

Revue Générale des Chemins de Fer



**Géométrie du contact
et défauts de surface
Minimiser le risque
d'apparition de head-checking**

**« Les grands
trains meuleurs
sont surtout
rentables sur de
longs tronçons de
pleine voie, mais
ce qu'il me faut
c'est une machine
polyvalente pour
traiter également
des cas
particuliers.**

**A qui puis-je
m'adresser? »**



“A Speno”

Speno a développé une flotte de trains meuleurs très innovants, capables de répondre parfaitement à vos besoins particuliers de meulage.

En fonction du domaine d'application du meulage, de l'importance du chantier et des durées d'interception de la voie, le concept de modularité permet plusieurs combinaisons de machines.

Adressez-vous à Speno !



SPENO INTERNATIONAL SA
26, Parc Château-Banquet
C.P. 16
1211 Genève 21, Suisse
Tél : +41 22 906 46 00
Fax : +41 22 906 46 01
e-mail : info@speno.ch

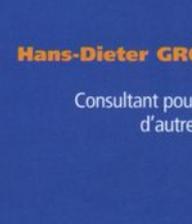
Géométrie du contact et défauts de surface Minimiser le risque d'apparition de head-checking

Dossier



Wolfgang SCHÖCH

Directeur des Affaires Extérieures
chez Speno International SA à
Genève



Hans-Dieter GROHMANN

Consultant pour la DB AG et
d'autres partenaires



Introduction

Les rails sont un élément incontournable pour tous les types de voies de chemins de fer. Ils constituent un élément essentiel de la voie, le composant le plus onéreux. La fonction du rail est double :

- ils transmettent les charges dynamiques des roues vers la structure de soutènement et de ce fait, les forces verticales, horizontales et longitudinales doivent être prises en considération ;
- ils assurent également le guidage correct du matériel roulant tant en alignement qu'en courbe.

La surface de contact entre la roue et le rail, une zone de la taille d'une pièce de monnaie, doit supporter des contraintes de surface élevées. La géométrie des deux volumes en contact doit être un équilibre entre la qualité du roulement et la transmission optimum des forces dans la limite définie par la résistance des matériaux.

Par l'essence même de sa fonction, le rail supporte des charges de

façon répétitive et il est de ce fait sujet à l'apparition de défauts de surface, bien que sa production fasse appel à de l'acier de haute qualité. Les défauts de surface, souvent appelés défauts de fatigue de contact (DFC), peuvent apparaître après un certain nombre de cycles de charges.

Le head-checking est une forme particulière de défauts de fatigue de contact. Il est connu de longue date sur les réseaux transportant du fret (heavy haul) où les charges par essieu de 30 tonnes et plus sont courantes. Dans ces conditions, les défauts de surface ont toujours été un problème majeur et constituent le facteur prédominant dans la planification du meulage du rail. Les charges par essieu élevées sont à l'origine des défauts de fatigue de contact. Ces phénomènes bien connus portent des noms en fonction de leur gravité : head-checking, écaillage et enfin défilage.

Avec des vitesses plus élevées et l'augmentation des charges par

essieu, les défauts de surface sont aussi devenus un sujet de première importance pour les chemins de fer conventionnels. Jusqu'à présent, l'usure et les défauts internes des rails étaient les facteurs déterminants pour décider d'un retrait de rail. Aujourd'hui, les défauts de fatigue de contact tels que le head-checking et les squats sont de plus en plus décisifs dans le programme de renouvellement des rails.

La combinaison de charges par essieu importantes et de vitesses élevées, ainsi que les efforts de traction plus importants fournis par les locomotives modernes, engendrent des problèmes dus aux défauts de fatigue. Une série de programmes de recherche appliquée est actuellement entreprise pour comprendre l'influence des caractéristiques des matériaux utilisés. Une autre partie de la recherche s'attache à la géométrie du contact entre la roue et le rail. Il y a une interaction et une interdépendance entre ces deux facteurs. L'un change la forme de l'autre et vice-versa.

Les roues empruntent tout type de voie – en alignement et en courbe – et à cause de cela, le contact peut se faire en différents points, de la bande de roulement jusqu'au boudin. Les rails, étant l'élément fixe, subissent toujours le contact en un point déterminé alors que la zone de contact des roues peut varier de façon considérable en fonction de son usure et de son entretien. Il est usuel de tourner les roues avec un profil de compromis qui satisfait plus ou moins tous les cas de contact sur le rail. D'un autre côté, les rails sont reprofilés avec une forme bien définie pour satisfaire un besoin particulier, tel que permettre un roulement stable en alignement, faciliter l'inscription en courbes de rayon serré ou réduire le développement des défauts de fatigue.

Les défauts de surface peuvent être éliminés totalement ou partiellement par meulage en fonction de leur profondeur. Simultanément, le profil transversal peut être corrigé afin qu'il se marie mieux avec le profil des roues. De ce fait, le head-checking se développe plus lentement et, avec un meulage cyclique, il ne peut plus devenir un défaut grave. La vie utile du rail s'en trouve considérablement allongée.

Recherche expérimentale

Les chemins de fer allemands (DB AG) doivent faire face depuis un certain temps à des défauts de surface. Du head-checking se développe très rapidement dans certaines zones après la pose de nouveaux rails. D'une façon caractéristique, les rails hauts dans des courbes serrées ont tendance à montrer, les premiers des défauts de fatigue de contact.

La DB meule ses rails depuis très longtemps. La raison en était l'élimination de l'usure ondulatoire avec un re-profilage simultané du champignon du rail. Contrairement aux chemins de fer de type « heavy

haul », le traitement par meulage des défauts de surface n'est pas encore une pratique courante. Ce n'est que récemment que la technologie du meulage a été prise en considération pour la réduction des défauts de fatigue de contact après un renouvellement des rails.

Un des sujets souvent discutés était de savoir si le meulage pouvait (ou devait) déjà éliminer totalement les défauts existants, et quels seraient les seuils d'intervention et les stratégies de meulage (cycles de meulage et enlèvement de métal) qui devraient être utilisés pour maintenir, de façon économique, le rail dans un état acceptable.

Pour en savoir plus, il a été décidé d'entreprendre une recherche expérimentale basée sur les théories des contraintes dues au contact, les défauts de fatigue et les conditions de roulement. Seront expérimentés plusieurs types de profils pour étudier leur influence sur l'apparition et le développement de head-checking. Le but est de définir des tolérances admissibles d'un profil cible adapté, qui retardera la réapparition de head-checking aussi longtemps que possible après un meulage. Le but final est de définir la stratégie de meulage la mieux adaptée et la plus économique pour lutter contre les défauts de surface.

Conditions des essais

Une ligne conventionnelle très chargée, empruntée par un trafic mixte et sur laquelle on pouvait constater des défauts de surface a été sélectionnée pour le test. Plusieurs courbes ont été choisies et divisées en tronçons de façon à pouvoir étudier l'influence de la forme géométrique du champignon du rail ainsi que la qualité de l'acier utilisé.

La DB AG a fixé un profil cible unique pour tout le meulage. Ce pro-

fil est une variante du profil UIC 60 posé au 1 : 40^{ème}. Le rayon central de 300 mm couvre une zone plus petite, et de ce fait le profil cible à obtenir par meulage est légèrement plus convexe que le profil UIC 60 d'origine.

Les spécifications allemandes pour le meulage des rails définissent des tolérances du profil transversal en fonction de la vitesse admissible localement sur la ligne. La tolérance est mesurée radialement dans une zone de 25 à 30 mm à partir de l'axe du champignon du rail allant vers le congé intérieur. Pour des lignes avec une vitesse inférieure à 140 km/h, la déviation maximum par rapport au profil cible doit être comprise entre +0,7 mm et -1,0 mm. Pour des lignes avec des vitesses supérieures à 160 km/h, les tolérances sont respectivement de +/-0,3 mm.

Les profils à tester ont été meulés avec des tolérances très précises, de +0,7 mm, +0,3 mm, +/-0,0 mm, -0,3 mm et -1,0 mm. Chaque profil du champignon du rail a été obtenu à partir de rails UIC 60 dans les deux nuances : standard 900 A et rails traités thermiquement.

Il a été préparé 20 tronçons de voie selon les paramètres cités ci-dessus, à savoir pour les deux qualités d'acier (standard 900A et traités thermiquement) deux jeux de cinq profils transversaux ont été meulés aux tolérances définies. Chaque tronçon de test mesurait 100 mètres de long et possédait deux points de mesure. Au total, 40 points d'enregistrement ont été définis.

Un des principaux problèmes était de définir comment faire les mesures et la classification des défauts de surface, car il n'existe pas de méthode réelle pour faire du contrôle non-destructif. Une nouvelle méthode de classement des défauts de fatigue du type head-checking a été utilisée au moyen de poudre aimantée rendant visible le head-checking sous un faisceau de lumière ultraviolette. Ce procédé présente l'avantage de

permettre la superposition exacte des images du head-checking avec celles des enregistrements du profil transversal.

La totalité du head-checking a été éliminée par meulage. Cette méthode permet une surveillance continue du développement sans être influencée par un head-checking résiduel. Des photos de la bande de roulement ont été prises associées à l'enregistrement du profil transversal avant et après le meulage.

Le développement des défauts de fatigue sur différents profils obtenus par meulage a été suivi et documenté sur des intervalles de trois mois.

Premier rapport intermédiaire

La durée des essais n'était pas définie. Deux ans après avoir effectué le meulage, un premier rapport intermédiaire a été établi et les résultats ont été publiés [1] [2].

Les principales conclusions étaient :

- le profil cible, habituellement utilisé pour le meulage, peut être utilisé pour le traitement du head-checking ;
- la valeur actuelle des tolérances du profil transversal n'a pas besoin d'être changée ;
- les formes du profil transversal qui étaient différentes à l'origine, ont toutes conduit à un profil d'usure uniforme ;
- le développement du head-checking est moins important sur les rails traités thermiquement ;
- les rails de nuance 900A présentent moins de head-checking dans des courbes à rayon serré et ceci est dû à la plus grande usure latérale ;
- la gravité du head-checking est directement proportionnelle à la variation des tolérances positives par rapport au profil cible et diminue lorsqu'on augmente les tolérances négatives par rapport au profil cible ;

- pour diminuer le développement du head-checking, des tolérances comprises entre +/-0,0 et -1,0 mm sont bien adaptées.

Ces conclusions sont bien entendu seulement valables pour les conditions spécifiques de l'expérimentation (trafic mixte sur une grand ligne conventionnelle européenne).

D'une façon plus générale, le rapport établit que le profil transversal des rails qui se marie le mieux avec la majorité des profils des roues actuels diminue le risque d'apparition de défauts de fatigue, et de ce fait devrait être considéré comme profil cible pour maîtriser les défauts de fatigue.

Deuxième rapport intermédiaire

Trois ans après le meulage, une nouvelle série de mesures a été décidée de façon à définir plusieurs cycles de meulage anti-head-checking. Afin de bénéficier de l'information accumulée lors des premiers tests, les résultats de ceux-ci étaient incorporés.

Des échantillons de rails supplémentaires ont été prélevés dans les tronçons d'essais et soumis à un examen destructif de façon à déterminer avec exactitude la forme et la profondeur des fissures. Cette technique a permis d'établir une corrélation entre la gravité du défaut et son apparence visuelle en surface.

Appréciation de l'apparence visuelle du head-checking et du développement de l'usure

Trente-neuf mois d'un suivi régulier ont donné une vue plus précise du développement du head-check-

ing et de l'usure. Après 20 mois d'essais, on est arrivé à une première conclusion : des tolérances positives accélèrent l'apparition de head-checking et son développement, alors que des tolérances négatives ont un effet retardateur.

Les contraintes de contact initiales sont fonction du profil transversal obtenu par meulage ou des tolérances choisies. La localisation et l'augmentation de la surface affectée par le head-checking en dépendent.

Une constatation importante : après une certaine période, le mécanisme d'usure créait un profil unique qui était très près du profil cible normalement recommandé pour le meulage.

Le profil ainsi obtenu (« profil d'usure adapté » = PUA) se stabilise après un certain temps (tPUA) qui est fonction de la forme du profil meulé. La durée est bien entendu fonction du matériau (nuance 900A ou traité thermiquement) et de la tolérance par rapport au profil cible de meulage (voir tableau 1).

Tolérance [mm]	tPUA [mois]	
	nuance 900A	traité thermiquement
-1	-	18
-0,8	6,5	-
-0,3/-0,2	6,5	14
0	6,5	8
+0,3	6,5	17
+0,5	11	-
+0,7	-	22

Tabl. 1 - Durée moyenne de stabilisation du profil d'usure adapté (tPUA)/tolérances d'exécution

Avec l'acier nuance 900A, le tPUA est plus long pour les tolérances au-dessus de +0,3 mm. Avec les rails traités thermiquement, le tPUA augmente avec des tolérances supérieures à 0,3 mm tant dans le sens positif que négatif.

Pendant la période comprise entre le moment du meulage et le moment où l'on atteint le profil d'usure adapté (tPUA), le profil meulé (ainsi que les tolérances de meulage) est l'élément déterminant dans l'apparition du head-checking. Une fois que l'on a atteint de façon uniforme le profil d'usure adapté, ce sont les conditions d'exploitation qui guident le processus d'apparition des défauts de fatigue.

Recherche métallurgique et mesure de la profondeur du head-checking

En neuf endroits (sur les 40 tronçons d'essai) on a coupé des morceaux de rail (env. 40 mm de longueur), après 37 mois d'observation. Ces échantillons ont été examinés avec soin. Le choix des échantillons a été défini sur leur apparence visuelle, leur nombre devant être limité pour des raisons opérationnelles. Des coupes longitudinales ont été faites au milieu de la zone présentant des défauts de fatigue.

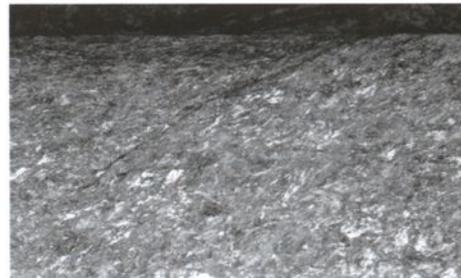
Les figures 1 et 2 montrent une coupe longitudinale (perpendiculaire à la surface de contact) d'un développement typique de fissure au point de mesure n° 6. La profondeur des fissures a été mesurée à 0,58 mm.

La coupe transversale dans la partie basse du congé intérieur du rail montre une déformation plastique, un décollement du métal et des modifications métallurgiques (figures 3 et 4).

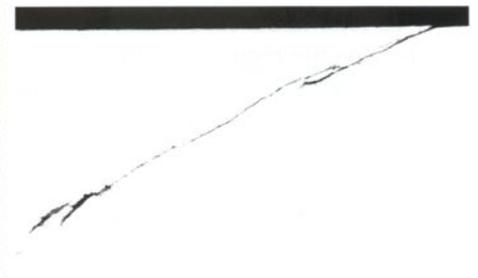
De la même façon, les figures 5 et 6 ainsi que 7 et 8 montrent la situation de l'échantillon 33 sur un rail traité thermiquement. De façon caractéristique, on trouve un espacement plus réduit entre fissures et de ce fait, on reconnaît facilement un champ plus dense de fissures. Les plus grandes profondeurs mesurées ici étaient de 0,30 mm.

Les profondeurs des fissures mesurées sur les neuf échantillons sont données dans le tableau 2.

Exception faite du point de mesure n° 7, toutes les valeurs sont relativement proches les unes des autres



100:1



100:1

Fig. 1 et 2 - Point de mesure n° 6, nuance 900A, fissure en surface - coupe longitudinale

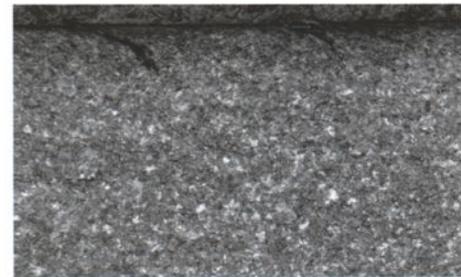


50:1



50:1

Fig. 3 et 4 - Point de mesure n° 6, nuance 900A, extrémité de la zone de contact au congé intérieur

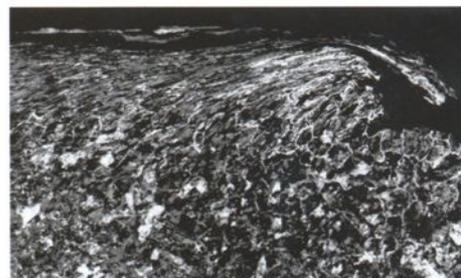


50:1



50:1

Fig. 5 et 6 - Point de mesure n° 33, traité thermiquement, fissure en surface – coupe longitudinale



100:1



100:1

Fig. 7 et 8 - Point de mesure n° 33, traité thermiquement, extrémité de la zone de contact au congé intérieur

PM	nuance acier	tolérance exécutée mm	PU mois	estimation après n mois				profondeur fissure mm
				PU	20	35	37	
6	900A	-0,8	6,5	1	1,5	2,5	2,5	0,58
7	900A	-0,3	6,5	1,5	4,5	4,5	4,5	0,36
9	900A	+0,3	6,5	2	4	4	4	0,66
13	900A	0	6,5	1,5	2,5	2,5	2,5	0,66
36	900A	+0,5	13	2	2,5	2,5	3	0,55
24	TT	-0,3	17	2	2,5	2,5	2,5	0,24
27	TT	0	17	2,5	3	3	3	0,21
32	TT	-1,0	20	2	2,5	2,5	3	0,27
33	TT	-0,3	13	2	3	3	3	0,30

PM: point de mesure
PU: profil d'usure réalisé

Tabl. 2 - Estimation de l'apparence visuelle/profondeur fissure mesurée

(nuance 900A et traité thermique). Les profondeurs des fissures dans les rails traités thermiquement sont plus petites dans le rapport 0,5 à 0,3 en comparaison au rail standard nuance 900A.

En plus de l'incertitude existante sur le choix des échantillons dans les zones les plus représentatives, il faut tenir compte que l'apparition des fissures et leur taux de développement varient avant et après avoir atteint le profil d'usure adapté (PUA).

Estimation visuelle du head-checking

La mesure de la profondeur des fissures ayant leur origine en surface n'est pas encore possible avec des méthodes non destructives. De ce fait, il n'est pas possible d'établir des programmes de meulage en utilisant la profondeur des fissures. Nous sommes donc limités à faire une inspection visuelle et à réaliser des observations.

Une échelle de classification allant de 1 à 5 (aucun head-checking visible – head-checking important) a été utilisée pour décrire la gravité de la fatigue. Les échantillons prélevés ont permis de mesurer la profondeur réelle des fissures. Ces valeurs ont été comparées avec l'estimation visuelle à partir de l'échelle de classi-

fication en tenant compte du développement de l'estimation visuelle dans le temps (voir tableau 2).

■ Échéance au moment de la stabilisation du profil d'usure adapté (tPUA)

Avec la nuance 900A, le profil avec les tolérances comprises entre +/-0 et -0,8 mm a obtenu de meilleurs résultats qu'avec les tolérances positives (0,3 et 0,5 mm).

Les résultats sont similaires dans le cas des rails traités thermiquement, mais le réseau de fissures est plus visible en raison de la durée plus importante et de l'usure moindre dans la zone soumise à la fatigue.

■ Situation trois ans après le meulage (nuance 900A)

Tolérance -0,8 mm

Faisceau important de fissures, des fissures isolées ne couvrent pas toute la surface, une large bande de contact s'est établie après un long délai, due à une adaptation d'usure durable; par conséquent faible profondeur des fissures.

Tolérance +/- 0 mm

Quelques longues fissures relativement éloignées les unes des

autres, moins d'usure mais plus grandes profondeurs qu'avec la tolérance -0,8 mm.

Tolérance +0,3 mm

Des fissures plus longues, proches les unes des autres, même profondeur qu'avec la tolérance 0.

Tolérance +0,5 mm

Réseau très étendu de fissures comme avec la tolérance -0,8 mm, un taux d'usure plus important explique la plus faible profondeur des fissures.

Avec l'augmentation de la largeur de la zone de fatigue, la profondeur des fissures diminue; moins de fissures isolées qui tendent à être plus profondes.

■ Situation 3 ans après le meulage (traité thermiquement)

La largeur de la zone des fissures à peu près identique à celle obtenue avec la nuance 900A, mais réseau de fissures plus dense. Tout comme pour la nuance 900A, l'accumulation de plus petites fissures indique qu'elles sont moins profondes que les fissures isolées.

Cette étude a clairement démontré que la corrélation entre l'aspect visuel en surface et la profondeur réelle des fissures n'est pas possible.

Conclusions et recommandations

L'influence du profil réalisé et des tolérances réellement obtenues a été suivie par des inspections visuelles fréquentes et par une étude métallurgique.

Sur la base des observations faites pendant une durée de trois ans après la totale élimination du

head-checking, on peut tirer plusieurs conclusions, certaines ont confirmé des constatations déjà faites, d'autres remettent en cause des résultats déjà obtenus :

- il y a une différence de comportement entre le rail standard de nuance 900A et le rail traité thermiquement ;
- le profil cible universel tel que préconisé par la DB AG est très proche du profil d'usure adapté (PUA) et de ce fait il peut parfaitement être utilisé pour combattre les défauts de fatigue de contact. Comme le profil d'usure adapté assure les conditions de contact les plus favorables, il garantit un taux d'usure plus faible en association avec un faible taux de croissance des fissures ;
- le PUA s'établit de lui-même assez rapidement avec des tolérances du profil comprises entre -0,8 et +0,3 mm avec des rails de nuance 900A et des tolérances comprises entre -0,3 et +0,3 mm avec des rails traités thermiquement. Ces tolérances devraient être retenues pour le meulage du profil en travers ;
- une stratégie de meulage optimale devrait tendre à reprofiler avec un minimum d'enlèvement de métal et d'usure. Dans le but de définir la meilleure stratégie, les recherches ci-

dessus décrites se poursuivent. Un reprofilage a déjà été entrepris ;

- il sera nécessaire de prélever des échantillons à certains intervalles après avoir atteint un PUA stable de façon à pouvoir mesurer de manière exacte la profondeur réelle des fissures. N'importe quelle méthode non destructive qui pourrait être disponible dans le futur faciliterait considérablement cette recherche ;
- une comparaison des usures à intervalles trimestriels permettra de prévoir l'évolution de l'usure. Plusieurs cycles de meulage (après 1, 2 et 3 ans), devraient aussi être expérimentés de façon à obtenir assez d'informations pour l'évaluation. À la fin d'une nouvelle période d'observation de trois ou quatre années, on espère obtenir de nouveaux résultats qui permettraient de trouver la stratégie de meulage optimale ;
- la combinaison des connaissances sur le développement des fis-

sures et l'évolution de l'usure (de façon naturelle par la circulation et artificielle par le meulage) permettra finalement de prolonger au maximum la vie utile des rails.

Cette étude est le résultat d'une étroite coopération entre l'organisation d'un chemin de fer, essayant de réduire le coût de la maintenance, et un entrepreneur essayant d'améliorer l'efficacité du meulage. L'accent a été mis sur la nécessité de combiner les théories de la recherche fondamentale avec une validation par la pratique.

Les résultats présentés suite à ces travaux de recherche devraient inciter à poursuivre la recherche fondamentale en vue de la définition de profils cibles et l'établissement de tolérances ainsi que leur influence sur les contraintes de contact.

Références

[1] W. Schöch, «Joint Research by Railway and Contractor on Headcheck Prevention», IHHA STS-Conference «Wheel/Rail Interface» Moscou 1999, résumé d'une conférence

[2] H.D. Grohmann, «Untersuchung des Betriebsverhaltens modifizierter Schienenprofile – Einfluss der Schleiftoleranzen auf die Headcheck Bildung», rapport non publié, DB AG, 12/1998