

# Identification des défauts de géométrie verticaux d'une voie ferrée à l'aide de capteurs embarqués

M. Chihaoui<sup>1,2,3</sup>, D. Duhamel<sup>1</sup>, G. Perrin<sup>2</sup>, C. Funfschilling<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Navier, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, {malek.chihaoui,denis.duhamel}@enpc.fr

<sup>2</sup> COSYS, Université Gustave Eiffel, guillaume.perrin@univ-eiffel.fr

<sup>3</sup> SNCF, Direction Technologies, Innovation et Projets Groupe, {malek.chihaoui,christine.funfschilling}@sncf.fr

**Résumé** — Ce travail présente une analyse numérique du comportement dynamique d'un essieu sur une voie ferrée et quantifie les contributions du défaut, de la déformation de la voie et de la cinématique de l'essieu sur les accélérations verticales mesurées au niveau des boîtes d'essieu. Une quantification des erreurs induites par ces différentes contributions sur la reconstruction des défauts de nivellement et de gauche à partir d'accélérations est alors réalisée. Pour finir, des résultats de reconstruction à partir d'accélérations simulées, corrigés du déplacement essieu-rail et de la déformation de la voie sont présentés.

**Mots clés** — Surveillance de la géométrie de la voie, Capteurs embarqués, Modélisation dynamique.

## 1 Introduction

La qualité de la géométrie de la voie ferrée joue un rôle prépondérant dans la sécurité des circulations et le confort des passagers. Aussi, des trains spéciaux parcourent régulièrement le réseau ferroviaire national pour surveiller, grâce à des mesures de flèche, les défauts de la voie. Afin d'enrichir la surveillance (notamment sa fréquence), plusieurs gestionnaires de l'infrastructure ont déployé des accéléromètres sur les boîtes d'essieux de trains commerciaux et reconstruisent les défauts verticaux. Ces reconstructions reposent en général sur l'hypothèse que l'essieu reste toujours en contact de la voie et que l'accélération mesurée sur la boîte d'essieu est proche de la dérivée seconde des défauts au niveau de la roue.

Les défauts de géométrie de la voie sont caractérisés le long de l'abscisse curviligne et sont classifiés en 4 catégories (voir figure 1). Le défaut de nivellement  $d_1$ , le défaut de gauche ou de nivellement transversal  $d_2$ , le défaut de dressage  $d_3$  et le défaut d'écartement  $d_4$ .

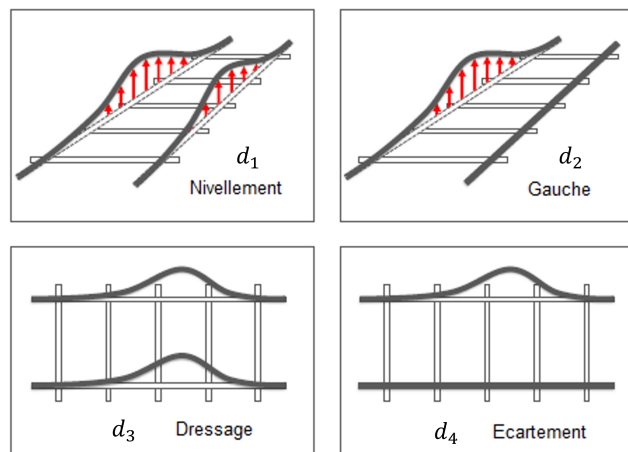


FIGURE 1 – Classification des défauts de géométrie de la voie

On trouve par ailleurs des reconstructions des défauts verticaux à partir d'accélérations mesurées en caisse. Tsunashima [1] suppose que les essieux restent verticalement solidaires du rail et reconstruit les défauts verticaux à partir des accélérations du Shinkansen à l'aide d'un filtre de Kalman à 4 ou 6 degrés de liberté. L'approximation est bonne mais repose sur la linéarité des caractéristiques mécaniques du véhicule.

Nous citerons aussi les travaux de Chen [2] qui propose d'estimer les défauts verticaux à partir des accélérations de caisse, de bogie et du 1<sup>er</sup> essieu à l'aide d'une méthode de deep-learning. Les accélérations sont générées par un méta-modèle sur des défauts synthétiques. Les résultats sont intéressants, mais le modèle a été entraîné sur une base de défauts générés et non mesurés. Par ailleurs la méta-modélisation introduit une erreur qui est non quantifiée. Ces concessions sont motivées par le besoin d'une grande base de données et des contraintes de temps de calcul nécessaire à l'apprentissage.

Dans ce travail on s'attache à identifier les différents phénomènes physiques intervenant dans la dynamique verticale des boîtes d'essieux et à quantifier les différentes contributions. On propose alors de reconstruire les défauts de nivellement  $d_1$  et de gauche  $d_2$  (voir Figure 1) à partir d'accélérations simulées. L'originalité de ce travail est donc double. Tout d'abord une analyse fine de la cinématique et de la dynamique de l'interaction entre la roue et le rail et de son impact sur l'accélération de la boîte de l'essieu. Ensuite une reconstruction des défauts verticaux à partir d'accélérations verticales simulées "corrigées", s'appuyant sur des informations de simulation qui ne sont pas pour l'instant disponibles lors de circulations commerciales.

## 2 Identification des différentes contributions au déplacement de l'essieu

Nous proposons dans ce travail de reconstruire les défauts de nivellement et de gauche à partir d'accélérations mesurées au niveau des boîtes d'essieux. Si on considère que l'essieu reste en contact avec le rail, ces accélérations sont essentiellement composées de la dérivée seconde, par rapport au temps, du nivellement de la file considérée, sous la roue de mesure. Cependant, du fait du profil conique de la roue, cette accélération verticale comprend aussi une contribution induite par le déplacement latéral et le roulis de l'essieu. De plus, la voie se déforme au passage de l'essieu, induisant une accélération verticale supplémentaire. Cette première partie décrit ces différents phénomènes et les quantifie.

### 2.1 Contribution de la déformation élastique de la voie

Au passage des trains, le rail est soumis à des efforts importants et la voie se déforme. Cette déformation est difficile à estimer pour deux raisons :

- Le comportement de la voie est complexe, ses caractéristiques mécaniques sont mal connues, elles évoluent dans le temps et sont spatialement hétérogènes.
- Les efforts transmis au niveau du contact par les roues sont eux aussi difficiles à mesurer et à estimer. Ils dépendent en outre du chargement du train, de ses caractéristiques mécaniques et de sa vitesse de circulation.

Le déplacement induit par la déformation dynamique de la voie au passage des trains est par conséquent difficile à estimer pour des circulations commerciales. Dans ce paragraphe, nous estimerons cependant sa contribution dans le cas très simplifié d'une voie modélisée par un système de ressorts - amortisseurs en parallèles, de raideur et d'amortissement spatialement homogènes. La relation entre les efforts verticaux sous les roues droite et gauche  $F_{d/g}$  et le déplacement des boîtes d'essieu induits  $z_{d/g}^e$  s'écrit de la façon suivante :

$$F_{d/g} = kz_{d/g}^e + cz_{d/g}^e. \quad (1)$$

Les déplacements sont alors estimés sur l'espace de Fourier grâce à la relation :

$$\hat{z}_{d/g}^e(\omega) = \frac{1}{k + ic\omega} \hat{F}_{d/g}(\omega). \quad (2)$$

### 2.2 Contribution du mouvement relatif de l'essieu sur le rail

L'essieu considéré comme indéformable possède 6 degrés de liberté couplés par le contact avec le rail. Cependant, dans ce travail, nous considérerons comme découplés, les deux mouvements relativement peu dépendants suivants (voir figure 2) :

- La translation verticale induite par la rotation de lacet de l'essieu.
- Le roulis induit par la translation latérale de l'essieu.

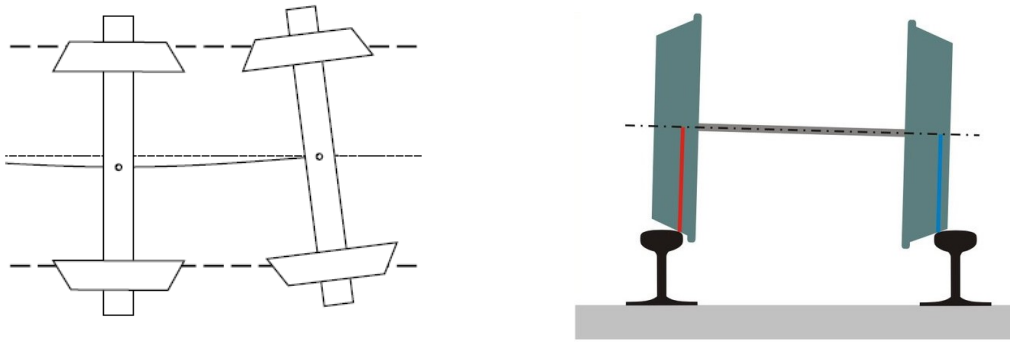


FIGURE 2 – Schémas représentant le lacet de l’essieu à gauche [3] et son roulis à droite

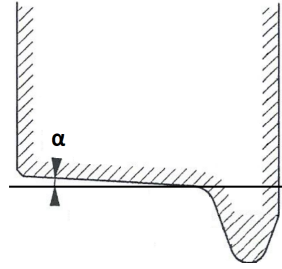


FIGURE 3 – Représentation de l’angle de conicité d’une roue

Nous appellerons  $y^c$ ,  $z^c$ ,  $\theta_x^c$  et  $\theta_z^c$  respectivement les déplacements latéraux, verticaux et les rotations de roulis et de lacet au centre de gravité de l’essieu par rapport au centre de la voie chargée dynamiquement. En supposant que le contact reste sur la table de roulement et que dans ces conditions la conicité de la roue (angle  $\alpha$ ) est constante, nous pouvons établir les relations géométriques suivantes :

$$\theta_x^c(s) = \frac{2 \tan \alpha}{D + d_4(s)} y^c(s) \quad (3)$$

$$z^c(s) = -\frac{1}{2} \tan \alpha d_4(s) - \frac{1}{2} \tan \alpha (D + d_4(s)) (1 - \cos \theta_z^c(s)) \quad (4)$$

avec  $\alpha$  l’angle de conicité de la roue (voir figure 3),  $D$  la distance entre les deux points de contact entre l’essieu et le rail qui est supposée constante. Le déplacement vertical de l’essieu comprend par conséquent une contribution due au déplacement latéral de l’essieu (qui provoque le roulis de l’essieu), une contribution induite par le défaut d’écartement et une contribution issue de la rotation en lacet de l’essieu.

### 2.3 Estimation de l’effet de la déformation de la voie et de la cinématique de l’essieu dans une expérience numérique

Dans ce paragraphe, une estimation des déplacements induits par la déformation de la voie et par la cinématique de l’essieu est effectuée dans le cadre d’une expérience numérique. Le comportement dynamique d’un TGV circulant sur une portion de ligne à grande vitesse est simulé à l’aide du logiciel de dynamique ferroviaire Vampire. Les différentes contributions aux déplacements des boîtes d’essieu sont alors calculées et comparées aux défauts. La figure 4 présente les résultats. À gauche les contributions au défaut de nivellement et à droite celles du défaut de gauche. En vert sont les contributions liées au déplacement du rail suite à la déformation. Elles sont représentées par la moyenne de ce déplacement sur chaque file de rail  $z_d^e$  et  $z_g^e$  pour le nivellement et la différence pour le gauche. En rouge, la contribution des déplacements de l’essieu sur le rail respectivement  $z^c$  pour le nivellement et  $D \sin(\theta_x^c)$  pour le gauche. L’impact de la déformation de la voie est donc aussi importante sur le déplacement vertical moyen des boîtes d’essieux que sur leur déplacement relatif. La contribution de la cinématique de l’essieu est quant à elle bien moins importante sur la moyenne que sur la différence des déplacements en boîte d’essieu.

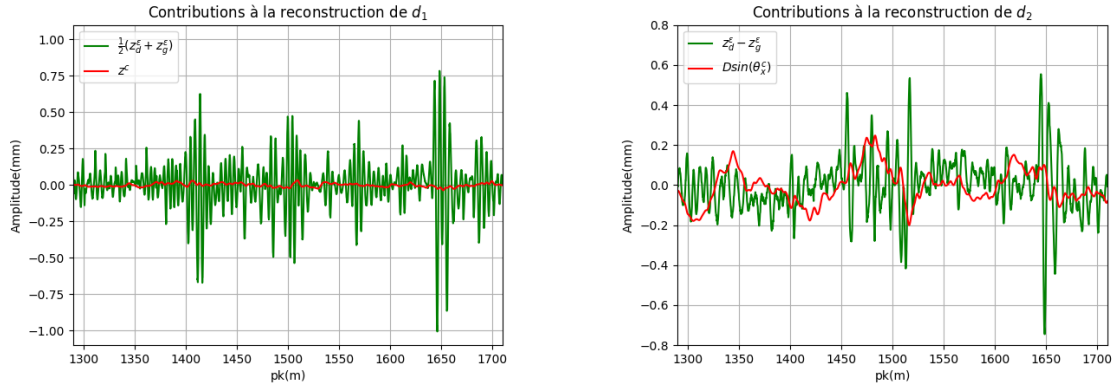


FIGURE 4 – Déplacement induit par la déformation de la voie et par la cinématique de l'essieu.

Les ordres de grandeur de ces compensations représentés par leurs écarts-types sont récapitulés ci-dessous :

- $\sigma(\frac{1}{2}(z_d^e + z_g^e)) \sim \sigma(z_d^e - z_g^e) \sim 0.15mm$
- $\sigma(D\sin(\theta_x^c)) \sim 0.16mm$
- $\sigma(z^c) \sim 0.017mm$

On peut en déduire que les contributions les plus importantes sont celles dues à la déformation du rail et de la sous-structure ainsi que celle due au roulis de l'essieu sur le rail.

### 3 Reconstruction des défauts de nivellement et de gauche

#### 3.1 Première reconstruction à partir des accélérations

Initialement, une quantification de l'erreur d'identification en supposant que les essieux suivent parfaitement les défauts du rails s'impose. La position des roues par rapport à la voie est donc assimilée aux défauts verticaux.

$$d_{1,rec} = \frac{1}{2}(z_{ed}(s) + z_{eg}(s)) - z_{voie} \quad (5)$$

$$d_{2,rec} = z_{ed}(s) - z_{eg}(s) - D\sin(\theta_{voie}) \quad (6)$$

avec  $d_{1,rec}$  le défaut de nivellement identifié,  $d_{2,rec}$  le défaut de gauche identifié,  $z_{ed}$  et  $z_{eg}$  les déplacements verticaux des boîtes d'essieux qui sont calculés par double intégration des accélérations verticales,  $z_{voie}$  la surélévation absolue de la voie qui est connue,  $\theta_{voie}$  l'angle de dévers absolu de la voie qui est connu.

Les signaux sont préalablement filtrés par un filtre passe haut parfait rectangulaire avec une fréquence de coupure  $\lambda_c = 500m$  pour éliminer la dérive du signal. l'opération résulte en des erreurs d'identification raisonnables par rapport à l'amplitude des défauts (voir figure 6). avec des erreurs RMSE de  $\epsilon_{d1} = 0.155mm$  et  $\epsilon_{d2} = 0.204mm$ . Comparés aux défauts identifiés, ces erreurs ont des ordres de grandeur quelques dizaines de fois inférieurs.

#### 3.2 Amélioration de la reconstruction

Nous supposons ici que les accélérations permettent d'accéder aux déplacements relatifs aux rails de façon à retrouver les compensations de reconstruction associés. Ces déplacements sont aussi préalablement filtrés par un filtre passe haut rectangulaire avec une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c = 500m$ .

Les défauts de nivellement sont alors estimés à l'aide de la somme des déplacements des boîtes d'essieux, auxquels on vient soustraire l'altitude de la voie issue de son tracé ainsi que la contribution issue de la rotation en lacet de l'essieu :

$$d_{1,rec}(s) = \frac{1}{2}(z_{ed}(s) + z_{eg}(s)) - z_{voie}(s) - \frac{1}{2}(z_d^e(s) + z_g^e(s)) - z^c(s), \quad (7)$$

Les déplacements induits par la déformation de la voie ne sont en effet pas accessibles de même que les contributions dépendant du défaut d'écartement de la voie.

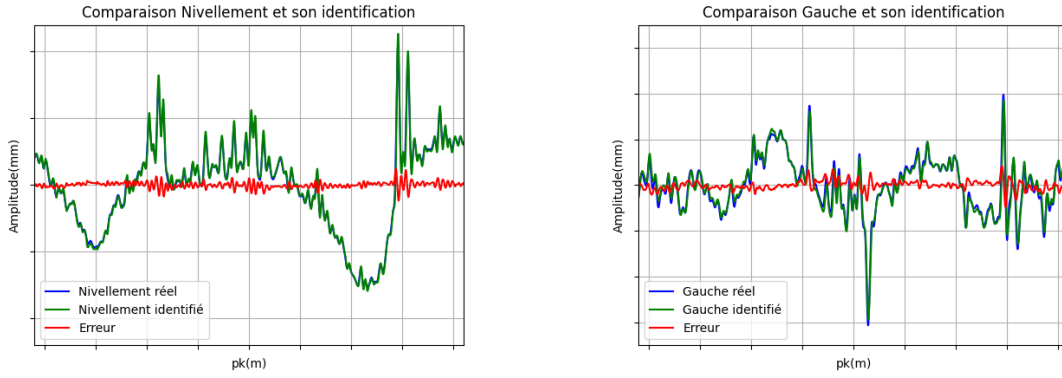


FIGURE 5 – Identification du défaut de nivellement à gauche et du défaut de gauche à droite en supposant que l’essieu suit parfaitement le rail

Le défaut de gauche est par ailleurs donné par :

$$d_{2,rec}(s) = z_{ed}(s) - z_{eg}(s) - (z_d^e(s) - z_g^e(s)) - D \sin(\theta_{voie}(s) + \theta_x^c(s)), \quad (8)$$

Ici encore, tous les termes de contribution à la reconstruction des défauts ne peuvent pas pour l’instant être estimés en circulation commerciale. Les données issues d’une déformation (hétérogène sous les files de rail) ou dépendant du défaut d’écartement ainsi que du déplacement latéral par rapport au centre du rail ne peuvent actuellement pas être estimés et sont présentés dans le but de monter l’amélioration éventuelle qui serait apportée à la reconstruction des défauts si on arrivait à les estimer.

Les nivellement et gauche ainsi estimés sont donnés à la figure 6.

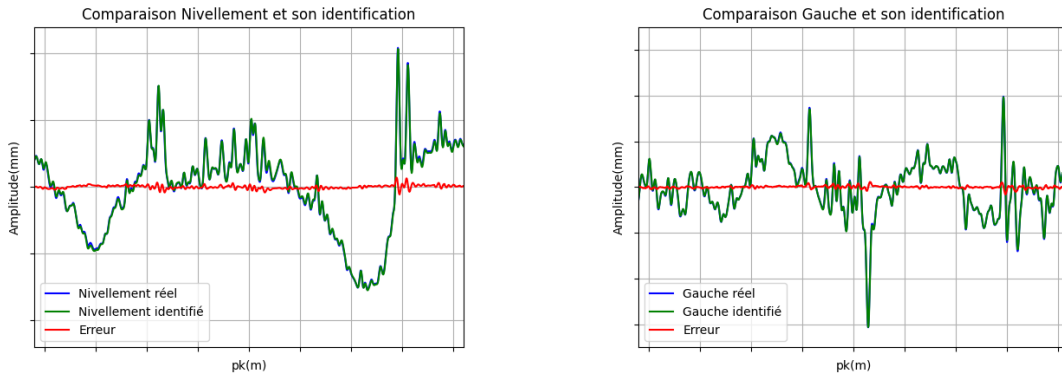


FIGURE 6 – Identification du défaut de nivellement à gauche et du défaut de gauche à droite

La prise en compte de ces contributions permet de réduire l’erreur d’identification RMSE des défauts verticaux à  $\epsilon_{d1} = 0.052mm$  et  $\epsilon_{d2} = 0.022mm$ .

## 4 Conclusions et perspectives

Ce travail présente une analyse des déplacements dynamiques des essieux ainsi qu’une quantification de l’impact des défauts de la géométrie, de la déformation de la voie et de la cinématique de l’essieu. Une reconstruction des défauts de nivellement et de gauche à partir des déplacements, qui seraient mesurés en boîte d’essieu et corrigés des contributions qui pourraient potentiellement être estimées à partir de signaux mesurés sur des trains commerciaux est proposée. Une approche similaire n’est pas envisageable pour les défauts latéraux de géométrie de la voie. En effet, la présence d’un important jeu latéral dans la voie implique un déplacement latéral de l’essieu très différent de la géométrie de la voie. De plus, ce déplacement est très dépendant des caractéristiques du train, de sa vitesse mais aussi du vent et du coefficient de frottement au contact ce qui complique le développement d’une méthode robuste.

## Remerciements

Ce travail est financé par la société ferroviaire française SNCF.

## Références

- [1] H. Tsunashima, Y. Naganuma, T. Kobayashi. *Track geometry estimation from car-body vibration*, Vehicle System Dynamics, 207-219, 2014.
- [2] M. chen, S. Zhu, W. Zhai, Y. Sun, Q. Zhang. *Inversion and identification of vertical track irregularities considering the differential subgrade settlement based on fully convolutional encoder- decoder network*, Construction and Building Materials, 2023.
- [3] X. Wang, Z. Lu, J. Wen, J. Wei, Z. Wang. *Kinematics modelling and numerical investigation on the hunting oscillation of wheel-rail nonlinear geometric contact system*, Nonlinear Dynamics, 1-23, 2022.