisme d'usure et de détérioration du contact roue/rail

Deux approches principales sont utilisées pour anticiper l'usure du profil des roues et des rails : les méthodes statistiques et les procédés de mécanique de contact. L'approche statistique consiste à utiliser les données de mesure de profil d'un type de véhicule donné dans des conditions d'exploitation spécifiques afin de prédire l'usure du profil de la roue ou du rail. Cela permet une prédiction rapide et précise de la forme du profil. Cependant, dès que les conditions d'exploitation changent, les prévisions de profil deviennent imprécises, voire impossible. Pour prédire l'usure du profil avec la méthode basée sur la mécanique de contact, on utilise des simulations dynamiques multi-corps. Cette méthode nécessite de nombreux calculs et plusieurs paramètres d'entrée, parfois inconnus. Cependant, l'avantage de cette méthode est qu'elle permet de prendre facilement en compte différents types de véhicules ou des conditions d'exploitation changeantes. En combinant les deux approches, il est possible de tirer parti de leurs avantages et d'obtenir une prévision rapide, précise et flexible des profils. Une telle approche est appelée « approche hybride ».

5.1.4.1 Approche statistique

Han et Zhang⁵² ont créé un modèle basé sur des statistiques pour prédire l'usure des profils de roue. Les courbes d'usure ont été calculées comme étant la distance verticale entre un profil usé mesuré et un nouveau profil non usé (profil de référence), voir Figure 21.

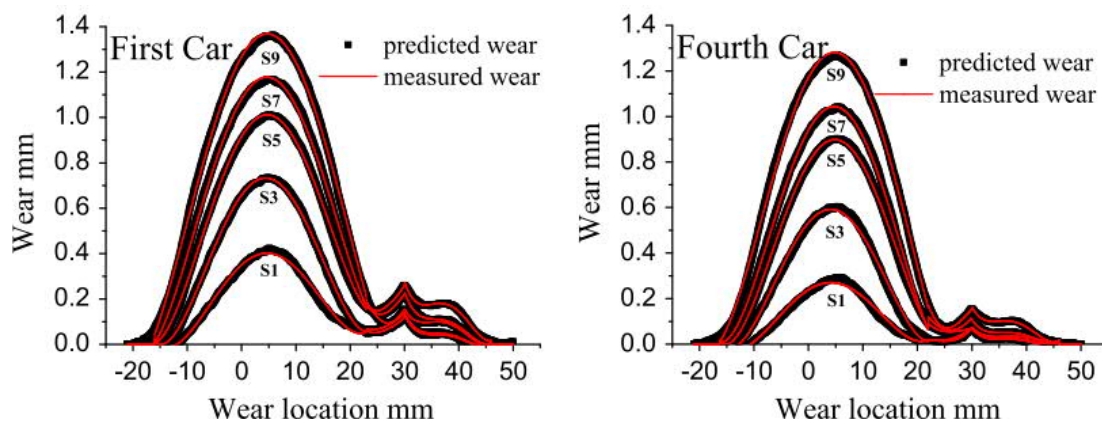


Figure 21 : Courbes d'usure mesurées et courbes d'usures prévues calculées par Han et Zhang ^{Fehler!}
Textmarke nicht definiert.

Pour prédire une nouvelle forme de profil de roue, des polynômes ont d'abord été adaptés aux courbes des usures mesurées. Ensuite, les coefficients des polynômes ajustés ont été calculés en fonction du kilométrage des profils de roue mesurés. Pour calculer une nouvelle courbe d'usure, il faut calculer les coefficients du polynôme pour un kilométrage donné. Pour obtenir un nouveau profil de roue, la courbure d'usure calculée est ajoutée au profil de référence. Les résultats de la validation sont présentés dans la Figure 22.

⁵² Han, P. and Zhang, W.H. (2015) "A new binary wheel wear prediction model based on statistical method and the demonstration," *Wear*, 324–325, pp. 90–99. Verfügbar auf doi: 10.1016/j.wear.2014.11.022.

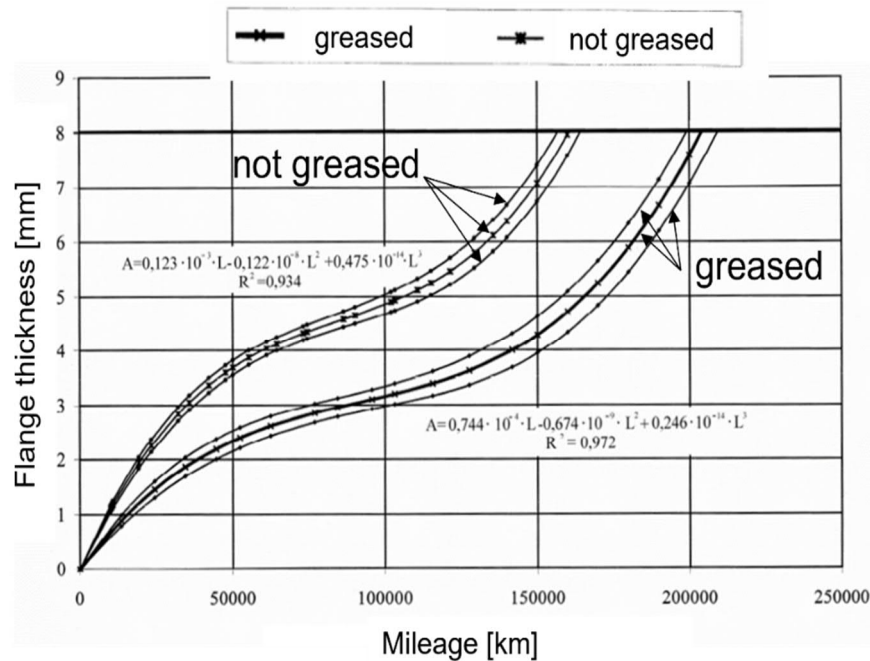


Figure 22 : Résultats de validation pour l'épaisseur du boudin *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

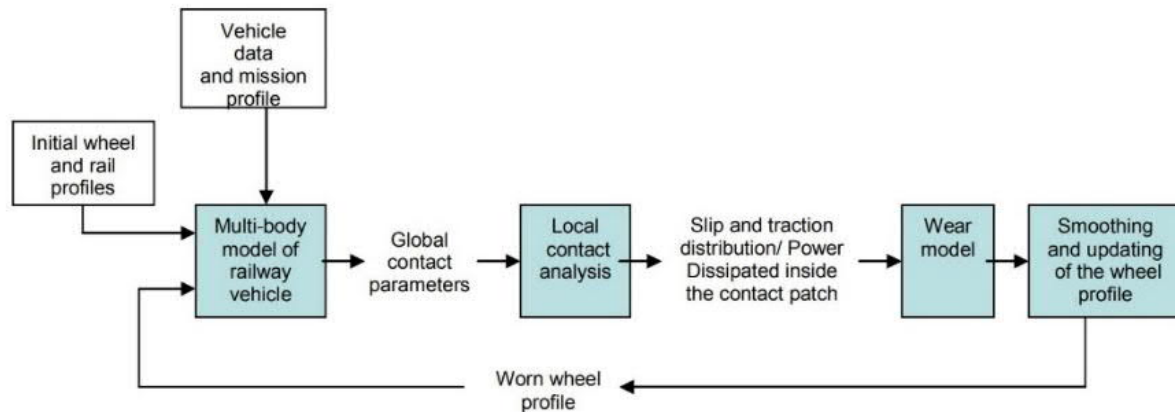
Lingaitis et al.⁵³ ont étudié l'influence de la graisse sur le comportement d'usure du boudin de roue. Comme pour la méthode de Han et Zhang⁵², des fonctions mathématiques ont été ajustées par l'usure mesurée sur le boudin jusqu'à un certain kilométrage. Les résultats de la validation sont présentés dans la Figure 22.

Les deux exemples montrent une très bonne corrélation avec la mesure. L'approche consistant à insérer des fonctions mathématiques dans l'usure mesurée sur le kilométrage, sous forme de courbe d'usure, ou dans l'usure mesurée à un endroit précis de la roue, permet une application très rapide du modèle. Cependant, les résultats des modèles ne sont applicables que pour le scénario dans lequel les mesures ont été effectuées.

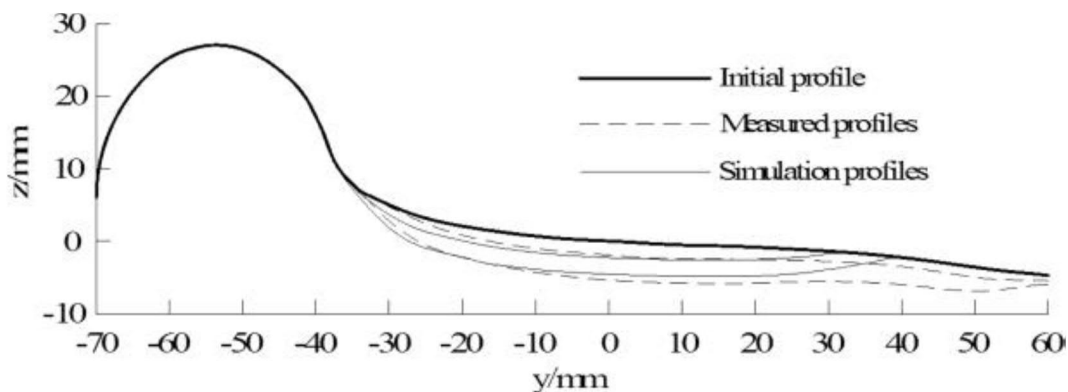
5.1.4.2 Approche mécanique de contact

L'approche basée sur la mécanique de contact utilise la simulation dynamique multi-corps (Multibody Dynamics MBD) et l'analyse locale du contact roue/rail pour calculer les paramètres de contact (surface de contact, glissement, forces) entre la roue et le rail. En utilisant les paramètres de contact comme entrée pour un modèle d'usure donné, la matière est enlevée sur la surface de contact. La forme du profil mise à jour est utilisée comme entrée pour la simulation MBD de la boucle suivante. De cette manière, l'évolution du profil de la roue est déterminée par l'approche basée sur la mécanique de contact, voir Figure 23.

⁵³ Lingaitis, L.P., Mikalunas, S. and Podvezko, V. (2005) "Statisticheskije imitazionije prognoznije modeli ozenok iznosa bandazhej kolesnich par lokomotivof," Transp. Telecommun., 6(3), pp. 391–396.

Figure 23 : Approche mécanique de contact - méthode par boucle ⁵⁴

Il existe deux modèles d'usure fréquemment utilisés, le modèle d'Archard ^{55,56}, et l'approche Ty ^{57,58}. Le modèle d'Archard utilise la charge, la distance de glissement, la dureté et un coefficient d'usure dépendant du matériau pour calculer le volume d'usure. L'approche Ty est basée sur le glissement γ et la force d'adhérence T . Récemment, Al-Maliki et al. ⁵⁹ ont développé un nouveau modèle d'usure basé sur la contrainte de cisaillement maximale de contact τ_{max} . Le modèle créé par Al-Maliki et al. montre une meilleure correspondance avec l'usure mesurée en utilisant la contrainte de cisaillement de contact maximale τ_{max} qu'avec le coefficient d'usure Ty.

Figure 24 : Résultats de validation de l'approche par contact de Ding et al. ⁶⁰

⁵⁴ Braghin, F., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S. and Bruni, S. (2006) "A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear," *Wear*, 261(11–12), pp. 1253–1264. Verfügbar auf doi: 10.1016/j.wear.2006.03.025.

⁵⁵ H. K. Jun, D. H. Lee, and D. S. Kim, "Calculation of minimum crack size for growth under rolling contact between wheel and rail," *Wear*, vol. 344–345, pp. 46–57, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.wear.2015.10.013.

⁵⁶ R. Lewis et al., "Towards a standard approach for the wear testing of wheel and rail materials," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 231, no. 7, pp. 760–774, Aug. 2017, doi: 10.1177/0954409717700531.

⁵⁷ R. Lewis and R. S. Dwyer-Joyce, "Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 218, no. 6, pp. 467–478, Jun. 2004, doi: 10.1243/1350650042794815.

⁵⁸ G. Pearce and N. D. Sherratt, "Prediction of wheel profile wear," *Wear*, vol. 144, no. 1–2, pp. 343–351, Apr. 1991, doi: 10.1016/0043-1648(91)90025-P.

⁵⁹ H. Al-Maliki, A. Meierhofer, G. Trummer, R. Lewis, and K. Six, "A new approach for modelling mild and severe wear in wheel-rail contacts," *Wear*, pp. 1–23, 2021.

⁶⁰ J. Ding, F. Li, Y. Huang, S. Sun, and L. Zhang, "Application of the semi-Hertzian method to the prediction of wheel wear in heavy haul freight car," *Wear*, vol. 314, no. 1–2, pp. 104–110, 2014, doi: 10.1016/j.wear.2013.11.052.

Ding et al.⁶⁰ ont utilisé une méthode basée sur la mécanique de contact pour prédire la forme de l'usure de la bande de roulement. Les résultats sont présentés à la Figure 24 correspondent généralement bien au profil mesuré, sauf dans la zone extérieure de la roue $y > 27\text{mm}$. Dans cette zone, le profil de roue mesuré présente encore de l'usure, alors que le résultat de la simulation ne l'indique pas. Les auteurs expliquent cet écart par le fait que les appareils de voie et la déformation plastique n'ont pas été pris en compte dans le modèle.

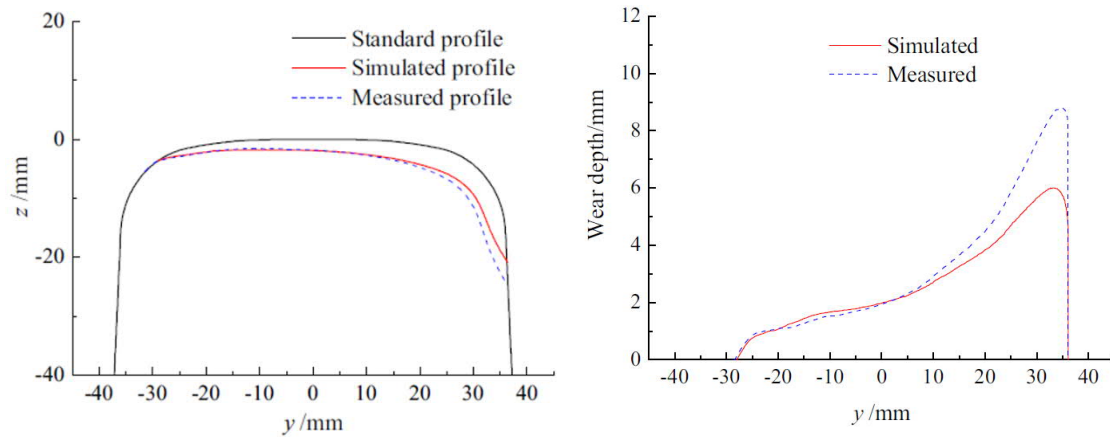


Figure 25 : Résultat de validation utilisant la mécanique de contact de Li et al.⁶¹

La méthode basée sur la mécanique de contact a également été utilisée par Li et al.⁶¹ pour réduire l'usure des profils de rail, voir Figure 25. Les résultats sont comparables aux résultats présentés. Le profil simulé est bien corrélé avec le profil mesuré, à l'exception de la zone extérieure du profil $y > 15\text{mm}$. Les auteurs expliquent cet écart par la non prise en compte de l'influence de différents facteurs comme la déformation plastique.

Les deux études montrent que les résultats de l'approche basée sur la mécanique de contact sont parfois bien corrélés avec les mesures. Les auteurs expliquent les écarts par la non prise en compte de différents paramètres globaux de contact.

⁶¹ X. Li, T. Yang, J. Zhang, Y. Cao, Z. Wen, and X. Jin, "Rail wear on the curve of a heavy haul line—Numerical simulations and comparison with field measurements," *Wear*, vol. 366–367, pp. 131–138, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.06.024.

5.1.4.3 Approche hybride

L'approche hybride pour la prévision des formes d'usure des profils combine l'approche statistique et l'approche mécanique de contact.

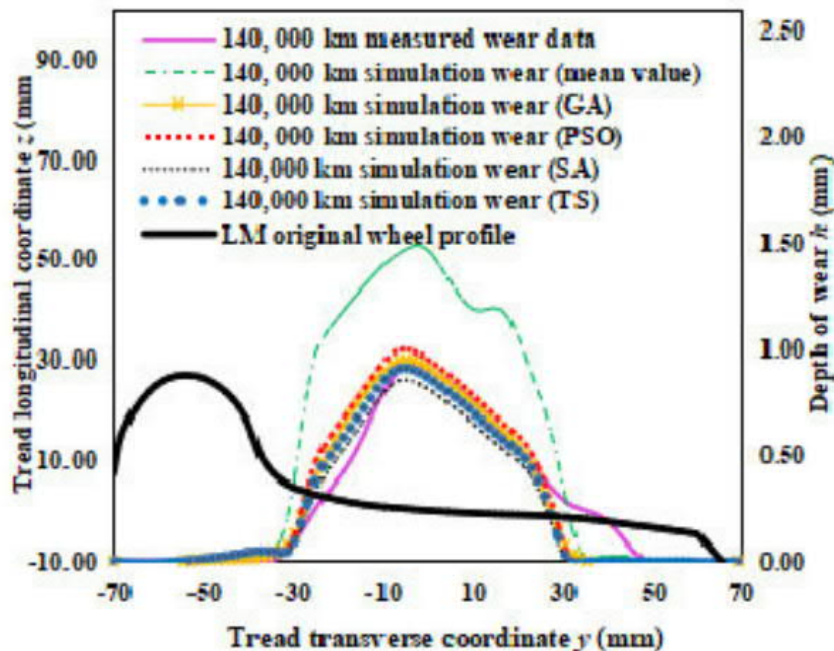


Figure 26 : Résultats de validation de Zhu et al. en utilisant une approche hybride ⁶²

Les résultats, en utilisant l'approche hybride de Zhu et al. ⁶², sont présentés dans la Figure 26. Ils sont similaires à ceux de Ding et al. ⁶⁰ et Li et al. ⁶¹, où les profils prédits correspondent bien aux profils mesurés, sauf dans les zones extérieures de la roue.

Hartwich et al. ⁶³ ont également utilisé l'approche hybride pour prédire l'usure des roues. Les auteurs ont calculé les courbes moyennes des courbes d'usure de niveaux similaires, appelées états d'usure, voir la Figure 27. Une nouvelle courbe d'usure est calculée en interpolant une courbe entre les états d'usure, en utilisant la surface d'usure comme paramètre d'entrée.

⁶² Zhu, A. et al., "Research on Prediction of Metro Wheel Wear Based on Integrated Data-Model-Driven Approach," IEEE Access, vol. 7, pp. 178153–178166, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2950391.

⁶³ D. Hartwich et al., "A new hybrid approach to predict worn wheel profile shapes," Veh. Syst. Dyn., 2021.

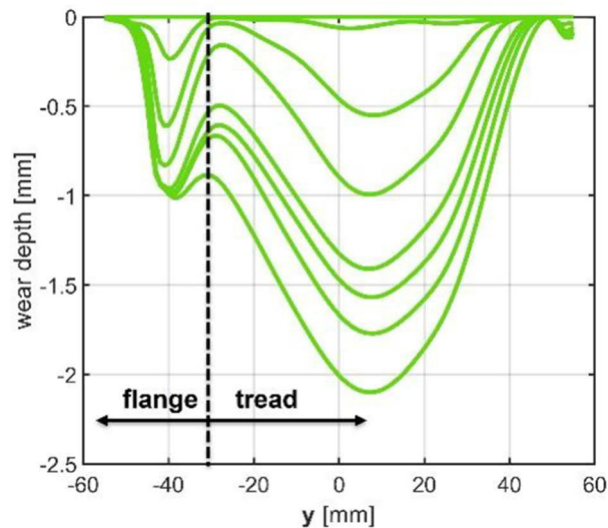


Figure 27 : États d'usure *Fehler! Textmarke nicht definiert*

Sur la base du comportement d'usure linéaire mesuré (surface d'usure en fonction du kilométrage), il est facile de calculer la surface d'usure à un kilométrage donné pour le scénario dans lequel les mesures ont été effectuées. Pour déterminer le taux d'usure pour un nouveau scénario d'exploitation, le taux d'usure mesuré doit être multiplié par le rapport des mesures d'usure (T_γ , $\tau_{\max}$) entre le nouveau scénario et le scénario dans lequel les mesures ont été effectuées, voir équation 3.

$$k_s = k_m \frac{P_s}{P_m}$$

k_s : Taux d'usure du nouveau scénario

k_m : Taux d'usure mesuré

P_s : Mesures d'usure pour un nouveau scénario

P_m : Mesures d'usure pour le scénario mesuré

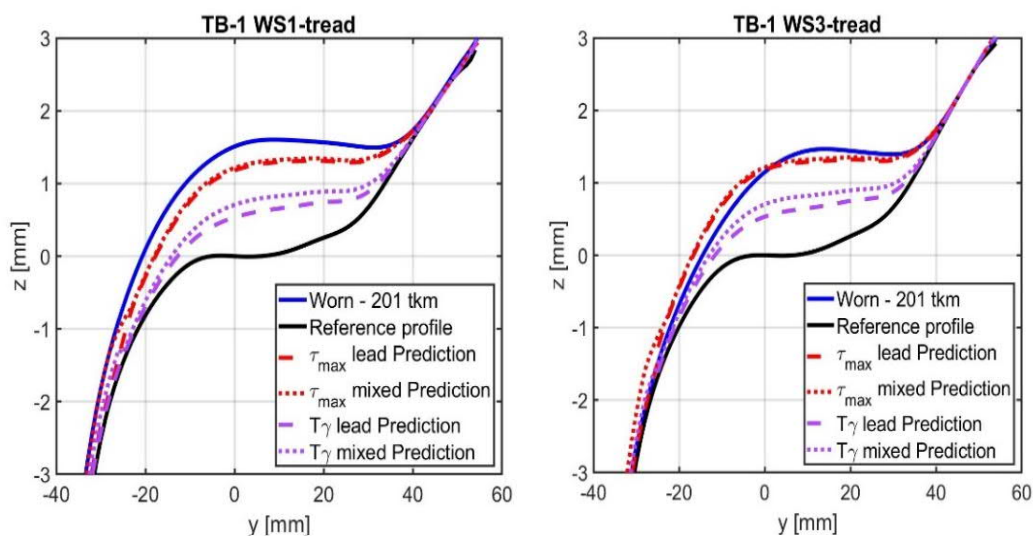


Figure 28 : Résultats de validation de Hartwich et al. *Fehler! Textmarke nicht definiert* en utilisant l'approche hybride

Les profils de roues prévus par Hartwich et al.⁶³ sont présentés dans la Figure 28. Les résultats sont mieux corrélés avec les mesures lorsque l'approche τ_{max} est utilisée plutôt que l'approche T_y . Cela confirme que le comportement à l'usure peut être mieux prédit en utilisant τ_{max} qu'en utilisant le modèle basé sur T_y , comme le montre le travail d'Al-Maliki et al.⁵⁹.

En résumé, l'approche basée sur les statistiques prédit bien l'usure, mais ne peut pas être appliquée à de nouveaux scénarios. L'approche basée sur la mécanique de contact peut être appliquée à différents scénarios, mais ne fournit pas de résultats très précis sur toute la forme du profil. L'approche hybride est moins précise que l'approche statistique, mais plus précise que l'approche basée sur la mécanique de contact. En outre, l'avantage de l'approche hybride réside dans son applicabilité à tous les scénarios et dans son efficacité de calcul.

5.1.5 Modélisation et simulation

5.1.5.1 Forces d'adhérence

Les modèles basés sur les forces d'adhérence sont extrêmement utiles pour la prévision et la simulation du comportement des voies ferrées et sont donc constamment développés et améliorés. Les modèles « Extended Creep Force » (ECF) et « CONTACT » sont capables de modéliser les effets des SKK. Il existe également le modèle Popovici⁶⁴, qui permet de modéliser les lubrifiants dans la zone de frottement. Il faudrait cependant procéder à des adaptations pour prendre en compte des produits solides à l'interface comme ceux qui peuvent être formés par le SKK.

Le modèle CONTACT⁶⁵, par exemple, était à l'origine un simple modèle semi-spatial, puis il a été développé et amélioré pour inclure les couches du troisième corps^{11,66}. Dans la littérature, les modèles de glissement sont principalement développés sur la base de théories de lubrification de surface ou hydrodynamique. Parmi les modèles qui relèvent principalement de la théorie de la lubrification à la surface, on peut citer le modèle CONTACT^{65,67}, le modèle FASTSIM^{68,69} et le modèle Polach^{70,71}.

⁶⁴ Popovici, R.I. (2010) "Friction in Wheel-Rail Contacts". PhD thesis. Verfügbar auf <https://research.utwente.nl/en/publications/friction-in-wheel-rail-contacts>.

⁶⁵ Vollebregt, E.A.H. (2013) 'Numerical modeling of measured railway creep versus creep-force curves with CONTACT', Wear, 314(1–2), pp. 87–95. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2013.11.030>.

⁶⁶ Six, K., Meierhofer, A., Müller, G. and Dietmaier, P. (2014) 'Physical processes in wheel–rail contact and its implications on vehicle–track interaction', International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 53(5), pp. 635–650. Verfügbar auf <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.983675>.

⁶⁷ Kalker, J.J. (1967) 'On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction'.

⁶⁸ Kalker, J.J. (1982) 'A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact', <http://dx.doi.org/10.1080/00423118208968684>, 11(1), pp. 1–13. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423118208968684>.

⁶⁹ Spiriyagin, M., Polach, O. and Cole, C. (2013) 'Creep force modelling for rail traction vehicles based on the Fastsim algorithm', <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2013.826370>, 51(11), pp. 1765–1783. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.826370>.

⁷⁰ Polach, O. (1999) 'A Fast Wheel-Rail Forces Calculation Computer Code', <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063125>, 33(SUPPL.), pp. 728–739. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063125>.

⁷¹ Polach, O. (2005) 'Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit', Wear, 258(7–8), pp. 992–1000. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2004.03.046>.

Plus récemment, le modèle ECF^{66,72,73,74} a été développé en tant qu'extension des modèles Tomberger⁷⁵ et FASTSIM pour étudier les effets du glissement et des solides en surface sur le comportement de traction^{76,77}. Toutefois, il n'est pas encore entièrement publié, mais a été validé avec l'aide des entreprises ferroviaires. Il intègre des essais de torsion à haute pression (High Pressure Torsion, HTP) dans les données pour caractériser le comportement de la couche du troisième corps⁷⁸. Il a été démontré que la qualité des prévisions était meilleure par rapport à d'autres modèles de force de d'adhérence^{11,66}.

D'autres modèles de force d'adhérence utilisent la théorie de la lubrification hydrodynamique, on peut citer les modèles Chen^{79,80}, Tomberger⁷⁵ et Zhu⁸¹ déjà mentionnés précédemment.

5.1.5.2 SKK, couche du troisième corps et contamination

Il y a peu d'études qui portent sur les produits de SKK et les modèles de contamination. Les modèles les plus remarquables sont présentés dans ce chapitre, ainsi que quelques recherches axées sur la couche du troisième corps.

Dans une étude de Meierhofer et al.⁸², les résultats expérimentaux du banc d'essai à double disques ont été utilisés pour paramétrer un modèle qui inclut une couche de troisième corps. Pour une pression hertzienne maximale de 1500 MPa et un glissement de 5% à 0.5 m/s, une épaisseur maximale de la couche troisième corps de 50 µm a été déterminée. La couche du troisième corps était plus mince et présentait de nombreuses fissures lorsque la pression était réduite à 900 MPa. Sur cette base, un modèle analytique comprenant deux équations intégrales a été proposée. Comme pour les travaux antérieurs de Hou et al., la couche du

⁷² R. A. Allen and R. P. Reiff, "Track Lubrication: Its Application and Potential for Reducing Fuel Consumption," *Transp. Res. Rec.*, pp. 48–58, 1985.

⁷³ R. Reiff and D. Creggor, "Systems Approach to Best Practice for Wheel and Rail Friction Control," *Int. Heavy Haul Conf.*, 1999.

⁷⁴ Meierhofer, A. (2015) 'A new wheel-rail creep force model based on elasto-plastic third body layers'.

⁷⁵ Tomberger, C. et al. (2011) 'Friction in wheel–rail contact: A model comprising interfacial fluids, surface roughness and temperature', *Wear*, 271(1–2), pp. 2–12. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2010.10.025>.

⁷⁶ Buckley-Johnstone, L., Lewis, R., Six, K., and Trummer, G. (2015) 'T1077: Modelling & quantifying the influence of water on wheel/rail adhesion levels', London, UK.

⁷⁷ L. Buckley-Johnstone, M. Harmon, R. Lewis, C. Hardwick, and R. Stock, "Assessment of Friction modifiers performance using Two Different Laboratory Test-Rigs," in *The Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2016, pp. 1–16.

⁷⁸ M. D. Evans, R. Lewis, C. Hardwick, A. Meierhofer, and K. Six, "High Pressure Torsion testing of the Wheel/Rail Interface," in *Proceedings of 10th international conference on contact mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, 2015.

⁷⁹ Chen, H. et al. (2002) 'Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact', *Wear*, 253(1–2), pp. 75–81. Verfügbar auf: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00085-6).

⁸⁰ Chen, H., Ishida, M. and Nakahara, T. (2005) 'Analysis of adhesion under wet conditions for three-dimensional contact considering surface roughness', *Wear*, 258(7–8), pp. 1209–1216. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2004.03.031>.

⁸¹ Zhu, Y., Olofsson, U. and Söderberg, A. (2013) 'Adhesion modeling in the wheel–rail contact under dry and lubricated conditions using measured 3D surfaces', *Tribology International*, 61, pp. 1–10. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2012.11.022>.

⁸² Meierhofer, A. et al. (2014) 'Third body layer-experimental results and a model describing its influence on the traction coefficient', *Wear*, 314(1–2), pp. 148–154. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2013.11.040>.

troisième corps est déterminée par une caractéristique bilinéaire^{82,83}. Le modèle qui prend en compte les caractéristiques du troisième corps a été plus précis que les modèles sans cette couche, comme la théorie linéaire de Kalker. La Figure 29 compare la précision des modèles avec et sans troisième corps avec le modèle expérimental pour quatre scénarios différents.

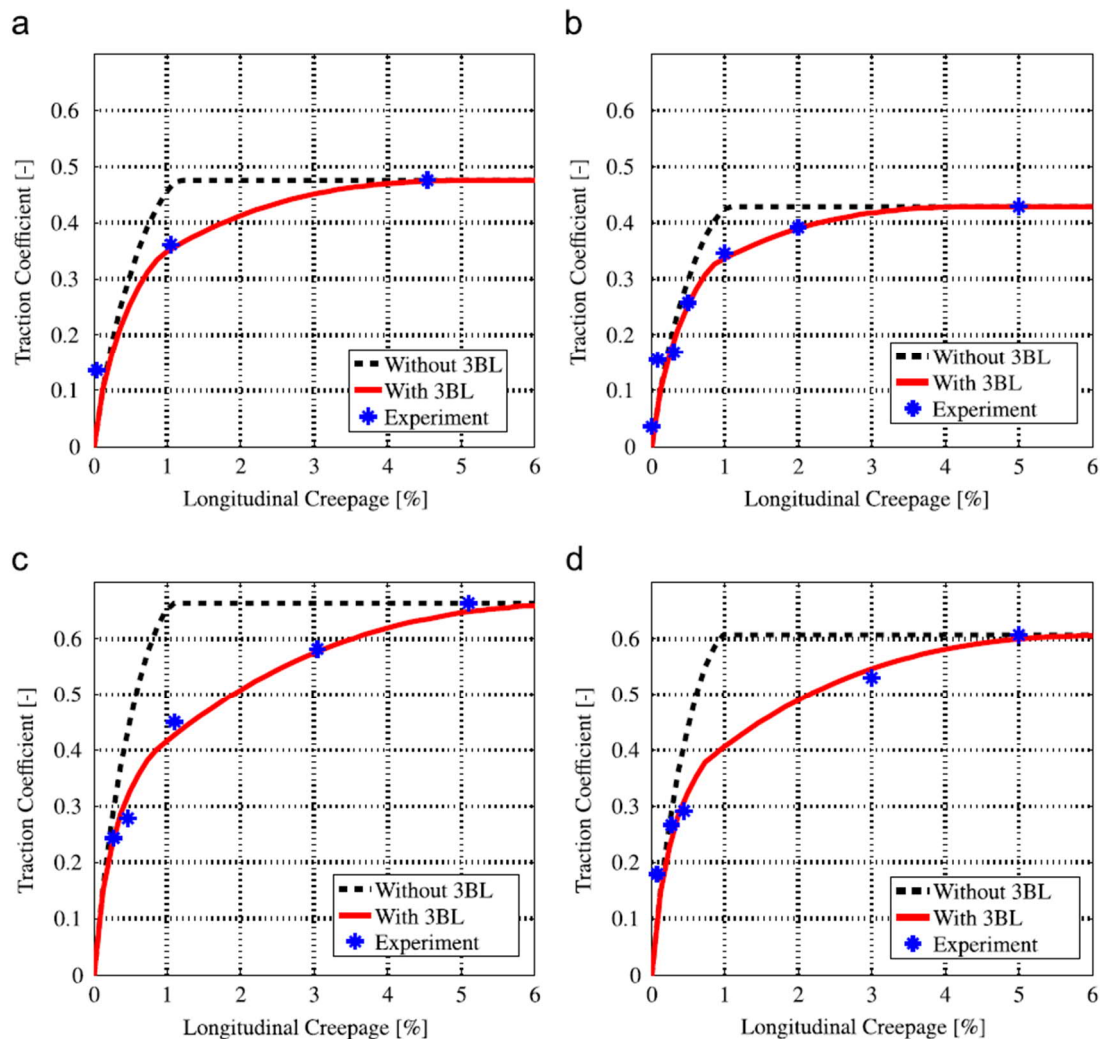


Figure 29 : Comparaison entre le modèle avec et sans les propriétés de la couche du troisième corps (3BL) et les résultats expérimentaux de quatre scénarios. a) $p_0 = 1500$ MPa, $v = 0,5$ m/s; b) $p_0 = 1500$ MPa, $v = 1$ m/s, c) $p_0 = 900$ MPa, $v = 0,5$ m/s, d) $p_0 = 900$ MPa, $v = 1$ m/s⁸²

Comme mentionné au point 5.1.5.1 ci-dessus, certains modèles utilisent la théorie hydrodynamique qui s'applique lorsqu'on tient compte de la présence de SKK ou d'impuretés telles que l'eau. Si on considère que l'effet hydrodynamique influence les frottements dans le système, il faut tenir compte du fait que cet effet gagne en importance avec l'augmentation de la vitesse relative.

Dans certaines études portant sur la contamination des rails par l'eau, Chen et al. ont élaboré un modèle qui suppose qu'une partie de la charge normale est supportée par les défauts de

⁸³ Hou, K., Kalousek, J. and Magel, E. (1997) 'Rheological model of solid layer in rolling contact', Wear, 211(1), pp. 134–140. Verfügbar auf: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00097-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00097-5).

rugosité et qu'une autre partie est supportée par le film hydrodynamique. Sur la base de cette hypothèse, le contact de surface est défini à la zone de lubrification limite, tandis que le contact de film hydrodynamique est défini à la zone hydrodynamique. Dans leur modèle, le coefficient de frottement du film hydrodynamique a été calculé par des équations de prévision de l'épaisseur du film et la loi de viscosité de Newton^{79,80,84,85}.

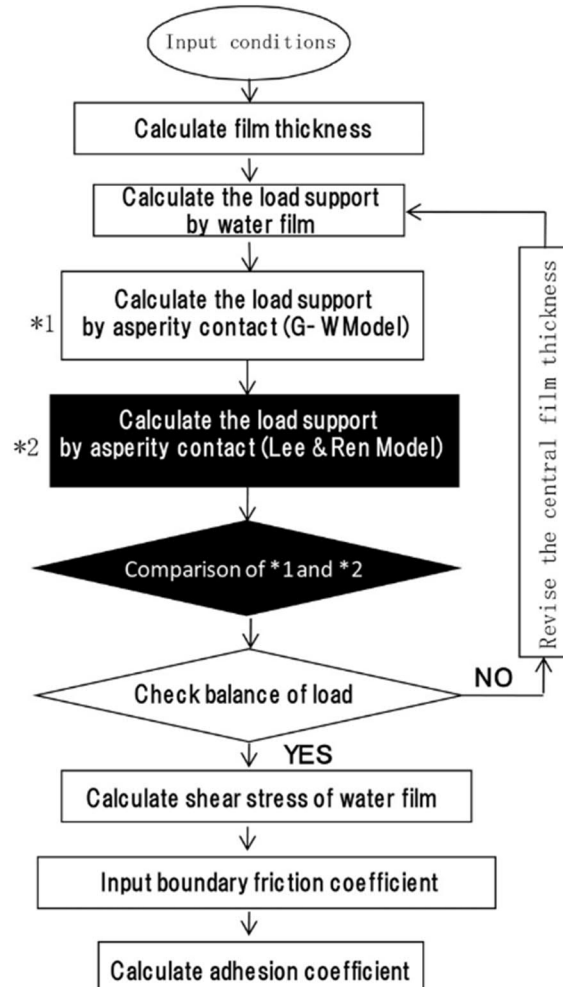


Figure 30 : Logigramme pour le calcul du coefficient d'adhérence⁸⁶

La Figure 30 présente le logigramme permettant d'obtenir le calcul du coefficient d'adhérence utilisé dans le modèle de Chen et al. Il convient de noter que le modèle de Greenwood et Williamson⁸⁷ a été utilisé pour les calculs à faibles pressions de contact, tandis que le modèle

⁸⁴ Chen, H. et al. (2008) 'Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions', *Wear*, 265(9–10), pp. 1504–1511. Verfügar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2008.02.034>.

⁸⁵ Chen, H. et al. (2016) 'Influence of axle load on wheel/rail adhesion under wet conditions in consideration of running speed and surface roughness', *Wear*, 366–367, pp. 303–309. Verfügar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2016.05.012>.

⁸⁶ Chen, H. et al. (2011) 'Estimation of wheel/rail adhesion coefficient under wet condition with measured boundary friction coefficient and real contact area', *Wear*, 271(1–2), pp. 32–39. Verfügar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2010.10.022>.

⁸⁷ Greenwood, J.A. and Tripp, J.H. (1970) 'The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces', *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 237, pp. 625–633. Verfügar auf: http://dx.doi.org/10.1243/PIME_PROC_1970_185_069_02, https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1970_185_069_02.

Lee et Ren a été utilisé pour les calculs à haute pression de contact, car ce modèle n'est pas assez précis avec une faible pression ⁸⁶.

La même étude a montré l'importance d'un calcul précis du coefficient de frottement limite, comme le montre la Figure 31.

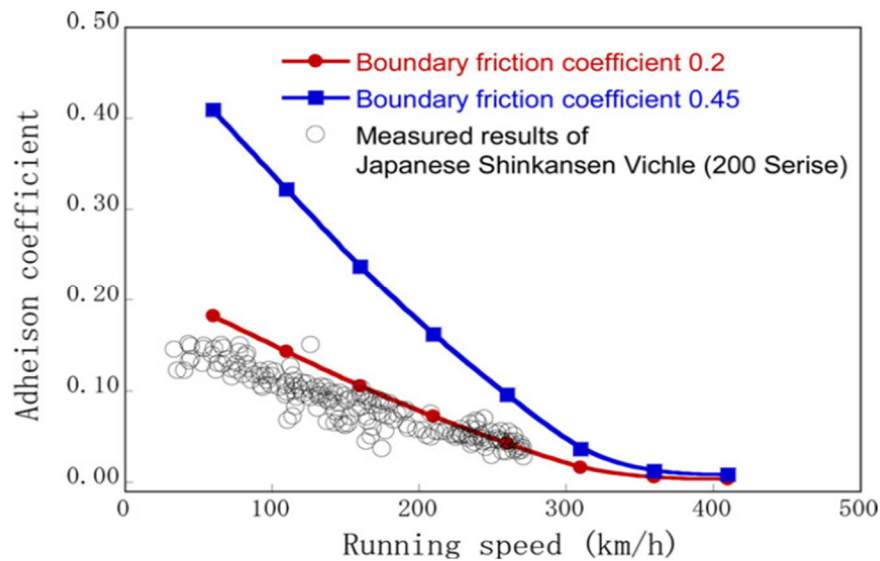


Figure 31 : Comparaison des coefficients de frottement limite avec des modèles et des expériences ⁸⁶

Dans une étude d'Allotta et al. ⁸⁸ un modèle a été développé sur la base du modèle de Polach, qui mettait l'accent sur la détérioration de l'adhérence au contact roue/rail. Une autre étude s'est intéressée à l'effet de différents glissements horizontaux sur le niveau d'adhérence dans des conditions de pollution par huile sur des roues de tram ⁸⁹. Dans cette étude de Voltr et Lata, le passage de l'état pollué par l'huile à l'état sec a été modélisé en fonction du travail spécifique de dispersion sur un intervalle de temps, et la variation du coefficient de frottement a été modélisée en fonction de la dérivée temporelle de la vitesse de glissement.

Une autre étude qui portait sur les conditions de pollution par l'eau et par l'huile a utilisée l'équation de Reynolds pour estimer l'épaisseur du film et le modèle de Greenwood et Tripp ^{87,90} pour calculer le contact en surface. Cela a encore été amélioré en utilisant le modèle ZMC

⁸⁸ Allotta, B. et al. (2014) 'Development of an innovative wheel-rail contact model for the analysis of degraded adhesion in railway systems', Tribology International, 69, pp. 128–140. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2013.09.013>.

⁸⁹ Voltr, P. and Lata, M. (2014) 'Transient wheel–rail adhesion characteristics under the cleaning effect of sliding', <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.961488>, 53(5), pp. 605–618. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.961488>.

⁹⁰ Wu, B. et al. (2014) 'Numerical analysis on wheel/rail adhesion under mixed contamination of oil and water with surface roughness', Wear, 314(1–2), pp. 140–147. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2013.11.041>.

de Zhai et al. pour étudier le contact avec les aspérités et l'analyse par éléments finis pour tenir compte de la déformation plastique de ces aspérités^{90,91,92}.

En 2021, Vollebregt et al.⁹³ ont étudié les difficultés rencontrées et les progrès réalisés dans la modélisation de l'interaction roue/rail et déterminé le comportement transitoire du coefficient de frottement.

Dans une étude récente, Trummer et al.⁹⁴ ont présenté un modèle qui prédit l'évolution du coefficient de frottement en utilisant les produits SKK en exploitation ferroviaire. Le modèle était basé sur les mécanismes de propagation des produits de SKK (à base d'eau) sur la surface de rail et son incidence sur le coefficient de frottement. Les mécanismes mis en évidence étaient le transfert du produit SKK du rail à la roue, et vice versa, le long du rail et le comportement de consommation du produit.

Toujours en 2021, Kvarda et al.⁹⁵ ont présenté un modèle utilisant une approche différente pour prédire les frottements au contact roue/rail. L'utilisation du modèle FASTSIM a permis d'obtenir une solution sans utiliser de valeur fixes de frottement entre les aspérités, ce qui a été considéré comme un facteur important dans le contact roue/rail étant donné que le frottement réel au contact est difficile à déterminer avec une précision suffisante. L'étude a montré que le modèle était suffisamment précis par rapport aux données mesurées, malgré une vitesse croissante. Cependant, il convient de noter que dans cette étude, un certain nombre de limites ont été signalées et qu'il est donc nécessaire de poursuivre les travaux de recherche.

⁹¹ Zhao, Y., Maietta, D.M. and Chang, L. (2000) 'An Asperity Microcontact Model Incorporating the Transition From Elastic Deformation to Fully Plastic Flow'. Verfügbar auf: http://asmedigitalcollection.asme.org/tribology/article-pdf/122/1/86/5822840/86_1.pdf (Accessed: 7 September 2022).

⁹² Wu, B. et al. (2016) 'Analysis on thermal effect on high-speed wheel/rail adhesion under interfacial contamination using a three-dimensional model with surface roughness', *Wear*, 366–367, pp. 95–104. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2016.06.002>.

⁹³ Vollebregt, E., Six, K. and Polach, O. (2021) 'Challenges and progress in the understanding and modelling of the wheel–rail creep forces', *Vehicle System Dynamics*, 59(7), pp. 1026–1068. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1912367/FORMAT/EPUB>.

⁹⁴ Trummer, G. et al. (2021) 'Modelling of Frictional Conditions in the Wheel–Rail Interface Due to Application of Top-of-Rail Products', *Lubricants* 2021, Vol. 9, Page 100, 9(10), p. 100. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS9100100>.

⁹⁵ Kvarda, D. et al. (2021) 'Asperity-based model for prediction of traction in water-contaminated wheel-rail contact', *Tribology International*, 157. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2021.106900>.

5.1.5.3 Rugosité de surface

En 2022, Ertz et Bucher⁹⁶ ont présenté un modèle qui prend en compte les effets de la rugosité de surface et de la température sur la base de la loi de force d'adhérence non-linéaire de Shen-Hedrick-Elkins^{96,97}. Comme le montre la Figure 32, le modèle d'Ertz et de Bucher a fourni une solution plus précise montrant une augmentation progressive du coefficient d'adhérence dans la première partie de la courbe de traction et une diminution après la saturation. L'influence principale de la rugosité est le rapport entre la surface de contact réelle déterminée par les aspérités (pics de rugosité) et la surface de contact nominale, le rapport entre la surface de contact réelle et nominales est également intégré comme paramètre dans le calcul initial des forces de frottement.

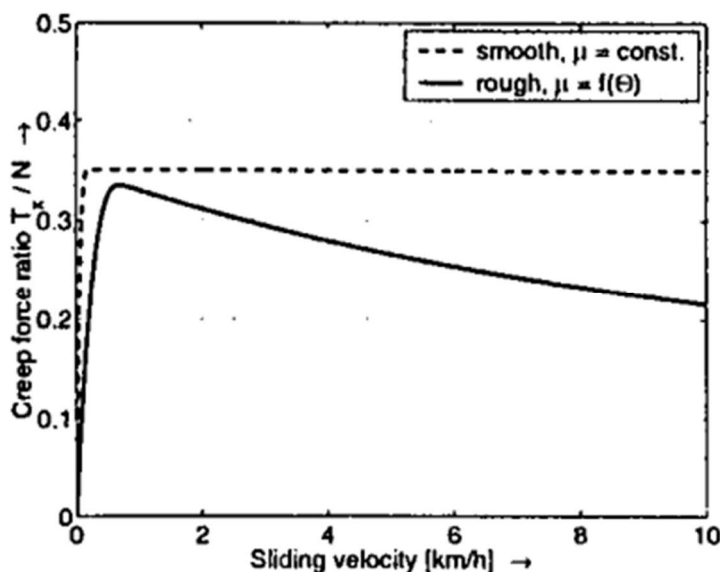


Figure 32 : Comparaison entre le modèle avec une surface lisse et le modèle avec une surface rugueuse à une vitesse $V=30\text{km/h}$ *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

La Figure 33 montre, à titre de comparaison, le modèle⁹⁶ pour différentes rugosités. Il y a une augmentation moins forte du coefficient d'adhérence avec un glissement faible. La diminution du coefficient d'adhérence en cas de glissement élevé peut être associée à l'augmentation de la température de contact due à la chaleur de frottement générée. Pour cette raison, un coefficient de frottement dépendant de la température a été intégré au calcul en utilisant une estimation analytique de la température moyenne de contact. Ce modèle s'applique au glissement longitudinal et transversal et est basé sur les phénomènes physiques de rugosité et de température.

⁹⁶ Ertz, M. and Bucher, F. (2002) 'Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility Improved Creep Force Model for Wheel/Rail Contact Considering Roughness and Temperature Improved Creep Force Model for Wheel/Rail Contact Considering Roughness and Temperature', Vehicle System Dynamics Supplement, 37, pp. 314–325. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423114.2002.11666242>.

⁹⁷ Shen, Z.Y., Hedrick, J.K. and Elkins, J.A. (1983) 'A Comparison of Alternative Creep Force Models for Rail Vehicle Dynamic Analysis', <http://dx.doi.org/10.1080/00423118308968725>, 12(1–3), pp. 79–83. Verfügbar auf: <https://doi.org/10.1080/00423118308968725>.

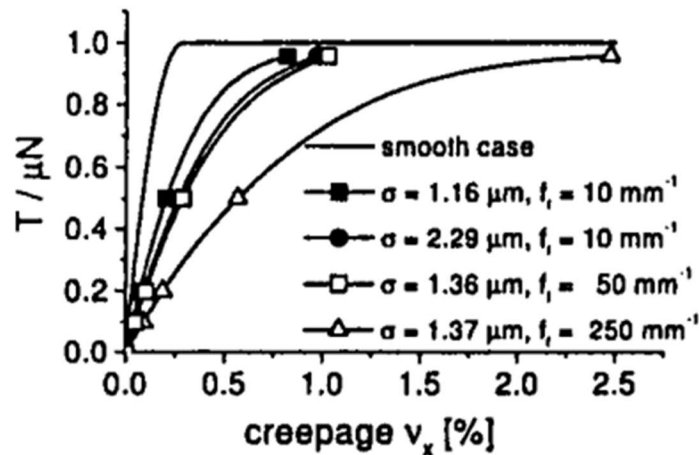


Figure 33 : Comparaison de la courbe de traction pour différentes rugosités *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

5.1.5.4 Usure

L'un des moyens les plus simples de modéliser les effets d'usure serait d'utiliser l'approche $T\gamma$ ⁹⁸. Cette méthode combine l'usure et la fatigue en un seul paramètre appelé dommages. La méthode s'appuie également sur des corrélations entre certains résultats $T\gamma$ et le comportement usure/fatigue constaté sur la voie, ce qui peut être un problème si de nouveaux aciers de rail sont utilisés par exemple. Le coefficient d'usure est représentatif de l'énergie consommée au contact, mais ne fait pas de distinction entre les différentes formes d'énergie (usure, chaleur, bruit, etc.). Les coefficients d'usure sont basés sur des données expérimentales issues d'essais de roulement/glisement bien étudiés pour les contacts secs, mais il existe désormais des essais avec des contacts humides contaminés⁹⁹. Il existe toutefois peu de données expérimentales sur l'influence des produits SKK sur l'usure. Un mémoire sur l'influence de SKK sur l'usure⁷⁷ a publié des données à la fois d'essais à échelle réduite sur banc d'essai à double disques et des essais à échelle réelle¹¹.

5.1.6 Gestion du frottement des rails intérieurs et/ou extérieurs

Aucune littérature n'est disponible au sujet de la gestion différente du frottement pour les rails intérieur et extérieur. Dans les chapitres précédents, la gestion du frottement se réfère toujours à parts égales au rail intérieur et au rail extérieur.

⁹⁸ C. Hardwick, R. Lewis, and D. T. Eadie, "Wheel and rail wear—Understanding the effects of water and grease," *Wear*, vol. 314, no. 1–2, pp. 198–204, Jun. 2014.

⁹⁹ C. Hardwick, R. Lewis, and D. T. Eadie, "Wheel and rail wear-Understanding the effects of water and grease," *Wear*, vol. 313, no. 5–6, pp. 19–24, 2013.

5.2 Situation des connaissances inexistantes dans le module 1.1 (livrable 1.1.2)

La plupart des connaissances sur l'interaction entre SKK et SKS au contact roue/rail se rapportent à la voie normale. Il faut donc étudier la possibilité d'analogie des connaissances de la voie normale à la voie métrique.

Il a des hypothèses sur les mécanismes d'action du SKK et de la SKS. Il existe toutefois un besoin de mécanisme d'action validé, aussi bien pour la voie normale que pour la voie métrique. Cette validation est rendue difficile par les nombreux facteurs d'influence qui déterminent les conditions d'adhérence et de frottement dans le contact roue/rail.

Par ailleurs, il existe des descriptions générales et qualitatives, mais pas quantitatives, des facteurs qui influencent les performances de SKK et de SKS, tels que la température et l'eau. Cela concerne aussi bien la voie normale que la voie métrique.

Il n'existe pas de normes ou de directives qui dicte clairement les exigences pour l'utilisation de SKK et de SKS sur voie métrique.

Il existe des méthodes de mesure pour l'évaluation tribologique (frottement) des SKK et SKS tout au long de la chaîne d'essai. Cependant, il s'agit généralement de méthodes individuelles, ce qui rend difficile une représentation globale des performances des SKK et SKS. De plus, l'analogie des méthodes et des résultats d'essai de la voie normale à la voie métrique n'est pas avérée.

L'approche hybride pour estimer l'usure de la roue et du rail présente des avantages en termes d'efficacité de calcul et d'applicabilité à différents scénarios. Une analyse de l'usure dans les courbes serrées des voies métriques doit être effectuée afin de pouvoir appliquer le modèle à ces conditions d'exploitation. L'interaction entre le SKK et la SKS doit également être étudiée et implémentée dans le modèle ou dans d'autres modèles appropriés.

Pour bien décrire le bruit en courbe, il est nécessaire de déterminer et modéliser précisément la plage du frottement décroissant du coefficient d'adhérence. Les mesures du frottement décroissant dans des conditions réelles sont difficiles. Dans la littérature, on trouve de nombreuses approximations de la courbe de frottement. L'approche de Kalker est valable dans des conditions statiques, mais il n'existe pas de théorie de glissement dynamique. La littérature traite principalement de la voie normale ou des tramways. Il est nécessaire de disposer d'un modèle d'étude du bruit en courbe qui soit suffisamment représentatif applicable aux voies métriques. Ce modèle est impératif pour pouvoir ensuite développer des mesures de maîtrise de l'usure.

5.3 Principaux résultats du module 1.1

De manière générale, une compréhension commune nécessite des définitions claires : cela s'applique, par exemple, pour les termes d'adhésion, traction et frottement, qui semblent être utilisés sans distinction dans les publications. La production d'un document expliquant les termes et leurs différences est recommandé afin de mettre au même niveau les connaissances des personnes travaillant dans le secteur ferroviaire et de la recherche.

La probabilité d'apparition de bruit en courbe dépend principalement du rapport entre le rayon de la courbe et l'empattement du boggie. Le glissement dans la surface de contact roue/rail provoque un effet stick-slip qui entraîne une instabilité du coefficient d'adhérence. Cette instabilité entraîne une excitation des modes d'oscillation de la roue. Le couplage modal entre les modes de la roue joue également un rôle, certes moindre, mais non négligeable. En conséquence, la roue émet des bruits de giration, l'émission sonore du rail étant négligeable. L'apparition de crissements en courbe est plus chaotique que caractéristique, elle peut se produire ou non sur le même véhicule au même endroit et à différents moments de la journée. Les mesures correctives typiques consistent à ajouter des éléments amortisseurs sur les roues ou à appliquer une lubrification optimisée au niveau du contact roue/rail. Des mesures sur des bancs d'essai à double disques peuvent être utilisées pour développer des telles mesures correctives.

L'approche statistique prédit bien l'usure, mais ne peut pas être appliquée à de nouveaux scénarios. L'approche basée sur la mécanique de contact est applicable à différents scénarios mais ne donne pas de résultats très précis sur l'ensemble des formes de profil. L'approche hybride est moins précise que l'approche statistique, mais d'un autre côté, elle est plus précise que l'approche basée sur la mécanique de contact. De plus, l'avantage de l'approche hybride réside dans l'applicabilité à tous les scénarios et dans l'efficacité des calculs.

6 Vue d'ensemble des produits (module 1.2)

6.1 Liste et évaluation (pour/contre) des produits de SKK et de SKS actuellement disponibles en Suisse et à l'étranger (Livrable 1.2.1)

6.1.1 Les produits de SKK et de SKS

Sur la base d'une recherche de marché sur internet, une liste de l'ensemble des produits de SKK et de SKS a été érigée. Elle a permis de recenser un total de 175 produits proposés par 50 fabricants. La liste complète des produits est disponible sous forme de liste Excel dans l'Annexe 1.

TOR-FM and FL products	Number	Mode of use	Number
Igralub	16	Top-of-railfriction modifier	43
Fuchs Lubritech	14	Flange lubricant	127
LB Foster	13	Both	10
Whitmore	12	?	7
Lubcon	11	Mode of application	Number
RS Clare	10	on-board	40
Bechem	9	wayside	51
Loram	6	Hi-Rail & wayside	3
Shell	6	on-board & wayside	15
Cico	6	on-board/Hi-Rail & wayside	2
Kompressol	6	?	64
LubeSense	4	Benefits	Number
Elpa	4	Noise reduction	56
Elm	4	Wear reduction	136
Brugarolas	4	Environmental	Number
Rhenus Lub	4	Biological degradability	107
Klüber	3	Any kind of ecolabel	19
Railmark	3	EU ecolabel	8
Others	40		

Tableau 4 : Synthèse des produits de SKK et de SKS classés par fabricant, type d'utilisation et d'applications, avantages et caractéristiques environnementales avec les informations issues des fiches techniques

L'analyse des fiches techniques et des autres informations disponibles sur les produits de SKK et SKS est résumée dans la Tableau 4. La plupart des fabricants disposant d'une large gamme de produits sont basées en Europe (Igralub, Fuchs Lubritech, Lubcon). LB Foster et Whitmore ont leur siège social aux Etats-Unis. La plupart des produits sont proposés pour la lubrification des boudins. Le type d'application, côté véhicule (embarquée, on-board) ou côté rail (installation fixe en voie) est équilibrée selon les informations claires à ce sujet disponibles. Toutefois, pour environ un tiers des produits, le domaine d'application exact reste flou.

Alors que la réduction de l'usure est le principal avantage pour 80% des produits, les informations sur la réduction de bruit sont moins disponibles (pour environ 30% des produits). En ce qui concerne les valeurs de frottement pouvant être obtenues avec SKK ou SKS, des

valeurs ne sont données que pour environ 5 % des produits. Les valeurs de frottement des produits clairement définis comme SKK vont de 0,18 à 0,42, indiqué pour 7 produits. Les coefficients de frottement ne sont donnés que pour 3 SKS allant de 0,065 à 0,33. Dans tous les cas, il n'y a pas d'informations sur la méthode de mesure et les paramètres de mesure.

La portée des produits clairement dénommés SKK est de 100 à 200m (Igralub) dans le cas d'une application embarquée, tandis que pour l'application fixe en voie, des valeurs allant jusqu'à 8 miles (12.9 km) (LB Foster) sont indiquées. Toutes les données relatives au SKS concernent les applications fixes en voie, et vont de 3000m (Igralub) à 8 miles (Withmore). Aucune information sur la méthode de mesure n'est disponible.

La biodégradabilité est déclarée pour environ 60% des produits, mais seulement 10% environ sont certifiés par un label écologique et seulement 5% par un label écologique européen ¹⁰⁰. Bien que les labels écologiques couvrent un large éventail de tests qui doivent être concluants, tels que les tests toxicologiques, les informations sur les produits se limitent à la biodégradabilité.

6.1.2 Performances du SKK et de la SKS

Lire chapitre 7.1.4

6.1.3 Impact environnemental du SKK et de la SKS

Il existe un certain nombre de lois régissant le traitement des produits chimiques, par exemple pour le stockage et l'élimination. L'ordonnance sur la réduction des risques chimiques ¹⁰¹ (ORRChim) contient des dispositions complètes pour:

- Certaines substances
- Groupes de préparations et d'objets

En général, SKK et SKS ne sont pas affectés négativement par la réglementation, à l'exception des produits pouvant contenir des alkylphénols et des biocides. Une liste et une évaluation des annexes de ORRChim en ce qui concerne les composants autorisés dans les SKK et SKS est disponible sous forme de liste Excel dans l'Annexe 2.

La biodégradabilité est le paramètre le plus important lié à la performance environnementale et disponible pour environ 60% des produits (voir liste Excel dans l'Annexe 1 et résumé dans le Tableau 4). Il existe différentes méthodes de détermination de la compatibilité biologique, en général il s'agit d'une des méthodes décrites dans l'OCDE 301 ¹⁰². Ainsi, une comparaison directe entre les produits est difficile.

¹⁰⁰ EU Ecolabel, https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel-home_en, accessed on 31.10.2022

¹⁰¹ Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV) vom 18. Mai 2005 (Stand am 23. Juni 2020)

¹⁰² OECD (1992), Test No. 301: Ready Biodegradability, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070349-en>.

Les labels écologiques, écolabels, comme le label écologique européen¹⁰⁰ et le label allemand « Blauer Engel »¹⁰³ exigent un certain nombre de paramètres pour confirmer la compatibilité environnementale. Les principaux paramètres pour les lubrifiants biodégradables et les lubrifiants hydrauliques¹⁰⁴ selon le « Blauer Engel » sont:

- Pas de métaux et de composés métallique
 - o Sauf Na/K/Mg/Ça et Li/Al dans les épaississants
- Toxicité aiguë et/ou chronique
 - o Test des algues (aiguë) OCDE 201¹⁰⁵
 - o Test de Daphnie (aigu) OCDE 202¹⁰⁶
 - o Test sur le poisson (aigu) OCDE 203¹⁰⁷, test sur l'embryon de poisson¹⁰⁸
- Biodégradabilité facile ou inhérente
 - o OCDE 301¹⁰², OCDE 302^{109,110,111}
- Coefficient de partage octanol-eau
 - o OCDE 107¹¹²
- Facteur de bioconcentration
 - o OCDE 305¹¹³

Pour « Blauer Angel » et le label écologique de l'UE, il existe une liste de substances et de produits répondant aux critères pour chacun des labels. Pour le label écologique de l'UE, il

¹⁰³ Blauer Engel, <https://www.blauer-engel.de/de>, accessed on 31.10.2022.

¹⁰⁴ Blauer Engel, DE-UZ 178 „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“, <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/schmierstoffe-hydraulikfluessigkeiten-bis-12-2022>, accessed on 31.10.2022

¹⁰⁵ OECD (2011) Test No. 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264069923-en>.

¹⁰⁶ OECD (2004), Test No. 202: Daphnia sp. Acute Immobilisation Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264069947-en>.

¹⁰⁷ OECD (2019), Test No. 203: Fish, Acute Toxicity Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264069961-en>.

¹⁰⁸ OECD (2013), Test No. 236: Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264203709-en>.

¹⁰⁹ OECD (1981), Test No. 302A: Inherent Biodegradability: Modified SCAS Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070363-en>.

¹¹⁰ OECD (1992), Test No. 302B: Inherent Biodegradability: Zahn-Wellens/ EVPA Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070387-en>.

¹¹¹ OECD (2009), Test No. 302C: Inherent Biodegradability: Modified MITI Test (II), OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070400-en>.

¹¹² OECD (1995), Test No. 107: Partition Coefficient (n-octanol/water): Shake Flask Method, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 1, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264069626-en>.

¹¹³ OECD (2012), Test No. 305: Bioaccumulation in Fish: Aqueous and Dietary Exposure, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264185296-en>.

s'agit de la liste LuSC (Lubricant Substance Classification List) ¹¹⁴ qui contient à la fois des substances, des huiles de base et des additifs commercialisés sous des marques.

Les normes EN15427 et CEN/TS 15427 (abordée au chapitre 5.1.2, voir ²⁹ à ³⁴) contiennent des tests de compatibilité environnementale, mais ne donne que des valeurs informatives. La RTE 49410 ³⁸ a fait une sélection parmi les tests prescrits par « Blauer Engel », qui comprennent l'utilisation de certains lubrifiants chimiques, métaux et composés métalliques, la toxicité (algues, daphnies et poissons), la biodégradabilité, le coefficient de partage octanol-eau et le facteur de bioconcentration. Les informations sur les nanomatériaux n'est pas exigée par « Blauer Engel », mais l'est par la R RTE 49410. De plus, les seuils indiqués dans la R RTE 49410 sont plus stricts que ceux de « Blauer Engel ». La comparaison entre « Blauer Engel » et R RTE 49410 est disponible sous forme de liste Excel dans l'Annexe 3.

6.1.4 Interactions possibles entre SKK et SKS

Le mélange SKK et SKS peut être effectué de deux manières selon les positions typiques présentées par la Figure 6:

- La SKS est supporté par le flanc du champignon du rail vers la surface de roulement
- Le SKK est transféré de la surface de roulement du rail vers le flanc du champignon du rail

Dans la littérature accessible, il existe peu d'informations qualitatives ou quantitatives sur les effets du mélange du SKK et de la SKS, voir Figure 17 ²⁷. On peut toutefois supposer que le transfert de la SKS du flanc du champignon du rail vers la surface de roulement du rail est plus critique que le transfert de SKK dans le sens inverse. Cela s'explique par le fait que pour une utilisation optimale du SKK, il faut respecter une certaine plage de coefficients de frottement, qui se situe approximativement entre 0,2 et 0,4, voir Figure 8. De cette manière, il est possible de réduire le bruit et l'usure tout en respectant les distances de freinage. Même une petite quantité de SKS sur la surface de roulement du rail peut compromettre la sécurité en augmentant les distances de freinage. D'autre part, l'ajout de SKK sur le flanc du champignon du rail améliorerait le contact roue/rail, ce qui, dans l'ensemble, favorise l'utilisation de SKS (coefficient de frottement nettement inférieur à 0,2), car un lubrifiant supplémentaire (ici SKK) réduira probablement encore le coefficient de frottement.

¹¹⁴ Lubricant Substance Classification List (2022) <https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/documents/LuSC-list%20vs%2010012022.pdf>, accessed on 31.10.2022

6.2 Situations des connaissances inexistantes dans le module 1.2

Bien qu'un grand nombre de produits de SKK et de SKS soient disponibles, il n'est pas possible de comparer directement les performances sur la base des fiches techniques disponibles, en raison du manque d'informations sur les méthodes et les paramètres de mesure utilisés.

En ce qui concerne la compatibilité environnementale, les normes et les méthodes d'essai concernent les substances, mais pas les produits, qui sont généralement des mélanges de substances, comme les SKK et les SKS. Les normes et spécifications techniques qu'on retrouve dans la norme EN 15427 ne concernent que la biodégradabilité, mais négligent d'autres paramètres importants qui décrivent la compatibilité avec l'environnement, tels que la toxicité. Il n'existe aucune norme ou directive qui concerne spécifiquement les lubrifiants pour les voies métriques. Pour l'élaboration d'une R RTE pour le SKK et la SKS pour les voies métriques, on pourrait se baser sur le R RTE 49410. Il convient toutefois de noter que la R RTE 49410 ne spécifie pas non plus de méthodes ou de seuils de performance basés sur des tests en laboratoire.

Les mécanismes et les effets exacts du mélange de SKK et de SKS ne sont pas connus.

6.3 Principaux résultats du module 1.2

L'étude de marché sur des produits de SKK et de SKS a permis d'identifier environ 170 produits d'une cinquantaine de fabricants. La proportion du type d'application (systèmes embarqués et des systèmes fixe en voie) est équilibrée, mais le type d'application reste flou pour environ un tiers des produits.

Alors que la réduction de l'usure est indiquée comme le principal avantage pour environ 80 % des produits, les informations sur la réduction du bruit sont moins disponibles (environ 30 % des produits). Les valeurs de frottement qui peuvent être clairement attribuées aux produits de SKK ou de SKS (10 au total) vont respectivement de 0,18 à 0,42 et de 0,065 à 0,33. La portée des produits clairement désignés comme SKK va de 100 à 200 m jusqu'à 8 miles, tandis que celle des produits SKS peut aller de 3000 m à 8 miles. Dans tous les cas, aucune information n'est donnée sur la méthode et les paramètres de mesure en termes d'usure, de frottement, de bruit et d'autonomie. Cela rend difficile, voire impossible, une comparaison ou une sélection sur la seule base des informations disponibles. Ce manque de connaissances peut être comblé par des méthodes bien définies, tant en laboratoire que sur le terrain.

La biodégradabilité est assurée pour environ 60 % des produits, mais seuls 10 % environ sont certifiés par un type d'écolabel, et seuls 5 % ont l'écolabel européen. L'exigence de compatibilité environnementale est plus facile à satisfaire pour les produits portant un label écologique tel que l'écolabel européen et « Blauer Engel », ce dernier étant étroitement lié à l'écolabel européen. Pour les produits dont les informations sont insuffisantes, par exemple uniquement sur la biodégradabilité, d'autres preuves doivent être fournies pour prendre des décisions (choix du produit).

En ce qui concerne le mélange de SKK et de SKS, peu de connaissances de la littérature sont disponibles. Les résultats ont montré un effet plus long de SKK quand la graisse a été mélangée.

7 Mise en œuvre opérationnelle

7.1 Liste et évaluation (pour/contre) des systèmes embarqués utilisé à l'échelle nationale et internationale (livrable 1.3.1)

7.1.1 Systèmes d'application embarqués pour le SKK et la SKS

Reiff déclare, au sujet de la décision entre l'application fixe en voie au sol et l'application embarquée à bord : « *La méthode d'utilisation choisie (fixe ou mobile) dépend d'un certain nombre de facteurs. Pour des raisons d'espace, il n'est pas possible d'aborder toutes les options en détail dans ce rapport, mais il est évident que si les zones de courbes d'un parcours sont réparties de manière uniforme et ne sont pas concentrées sur des zones spécifiques, l'utilisation de systèmes mobiles (embarqués) est plus intéressante. Lorsque les courbes sont concentrées à des zones précises et qu'elles ont des rayons serrés, l'utilisation d'applicateurs fixes en voie devient plus attrayante. D'autres paramètres à prendre en compte sont l'accès aux applicateurs en voie, la variation de température, la capacité d'énergie solaire, l'environnement d'exploitation, le type de locomotives qui circulent, les politiques de main-d'œuvre et le retour d'expérience.* »

La compatibilité entre les différents appareils d'application est compliquée et se fait souvent sur la base d'essais. C'est pourquoi les applicateurs sont généralement liés à un nombre limité de SKK ou de SKS. Lorsqu'un produit de SKK ou de SKS doit être remplacé, le dispositif d'application doit être soigneusement nettoyé afin d'éviter tout mélange de produits. Les produits de SKK et de SKS à base d'huile qui ne contiennent pas de particules solides peuvent être remplacés sans problème sur les appareils d'application. Ceux contenant des particules solides ont tendance à obstruer le dispositif d'application. La plupart des applicateurs appliquent les produits de SKK sur le rail, le système REBS peut par exemple pulvériser les produits de SKS sur le boudin de roue.

Les systèmes d'application embarqués disponibles sont ci-dessous:

- Elpa (Slovénie) ¹¹⁵
- Groeneveld-Beka (Allemagne) ¹¹⁶
- Bijur Delimont International (Etats-Unis) ¹¹⁷
- LB Foster (Etats-Unis) ¹¹⁸
- REBS Zentralschmiertechnik (Allemagne) ¹¹⁹
- SKF (and Lincoln automatic lubrication systems) ¹²⁰
- TriboTec (République Tcheque) ¹²¹

¹¹⁵ <https://elpa.si/on-board-devices/>, accessed on 31.10.2022

¹¹⁶ <https://www.groeneveld-beka.com/us/systems/automatic-lubrication-systems/spray-lubrication/fluilub/>, accessed on 31.10.2022

¹¹⁷ <https://www.bijurdelimon.com/automatic-lubrication/railway-lubrication.html>, accessed on 31.10.2022

¹¹⁸ <https://www.lbfoster.com/en/market-segments/rail-technologies/friction-management/products-and-solutions/freight-solutions/on-board-top-of-rail-friction-management-for-freight>, accessed on 31.10.2022

¹¹⁹ <https://www.rebs.de/en/solutions/railway-technology/wheel-flange-lubrication-wfl/>, accessed on 31.10.2022

¹²⁰ <https://www.skf.com/uk/industries/railways/products-and-services/lubrication-systems>, accessed on 31.10.2022

¹²¹ <https://railwaytechnology.tribotec.eu/>, accessed on 31.10.2022

7.1.2 Méthodes de mesure pour l'évaluation du SKK et de la SKS

Les tests en laboratoire sont largement utilisés pour déterminer l'efficacité des produits de SKK. Les propriétés souhaitées, décrites plus en détail dans le rapport suivant, sont les suivantes:

- Coefficient de frottement
- Caractéristique d'usure des produits de SKK et SKS
- Diffusion le long du rail
- Capacité de rétention

Une fois déterminés, ces tests comparatifs peuvent aider à trouver le produit et la méthode d'application les plus appropriés pour une bonne interaction roue/rail.

Dans le cadre des normes ÖNORM 8121-1 ¹²², ÖNORM 8121-3 ¹²³ et ÖNORM 8122 ¹²⁴, on entend par « essai » ou « chaîne d'essai » un essai expérimental visant des objectifs spécifiques. La chaîne d'essais comprend des tests mécaniques et dynamiques (mesures, expériences, etc.) à l'aide d'instruments de contrôle ou de mesure, notamment des tribomètres, de différents degrés d'abstraction (abstrait, non concret), ce que l'on appelle les catégories. L'importance des résultats de ces études peut dépendre fortement du degré d'abstraction (par exemple des simplifications et écarts par rapport aux conditions d'application pratique). Dans le but d'orienter les solutions tribologiques (essentiellement définies par la construction, la technologie, le choix des matériaux des composants soumis à des contraintes tribologiques), ces études sont généralement, mais pas seulement, effectuées dans des conditions plus ou moins abstraites pour des raisons économiques. Les "résultats" qui en découlent permettent de présélectionner ou de délimiter des variantes qui feront l'objet d'études plus approfondies dans des conditions moins abstraites. En ce qui concerne le degré d'abstraction, on distingue approximativement six catégories (cat. I à VI) de tests tribologiques, comme illustré par la Figure 34 ¹²⁵.

Catégorie I - Essai opérationnel (essai sur le terrain, essai pratique): L'essai complet se déroule dans des conditions d'exploitation (réelles). Il est très difficile de procéder à des analyses systématiques du comportement en service du système, car les sollicitations des composants du système tribologique peuvent varier pendant la durée de l'essai.

Catégorie II - Essai sur banc d'essai: le contact roue-rail original avec les superstructures originales (bogie, etc.) sont testés dans des conditions définies et reproductibles (par ex. banc d'essai, système d'essai). Des études paramétriques spécifiques peuvent être menées dans le cadre d'une plage de variation limitée du rapport charge/contrainte.

¹²² ÖNORM 8121-1:1987 05 01 – Tribotechnik – tribologische Prüfung – Kategorien

¹²³ ÖNORM 8121-3:1994 03 01 – Tribotechnik – tribologische Prüfung – Verschleiß-Meßgrößen

¹²⁴ ÖNORM 8122:2017 08 01 – Tribotechnik – Prüfung von tribologischen Kontakten – Prüfprinzipien und Übersicht

¹²⁵ AC2T research GmbH (2022) Tribological test chain related to wheel-rail contacts

Catégorie III - Essai d'assemblage ou de composants: Les assemblages ou les composants du système original sont soumis à des contraintes définies. Les conditions de sollicitation, les capacités de mesure et la pertinence pratique sont en partie perdues, car certains éléments du spectre de sollicitation sont supprimés, modifiés (par exemple la transmission des vibrations, les rapports de conductivité thermique, les rapports ressort/masse) ou sont indiqués comme remplacement du système original. L'acquisition ou la définition à partir des conditions du système original est donc difficile, voire impossible. Les études de durée de vie absolue sont difficilement réalisables dans ces conditions, mais une comparaison relative avec le comportement connu d'une unité d'origine est possible.

Catégorie IV - Essai des composants standards ou des composants modifiés à l'échelle: Pour simplifier la manipulation, on n'utilise pas des composants de taille originale, mais des pièces à l'échelle, fidèles à leur fonction. En génie mécanique, une réduction de taille s'avère généralement judicieuse. Les sollicitations se trouvent naturellement modifiées. Les différences par rapport au système original résident dans la dissipation de la chaleur, la tendance aux vibrations et l'apport d'énergie, ainsi que dans le "degré de couverture" ou le "rapport de contact" des surfaces de contact, l'usure et les conditions de fabrication des éprouvettes. C'est pourquoi seules des études paramétriques spécifiques qui mettent en évidence les influences sur le fonctionnement global du système peuvent être menées.

Catégorie V - Essai sur échantillons avec des composants simplifiés (éprouvettes semblables à des composants ou similaires aux conditions de charge): Pour les essais sur échantillon, seuls certains composants sont prélevés dans le groupe et généralement simplifiés (par exemple une dent ou un segment de dent d'une roue dentée). La surface de contact ou le rapport d'engrènement ne correspondent plus au système original. Des études paramétriques sont certes possibles, mais les sollicitations sont déjà relativement modifiées.

Catégorie VI - Essai d'éprouvettes simples: lors de telles études, les exigences pratiques, généralement complexes, sont décomposées en processus élémentaires de base (par exemple forme du mouvement, évolution de la force) pour les études de base, afin de pouvoir simuler les processus dans la zone de contact du composants réels. Lors de l'essai avec des éprouvettes simples, les paramètres sont clairs et peuvent facilement être maintenus constants, c'est-à-dire contrôlés.

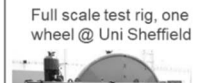
Category	Measuring and testing technology		Test parameters	Results	System, Assembly, Model	
I	Operational test and tests similar to operational tests	Operational test	• Real axis load • Real acceleration and braking processes • Real dynamic driving loads • ...	• Static or dynamic strength tests • Running tests • Coefficient of friction • Efficiency measurement • ...		Mechanical measuring group @ ÖBB
II		Test bench experiment	• Normal force • Transverse force • Angle of attack (for curves) • Defined slip • Real wheels and rail • ...	• Wheel, rail wear • Coefficient of friction • ...		Full scale test rig, wheel set @ RTRI Tokio
III	Original system structure with simplified loads	Aggregate experiment	• Normal force • Transverse force • Angle of attack (for curves) • Defined slip • small modification of the samples	• Rad-, Schienenverschleiß • Coefficient of friction • ...		Full scale test rig, one wheel @ Uni Sheffield
IV		Component experiment	• Normal force • Transverse force • Angle of attack (for curves) • Defined slip • Samples taken from real parts • ...	• Sample wear • Crack initiation • Coefficient of friction • ...		Wheel rail test rig @ TU Wien
V	Model structure and simple loads	Sample experiment	• Normal force • Speed • Defined slip • Samples taken from real parts • ...	• Sample wear • Crack initiation • Coefficient of friction • ...		Sample, component, model test rig, rail, wheel piece @ AC2T
VI		Model experiment	• Normal force • Speed • Defined slip • Sample from real part, counter sample from harder materials • ...	• Sample wear • Crack initiation • Coefficient of friction • ...		Two disc test rig @ AC2T
						Pin on disc test rig @ AC2T

Figure 34 : Chaîne de contrôle tribologique pour le contact roue/rail *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

La reproductibilité des résultats augmente avec la catégorie, car les tolérances de fabrication et les erreurs de montage peuvent être minimisées. Les rapports de surface de contact peuvent être très différents du système d'origine. Des conditions défavorables d'évacuation de la chaleur, des répartitions différentes de la pression superficielle et des conditions d'usure modifiées peuvent entraîner des réactions tribologiques mécaniques ou chimiques nettement différentes et provoquer des déformations considérables dans l'interprétation des résultats. La charge de travail pour vérifier l'application au cas d'exploitation augmente considérablement avec la croissance des catégories, car des méthodes d'examen et des analyses supplémentaires doivent être réalisées.

Le choix de la méthode d'essai (catégorie) est un équilibre entre de nombreux facteurs tels que le coût, la complexité de mise en œuvre et le contrôle. En règle générale, les bancs d'essai simples sont en mesure de fournir rapidement et à moindre coût les résultats de nombreux échantillons ainsi que de nombreuses variations de paramètres par rapport à des méthodes plus complexes, au détriment d'une représentation précise du système à étudier.

Une augmentation de la complexité de la méthodologie d'essai pour obtenir des conditions d'essai représentatives entraîne non seulement une augmentation des coûts et du temps nécessaire, mais aussi une perte progressive de contrôle sur les différents paramètres étudiés, ce qui peut là aussi introduire une source d'erreur dans l'étude.

Différents types de bancs d'essai de laboratoire sont régulièrement utilisés pour tester les produits de SKK et de SKS, chacun ayant ses avantages et ses limites spécifiques, voir. Les bancs d'essai les plus complexes sont ceux de taille réelle, qui peuvent reproduire des

conditions de contact rotatives, unidirectionnelles, linéaires ou oscillantes ^{21,126,127}. Les deux ont des tailles de contact représentatives et sont utiles pour les travaux de mise à l'échelle et la génération de données pour la modélisation. Cependant, ces bancs d'essai sont coûteux et longs à mettre en place, et peu d'installations sont disponibles, ce qui ne les rend pas adaptés à un protocole d'essai standardisé. Lors de l'essai de différents produits de SKK et de SKS, il peut également être difficile de nettoyer complètement le banc d'essai lors du passage d'un essai à l'autre, ce qui entraîne des problèmes de répétabilité.

Les bancs d'essai de torsion haute pression (HPT) ont également une taille de contact réaliste. Le contact HPT est constitué de zones de glissement partiel à mesure que la rotation augmente, ce qui permet d'établir une courbe de traction. L'avantage d'une structure HPT est que les échantillons sont plats, ce qui permet d'appliquer des troisièmes corps supplémentaires dans le contact ¹²⁸. Cependant, très peu de ces dispositifs d'essai sont disponibles.

Le banc d'essai d'usure Pin-on-Disk est largement inadapté en raison du très petit contact glissant, car le produit peut être expulsé du contact et il est difficile d'appliquer la "bonne" quantité de produit. Certains travaux, dans lesquels la tige avait un contact plus grand et le "glissement" était ajusté de manière à reproduire la composante de glissement dans des conditions de contact partiellement glissant, ont été réalisés avec succès. ¹²⁹ Toutefois, pour un test standardisé, l'ajout d'une composante roulante serait préférable.

Les mini-machines de traction (MTM) ¹³⁰ permettent de réaliser des essais à grande vitesse avec un contact roulant ou glissant variant sur une large plage. Cependant, le contact sphère/plan entraîne toujours l'expulsion des produits de SKK et de SKS hors du contact, ce qui rend difficile la détermination de la quantité réelle de produit. Ce banc d'essai peut être utilisé pour tester des lubrifiants homogènes à base d'huile comme le SKS, mais les particules solides, si elles sont présentes, peuvent être expulsées du contact.

Le banc d'essai à double disques est régulièrement utilisé pour évaluer le comportement des produits de SKK ^{24,131}, et des produits de SKS ^{17,98}. Les deux disques cylindriques assurent un contact linéaire. Bien qu'il soit toujours possible que le produit puisse s'écouler en cas d'application de grandes quantités, le contact linéaire plus large et le mouvement de roulement du banc d'essai à deux disques rendent le produit plus susceptible de rester en contact pendant le test. Ceci est important pour l'évaluation de la consommation de produit.

¹²⁶ L. Buckley-Johnstone, M. Harmon, R. Lewis, C. Hardwick, and R. Stock (2019) "A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 233, no. 2, pp. 201–210.

¹²⁷ P. Boyacioglu, A. Bevan, P. Allen, B. Bryce, and S. Foulkes (2021) "Wheel wear performance assessment and model validation using Harold full scale test rig," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, pp. 1–12.

¹²⁸ M. Evans, W. A. Skipper, L. Buckley-Johnstone, A. Meierhofer, K. Six, and R. Lewis (2021) "The development of a high pressure torsion test methodology for simulating wheel/rail contacts," *Tribol. Int.*, vol. 156, no. November 2020, p. 106842.

¹²⁹ S. R. Lewis, R. Lewis, U. Olofsson, D. T. Eadie, J. Cotter, and X. Lu (2012) "Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers: Pin-on-disk study," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 227, no. 2, pp. 115–127.

¹³⁰ R. Galas, D. Kvarda, M. Omasta, I. Krupka, and M. Hartl (2018) "The role of constituents contained in water – based friction modifiers for top – of – rail application," *Tribol. Int.*, vol. 117, no. April 2017, pp. 87–97.

¹³¹ D. V. Gutsulyak, L. J. E. Stanlake, and H. Qi, "Twin disc evaluation of third body materials in the wheel/rail interface," *Tribol. - Mater. Surfaces Interfaces*, vol. 15, no. 2, pp. 115–126, 2021.

Type of tests	Capabilities	Pros	Cons
Pin-on-disc ¹³²	Friction measurements	Higher speed than twin disc	Very small (circular) contact
	Load, speed		Solid particles pushed aside rather than entrained
			No creep control
Mini-Traction-machine Fehler! Textmarken nicht definiert., ¹³³	Traction measurements	Higher speed than twin disc	Very small (circular) contact
	Load, speed, creep	Creep curves can be produced	Solid particles pushed aside rather than entrained
High pressure torsion Fehler! Textmarke nicht definiert., ¹³⁴	Traction measurements	Realistic contact size and 3 rd body application	Very few facilities available
Twin disc Fehler! Textmarke nicht definiert., ¹³⁵	Traction measurements	Better particle entrainment	Small contact (larger with larger test rigs)
	Load, speed, creep	Larger contact than pin-on disc/MTM	Slow speed
		Specimens often made from wheel/rail steel	
Scaled wheel ¹³⁶	Visual	Realistic contact shape	Smaller contact than real wheel-rail
		Simple test methods	No way of measuring friction
			Unrealistic load/speed
			No creep control
Full scale ^{17,135}	Traction measurements	Realistic contact shape	Slow
	Load, speed, creep	Realistic contact load	

Tableau 5 : Méthodes de test en laboratoire

¹³² J. Sundh, U. Olofsson, and K. Sundvall, "Seizure and wear rate testing of wheel–rail contacts under lubricated conditions using pin-on-disc methodology," *Wear*, vol. 265, no. 9–10, pp. 1425–1430, Oct. 2008.

¹³³ R. Galas, M. Omasta, M. Klapka, S. Kaewunruen, I. Krupka, and M. Hartl, "Case study: The influence of oil-based friction modifier quantity on tram braking distance and noise," *Tribol. Ind.*, vol. 39, no. 2, pp. 198–206, 2017.

¹³⁴ M. Evans et al., "Top-of-Rail Friction Modifier Performance Assessment: High Pressure Torsion Testing; Creep Force Modelling and Field Validation," to be submitted.

¹³⁵ Trausmuth, A., Lebel, A., Ronai, B., Dörr, N. (November 2022) „SafeRail – Beurteilungsverfahren Schienenkopfkonditionierungsmittel, Ergebnisbericht“

¹³⁶ M. Harmon and R. Lewis, "New laboratory methodologies to analyse the top of rail friction modifier performance across different test scales," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 235, no. 2, pp. 191–200, 2021.

Des études ont commencé à s'intéresser aux écarts entre les différentes échelles utilisées pour évaluer les conditions au contact roue/rail lors des essais. Une petite étude a montré qu'il existe une corrélation raisonnable entre les résultats obtenus à petite échelle et ceux obtenus à l'échelle réelle ^{137,138}.

Le banc d'essai de torsion haute pression a été utilisé pour paramétrer le modèle ECF utilisé pour des prévisions précises à grande échelle ¹²⁸.

La Figure 35 provient d'un travail dans lequel deux bancs d'essai différents (à double disques et à échelle réelle) ont été comparés ⁷⁷. Les travaux montrent qu'une approche Ty peut être utilisée pour comparer différents bancs d'essai.

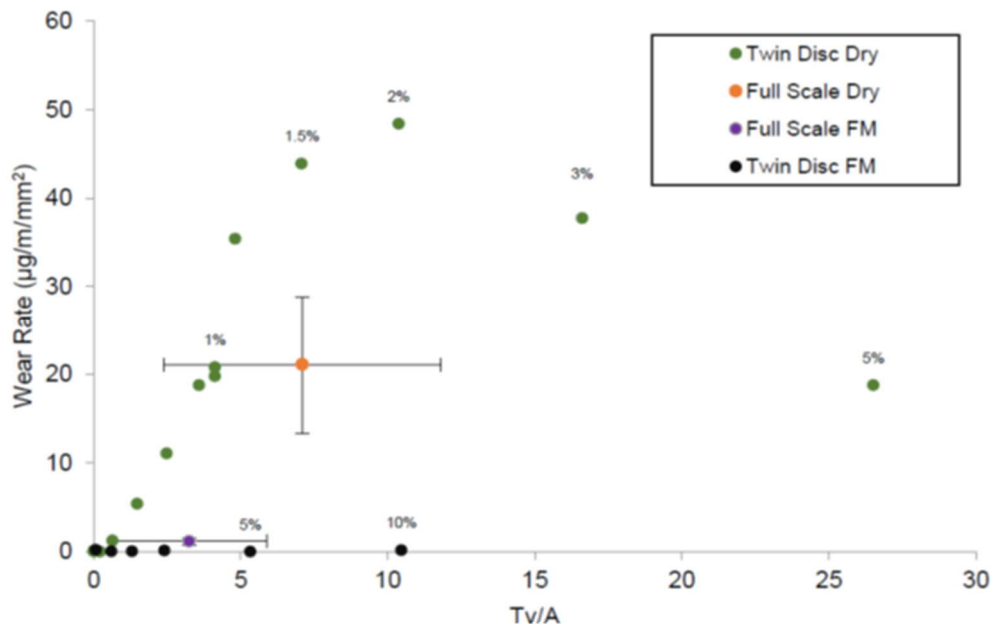


Figure 35 : Comparaison des taux d'usure Ty/A des essais sur banc double disques et échelle réelle en conditions sèches et avec SKK ⁷⁷

Il a été démontré que les essais à échelle réelle et les essais à double disques ont le même comportement tribologique pour différentes graisses. Ceci montre, même si les valeurs exactes sont différentes, que les essais sur banc à double disques fournissent des données qualitatives exploitables. D'autres études ont également constaté que, bien que les mêmes tendances puissent être observées, les valeurs exactes peuvent varier considérablement entre les essais sur banc à échelle réelle et les essais sur le terrain ¹³⁹, cela pourrait être dû principalement au manque de contrôle des paramètres de la surface du rail lors des essais sur le terrain. Par exemple, lors d'un essai ²¹, il a été constaté que le SKK utilisé se dépose sur le rail de test, ce qui n'a pas été détecté lors des observations sur le terrain. Cela montre la différence entre la réalisation d'un essai sur banc à échelle réelle dans des conditions de contact et d'environnement contrôlé par rapport aux essais sur le terrain où ses paramètres sont incertains.

¹³⁷ R. Lewis and U. Olofsson, "Mapping rail wear regimes and transitions," *Wear*, vol. 257, no. 7–8, pp. 721–729, 2004.

¹³⁸ M. Chestney, N. Dadkah, and D. T. Eadie, "The effect of top of rail friction control on a european passenger system: the Heathrow express experience," *Proc. 8th Int. Contact Mech. wear rail/wheel Syst. Conf.*, 2009.

¹³⁹ R. Stock, D. Eadie, and K. Oldknow, "Rail grade selection and friction management: a combined approach for optimising rail–wheel contact," *Ironmak. Steelmak.*, vol. 40, no. 2, pp. 108–114, Feb. 2013.

7.1.3 Facteurs d'influence sur l'effet du SKK et de la SKS

L'efficacité des lubrifiants en général, et ceux de SKK et de SKS en particulier, dépend d'un certain nombre de facteurs déterminant pour le choix du SKK ou de la SKS sur le terrain. La SKS est influencée par la quantité appliquée et la fréquence d'application. Actuellement, il convient d'appliquer le SKK ou la SKS en fonction des besoins, parce que l'on ne peut pas supposer que le SKK et la SKS ont un effet lubrifiant constant et durable.

Certains de ces facteurs d'influence sont l'objet d'études, comme l'eau/l'humidité ou la température. Voir le point 7.1.4, ci-dessous.

7.1.4 Propagation ou portée des produits de SKK

7.1.4.1 Propagation

La propagation, ou portée, est définie comme la distance entre le point d'application et le point où les avantages tribologiques du produit de SKK ne sont plus démontrables ¹⁴⁰.

Une étude a utilisé un applicateur fixe en voie pour le SKK sur un ligne de fret ferroviaire suédoise ¹⁴¹. Des échantillons ont été prélevés à l'aide de cotons-tiges immergés dans un solvant à plusieurs endroits sur la ligne d'essai. Une analyse élémentaire EDX a été effectuée pour vérifier la présence ou non de produit de SKK et déterminer l'étendue de la propagation (voir Tableau 6) ¹⁴². Les deux produits testés se situaient entre 70m et 450m dans la zone de contact. Le produit a été transporté jusqu'à 3km en adhérent en dehors de la bande de contact de la roue avec le rail. Cependant, sur la voie d'essai, le produit se trouvant en dehors de la bande de contact roue/rail n'est pas entré dans le contact, donc aucun avantage de produit n'a pu être relevé. Il peut potentiellement entrer dans le contact en courbe.

Dans un autre travail, un colorant fluorescent induit par laser a été mélangé au produit de SKK ¹⁴⁰. Il a été détecté sur le rail en alignement jusqu'à 200m (distance par rapport à l'applicateur fixe en voie). Avec des voies en courbes, il a été détecté jusqu'à 2km.

Presque tous les travaux ont été réalisés avec des applicateurs fixe en voie (au sol) et non embarqués. De nombreuses études portent sur le produit appliqué directement sur le rail. Mais les produits appliqués sur la roue peuvent également être intéressants, car ils peuvent entrer en contact lors du franchissement d'une courbe ¹⁴³.

¹⁴⁰ H. Rahmani, D. Gutsulyak, L. Stanlake, B. Stoeber, and S. Green, "Carrydown of liquid friction modifier," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, p. 095440972210762, 2022.

¹⁴¹ S. A. Khan, J. Lundberg, and C. Stenström, "Carry distance of top-of-rail friction modifiers," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 232, no. 10, pp. 2418–2430, 2018.

¹⁴² J. Lundberg, "Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions," Wear, vol. 324–325, pp. 109–117, 2014.

¹⁴³ Z. S. Lee, M. Harmon, B. White, G. Trummer, K. Six, and R. Lewis, "Studying the Transfer Mechanisms of Top-of-Rail Products in a Wheel/Rail Interaction," To be Submitt., 2022.

Source	Position of sample collection	Carry distance (m)	
		FM-A	FM-B
Manufacturer's claim		3200–6400	5000
When supplied continuously by the stationary equipment	Top of rail	70	450
When applied once manually	Top of rail	65	320
	Wheel's running surface	>3000	>3000
	Wheel's contact band	100	340

Tableau 6 : Propriétés de propagation de deux types de produits de SKK

7.1.4.2 Rémanence ou capacité de rétention

La rémanence ou la capacité de rétention est une mesure du temps (ou du nombre de passages de roues ou de mouvement) pendant lequel le lubrifiant conserve son pouvoir lubrifiant. Par exemple, une graisse qui fonctionne dans des conditions de lubrification limitées ne peut séparer que partiellement les surfaces de la roue et du rail. Les bosses microscopiques individuelles sur chaque surface, la rugosité, sont reliées entre elles. La chaleur des frottements qui en résultent peut conduire à une température de rupture (plusieurs centaines de °C). Les températures de 600 à 800 °C sont typiques des contacts roue/rail. Le lubrifiant est consommé dans ces points chauds microscopiques, il est « brûlé ». Une fois que tout le lubrifiant est consommé, le coefficient de frottement augmente rapidement, passant d'un coefficient de frottement « de lubrification » de 0,05 à 0,1 à un coefficient de frottement de lubrification sèche d'environ 0,6.

La rémanence est une fonction qui définit la charge et le glissement. Les tests en laboratoire montrent que la capacité de rétention diminue avec l'augmentation de la charge et du glissement (angle d'attaque). Dans la pratique, cela signifie que les trains chargés consomment beaucoup plus de lubrifiant (« brûlé ») que les trains vides. De même, en courbe de petit rayon la consommation est supérieure qu'en courbe de grand rayon ¹⁴⁴. Cela laisse à penser que la voie métrique consommerait ou brûlerait le lubrifiant plus rapidement en raison de ses conditions de contact plus « extrême » qu'en voie normale et indique où des recherches futures devraient être menées.

La capacité de rétention d'un produit de SKK avec deux quantités différentes et deux valeurs de rugosité différentes (lisse et rugueuse) a été évaluée avec un banc d'essai à double disques, les résultats illustrés en Figure 36 ¹⁷. On constate que la surface la plus rugueuse consomme plus de produit de SKS. Cela peut être attribué au transport du produit SKS dans les rugosités de surface. C'est un facteur clé pour expliquer les différences de résultats entre les essais en laboratoire et sur le terrain.

¹⁴⁴ H. Tournay, "Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues," Int. heavy Haul Assoc., p. 484, 2001.

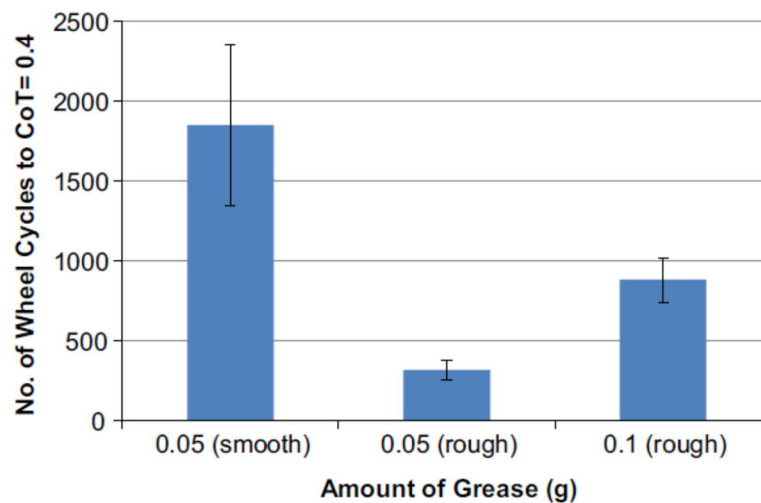


Figure 36 : Capacité de rétention en fonction de la quantité de graisse ¹⁷

7.1.4.3 Consommation d'énergie

Les études sur la consommation d'énergie des produits de SKK se sont largement concentrées sur le transport de marchandises en Amérique du Nord, où les trains lourds et les longues distances peuvent entraîner de grandes économies de carburant.

Torunay et al. dans „Guidelines to best practices to heavy haul railway operations, 2001“ parlent des économies d'énergie après l'utilisation de la lubrification fixe en voie (bien que les citations originales proviennent de conférences plus anciennes et soient donc difficiles à trouver).

DeKoker ¹⁴⁵ a fait des tests à Spoornet en Afrique du Sud qui ont montré que 51% d'énergie en moins est nécessaire pour franchir une courbe de rayon 8,7 degré soit 200m. De plus, les trains de la Richards Bay Coal Line consomment 28% d'énergie en moins et leur durée de vie a été multipliée par 6.

Reiff⁷³ constate une réduction de la consommation de carburant à hauteur de 30% avec une lubrification généreuse par rapport aux conditions sèches (non lubrifiées). L'Association of American Railroads (AAR) a développé une méthode pour mesurer la résistance d'un train sur des voies sinueuses. Allen et Reiff ont également fait état d'importantes économies de carburant sur les lignes sinueuses (Tableau 7 et Tableau 8).

Rucinski ¹⁴⁶, de Queensland Rail, a rapporté des économies d'énergie de 4,63% pour les trains chargés et de 1,4% pour les trains vides.

¹⁴⁵ J.DeKoker, “Rail and Wheel Flange Lubrication,” South African Perm. W. Inst., 1993.

¹⁴⁶ J.Rucinski and J.Powell, “Assessment of Wheel and Rail Lubrication Strategies at Queensland Rail.”

<u>FAST Section</u>	<u>Energy Savings due to Lubrication (%)</u>
Tangent	30
Curved	
Three degrees	36
Four degrees	39
Five degrees	51

Tableau 7 : Économies d'énergie dans les courbes⁷²

System	Fuel Efficiency (gal/MGT ^a)	Savings over Dry (%)
Dry track	6,000	–
Lubricated by wayside lubricator	4,100	32
Lubricator car (simulated for one train in four equipped); graphite grease	4,800	20
Hyrailer System (operated once every 30 to 35 trains)	5,500	8
On-board locomotive system (two locomotives equipped, modified for American use)	5,140	14

Note: Data for 80-car train, 45 mph, four locomotives on 4.8-mi loop, 56 percent curved track of 5, 4, and 3-degree curves. Baseline data: overlubricated by wayside systems; one trackside lubricator every 2.5 mi.

^a Million gross tons.

Tableau 8 : Économies d'énergie avec différentes stratégies de lubrification ⁷²

7.1.4.4 Usure et fatigue des contacts roulants

L'usure d'un matériau dépend du système tribologique dans son ensemble. Ce système comprend non seulement les propriétés des matériaux et les contraintes auxquelles le contact est soumis, mais aussi d'autres facteurs tels que les conditions environnementales et la contamination du contact. L'usure au contact roue/rail peut résulter d'un certain nombre de mécanismes différents, dont les principaux sont les suivants :

Le contact avec un système ouvert signifie que l'oxygène est abondant, ce qui provoque une usure liée à l'oxydation. La contamination par des particules dures et solides comme le sable peut entraîner une usure abrasive. L'usure thermique est causée par l'augmentation de la température causée par le frottement dans le contact. Cela peut augmenter l'usure des autres mécanismes en réduisant la dureté.

Il est possible de créer des cartes d'usure pour un matériau, ce qui facilite l'analyse des données d'usure. Les cartes sont généralement définies à l'aide du glissement ou de la pression au contact. Elles sont principalement utilisées pour définir d'autres zones d'essai, car les données utilisées pour les créer sont généralement limitées. La Figure 37 montre une carte d'usure avec des conditions de contact typiques superposées. Elle montre également que le contact entre le flanc du champignon de rail et le boudin de la roue entraîne une usure plus importante, ce qui correspond aux observations faites sur le terrain.

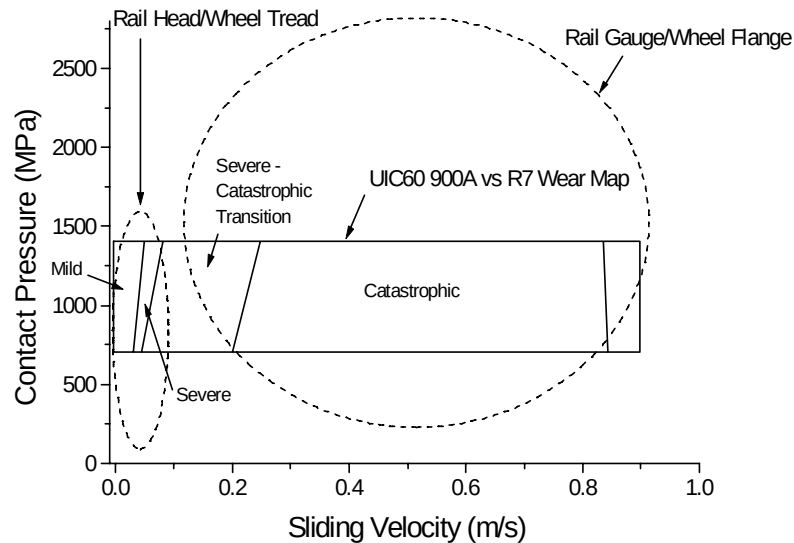


Figure 37 : Diagramme d'usure avec indication des rapports de contact roue/rail ⁷¹

La fatigue par contact de roulement (Rolling Contact Fatigue, RCF) est l'accumulation de dommages de fatigue causée par de nombreux passages de roues qui entraînent des fissures sur les roues et les rails. Chaque roue traversant un point spécifique sur la voie exerce un cycle de charge. Le RCF entraîne des exigences de maintenance (rectification des rails, essais non destructifs réguliers) qui sont coûteuses mais évitent des problèmes de sécurité car les fissures négligées peuvent se développer rapidement et entraîner des ruptures de rails.

Les produits de SKK visent principalement à réduire le frottement et l'usure, ce qui réduit les besoins de maintenance et augmente la sécurité. Les produits de SKK réalisent cette réduction en améliorant l'orientation dans les courbes et en réduisant les forces latérales. Une étude portant sur un système roue/rail à l'échelle a montré que les rails équipés de SKK ne présentent pas d'usure supplémentaire après une légère augmentation initiale de l'usure par rapport aux tests à sec, où l'usure s'est poursuivie tout au long de l'essai. La même étude a montré que les rails conditionnés avec les produits de SKK ne présentaient pas de fissures après les tests, tandis que les rails secs présentaient des fissures visibles à l'œil nu à mi-parcours. Les mêmes conclusions ont été tirées lors d'essais sur le terrain sur une ligne de fret en Chine ¹⁴⁷ et en Amérique ¹⁴⁸.

Des tests sur le banc d'essai à double disques ont montré que la rémanence diminue avec l'augmentation de la rugosité de surface et l'usure augmente avec la diminution de la rémanence ¹⁷. On suppose que ces relations sont dues à la pressurisation du lubrifiant liquide dans des fissures, de sorte que les produits SKK après « séchage » ne devraient plus avoir les mêmes liens, bien qu'il n'existe actuellement aucune littérature traitant de ce point pour le SKK.

¹⁴⁷ X. Lu et al., "Friction management on a Chinese heavy haul coal line," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, vol. 226, no. 0, pp. 630–640, 2012.

¹⁴⁸ D. Elvidge, R. Stock, C. Hardwick, and K. Oldknow "The Effect of Freight Train Mounted TOR-FM on Wheel Life and Defects," in Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, 2016, pp. 8–12.

Une étude a montré qu'en utilisant un rail de qualité supérieure^{39,147} et le SKK, le RCF et l'usure sont encore plus réduits. L'optimisation de ces deux paramètres peut entraîner des taux d'usure très bas et un RCF très faible.

7.1.4.5 Formation d'usure ondulatoire

La formation d'usure ondulatoire peut avoir de nombreuses causes, mais dépend à la fois des conditions dynamiques de la voie et du véhicule et des conditions d'exploitation. Les forces tangentielles élevées et le glissement sont généralement considérés comme des facteurs contributifs importants, ainsi que les fréquences de résonance locale²³.

Un outil de mesure de la géométrie des rails sur le terrain est composé d'un gabarit qui mesure le champignon du rail dans les directions verticale et latérale à l'aide de deux capteurs situés dans le boîtier et entraînés par un moteur pas à pas. Le profil longitudinal est déterminé, et la transformée de Fourier discrète (FFT) du signal a été calculée pour obtenir la densité du spectre de l'usure ondulatoire correspondante de chaque mesure. Une comparaison du taux de croissance de l'usure ondulatoire entre les systèmes avec et sans produit de SKK est présentée à la Figure 38.

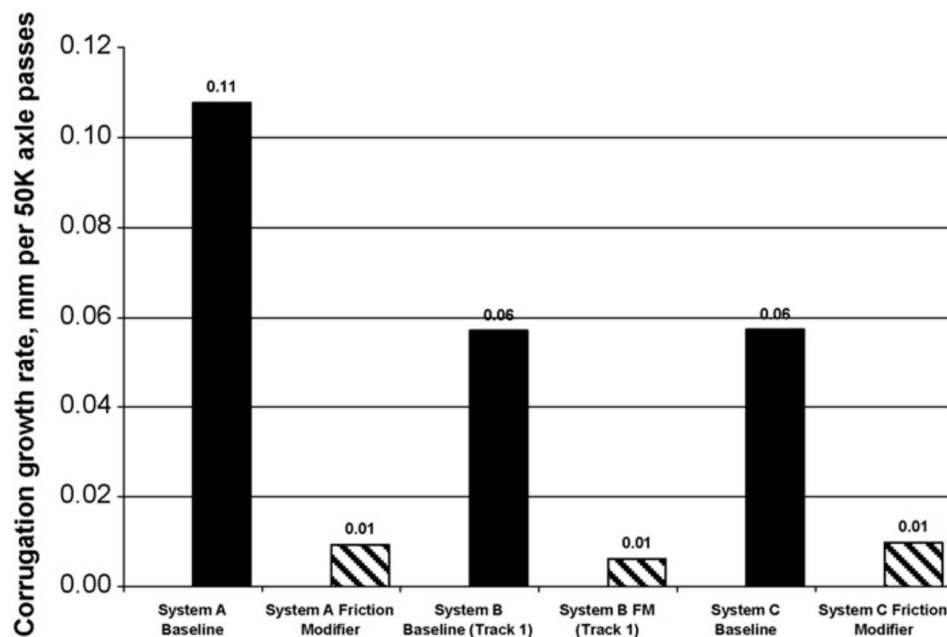


Figure 38 : Comparaison des taux de croissance des usures ondulatoires entre différents systèmes avec et sans conditionnement Fehler! Textmarke nicht definiert.

7.1.4.6 Réduction du bruit

Les vibrations et le bruit provenant des usures ondulatoires du rail et des roues, réduisent la durée de vie des composants du véhicule et de la voie et causent l'inconfort des passagers et des riverains qui vivent à proximité des voies. Les vibrations de glissement (stick-slip) provoquent du bruit et sont impliquées dans un certain nombre de mécanismes de formation et d'apparition d'usure ondulatoire, en particulier dans les systèmes qui présentent un niveau élevé de frottement et donc des caractéristiques de frottement négatif.

Une caractéristique de frottement positif élevée (HPF, High positive friction), obtenue grâce à l'utilisation de produits de SKK, a prouvé sa capacité à transformer la caractéristique de frottement négatif à l'interface roue/rail en une caractéristique de frottement positif et ainsi à réduire et contrôler le frottement à un niveau compatible avec les exigences de freinage et de traction du système. Selon les caractéristiques du système concerné, le HPF peut toujours réduire le bruit d'au moins 3-4 dB et dans certains cas jusqu'à 25 dB^{23,143}.

Une évaluation de la réduction du bruit d'un produit à base de pétrole utilisé par un réseau de tramway est présentée à la Figure 39. D'autres études sur la réduction du bruit sont présentées dans^{149,150}.

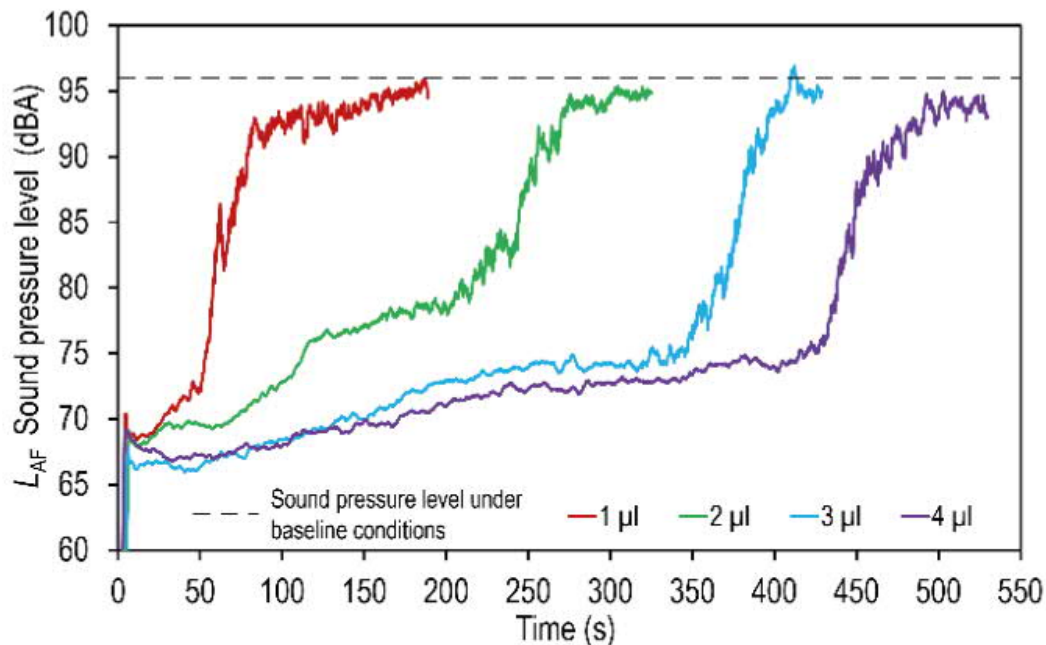


Figure 39 : Variation du niveau sonore pour différentes quantités de produits SKK utilisées¹³³

7.1.4.7 Angle d'attaque

L'angle d'attaque (angle of attack, AOA), comme le montre la Figure 40¹⁵¹, est un paramètre important qui affecte le frottement et l'usure, en particulier dans les environnements secs (non lubrifiés)^{134,152}. Les résultats des essais à double disques d'après¹⁵² montrent qu'une augmentation de l'AOA augmente la force de frottement et la consommation de lubrifiant, comme le montre la Figure 41. La raison est qu'avec un AOA plus élevé, des forces de

¹⁴⁹ D. T. Eadie, M. Santoro, and W. Powell, "Local control of noise and vibration with KELTRACK™ friction modifier and Protector® trackside application: an integrated solution," J. Sound Vib., vol. 267, no. 3, pp. 761–772, Oct. 2003.

¹⁵⁰ D. T. Eadie, M. Santoro, and J. Kalousek, "Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves," Wear, vol. 258, no. 7–8, pp. 1148–1155, Mar. 2005.

¹⁵¹ K. Oldknow, D. T. Eadie, and R. Stock, "The influence of precipitation and friction control agents on forces at the wheel/rail interface in heavy haul railways," J. Rail Rapid Transit, vol. 227, no. 1, pp. 86–93, 2012.

¹⁵² "USDOE TOP-OF-RAIL LUBRICANT PROJECT Final Report to U.S. Department of Energy Office of Transportation Technology Office of Heavy Vehicles Technologies Argonne National Laboratory Mohumad F. Alzoubi, George R. Fenske, Robert A. Erck Energy Technol," 2000.

frottement plus élevées se produisent dans la direction latérale et le taux de cisaillement du lubrifiant augmente, ce qui signifie que le lubrifiant est consommé plus rapidement qu'avec des angles plus petits.

D'autres études impliquant un changement de l'angle d'attaque ont été réalisées^{6,153}.

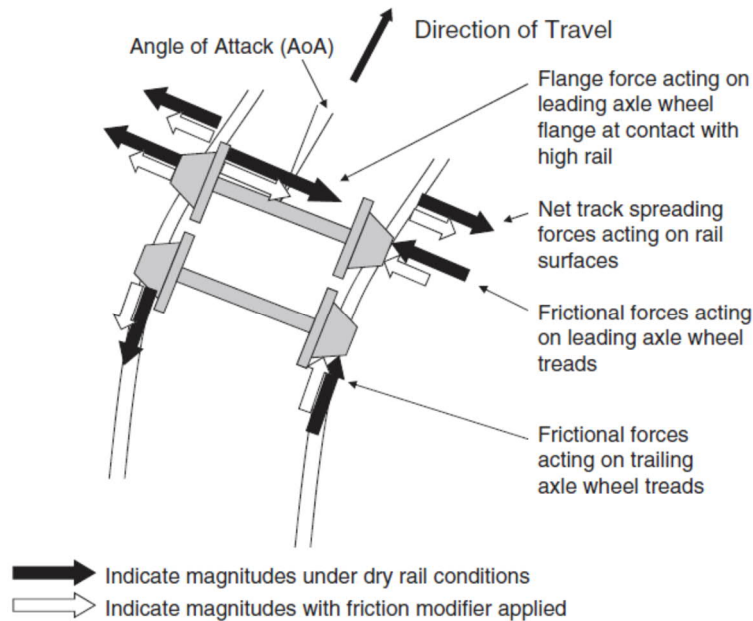


Figure 40 : Schéma représentant l'influence des frottements SKK sur les forces latérales dans les courbes *Fehler! Textmarke nicht definiert.*

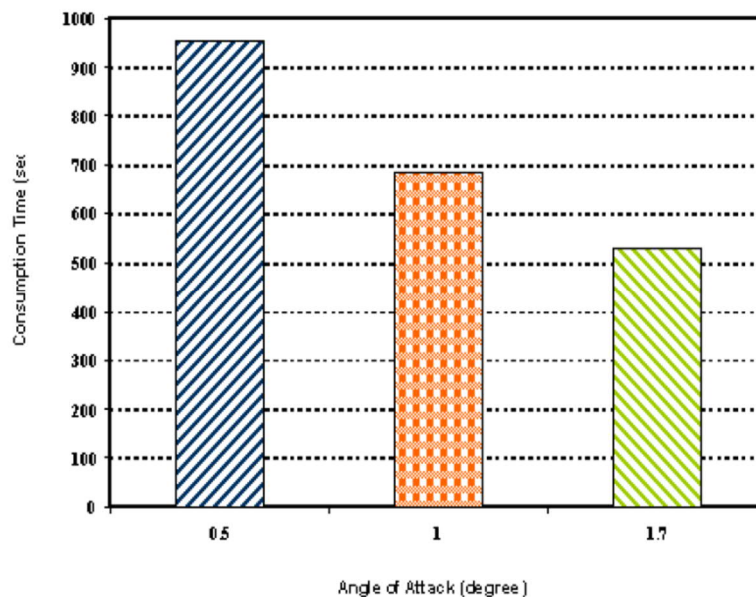


Figure 41 : Effet de l'angle d'attaque sur le temps de consommation du SKK pour une quantité de 5 μ L de SKK sur un banc d'essai à double disques¹⁵²

¹⁵³ S. Kumar, M. F. Alzoubi, and N. a. Allsayyed, "Wheel/rail adhesion wear investigation using a quarter scale laboratory testing facility," Proc. 1996 ASME/IEEE Jt. Railr. Conf., pp. 247–254.

7.1.4.8 Glissement

Les effets de différentes valeurs de glissement ont été étudiés sur un banc d'essai à double disques pour les produits de SKK¹³¹ et de SKS¹⁷. A chaque essai, le produit a été consommé plus rapidement lorsque le taux de glissement augmente. Les caractéristiques de frottement positifs conçues pour réduire les usures ondulatoires et le bruit lors de l'utilisation de certains produits de SKK sur la surface de roulement du rail entraîne une augmentation du coefficient de traction pour des valeurs de glissement élevées, tandis que d'autres ont des caractéristiques neutres, voir Figure 42.

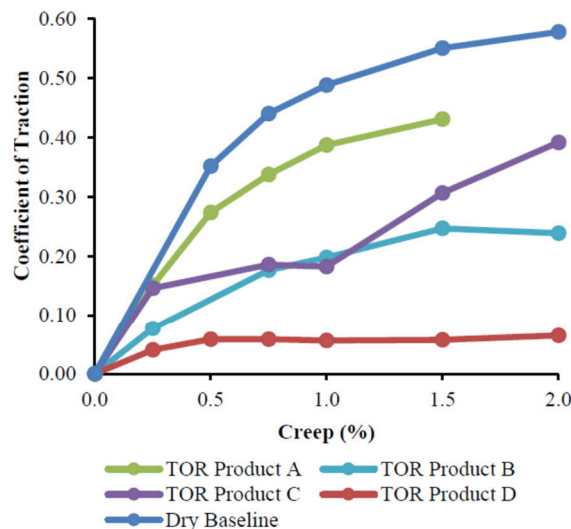


Figure 42 : Courbes de traction de différents produits de SKK et dans des conditions sèches à l'aide d'un banc d'essai à doubles disques¹³¹

7.1.4.9 Environnement

Il est important de comprendre les effets de la couche du troisième corps sur les performances de SKK, car le rail sera très rarement propre sur le terrain. Une étude sur l'effet d'une couche d'oxyde produite artificiellement à l'aide d'un banc d'essai Pin-on-Disk et d'un banc d'essai à double disques a conclu qu'un produit de SKK restait efficace même en présence d'un grand nombre d'impuretés d'oxyde sur le champignon du rail²⁷. La même étude s'est également penchée sur l'influence de la graisse sur les performances de SKK. Il a été constaté que la graisse affecte le SKK en perturbant l'adhérence du film à la surface et en réduisant le coefficient de frottement. Cependant, il s'est avéré que le coefficient de frottement augmente encore en présence d'un SKK, ce qui montre que le SKK peut faire face à une légère contamination par la graisse. Cette étude était la seule consacrée à l'interaction de SKK avec d'autres substances.

Une autre étude, utilisant un banc d'essai d'usure Pin-on-Disk, s'est intéressée aux effets de la température, de l'humidité et de la pollution par les oxydes, sur les performances des produits SKK¹²⁹. Il s'est avéré que l'humidité de l'air avait une influence significative sur la rémanence et le coefficient de frottement du produit. Il est également apparu que la teneur en oxyde du SKK faisait également la différence.

Comme le souligne la section 7.1.2, le banc d'essai d'usure Pin-on-Disk n'est pas idéal pour l'étude des produits de SKK en raison de la géométrie de contact différente. Des études complémentaires sur l'influence de l'environnement, comme la température, l'humidité, le mélange et notamment l'abrasion par le troisième corps seraient recommandées, en utilisant une méthode d'essai plus appropriée.

Dans une étude récemment achevée, Trausmuth et al.¹³⁵ ont mis au point un processus d'évaluation des produits de SKK en plusieurs étapes, qui tient compte de la performance environnementale, du non-shuntage (non-pontage) des joints isolants et du coefficient de frottement, en tant que paramètres de performance essentiels pour le respect des distances de freinage. Les courbes de coefficient de frottement des produits de SKK sélectionnés ont été déterminées, entre autres, à l'aide d'un banc d'essai à double disques dans différentes conditions environnementales:

- Quantité de SKK
- Pression
- Glissement
- Température
- Présence d'eau

Les résultats ont montré des tendances claires en laboratoire, voir Figure 43:

- Plus la quantité de SKK est élevée, plus le coefficient de frottement initial est faible et plus l'effet de SKK est long
- Plus le glissement est élevé, plus l'effet de SKK est court
- Plus la température est basse, plus le coefficient de frottement est faible et plus l'action de SKK est longue en raison du changement des propriétés rhéologiques (Le SKK devient plus visqueux)
- Les conditions humides entraînent des coefficients de frottement très faibles qui sont maintenus pendant une longue période
- Une pression élevée entraîne une consommation plus rapide de SKK, donc une augmentation plus rapide du coefficient de frottement

Les méthodes de laboratoire basée sur des essais à double disques (catégorie V) ont d'abord été vérifiées avec un banc d'essai à échelle réelle (catégorie III), puis ont été corrélées dans le cadre d'essais sur le terrain (catégorie I) en été et en hiver. Les tendances observées sur le banc d'essai à double disques ont été confirmées par les résultats obtenus sur le banc d'essai à échelle réelle et sur le terrain.

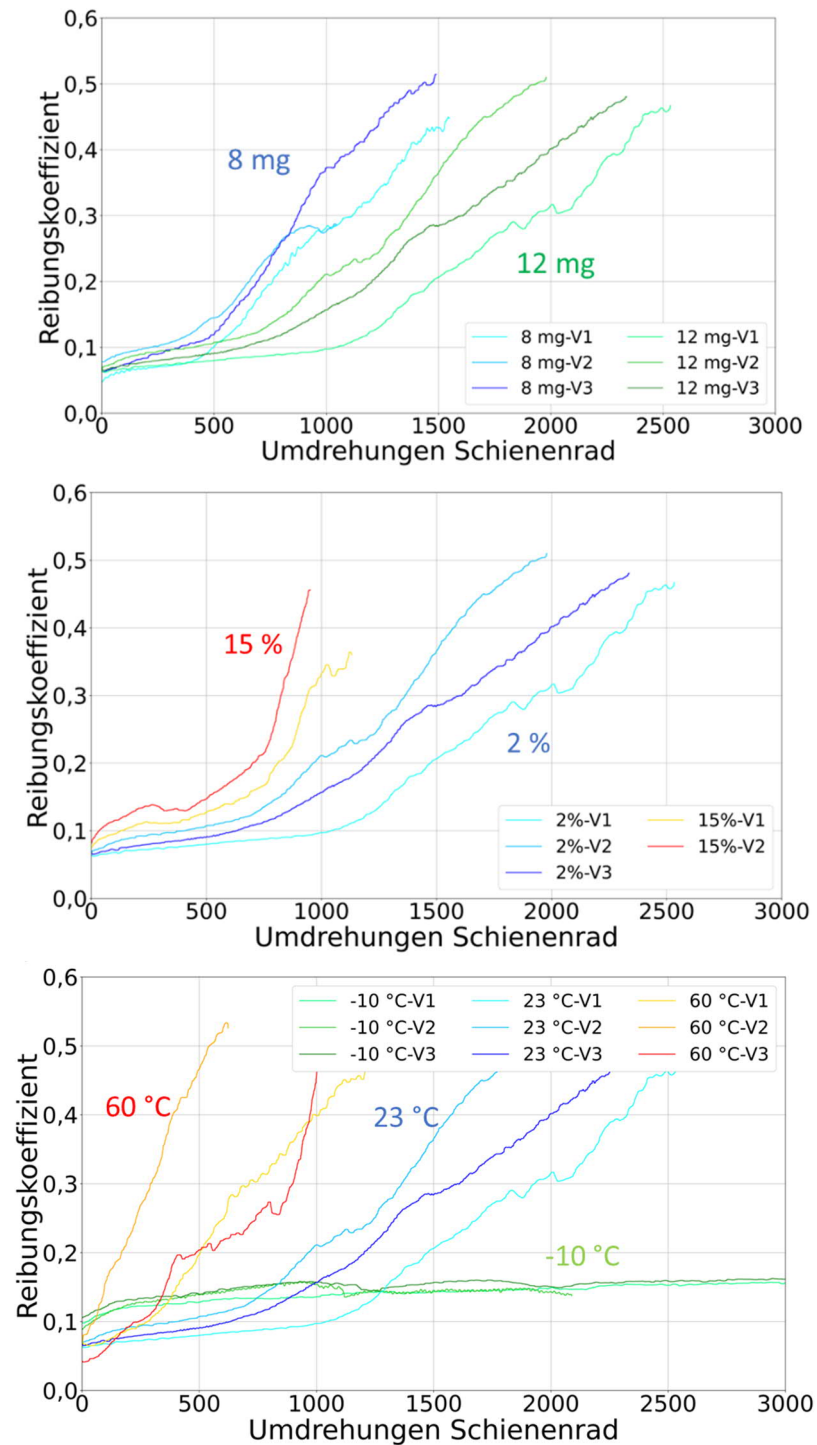


Figure 43 : Courbe du coefficient de frottement en fonction de la quantité de SKK (en haut), du glissement (2ème à partir du haut), de la température (2ème à partir du bas) et de l'eau (en bas) ¹³⁵

7.1.4.10 Echelle pour la variation du produit

La quantité optimale à appliquer et le point d'application peuvent varier d'un produit à l'autre et influencer le coefficient de frottement. Des problèmes se posent lorsque l'on passe de l'application du produit sur le terrain aux essais en laboratoire, où les produits sont souvent appliqués de façon excessive¹⁶.

Une étude expérimentale à grande échelle sur des bancs à double disques a été réalisée avec un SKK à base d'eau, en modifiant la quantité de produit utilisée¹⁵⁴, voir Figure 44. Le coefficient de traction est resté faible plus longtemps lors de l'essai du contact fortement lubrifié. Des résultats similaires ont été observés avec un banc d'essai MTM et un SKK à base d'huile¹⁵⁵, voir Figure 45. D'autres mesures sur le terrain avec différentes quantités appliquées ont été effectuées par Harmon et al¹⁵⁶.

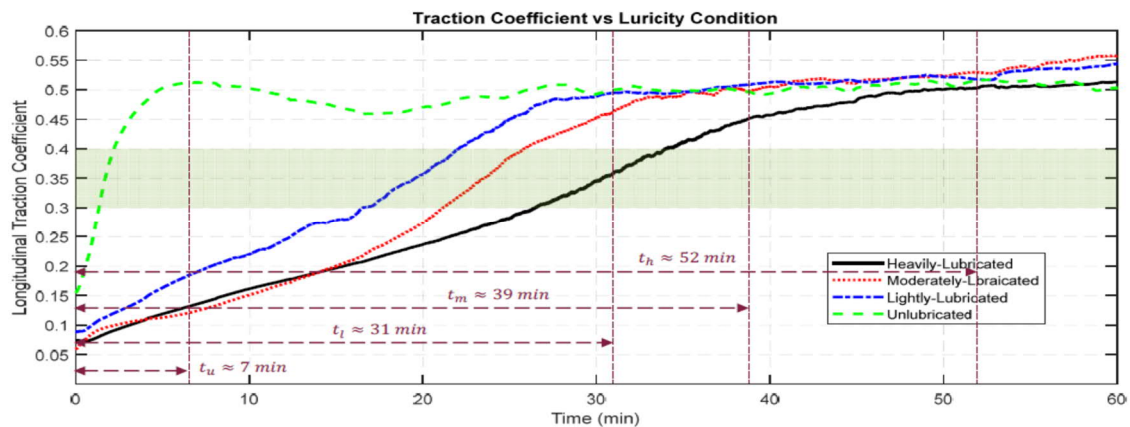


Figure 45 : Coefficient de traction dans le sens longitudinal des différentes quantités de SKK à base d'eau¹⁵⁴

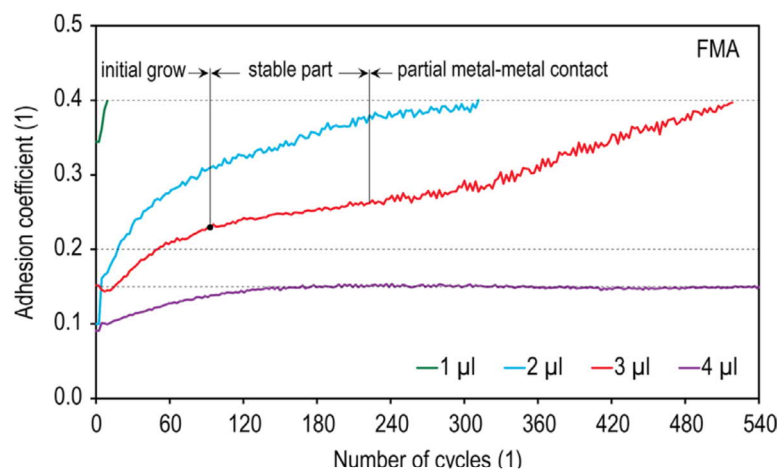


Figure 44 : Influence de la quantité de SKK à base d'huile sur le coefficient d'adhérence¹⁵⁵

¹⁵⁴ Y. Pan, A. Radmehr, A. Tajaddini, and M. Ahmadian, "AN EXPERIMENTAL STUDY of the INFLUENCE of the AMOUNT of TOP-OF-RAIL FRICTION MODIFIERS on TRACTION," Proc. 2021 Jt. Rail Conf. JRC 2021, pp. 1–6, 2021.

¹⁵⁵ R. Galas, M. Omasta, I. Krupka, and M. Hartl, "Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface," Wear, vol. 368–369, pp. 230–238, 2016.

¹⁵⁶ M. Harmon, J. F. Santa, J. A. Jaramillo, A. Toro, A. Beagles, and R. Lewis, "Evaluation of the coefficient of friction of rail in the field and laboratory using several devices," Tribol. - Mater. Surfaces Interfaces, vol. 14, no. 2, pp. 119–129, 2020.

7.1.5 Exemples d'utilisation de SKK et de SKS

Le Tableau 9 donne des exemples de mise en œuvre de SKK et de SKS. Bon nombre de ces rapports ne sont pas accessibles au public, mais les principaux critères de chaque rapport sont cités.

Reference	Product	Application	Performance criteria	Location
<i>THE EFFECT OF TOP OF RAIL FRICTION CONTROL ON A EUROPEAN PASSENGER SYSTEM: THE HEATHROW EXPRESS EXPERIENCE, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems</i>	LB Foster Keltrack (drying). TOR-FM	Wayside	Corrugation Wear RCF	Heathrow, UK
<i>Top of Rail Friction Control: Reductions in Fuel and Greenhouse Gas Emissions, Kelsan Technologies Corp report</i>	LB Foster Keltrack (drying). TOR-FM	Onboard	Energy/fuel reduction	BC, Canada
<i>Evaluation of Two TOR Products on River Grade Track, The Indiana Rail Road Company</i>	TOR drying and TOR non-drying	Wayside	Lateral force reduction, braking	Indiana
<i>KELTRACK® TRACKSIDE FREIGHT HEAVY GRADE CASE STUDIES</i>	LB Foster Keltrack (drying). TOR-FM	Wayside	Braking tests, wear reduction, lateral force reduction, RCF	Union Pacific, Canada
<i>Carry distance of top-of-rail friction modifiers, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit</i>	LB Foster Keltrack (drying). TOR-FM	Wayside	Carry distance	Swedish Iron Ore Line

Tableau 9 : Exemples d'utilisation

7.2 Localisation des connaissances manquantes dans le module 1.3

Certaines des principales lacunes dans la connaissance de l'état de l'art sont décrites ci-dessous :

Par rapport à la voie normale, les conditions de contact pour la voie métrique sont plus élevées, on peut citer une charge par essieu plus élevée, une distance plus importante du mouvement latéral de la roue par rapport au champignon du rail et un angle d'attaque plus important, ce qui entraîne des glissements élevés. Dans la littérature, il y a très peu d'exemples de produits testés dans ces conditions.

Les recherches futures devraient être effectuées avec des charges à l'essieu plus importantes et un glissement élevé afin d'évaluer les performances de SKK, telles que la rémanence, ainsi que l'impact éventuel sur la quantité à appliquer.

Il existe de grandes différences dans le comportement des produits à base d'huile et d'eau. Pour les produits à base d'eau, il existe de nombreuses publications, mais pour les produits à base d'huile tous les critères de performance n'ont pas été traités. Il existe peu de littérature traitant des effets du mélange de produits.

L'impact des facteurs environnementaux n'ont pas fait l'objet d'études approfondies. Les facteurs d'influence de SKK et de SKS sélectionnés ne sont généralement pas disponibles ou sont disponibles de manière incomplète. Il faut plus d'informations sur les variations de température (surface du rail et environnement), l'humidité et les effets des précipitations. D'autres paramètres à peine pris en compte dans les études de laboratoire sont le rayonnement solaire (température, UV) et le vent latéral qui peuvent influencer l'application.

La littérature couvre principalement les applicateurs fixes en voie, plutôt que les systèmes embarqués. Les quantités de produits, les méthodes d'application et les intervalles d'application doivent être pris en compte si les études futures couvrent ou simulent l'application embarquée. Le transfert de produits lors de l'application embarquée n'a pas fait l'objet de recherches.

Les méthodes d'essai doivent faire la distinction entre celles qui font partie d'une spécification et celles qui servent à vérifier des modèles. Dans le premier cas, on privilégie des méthodes simples, rapides et peu coûteuses, tandis que dans le second cas, on utilise des tests avec des technologies de mesure parfois complexes.

7.3 Principaux résultats du module 1.3

En ce qui concerne les systèmes d'application, on dispose de beaucoup plus de résultats des installations fixes en voie que pour les systèmes embarqués.

Étant donné que les effets du SKK et de la SKS dépendent non seulement de nombreux paramètres d'influence, mais aussi de la composition et de la quantité, les installations d'application doivent être considérées comme un tout avec les lubrifiants. Le passage à des lubrifiants alternatifs nécessite des essais pour coordonner l'installation et le lubrifiant.

De nombreux dispositifs sont disponibles pour évaluer le comportement des SKK et SKS au contact roue/rail, couvrant les six catégories de la chaîne d'essai. En principe, des essais simples sur modèle réduit, comme par exemple sur le tribomètre à double disques, permettent de "balayer" rapidement un grand nombre de paramètres de SKK ou de SKS, alors que plus on se rapproche du système réel rail/véhicule, plus les essais sont nombreux et plus le nombre

de variantes d'essais diminue. L'expérience montre que l'essai sur le terrain est la représentation la plus précise mais aussi la plus coûteuse pour un système tel que le contact roue/rail. La littérature fait souvent état de tendances comparables des propriétés de SKK et SKS sur les bancs d'essai modèles (échelle réduite) et les bancs d'essai à échelle réelle.

Il existe de nombreux facteurs d'influence sur l'effet du SKK et de la SKS, notamment:

- La quantité de SKK/SKS
- La température
- L'humidité/l'eau
- Le glissement
- La pression
- L'angle d'attaque
- L'environnement
- La variation du produit ou de l'échelle

Les performances de SKK et de SKS peuvent être décrites à l'aide de nombreuses caractéristiques proches de la pratique, en particulier:

- La rémanence ou la capacité de rétention
- La consommation d'énergie
- L'usure et la fatigue des contacts roulants
- La formation d'usure ondulatoire
- La réduction du bruit

Bien que des exemples d'application soient disponibles, la plupart des rapports ne sont pas accessibles au public.

8 Résumé et conclusion

La tribologie est aujourd'hui considérée comme un sujet multidisciplinaire d'une grande importance pour différents aspects de l'ingénierie et de la science. Un système tribologique se compose d'un corps principal fixe, par exemple un rail, qui est en contact avec un contre-corps, par exemple une roue, et qui est en mouvement relatif par rapport au corps principal. Le mouvement relatif entre eux peut donc aller d'un contact purement glissant à un contact purement roulant. La plupart des systèmes tribologiques sont lubrifiés, c'est-à-dire qu'il y a un lubrifiant entre le corps principal et le contre-corps, par exemple les SKK et les SKS. Le système tribologique comprend également l'environnement, qui contribue de manière significative aux propriétés de frottement et d'usure, typiquement, mais pas exclusivement, la température et l'humidité.

Le frottement peut être décrit comme la résistance qui se produit lorsqu'un corps se déplace tangentiellement sur un autre corps. Cependant, l'interface entre la roue et le rail n'est pas un simple contact de glissement, mais un contact de roulement et de glissement. Par conséquent, la force de traction doit également être prise en compte. Dans la littérature, on utilise parfois le terme de coefficient de traction au lieu de coefficient d'adhérence, probablement parce que les études sont généralement menées dans des conditions de traction, c'est-à-dire lorsque la ou les roues sont accélérées sur le ou les rails. En principe, le coefficient d'adhérence et le coefficient de traction peuvent tous deux être utilisés de la même façon sans perdre leur sens.

Par gestion du frottement, on entend le processus de contrôle du frottement entre la roue et le rail par le biais de différentes mesures. La gestion du frottement dans le contact roue/rail est utilisée pour améliorer l'efficacité, la sécurité, les coûts de maintenance, la réduction du bruit et des vibrations et, à long terme, pour réduire l'usure de la roue et du rail.

Les produits de SKK ont été conçus pour réduire les coefficients de frottement élevés et les maintenir à un niveau "intermédiaire" optimal; si le coefficient de frottement est trop faible, il a un effet négatif sur la traction et le freinage, s'il est trop élevé, il y a un RCF et une usure excessive. L'application de produits de SKK peut contribuer à minimiser et à atténuer la formation d'usure ondulatoire. L'usure ondulatoire peut se former sur les surfaces de contact entre la roue et le rail et peuvent varier en termes de mécanisme, de position et de longueur des usures.

Outre la qualité proprement dite des SKK et des SKS, à savoir la modification du frottement, d'autres propriétés jouent un rôle important en termes d'application, de compatibilité environnementale et de sécurité. Sont prises en compte les caractéristiques typiques des lubrifiants telles que la consistance, la viscosité et l'inflammation. En ce qui concerne la compatibilité avec l'environnement, on constate une offre croissante de SKK et de SKS respectueux de l'environnement, même si la preuve de la compatibilité avec l'environnement se limite souvent à la biodégradabilité. Pour choisir les SKK et les SKS en fonction de leur compatibilité avec l'environnement, il existe désormais des produits portant des écolabels, notamment l'écolabel européen et l'écolabel allemand « Blauer Engel ». La réglementation suisse R RTE 49410 a intégré ces prescriptions et est plus stricte que le label de « Blauer Engel » pour certains paramètres.

Les données collectées sur environ 170 produits de SKK et de SKS dans le cadre d'une étude de marché ont révélé que de nombreuses indications, telles que la capacité de rétention, la portée du produit et l'effet de modification de frottement, ne peuvent pas être vérifiées objectivement, car aucune indication n'est donnée sur les méthodes de mesures utilisées. Une évaluation objective des SKK et SKS en laboratoire et sur le terrain s'impose. La norme EN 15427, en cours de révision, décrit des méthodes de laboratoire, basées par exemple sur le

tribomètre à double disques. En principe, il existe une multitude de méthodes d'analyse concernant le comportement de frottement et d'usure des SKK et SKS. Ces méthodes couvrent l'ensemble de la chaîne d'essai, qui va des essais sur modèle réduit aux essais sur le terrain, en passant par les bancs d'essai à échelle réelle. La transférabilité des résultats à d'autres maillons de la chaîne d'essai facilite le transfert des résultats de laboratoire sur le terrain, mais reste un défi.

En général, le bruit en courbe est plus gênant que les bruits à large bande de même niveau en raison de sa tonalité. Le bruit en courbe est dû au fait que la direction de roulement des deux essieux d'un wagon ou d'un bogie ne correspond pas à la direction de la voie lors du franchissement d'une courbe. Cela entraîne un glissement au niveau de la surface de contact roue/rail et également des vibrations de flexion de la roue. Celles-ci conduisent finalement à une émission sonore sous forme d'oscillations stick-slip, un mode d'oscillation dominant de la roue conduisant à des parts tonales élevées. Les modes de vibration axiaux des roues sont les plus importants. Le rail est excité par la même force, mais en raison de sa faible mobilité, la réponse en termes d'oscillations est également beaucoup plus petite. C'est pourquoi la roue est déterminante pour le bruit en courbe. Cette instabilité provoque une diminution des caractéristiques de frottement, ce qui entraîne le crissement en courbe. De plus, un couplage de modes peut entraîner une instabilité et des crissements en courbe. La masse et le comportement d'amortissement du rail peuvent également provoquer une instabilité et des bruits en courbe. Le crissement en courbe se produit principalement au niveau de la roue intérieure avant. La roue extérieure avant rentre en contact avec le rail. Le bruit en courbe et le contact roue rail peuvent également se produire simultanément. Les facteurs d'influence pertinents sont les suivants:

- La vitesse de glissement (vitesse relative normalisée en fonction de la vitesse du train)
- Les caractéristiques modales de la roue (y compris l'amortissement)
- La charge verticale, la position de contact (latérale) et la friction (action de SKK et de SKS)

Ce dernier dépend à son tour de paramètres spécifiques, notamment:

- La température
- L'humidité
- La rugosité

En conséquence, le bruit en courbe est un mécanisme chaotique dont la probabilité d'occurrence peut varier considérablement selon les jours, voire selon les heures de la journée. Un deuxième mécanisme (couplage des modes) a été étudié pour expliquer le bruit (beaucoup plus rare) dans des conditions qui ne peuvent pas être expliquées par la théorie traditionnelle des « caractéristiques de frottement décroissants ». L'excitation latérale due aux forces d'adhérence n'entraînent pas seulement un mouvement latéral, mais fait également intervenir un degré de liberté vertical (DOF), qui fait à son tour varier les forces d'adhérence. Ce système peut devenir instable et provoquer des bruits, même si les forces de frottements sont constantes (c'est-à-dire qu'elles ne diminuent pas).

Deux approches principales sont utilisées pour prédire l'usure d'une roue ou d'un rail, la méthode statistique et la méthode mécanique de contact. L'approche statistique consiste à utiliser les données de mesure de la surface de roulement d'un type de véhicule donné dans des conditions d'exploitation données pour prédire la forme d'usure de la surface de roulement de la roue ou du rail. Cela permet de prédire rapidement et précisément la forme de la surface

de roulement, mais dès que les conditions d'exploitation changent, les prédictions deviennent imprécises, voire impossibles. Pour prédire l'usure de la bande de roulement avec la méthode basée sur la mécanique de contact, on utilise des simulations dynamiques à plusieurs corps. Cette méthode nécessite de nombreux calculs et plusieurs paramètres d'entrée, dont certains sont inconnus. Cependant, l'avantage de cette méthode est que d'autres types de véhicules ou des conditions d'exploitation variables peuvent être facilement pris en compte. En combinant les deux approches, il est possible de tirer parti de leurs avantages et d'obtenir une prédiction rapide, précise et flexible des profils. Une telle approche est appelée "approche hybride".

Dans le modèle basé sur la statistique pour la prédiction des formes d'usure de profil de roue, les courbes dites d'usure sont calculées comme la distance verticale entre un profil usé mesuré et un nouveau profil non usé (profil de référence). Pour prédire une nouvelle forme de profil de roue, des polynômes ont d'abord été adaptés aux courbes d'usure mesurées. Ensuite, les coefficients des polynômes ajustés ont été calculés en fonction du kilométrage des profils de roue mesurés. Pour calculer une nouvelle courbe d'usure, il faut ensuite calculer les coefficients du polynôme pour un kilométrage donné. Pour obtenir une nouvelle forme de profil de roue, la courbe d'usure calculée est ajoutée au profil de référence.

L'approche basée sur la mécanique de contact utilise des simulations MBD et des analyses locales de contact roue/rail pour calculer les paramètres de contact (surface de contact, glissement, forces) entre la roue et le rail. En utilisant les paramètres de contact comme entrée pour un modèle d'usure donné, le matériau est retiré de la surface de contact. La forme de profil mise à jour est utilisée comme entrée pour la simulation MBD de la boucle suivante. De cette manière, l'évolution du profil de la roue est déterminée par l'approche basée sur la mécanique de contact. Il existe deux modèles d'usure fréquemment utilisés, le modèle d'Archard et l'approche Ty. Le modèle Archard utilise la charge, la distance de glissement, la dureté et un coefficient d'usure dépendant du matériau pour calculer le volume d'usure. L'approche Ty est basée sur le glissement γ et la force de traction T .

L'approche hybride de prédiction de l'usure de la bande de roulement combine l'approche statistique et l'approche par contact.

Les modèles de force d'adhérence sont extrêmement utiles pour la prévision et la simulation des performances ferroviaires et sont donc constamment développés et améliorés. Les modèles "Extended Creep Force" (ECF) et "CONTACT" sont capables de modéliser les effets des modificateurs de frottement. Il existe également le modèle de Popovici, qui est capable de modéliser les lubrifiants dans la lubrification mixte, mais des adaptations seraient nécessaires pour traiter les solides produits à l'interface tels que le SKK. Il existe peu d'études qui se sont penchées sur les produits de SKK et les modèles de pollution qui traitent de la couche du troisième corps. Dans une étude de Meierhofer et al., les résultats expérimentaux de bancs d'essai à double disques ont été utilisés pour paramétrer un modèle qui inclut une couche de troisième-corps. Le modèle avec une couche de troisième-corps a montré une meilleure précision par rapport aux modèles sans couche de troisième-corps. Si l'on part du principe que l'effet hydrodynamique influence le frottement dans le système, il convient de mentionner que cet effet prend de l'importance avec l'augmentation de la vitesse relative.

La principale influence de la rugosité est le rapport entre la surface de contact réelle des aspérités et la surface de contact nominale; le rapport de la surface de contact réelle est également inclus comme paramètre dans le calcul initial des forces de frottement. La diminution du coefficient d'adhérence en cas de glissement élevé peut être liée à l'augmentation de la température de contact due à la chaleur de frottement générée. C'est

pourquoi un coefficient de frottement dépendant de la température a été inclus dans le calcul en utilisant une estimation analytique de la température de contact moyenne.

L'une des façons les plus simples de modéliser les effets de l'usure serait d'utiliser l'approche Ty. Cette méthode combine l'usure et la fatigue en un seul paramètre appelé dommage. Elle s'appuie également sur des corrélations entre certains coefficients Ty et le comportement de l'usure/fatigue dans la voie, ce qui peut souvent poser problème lors de l'introduction de nouveaux aciers pour la fabrication de rails, par exemple. Le coefficient d'usure est représentatif de l'énergie consommée dans la surface de contact, mais ne fait pas de distinction entre les différentes formes d'énergie (usure, chaleur, bruit, etc.). Les coefficients d'usure sont basés sur des données expérimentales issues d'essais de roulement/glissement, qui ont été bien étudiés pour les contacts secs, mais il existe désormais quelques essais avec des contacts humides et sales. En revanche, il existe peu de données expérimentales concernant les modificateurs de frottement.

9 Perspectives et recommandations

Les connaissances disponibles portent principalement sur la voie normale et doivent être appliquées aux voies métriques, par des expérimentations, des modélisations et des vérifications sur le terrain. Pour déterminer les effets du SKK et de la SKS, il convient de faire varier les paramètres des conditions d'exploitation (conditions critiques), par exemple la température, la pluie, la quantité de lubrifiant. La matrice des résultats obtenus doit être utilisée pour la mise en place de RTE en vue de la spécification du SKK et de la SKS pour les voies métriques. Pour ce faire, il est possible de se baser sur les résultats d'études ainsi que sur les normes et les réglementations relatives à la voie normale.

Dans la littérature, il est parfois indiqué que le SKK doit être appliqué sur les deux surfaces de roulement du rail. Cet aspect doit être étudié de manière plus approfondie au cours des travaux de recherche de la P2. Les effets précis du mélange de SKK et de SKS doivent également être étudiés.

En ce qui concerne l'étude et le choix de SKK et de SKS, il est recommandé de commencer par des informations plus facilement disponibles, comme la compatibilité environnementale, afin de limiter le nombre de produits et le nombre d'essais dans l'étude, en particulier pour les études tribométriques.

L'approche hybride pour estimer l'usure de la roue et du rail présente des avantages notamment d'applicabilité à différents scénarios et d'efficacité de calcul. Pour l'application aux voies ferrées à écartement métrique, une analyse de l'usure dans les courbes serrées, de petit rayon, doit être effectuée afin de pouvoir appliquer le modèle dans ces conditions d'exploitation. L'interaction avec les produits de SKK et de SKS doit également être étudiée et implémentée dans le modèle.

Il est impératif de déterminer et de modéliser avec précision la plage de « frottement décroissant » du coefficient d'adhérence afin de bien décrire le bruit en courbe. Les mesures du « frottement décroissant » dans des conditions réelles sont difficiles. Dans la littérature, on trouve de nombreuses approches différentes de la courbe de glissement. L'approche de Kalker est valable pour l'état statique, mais il n'existe pas de théories pour le glissement dynamique. La littérature traite principalement de la voie normale ou des tramways. Il est nécessaire de disposer d'un modèle suffisamment représentatif pour l'application aux voies métriques. Ce modèle est obligatoire pour pouvoir ensuite développer des mesures de limitation des dommages.

Tables des Figures

Figure 1 : Schéma représentant un système tribologique	11
Figure 2 : Facteurs importants à prendre compte lors du traitement d'une problème tribologique	12
Figure 3 : Schéma de force du contact roue/rail	13
Figure 4 : Représentation de la courbe de traction théorique de Carter et des zones de glissement (Slip) et d'adhérence (Stick) de la surface de contact	14
Figure 5 : Diagramme Glissement-Traction illustrant la différence entre les caractéristiques de frottement positifs et négatifs ¹⁵	16
Figure 6 : Représentation schématique des zones typiques de l'application de SKK et de SKS pour la gestion du frottement	17
Figure 7 : Plage de coefficient de frottement préférentielles de différents produits pour la gestion du frottement	17
Figure 8 : Système typique d'application de graisse en voie	18
Figure 9 : Section métallographique d'un rail et d'une couche de troisième de corps	19
Figure 11 : Taches brillantes sur le rail et taches sur la roue représentant les zones de glissement Stick-Slip (source : zb Zentralbahn AG)	21
Figure 10 : (a) taches brillantes (1 à 4) sur le rail et (b) taches sombres sur la roue représentant les zones de glissement Stick-Slip ¹⁵	21
Figure 12 : Comparaison des taux de croissance des usures ondulatoires de trois systèmes ferroviaires avec et sans SKK ²³	22
Figure 13 : Effet du a) SKK et du b) Lubrifiant sur les coefficients de frottement des rails extérieurs et intérieurs pour 10 passages ¹⁵	24
Figure 14 : Représentation du coefficient de frottement moyen pour différents scénarios de contact roue/rail ²⁵	24
Figure 15 : Coefficient de traction lors de l'application de SKK sur différentes durées de pulvérisation ²⁶	25
Figure 16 : Courbe de traction pour différents temps de pulvérisation ou quantités d'application ²⁶	26
Figure 17 : Influence de la teneur en graisses (0 à 60 mg) du SKK sur le frottement en fonction de la durée de l'essai ²⁷	27
Figure 18 : Courbe de traction (ici : adhérence en fonction de l'angle d'attaque) dans différentes conditions de contact (sec, SKK à base d'eau et SKK à base d'huile) à différentes vitesses de rotation : (a) 800tr/min ; (b) 600 tr/min ; (c) 400 tr/min ; (d) 200 tr/min ; (e) 100 tr/min ²⁸	28
Figure 19 : Vue d'ensemble d'un banc d'essai à double disques ⁴⁸	33
Figure 20 : Distribution de fréquence de niveau cumulée des niveaux LpAFmax filtrés dans la gamme de fréquences de 2 kHz à 10 kHz, mesurés sur le périphérique de Berlin (RingBahn)	

pour des vitesses supérieures ou égales à 80 km/h : avant installation des mesures anti-bruit (ligne pleine), après installation des mesures anti-bruit (ligne pointillé) ^{42,49}	34
Figure 21 : Courbes d'usure mesurées et courbes d'usures prévues calculées par Han et Zhang ⁶²	35
Figure 22 : Résultats de validation pour l'épaisseur du boudin ⁵³	36
Figure 23 : Approche mécanique de contact - méthode par boucle	37
Figure 24 : Résultats de validation de l'approche par contact de Ding et al.	37
Figure 25 : Résultat de validation utilisant la mécanique de contact de Li et al.	38
Figure 26 : Résultats de validation de Zhu et al. en utilisant une approche hybride	39
Figure 27 : États d'usure ⁶³	40
Figure 28 : Résultats de validation de Hartwich et al. ⁶³ en utilisant l'approche hybride	40
Figure 29 : Comparaison entre le modèle avec et sans les propriétés de la couche du troisième corps (3BL) et les résultats expérimentaux de quatre scénarios. a) $p_0 = 1500$ MPa, $v = 0,5$ m/s; b) $p_0 = 1500$ MPa, $v = 1$ m/s, c) $p_0 = 900$ MPa, $v = 0,5$ m/s, d) $p_0 = 900$ MPa, $v = 1$ m/s ⁸²	43
Figure 30 : Logigramme pour le calcul du coefficient d'adhérence	44
Figure 31 : Comparaison des coefficients de frottement limite avec des modèles et des expériences ⁸⁶	45
Figure 32 : Comparaison entre le modèle avec une surface lisse et le modèle avec une surface rugueuse à une vitesse $V=30$ km/h ⁹⁶	47
Figure 33 : Comparaison de la courbe de traction pour différentes rugosités ⁹⁶	48
Figure 34 : Chaîne de contrôle tribologique pour le contact roue/rail ¹²⁵	59
Figure 35 : Comparaison des taux d'usure Ty/A des essais sur banc double disques et échelle réelle en conditions sèches et avec SKK ⁷⁷	62
Figure 36 : Capacité de rétention en fonction de la quantité de graisse ¹⁷	65
Figure 37 : Diagramme d'usure avec indication des rapports de contact roue/rail ⁷¹	67
Figure 38 : Comparaison des taux de croissance des usures ondulatoires entre différents systèmes avec et sans conditionnement ²³	68
Figure 39 : Variation du niveau sonore pour différentes quantités de produits SKK utilisées ¹³³	69
Figure 40 : Schéma représentant l'influence des frottements SKK sur les forces latérales dans les courbes ¹⁵¹	70
Figure 41 : Effet de l'angle d'attaque sur le temps de consommation du SKK pour une quantité de 5 μ L de SKK sur un banc d'essai à double disques ¹⁵²	70
Figure 42 : Courbes de traction de différents produits de SKK et dans des conditions sèches à l'aide d'un banc d'essai à doubles disques ¹³¹	71

Figure 43 : Courbe du coefficient de frottement en fonction de la quantité de SKK (en haut), du glissement (2ème à partir du haut), de la température (2ème à partir du bas) et de l'eau (en bas) ¹³⁵ 73

Figure 45 : Influence de la quantité de SKK à base d'huile sur le coefficient d'adhérence ¹⁵⁵ 74

Figure 44 : Coefficient de traction dans le sens longitudinal des différentes quantités de SKK à base d'eau ¹⁵⁴ 74

Tables des tableaux

Tableau 1 : Limites de coefficient d'adhérence entre la roue et le rail pour différents chemins de fer dans différents pays	15
Tableau 2 : Vue d'ensemble des fonctions des composants utilisés dans les produits de SKK	20
Tableau 3 : Principaux paramètres pris en compte dans les essais sur le terrain	32
Tableau 4 : Synthèse des produits de SKK et de SKS classés par fabricant, type d'utilisation et d'applications, avantages et caractéristiques environnementales avec les informations issues des fiches techniques	51
Tableau 5 : Méthodes de test en laboratoire.....	61
Tableau 6 : Propriétés de propagation de deux types de produits de SKK	64
Tableau 7 : Économies d'énergie dans les courbes ⁷²	66
Tableau 8 : Économies d'énergie avec différentes stratégies de lubrification ⁷²	66
Tableau 9 : Exemples d'utilisation	75

Annexes

Annexe 1 : Liste des produits de SKK et de SKS

(Report_P2_Module 1_Finalreport_Appendix1_TOR-FM_FL.xlsx)

[illegible]

Annexe 2 : Liste et évaluation des annexes du règlement sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORChim) en ce qui concerne les composants de SKK et de SKS

(Report_P2_Module 1_Finalreport-Appendix2_ChemRRV.xlsx)

		Relevanz	Begründung / Anmerkung
Anhang 1	Bestimmungen für bestimmte Stoffe		
1.1	Persistente organische Schadstoffe	möglich	möglicherweise in Spezialschmierstoffen, generell nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.2	Halogenierte organische Stoffe	möglich	möglicherweise in Spezialschmierstoffen, generell nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.3	Aliphatische Chlorkohlenwasserstoffe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.4	Ozonschichtabbauende Stoffe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.5	In der Luft stabile Stoffe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.6	Asbest	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.7	Quecksilber	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.8	Octylphenol, Nonylphenol und deren Ethoxylate	nein	Verbote/Einschränkungen beziehen sich nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren, eine Verbindung dieser Kategorie wurde im Sicherheitsdatenblatt eines TOF-FM aufgeführt
1.9	Stoffe mit flammhemmender Wirkung	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.10	Krebserzeugende, erbgutverändernde und fortpflanzungsgefährdende Stoffe	möglich	generell nicht auszuschließen, muss auf Sicherheitsdatenblatt aufgeführt werden
1.11	Gefährliche flüssige Stoffe	nein	Verbote/Einschränkungen beziehen sich nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren
1.12	Benzol und Homologe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.13	Nitroaromaten, aromatische Amine und Azofarbstoffe	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.14	Zinnorganische Verbindungen	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.15	Teere	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.16	Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
1.17	Stoffe nach Anhang XIV der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006	möglich	generell nicht auszuschließen, muss von den "Inverkehrbringern" beachtet werden
1.18	Phthalate	nein	nicht in (Schienen-)Schmierstoffen/Reibmodifikatoren zu erwarten
Anhang 2	Bestimmungen für Gruppen von Zubereitungen und Gegenständen		
2.1	Textilwaschmittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.2	Reinigungsmittel, Desodorierungsmittel und kosmetische Mittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.3	Lösungsmittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.4	Biozidprodukte	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
			eine Verbindung dieser Kategorie wurde im Sicherheitsdatenblatt eines TOF-FM aufgeführt
2.5	Pflanzenschutzmittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.6	Dünger	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.7	Auftaumittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.8	Anstrichfarben und Lacke	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.9	Kunststoffe, deren Monomere und Additive	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.10	Kältemittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.11	Löschmittel	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.12	Aerosolpackungen	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.13	Brennstoffzusätze	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.14	Kondensatoren und Transformatoren	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.15	Batterien	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.16	Besondere Bestimmungen zu Metallen	nein	Beschränkung auf Blei, Cadmium, Quecksilber, Chrom(VI) in bestimmten Anwendungen, nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.17	Holzwerkstoffe	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend
2.18	Elektro- und Elektronikgeräte	nein	nicht auf (Schienen-)Schmierstoffe/Reibmodifikatoren zutreffend

Annexe 3 : Comparaison entre les exigences pour les lubrifiants (en particulier les huiles hydrauliques) dans "Blue Angel" et pour SKS dans R RTE 49410

(Report_P2_Module 1_Finalreport-v1_Appendix3_BlauerEngel_vs_RTE.xlsx)

Specification	Subject	Requirements	"Blauer Engel" DE-ZU 178	"Blauer Engel" Value	RTE 49410	RTE 49410 Value
CLP (1272/2008)	Final product	Ban or restriction of hazardous substances (details see respective document) according to CLP	x		x	
MAK list	Final product	Ban of "carcinogenic", "mutagenic" or "toxic to reproduction" substances according to MAK	x			
REACH (1907/2006) regarding SVHC (substances of very high concern)	Final product	Ban of SVHC	x			
OSPAR list	Final product	Ban of OSPAR list substances	x		x	
List of priority substances under the water framework directive (2000/60/EG + 2008/105/EG)	Final product	Ban of priority list substances	x		x	
Wassergefährdungsklasse (WGK) according to "Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)"	Final product	Ban of substances of WGK 2 and 3	x		x	
Organic halogen compounds	Final product	Ban of organic halogen compounds	x	-	x	
Nitrite compounds	Final product	Ban of nitrite compounds	x	-	x	
Metals and metal compounds (except Na/K/Mg/Ca & Li/Al in thickener)	Final product	Ban of metals and metal compounds (except exceptions)	x	-	x	
Algae (acute & chronic) EC50 (72h)	Final product	ISO 10253	x	> 100 or 1000 mg/l		
Algae (acute & chronic) EC50 (72h)	Final product	ISO 8692	x	> 100 or 1000 mg/l		
Algae (acute & chronic) EC50 (72h)	Final product	OECD 201 or C.3 of annex of 440/2008	x	> 100 or 1000 mg/l	x	> 1000 mg/l
Daphnia (acute) EC50 (96h)	Final product	ISO 6341	x	> 100 or 1000 mg/l		
Daphnia (acute) EC50 (96h)	Final product	OECD 202 or C.2 of annex of 440/2008	x	> 100 or 1000 mg/l	x	> 1000 mg/l
Daphnia (chronic) NOEC	Final product	OECD 211 or C.20 of annex of 440/2008	x	> 10 or 100 mg/l		
Fish (acute) LC50	Final product	OECD 203 or C.1 of annex of 440/2008	x	> 100 or 1000 mg/l	x	> 1000 mg/l
Fish (acute) LC50	Final product	OECD 236 or C.49 of annex of 440/2008	x	> 100 or 1000 mg/l		
Fish (chronic) NOEC	Final product	OECD 210 or C.47 of annex of 440/2008	x	> 10 or 100 mg/l		
Fish (chronic) NOEC	Final product	OECD 212 or C.15 of annex of 440/2008	x	> 10 or 100 mg/l		
Fish (chronic) NOEC	Final product	OECD 215 or C.14 of annex of 440/2008	x	> 10 or 100 mg/l		
Algae (acute)	Product components	OECD 201 or C.3 of annex of 440/2008	x			
Daphnia (acute)	Product components	OECD 202 or C.2 of annex of 440/2008	x			
Daphnia (chronic) NOEC	Product components	OECD 211 or C.20 of annex of 440/2008	x			
Fish (acute)	Product components	OECD 203 or C.1 of annex of 440/2008	x			
Fish (chronic) NOEC	Product components	OECD 210 or C.47 of annex of 440/2008	x			
Ready biodegradability	Product components	OECD 301 (B/C/D/F) or C.4 (C-F) of annex of 440/2008	x	> 60 %	x	> 60 %
Ready biodegradability	Product components	OECD 310 or C.29 of annex of 440/2008	x	> 60 %		
Ready biodegradability	Product components	OECD 306 or C.42 of annex of 440/2008	x	> 60 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 301 (B/C/D/F) or C.4 (C-F) of annex of 440/2008	x	20 - 60 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 310 or C.29 of annex of 440/2008	x	20 - 60 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 306 or C.42 of annex of 440/2008	x	20 - 60 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 302 B or C.9 of annex of 440/2008	x	> 70 %		
Inherent biodegradability	Product components	OECD 302 C	x	> 70 %		
log P _{ow} (log of octanol-water partition coefficient)	Product components	OECD 107, OECD 117, OECD 123 or A.8 of annex of 440/2008	x	< 3 or > 10	x	< 3 or > 7
BCF (bioconcentration factor)	Product components	OECD 305 or C.13 of annex of 440/2008	x	< 500 l/kg	x	< 100 l/kg
Surface tension of aqueous solutions	Product components	OECD 115 or C.13 of annex of 440/2008	x	< 50 mN/m at 1 g/l		
Nanomaterials	Final product	Labeling of nanomaterials is mandatory		-	x	