

Recommandation d'utilisation des produits SKK en termes de compatibilité environnementale

Maîtrise de système Interaction Véhicule – Voie ferrée à écartement métrique

Projet : 2 SKS / SKK

Module : 2. Bases légales

Rapport technique



ID : RAILPlusSF-00013

Date / Statut : 29.02.2024 / Validé

Nombre de pages 20

Auteur : Gaël Vuillème / MOB

Contrôle : Michael Stalder / CE cideon engineering Schweiz AG

Validation : Nikolaus Ritter / zb Zentralbahn AG

Mode de citation : Vuillème Gaël, RAILplus / MOB : Compatibilité environnementale. Rapport technique, RAILPlusSF-00013, 28.3.2024

Liste des modifications

Version	Date	Responsable	Description
0.1	15.07.2023	G. Vuillème	Première version
0.2	31.07.2023	M. Stalder	1ère révision du MLSR
0.3	03.11.2023	G. Vuillème	Rapport terminé avec brouillon BFH et sans AC ² T
0.4	15.11.2023	G. Vuillème	Rapport terminé avec brouillon AC ² T
0.5	29.02.2024	G. Vuillème	Brouillon pour review
0.6	06.03.2024	G. Vuillème	Brouillon pour review AC ² T
0.7	11.03.2024	G. Vuillème	Version pour libération
0.9	18.03.2024	M. Stalder	Rapport édité et finalisé
1.0	18.03.2024	N. Ritter	Correction finale et validation par le responsable du projet
1.1	09.04.2024	G. Vuillème	Adaptation suite aux remarques de L. Pasquier
2.0	08.05.2024	N. Ritter	Validation par le responsable du projet

Validation par la maîtrise de système

Version	Responsable	Date
1.0	Direction technique	28.03.2024
2.0	Direction générale	13.06.2024

Statut public

Public

Liste des abréviations

AB	Appenzeller Bahnen AG
ASm	Aare Seeland mobil AG
AVA	Aargau Verkehr AG
CMR	Substance cancérigène, mutagène ou reprotoxique
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (<i>Fourier transform infrared spectroscopy</i>)
GC-FID	Chromatographie en phase gazeuse – détection à ionisation de flamme (<i>Gas chromatography – flame ionization detector</i>)
GC-MS	Chromatographie en phase gazeuse – spectroscopie de masse (<i>Gas chromatography – mass spectroscopy</i>)
HAP	Hydrocarbure aromatique polycyclique
ICP-OES	Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (<i>Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy</i>)
LEB	Compagnie du chemin de fer Lausanne-Echallens-Bercher SA
MGB	Matterhorn Gotthard Bahn
NIST	Institut national (Etats-Unis) des normes et de la technologie (<i>National Insitute of Standards and Technology</i>)
OLED	Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn RBS
SEM-EDX	Microscopie électronique à balayage et spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (<i>Scanning electron microscopy energy-dispersive X-ray spectroscopy, SEM-EDX</i>)
SKK	Conditionnement du champignon du rail (<i>Schienenkopfkonditionierung</i>)
SKS	Lubrification du boudin (<i>Spurkranzschmierung</i>)
STEP	Station d'épuration
TPF	Transports publics fribourgeois Holding (TPF) SA
ZB	zb Zentralbahn AG

Résumé exécutif

Ce document décrit le processus pour déterminer la compatibilité environnementale du SKK. Les fiches techniques de sécurité de certains produits de conditionnement mentionnent plusieurs produits dangereux pour l'environnement. Le risque de pollution doit être minimisé en s'assurant que les substances concernées ne sortent pas de la voie avec l'eau de pluie et de fonte.

Deux cas-types de voie sont étudiés. Dans le premier, la voie respecte les normes de construction actuelles. L'eau s'écoule d'abord à travers le ballast puis un corps filtrant constitué de sable ou de gravier. Les échantillons d'eau sont alors prélevés. Lors de toutes les mesures, les produits dangereux et autres indicateurs de la présence de SKK respectent les normes en vigueur. Les mesures ont lieu à Gruyères (FR) et Bossonnens (FR) sur le réseau TPF et à Stans (NW) sur celui de la ZB.

Dans la seconde configuration, la voie n'a pas de ballast. L'eau ruisselle sur une surface imperméable et est collectée dans une chambre. Elle est ensuite rejetée dans la nature. Ce cas est une estimation de l'état de l'eau lorsqu'elle entre dans le ballast. Si une partie des polluants se déposent dans les boues dans la chambre de collecte, une autre est rejetée dans l'environnement. A la sortie de la chambre, la concentration de polluant peut dépasser les valeurs limites de rejets toxiques. Lors du rejet dans un cours d'eau, la concentration, et avec elle les dangers, diminue. Ces mesures sont effectuées sur un pont, à Hergiswil (NW) sur le réseau de la ZB.

Les résultats des mesures indiquent que les différents polluants sont retenus par les différentes couches traversées par l'eau. La très faible solubilité dans l'eau et les propriétés d'adsorption des éléments de la voie permettent ce filtrage, raisons pour lesquelles d'autres polluants tels que le SKS ou les produits d'imprégnation des traverses en bois sont aussi retenus. La qualité du corps filtrant s'améliore avec le temps grâce à la formation d'un filtre secondaire de particules venant de la voie.

Le HeadLub 90 de Igralub est utilisé comme référence pour les tests car c'est le produit de conditionnement utilisé les TPF et la ZB. Pour transférer les résultats d'autres agents SKK, la solubilité dans l'eau joue un rôle décisif. Cela vaut aussi bien pour la matrice de base que pour les composants individuels. Les résultats montrent que, dans le cadre d'une utilisation normale du SKK, les corps filtrants actuels sont suffisants pour retenir de nombreuses substances pour autant qu'elles ne soient pas solubles dans l'eau. Les résultats obtenus dans cette étude sont transférables aux autres produits de SKK pour autant que la solubilité dans l'eau est comparable. Ce document propose une procédure en laboratoire afin de mesurer cette solubilité.

Pendant la durée de vie des installations, les polluants s'accumulent dans le ballast et le corps filtrant. Une pollution plus élevée entraîne des coûts supplémentaires pour l'élimination ou le recyclage des matériaux de la voie. Le SKK exerce une influence très faible voire négligeable, en particulier dans le cas de traverses en bois à cause de leur imprégnation. Dans le cas de traverse en métal ou béton, la pollution du ballast est similaire avec ou sans utilisation du SKK. Les autres sources de pollution provenant du trafic ferroviaire sont le SKS, les semelles de frein ou les produits d'imprégnation des traverses en bois.

Table des matières

1	Introduction	6
2	Objectifs	7
3	Connaissances de base.....	8
3.1	Composition	8
3.2	Détection et filtrage	8
4	Procédures de tests	10
4.1	En laboratoire.....	10
4.2	Sur le terrain.....	13
5	Résumé des résultats	15
5.1	En laboratoire.....	15
5.2	Sur le terrain.....	16
5.2.1	<i>Échantillons filtrés</i>	<i>16</i>
5.2.2	<i>Échantillons non filtrés</i>	<i>17</i>
6	Interprétation	18
6.1	Rétention des polluants et pollution des eaux de surfaces	18
6.2	Pollution du ballast, de l'infrastructure et du corps filtrant	18
6.3	Transférabilité des résultats aux autres produits de conditionnement.....	18
7	Conclusion.....	19
7.1	Recommandations	19
8	Répertoires	20
8.1	Références.....	20
8.2	Figures	20
8.3	Tableaux	20

1 Introduction

Parmi les sujets d'étude de la maîtrise de système se trouve le conditionnement du champignon du rail (SKK – *Schienenkopfkonditionierung*). Le but de son utilisation est la baisse du coefficient de frottement sur la bande de roulement afin de réduire l'usure et le bruit par l'application d'un agent de conditionnement. Contrairement à la lubrification du boudin (SKS – *Spurkranzschmierung*), le SKK ne peut pas réduire au plus bas le coefficient de frottement, mais doit garantir l'adhérence.

L'introduction du SKK comporte un risque de pollution de l'environnement puisque l'agent de conditionnement est appliqué directement sur le champignon du rail. Il s'écoule alors dans la voie puis potentiellement dans l'environnement. Il est donc nécessaire de s'assurer de la compatibilité environnementale des produits ou de leur application. L'étude porte uniquement sur une utilisation normale du SKK. Les mauvaises utilisations et les accidents sortent de ce cadre.

Plusieurs produits de conditionnement sont utilisés par différents chemins de fer métriques en Suisse, notamment dans le cadre des recherches de RAILplus. Le Tableau 1 résume les produits utilisés aujourd'hui par les différentes entreprises ferroviaires. Certains produits affichent une prétention écologique. Si l'ensemble des recherches sur le terrain est effectué avec le HeadLub 90 de Igralub, ce document fixe des critères pour transférer ces résultats à d'autres produits existants ou futurs.

Entreprises ferroviaires	Produit de conditionnement	Fabriquant	Remarque
ASm, LEB, RBS, BOB	Sintono Terra HLK	Lubcon	
AB, MGB, TPF, ZB	HeadLub 90	Igralub	
AVA	inconnu		Lors de l'enquête P1, AVA souhaitait faire des tests durant l'été 2022. (Güldenapfel, 2022)
TMR	HeadLub Oec 90	Igralub	

Tableau 1 Liste des produits de conditionnement utilisés en 2023 par les chemins de fer métriques suisses.

Ce document présente les résultats de trois travaux différents. D'abord une étude théorique d'E. Brugger (ZB) réalisé dans le cadre de la maîtrise de système (Brugger, 2022) qui présente un concept d'évaluation de la compatibilité environnementale des agents de conditionnement. Elle présente les produits de conditionnement, le concept de compatibilité environnementale, les bases légales et normes en vigueur.

Deuxièmement, une étude en laboratoire pour notamment analyser la composition chimique des produits et définir des méthodes pour déterminer la biodégradabilité, la toxicité, la bioaccumulation et la capacité de rétention du filtre de la voie conduite par le laboratoire autrichien de tribologie AC2T research GmbH (AC²T) (Dörr, 2024). Le but de cette étude est de mettre en place une procédure en laboratoire pour évaluer de nouveaux SKK sans devoir effectuer de test sur le terrain. Cette manière de faire a l'avantage d'être moins chère, plus reproductible, mais aussi plus rapide. Le rapport présente aussi l'ensemble des normes, spécifications et règlements en vigueur qui concernent le SKK.

Finalement, une recherche menée par M. Steiner de l'institut du développement urbain et de l'infrastructure de la Haute école supérieur bernoise porte sur des mesure *in situ* de rejets de SKK dans l'environnement ainsi que l'évaluation et la gestion des risques (Steiner, 2024).

La procédure de test est choisie en analogie avec les produits de SKS selon la R RTE 49410 (Kling, 2017) puisque, d'une part, les deux types de produits sont déposés sur le rail et d'autre part, les textures sont proches et les compositions peuvent être évaluées de la même manière (Brugger, 2022), (Dörr, 2024).

Les résultats expérimentaux, permettent de définir et réduire les risques de l'utilisation de SKK en adoptant une stratégie adéquate de conditionnement, sur les quantités de produits et les lieux d'application. Les études sur le terrain sont effectuées sur les lignes de la ZB et des TPF.

2 Objectifs

Le but de cette étude est de prouver la compatibilité environnementale de l'utilisation de SKK pour les chemins de fer métriques que Suisse.

Si un produit est dangereux pour l'environnement, cela n'implique pas forcément l'impossibilité d'utiliser le SKK. S'il reste dans la voie ou si la quantité atteignant l'environnement est faible, l'utilisation de SKK peut tout de même être considérée comme compatible environnementalement. E. Brugger décrit ces considérations dans l'arbre de décision de la Figure 1.

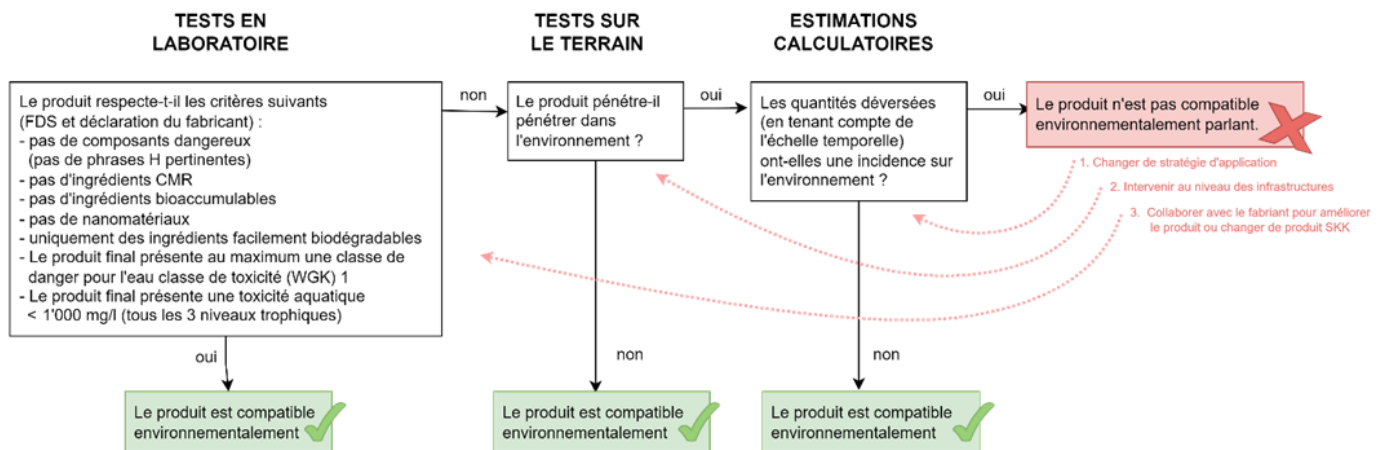


Figure 1 Arbre de décision inspiré de la stratégie des CFF. (Brugger, 2022) d'après (CFF CoC WFF, 2020).

En connaissant les produits utilisés ainsi que leurs composants problématiques et les quantités appliquées, les tests sur le terrain permettent d'évaluer combien de produit de conditionnement est rejeté dans l'environnement. Des mesures de concentrations sont menées dans les drains ainsi que dans les différentes couches du système pour connaître l'effet et l'accumulation de chaque élément (ballast, corps filtrant...). Ces mesures permettent de déterminer les éléments de la voie nécessaires à filtrer les polluants de l'eau de ruissellement.

Les différentes matières toxiques s'accumulent dans la voie. Cette étude détermine les implications sur la durée de vie et les conditions d'élimination de éléments de la voie pollués par le SKK.

Toutes les analyses sur le terrain de cette étude sont effectuées avec un agent de conditionnement. Les critères et une méthode pour transférer les résultats à d'autres produits sont définis.

3 Connaissances de base

Un état des dispositions légales ainsi qu'une revue des normes, spécifications et réglementations concernant les produits de conditionnement est disponible dans (Dörr, 2024).

3.1 Composition

Les produits annoncés comme dangereux dans la MSDS (Material Safety Data Sheet) dans les différents agents de conditionnement sont les branched ethoxylated nonyl phenol (présent dans le KELTRACK) et les hydrocarbures (alcanes et aromatiques ; présent dans le HeadLub 90). Le troisième produit (Sintonno Terra) n'en contient aucun. (Steiner, Homes, & Rütli, 2021).

Compte tenu du peu d'informations disponibles, des tests supplémentaires peuvent être effectués (FTIR, ICP-OES, fraction massique, morphologie et composition des composants solides par SEM-EDX) (Dörr, 2024). Différents procédés mentionnés dans (Dörr, 2024) permettent de déterminer les propriétés « biologiques » des SKK. C'est sur ce concept que se basent par exemple le label écologique européen pour les lubrifiants (EU Ecolabel for Lubricants) et *Blauer Engel*, le label écologique allemand, DE-UZ 178 sur les lubrifiants et fluides hydrauliques biodégradables. (Dörr, 2024).

Les produits de SKK considérés sont composés 1 à 2 % de composants volatils, d'environ un tiers de matière solide et deux tiers d'huile. Le comportement d'éluion (lavage) du SKK est déterminé par les paramètres physico-chimiques suivants :

- Solubilité dans l'eau des composants ou répartition entre les phases huile et eau déterminée à l'aide du coefficient K_{OW} ou son logarithme $\log K_{OW}$. Ce dernier est mesuré en ajoutant une petite quantité de SKK dans un système biphasique (*n*-octanol et eau, respectivement apolaire et polaire). Les SKK et SKS ont une grande valeur K_{OW} , impliquant une haute sorption sur les surfaces (ballast, particules, gravier, sable...) et une forte bioaccumulation.
- Répartition des composants solubles dans l'huile entre la phase solide (sédiments et sol) et l'eau (coefficient d'adsorption K_{SW}). Ces valeurs peuvent être estimée pour chaque couche de la voie si les propriétés de chacune sont connues.
- Mobilité des particules, en particulier des particules solides. Elle est mesurée par la préparation d'un éluat selon l'OLED (Dörr, 2024).

Ces paramètres évoluent avec le temps, avec notamment l'apport de matière organique et des particules provenant de l'usure du ballast (Dörr, 2024), (Steiner, 2024).

3.2 Détection et filtrage

Les différents tests sont effectués avec le HeadLub 90 car il est utilisé sur les réseaux TPF et ZB qui participent à cette étude. La solubilité dans l'eau des produits problématiques est faible. Ils ont donc tendance à être adsorber les éléments solides, le ballast ou les particules en suspension dans l'eau (Steiner, 2024). En cas de forte pluie, ces particules sont emportées et peuvent se retrouver dans le corps filtrant.

La qualité de filtrage des eaux dépend très fortement de la structure de la voie. Le Tableau 2 présente l'effet de chaque élément dans trois types de drainage. L'utilisation de sable à la place de gravier dans le corps filtrant de la tranchée drainante est par exemple meilleure.

Type de drainage	Lieu de l'effet de rétention					
	Corps de la voie	Épaulement	Tranchée drainante	Terrain naturel	Eaux superficielles	STEP
Épaulement	+	+		+ à ++		
Tranchée drainante avec infiltration	+	+	+ à +++	+ à ++		
Tranchée drainante avec évacuation	+	+	+ à +++		(+)	+ à ++

Tableau 2 Types de drainages et rétentions des polluants. La rétention est spécifique à la substance et dépend de la conception des composants. La biodégradation n'est pas prise en compte. + faible rétention, ++ rétention moyenne, +++ rétention élevée. (Steiner, 2024).

La qualité du filtre dans la tranchée drainante s'améliore aussi avec le temps. Avec les dépôts qui s'accumulent, un filtre secondaire se forme sur le corps filtrant. (Steiner, 2024)

4 Procédures de tests

4.1 En laboratoire

Les méthodes en laboratoire visent à simuler la solubilité et le comportement de sorption des SKK dans la voie ferrée, en particulier dans le système de drainage, selon un procédé simple et peu coûteux. Si nécessaire, cela permet aisément de mettre en place des variations. Il s'agit d'estimer si les composants du SKK peuvent être lessivés dans le système de drainage. (Dörr, 2024).

Les lubrifiants solides (cuivre, aluminium, graphite) ne sont pas dangereux dans les quantités attendues pour SKK. Selon l'ECHA (European Chemicals Agency), aucun risque n'a été classifié pour l'aluminium et le graphite. Le cuivre est très toxique pour la vie aquatique. A titre indicatif, l'annexe 3.2 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEau) indique une valeur limite de 0,5 à 1 mg/L de cuivre (total) pour le déversement des eaux industrielles dans les eaux ou dans les égouts publics. De manière générale, on estime que les métaux mentionnés libèrent peu d'ions. Lorsqu'ils sont libérés, ils sont supposés se lier par sorption au ballast, au gravier et au sable ainsi qu'à la matière organique qui s'accumule au fil du temps. La conclusion est que des quantités négligeables de métaux dissous sont rejetées dans les eaux usées. (Dörr, 2024).

Une série d'autres processus tel que la volatilisation, la dégradation par des micro-organismes et par le rayonnement solaire et distribution le long du rail par le passage des trains ne sont pas considérés ici. Chacun de ces processus réduit les risques de pollution des eaux. (Dörr, 2024).

Le comportement de dissolution et de sorption des SKK et de leurs composants est déterminé selon la méthode de préparation des éluats de l'OLED adaptée selon les propriétés des SKK suivantes :

- **Solubilité des composants organiques et inorganiques.** 1 g de SKK est étalé sur les parois d'un récipient. 900 g d'eau y sont ajoutés (Figure 2 à gauche). Le mélange est intensément brassé durant 24 h (Figure 2 au centre). La phase solide est séchée et pesée pour en déduire, de manière complémentaire, la solubilité dans l'eau. La phase aqueuse (appelée éluat) est utilisée pour deux mesures. La concentration de cuivre et d'aluminium est mesurée par ICP-OES. Les composants organiques dissous sont extraits avec du *n*-hexane et analysé par GC-FID (Figure 2 à droite). Le processus complet est présenté dans (Dörr, 2024).



Figure 2 Solubilité dans l'eau. Préparation avant le mélange (gauche), durant le mélange (centre) et durant l'extraction des composants organiques par *n*-hexane (droite). (Dörr, 2024).

- **Sorption du SKK sur de la matière organique.** 1 g de SKK est réparti sur 90 g de matière organique, du paillis d'écorce (Figure 3) ou des copeaux de bois (Figure 4). 900 g d'eau sont ajoutés. Le mélange est agité pendant 24 h. Le même procédé est utilisé sans le SKK pour exclure une contamination venant de la matière organique. L'éluat est traité de la même manière que pour la solubilité dans l'eau.



Figure 3 Mélange de paillis d'écorce et de SKK dans l'eau avant le mélange (gauche) et après le mélange (centre). Éluat en résultant (droite).



Figure 4 Mélange de copeaux de bois et de SKK dans l'eau avant le mélange (gauche) et après le mélange (centre). Éluat en résultant (droite).

- **Libération d'ions métalliques dans l'eau.** 1 g de matière solide de SKK est mélangé dans 1000 g d'eau. Pendant 5 jours, le mélange est brassé vigoureusement. Toutes les 24 heures, un échantillon est prélevé et la concentration de métaux est détectée par ICP-OES.
- **Sorption d'ions métalliques** provenant de composants solides du SKK sur la matière organique par circulation de paillis d'écorce et de copeaux de bois dans des solutions aqueuses d'aluminium (jusqu'à 80 mg Al/kg) et de cuivre (jusqu'à 200 mg Cu/kg). (Dörr, 2024).

Le paillis d'écorce et les copeaux de bois sont facilement disponibles pour des essais et choisis comme matériaux organiques représentatifs apportés dans la zone de la voie, tels que les branches, les feuilles, etc. et leurs produits d'altération. Dans le cadre de cette étude, de l'eau déminéralisée est utilisée. Contrairement à l'eau naturelle (pluie, eau de fonte), sa composition est bien définie, notamment sa teneur en sels dissouts. La réalisation en laboratoire se fait dans les conditions ambiantes (environ 25°C). (Dörr, 2024).

Afin de confirmer les résultats sur la solubilité des SKK à l'aide des éluats, la méthode d'essai de lavage à l'eau (DIN EN 15427-2-1:2022-07, annexe B ; Figure 5) est adaptée. Dans ce cas, une plaque métallique préparée avec un film de SKK est sans cesse arrosée d'eau. Après « l'arrosage », la perte de masse de SKK est utilisée pour obtenir une estimation de la solubilité (Figure 6). (Dörr, 2024).

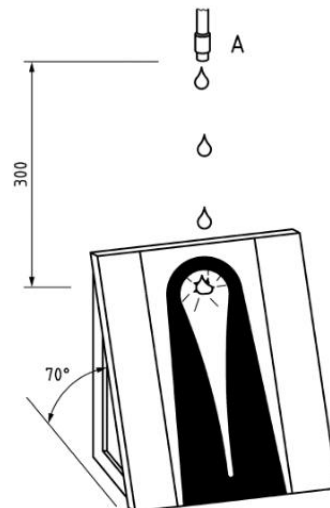


Figure 5 Test de lavage selon DIN EN 15427-2-1. (Dörr, 2024).

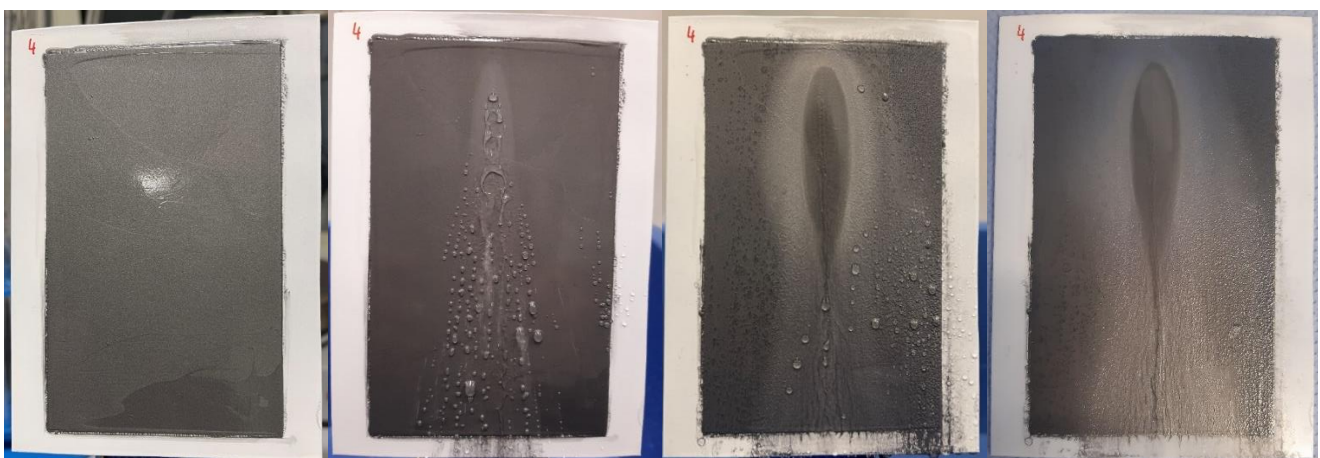


Figure 6 Test de lavage. De gauche à droite : la plaque recouverte de SKK avant l'essai, durant l'essai, à la fin de l'essai et après séchage. (Dörr, 2024).

Ce concept de méthode en laboratoire est testé avec trois produits de conditionnement.

Le test de lavage est modifié en accord avec la R RTE 21110 (Infrastructure et ballast – Voie normale et métrique ; (Däppen, 2015)) de manière que l'eau de « de pluie » soit dirigée sur des couches définies dans la R RTE 21110 du ballast (30 cm) comme partie de la superstructure ainsi que du gravier (50 cm défini par (Dörr, 2024)) et du sable (30 cm) comme parties du drainage. Le matériau est versé dans des récipients appropriés, munis d'une petite ouverture en bas pour l'écoulement de l'eau. Les plaques sont préparées avec différentes quantités de SKK et arrosées de manière définie, notamment par séquences de 15 minutes, comme indiqué dans la R RTE 21110. On observe si et quand le SKK est emporté avec l'eau d'écoulement, ce qui est visuellement reconnaissable aux particules solides dans le SKK. (Dörr, 2024).

4.2 Sur le terrain

L'étude *in situ* est effectuée par Dr. M. Steiner de la Haute école spécialisée bernoise (BFH – *berner Fachhochschule*). Le but de ces mesures est de détecter les produits de SKK ou ses composants dans l'eau du drain. L'étude se base sur l'analyse des éléments dissous ou en suspension dans des échantillons d'eau collectés dans les drains afin de déterminer si l'agent de conditionnement atteint l'environnement et, le cas échéant, la quantité de produits dangereux.

Afin de détecter ces rejets, deux substances sont utilisées comme indicateurs du HeadLab. C'est-à-dire qu'ils sont présents dans le SKK, mais absents des autres graisses et huiles utilisés sur la voie. La concentration de différents polluants comme le cuivre, zinc, fer et aluminium sont mesurées ainsi que celle des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Le SKK n'est pas la seule source de ces polluants. On les retrouve dans le SKS, les semelles de freins, les produits d'imprégnation des traverses en bois etc. (Steiner, 2024).

La collecte des échantillons est effectuée à quatre endroits, Bossonnens (FR), Gruyères (FR), Stans (NW) et Hergiswil (NW). Ces choix reposent sur des critères d'accessibilité aux eaux drainées ainsi qu'aux différentes couches filtrantes. Les échantillons sont récoltés manuellement pendant ou après une pluie.

Bossonnens : Les échantillons sont collectés à la gare de Bossonnens (Figure 7). Avant d'arriver dans le drain, l'eau traverse le ballast et un corps filtrant de sable. La géométrie de la voie respecte les normes actuelles de construction concernant l'évacuation des eaux des installations ferroviaires. Les échantillons sont collectés dans une conduite. Le conditionnement a débuté en décembre 2022. Une mesure 0, avant le début du conditionnement, a été effectuée.

Trois des sept rames circulant régulièrement sur la ligne sont équipées du système de conditionnement qui est uniquement utilisé si le taux d'humidité est inférieur à 85%. Les trains ne conditionnent que dans une direction. En moyenne, 16 trains conditionnent par jour, appliquant chacun environ 3070 mm³/km de SKK en cas de temps sec. (Pasquier, 2024). Cela correspond à un total de 59 g/km/j.



Figure 7 Situation des points de collecte d'échantillons d'eau drainée à Bossonnens et Gruyères. (Steiner, 2024)

Gruyères : Le point de collecte se situe à proximité du passage à niveau du Pas, dans une chambre. Les conditions permettant l'utilisation de SKK sont les mêmes qu'à Bossonnens, avec en moyenne 9 trains quotidien qui conditionnent chacun environ 1670 mm³/km. (Pasquier, 2024). Cela correspond au total à 18 g/km/j de SKK.

La collecte des échantillons est située dans une chambre d'accumulation (Figure 7).

Stans : Ce point de collecte de la ZB est mis en place à Stans afin de mesurer l'efficacité des couches filtrantes sur une durée plus longue que sur la ligne TPF. La géométrie de la voie y est similaire. L'eau s'écoule à travers le ballast et une couche de sable puis est collectée dans une chambre. Si les conditions de conditionnement sont réunies, 622 g/km/j de SKK sont dispensés d'après les données fournies par ZB.



Figure 8 Situation du point de collecte d'échantillons d'eau drainée à Stans. (Steiner, 2024)

Hergiswil : La Zentralbahn conditionne à cet endroit depuis 2016. Ce qui correspond à la plus longue période d'application en Suisse. La quantité de conditionnement journalière appliquée sur le rail atteint jusqu'à 637 g/km/j en fonction des conditions météorologiques (données fournies par ZB¹). La quantité est environ dix fois plus élevée que chez les TPF. L'étude de l'impact environnemental ayant débuté après le début de l'application du SKK, la situation initiale est inconnue. Le point de récolte de l'eau du drain se situe sur le pont sur le Steinibach (Figure 9). Il n'y a pas de couche filtrante ; l'eau de la voie est directement dirigée dans la chambre de collecte des boues puis rejetée dans le ruisseau. La chambre de collecte permet d'atténuer les effets de pic par dissolution.

La situation de Hergiswil présente deux avantages pour cette étude. D'une part, elle permet de mesurer la pollution dans le cas le plus défavorable : sans filtre. D'autre part, elle permet de connaître l'état de l'eau sans qu'elle ne soit filtrée permettant de mieux comprendre l'effet filtrant de la voie. Cependant, une partie des polluants sont adsorbés par les particules et se retrouvent dans les boues au fond dans la chambre.



Figure 9 Situation du point de collecte d'échantillons d'eau drainée à Hergiswil. (Steiner, 2024)

¹ La quantité annuelle peut être calculée en estimant le nombre de jours par année avec conditionnement. Ce facteur est estimé à environ 2/3.

5 Résumé des résultats

5.1 En laboratoire

L'ensemble de ce chapitre provient de (Dörr, 2024). La solubilité des SKK varie selon le procédé utilisé, mais l'ordre de grandeur reste le même. Celle des composants organiques dans l'eau est de l'ordre de 20 à 60 mg/kg. La matière organique, telle que le paillis d'écorce et les copeaux de bois, fixe le SKK, réduisant voire empêchant sa présence dans l'éluat (eau « sale ») et donc dans l'environnement en condition réelles.

La solubilité des composants inorganiques du SKK dans l'eau est étudiée pour l'aluminium et le cuivre. Même dans un essai de cinq jours avec les solides du SKK, seule une faible solubilité de l'aluminium est constatée, jusqu'à 4 mg/kg; la solubilité du cuivre reste plus faible que 1 mg/kg.

Le comportement de sorption des ions métalliques provenant des composants inorganiques des SKK est étudié pour les ions d'aluminium et de cuivre. Le paillis d'écorce retient très bien les ions cuivre et la majeure partie des ions aluminium. Dans le cas des copeaux de bois, l'adsorption est partielle (environ 40 à 60 %) à cause de l'osmose.

En se basant sur les résultats des méthodes en laboratoire effectuées dans les conditions d'essai appliquées, on peut conclure que

- chaque procédé de la méthode en laboratoire permet individuellement d'évaluer le comportement de solubilité et de sorption des SKK. La méthode de préparation de l'éluat selon l'OLED permet de larges variations de paramètres qui peuvent aller bien au-delà des variantes appliquées dans cette étude. La simplicité et la large applicabilité de la préparation de l'éluat permettent notamment d'étudier d'autres SKK ainsi que le comportement de solubilité et de sorption dans d'autres conditions d'intérêt, par exemple la qualité de l'eau, la température et les surfaces pour la sorption (ballast, gravier, sable, matière organique décomposée). La détection des composants organiques du SKK (huile de base, additifs) par extraction et GC-FID, comme décrit dans la méthode de détermination de l'indice d'hydrocarbures C10-C40 (DIN EN ISO 9377-2), est bien possible. La détermination des métaux dissous, notamment à partir des composants inorganiques du SKK, par spectrométrie d'émission optique (ICP-OES) est une méthode d'analyse conventionnelle avec de faibles limites de détection ;
- l'« arrosage » au moyen d'une méthode inspirée de l'essai de lavage à l'eau de la norme DIN EN 15427-2-1:2022-07 constitue une simplification de l'estimation de la solubilité des SKK dans l'eau. Comme elle repose sur une détermination gravimétrique, aucune connaissance de la composition du SKK n'est nécessaire. Cette méthode permet également de varier largement les paramètres, par exemple la qualité de l'eau, la température, la quantité de SKK ou l'épaisseur du film de SKK. Si les teneurs en huile et en solides du SKK sont connues, également sur la base d'une méthode gravimétrique, la solubilité peut être estimée spécifiquement pour les composants organiques du SKK ;
- la solubilité des composants organiques du SKK est faible. Elle est de l'ordre de 20 à 60 mg/kg, selon la méthode utilisée ;
- la solubilité des composants inorganiques du SKK est faible. Des ions d'aluminium et de cuivre ont été trouvés dans une plage de l'ordre du mg/kg, typiquement plus faible que 1 mg/kg ;
- le SKK est retenu dans une certaine quantité dans le ballast, le gravier et le sable. La détection a été faite dans des conditions de surconditionnement (quantité de SKK bien plus grande qu'en exploitation), qui ne correspondent pas à l'utilisation normale des SKK ;
- la matière organique (le paillis d'écorce et les copeaux de bois dans cette étude), peut lier au moins en partie les composants organiques du SKK et les métaux dissous (aluminium et cuivre), ce qui réduit considérablement les risques de pollution causés par le SKK.

En ce qui concerne la méthode de laboratoire pour évaluer le comportement de dissolution et de sorption du SKK, (Dörr, 2024) recommande de :

- Définir un SKK de référence : compte tenu des faibles concentrations attendues, il convient d'utiliser un SKK de référence lors de la réalisation des essais dans différents laboratoires. De cette manière, la comparabilité des SKK connus avec d'autres SKK est nettement améliorée.
- Quantifier les composants organiques des SKK dans l'eau : l'indice d'hydrocarbures C10-C40 selon la norme DIN EN ISO 9377-2 utilise comme référence pour la quantification le carburant diesel selon EN 590 et une autre huile lubrifiante inconnue. Étant donné que pour l'évaluation d'un SKK, contrairement à la norme, le SKK en question est connu, il convient d'utiliser pour la quantification, la phase huileuse, par exemple l'heptane soluble comme dans (Dörr, 2024).
- Évaluer qualitativement les composants organiques du SKK dans l'eau : en utilisant la phase huileuse du SKK, il est également possible de déterminer quels composants du SKK vont migrer de la phase huileuse vers l'eau. Cela peut être fait en comparant les chromatogrammes par GC-FID. Cependant, la GC-FID ne donne aucune information concernant la structure chimique des composants organiques du SKK dissous dans l'eau et extraits avec du *n*-hexane. En cas de besoin, une évaluation plus approfondie par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) est recommandée. La comparaison avec les spectres de masse de la base de données du NIST permet de tirer des conclusions sur la structure chimique des composants SKK trouvés. Il convient toutefois de noter que la composition des lubrifiants, y compris les SKK et les SKS, représentent le savoir-faire de leur fabricant. Pour ce type d'analyses détaillées, il est courant de conclure des accords, notamment des accords de confidentialité, avec les fabricants de lubrifiants. (Dörr, 2024).

5.2 Sur le terrain

Les résultats et analyses sont reproduits d'après (Steiner, 2024). Les concentrations des deux indicateurs, des HAP, de l'indice hydrocarbure, du cuivre, du zinc ainsi que du fer sont mesurées grâce aux échantillons prélevés aux différents endroits. En dehors des deux indicateurs qui permettent de mesurer la présence du SKK, il est impossible de déterminer la source des éléments mesurés.

On peut séparer les mesures en deux catégories, la première permet d'étudier le cas des voies construites selon les normes actuelles, avec toutes les couches filtrantes. Elle concerne les points de mesure de Gruyères, Bossonnens et Stans. La seconde catégorie concerne les échantillons non filtrés venant de Hergiswil. Ils permettent d'approcher les conditions de l'eau avant qu'elle entre dans la voie, mais fournit aussi des informations pour tous les lieux de type « pire scénario », sans effet filtrant. (Steiner, 2024).

5.2.1 Échantillons filtrés

Aucun des échantillons d'eau ayant traversé les couches filtrantes ne contient une quantité mesurable des deux indicateurs, d'indice hydrocarbure ou de HAP. Les substances sont en majorité adsorbées sur des particules qui restent dans le ballast ou le corps filtrant. Pour le zinc et le cuivre, on observe aussi des concentrations beaucoup plus faibles que sur le point de collecte d'Hergiswil. (Steiner, 2024).

Contrairement au cas non-filtré, les concentrations de cuivre et de fer sont faibles, voire indétectables. La situation est similaire à ce qui est constaté avec les eaux usées routières avec des traitements par filtre comparables. (Steiner, 2024).

Pour les mesures avec mesure 0 (sur les points de collecte TPF), on ne constate pas de différence avant et avec conditionnement. De plus, les mesures de Stans montrent que même après des années de conditionnement, la présence de SKK n'est pas détectable en aval du filtre. (Steiner, 2024).

5.2.2 Échantillons non filtrés

Les produits de SKK sont détectés dans les eaux de la voie, notamment les deux indicateurs et les HAP. Une partie des substances problématiques est adsorbée et se concentre dans la boue de la chambre de collecte. Les valeurs limites de l'Ordonnance sur la protection des eaux pour la concentration du zinc et du cuivre sont dépassées, mais reste en-deçà des eaux usées routières fortement polluées. (Steiner, 2024).

Le dépôt des boues de la chambre permet de récolter une partie mais pas l'entièreté des produits problématiques. Vraisemblablement, seules les grosses particules se déposent, les autres restent en suspension et se déversent dans le Steinibach. Par ailleurs, lors des grandes pluies, les boues sont emportées. (Steiner, 2024).

Les mesures ne permettent pas de connaître les concentrations dans les eaux à l'entrée de la chambre de collecte, équivalent à l'eau telle qu'elle entre dans le ballast. Mais cela permet de supposer qu'au moins une partie de valeurs limites sur la qualité de l'eau sont dépassées. (Steiner, 2024)

Pour les situations sans filtre, comme à Hergiswil, il est recommandé de veiller à retenir durablement au moins les particules. (Steiner, 2024).

Les boues collectées dans la chambre montrent la présence de polluants dont les deux indicateurs du SKK. Les concentrations de certains polluants dépassent parfois les valeurs limites des déchets pour les décharges de type A (déchets non-contaminés) et peuvent entrer dans la catégorie des déchets faiblement contaminés (décharges de type B) selon l'Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED). (Steiner, 2024).

6 Interprétation

6.1 Rétention des polluants et pollution des eaux de surfaces

L'eau usée des voies ferrées avec des couches filtrantes comparables à celles de Stans, Gruyères et Bossonnens peuvent être déversée dans un cours d'eau. Cela est vrai pour le conditionnement, mais aussi pour la lubrification du champignon du rail. Les polluants sont retenus par les différents filtres. (Steiner, 2024)

S'il y a un corps filtrant, les eaux peuvent être déversée dans un cours d'eau. En l'absence de celle-ci, les concentrations peuvent être au moins partiellement supérieures aux valeurs limites. Ces résultats peuvent être relativisés car la limite s'applique après un mélange complet dans le cours d'eau, alors que les mesures ont lieu dans le système de collecte. M. Steiner recommande, dans la mesure du possible, de traiter les eaux usées de la voie ferrée avec un corps filtrant, indépendamment de l'utilisation de SKK, en particulier si l'eau est collectée sur une longue distance et est déversée dans un ruisseau. (Steiner, 2024).

6.2 Pollution du ballast, de l'infrastructure et du corps filtrant

Durant sa durée de vie, le corps filtrant et le ballast se chargent en polluants. Lors des renouvellements, ces déchets doivent être traités correctement. Le SKK n'est pas la seule source d'hydrocarbures, HAP, cuivre et zinc mais il pourrait augmenter ces concentrations et donc les coûts d'élimination ou de recyclage. (Steiner, 2024).

Afin de déterminer la pollution du ballast et des matériaux de l'infrastructure, la concentration de polluants sur ceux-ci est mesurée lors des renouvellements. Du SKS est utilisé sur tous les lieux d'échantillonnage considérés. L'utilisation ou non de SKK n'a pas d'influence significative sur le niveau de pollution. En cas de présence de traverses en bois, les principales sources de pollution sont les produits d'imprégnation de celles-ci. A noter que les matériaux de la voie sans SKK, y compris sur les sections sans traverses en bois, dépassent parfois les limites pour les matériaux non contaminés selon l'OLED. (Steiner, 2024).

Les concentrations de polluants dans le ballast montrent que celui-ci n'en retient qu'une partie, estimée entre un quart et la moitié. Sans l'action d'autres couches filtrantes, l'eau est versée dans la nature chargée de différents polluants, ceci indépendamment de la présence ou l'absence de SKK. Cela démontre l'importance du type de matériau dans le corps filtrant de la tranchée drainante ; l'utilisation de ballast comme corps filtrant n'est pas recommandée. (Steiner, 2024)

Aucune analyse du corps filtrant n'est disponible. On peut néanmoins supposer que la qualité du filtre est maintenue même après une longue utilisation car les eaux usées de la voie constituent un filtre secondaire avec les particules qui se déposent. La durée de vie du corps filtrant est indépendante de l'utilisation de SKK. (Steiner, 2024).

6.3 Transférabilité des résultats aux autres produits de conditionnement

De nombreuses substances sont retenues dans le corps filtrant, en particulier si elles sont adsorbées par les particules, comme le cuivre, les HAP et les hydrocarbures. La présence de fer facilite l'adsorption. Pour transférer les résultats du HeadLub 90 de cette étude à d'autres produits de conditionnement, le facteur déterminant est la solubilité dans l'eau du SKK et de ses composants. Si elle est comparable, les résultats sont hautement transférables. Elle peut être mesurée par le coefficient de répartition octanol/eau (K_{OW}). Si la solubilité dans l'eau de composants ou du produit est plus élevée ou si la composition du SKK est fondamentalement différente du HeadLub 90, sa dangerosité dans l'eau doit être évaluée. (Steiner, 2024). (Dörr, 2024) propose un concept pour effectuer cette comparaison.

En cas de solubilité plus élevée, il faut déterminer la solubilité dans l'eau des substances dangereuses. (Steiner, 2024).

Les mesures sur le réseau de la ZB montrent que les corps filtrants sont aussi efficaces pour le SKS et la graisse à crémaillère. (Steiner, 2024).

7 Conclusion

Le produit de conditionnement HeadLub 90 utilisé notamment par les TPF et la ZB contient plusieurs substances dangereuses pour l'environnement. Les eaux qui ruissellent sur la voie en emporte une partie, impliquant, si elles ne sont pas traitées, une libération de polluants dans l'environnement. Les SKK ne sont pas les uniques sources de pollution de la voie. On trouve par exemple des hydrocarbures, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des métaux lourds comme le cuivre et le zinc dans les SKS, la poussière produite par l'abrasion, l'usure des sabots de freins ou les traverses en bois.

Les corps filtrants latéraux ont une influence déterminante sur le traitement des eaux de ruissellement. Leur présence permet de rejeter l'eau dans l'environnement. Ils filtrent en effet les polluants provenant du SKK et des autres sources. Le ballast joue aussi un rôle de filtre important, estimé entre 25 et 50% des polluants d'après les tests effectués sur le terrain. Il n'est néanmoins pas suffisant. La capacité à retenir les particules est déterminante. L'utilisation d'une tranchée drainante avec corps filtrant est recommandée, avec ou sans utilisation de SKK.

Pour mieux comprendre la question de l'effet de filtration et d'adsorption du matériau filtrant installé dans les tranchées drainantes, comme à Stans, Bossonnens et Gruyères, un essai sur le terrain peut être réalisé dans des conditions contrôlées. Un site idéal pour cela est Hergiswil, où les concentrations d'entrée et de sortie ainsi que le débit dans la sortie d'une telle couche, par exemple intégrée dans un anneau en béton, peuvent être mesurés.

La présence ou l'absence de SKK influence faiblement la pollution en HAP et hydrocarbures. Les coûts d'élimination des déchets de la voie ne sont donc pas significativement augmentés. En l'absence de traverse en bois, la situation est incertaine. Les matériaux de la voie pourraient passer de la catégorie de déchets non pollué à faiblement pollué.

Les résultats obtenus pour le Headlub 90 étudié dans cette étude sont transférables aux autres SKK pour autant que la composition est similaire et la solubilité dans l'eau aussi faible. Cette comparaison peut être effectuée selon la procédure de laboratoire présentée.

7.1 Recommandations

- Utiliser des SKK sans substances problématiques en se basant par exemple sur le label écologique européen pour les lubrifiants.
- En cas d'utilisation de SKK contenant des substances problématiques, comparer le comportement de solubilité d'un nouveau produit de conditionnement avec un SKK connu tel que le HeadLub 90.
- Indépendamment du SKK, traiter les eaux usées de la voie avec un corps de filtrage dans la tranchée drainante.
- Dans le cas où il n'est pas possible de filtrer l'eau de ruissellement, mettre en place un système pour au moins retenir les particules de manière permanente, soit par un filtre, soit en éliminant les boues régulièrement.
- Étudier la pollution du corps d'infiltration pour mieux comprendre la rétention des composants problématiques et préciser les exigences en matière d'élimination.
- Étudier la capacité de rétention du ballast pour confirmer que le ballast seul ne suffit pas à filtrer le SKK.

8 Répertoires

8.1 Références

- Brugger, E. (2022). *Compatibilité environnementale du conditionnement du champignon du rail*. Zentralbahn.
- CFF CoC WFF. (2020). Schienenkopfkonditionierung: Umweltverträglichkeit.
- Däppen, J. (2015). R RTE 21110 - Infrastructure et ballast.
- Dörr, N. (2024). *Spezifikation für Schienenkopfkonditionierungsmittel*. AC²T.
- Güldenapfel, P. (2022). *Grundlagenscanning Umfrage Bahnen*. RAILplus/KPZ Fahrbahn.
- Kling, W. (2017). R RTE 49410 - Lubrification des boudins sur les véhicules de chemins de fer - Voie normale.
- Pasquier, L. (2024). *Essais en service SKK aux TPF, RAILplusSF-00032*. RAILplus/TPF.
- Steiner, M. (2024). *Schienenkopfkonditionierung - Abschätzung der Gefährdung von Oberflächengewässern beim einjährigen Betrieb von Teststrecken und regulären Strecken (V1.1)*. BFH.
- Steiner, M., Homes, C., & Rütli, R. (2021). *Schienenkopfkonditionierung, Abschätzung der Gefährdung von Oberflächengewässern beim einjährigen Betrieb von Teststrecken*. BFH.

8.2 Figures

- Figure 1 Arbre de décision inspiré de la stratégie des CFF. (Brugger, 2022) d'après (CFF CoC WFF, 2020).7
- Figure 2 Solubilité dans l'eau. Préparation avant le mélange (gauche), durant le mélange (centre) et durant l'extraction des composants organiques par *n*-hexane (droite). (Dörr, 2024).10
- Figure 3 Mélange de paillis d'écorce et de SKK dans l'eau avant le mélange (gauche) et après le mélange (centre). Éluat en résultant (droite).11
- Figure 4 Mélange de copeaux de bois et de SKK dans l'eau avant le mélange (gauche) et après le mélange (centre). Éluat en résultant (droite).11
- Figure 5 Test de lavage selon DIN EN 15427-2-1. (Dörr, 2024).12
- Figure 6 Test de lavage. De gauche à droite : la plaque recouverte de SKK avant l'essai, durant l'essai, à la fin de l'essai et après séchage. (Dörr, 2024).12
- Figure 7 Situation des points de collecte d'échantillons d'eau drainée à Bossonnens et Gruyères. (Steiner, 2024)13
- Figure 8 Situation du point de collecte d'échantillons d'eau drainée à Stans. (Steiner, 2024)14
- Figure 9 Situation du point de collecte d'échantillons d'eau drainée à Hergiswil. (Steiner, 2024)14

8.3 Tableaux

- Tableau 1 Liste des produits de conditionnement utilisés en 2023 par les chemins de fer métriques suisses.6
- Tableau 2 Types de drainages et rétentions des polluants. La rétention est spécifique à la substance et dépend de la conception des composants. La biodégradation n'est pas prise en compte. + faible rétention, ++ rétention moyenne, +++ rétention élevée. (Steiner, 2024).9