

Modélisation et simulation / Modelling and simulation

Prévention de l'usure ondulatoire en transport ferroviaire : revue de la littérature

C. Collette

U.L.B. Department of Mechanical Engineering, 50, av. F.D. Roosevelt, 1050 Brussels, Belgium
e-mail : Christophe.Collett@ulb.ac.be

Mots-clés :

Usure ondulatoire; dynamique ferroviaire; maintenance; contact roue-rail

Résumé – Après plus d'un siècle de recherche, l'usure ondulatoire reste encore un problème majeur auquel doit faire face l'industrie ferroviaire. À l'heure actuelle, on dépense encore environ 3 millions d'euros par an pour traiter complètement (y compris le renouvellement) l'UO sur les quelques lignes de métro de Bruxelles, et plus de 60 millions d'euros en Europe. Bien que la connaissance de ce phénomène ait fortement augmentée, les solutions permettant de réduire cette usure restent difficiles à mettre en œuvre. L'objectif de cet article est de définir brièvement les mécanismes qui sont à l'origine de l'UO et présenter les différents types d'UO qui ont été répertoriés. Ensuite, pour chaque type, une liste des moyens actuels de les traiter est proposée, reprenant les développements les plus récents. Quand elle est disponible, une évaluation des coûts respectifs de ces solutions est également fournie.

Key words:

Abstract – After more than a century of research work, rail corrugation remains one of the major concern of the railway industry. Nowadays, the treatment of rail corrugation costs about 3 million euros for the few lines of the Brussels subway, and more than 60 million euros in Europe. Even if the knowledge of the phenomenon has increased, the development effective solutions remains a challenging task. The aim of this paper is first to define the basic mechanisms involved in the formation of rail corrugation and present the different types classified in the literature. Then, for each of these types, a list of adapted solutions is provided. When available, the relative cost of these solutions is also mentioned.

L'Usure Ondulatoire (UO) des rails est un phénomène qui touche aussi bien les trains que les trams, les métros, ou tout autres types de transports ferroviaires. La figure 1 montre un exemple de rail présentant de l'UO. Après plus d'un siècle de recherche, bien que la plupart des causes de ce phénomène vibratoire aient été mises en évidence (e.g. résonances de la voie ou du véhicule), on observe toujours à certains endroits une usure qui est mal expliquée [1]. Par ailleurs, quoique les efforts de modélisation aient permis d'expliquer beaucoup de cas d'UO, les solutions à mettre en œuvre pour résoudre ces problèmes d'usure excessive restent coûteuses et difficiles à installer. À l'heure actuelle, on dépense environ 3 millions d'euros par an pour traiter complètement (y compris le renouvellement) l'UO sur les quelques lignes de métro de Bruxelles, et plus de 60 millions d'euros en Europe. L'objectif de cet article est de définir brièvement les mécanismes qui sont à l'origine de l'UO, les différents types d'UO qui ont été répertoriés, et ensuite les moyens actuels de les traiter.

Définition de l'UO

L'UO résulte de la combinaison de deux mécanismes : un mécanisme de *fixation de la longueur d'onde* et un *mécanisme d'endommagement*, agissant comme illustré sur la figure 2 [2]. Le rail, initialement non usé, possède une certaine rugosité. Celle-ci, combinée à des glissements et tractions variables dans le

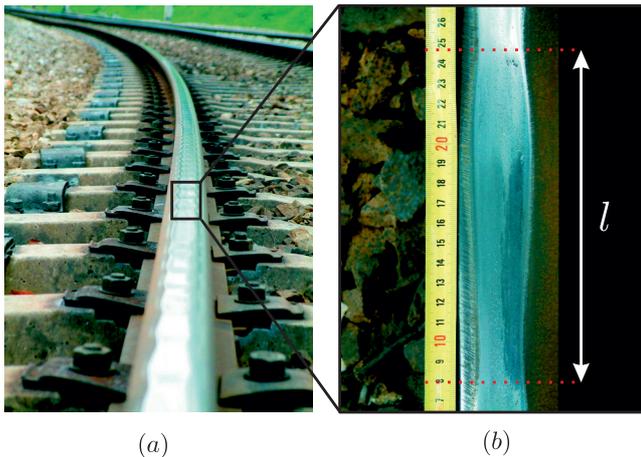


Fig. 1. (a) Photo d'une voie du Réseau Express Régional (RER) de Paris présentant une UO; (b) Vue rapprochée du rail montrant une UO de longueur l .

Fig. 1. (a) Picture of a corrugated track from the RER Paris network; (b) Zoom on the corrugated rail with a wavelength l .

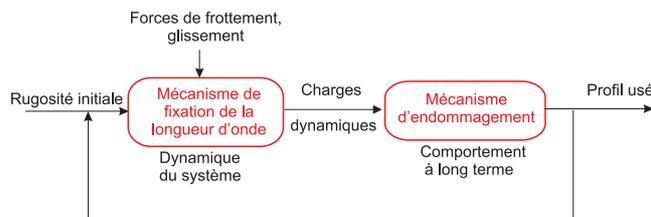


Fig. 2. Composantes générales du mécanisme de formation de l'usure onduloire [2].

Fig. 2. General components involved in the formation of rail corrugation.

temps, excite les charges dynamiques du véhicule et de la voie, créant une modification du profil du rail. Étant donné que les véhicules sont tous presque identiques et passent sur la voie à la même vitesse, les longueurs d'ondes auxquelles ces charges dynamiques varient sont les mêmes d'un véhicule à l'autre, formant le mécanisme de fixation de la longueur d'onde. Le mécanisme d'endommagement résulte du comportement à long terme de l'interaction roue/rail, étudié par un modèle d'usure. Les deux principaux mécanismes d'endommagement sont l'usure (détachement de matière) et l'écoulement plastique de la tête du rail. Dès que l'UO est amorcée, son développement est en général exponentiel, comme le montrent les relevés de la hauteur du rail d'un tronçon de la STIB sur la figure 3. Il est donc particulièrement important de la détecter le plus tôt possible.

Classification

La première classification des différents types d'usure onduloire a été présentée

par Grassie et Kalousek [2] et n'a été que légèrement modifiée depuis lors, dans les références [3, 4]. Le tableau 1 montre une version actualisée de cette classification publiée par les mêmes auteurs [4]. Il résume les caractéristiques principales des cinq types d'UO répertoriés : l'intervalle de longueurs d'ondes auquel ils se rapportent, leur mécanisme de fixation de la longueur d'onde et leur mécanisme d'endommagement. La longueur d'onde l de l'usure correspond au rapport de la vitesse linéaire du véhicule v et d'une fréquence caractéristique de vibration f

$$l = \frac{v}{f}. \quad (1)$$

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse principalement aux mécanismes de fixation de la longueur d'onde. Pour le premier type d'UO, le mécanisme de fixation de la longueur d'onde est une résonance des masses non suspendues (incluant l'essieu, les roues, le disque de frein et la boîte de réduction) sur la raideur de la voie, appelée *résonance P2* (Fig. 4). L'usure de type 2 est associée aux vibrations de torsion des essieux : en courbe, la différence de longueur des rails excite le premier mode de torsion ; dans les zones d'accélération et de freinage du véhicule, le couple moteur excite le deuxième mode de torsion [5,6]. L'UO de type 3 est causée par un mode de flexion de l'essieu et de la voie : en courbe, la voie impose des efforts latéraux (perpendiculairement à l'axe de la voie) importants au véhicule, excitant un ou plusieurs modes de flexion de l'essieu et de la voie. L'UO de type 4 correspond à une résonance de la traverse, également excitée par les efforts verticaux et latéraux en courbe. L'UO de type 5 provient d'une résonance du rail qui se comporte comme une corde pincée au niveau des traverses (d'où son nom en anglais *pinned-pinned mode*) [7–9].

Traitement de l'UO

Le seul moyen de remédier aux effets de l'UO est de meuler ou remplacer les rails [5, 10–12]. On dépense encore deux millions d'euros par an pour meuler les rails du métro de Paris.

Le tableau 2 liste les principales techniques qui ont été développées pour traiter les causes des différents types d'UO, et donne pour certaines d'entre elles un indice de leur efficacité respective (supposée ou reconnue) sur le développement de chacun des cinq types d'UO. Ce tableau est issu

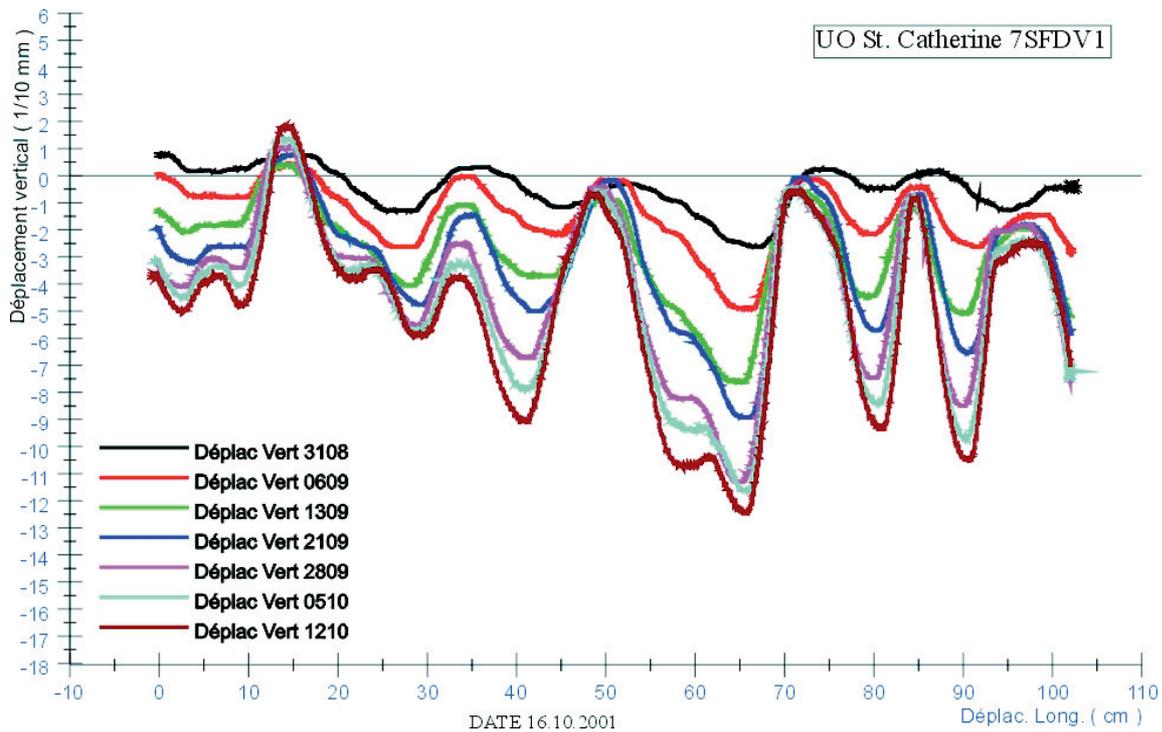


Fig. 3. Développement de l'UO sur le tronçon de métro la STIB entre la station *Ste Catherine* et la station *Comte de Flandre* : relevés de la hauteur de la surface du rail du 31 août au 12 octobre 2001 [24].

Fig. 3. Rail corrugation growth on the STIB rail section between *Ste Catherine* and *Comte de Flandre*: evolution of the rail profile height from the 31st August to the 12th of October 2001.

Tableau 1. Classification de l'UO des rails [4].

Table 1. Classification of Rail Corrugation.

	Longueur d'onde [mm] ^a	Mécanisme de fixation de la longueur d'onde	Mécanisme d'endommagement
1	200–1500	Résonance P2	Écoulement plastique, fatigue
2	50–200	Torsion de l'essieu	Usure longitudinale
3	40–60	Modes de flexion	Usure latérale
4	40–60	Résonance de la traverse	Usure latérale
5	25–80	Résonance PP	Usure longitudinale

^a Les longueurs d'ondes ne sont données qu'à titre indicatif, car certains types d'UO peuvent concerner des véhicules roulant à des vitesses très différentes, donnant naissance à des phénomènes de longueurs d'ondes également différentes selon l'équation (1)

de la référence [4], incluant également des conclusions plus récentes rapportées dans la littérature (e.g. [13, 14]).

Le meulage peut également être utilisé à titre préventif en meulant de manière symétrique (ou non-symétrique) la surface des deux rails : un meulage symétrique des rails neufs permet, en diminuant la rugosité initiale du rail, de retarder l'apparition de l'UO (mesure 17, [15]) ; un meulage asymétrique permet d'augmenter la différence des rayons de roulement entre deux roues d'un même essieu dans une courbe [16], et donc réduire

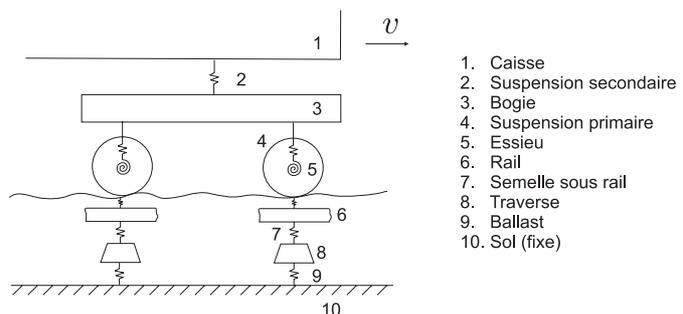


Fig. 4. Représentation schématique d'un véhicule ferroviaire sur une voie.

Fig. 4. Schematic view a railway vehicle-track system.

Tableau 2. Traitement de l'UO.*Table 2. Measures to Mitigate Rail Corrugation.*

Mesures préventives	1	2	3	4	5	Coût relatif	Références
1. Fixation directe des rails souple	++	-	-	-	+		[4, 19]
2. Semelle sous rail souple	+	+	-	+	+	11,3 à 31,3	[4, 9–11]
3. Graissage de la tête du rail	-	++	-	++	-	0,5	[16–18]
4. Contrôle du frottement (rail)	+	+	+	+	+	-1,8	[20–22]
5. Rail en acier dur	++	++	+	+	+	-2,0	[4, 21]
6. Enlever le guide de rail	-	-	+	-	-	2,9	[4]
7. Optimisation des profils des rails	-	+	+	+	-		[5, 16, 18, 21, 23]
8. Augmenter le rayon de courbe de la voie	-	+	+	+	-	Variable	[4]
9. Diminuer les accélérations et freinages	+	+	-	-	-	Variable	[18]
10. Modifier l'espacement entre traverses	-	-	-	-	+	Variable	[4, 7, 8]
11. Graissage du bourrelet de la roue	-	+	-	+	-	0,5	[10]
12. Contrôle du frottement (roue)	+	+	+	+	++	-1,8	[20]
13. Absorbeur de torsion pour l'essieu	-	+	-	-	-		[4, 14]
14. Pilotage	+	+	-	+	-	Variable	[10]
15. Roues souples	+	+	+	+	+		[5, 21]
16. Montage entraînement souple	-	+	-	-	-		[5]
17. Meulage préventif des rails	++	-	-	++	-		[15]
18. Absorbeur sur la traverse	-	-	-	+	-		[12]

++ Utilisé avec succès

+ Susceptible de donner de bons résultats, mais pas encore testé

- Aucune recommandation

les efforts de torsion dans l'essieu induits par la voie à cause de la différence de longueurs des deux rails (mesure 7).

Le graissage des roues [10] et des rails [16, 17] permet également de freiner la croissance de l'UO (mesure 3 et 11). Par exemple, pour réduire la force de traction sur l'essieu avant en courbe, on graisse le rail interne [18]. Bien qu'il soit efficace, surtout pour réduire la croissance de l'UO de grande longueur d'onde, le graissage pose certains problèmes sur les réseaux urbains : tous les véhicules étant motorisés, cette méthode diminue considérablement les qualités de freinage et d'accélération, en plus de polluer l'environnement [11]. Un changement des caractéristiques de frottement entre la roue et le rail peut également être obtenue grâce à des lubrifiants de type HPF

(High Positive Friction) [20]. Le lubrifiant HPF peut être solide (il est déposé sur la roue avec un stick, mesure 12) ou liquide (il est déposé sur le rail, mesure 4). L'utilisation de rails en acier plus dur a un effet positif pour tous les types d'UO parce qu'il ralentit leur mécanisme d'endommagement (mesure 5). L'enlèvement du guide de rail (rail parallèle qui empêche le déraillement, mesure 6) permettrait d'éviter des frottements excessifs entre la roue et le guide, mais pose des problèmes de sécurité.

En augmentant le rayon de courbure des nouvelles voies (mesure 8), on diminue les risques d'UO liée aux forces de frottement latérales entre la roue et le rail. L'utilisation de semelles et fixations plus souples (mesures 1 et 2) permet de réduire fortement, voire d'éliminer l'usure causée par la résonance P2 [4, 9–11]. En effet, l'amortissement des semelles, comme de l'ensemble de la voie, permet de réduire les excitations verticales de l'essieu dans l'intervalle de fréquences entre 50 Hz et 100 Hz, et donc de réduire l'usure [19]. Un moyen de diminuer l'UO de type 5 est de réduire l'espacement des traverses (mesure 10), ce qui a pour effet d'augmenter la fréquence de résonance du mode PP [7]. Selon l'équation (1), la longueur d'onde correspondante devient comparable au diamètre du contact et disparaît. Par exemple [8], en espaçant les traverses de 40 cm au lieu de 60 cm, le mode PP passe de 1200 à 2000 Hz, donc $l = 1,7$ cm à $v = 120$ km/h, et l'UO correspondante disparaît grâce à la taille du contact. L'alternative qui consisterait à diminuer la vitesse du véhicule (mesure 9 et 14) permettrait évidemment d'obtenir un résultat similaire sans frais, mais n'est pas envisageable en pratique en raison des contraintes d'horaire à respecter. Un espacement aléatoire des traverses devrait théoriquement

modifier la forme du mode PP (mesure 10) et réduire l'usure de type 5. L'UO de type 2, qui apparaît principalement dans les courbes et les sites d'accélération et de freinage, est principalement liée aux deux premiers modes de résonance de torsion de l'essieu. Par conséquent, ce type d'UO peut être réduit (i) en modifiant l'essieu (par exemple en remplaçant les roues par des roues plus flexibles, mesure 15) (ii) en montant l'engrenage d'entraînement de manière élastique (mesure 16) [5] pour diminuer les efforts de torsion (iii) en augmentant l'amortissement des vibrations de torsion de l'essieu (mesure 13).

Conclusion

Une liste de mesures préventives visant à freiner ou à supprimer la croissance de l'usure ondulatoire a été présentée dans le tableau 2. Selon ce tableau, certaines mesures peuvent être efficaces pour plusieurs types d'UO, et donc se révéler plus attrayantes (car moins coûteuses) en fonction du tronçon de voie considéré. La colonne "coût relatif" donne, quand l'information est disponible, une estimation du coût de la mesure par rapport au coût de meulage, justifiant de manière évidente les efforts de recherche menés depuis de nombreuses décennies pour résoudre les problèmes d'UO.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet européen *Wheel-Rail Corrugation in Urban Transport* (GRD2-2001-50006).

Références

- [1] J. Alias, *Le Rail*, Eyrolles, 1984
- [2] S.L. Grassie, J. Kalousek, *J. Rail Rapid Transit* **207** (1993) 57-68
- [3] J. Kalousek, S. Grassie. *Int. Nat. Railway J.* (2000) 24-26
- [4] Transit Cooperative Research Program, Rail Corrugation Mitigation in Transit, June 1998
- [5] J.A. Grassie, S.L. Elkins, *Vehicle Syst. Dynam. Suppl.* **28** (1998) 5-17
- [6] J.C.O. Hiensch, M. Neilsen, E. Verheijden, *Wear* **9139** (2002) 1-10
- [7] K. Hempelmann, F. Hiss, B. Ripke, *Wear* **144** (1991) 179-195
- [8] B. Ripke, K. Hempelmann, *Railway Gazette* (1994) 447-450
- [9] K. Hempelmann, K. Knothe, *Wear* **191** (1996) 161-169
- [10] D.R. Ahlbeck, L.E. Daniels, *Wear* **144** (1991) 197-210
- [11] G. Diana, F. Cheli, S. Bruni, A. Collina, *Vehicle Syst. Dynam. Suppl.* **28** (1998) 234-245
- [12] C. Collette, P. Vanhonacker, R. Bastaitis, D. Levy, Comparison between time and frequency studies of a corrugated curve of RER Paris network, proceedings of the 7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Wheel/Rail Systems, September 24-26 CM 2006
- [13] Y. Sato, A. Matsumoto, K. Knothe, *Wear* **9138** (2002) 1-10
- [14] S.L. Grassie, *Wear* **258** (2005) 1224-1234
- [15] S.L. Grassie, *Wear* **191** (1996) 149-160
- [16] A. Matsumoto, Y. Sato, O. Hiroyuki, M. Tanimoto, Y. Oka, E. Miyauchi, *Wear* **253** (2002) 178-184
- [17] M. Tomeoka, N. Kabe, M. Tanimoto, E. Miyauchi, M. Nakata, *Wear* **9137** (2002) 1-6
- [18] Y. Suda, M. Hanawa, M. Okumura, T. Iwasa, *Wear* **253** (2002) 162-171
- [19] E. Tassilly, N. Vincent, *Wear* **144** (1991) 163-178
- [20] D.T. Eadie, J. Kalousek, K.C. Chiddick, *Wear* **253** (2002) 185-192
- [21] J.C.O. Nielsen, R. Lunden, A. Johansson, T. Verneresson, *Vehicle Syst. Dynam.* **40** (2003) 3-54
- [22] J.C.O. Nielsen, *J. Sound Vibrat.* **267** (2003) 537-548
- [23] S. Muller, *Wear* **243** (2000) 122-132
- [24] STIB, rapport interne, 2001