

MESURE DE LA QUALITE DE L'UNI DES ROUTES EN GRAVIER AVEC LA TECHNOLOGIE DU CAPTEUR D'ACCÉLÉRATION

J. PIRINEN & K. PULKKINEN

Administration finlandaise des chaussées, Finlande

jarkko.pirinen@ely-keskus.fi

J. SEPPÄ & R. HEIKKILÄ

Laboratoire d'ingénierie structurelle et technologie de construction, Université d'Oulu, Finlande

rauno.heikkila@oulu.fi

A. LAMPINEN

AL-Engineering Oy, Finlande

AL.Engineering@al-engineering.fi

J. JOKIKAARTO & M. PIKKARAINEN

Tietomekka Oy, Finlande

jarmo.jokikaarto@tietomekka.fi

RÉSUMÉ

En Finlande, le réseau routier public s'étend sur 78 000 km, dont 35 % sont des routes en gravier. Les routes en gravier appartiennent généralement à un réseau à volume faible fournissant les services de niveau normal.

L'objectif du projet était de développer une méthode de mesure automatique de l'uni des routes en gravier. La méthode utilise un véhicule équipé d'un appareil de mesure et d'une unité de collecte de données avec une connexion pour le transfert des données. L'appareil de mesure fixé à la voiture comprend un capteur d'accélération et une unité terminale avec un module de collecte des données.

La méthode de mesure de la déformation des chaussées en gravier a été développée en définissant une interface entre le logiciel d'application et l'unité de mesure. La mesure de la qualité de l'uni des routes en gravier enregistrée par les capteurs d'accélération a été étudiée à partir des accélérations verticales de deux voitures. L'impact de la pression du pneu a également été examiné moyennant un banc d'essai à rouleaux à vibration pour voitures.

L'étude a permis de conclure que la déformation verticale de la chaussée en gravier peut se mesurer automatiquement. L'inconvénient de la méthode utilisant le capteur d'accélération est que les informations qu'elle fournit se limitent au trajet situé sur la ligne de conduite. L'avantage de cette méthode est qu'une grande quantité d'informations peut être recueillie en temps réel. La méthode peut également être appliquée à d'autres études telles que la mesure de la rugosité de la surface de la chaussée.

1 INTRODUCTION

En Finlande, le réseau routier public s'étend sur 78 000 km, dont 35 % sont des chaussées en gravier. Dû au grand nombre de routes en gravier, leur condition et utilisation constituent un point d'intérêt. Les chaussées en gravier appartiennent à un réseau routier de faible volume qui dessert des aires de population peu peuplées et sert également au transport de matériel et de matières premières, notamment dans l'industrie forestière et l'agriculture. S'agissant des chaussées en gravier, l'objectif est de fournir un niveau de services qui répond aux besoins de base des usagers. Le classement des chaussées en gravier pose des exigences à la fois en termes de condition structurelle de la chaussée et de l'état de la surface, le dernier étant considéré comme le critère le plus

important. L'état de la surface est déterminé par l'uni de la chaussée, la consistance et le degré de poussière, et nous avons défini cinq conditions de classes pour les chaussées. Actuellement, la valeur de la condition de la surface est déterminée visuellement par des images de référence et des définitions de textes.

1.1 Objectif

L'objectif dans les contrats de maintenance est d'utiliser davantage la gestion des données électroniques. La gestion des données électroniques aide à rendre plus efficace le processus d'adjudication et la gestion de la qualité ainsi qu'à automatiser la collecte, le traitement et la distribution de données.

Le système courant des inspections visuelles est problématique, car il est subjectif et exige une interprétation. En plus, le manque de paramètres objectifs rend difficile le contrôle de la condition à long terme des chaussées en gravier et la qualité du travail des contractants. Du point de vue de la qualité, il est nécessaire que la condition de la chaussée corresponde aux attentes des usagers de la route. En 2007, un projet d'études a été lancé afin de créer une méthode de mesure nouvelle et plus objective pour les chaussées en gravier. L'étude s'est concentrée sur la condition de la surface de la chaussée (uni de la surface), c'est-à-dire le critère le plus important.

1.2 Études antérieures

Les méthodes de mesure des déformations des chaussées en gravier et les paramètres respectifs ont fait l'objet d'études au milieu des années 1990 en Finlande. Dans ces études on a également utilisé un équipement basé sur un capteur d'accélération. L'étude antérieure a comparé la correspondance des valeurs de confort de la conduite collectées sur un panneau de transmission avec les résultats de la déformation mesurée sur quelque 100 chaussées en gravier. Les résultats des mesures de l'uni et le classement de l'uni basé sur ces résultats ont été dérivés des valeurs IRI. Comme conclusion du projet, il a été suggéré que la valeur IRI pourrait également être appliquée pour décrire la déformation de la chaussée et le confort du conducteur, mais pas pour contrôler l'entretien de la qualité des chaussées en gravier. [4]

2 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE POUR MESURER L'UNI DES ROUTES EN GRAVIER

2.1 Condition de classement des routes en gravier

L'affaissement longitudinal des chaussées en gravier est évalué en accord avec le classement de leur condition. Le classement de leur état est basé sur des images standard en cinq étapes auxquelles sont comparées des observations visuelles de l'état des routes. L'évaluation tient également compte de la consistance de la chaussée et de la coupe transversale. Le classement final en termes de condition, de 1 à 5, est déterminé à partir de la propriété la plus mauvaise. Cependant, l'uni de la chaussée est la propriété la plus dominante, car son absence est ressentie par les conducteurs comme la caractéristique la plus gênante. [7, 8]

Dans les contrats passés avant 2008, l'exécutant régional des travaux d'un contrat de maintenance périodique et de routine avait la responsabilité de contrôler la qualité de la chaussée en gravier en utilisant le classement de condition. En pratique, l'évaluation des chaussées en gravier est effectuée sur des sections de 2 kilomètres divisés en segments de 100-mètres. Chaque segment de 100 mètres est classé en fonction d'un barème de classement allant de 1 à 5 décrivant l'état de la chaussée.



Tableau 1. Exemple d'une l'image standard montrant l'état d'une chaussée de gravier de classe 2. [7]

2.2 Mesures des vibrations causées par le défaut d'uni de la chaussée

La vibration est définie comme le mouvement d'un point imaginable autour de sa position d'équilibre causé par une source de vibration ou un stimulus. Sur une chaussée de gravier cela signifie que les déformations de la chaussée agissent comme un stimulus qui fait vibrer la voiture et les passagers. Les vibrations sont transmises vers les structures de la voiture et ses passagers. Cependant, toute l'énergie du stimulus ne se traduit pas en vibration, mais une partie de l'énergie de la vibration se transforme en chaleur par exemple. Les vibrations sur une chaussée en gravier consistent en des vibrations multifréquences qui sont arbitraires. [2, 5, 6]

La mesure des vibrations mesure habituellement la variation du déplacement, la vitesse ou l'accélération comme une fonction temporelle. Quand nous étudions les chaussées en gravier, le déplacement de la partie inférieure du pneu est lié aux déformations de la chaussée par la fonction $h(t)$. La vitesse dans la direction verticale, v_z , et l'accélération, a_z , sont tour à tour dérivées de la fonction de déplacement $h(t)$. Ceci est présenté dans les formules 1 et 2.

$$v_z = \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2h}{dt^2} \quad (2)$$

L'effet de la vitesse horizontale constante du véhicule, v_x , sur l'accélération verticale du pneu, a_z , est présenté dans la formule 3.

$$a_z = \frac{h_x v_x^2}{l^2}, \quad (3)$$

où h_x est la magnitude du déplacement sur la distance parcourue l [m]
 l est la distance horizontale parcourue

Le capteur d'accélération permet de mesurer des vibrations mécaniques parce que son fonctionnement est basé sur un signal électrique généré par le mouvement d'un corps de masse apparente. [6, 9]

2.3 Équipement de mesure

L'équipement de mesure utilisé dans la l'étude peut être divisé en deux groupes. Le premier inclut l'équipement de mesure fixé sur la voiture et qui mesure les accélérations verticales causées par l'irrégularité de l'uni et transmet les résultats de la mesure. Le deuxième inclut l'équipement de gestion des données (téléphone portable et serveur) qui a pour tâche d'affiner, de sauvegarder et de présenter les résultats à l'utilisateur.

L'équipement monté sur la voiture comprend un capteur d'accélération et un compteur fixé sur le pare-brise de la voiture. Dans cette étude, c'est le compteur du pare-brise qui transmet et affine les résultats mesurés. Le champ de mesure du capteur d'accélération est de 12 g. Le capteur d'accélération est fixé à la suspension de la roue arrière droite de la voiture près du pneu (figure 2). L'idée consiste à minimiser l'influence des différentes propriétés du véhicule sur les valeurs de la mesure. L'unité de mesure fixée au pare-brise utilise la transmission sans fil pour envoyer les données sur le logiciel du téléphone portable.

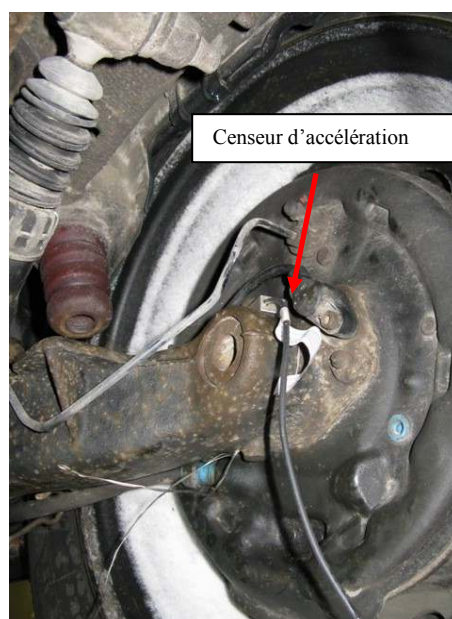


Tableau 2. L'emplacement sur la suspension de la roue où est fixé le capteur d'accélération

L'objectif dans la mise au point du dispositif de mesure était de créer un dispositif et une méthode conviviaux et néanmoins fiables. Le prototype est construit sur un frictiomètre avec une connexion Bluetooth incorporée. Quand nous évaluons les résultats des mesures de la déformation, il est essentiel de connaître la vitesse de conduite, qui est transmise par le logiciel du téléphone portable utilisant GPS. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'avoir un capteur de pulsation séparé.

2.4 Compte rendu des résultats de mesure

Les paramètres des sections de 100-mètres calculés à base des résultats des mesures sont sauvegardés sur le téléphone portable qui est utilisé comme appareil d'enregistrement des données pendant la phase de mesure. L'emplacement de mesure a également été identifié et enregistré dans le système à l'aide du localisateur de chaussée connecté au registre routier, et chaque phase de mesure inclut également les métadonnées relatives à la mesure. L'information affinée relative au site facilite considérablement le travail de compte rendu, et les résultats de mesure peuvent être visualisés en temps réel sur le panneau d'affichage du téléphone portable.

Les résultats de mesure sont transmis sans fil sur un portail sur un serveur internet. Les résultats de mesure peuvent être parcourus sur le portail, où ils sont clairement affichés sur une carte dynamique avec des codes en couleurs (Figure 3).

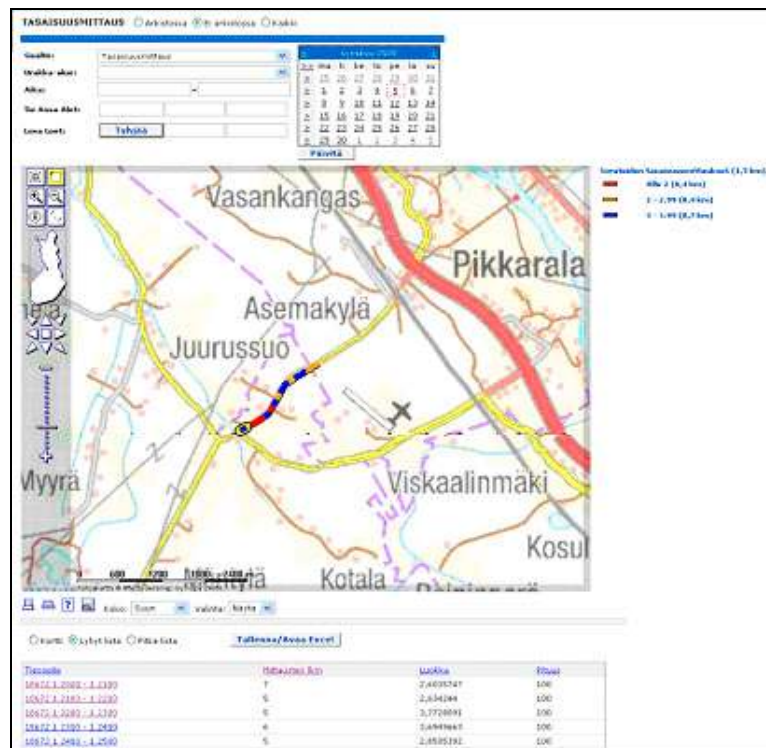


Figure 3. Les résultats de mesure sont disponibles dans un navigateur.

2.5 Possibles sources d'erreur

Les erreurs qui se produisent durant la phase de mesure peuvent être divisées en trois catégories: erreurs grossières, erreurs systématiques et erreurs aléatoires.

Les erreurs grossières sont définies comme des erreurs significatives, qui peuvent être causées par un mesureur, des changements momentanés du milieu, ou un mauvais fonctionnement momentané de l'appareil de mesure [3].

Les erreurs systématiques sont définies comme des erreurs de l'appareil de mesure, ou des erreurs dues à des effets extérieurs et à la présence de mesureurs différents évaluant les résultats de mesure. Tous les instruments de mesure ont une certaine précision dimensionnelle qu'ils utilisent pour mesurer l'ordre de grandeur en question. Les effets de facteurs intrinsèques mènent à des erreurs liées aux conditions de mesure. Les erreurs systématiques peuvent être causées par la position du capteur d'accélération sur la suspension de la roue de la voiture. La solution optimale consisterait à installer le capteur en position totalement horizontale. Dans la pratique, cependant, le capteur fixé reste toujours dans une position légèrement inclinée, parce qu'il est difficile de trouver une surface horizontale sur une suspension de roue, et en plus il serait difficile de vérifier s'il reste en position absolument horizontale vu le peu d'espace disponible. La déviation dans la position du capteur peut signifier que d'autres accélérations que celles qui sont strictement verticales affectant le véhicule influencent également les résultats de la mesure. Le gradient de la surface de la chaussée mène également à une petite erreur, mais l'influence en est seulement de l'ordre de 0.5 %. [3]

Une erreur aléatoire ou de statistique cause toujours des imprécisions de mesure. Une erreur de statistique peut être révélée par un instrument de mesure suffisamment précis, et l'effet de l'erreur statistique peut être diminué en prenant plusieurs mesures de l'objet ciblé. [3]

2.6 Les questions à prendre en considération dans l'utilisation de la méthode

Les sources possibles d'erreur doivent être prises en compte quand on utilise cette méthode de mesure afin d'obtenir des résultats fiables. Le capteur d'accélération doit être fixé sur la suspension de la roue arrière droite de la voiture et être sécurisé autant que possible. Le capteur doit être monté de telle façon que sa position soit aussi horizontale que possible. Le calibrage doit être effectué chaque fois que l'appareil de mesure est monté sur un autre véhicule, ou lorsqu'il est réinstallé après avoir été retiré.

La prise de mesure doit être effectuée en conduisant normalement sans éviter les nids-de-poule, afin d'obtenir une description complète. En plus d'être responsable de l'utilisation correcte de la méthode de mesure, le mesureur doit tenir compte des déformations et des nids-de-poule en dehors de la ligne de conduite. En plus, la pression du pneu doit correspondre aux recommandations du constructeur du véhicule.

3 MESURE

3.1 Méthode de mesure

Durant la phase de développement du compteur, le signal transmis par le capteur d'accélération a été sauvegardé dans un ordinateur portable en utilisant un oscilloscope. Il a été possible de convertir le signal de l'accélération électrique du capteur d'accélération en une véritable valeur d'accélération compte tenu que le niveau de la sensibilité du capteur était connu. Le voltage du capteur était équivalent à l'accélération de 9.81 m/s². La moyenne absolue et la valeur RMS (RMS = Sqrt(RMS_enregistré / Coefficient2) *9.81) a été calculée en se basant sur le signal d'accélération. Les valeurs ont été calculées en séquences de 1.2 secondes, qui ont également été utilisées pour calculer les moyennes totales pour une section 100-mètres. La valeur d'accélération a été interprétée et classée en utilisant la moyenne absolue et les valeurs RMS, car elles indiquaient une image relativement précise de l'ampleur de la déformation de la chaussée. [1]

La vitesse de conduite a un impact important sur les forces d'accélération affectant le véhicule. Toutes les accélérations verticales mesurées avec le capteur d'accélération ont été transformées pour égaliser la vitesse de comparaison (60 km/h), afin de rendre les résultats comparables. Le calcul du coefficient de changement k est présenté dans la formule 4

$$k = \frac{v_{norm}}{v_m}, \quad (4)$$

où v_m est la vitesse du véhicule au moment de la mesure

Le classement des chaussées se fait sur des sections de 100 mètres. La valeur absolue moyenne de la section de 100 mètres a été comparée avec les valeurs limites préliminaires du classement. L'échelle de classement préliminaire présentait les valeurs indiquées dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Valeurs limites préliminaires applicables aux chaussées en gravier.

Classe de d'uni	Moyenne d'accélération pour 100 mètres (voiture 1) [m/s^2]
5	0–5,2
4	5,3–9
3	9,1–22,4
2	22,5–30
1	>30

La vitesse minimum de mesure a été réglée à 30 km/h. Lorsque la mesure a été effectuée à une vitesse inférieure, nous l'avons mentionné dans les résultats de mesure présentés sur les pages web en indiquant une erreur dans la vitesse. Une vitesse plus faible peut être due à une section de chaussée en très mauvais état ou au fait d'avoir évité des nids-de-poule par exemple. Le nombre des données de mesure, 10 valeurs moyennes les plus importantes et les valeurs RMS ainsi que les 20 valeurs d'accélération les plus grandes transformées en vitesse comparative ont été recueillies par section. En plus, d'autres données de base relatives au mesureur, au temps et à la section de la chaussée ainsi que la vitesse de mesure moyenne ont été recueillies. En plus des valeurs de déformation, une réserve de prise en compte du gradient transversal et longitudinal, de la consistance et du degré de poussière de la chaussée a été introduite dans le programme.

Les mesures liées à la mise au point de la méthode ont été effectuées principalement au printemps et en été 2008. Des mesures de contrôle supplémentaires ont été effectuées à l'automne 2008. Deux voitures ont été utilisées pour les mesures. La taille des pneus des voitures de mesure étaient: pour la 1^e voiture 225/50 R17, et pour la 2^e voiture 185/65 R15.

Les mesures ont été effectuées sur deux sections de chaussée, qui présentaient toutes les deux des segments de surface unie et dense ainsi que des segments de surface plus irréguliers. En mesurant les différents degrés de déformation, le but a été de trouver les types de niveaux d'accélération causés et d'utiliser cette information pour aider au classement des chaussées de gravier. La ligne de conduite utilisée dans le travail de mesure était sélectionnée de telle manière qu'elle incluait autant de nids-de-poule que possible. Il y avait plusieurs petits trous au début de la section de la chaussée 3400–3500. La fin de la section de la chaussée était à surface unie et dense.

Le début de la section 2250–2450 avait une surface unie et dense, mais vers la fin de la section, la chaussée présentait des cavités assez profondes. Les nids-de-poule se succédaient en ligne, raison pour laquelle nous avons choisi une ligne de conduite comprenant le plus grand nombre de trous possible dans les mesures.

3.2 Effet de différents facteurs sur les mesures

À l'automne 2008, des mesures ont été effectuées à l'aide d'un capteur 150 g couvrant un champ de mesure plus vaste, car il était devenu évident pendant l'été que le champ de mesure du capteur 12 g n'était probablement pas suffisamment efficace pour les accélérations causées par les grandes déformations. La mesure a été faite sur la section 1 de la route en gravier 18613. Les flaches mesurées avaient environ 3-4 cm de profondeur. L'objectif était d'étudier l'applicabilité d'un capteur d'accélération plus grand pour les mesures de chaussée de gravier et de trouver la taille des accélérations maximum causées par les flaches.

Les mesures ont été réalisées deux fois avec les deux capteurs sur une section de chaussée sélectionnée de quelque 200-mètres. Les capteurs étaient attachés entre eux et ensuite fixés sur la suspension de la roue arrière droite du véhicule.

L'uniformité des accélérations verticales a été étudiée avec deux voitures séparées sur trois sections de chaussée différentes. Les sections de chaussée mesurées étaient les sections 2250–2450 et 3400–3500 sur la chaussée 18672, et la section 1 entre les sections 835–985 sur la chaussée 18632. Une mesure réussie a été effectuée par les deux véhicules sur chacune des deux sections à l'étude de la chaussée 18672. Une mesure était considérée comme réussie quand la ligne de conduite passait sur la plupart des cavités. Ceci a fourni également des données de référence relatives à l'effet évident des déformations sur les deux véhicules. D'un autre côté, sur la chaussée 18632, les deux véhicules ont effectué des mesures différentes à des vitesses de conduite de 40 et 50 km/h. En plus, les deux vitesses ont été utilisées pour prendre des mesures en utilisant trois lignes de conduite différentes. Les lignes de conduite en direction de la prise de mesure ont été sélectionnées de telle manière que la première était la plus éloignée à droite et les suivantes toujours à environ un mètre de distance du centre de la route. Par conséquent, la ligne de conduite de la dernière mesure passait environ au centre de la chaussée.

L'effet de la pression du pneu sur l'accélération verticale a été mesuré le 15 février 2008, Le banc d'essai de la suspension de la roue a été utilisé pour le test d'accélération (Figure 4). La vibration créée par le banc d'essai est similaire à celle causée par la chaussée réelle. Les pressions du pneu variaient entre 2.0–3.0 bars (l'intervalle de mesure étant - 0.2 bar). Les pneus utilisés dans l'étude étaient des pneus d'été et des pneus d'hiver cloutés 185/65 R15.

La suspension de la roue a été testée sur un banc d'essai comprenant deux rouleaux à vibration. Chaque rouleau de cette ligne d'essai génère une séquence de vibrations d'environ sept secondes. En résultat, l'unité affiche le taux d'amortissement de la suspension exprimé en pourcentage pour les pneus mesurés. Le taux d'amortissement est basé sur la manière dont les pneus suivent les rouleaux à vibration à la fréquence de résonance pendant l'essai.



Figure 4. Banc d'essai avec rouleaux à vibration utilisé pour étudier l'effet de la pression du pneu.

Le banc d'essai de la suspension de la roue a été utilisé pour effectuer des mesures avec les deux voitures (voiture 1 et voiture 2) en automne 2008. La mesure a été effectuée avec le capteur d'accélération fixé sur la suspension de la roue arrière droite pour mesurer l'accélération causée par les rouleaux à vibration. Nous avons effectué cinq mesures avec

chaque voiture. Le signal d'accélération des rouleaux à vibration a été sauvegardé sur un ordinateur portable moyennant Vibrocode (données de l'unité de mesure).

3.3 Calibrage de la méthode de mesure

La méthode de mesure doit être calibrée pour différents véhicules, ou chaque fois que le dispositif de mesure est réajusté. Le calibrage se fait sur la base des valeurs d'accélération de la vibration sur le banc d'essai de la suspension de la roue. Les données spécifiques de la voiture sont introduites dans l'appareil à l'aide du logiciel. La formule de calcul du coefficient de correction d'une voiture est présentée dans la formule 5.

$$a_k = \frac{17,70}{v_5 \cdot \frac{9,81}{1280}} = \frac{22656}{v_5 \cdot 9,81}, \quad (5)$$

où a_k est le coefficient de correction spécifique de la voiture introduit dans le logiciel
 v_5 est la moyenne de la somme des cinq valeurs absolues les plus grandes.

3.4 Développement de la méthode de mesure

L'objectif de la méthode de mesure est de fonctionner en continu et rapidement en prenant des échantillons du capteur d'accélération et en calculant les valeurs numériques basées sur les observations faites et en les transmettant à l'unité de collecte de données. Le dispositif de mesure est conçu pour calculer, en se basant sur les observations faites pendant 1.2 secondes, la somme des valeurs absolues d'accélération, le carré des accélérations et pour collecter les plus grandes valeurs d'accélération à un intervalle de 1.2 secondes. L'appareil transmet ces données via une connexion Bluetooth à l'unité de collecte des données. Les résultats finaux des mesures ont été calculés en se basant sur ces valeurs mesurées. Nous avons tenu compte dans l'interface de transmission des données des besoins futurs pour la mesure du gradient de la chaussée et du confort de conduite.

Les calculs réalisés avec l'unité de collecte de données ont fourni les paramètres de chaque section de cent mètres de chaussée, pouvant être utilisés pour l'évaluation de la qualité. L'unité de collecte de données a transformé les valeurs de mesure de chaque intervalle de 1.2 secondes pour les faire correspondre à la valeur de vitesse dite standard. Les valeurs liminaires spécifiées pour la vitesse standard ont permis de compter le nombre de nids-de-poule. Les résultats des différentes voitures ont varié. On pourrait comparer les résultats en utilisant le coefficient de calibrage. Les données réunies ont été transmises sur un serveur Internet. Les résultats de mesure ont été étudiés et classés en fonction des valeurs liminaires sur le serveur. Le résultat final a été présenté sur une carte en couleurs sur les pages web. Les images et les autres données enregistrées peuvent être jointes aux résultats.

4 RÉSULTATS

4.1 Mesurer différents ordres de grandeur de défaut d'uni

Les mesures ont produit les résultats présentés sur le tableau 2. Celui-ci indique la moyenne d'accélération calculée à partir des accélérations absolues et la valeur RMS (moyenne quadratique). Les valeurs ont toujours été calculées à un intervalle de 1.2 secondes, ce qui correspond au délai de transmission des données relative au dernier mètre parcouru. En plus, le tableau montre également les valeurs moyennes totales pour

les sections de cent mètres étudiées. Selon ces résultats, la section de la chaussée présentant des défauts d'uni est trois fois plus longue que la section à surface unie.



Figure 5. Surfaces de chaussée des sections mesurées. La section entre 2250-2450 à gauche et entre 3400-3500 à droite.

Tableau 2. Résultats des mesures de la chaussée 18672.

La présentation visuelle du signal d'accélération a montré que les sections de la chaussée avec le plus de cavités diffèrent clairement des sections plus régulières. Les plus grandes accélérations ont été telles qu'elles ont atteint la limite de mesure du capteur d'accélération, c'est-à-dire 12 g (figure 6).

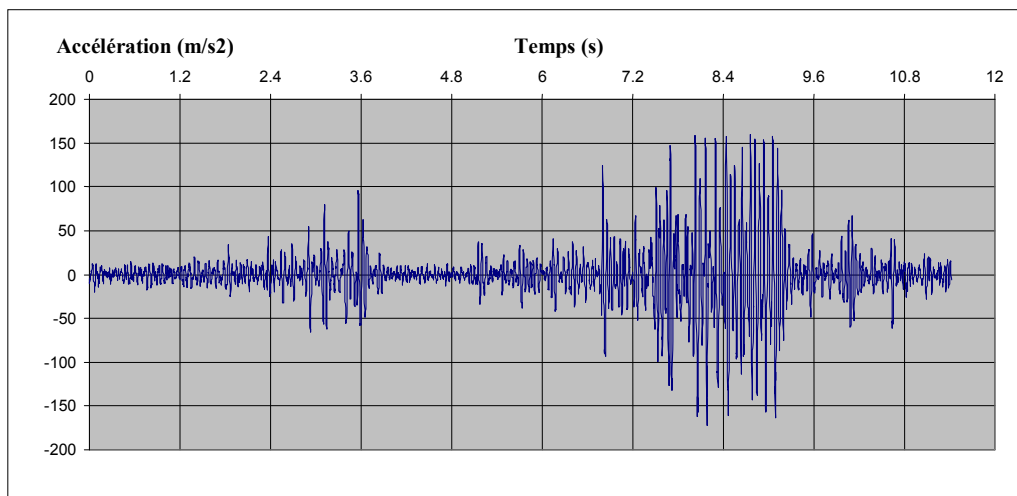


Figure 6. Le graphique d'accélération de la section de chaussée entre 2250–2450. Le tronçon irrégulier après le milieu de la section de la chaussée provoque des accélérations importantes.

4.2 Applicabilité de la méthode de mesure à des véhicules différents

Nous avons décidé de mesurer les valeurs de la chaussée 18672 en utilisant également un autre véhicule (voiture 1). Quand les valeurs respectives du tableau 2 ont été comparées aux valeurs du véhicule de comparaison, nous avons noté que les valeurs des mesures précédentes étaient 1.1–2.3 fois plus grandes que celles de la voiture 1. La plus grande différence est apparue sur la section de la chaussée 2350–2450, ce qui peut s'expliquer par le fait que la ligne de passage de la voiture 1 suivait un tracé légèrement différent. Par conséquent, le nombre de cavités sur la ligne de conduite causant des accélérations plus grandes a été inférieur à celui de la mesure précédente réalisée par la voiture 2.

Les deux voitures ont été utilisées pour des mesures sur la chaussée 18632. Le tableau 3 présente un résumé des résultats de mesure des deux voitures dont la vitesse mesurée était de 40 ou 50 km/h.. Ces résultats ont été convertis afin de les rendre compatibles avec une vitesse de conduite de 60 km/h. Quand nous comparons les résultats des voitures en utilisant la même vitesse et la même ligne de conduite, nous pouvons constater que les valeurs de mesure de la voiture 1 sont 0.67–0.82 plus élevées que celles de la voiture 2. La différence est due aux différences de pneus, de suspension et de structures des voitures. Le site et le positionnement du capteur d'accélération ont aussi influé sur les résultats. Par contre, il n'y avait pas de grandes différences dans les valeurs mesurées pour la même voiture.

Tableau 3. Les accélérations mesurées par les deux voitures sur la chaussée 18632. Ligne de conduite 1 plus éloignée à droite, 2 au milieu de la voie droite et 3 dans la ligne centrale de la chaussée

Véhicule	Ligne de conduite	Vitesse [km/h]	Moyenne accélération absolue.	Moyenne accélération absolue.	Moyenne RMS 100 m	Moyenne RMS 150 m
			100 m [m/s ²]	150 m [m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]
voiture 2	1	40	18,90	17,96	25,63	23,53
voiture 1	1	40	13,10	12,13	17,28	15,91
voiture 2	2	40	16,44	14,27	21,25	18,33
voiture 1	2	40	12,30	10,17	15,48	12,91
voiture 2	3	40	14,41	12,83	17,99	16,14
voiture 1	3	40	11,31	10,03	14,20	12,61
voiture 2	1	50	17,88	16,98	24,37	22,97
voiture 1	1	50	12,80	12,29	16,40	15,70
voiture 2	2	50	17,14	15,00	21,66	19,03
voiture 1	2	50	11,66	10,45	14,64	13,19
voiture 2	3	50	15,46	13,81	19,41	17,34
voiture 1	3	50	12,42	11,33	15,72	14,51

4.3 Effet de la pression du pneu sur la valeur mesurée

La pression du pneu se situait entre 2.0 et 3.0 bars et il a été montré que les accélérations du pneu augmentent presque de façon constante avec l'augmentation de la pression de l'air. Ceci peut-être expliqué par le fait que la pression du pneu a un effet sur la constante de suspension: l'augmentation de la pression de l'air de 0.2 bars a fait monter l'accélération maximum en moyenne de 3.02 m/s² pour les pneus d'été et de 3.66 m/s² pour les pneus d'hiver. L'effet sur la moyenne d'accélération était bien moindre, parce que les valeurs étaient respectivement de 0.52 m/s² avec les pneus d'été et de 0.82 m/s² avec les pneus d'hiver. Les figures 7 et 8 expriment l'effet de la pression du pneu sur les valeurs d'accélération maximum et médianes mesurées. L'accélération médiane a été calculée sur la base de la durée de la vibration appliquée au pneu, c'est-à-dire environ sept secondes.

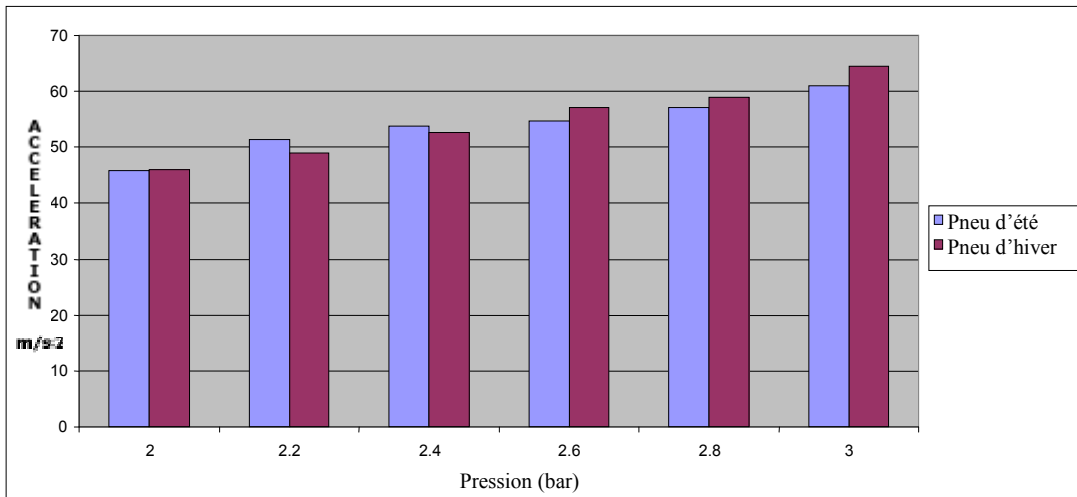


Figure 7. Effet de pression du pneu sur la valeur maximum d'accélération.

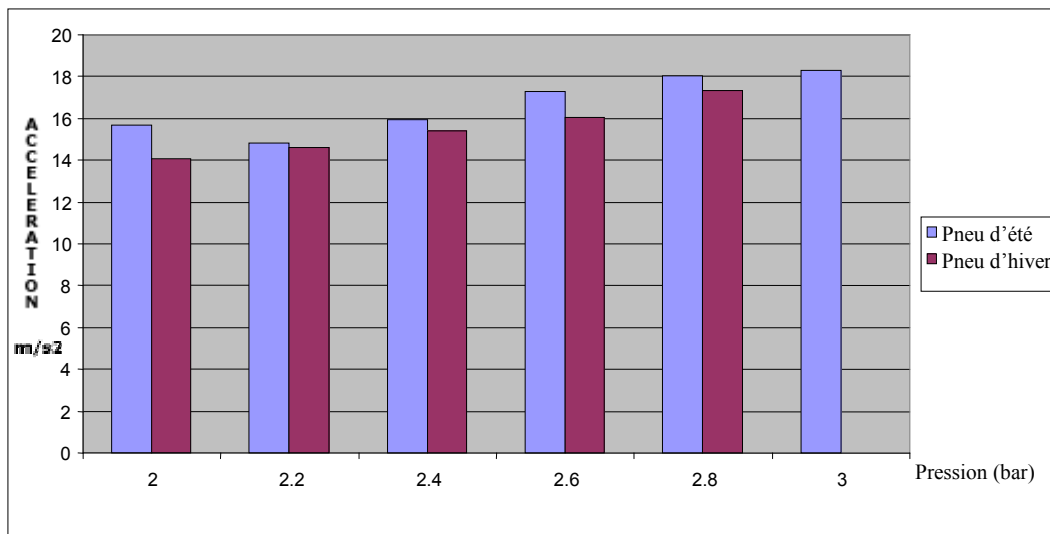


Figure 8. Effet de la pression du pneu sur la moyenne absolue d'accélération.

Il semblerait que l'effet de la pression de l'air sur l'accélération est insignifiant pour les valeurs de faible accélération, et inversement cet effet semblerait augmenter avec les accélérations fortes (figure 9).

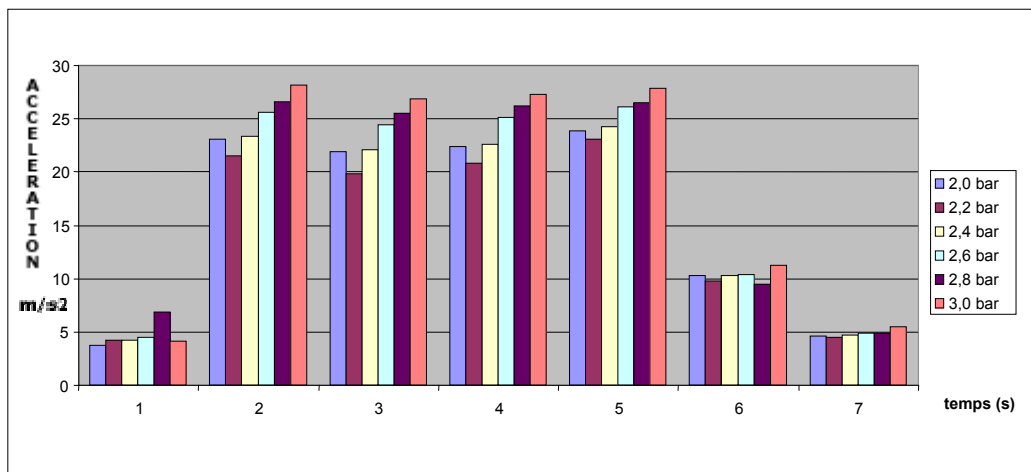


Figure 9. Accélérations mesurées, regroupées en séquences d'une seconde.

4.4 L'applicabilité du banc d'essai de suspension de la roue pour calibrer la méthode de mesure.

Les accélérations mesurées à partir des suspensions de roues ont été calculées dans un intervalle de six secondes basé sur la moyenne absolue d'accélération. Il n'y a pas eu de grande dispersion dans l'ordre de grandeur des séquences d'accélération mesurées par le même véhicule. Sur les deux véhicules utilisés dans l'étude, la voiture 1 a montré une accélération plus faible pour une séquence de vibration de six secondes. Les résultats mesurés de la voiture 1 étaient en moyenne, environ 0.8 fois plus élevés que ceux de la voiture 2. En été 2008 pour les mesures réalisées sur les chaussées en gravier, les résultats de la voiture 1 étaient 0.67–0.82 fois ceux de la voiture 2 (en moyenne environ 0.75). En nous basant sur ces résultats, nous avons conclu que le banc d'essai de suspension de la roue se prête pour le calibrage de la méthode.

4.5 Mesures utilisant le capteur d'accélération avec un champ de mesure plus large

Il a été décidé de procéder à des mesures en utilisant un capteur d'accélération au champ plus large plus large (150 g). Le tableau 4 présente les résultats de la même section de chaussée en utilisant les capteurs de différentes tailles.

Tableau 4. Les résultats des mesures du 9 octobre 2008, quand nous avons mesuré la même section de chaussée en utilisant les capteurs à champs de mesure différents.

Aire de mesure du capteur utilisé (\pm g)	Accélération maximum à la vitesse de mesure de 40 km/h (g)	Accélération maximum convertie pour correspondre à la vitesse de comparaison $v_{norm} = 60$ km/h (g)
12	15,5	23,3
12	15,7	23,6
150	11,1	16,6
150	12,5	18,7

Les flaches sur la chaussée 18613, qui étaient environ de 3-4 cm de profondeur (figure 10) ont causé environ 12 g d'accélération selon le capteur 150 g. Les mêmes flaches ont provoqué 15 g d'accélération avec le capteur 12 g. L'accélération 15 g indiquée par le capteur plus petit peut s'expliquer par le fait que le champ de mesure a été dépassé, et par conséquent l'accélération enregistrée par le capteur n'est plus aussi précise.



Figure 10. Il y avait de grandes flaches dans la ligne de conduite de la chaussée 18613.

La figure 11 montre les graphiques d'accélération des deux capteurs pour la chaussée 18613. Le graphique montre à quel point la capacité de différenciation du capteur à champ de mesure plus large est beaucoup plus pauvre à des niveaux d'accélération faibles. Le graphique basé sur les données enregistrées par le capteur montre les accélérations dues aux flèches plus grandes sur la chaussée, mais avec une différenciation des accélérations inférieure à 10 g, le graphique est donc loin de la capacité de différenciation du capteur plus petit. Ce capteur plus petit 12 g indique les accélérations les plus communes causées par la surface de la route, mais il est moins adapté au classement de déformations plus grandes telles que les nids-de-poule, car son champ de mesure est trop restreint. Cependant, le capteur plus petit de 12 g est plus approprié que le capteur de 150g pour le classement de la qualité de l'uni, car le capteur de 150 g a une capacité de différenciation moins précise à des niveaux d'accélération faibles. De plus, le champ de mesure du capteur 12 g peut être techniquement élargi en utilisant une vitesse de conduite plus faible.

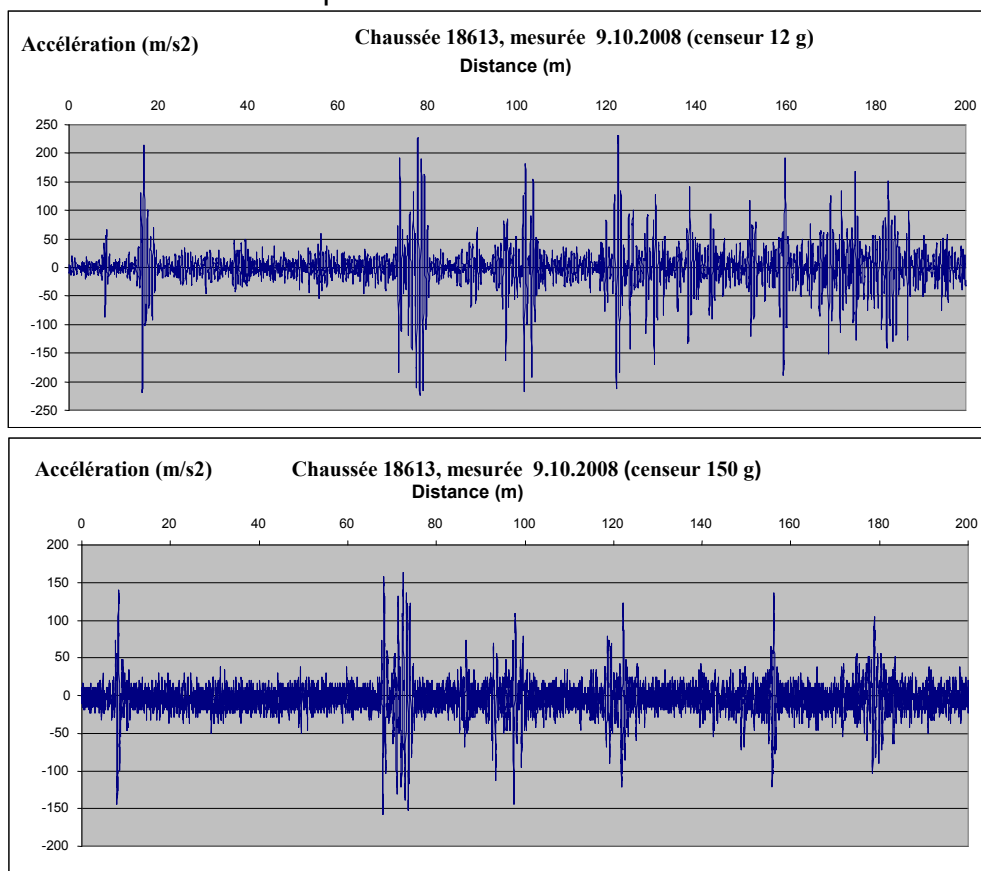


Figure 11. Schéma de l'accélération des capteurs 12g et 150g pour la route en gravier 18613.

5 CONCLUSIONS

Mesurer la qualité d'uni des chaussées en gravier occupe une place importante dans l'entretien régulier et périodique du réseau routier classé de moindre importance. L'évaluation de l'état de l'uni basée sur les observations visuelles a besoin d'être complétée par de nouvelles techniques de mesure. La méthode automatique mise au point pour mesurer l'uni des routes de gravier semble adéquate pour mesurer, suivre et gérer la qualité d'uni des routes en gravier. L'inconvénient des résultats mesurés à l'aide de capteurs d'accélération consiste dans le fait qu'ils ne génèrent que les données situées dans la ligne de passage de la voiture. À l'avenir, une piste de recherche pourrait porter

sur la possibilité de mesurer et de combiner une vision informatisée avec les données de mesure collectées à l'aide du capteur d'accélération. Une vision informatisée permettrait l'observation des cavités sur la chaussée sur l'ensemble du périmètre et également le suivi sur toute la largeur de la route.

La méthode mise au point a permis de collecter automatiquement des données sur la qualité de l'uni des chaussées en gravier. Il est désormais possible de recueillir de grandes quantités de données et de suivre l'évolution des données relatives à la qualité de l'uni. Par conséquent, il sera possible de contrôler avec une plus grande efficacité l'évolution de la surface et de réagir aux changements dans la qualité de l'uni du réseau de routes en gravier. À l'avenir, l'existence de données historiques dégagera également des possibilités de réaliser de nouveaux types d'analyses sur l'évolution de l'état des chaussées en gravier, par exemple, sur l'évolution de la qualité de l'uni d'une nouvelle chaussée pendant une période précise. Le contrôle à long terme fournit une information importante pour les décideurs chargés du suivi de la condition du réseau routier.

La méthode de mesure mise au point dans le projet est particulièrement apte à l'évaluation d'un réseau routier, car elle permet de travailler en temps réel. Cet aspect ouvre plusieurs nouvelles possibilités de développer la gestion de l'état du réseau routier, de contrôler la qualité des travaux effectués par les contractants et d'assurer une meilleure prévention des risques. La méthode a été élaborée de manière à permettre aussi l'inclusion d'autres variables de mesures dans la méthode. Très probablement elle se prête également à la mesure de la qualité de l'uni en période hivernale. En hiver, l'unité de mesure peut également être utilisée pour mesurer la friction. En Finlande, la méthode de mesure pour les contrats régionaux signés en 2009 et plus tard a changé, mais cette méthode pourrait également être appliquée avec quelques modifications aux contrats plus récents.

RÉFÉRENCES

1. CCD-Fotoniikka Oy (2008). Kitkamittarin käyttö tasaisuuden mittauksessa, version 1, 17.1.2008.
2. Dahlström, Seppo & Syrjälä, Kai. (1984). Matalataajuuksinen värähtely ja sen vaikutus ihmiseen. Helsinki 1984, Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta (MATINE), report series A. 41 p.
3. Hiltunen, Erkki & al. (1993). Mittaustulosten esittäminen ja niiden luotettavuuden arvioiminen. University of Turku: offset. University of Turku, Institute of Biomedicine, Medical Physics.
4. Hiltunen, Kari & al. (1995). Sorateiden tasaisuustunnusluku. 2nd ed. Helsinki: Oy Edita Ab. 22 p. Finnish Road Administration report 62/1995.
5. Marjanen, Ykä. (2002). Koko kehon värähtelyn analysointi työkoneissa. University of Oulu, Department of Mechanical Engineering, Master of Thesis. 112 p.
6. Nevalainen, Seppo (1999). Mekaanisten värähtelyjen mittausten kartoitus. Helsinki. The centre for metrology and accreditation report J8/1999. 26 p.
7. Sorateiden kuntoluokitus [Verkkodokumentti]. Saatavan PDF-tiedostona: <http://www.tiehallinto.fi/pls/wwwedit/docs/7511.PDF> [Vii-tattu 2.12.2008].
8. Tiehallinto (2007a). Kunnossapidon tuotekortit 22.1.2007 [webdocument]. Available in PDF-file: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/alueurakat/tuotekortit2007.pdf> [7.1.2008].
9. Ylitalo, Mika. (2005). Kiihtyvyyssanturien automaattisen testausjärjestelmän kehitys. University of Oulu, Department of Electrical and Information Engineering, Master of Thesis 62p.