

RECHERCHES TRANSPORT

BULLETIN D'INFORMATION SCIENTIFIQUE

Volume thématique 1, no. 7 : août 1992

SYSTÈME DE PESÉE EMBARQUÉ BASÉ SUR DES JAUGES EXTENSOMÉTRIQUES PAR FIBRE OPTIQUE

C. Belleville, G. Duplain, A. Bergeron
Institut national d'optique
Sainte-Foy, (Québec)

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

INTRODUCTION

Le ministère des Transports du Québec consacre plus de 400 millions de dollars par année pour la réfection des chaussées et des infrastructures routières. Afin de limiter leur détérioration, le Ministère a mis en place une réglementation limitant la charge axiale et la charge totale en fonction de plusieurs paramètres liés à la configuration du véhicule et à la période de l'année. Le respect de cette réglementation s'avère toutefois difficile parce que la majorité des transporteurs routiers ont peu de moyen de connaître leurs charges exactes et encore moins leur distribution. Il est reconnu que les systèmes de pesée embarqués constituent le meilleur moyen pour le transporteur routier de s'assurer du respect de la réglementation en vigueur, tout en maximisant la charge transportée¹. Il existe par ailleurs un certain nombre de systèmes de pesée embarqués pour véhicule routier sur le marché nord-américain. Pour des raisons d'ordre technique et économique, ces systèmes sont encore très peu répandus au Québec^{2, 3}. Pour présenter un potentiel réel, les systèmes de pesée embarqués doivent satisfaire un certain nombre de caractéristiques: les coûts d'achat et d'installation doivent être relativement faibles; le système doit mesurer la charge par essieu et doit être insensible aux inclinaisons du sol; la précision doit être de l'ordre de 1%, le système doit être fiable à long terme et doit fonctionner dans toutes les conditions d'opération du véhicule: de -40°C à +40°C, en présence de sel, de sable, d'huile et surtout d'humidité.

Nous avons mis au point un système de pesée embarqué basé sur les technologies de la fibre optique. La méthode développée consiste à mesurer les contraintes de cisaillement des essieux soumis à un chargement. Celle-ci se distingue des méthodes proposées ou expérimentées jusqu'à

CANQ
TR
248
V.7

Québec 

maintenant par l'usage de jauges extensométriques par fibre optique. Les propriétés inhérentes aux fibres optiques et à leurs composantes permettent d'envisager des solutions à plusieurs problèmes rencontrés par les méthodes de mesures traditionnelles. Les jauges par fibre optique possèdent en effet un certain nombre d'avantages sur les jauges extensométriques conventionnelles de type résistif ou autre:

- insensibilité aux champs électromagnétiques;
- extrêmement robustes aux agents corrosifs;
- signaux propagés sans perte dans la fibre optique (unité de lecture pouvant être éloignée de la jauge)
- possibilité de multiplexage (plus d'une jauge sur une même fibre optique);
- grande précision;
- excellente stabilité à long terme;
- possibilité d'une auto-compensation thermique;

MÉTHODE DE MESURE DE LA CHARGE

L'analyse des déformations mécaniques de la structure d'une semi-remorque révèle que les déformations de l'essieu, entre la roue et le point d'appui du châssis, présentent la meilleure corrélation avec la charge embarquée. Nous avons étudié deux méthodes différentes: la première est basée sur la mesure des moments fléchissants de l'essieu et la seconde est basée sur la mesure des contraintes en cisaillement.

La première méthode consiste à mesurer les moments fléchissants de l'essieu d'une semi-remorque aux endroits indiqués par la figure 1a), le diagramme de corps libre étant illustré à la figure 1b). Si l'inclinaison du véhicule est faible ($\tan(\theta) \sim \theta$), les moments fléchissants mesurés par les quatre jauges extensométriques sont donnés par les relations suivantes:

$$M_{G1} = \left(\frac{W_T}{2} + \frac{W_T H \theta}{V} \right) \cdot (E_{G1} - \theta R) - W_R E_{R1} \quad (1)$$

$$M_{G2} = \left(\frac{W_T}{2} + \frac{W_T H \theta}{V} \right) \cdot (E_{G2} - \theta R) - W_R E_{R2} \quad (2)$$

$$M_{D1} = \left(\frac{W_T}{2} - \frac{W_T H \theta}{V} \right) \cdot (E_{D1} + \theta R) - W_R E_{R1} \quad (3)$$

$$M_{D2} = \left(\frac{W_T}{2} - \frac{W_T H \theta}{V} \right) \cdot (E_{D2} + \theta R) - W_R E_{R2} \quad (4)$$

où	W_T	=	charge totale exercée sur l'essieu ($W_{max} = 10\ 000\ kg$);
	H	=	hauteur du centre de masse de la charge (1,5 m à 2,5 m);
	θ	=	angle d'inclinaison du véhicule;
	V	=	voie d'essieu (1,78 m à 1,93 m);
	E	=	distance entre les jauges extensométriques et le centre de force;
	R	=	hauteur de l'essieu par rapport au sol (48 cm à 53 cm);
	W_R	=	pois des roues, freins, tambours, etc (320 kg);
	E_{Ri}	=	distance entre la jauge extensométrique
	$i=1,2$		et le centre de masse de la roue.

La différence entre les moments fléchissants gauches de même que la différence entre les moments fléchissants droits est donnée par:

$$\Delta M_G = M_{G1} - M_{G2} = \left(\frac{W_T}{2} + \frac{W_T H \theta}{V} \right) \cdot \Delta E - W_R \Delta E_R \quad (5)$$

$$\Delta M_D = M_{D1} - M_{D2} = \left(\frac{W_T}{2} - \frac{W_T H \theta}{V} \right) \cdot \Delta E - W_R \Delta E_R \quad (6)$$

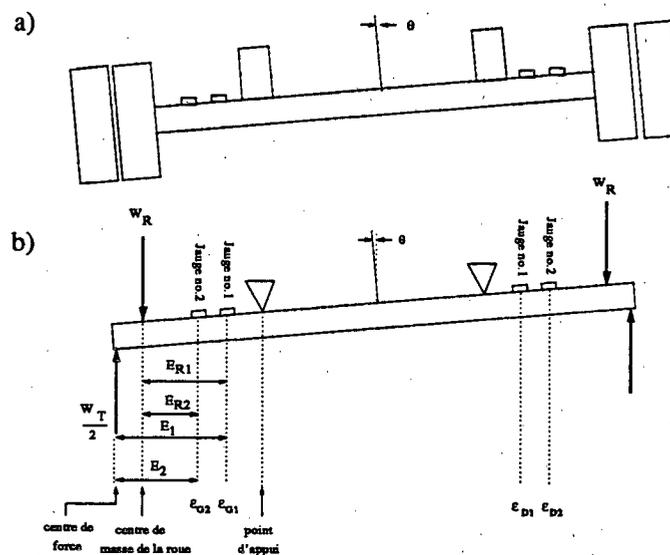


Figure 1: a) Disposition des jauges extensométriques pour la mesure des moments fléchissants. b) Diagramme de corps libre de l'essieu d'une semi-remorque.

CANQ
TR
248
v. 7.

À l'aide des deux dernières relations, on trouve que la charge totale appliquée sur l'essieu est:

$$W_T = \frac{\Delta M_G + \Delta M_D}{\Delta E} + 2 W_R \frac{\Delta E_R}{\Delta E} \quad (7)$$

ΔE étant égal à ΔE_R et le moment fléchissant M étant donné par $S \cdot E \cdot \epsilon$, la charge appuyée sur l'essieu s'exprime à l'aide de la relation suivante:

$$W_T = \frac{S \cdot E}{\Delta E} [(\epsilon_{G1} - \epsilon_{G2}) + (\epsilon_{D1} - \epsilon_{D2})] + 2 W_R \quad (8)$$

où

E	=	module de Young de l'acier;
S	=	module de section de l'essieu;
ϵ_{ij}	=	déformation mesurée par les jauges extensométriques;
$2W_R$	=	poids des roues droite et gauche;
$(S \cdot E)/\Delta E$	=	constante de calibration.

Cette relation permet de mesurer la charge exercée sur l'essieu et ce, indépendamment des inclinaisons du sol ou du véhicule, de la pression des pneus, ainsi que du type et de l'état de la suspension. La constante de calibration du système est obtenue à l'aide des modules de section et de Young de l'essieu, et de la distance séparant les deux jauges extensométriques (ΔE). Puisqu'il n'existe que trois types d'essieux sur le marché nord-américain, la connaissance des modules de section et de Young ne pose pas de problème. La distance séparant les deux jauges extensométriques peut être ajustée lorsque les jauges sont disposées sur le support. Toutefois, la méthode d'installation d'un tel support qui doit transférer un moment fléchissant différentiel, impose des restrictions lors de l'installation du support qui sont désavantageuses. De plus, la plage dynamique des jauges extensométriques utilisées par la méthode de mesure des moments fléchissants doit être près de 10 fois supérieure à celle requise par la seconde méthode: la méthode de mesure du cisaillement.

La deuxième méthode consiste à mesurer la déformation selon les axes principaux au niveau de l'axe neutre de l'essieu, entre la roue et le point d'appui. La déformation est alors directement proportionnelle à la pente du moment fléchissant de l'essieu:

$$\epsilon_y = \frac{1}{2G} \cdot \frac{1}{It} \int y dA \cdot \frac{dM}{dx} \quad (9)$$

où

ϵ_y	=	déformation suivant l'axe principale;
G	=	module d'élasticité;
$1/It \int y dA$	=	constante qui dépend de la structure et de la composition de l'essieu.

En combinant les relations (8) et (9), on obtient la relation donnant la charge par essieu:

$$W_T = \left[\frac{(S \times E) \cdot 2G \cdot I t}{\int y \cdot dA} \right] \cdot (\epsilon_{\gamma G} + \epsilon_{\gamma D}) + 2W_R \quad (10)$$

Pour un essieu type, les déformations $\epsilon_{\gamma G}$ et $\epsilon_{\gamma D}$ produites par une charge ajoutée de 10 000 kg par essieu sont estimées à 114×10^{-6} m/m ($114 \mu\epsilon$). Dans ces conditions, le système de pesée embarqué aura une précision de 1% de la charge maximale si les jauges extensométriques sont précises à $1 \mu\epsilon$.

On doit cependant tenir compte de la variation de température de l'essieu. En effet, le coefficient d'expansion thermique de l'essieu étant égal à $12 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$, la déformation causée par une variation de température de 1°C est comparable à celle causée par un chargement de plus de 10% de la charge maximale. Cette erreur peut être corrigée soit en utilisant des jauges extensométriques auto-compensées en température, soit en disposant les jauges extensométriques de la façon indiquée par la figure 2. Dans ce dernier cas, lorsque la charge augmente, la contrainte mécanique a pour effet de comprimer la jauge no.1, tandis que la jauge no.2 est mise sous tension: les jauges réagissent en sens inverse. Par ailleurs, une déformation thermique agira de la même façon sur les jauges no.1 et no.2: les deux jauges réagissent dans le même sens. Il est de ce fait possible d'isoler la déformation ϵ_γ de celle causée par une fluctuation thermique. Si la température est compensée à l'aide d'une jauge auto-compensée, on a déjà indiqué que la charge est donnée par la relation 10. Par ailleurs, si la température est compensée de la manière indiquée par la figure 2, la charge est alors donnée par la relation suivante:

$$W_T = \left[\frac{(S \times E) \cdot 2G \cdot I t}{\int y \cdot dA} \right] \cdot \left[\frac{\epsilon_{\gamma G1} + \epsilon_{\gamma G2}}{2} + \frac{\epsilon_{\gamma D1} + \epsilon_{\gamma D2}}{2} \right] + 2W_R \quad (11)$$

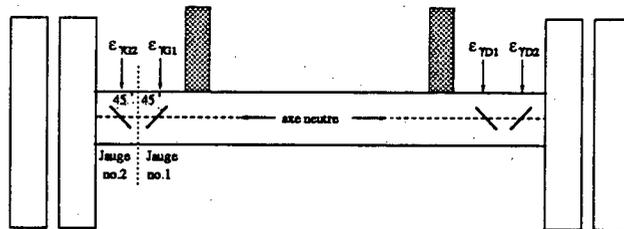


Figure 2: Disposition des jauges extensométriques pour la mesure des déformations suivant les axes principaux.

SYSTÈME DE MESURE PAR FIBRE OPTIQUE

Il n'existe actuellement aucune jauge extensométrique par fibre optique disponible sur le marché. Un grand nombre de méthodes de mesure ont par ailleurs été proposées et expérimentées en laboratoire^{4,5,6}. Parmi toutes ces méthodes, aucune n'a pu être retenue en raison de l'exigence des caractéristiques requises par la méthode de mesure de charge discutée à la section précédente: précision de 1 µε; excellente linéarité et stabilité; région sensible limitée à 1 cm; grande robustesse à l'installation; coûts d'achat et d'installation peu élevés, cette dernière caractéristique étant certainement la plus contraignante. Nous avons donc développé une jauge extensométrique par fibre optique satisfaisant toutes les caractéristiques requises pour le développement d'un système de pesée embarqué basé sur la mesure du cisaillement.

La conception de la jauge extensométrique par fibre optique est basée sur la technique d'interférométrie de type Fabry-Perot. Une cavité Fabry-Perot se compose de deux miroirs disposés face à face et espacés d'une distance donnée. Une onde lumineuse plane se propageant suivant la normale de ces miroirs sera partiellement transmise, le reste étant réfléchi (on peut négliger les pertes). La fonction de transmittance d'une telle cavité Fabry-Perot, définie comme le rapport de l'intensité lumineuse transmise sur l'intensité lumineuse incidente, est donnée par la relation suivante:

$$T(\lambda, d) = \frac{1}{1 + F \cdot \sin^2 \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right]} \quad (12)$$

où d est la distance séparant les miroirs, λ est la longueur d'onde du faisceau lumineux et F (la finesse) est égale à $[4R / (1 - R)]^2$, R étant la réflectance des miroirs. Pour une cavité Fabry-Perot composée de deux miroirs d'une réflectance donnée, la finesse est évidemment constante. La distance entre les miroirs et la longueur d'onde lumineuse, quant à elles, peuvent varier. Si la distance entre les miroirs d'une cavité Fabry-Perot est fixe, la relation 12 révèle que la transmittance en fonction de la longueur d'onde prend alors la forme d'une sinusoïde dont la période augmente avec la longueur d'onde (figure 3). En variant légèrement la distance entre les miroirs, la sinusoïde subit alors un déphasage accompagné d'une variation de la période (figure 3). Pour une longueur de cavité Fabry-Perot donnée, la transmittance en fonction de la longueur d'onde est ainsi unique. L'on peut ainsi parler d'une signature unique du spectre $T(\lambda)$ de la transmittance pour chaque valeur de d . On peut donc connaître la longueur de la cavité en mesurant l'intensité lumineuse en fonction de longueur d'onde (spectre lumineux) transmise par la cavité Fabry-Perot.

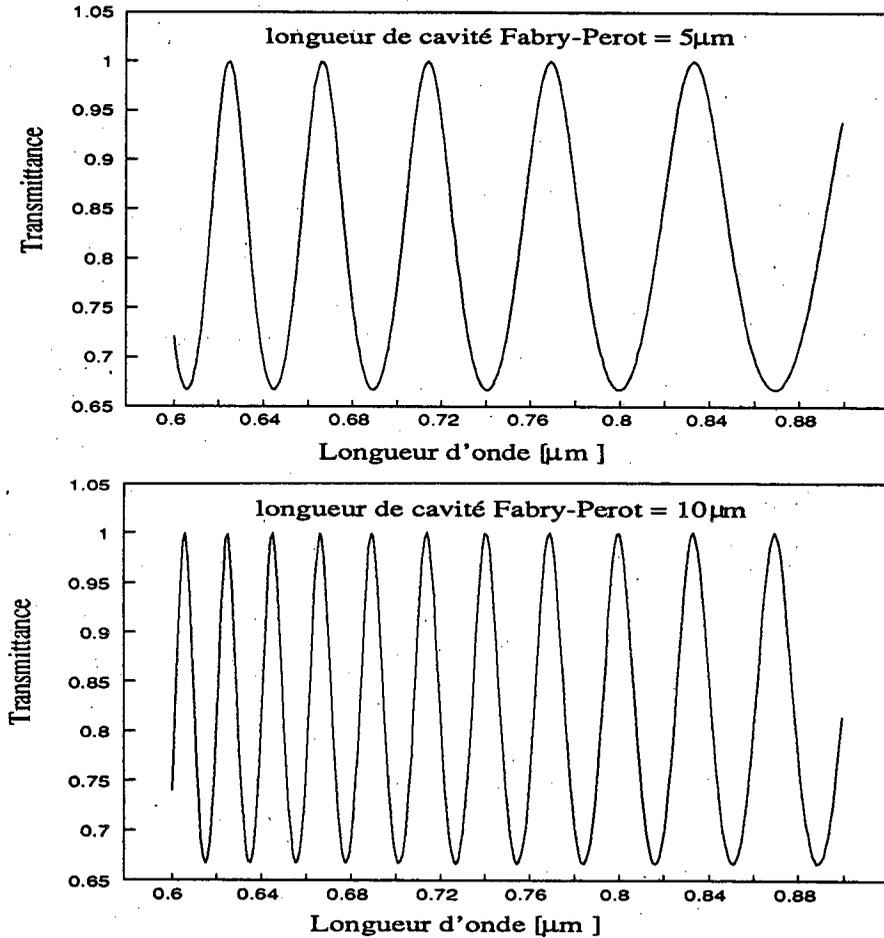


Figure 3: Fonction de la transmission de deux cavités Fabry-Perot de longueur différente.

Le schéma de la jauge Fabry-Perot est illustré à la figure 4. Deux fibres optiques dont les bouts à angle droit ont été préalablement rendus réfléchissants sont insérées dans un micro-capillaire de précision. La cavité Fabry-Perot est ainsi constituée des miroirs déposés sur le bout des deux fibres optiques. Le flux lumineux propagé dans la fibre optique incidente traverse la cavité Fabry-Perot avant d'être réinjecté dans l'autre fibre optique. En mesurant le spectre lumineux $X(\lambda)$ transmis (ou réfléchi) par la jauge, on peut déduire la distance entre le bout des deux fibres optiques, c'est-à-dire la distance entre les deux miroirs. Pour ce faire, le spectre mesuré $X(\lambda)$ est intercorrélé avec la fonction de transmission théorique $T(\lambda, d)$ donnée par la relation 12 et ce, pour différentes longueurs de cavité. Le coefficient d'intercorrélacion est calculé en fonction de la longueur de cavité:

$$C(d) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{n=0}^{M-1} X(\lambda_0 + n\Delta\lambda) \cdot \frac{1}{1 + F \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda_0 + n\Delta\lambda}\right)} \quad (13)$$

où la longueur de cavité réelle (d) est donnée par le coefficient d'intercorrélation maximal $C(d)_{\max}$.

En fixant la jauge Fabry-Perot sur une structure donnée, la déformation mécanique transférée à la jauge Fabry-Perot se traduira par une variation de la longueur de cavité, qui peut être convertie en une mesure de contrainte mécanique.

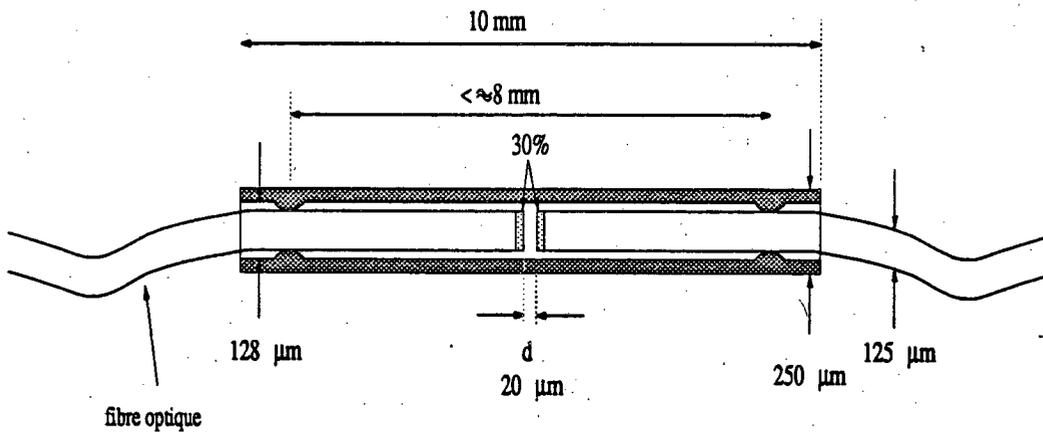


Figure 4 : Schéma de la jauge extensométrique de type Fabry-Perot.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La jauge Fabry-Perot décrite a été expérimentée sur une semi-remorque. Le montage utilisé lors de ces tests en laboratoire est illustré à la figure 5. Le flux lumineux issu d'une diode électroluminescente est injecté dans une fibre optique. La lumière est alors acheminée jusqu'à la jauge Fabry-Perot, disposée à 45° sur l'axe neutre de l'essieu de la semi-remorque. Le spectre lumineux transmis par la jauge Fabry-Perot est finalement analysé à l'aide d'un monochromateur. La longueur de cavité de la jauge Fabry-Perot, calculée au moyen de la relation 13 est corrélée avec la charge exercée sur la roue adjacente à la jauge. La charge exercée sur la roue est mesurée à l'aide d'une balance.

Les résultats ainsi obtenus sont illustrés à la figure 6. La précision sur la charge est estimée à 67 lbs, soit près de 0,5% de la charge maximale. Ces résultats indiquent par ailleurs que la déformation suivant un axe principal produite par une charge de 10 000 kg s'exerçant sur l'essieu serait de 121 μe . Les résultats semblent donc en accord avec la théorie exposée à la section 2.

On a également mesuré la déformation suivant un axe principal en fonction de la charge s'exerçant en totalité sur la roue intérieure, puis en totalité sur la roue extérieure (soit un bras de levier passant de 12 cm à plus de 45 cm). La contrainte de cisaillement mesurée dans ces deux cas différait par moins de 5%. Cette différence s'explique par un mauvais alignement de la jauge sur l'axe neutre de l'essieu. Dès lors, on peut conclure que la méthode est effectivement peu sensible à la répartition de la charge sur les pneus, c'est-à-dire à l'inclinaison locale du sol et à la pression des pneus.

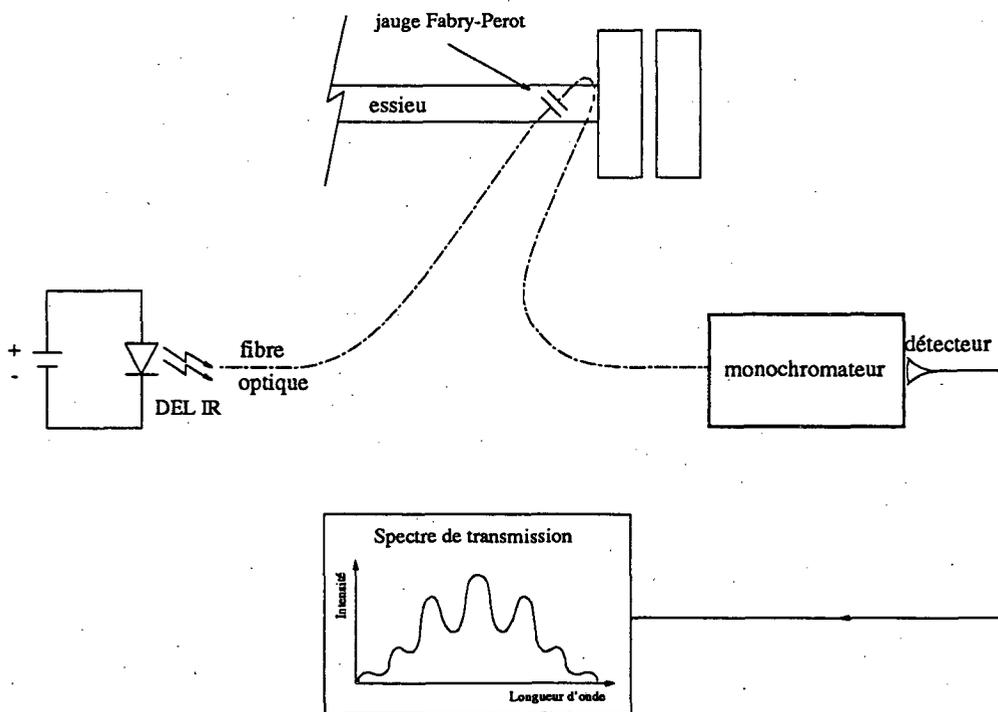


Figure 5: Montage expérimental utilisé pour caractériser le système.

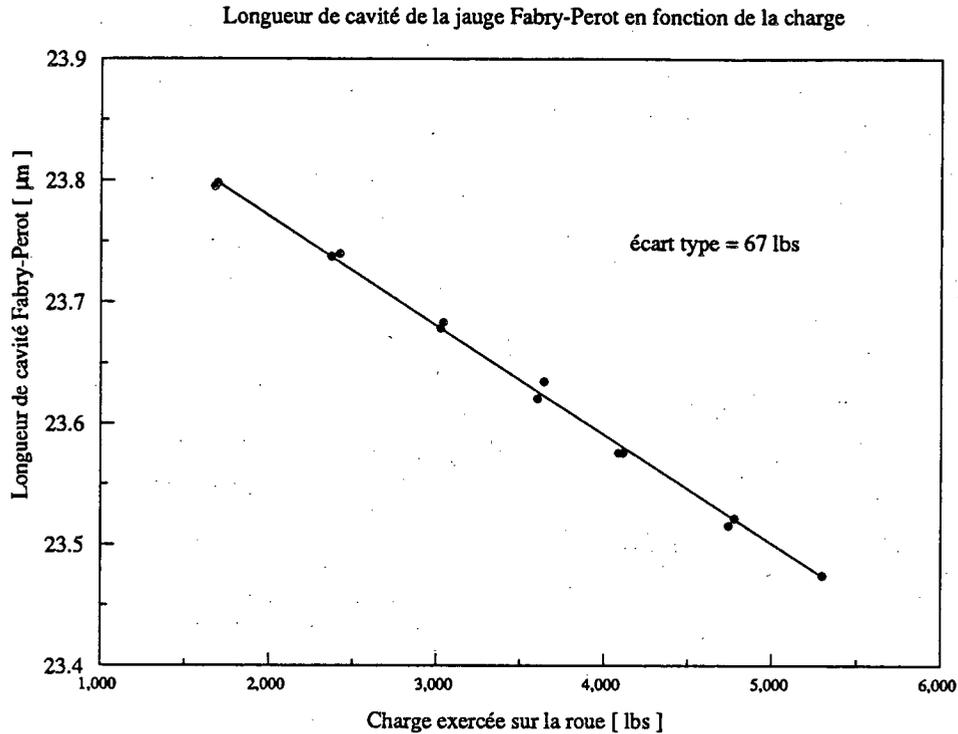


Figure 6: Longueur de cavité Fabry-Perot disposée à 45° sur l'essieu de la semi-remorque en fonction de la charge exercée sur la roue.

CONCLUSION

Le système de pesée embarqué proposé et expérimenté est basé sur la méthode des contraintes en cisaillement mesurées au moyen de jauges extensométriques par fibre optique de type Fabry-Perot conçues exprès à cette fin. Cette méthode permet de mesurer la charge dans toutes les conditions d'opération des véhicules routiers et ce, avec une excellente précision. La précision obtenue en laboratoire a été estimée à 0,5%.

Le système expérimenté possède cependant un certain nombre d'inconvénients. D'abord, l'usage d'un monochromateur est peu recommandé sur un camion en raison du coût et de l'encombrement occasionné. Par ailleurs, le temps de lecture requis pour produire un spectre réduit le taux de mesures et affecte considérablement la précision des mesures en présence de vibrations ou d'une charge dynamique. À cela s'ajoute un temps de calcul nécessitant plusieurs minutes. Ces considérations nous ont poussé à mettre au point une méthode de mesure beaucoup plus performante, avec laquelle l'intercorrélacion du signal lumineux transmis par la jauge Fabry-Perot est produite instantanément à l'aide d'un intercorrélacion optique. L'intercorrélacion optique est en fait un interféromètre de Fizeau. La configuration du système est schématisée à la figure 7. L'interféromètre de Fizeau utilisé est composé de deux lames de verre dont les faces rapprochées ont les mêmes propriétés réfléchissantes que celles de la cavité des jauges Fabry-

Perot. La distance entre les faces réfléchissantes passe de 0 μm à 40 μm . La distance entre les lames est fixée par la présence d'une cale de verre de précision. L'interféromètre de Fizeau agit comme un intercorrélateur dont la longueur de cavité dépend de la position entre la cale et l'endroit où les lames sont appuyées l'une sur l'autre. Par exemple, la puissance lumineuse codée par une jauge Fabry-Perot dont les miroirs sont espacés de 25 μm sera transmise au maximum si elle traverse l'interféromètre de Fizeau à l'endroit où la distance entre les lames de verre égale 25 μm . La fonction d'intercorrélation est produite instantanément en illuminant l'interféromètre de Fizeau sur toute sa largeur. Pour ce faire, le faisceau lumineux est collimé sur une ligne au moyen d'un jeu de lentilles. Le faisceau collimé est ensuite dirigé vers l'interféromètre de Fizeau, lequel produit la fonction d'intercorrélation du signal. Le faisceau lumineux transmis est détecté à l'aide d'une barrette de détecteurs. Les barrettes de détecteurs peuvent comprendre plus de 2 048 détecteurs alignés sur 25,4 mm. Si on appose une telle barrette sur la surface extérieure de l'interféromètre de Fizeau, la fonction d'intercorrélation de la jauge s'inscrit sur les 2 048 détecteurs (pixels), chaque pixel étant associé à une longueur de cavité Fabry-Perot corrélée.

Cette méthode a été expérimentée sur un banc d'essai en laboratoire. La précision obtenue est estimée à 0,2 μe avec un taux de lecture supérieur à 100 Hz. Ces caractéristiques étant de loin supérieures à celles obtenues à l'aide d'un monochromateur, nous croyons possible d'améliorer ou de maintenir les caractéristiques du système de pesée embarqué dans des conditions réelles d'utilisation. À cet égard, nous envisageons de construire et d'expérimenter un prototype sur un véhicule routier. En ce qui concerne l'aspect économique des jauges Fabry-Perot démodulées au moyen d'un interféromètre de Fizeau, celles-ci devraient être compétitives avec les jauges de contraintes résistives traditionnelles.

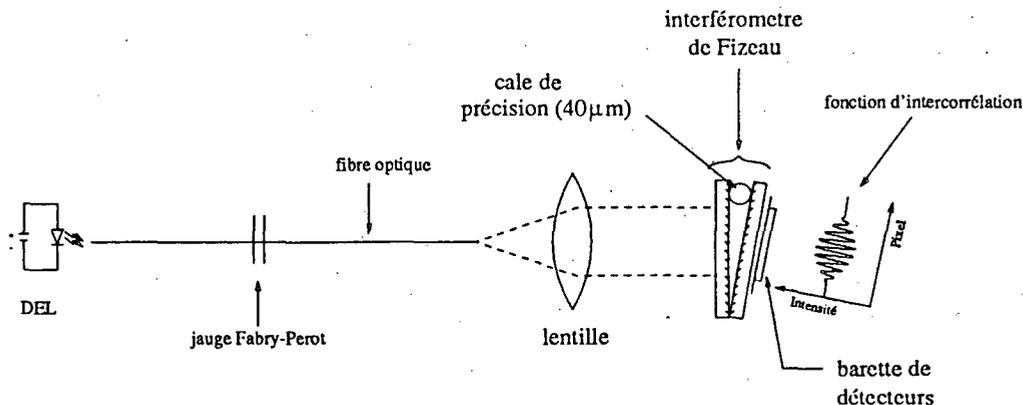


Figure 7 : Unité de mesure basée sur un interféromètre de Fizeau.
Méthode d'intercorrélation optique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Transports du Québec et Transports Canada pour leur aide financière, ainsi que messieurs Normand Raymond et Sesto Vespa. Nous remercions également monsieur Charles-H. Jacques pour l'aide apportée dans l'analyse de la structure d'une semi-remorque.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Pottie, M.A., Truck-mounted weight scales help optimize the payload, Forest Engineering Research Institute of Canada.
2. Phillips, E., Systèmes de Pesage Intégrés pour Camions Grumiers et Chargeuses: Évaluation, Institut Canadien de recherches en Génie Forestier, RT-91, novembre 1989.
3. Newton W.H., Trials of Three On-Board Axle Weighing Systems for Heavy Goods Vehicles, Transport and Road Research Laboratory, Research Report 103, 1987.
4. Sirkis, J.S. et al., Interferometric Fiber Optic Strain Sensor, Experimental Mechanics, 1988.
5. Rogowski R. et al., A Method for Monitoring Strain in Large Structures: Optical and Radio Frequency Devices, Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation, 1988.
6. Rausch E.O. et al., Fiber Optic Strain Sensing with RF Interferometric Techniques, SPIE vol. 1170, 1989.

ON VA DE **L'AVANT**



Transports
Québec



MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 056 690