



Expérience en conditions réelles d'une nouvelle solution de pesage dynamique pour l'évaluation du trafic sur les ponts routiers

François-Baptiste CARTIAUX, Véronique LE CORVEC, Jorge SEMIAO

OSMOS Group SA, Paris, France

Bernard JACOB, Franziska SCHMIDT

Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne, France

Alexandre BROUSTE

Laboratoire Manceau de Mathématiques, Le Mans Université, Le Mans, France

Alain EHRLACHER

Cabinet Ehrlacher, Grisy-Suisnes, France

Contact : cartiaux@osmos-group.com

Résumé

Le pesage dynamique est actuellement le seul moyen d'évaluer et de surveiller avec précision les charges de circulation sur les ponts routiers à partir de mesures réelles. Cette évaluation permet de détecter les véhicules potentiellement en surcharge et d'optimiser les opérations de maintenance sur le pont grâce à une connaissance précise de ses conditions de charge réelles.

Une expérience est décrite, réalisée sur un pont à poutres préfabriquées en béton précontraint traversant une autoroute en France. Le système de pesage dynamique Weigh-in-Motion (WIM) utilise le tablier du pont à la manière d'une balance, comme élément du dispositif de pesage, et mesure la déformation des parties critiques de la structure.

Ce système est capable d'obtenir des estimations significativement précises du poids total des véhicules sur la plupart des types de ponts, y compris les tabliers à caissons de longue portée, à grands tabliers composites, ou à multiples poutres préfabriquées en béton précontraint comme celui examiné dans cette étude. Cependant, l'estimation de la charge par essieu est encore moins précise et n'est pas présentée ici.

L'expérience a débuté en février 2019 et se poursuit, démontrant également la robustesse de la solution pour une exploitation de longue durée, en tant que partie permanente de la gestion du pont tout au long de son cycle de vie. Ainsi, les capteurs WIM utilisés sont également pertinents pour le monitoring de l'intégrité structurelle du tablier du pont.

Mots clés : pesage dynamique (WIM) ; pont routier ; structural health monitoring (SHM) ; charge de circulation ; mesure de déformation ; Corde Optique.

1 Introduction

Les gestionnaires et les exploitants d'infrastructures, les autorités routières, les régulateurs de trafic et les autres parties prenantes ont besoin de données détaillées et exhaustives sur les charges et la densité du trafic, en particulier concernant les véhicules utilitaires poids lourds, à diverses fins de surveillance de la circulation. Les principaux défis à relever sont les suivants : assurer une concurrence équitable entre les modes et les sociétés de transport [1], améliorer la sécurité des routes et des camions [2], évaluer l'impact sur les infrastructures et en atténuer les dommages [3, 4, 5], étudier les chaînes logistiques et fournir des indicateurs économiques sur le transport de marchandises [6], voire optimiser la conception des camions ou de leurs composants [7]. Pour tous ces objectifs, l'application des réglementations relatives aux véhicules utilitaires poids lourds surchargés est un défi majeur [8]. Le pesage dynamique (*weigh-in-motion* ou WIM) est l'outil idéal pour recueillir et fournir des données sur la charge du trafic, et bien plus encore sur la taille des véhicules, leur espacement, leur vitesse, etc.

Les données WIM apportent des informations extrêmement utiles pour la gestion des infrastructures routières, par exemple pour les inspections, l'entretien et les réparations. Elles permettent de planifier ces opérations à l'avance, de donner l'alerte lorsque l'intensité du trafic atteint un certain seuil, et de minimiser l'impact sur la structure et la circulation. Un grand nombre de données WIM ont été utilisées pour développer ou calibrer les codes de charge des ponts, par exemple le code des ponts de l'Ontario à la fin des années 70, ou l'Eurocode 1991-2 à la fin des années 80 et dans les années 2000 [9, 10]. L'évaluation de la fatigue des ponts en acier et en matériaux composites sous des charges en mouvement utilise également principalement des données WIM [11].

Les systèmes WIM peuvent être classés soit en fonction de leur mode de fonctionnement, soit en fonction de leur technologie :

- WIM à grande vitesse (HS-WIM) et WIM à faible vitesse (LS-WIM),
- Capteurs routiers, pont instrumenté (B-WIM) et capteurs embarqués dans les véhicules (OB-WIM).

Le LS-WIM a principalement lieu en dehors du flux de circulation, sur des zones dédiées et contrôlées,

à une vitesse inférieure à 10-15 km/h (sans effet dynamique) sur des surfaces lisses et plates, et généralement à des fins légales, d'application de la loi ou commerciales. Par conséquent, la précision de ces systèmes est généralement évaluée en utilisant la recommandation OIML R-134 [12]. Le HS-WIM consiste à peser les véhicules à la vitesse actuelle du flux de trafic, sur les routes et autoroutes existantes. Les mesures étant affectées par l'interaction dynamique entre le véhicule et l'infrastructure, c'est une évaluation statistique de la précision qui est effectuée, par exemple selon la norme COST323 [13]. Cependant, certains pays ou certaines expériences utilisent maintenant le HS-WIM à des fins d'application directe [14, 15]. Les systèmes LS-WIM utilisent principalement des plaques de cellules de charge, tandis que les systèmes HS-WIM par capteurs routiers utilisent des plaques de cellules de charge ou de flexion, ou divers capteurs à bande, piézo-quartz, piézo-céramiques, piézo-polymères, à fibre optique ou à jauges de contrainte.

Le B-WIM est une solution HS-WIM, dans laquelle un pont instrumenté est utilisé comme balance pour déduire les poids et dimensions des camions qui le traversent. Le pont est donc équipé de capteurs de contraintes, de jauges, de fibres optiques ou de Cordes Optiques (par OSMOS). Un problème inverse d'identification est résolu en ajustant les déformations calculées dans diverses sous-structures du pont, dérivées des lignes ou des surfaces d'influence ainsi que des charges et de l'espacement des essieux ou des roues (qui sont la variable inconnue), sur les déformations mesurées. L'étalonnage du système (algorithmique) s'effectue avec les camions de test en ajustant les lignes d'influence.

En fonction du type et de l'état du pont, la précision d'un système B-WIM varie entre les classes D+(20) et A(5) telles que définies par la norme COST323. Les avantages d'un B-WIM sont les suivants : système non intrusif ou très peu intrusif, qui peut être installé ou retiré en toute sécurité sans interrompre la circulation grâce à un accès sous le tablier du pont, difficile à éviter par les conducteurs, faible exposition au vandalisme ou aux charges du trafic. Cependant, le B-WIM nécessite le bon pont au bon endroit, un bon niveau d'expertise pour l'installation et l'étalonnage, et il n'est pas facile d'obtenir une homologation pour les applications métrologiques et légales, car le pont lui-même fait partie de l'instrument. Pour autant, ces systèmes fournissent des informations à la fois sur les charges du trafic

et sur la réponse du pont, et constituent donc des outils très pertinents pour évaluer et surveiller le comportement du pont sous les charges du trafic.

2 La solution B-WIM d'OSMOS

OSMOS a proposé pour la première fois sa solution B-WIM, appelée WIM+D[®], en 2018. Cette solution tire parti de la précision de la Corde Optique, un capteur de déformation à base longue, qui utilise une technologie exclusive pour obtenir des mesures de déformation à un taux d'échantillonnage élevé à partir de l'analyse de l'atténuation de la lumière dans un dispositif à fibre optique [16].

Par rapport aux techniques B-WIM précédentes, la solution WIM+D[®] d'OSMOS innove en distinguant radicalement le poids total autorisé en charge (PTAC) ou la masse maximale techniquement admissible (MMTA) et la charge par essieu.

Le PTAC est obtenu à partir de capteurs qui mesurent les effets globaux sur les principaux éléments structurels, comme par exemple les poutres principales, où il est plus facile de lisser les effets des vibrations et d'obtenir des lignes d'influence précises. Par ailleurs, le nombre minimal de capteurs requis pour cette estimation, quelle que soit la position transversale du véhicule, correspond au nombre de poutres principales, généralement 2 ou 4 seulement, le plus souvent moins de 10 pour un tablier à 2 voies.

La vitesse du véhicule est dérivée de l'écart temporel entre les mesures des capteurs situés sur deux travées successives.

Les emplacements transversaux et les poids des essieux sont obtenus à partir de capteurs supplémentaires sensibles aux effets locaux, par exemple en mesurant la flexion en sous-face d'une dalle sous chaussée. Un seul capteur de poids d'essieu est nécessaire pour chaque voie de circulation, ce qui conduit généralement à deux capteurs sur les ponts routiers standards. L'espacement des essieux est calculé à partir de l'identification des pics dans les signaux post-traités, avec des entrées provenant de plusieurs capteurs. Les poids des essieux sont calculés en répartissant le PTAC précédemment estimé sur chaque essieu identifié par les capteurs, avec des ratios déduits des amplitudes relatives des effets locaux de l'essieu.

Les données brutes sont téléversées sur le cloud OSMOS toutes les 30 secondes. L'algorithme WIM+D effectue l'analyse des données sur le cloud

et publie des « fiches de passages » complètes pour chaque passage de camion sur le pont, sur une interface web appelée « Safe WIM+D », dans un délai moyen de 1 minute (Figures 1, 2 et 3).

Time :	2021/01/30 at 13:29:08 UTC
Maximum Strain (mm/m) :	0.0334
Gross Weight (tons) :	38.8
Number of Axles :	5
Length (m) :	9.04
Speed (km/h) :	75.7
Direction :	N-S

Figure 1. Résultats typiques sur une fiche de passages

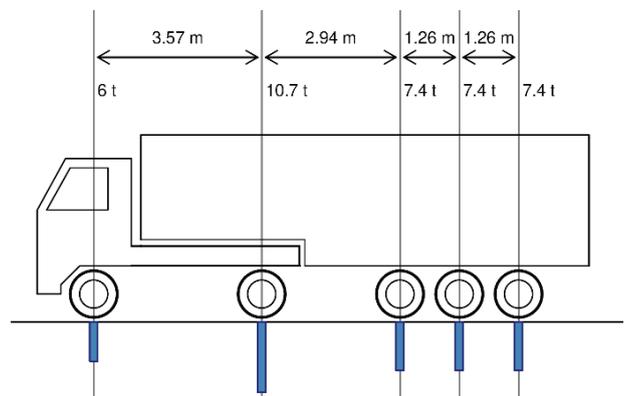


Figure 2. Configuration du camion telle que présentée sur la fiche de passages

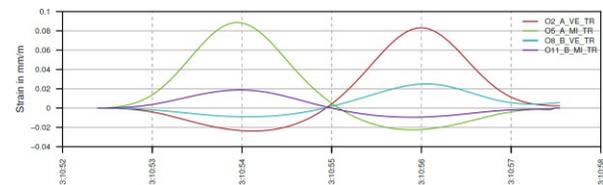


Figure 3. Mesures de la déformation telles que présentées sur la fiche de passages

Les avantages de la solution WIM+D[®] sont les suivants : (1) le faible nombre de capteurs requis, qui augmente la portabilité du système et réduit les coûts d'acquisition et d'installation (seulement 6 capteurs sur un pont à tablier mixte typique avec deux poutres principales et deux travées), (2) la disponibilité de toutes les données de déformation brutes sur un service cloud pour une analyse plus poussée du monitoring de l'intégrité structurelle, y compris l'évaluation des vibrations ou de la fatigue, et (3) son adaptabilité à un large éventail de types de ponts différents, au moins pour l'estimation du poids brut.

3 L'expérience d'Auzouer

3.1 Description de la structure et du système

Le pont d'Auzouer est un viaduc situé dans le centre de la France, près de Tours, enjambant l'autoroute A10 exploitée par Vinci Autoroutes. Il supporte une route à deux voies, située sur un itinéraire de convois exceptionnels. Il compte deux travées principales de 14,5 m au-dessus des voies de l'autoroute, et deux travées latérales plus courtes.

Le tablier du pont, constitué d'une dalle en béton armé, est soutenu par dix poutres parallèles préfabriquées en béton précontraint. L'enjeu, pour une telle configuration de pont avec de multiples poutres principales, est de choisir le nombre minimum de capteurs de pesage à installer, donc de poutrelles à instrumenter.

L'expérience a débuté en février 2019 avec l'installation d'un système de monitoring OS MOS comprenant dix Cordes Optiques et deux accéléromètres tri-axiaux (non utilisés pour le WIM). Les Cordes Optiques sont placées comme suit :

- Quatre capteurs sur l'âme de quatre poutres principales de la travée principale 1, à mi-travée,
- Deux capteurs sur l'âme de deux poutres principales de la travée principale 2, à mi-travée,
- Quatre capteurs en intrados de la dalle de la travée principale 1, à mi-travée (Figure 4).



Figure 4. Cordes optiques sur la travée principale 1

Le premier groupe de quatre capteurs est utilisé pour l'estimation du poids total, tandis que le second groupe de deux capteurs est utilisé pour l'estimation de la vitesse.

Le dernier groupe de quatre capteurs est utilisé pour détecter les essieux, dérivés de la flexion locale de la dalle. Cette méthodologie est fiable si au moins les roues gauches ou droites du camion

induisent une flexion locale significative de la dalle sur au moins un des quatre capteurs (parmi neuf montés sous la dalle).

3.2 Test de charge

L'évaluation des performances du système WIM+D® sur le pont Auzouer utilise les résultats d'un essai de charge réalisé le 7 novembre 2019.

Trois camions de référence (test), de poids et dimensions connus et mesurés en statique, ont été utilisés pour étalonner le système. Un camion rigide à 2 essieux, un camion rigide à 4 essieux et un semi-remorque court à 5 essieux (Figure 5) ont été loués à une entreprise de construction située à proximité du pont. Ils ont été entièrement chargés, respectivement à 19,2 tonnes, 31,8 tonnes et 43,9 tonnes (MMTA). La pesée statique a été effectuée le matin avant les tests et le soir après les tests, de façon à vérifier que les charges n'ont pas varié au cours de la journée.



Figure 5. Deux (des trois) camions qui ont été utilisés pour le test de charge

Les camions de test ont traversé plusieurs fois le pont, et la réponse structurelle a été enregistrée pour chaque passage. Les passages ont simulé diverses situations :

- Un camion test traversant le pont seul, par comparaison avec 2 camions test présents

- simultanément sur le pont,
- Plusieurs vitesses, de très lente (quasi-statique, 10 km/h) jusqu'à la vitesse maximale autorisée (80 km/h),
- Diverses positions latérales du camion sur le tablier du pont, soit centrée dans chaque voie, soit en dehors d'une voie.

3.3 Performances du système

Sur les 49 passages de test, certains ont été écartés car ils correspondaient à des situations de trafic inhabituelles, comme des parcours à très faible vitesse (moins de 10 km/h, avec un arrêt du camion sur le pont), ou deux camions qui étaient très proches l'un de l'autre. Un total de 33 passages ont été retenus, dont 6 sont utilisés pour l'étalonnage et 27 pour l'évaluation de la précision du système B-WIM. Les passages d'étalonnage ont été choisis de façon à couvrir diverses situations : un passage pour chaque voie, un parcours centré, au moins deux camions différents dans les deux directions. L'étalonnage produit quatre coefficients, un pour chaque capteur utilisé pour l'estimation du PTAC.

Les erreurs relatives sur le PTAC pour les 27 passages de camions sont calculées par rapport aux poids statiques mesurés sur des balances homologuées (Figure 6). Les quantiles à 5 et 95 % des erreurs négatives et positives sont respectivement de -5,3 et +4,7 %. L'écart-type est de 3,9 %.

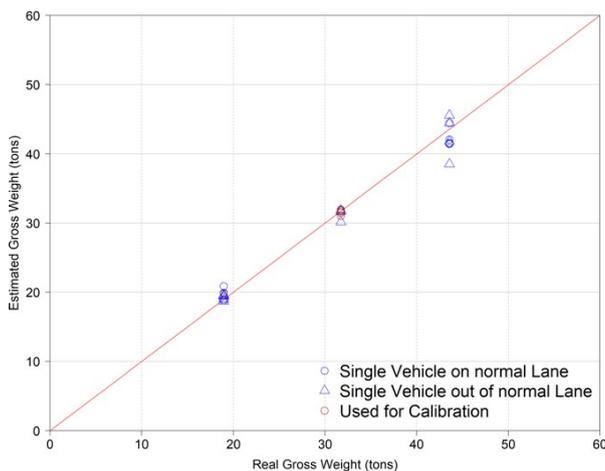


Figure 6. Comparaison du poids réel et du poids estimé pour différents cas de charge

Selon la norme COST323, le système B-WIM se situe dans la classe de précision C(15) pour le PTAC, très proche de la classe B(10) - la tolérance au niveau de confiance requis est inférieure à 11 %.

Pour les charges et les espacements d'essieux, la

version actualisée du système WIM+D® développé par OSMOS a été considérablement améliorée par rapport à la première version de 2018. L'ancien système n'était pas en mesure d'identifier correctement les essieux sur ce type de pont. La marge d'erreur maximale actuelle de la mesure de l'espacement des essieux est inférieure à 0,25 m, soit moins que la longueur d'une empreinte de pneu, et l'écart type est de 0,14 m.

La charge par essieu est calculée par la répartition du PTAC sur les essieux identifiés. En raison de la complexité des lignes d'influence, liée à la géométrie du pont, la charge par essieu estimée peut présenter une marge d'erreur allant jusqu'à 35 %. Des méthodes d'analyse avancées sont à l'étude pour améliorer la précision de cette estimation.

Ce type de pont justifie le maintien de l'effort sur l'estimation de la charge par essieu. Cependant, une étude précédente réalisée avec le système WIM+D® sur un tablier de pont composite à deux poutres principales a donné des résultats plus précis sur les charges par essieu, avec une marge d'erreur maximale de 15 % pour les essieux de plus de 10 tonnes et un écart type de 7,5 % [17].

3.4 Résultats statistiques

Sur la base des mesures enregistrées par les Cordes Optiques et des paramètres d'étalonnage, l'identification des camions est automatiquement réalisée et les données de trafic sont directement communiquées au client via l'interface web WIM+D® du site OSMOS Safe.

Le niveau de détection dynamique est réglé pour enregistrer tous les camions de plus de 40 tonnes, mais certains camions plus légers sont également enregistrés. Une analyse statistique des camions enregistrés sur l'année 2020 a été effectuée (Figure 7).

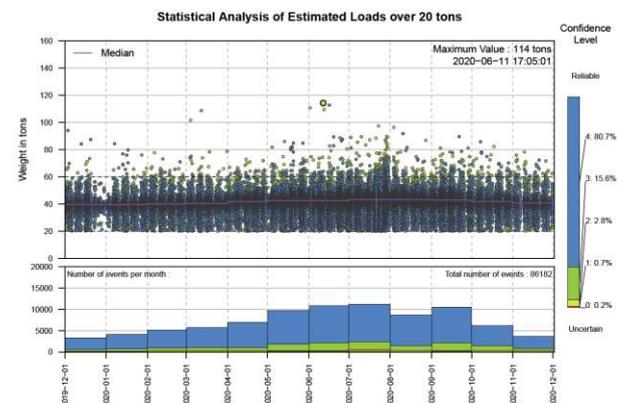


Figure 7. Analyse statistique des camions identifiés sur un an.

Environ 86 000 camions ont été enregistrés au cours de l'année (Figure 8). Le type de camion le plus fréquent est un camion T2S3 à 5 essieux (tracteur à 2 essieux et semi-remorque à 3 essieux), ce qui est cohérent avec le schéma de circulation habituel sur les routes françaises.

La circulation évolue au cours de l'année : le flux de trafic double en été par rapport à l'hiver. Ces données sont utiles au gestionnaire de la structure pour surveiller le trafic sur le pont, planifier le calendrier d'entretien et effectuer des analyses de fatigue.

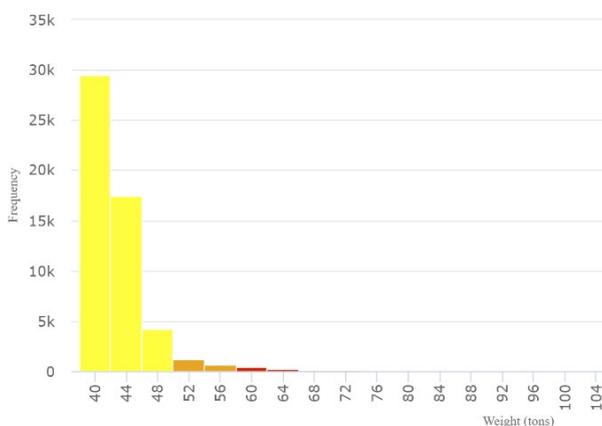


Figure 8. Répartition du poids des camions identifiés sur une année, telle qu'affichée en temps réel sur l'interface web.

L'exhaustivité des données permet également d'identifier les charges anormales qui traversent le pont. Ces charges anormales sont comparées à celles déclarées dans les autorisations délivrées. Sur le pont d'Auzouer, 6 passages de plus de 100 tonnes (PTAC) ont été identifiés en 2020 et la configuration des camions mesurée par le WIM+D® semble réaliste.

4 Conclusions

Cet article présente le système B-WIM développé par OSMOS et son application sur le pont d'Auzouer, un pont à poutres préfabriquées en béton précontraint. Cette configuration de pont implique une ligne d'influence de charge complexe, pour laquelle OSMOS a dû améliorer son système B-WIM.

Avec un nombre limité de capteurs (4 capteurs pour le poids brut, et 4 autres pour l'emplacement des essieux et l'estimation de la charge), le système peut estimer le PTAC des camions avec un écart

type de 3,9 %. L'identification de l'emplacement des essieux a été considérablement améliorée et une meilleure évaluation de la charge par essieu est actuellement à l'étude.

Il est apparu que l'emplacement transversal des camions sur le pont est très dispersé : une partie importante des parcours n'a pas induit de flexion locale de la dalle sur laquelle les capteurs de détection d'essieux sont montés. Ainsi, deux capteurs supplémentaires ont été installés en intrados de la dalle en décembre 2020. Les résultats présentés dans ce document ne tiennent pas compte de cette amélioration. Un test supplémentaire est prévu en 2021 pour qualifier les performances du système amélioré.

En effectuant une mesure précise de la charge de trafic en temps réel, le système B-WIM d'OSMOS est un système efficace pour les gestionnaires d'infrastructures, qui permet d'évaluer les charges de trafic actuelles et d'optimiser les calendriers de maintenance.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Cofiroute et M. Nicolas BARDOU pour leur soutien dans l'utilisation du pont d'Auzouer comme étude de cas pratique, qui a rendu possible cette expérience en conditions réelles.

Références

- [1] Dolcemascolo V., Hornych P., Jacob B., Schmidt F., Klein E. Heavy Vehicle Traffic and Overload Monitoring in France and Applications. *Proceedings of the XXVth World Road Congress, Road and Mobility creating new Value from Transport*, Seoul, Nov. 2-6, 201.
- [2] Jacob B., Feypell de la Beaumelle V. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research*, 34, 2010, 9–15.
- [3] Schmidt F., Jacob B. Experimentation of a bridge WIM system in France and applications to bridge monitoring and overload screening. *Proceedings of the International Conference on Weigh-In-Motion ICWIM6*, Eds. B. Jacob et al., Jun 2012, 52-59
- [4] Schmidt F., Glaeser K.-P., Hornych P., Piau J.-M., Jacob B. Impacts from Truck Traffic on Road Infrastructure. *PIARC, Routes/Roads*

- 358, 2013, 74-83.
- [5] Papagiannakis A.-T., Jackson N.-C. Traffic Data Collection Requirements for Reliability in Pavement Design. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 237-243, 132, 3.
- [6] Eurostat, Road freight transport by vehicle characteristics, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Road_freight_transport_by_vehicle_characteristics#Road_freight_transport_by_axle_configuration, accessed 12/01/2021.
- [7] Schmidt F., Jacob B., Domprobst F. Investigation of Truck Weights and Dimensions Using WIM Data. *Transportation Research Procedia, Volume 14*, 2016, 811-819.
- [8] Dolcemascolo V., Jacob B., Klein E. French policy to prevent overloading. *Proceedings of the International Conference on Weigh-in-Motion ICWIM8*, Eds. B. Jacob & F. Schmidt, May 2019, 15-23.
- [9] Flint A., Jacob B. Extreme Traffic Loads on Road Bridges and Target Values of their Effects for Code Calibration. *Proceedings of IABSE Colloquium Basis of Design and Actions on Structures*, Copenhaguen 1996, 469-477.
- [10] Jacob B., Kretz T. Calibration of bridge fatigue loads under real traffic conditions. *Proceedings of the IABSE Colloquium: Basis of Design and Actions on Structures*, Copenhagen, 1996, 479-487.
- [11] Jacob B., Arroyo-Contreras G.-M., Schmidt F., Assessment in Fatigue of an orthotropic Steel Deck Bridge under Traffic Loads and Impact of abnormal Loads – Case of the Normandy Bridge, *Proceedings of the TRB Annual Meeting*, Washington, 2019.
- [12] OIML (2006). *Automatic Instruments for weighing Road Vehicles in Motion and Axle Load measuring*. Part 1: Metrological and technical requirements – Tests. R 134-1.
- [13] COST323. *European Specification on Weigh-in-Motion of Road Vehicles*. EUCOCOST /323/8/99, LCPC, Paris, August 1999, 66 pp.
- [14] Cottineau L.-M., Jacob B., Hornych P., Schmidt F., Klein E. Direct enforcement of overload by WIM. *Proceedings of the International Conference on Weigh-In-Motion ICWIM7*, November 2016, 281-290.
- [15] Antofie A., Boreux J., Corbaye D., Geroudet B., Liautaud F. Approach of the Wallonian Legal Metrology (Belgium) for Weigh-In-Motion (WIM) free-flow direct Enforcement. *Proceedings of the International Conference on Weigh-in-Motion ICWIM8*, Eds. B. Jacob & F. Schmidt, May 2019, 147-154.
- [16] Cartiaux F.-B., Pelletier P., Semiao J. Traffic and Temperature Effects Monitoring on Bridges by Optical Strand Strain Sensors. *Proceedings of the Fifth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures SMAR2019*, Potsdam, August 2019.
- [17] Cartiaux F.-B., Koutsonika S., Andrikopoulos G., Pelletier P. Bridge Monitoring & Assessment via OSMOS Optical Strands. *Proceedings of the Fourth Joint International Symposium on Deformation Monitoring JISDM2019*, Athens, May 2019.