

## ▾ Dossier Technique

### « Mesures de rigidité de la voie et indicateur de maintenance... »



Dans le cadre du projet européen **INNOTRACK**, différentes méthodes d'investigation de l'infrastructure ferroviaire sont testées sur plusieurs sites des réseaux partenaires. Ces mesures permettent de mesurer des paramètres différents (raideur, amortissement, géométrie, etc.). il est important dans ce cadre de prendre en compte les corrélations éventuelles qui peuvent exister entre les différents mesures.

Ce dossier vous est proposé à partir d'extraits de paragraphes d'un rapport interne de l'Unité Physique du Système Ferroviaire Département de l'Innovation et de la Recherche. Un projet de mesure identique est réalisé sur LN 6 (LGV Est-Européenne) après avoir en 2008 utilisé une autre méthode avec un engin Suisse.



Le rapport cité propose une analyse paramétrique ayant pour but de retrouver une éventuelle corrélation entre la rigidité global de la voie (par RSMV) et un indicateur de maintenance des voies propre à la SNCF. Ces mesures ont été effectuées sur un des sites de mesures du projet INNOTRACK (site de Chambéry). En premier lieu sont présentés les deux paramètres de comparaison (NL et rigidité de la voie par RSMV), dans la deuxième partie il présente les résultats de l'analyse menée. Par soucis de confidentialité et respect du travail de son auteur Mr RHAYMA N., il n'est pas proposé dans son intégralité.

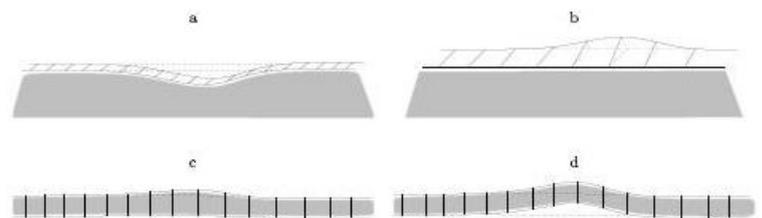
#### 1) Qualité de la Voie :

Pour déterminer la qualité de la voie, il existe des indicateurs, pour les différents modes de dégradations, permettant de qualifier la dégradation mesurée sur plusieurs mètres voie. Ces indicateurs sont intégrés au Mauzin synthétique.

Le Mauzin synthétique permet, d'une part de suivre l'évolution de la qualité globale de la voie, d'autre part de programmer les travaux continus de correction lorsqu'ils concernent une zone de voie étendue. Les valeurs moyennes obtenues sont comparées à des valeurs de référence ; l'une (basse) constituant l'objectif minimal à obtenir après une opération d'entretien, la deuxième (haute) correspondant au niveau qu'il est souhaitable de ne pas dépasser pour ne pas risquer une sensible dégradation du confort.

Les relevés des indicateurs Mauzin synthétiques sont basés sur les résultats des tournées Mauzin.

**Figure 1 :** Différents défauts ponctuels de géométrie de la voie. a : nivellement longitudinal, vue latérale ; b : nivellement transversal, vue latérale ; c : écartement, vue supérieure ; d : dressage, vue supérieure



#### 2) Indicateurs de Mauzin Synthétique :

Pour chaque type de dégradation (figure 1), il existe un indicateur synthétique qui résume la qualité de la géométrie de voie sur 200m ou un kilomètre. Les indicateurs du Mauzin synthétique sont utilisés pour évaluer l'évolution de la qualité de la voie. Ces indicateurs synthétiques sont calculés à partir des signaux électriques du STS et des informations enregistrées par les capteurs électriques. Le traitement réalisé sur ces signaux permet d'évaluer les écarts moyens sur une fenêtre de 200m :

- ↪ NL : nivellement longitudinal. Le nivellement longitudinal est obtenu à partir de la dénivellation locale mesurée sur chaque file de rail par rapport au profil en long moyen de la voie.
- ↪ NT : nivellement transversal. Le nivellement transversal est obtenu à partir des signaux utilisés pour la base allongée.
- ↪ D : dressage. Le dressage de la voie traduit la régularité du tracé réel.
- ↪ Ec : La moyenne d'écartement.

Pour Chaque indicateur, il existe une valeur calculée sur 200m et une valeur sur 1 km. Au début de l'exploitation, les valeurs sur 1km étaient les seules informations disponibles dans le Mauzin synthétique. Elles disposent donc d'un historique plus important. Ainsi les résultats de l'étude sont-ils basés sur les indicateurs de 1km.

#### 3) Dégradation de la Qualité de la Voie :

La dégradation de la géométrie de la voie se traduit par une évolution défavorable de la position de la table de roulement. La voie peut se dégrader de différentes façons, c'est la raison pour laquelle différents défauts sont identifiés : défauts de nivellement longitudinal et transversal, défauts de dressage, défauts d'écartement. Les différents types de défaut sont présentés dans la figure 1.

Pour chaque mode de dégradation et pour différentes longueurs de défaut, il existe des indicateurs mesurables qui permettent d'exprimer quantitativement la dégradation. Il est alors possible de détecter les défauts ponctuels, présentés dans la figure 1, mais également les défauts à



grande longueur d'onde ou encore l'accumulation de plusieurs défauts sur un même tronçon.

**4) Rolling Stiffness Measurement Vehicle (RSMV) :**

Le Rolling stiffness measurement vehicle (photo sur la figure 2), est un véhicule de chargement de voie (TLV), constitué d'un wagon de fret à deux essieux (2 axes), équipé de deux masses hydrauliques vibrantes (de 600 kg chacune). Il permet de mesurer les rigidités des assises des voies ferrées.

La rigidité de voie (k) est définie comme le rapport entre la charge de voie (F) et la déflexion de cette dernière (z) (Eq. 1.2). Elle est souvent considérée comme constante si la charge est statique.

Si la rigidité de voie est étudiée dans le domaine fréquentiel, l'inverse de la rigidité dynamique de voie est de préférence utilisé et il est appelé réceptance de la voie (a) ou la flexibilité dynamique (Eq. 1.3) dans le cas d'une charge dynamique. La réceptance est une quantité complexe, elle est souvent décrite par une amplitude et une phase. La raison pour laquelle l'usage de la réceptance de voie au lieu de sa rigidité dynamique, est que la plupart des systèmes étudiés sont pilotés en force et que le phénomène de résonance sera interprété en tant qu'une grande déflexion.

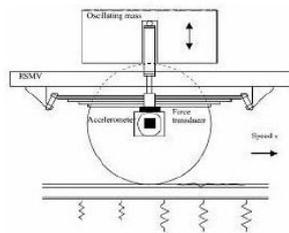
$$k(t) = F(t) / z(t) \quad (1.1)$$

$$\alpha(t) = z(t) / F(t) \quad (1.2)$$

**4.1) La méthode Banverket :**

La méthode développée par Banverket est basée sur un axe de mesure qui comporte une charge constante et une charge dynamique variable. Le véhicule roulant de mesure de rigidité (RSMV) monté sur un wagon fret à deux essieux. La voie subit une excitation dynamique via deux masses oscillantes au-dessus d'un des deux essieux. La rigidité de la voie est calculée ensuite à partir des mesures de l'accélération et de la force.

La charge axiale statique est de 180 kN et l'amplitude maximum de charge dynamique est de 60 kN. Le RSMV peut mesurer la rigidité dynamique jusqu'à 50 hertz. Des mesures globales à des vitesses élevées (jusqu'à 60 km/h) avec des excitations sinusoïdales à des fréquences simultanées (jusqu'à 3) ou des investigations détaillées à petites vitesses (inférieures à 10 km/h), sont toutes deux possibles. La force est mesurée avec un capteur de charge placé au-dessus de l'axe de la roue de mesure, et l'accélération est mesurée à l'axe de la roue de mesure.



Le principe d'essai sur une roue de mesure est montré sur la figure 3. Le système hydraulique excite la voie avec une charge statique et dynamique (Eq.1.4).

Les quantités mesurées  $F1$  et  $a1$  (comme indiqué sur la figure 3) sont obtenues, pour chaque roue de mesure, via deux capteurs de charge et deux accéléromètres. La force de contact entre la roue et le rail est calculée à partir de la loi de seconde de Newton du mouvement (Eq.1.5).

$m$  est la masse de la roue de mesure

$$F_1(t) = P_{stat} + P_{dyn} \sin(2\pi ft) \quad (1.3)$$

$$F_2(t) = F_1(t) - ma_1(t) \quad (1.4)$$

L'accélération mesurée  $\alpha_1$  doublement intégrée permet de retrouver la déflexion (Eq.1.6).

La roue de mesure est considérée comme rigide sauf pour les déflexions  $\delta_H$  dans la zone de contact même si l'influence de  $\delta_H$  sur le résultat est petite. Les défauts longitudinaux de la géométrie du rail  $\delta_C$  peuvent également être pris en compte (Eq.1.7).

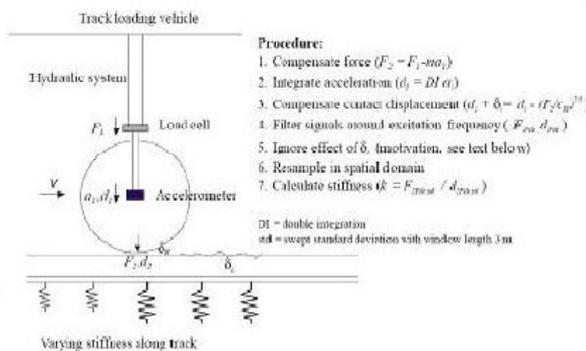


Figure3. Principe de la méthode de mesure de rigidité de la voie de Banverket.

$$d_1(t) = \int \int a_1(t) dt dt \quad (1.5)$$

$$d_2(t) = d_1(t) - \delta_H(t) - \delta_C(t) \quad (1.6)$$

$$F_2(t) = c_H \delta_H(t)^{\frac{3}{2}} \quad (1.7)$$

$\delta_C$  est la somme de toutes les imperfections du rail. La déflexion dans la zone de contact est modélisée par un ressort hertzien et peut-être calculée de la fonction  $F_2$  (Eq. 1.7).

$c_H$  constant dépendant des principaux rayons des corps en contact et des modules de Young  $E$  et des coefficients de Poisson  $\nu$  des corps. Dans ce calcul le  $c_H$  a la valeur de  $92.7GN/m^{3/2}$ .



#### 4.2) Fréquence d'excitation :

Le choix de la fréquence ou des fréquences est en même temps la difficulté et l'avantage de la méthode actuelle. La première contrainte à prendre en compte est que la combinaison de la fréquence d'excitation et la vitesse de passage ne doit pas coïncider avec la fréquence de passage des traverses, car la fréquence de passage des traverses peut influencer les accéléromètres et dégradera l'exactitude. Deuxièmement, s'il y a des problèmes graves connus avec des ondulations, la longueur d'onde de l'ondulation correspondante à la combinaison fréquence - vitesse devrait être évitée. Troisièmement, pour réaliser une résolution spatiale et pour donner une énergie suffisante à la voie, une période d'excitation ne devrait pas durer plus que deux ou trois mètres.

La méthode donne la possibilité d'examiner plusieurs fréquences différentes, dans le même essai ou à différentes courses. Il est possible par exemple d'exciter le système aux fréquences de résonance du ballast ce qui permet de détecter le ballast écrasé ou une consolidation pauvre. Dans les essais réalisés, les fréquences d'excitation ont été choisies comme la fréquence de passage des traverses divisée par 1.5, 2.5 et 3.5. La vitesse de passage maximale est de 40km/h.

#### 4.3) Mesures de rigidité sur le site de Chambéry :

Les mesures de rigidité par RSMV sur le site de Chambéry : entre la gare de Chémery-Challes les-Eaux et la gare de Saint Pierre d'Albigny (Haute Savoie) ont été effectués pendant les 2 nuits à raison d'une nuit de mesure par voie. La distance parcourue a été de 30 km par voie. La voiture de mesure (RSMV) a été placée entre deux draisines ( photo sur la figure 4) :

- ↪ l'une servant à la traction du convoi
- ↪ la deuxième est utilisée pour l'installation du matériel du pilotage et d'enregistrement des mesures.

Pour chaque voie deux passages à des vitesses différentes ont été effectués :

- ↪ un premier passage à une vitesse de 40 Km/h. lors de ce passage les mesures de la rigidité sont effectuées avec des excitations sinusoïdales à deux fréquences simultanés (6,8 et 11,4 Hz)
- ↪ un deuxième passage à la vitesse de 7 Km/h. Ce passage permet l'investigation détaillée avec un spectre d'excitation de 3 à 20 Hz dans le but de détecter les bruits de mesures.

### 5) Indicateurs de maintenance et mesures de la voie - Analyses Résultats :

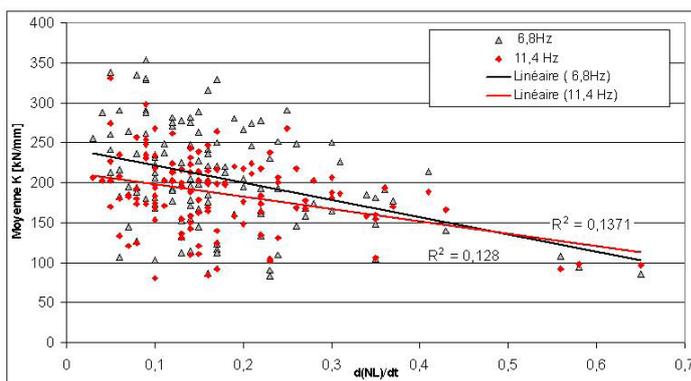
Après les essais les mesures de rigidité de la voies (RSMV) et du nivellement longitudinale de la voie sont connus . Les analyses ont procédé à une segmentation de la voie (par tronçon de 200m) et les essais ont pour but de tester la Corrélation entre le NL et l'indice de dégradation (dNL/dt) d'une part et la rigidité de la voie d'autre part.

Les mesures de la rigidité de la voie par RSMV sont des mesures en continu par contre les valeurs du NL et de l'indice de dégradation (dNL/dt) sont donnés tous les 200 m. Il est procédé à un traitement statistique des mesures RSMV en calculant des moyennes et des écart types pour les tronçons de 200 m. Pour chaque tronçon de 200 m, les données suivantes sont déterminées :

- ↪ la valeur du NL
- ↪ la valeur de la vitesse de dégradation de la voie (dNL/dt)
- ↪ une moyenne des rigidités (à 6,8 et 11,4 Hz)
- ↪ l'écart-type des rigidités (à 6,8 et 11,4 Hz) Hz



Figure 4 : moyenne de la rigidité en fonction du NL



Après analyses, il n'est pas remarqué de corrélation visible entre la moyenne et l'écart-type de la rigidité de la voie, d'une part, et le nivellement longitudinale (NL). Les coefficients de corrélation sont trop faibles dans les deux cas.

De la même manière, les tests d'éventuelles corrélations entre les mesures de rigidité par RSMV (moyennes et écart-types) et la vitesse de dégradation de la voie d(NL)/dt. L'analyse des résultats obtenus ne met pas en évidence l'hypothèse de corrélation entre les deux paramètres

Il est ensuite essayé de travailler par classe de NL . Plusieurs classes de NL ont été définies avec des pas de 0.025, 0.05, 0.1 et 0.2 . À l'aide d'un outils développé sous MATLAB. Des graphes représentant les densités de probabilité des rigidités mesurées par classe de NL sont réalisés. L'analyse des différents résultats obtenus (avec différentes classes de NL) n'a pas permis de distinguer des

signatures ou de formes particulières des densités de probabilité de la rigidité. Il a aussi été remarqué qu'on ne trouve pas de corrélation entre les moyennes de la rigidité et les classes de NL. Les coefficients de variation sont très élevés (+40%).

*Ce rapport d'étude a présenté deux outils de diagnostics des voies ferrées proposés dans le cadre du projet européen INNO-TRACK (RSMV et Mauzin synthétique). Le chercheur a essayé d'analyser les éventuelles corrélations entre les mesures, issues de ces deux outils, sur le site de Chambéry.*

*Cette étude a montré qu'il n'existe pas une corrélation directe entre la rigidité globale de la voie d'une part et le nivellement longitudinal (NL) et la vitesse de dégradation de la voie (d(NL)/dt) d'autre part. Cette analyse peut être complétée par d'autres mesures tel qu'une cartographie des résistances des plate-forme (PANDA) et de résistivité.*

Article proposé par Alain THIEBAUT—Infrapôle Est Européen.