

Modélisation du trafic routier suisse

par Rolf Bez, Lausanne, Reto Cantieni, Dübendorf et Joseph Jacquemoud, Sion

Le travail de modélisation du trafic routier suisse décrit dans cet article a été entrepris dans le cadre de la révision de la norme de charges SIA 160 (1970) [1]¹. L'application de plus en plus généralisée du dimensionnement à la ruine des structures a rendu nécessaire un nouveau concept de définition des charges, qui fait clairement la distinction entre la vérification de la capacité portante et la vérification de l'aptitude au service. C'est dans cet esprit qu'a été élaboré et mis en consultation un projet de nouvelle norme de charge [2].

Le but de cet article est de montrer, dans un premier temps, selon quelle démarche la modélisation du trafic routier a été établie dans ce projet de norme. Les différentes étapes de cette modélisation, à savoir : le concept de sécurité, les caractéristiques du trafic routier, les situations de danger et les objectifs d'utilisation, sont successivement abordées (chapitres 1-5). Dans un second temps, les chapitres 6 et 7 donnent des détails sur l'établissement des valeurs numériques des coefficients dynamiques et des modèles de charge utilisés pour les vérifications de la capacité portante et de l'aptitude au service.

1. Concept de sécurité

Le concept de sécurité adopté dans le projet de norme de charge soumis en consultation [2] est commenté dans la référence [3]. Nous en rappellerons ici les principes de base qui ont été utilisés pour la modélisation du trafic routier, en distinguant entre les vérifications de la capacité portante et de l'aptitude au service.

1.1 Capacité portante

La capacité portante d'une structure est vérifiée lorsque la condition suivante est remplie :

$$\frac{R}{\gamma_R} \geq S_d; \tag{1}$$

- R: résistance calculée selon les normes de matériaux;
- γ_R : facteur de résistance défini par les normes de matériaux;
- S_d : sollicitation déterminée avec les valeurs de dimensionnement des actions définies dans la norme de charge.

La sollicitation S_d est définie comme suit :

$$S_d = S(Q_d, G_d, Q_a); \tag{2}$$

- Q_d : valeur de dimensionnement de l'action prépondérante;
- G_d : valeur de dimensionnement des charges propres;
- Q_a : valeur de dimensionnement de l'action accompagnante.

Lorsque le trafic routier est considéré comme *action prépondérante*, les valeurs de dimensionnement Q_d ont été établies conformément aux prescriptions de l'instruction SIA 260 [4], en recherchant tout d'abord la valeur caractéristique Q^* de l'action Q , puis en majorant cette valeur par le facteur de modèle γ_s , selon la relation suivante :

$$Q_d = \gamma_s Q^*; \tag{3}$$

γ_s : facteur de modèle de charge tenant compte, entre autres, du fait qu'on ne considère, dans la combinaison de charge de la relation (2), qu'une seule action accompagnante Q_a agissant simultanément à l'action prépondérante Q_d . La valeur de γ_s est fixée à 1,1 et la valeur numérique de Q_d est finalement arrondie.

La valeur caractéristique Q^* est, quant à elle, définie comme suit [4] :

$$Q^* = m_Q + \beta \delta_Q s_Q; \tag{4}$$

- m_Q : valeur moyenne de l'action Q ;
- β : indice de fiabilité fixé à 4,0;
- δ_Q : facteur linéaire fixé à 0,8 pour une action Q prépondérante;
- s_Q : écart type de l'action Q .

Avec les valeurs numériques de β et de δ_Q , ceci donne :

$$Q^* = m_Q + 3,2 s_Q \tag{5}$$

ce qui correspond à une probabilité de dépassement de $6,9 \cdot 10^{-4}$ si l'action Q a une distribution normale. La figure 1 situe ces différentes valeurs pour le cas d'une distribution normale. On y a également reporté le fractile 95%, désigné par Q_{95} , qui correspond à la valeur au-dessous de laquelle se situe le 95% des observations ou qui a, en d'autres termes, une probabilité de dépassement de 5%. Pour une distribution normale, le fractile 95% se détermine selon l'expression suivante :

$$Q_{95} = m_Q + 1,645 s_Q. \tag{6}$$

Remarques :

1. Si une action Q ne satisfait pas à une loi de distribution normale, mais par exemple à une loi gamma, la valeur caractéristique Q^* a été déterminée dans ce qui suit de façon à ce qu'elle corresponde également à une probabilité de dépassement de $6,9 \cdot 10^{-4}$.
2. Rappelons ici que les valeurs de la résistance correspondent aussi à un certain

Zusammenfassung

Die in diesem Artikel beschriebene Bildung von Modellen für den Strassenverkehr wurde im Rahmen der Revision der Norm SIA 160, Belastungsannahmen, in Angriff genommen. Die immer häufiger angewandte Dimensionierung auf Bruchniveau erforderte die Anwendung eines neuen Konzeptes für die Festlegung der Lasten, das klar zwischen den Nachweisen der Trag- und der Gebrauchsfähigkeit unterscheidet. Auf dieser Überlegung aufbauend wurde ein Projekt der neuen Norm für Belastungsannahmen ausgearbeitet und in die Vernehmlassung gegeben.

In einem ersten Teil des vorliegenden Artikels wird nach der Beschreibung der theoretischen und experimentellen Grundlagen die Entwicklung der Lastmodelle erläutert (Kap. 1 bis 5). Im zweiten Teil ist die Festsetzung der dynamischen Koeffizienten und die Berechnung der den Lastmodellen für den Trag- und Gebrauchsfähigkeitsnachweis zugeordneten Zahlenwerte beschrieben (Kap. 6 und 7).

niveau de probabilité de dépassement tel que globalement on atteigne un risque de rupture de 10^{-6} , couramment admis pour les ouvrages civils.

Lorsque le trafic routier est considéré comme *action accompagnante*, les valeurs de dimensionnement Q_a ont été établies en arrondissant les valeurs moyennes m_Q correspondantes.

1.2 Aptitude au service

Pour garantir l'aptitude au fonctionnement de l'ouvrage et le confort des utilisateurs, la sollicitation de courte durée durant l'utilisation $S_{ser,court}$ est définie de la façon suivante :

$$S_{ser,court} = S(G_m, Q_{ser,court}); \tag{7}$$

- G_m : valeur moyenne des charges propres G ;
- $Q_{ser,court}$: charge de service de courte durée à utiliser pour la vérification de l'aptitude au service.

La valeur de dimensionnement de cette charge $Q_{ser,court}$ a été déterminée de façon à correspondre au mieux à la réalité du trafic routier suisse. Précisons encore que, contrairement à d'autres types d'actions, il n'a pas été défini une charge de service de longue durée $Q_{ser,long}$ (qui serait déterminante pour garantir la durabilité ou l'aspect de l'ouvrage) car sa valeur numérique serait quasi nulle.

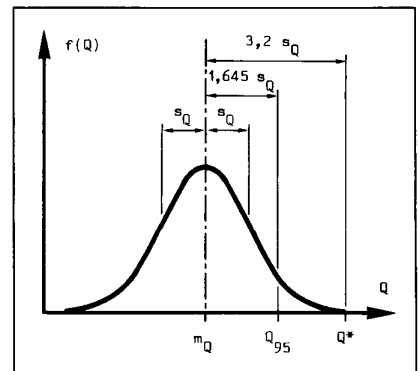


Fig. 1. — Caractéristiques d'une distribution normale.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

2. Trafic routier suisse

Les actions du trafic routier, telles qu'elles sont définies dans le nouveau concept de sécurité, ne sont pas directement observables et mesurables dans le trafic réel. Elles résultent de situations particulières, plus ou moins rares, dans lesquelles un ou plusieurs véhicules réels sont impliqués. L'observation et les mesures du trafic réel doivent par conséquent fournir, sous forme statistique, les données de base permettant de reconstituer les situations extrêmes recherchées.

Les principales sources de données ont été les mesures de trafic effectuées en 1975 et 1976, sur quatre axes routiers importants de notre pays, par l'Office fédéral des routes (OFR), le Laboratoire fédéral d'essais des matériaux (LFEM/EMPA) et l'ICOM — Construction métallique de l'EPFL. La procédure d'acquisition et le dépouillement de ces mesures, qui ont porté sur 2340 camions, sont décrits de façon détaillée dans les références [5], [6] et [7]. Les caractéristiques de base recherchées lors de ces mesures étaient, entre autres, le type des camions ainsi que le poids et l'empattement de leurs essieux. L'OFR a participé aux mesures précitées dans le cadre de recensements périodiques de la circulation. Leurs résultats [8] ont complété les mesures faites par le LFEM et l'ICOM, dans la mesure où la part du trafic de camions dans le trafic total a été déterminée.

Les caractéristiques et les observations principales issues de ces mesures, et qui ont par la suite été utilisées dans la modélisation du trafic, sont les suivantes :

- le poids total des camions chargés va fréquemment jusqu'à une valeur égale à 120% de leur poids maximal légal ;
- le camion le plus agressif du trafic, c'est-à-dire celui ayant le rapport poids total/longueur le plus élevé, est le camion à 3 essieux, d'un poids maximal légal de 250 kN ;
- les valeurs minimales mesurées des empattements avant et arrière de ce type de camion sont respectivement de 3,00 et 1,30 m, et le poids total est réparti de façon assez égale sur les 3 essieux.

Mentionnons ici également que les porte-à-faux avant et arrière des camions n'ont pas été mesurés. Ils ont toutefois été admis uniformément à 1,50 m, ce qui semble être une valeur relativement sévère. La part des camions dans chaque voie de circulation pour un trafic à plusieurs voies et les caractéristiques des voitures ont été établies sur la base de mesures allemandes [9] ; le tableau 1 donne un exemple des renseignements donnés par cette référence.

Une continuation des mesures effectuées en Suisse en 1975 et 1976 est à recommander, pour suivre l'évolution du

trafic routier suisse, en particulier le type et le nombre relatif des véhicules. Dans ce sens, il serait utile de mesurer également les porte-à-faux des camions, ainsi que leur part respective dans les différentes voies de circulation.

3. Situations de danger

Pour contrôler la capacité portante d'une structure, il faut tenir compte des actions du trafic routier au travers de situations de danger. Ces dernières décrivent les situations critiques qui peuvent réellement être rencontrées durant la vie de la structure. Chaque situation de danger, telle que le montre la relation (2), est composée d'une action prépondérante Q_d et d'une action accompagnante Q_a , définies au chapitre 1.

Les situations de danger suivantes ont été retenues pour l'établissement des modèles de charges, selon que le trafic routier est considéré comme action prépondérante ou accompagnante :

1. Action prépondérante :

- le passage isolé d'un camion surchargé ;
- le croisement de plusieurs camions en mouvement ;
- le passage d'un groupe de 2 ou 3 camions à 3 essieux, suite par exemple à la présence d'un chantier ou d'une gravière ;
- une file compacte de camions de type quelconque à l'arrêt sur une voie, suite par exemple à un bouchon ;
- la même file compacte de camions de type quelconque, mais en mouvement ;
- trafic mélangé de voitures et de camions arrêtés sur toute la chaussée, suite par exemple à un bouchon ou à des feux de circulation.

2. Action accompagnante :

- le passage isolé d'un camion ;
- un trafic mélangé de voitures et de camions arrêtés sur toute la chaussée (circulation à l'arrêt) ;
- un trafic mélangé de voitures et de camions en mouvement (circulation fluide).

La relation (1) devra être satisfaite pour chacune des situations de danger déterminante pour la structure porteuse considérée. Il est donc important de faire l'inventaire complet de toutes les situations critiques pouvant être rencontrées durant la vie d'une structure. Les modèles

de charge présentés au chapitre 5 ont été choisis précisément pour couvrir les nombreuses situations de danger qu'il s'agit de prendre en compte.

4. Objectifs d'utilisation

Pour la vérification de l'aptitude au service, la charge de service proposée doit correspondre aux objectifs d'utilisation à vérifier qui peuvent être la durabilité ou l'aspect de l'ouvrage, l'aptitude de l'ouvrage au fonctionnement ou le confort de l'utilisateur. Ces objectifs d'utilisation sont vérifiés par un contrôle de la fissuration, des déformations, des vibrations, ou des propriétés des matériaux.

Afin de satisfaire à ces différents critères d'utilisation sous les charges du trafic routier, il faut que la charge de service représente les actions suivantes :

- le passage isolé d'un camion ;
- un trafic mélangé de voitures et de camions arrêtés sur toute la chaussée, suite par exemple à un bouchon ou à des feux de circulation ;
- un trafic mélangé de voitures et de camions en mouvement (circulation fluide).

5. Modélisation du trafic

Pour représenter les différentes situations de danger du trafic routier citées dans le chapitre précédent, les trois modèles de charge suivants ont été utilisés :

- le modèle de charge 1, pour représenter l'action concentrée d'un camion lourd pouvant se trouver n'importe où sur la chaussée et sur le trottoir, conformément à la figure 2 [2]. Sa géométrie correspond à celle donnée au chapitre 2 pour le camion le plus agressif. Ce modèle de charge est considéré comme étant en mouvement ; la valeur de dimensionnement du poids de ses essieux (déterminée au chapitre 7) sera donc multipliée par le coefficient dynamique ϕ_1 défini au chapitre 6 ;
- le modèle de charge 2, pour simuler la charge sur une voie de circulation d'une colonne de camions circulant lentement les uns derrière les autres (cas déterminant par rapport à la colonne à l'arrêt, voir chapitre 7). Il est représenté par une charge répartie

TABLEAU 1 : Part moyenne des camions dans les différentes voies d'un trafic à 2 ou 3 voies [9].

NOMBRE DE VOIES PAR SENS DE CIRCULATION	POURCENTAGE DU NOMBRE DE CAMIONS DANS CHAQUE VOIE		
	1ère voie	2ème voie	3ème voie
2	34 %	4 %	—
3	47 %	8 %	1 %

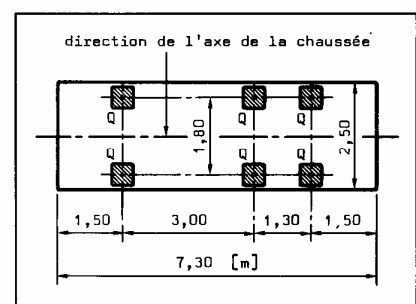


Fig. 2. — Géométrie du modèle de charge 1.

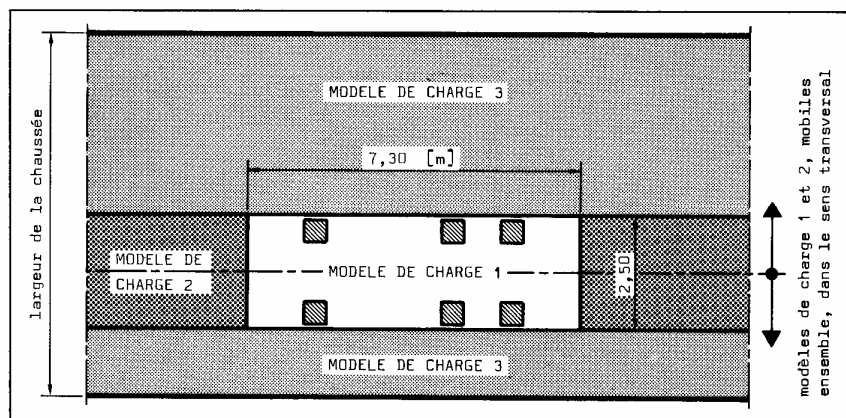


Fig. 3. — Cas de charge à considérer pour la vérification de la capacité portante lorsque le trafic routier est admis comme action prépondérante.

agissant sur une largeur environ égale à celle des camions, à savoir 2,50 m, à mettre sur la chaussée dans la position la plus défavorable possible. Comme les camions composant la file sont en mouvement, la valeur de dimensionnement de ce modèle de charge (déterminée au chapitre 7) sera multipliée par le coefficient dynamique ϕ_2 défini au chapitre 6;

- le modèle de charge 3, pour représenter un trafic mélangé de voitures et de camions arrêtés sur l'ensemble de la chaussée. Il est donné par une charge uniformément répartie sur la surface de la chaussée, qu'il n'est pas nécessaire de multiplier par un coefficient dynamique.

Si le trafic routier est considéré comme *action prépondérante*, le cas de charge à prendre en compte pour la vérification de la capacité portante est alors constitué simultanément des modèles de charge 1, 2 et 3, tels que le montre la figure 3 [2]. Ce cas de charge modélise ainsi une situation de trafic extrême où l'on rencontrerait un camion surchargé à l'intérieur d'une file de camions en mouvement et un trafic mélangé de voitures et de camions arrêtés sur le reste de la chaussée.

Lorsque le trafic routier est considéré comme *action accompagnante* pour la vérification de la capacité portante, le cas de charge à prendre en compte est, quant à lui, composé uniquement du modèle de charge 3. Ce cas de charge correspond à la situation relativement fréquente d'un trafic mélangé de voitures et de camions arrêtés sur l'ensemble de la chaussée et pouvant se produire au même moment où agit une autre action, par exemple le vent, en tant qu'action prépondérante. S'il s'agit de vérifier l'*aptitude au service* d'un ouvrage sous l'effet du trafic routier, le cas de charge à considérer sera composé simultanément des modèles de charge 1 et 3, conformément à la figure 4 [2]. Ce cas de charge est destiné à satisfaire les critères d'utilisation définis au chapitre précédent, ceci aussi bien pour les ouvrages de courte et de longue portée.

Remarque :
Sans entrer dans les détails de la vérification à la fatigue, mentionnons toutefois que ce même cas de charge est utilisé pour modéliser les charges de fatigue du trafic routier.

6. Coefficients dynamiques

Selon une tradition bien établie et par souci de simplification, les actions dynamiques du trafic routier sont prises en compte par l'intermédiaire de coefficients dynamiques. Le projet de norme SIA 160 [2] utilise deux coefficients distincts, ϕ_1 et ϕ_2 , qui multiplient respectivement les valeurs de dimensionnements des modèles de charge 1 et 2. Les valeurs de ces coefficients dynamiques sont données à la figure 5 [2]; elles ont été définies par le LFEM sur la base des deux références suivantes :

- les résultats des essais de charge dynamiques effectués de façon systématique par le LFEM depuis 1958 sur plus de 200 ponts routiers [10];
- les résultats des essais dynamiques effectués en 1978 sur le pont de Deibüel [11].

Dans le cadre des essais standard décrits dans la référence [10], c'est le comportement dynamique des éléments porteurs principaux du pont qui a été mesuré au

passage d'un camion à deux essieux d'un poids total de 160 kN. Le dépouillement de ces mesures a montré que le coefficient dynamique dépend principalement de la fréquence du premier mode de vibration en flexion longitudinale du pont, de la vitesse du véhicule et de la qualité du revêtement de la chaussée. Les essais effectués sur le pont de Deibüel [11], tout en s'intégrant dans le cadre des essais standards du LFEM, ont en plus permis d'évaluer de façon plus détaillée l'importance du type du véhicule et de la qualité du revêtement. Pour ces essais on a choisi, sur la base des mesures statistiques du trafic routier suisse [5], douze camions différents (représentant 8 types de véhicules), ayant un poids total compris entre 161 et 403 kN. En plus du passage isolé de chacun de ces camions, on a effectué des passages simultanés de deux et quatre camions, ceci dans différentes compositions. L'influence de l'amélioration de la qualité du revêtement, initialement très mauvaise, a également été étudiée pour le passage de quelques-uns des camions d'essais. Sur demande de la commission de norme 160 de l'époque, il a également été procédé à l'étude du comportement transversal du pont. Les résultats des essais du pont de Deibüel peuvent se résumer de la façon suivante :

1. Comportement longitudinal des éléments porteurs principaux

- Les camions seuls à plus de deux essieux produisent une majoration dynamique supérieure à celle des

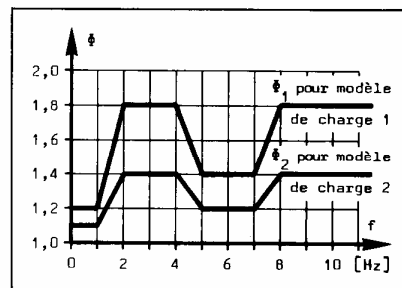


Fig. 5. — Coefficients dynamiques pour les charges du trafic routier en fonction de la fréquence fondamentale de l'élément considéré.

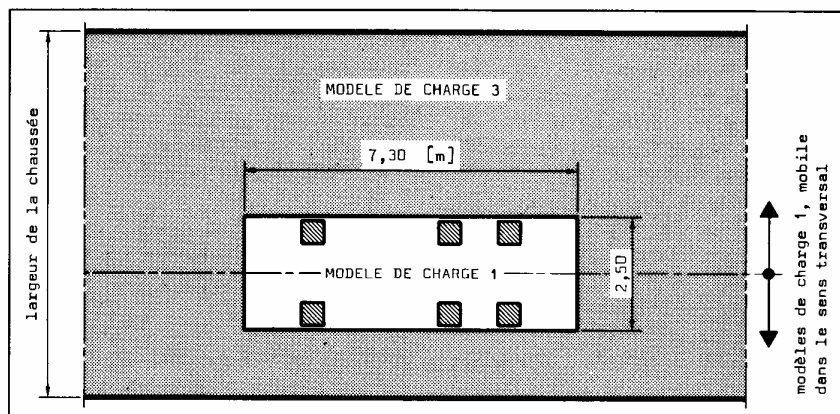


Fig. 4. — Cas de charge à considérer pour la vérification de l'aptitude au service sous l'effet du trafic routier.

- camions à deux essieux. C'est pour cette raison que les valeurs des coefficients dynamiques ϕ_1 données dans la figure 5 sont un peu supérieures à l'enveloppe des mesures effectuées avec des camions à deux essieux [10];
- les camions à remorques ou articulés produisent une majoration dynamique inférieure à celle des camions à deux essieux;
 - des compositions de deux ou quatre camions produisent une majoration dynamique toujours inférieure à la moitié de celle due au passage isolé des camions seuls à plus de deux essieux. C'est pourquoi la figure 5 donne une valeur du coefficient dynamique ϕ_2 égale à 50% de celle de ϕ_1 .

2. Comportement transversal de la section caissonnée

Les deux cas extrêmes de répartition transversale, à savoir avec le camion roulant à l'extrémité de la console du caisson ou au milieu de la dalle du caisson, n'ont jamais produit, avec les qualités de revêtement étudiées, une majoration dynamique supérieure à celle observée pour le comportement longitudinal.

3. Qualité du revêtement

Si une amélioration de la qualité du revêtement n'a pas toujours eu comme conséquence une diminution de la majoration dynamique, les rares cas d'augmentation de la majoration dynamique ne se reportaient cependant jamais aux véhicules déterminants, à savoir les camions seuls à plus de deux essieux.

Remarquons encore que la relation donnée à la figure 5 entre le coefficient dynamique ϕ et la fréquence fondamentale f donne deux zones où le coefficient dynamique est maximal: l'une lorsque la fréquence fondamentale est comprise entre 2 et 4 Hz et l'autre lorsqu'elle est supérieure à 8 Hz. Ces deux zones correspondent en fait aux domaines dans lesquels se situent les deux principales fréquences propres des camions, en l'occurrence celle du châssis et celle des essieux. Comme les ponts routiers ne présentent souvent qu'un faible amortissement [10], leur comportement dynamique est donc fortement dépendant du rapport entre la fréquence d'excitation (en l'occurrence celle des forces dynamiques engendrées par les camions) et leur fréquence fondamentale. Le calcul ou l'évaluation de cette dernière peut être effectuée grâce à des programmes d'ordinateurs ou sur la base d'articles spécialisés, tels que [12], ainsi qu'à l'aide d'une éventuelle annexe à la future norme de charge. Dans le sens transversal de l'ouvrage, l'estimation de la fréquence fondamentale est rendue difficile de par le changement fréquent des conditions d'appuis; l'expérience montre cependant que cette fréquence se situe le plus souvent au-dessus de 8 Hz, ce qui fait que le coefficient dynamique est à prendre à sa valeur maximale.

TABLEAU 2: Valeurs de dimensionnement des modèles de charge du trafic routier.

	CAPACITE PORTANTE		APTITUDE AU SERVICE	
	action prépondérante Q_d	action accompagnante Q_a	courte durée $Q_{ser,court}$	
	q [kN/m ²]	Q [kN]	q [kN/m ²]	Q [kN]
Modèle de charge 1		90	—	50
Modèle de charge 2	7,5		—	
Modèle de charge 3	5,0		2,0	2,0
- largeur totale de la chaussée en [m]	≤ 9		2,0	2,0
	> 9 et ≤ 13		2,0	2,0
	> 13		2,0	2,0

Concernant la vitesse de passage des camions, précisons que la norme couvre les cas extrêmes mesurés. Les valeurs des coefficients dynamiques donnés par la norme en fonction de la fréquence fondamentale sont donc bien des valeurs extrêmes, dans la mesure où elles n'ont, jusqu'à présent, jamais été dépassées par les valeurs mesurées lors des essais dynamiques des ponts. Ceci n'est toutefois valable que pour les ouvrages ayant une qualité de revêtement normale.

En ce qui concerne précisément la qualité du revêtement, on se référera aux normes SNV 640 520 a [13] et SNV 640 521 a [14] qui définissent le contrôle de la géométrie et les exigences concernant la planéité des revêtements routiers. La bonne relation entre ces normes et les valeurs des coefficients dynamiques obtenus expérimentalement a été confirmée lors des essais du pont de Deibüel, où des mesures ont été faites sur un revêtement de mauvaise qualité dont les caractéristiques entraient tout juste dans la catégorie où des dispositions constructives auraient dû être prises. Ceci a permis de confirmer que les coefficients dynamiques indiqués dans la figure 5 sont valables si les valeurs définissant la qualité du revêtement du pont et de ses accès ne dépassent pas les valeurs limites données dans [14]. Si ces valeurs limites sont largement dépassées, l'amplification dynamique peut alors être de beaucoup supérieure à celle donnée dans la norme. Pour représenter de tels cas, il faut alors se baser sur les mesures également effectuées par le LFEM, où le camion d'essai roule par-dessus une planche de 45-50 mm d'épaisseur posée en travers de la chaussée; les résultats de ces mesures sont donnés dans [10] et [11].

7. Calcul des valeurs de dimensionnement

Les chapitres précédents définissent les données de base du trafic routier suisse ainsi que les situations de danger adoptées et admises comme déterminantes pour modéliser ce dernier. Ce chapitre commente la procédure et les méthodes

de calcul utilisées pour évaluer les valeurs de dimensionnement des différents modèles de charge telles qu'elles sont données dans le tableau 2 [2]. Les indications qui sont données ci-après sont un résumé d'une démarche complexe entreprise depuis 1980 au sein d'un groupe de travail de la norme SIA 160. Elles sont concentrées plus sur le concept de la méthode que sur les détails du calcul, qui font l'objet de notes de calcul internes au groupe de travail concerné [15].

Pour plus de clarté, les cas où le trafic est à considérer comme action prépondérante (§ 7.1), comme action accompagnante (§ 7.2) ou comme charge de service (§ 7.3) sont traités séparément.

7.1 Action prépondérante

Le cas de charge relatif à l'action prépondérante du trafic est constitué par la prise en compte simultanée des modèles de charge 1, 2 et 3 (voir chap. 5 et fig. 3). Les valeurs de dimensionnement de ces modèles de charge ont été déterminées sur la base des indications données au chapitre 1. La démarche de calcul adoptée est donnée ci-après pour chacun des trois modèles de charge.

7.1.1 Modèle de charge 1

Comme une répartition égale du poids total du camion le plus agressif sur ses trois essieux correspond assez bien à la réalité [6], la valeur de dimensionnement de la charge d'essieux à prendre en compte pour le modèle de charge 1 (fig. 2) a été déterminée sur la base de l'histogramme du poids des 6611 essieux simples de tous les types de camions mesurés en 1975 et 1976 sur le trafic suisse; cet histogramme est donné à la figure 6 [6]. Le dépouillement statistique de ces mesures donne les résultats suivants:

- valeur moyenne: $m_x = 48,0$ kN;
- écart type: $s_x = 23,7$ kN;
- fractile 95% observé: $X_{95} = 101$ kN;
- valeur maximale observée: $X_{max} = 155$ kN.

Si l'on applique la relation (5), qui suppose une distribution normale, on obtient une valeur caractéristique $X^* =$

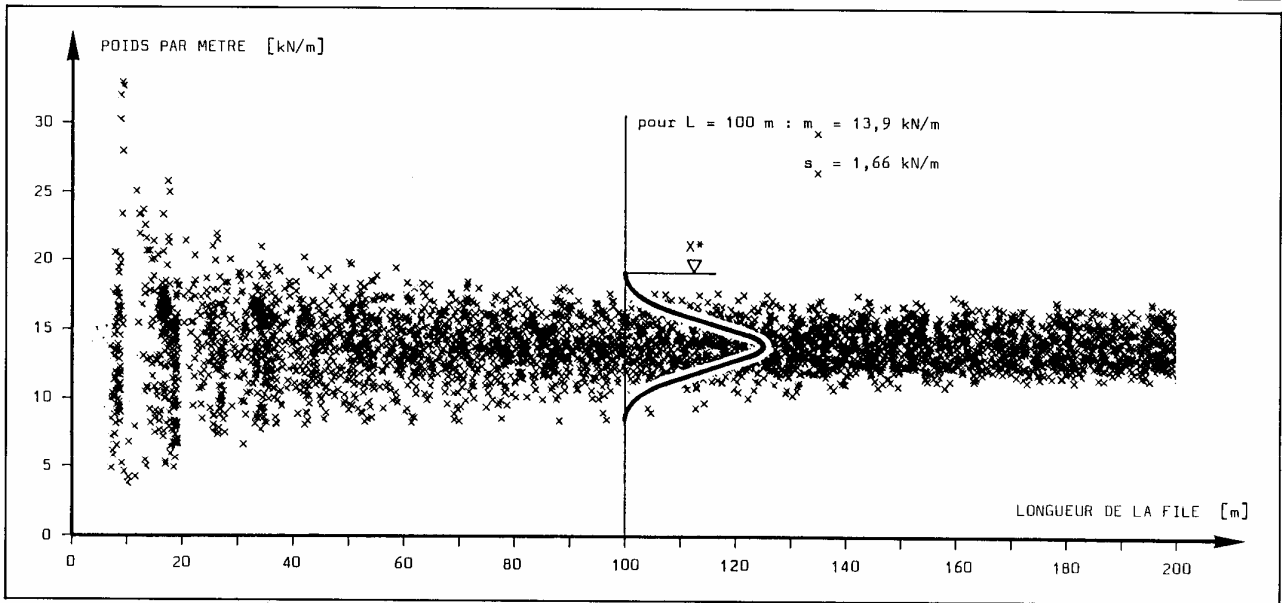


Fig. 7. — Variation du poids par mètre courant de files de camions espacés de 0,5 m en fonction de leurs longueurs.

124 kN qui est nettement inférieure à la valeur maximale observée de 155 kN. Ceci provient du fait que l'histogramme du poids des essieux simples ne correspond pas à une loi de distribution normale, mais plutôt à une loi gamma, comme le montre la figure 6. La valeur caractéristique correspondant à ce type de distribution vaut alors $X^* = 161$ kN.

Remarque :

Il est intéressant de calculer le rapport entre la valeur caractéristique X^* et le fractile X_{95} . Ce rapport X^*/X_{95} donne une idée de la «marge» du modèle de charge considéré par rapport à une valeur facilement déterminable, le fractile 95%. Ce rapport est couramment admis, souvent de façon arbitraire, égal à 1,40. Pour le modèle de charge 1, il vaut en l'occurrence 1,59, ce qui est supérieur à 1,40, mais qui s'explique par une grande dispersion vers le haut du poids des essieux simples.

Sur la base de cette valeur caractéristique $X^* = 161$ kN, la relation (3) a donné

comme valeur de dimensionnement X_d arrondie de 180 kN/essieux, c'est-à-dire 90 kN/roue (tabl. 2).

7.1.2 Modèle de charge 2

La valeur de dimensionnement de ce modèle de charge a été établie à l'aide d'un programme de simulation sur ordinateur. A l'aide des poids et des empattements des essieux mesurés sur les camions [5] [6], dans leur ordre d'apparition dans le trafic, il a été possible de reconstituer des files de camions telles qu'elles se seraient réellement produites en cas de bouchon, par exemple.

On a donc composé toutes les files de n ($n = 1, 2, 3, \dots$) camions qui pourraient se produire dans le trafic, et déterminé pour chacune d'entre elles sa longueur et son poids par mètre courant (poids total/longueur) en considérant les deux cas suivants :

1. la file de camions est à l'arrêt, et il n'y a pas de coefficient dynamique à

prendre en compte. L'écartement entre les camions a été fixé à une valeur très sévère de 0,5 m ;

2. la file de camions est en mouvement, et il faut tenir compte du coefficient dynamique ϕ_2 défini au chapitre 6. Sur la base de mesures d'écartement effectuées dans des files de camions [11], celui-ci a été admis égal à 2,5 m, cette valeur pouvant se rencontrer sans autre jusqu'à une vitesse de 20 km/h.

C'est le trafic mesuré entre Bâle et Zurich qui s'est révélé être le plus agressif et qui a donc servi de base à ce travail de simulation.

La figure 7 donne le résultat de cette démarche pour le cas de la colonne à l'arrêt, c'est-à-dire avec $e = 0,5$ m. Elle montre que la valeur moyenne est quasi indépendante de la longueur de la file. En revanche la dispersion des résultats décroît avec la longueur de la file et le poids maximal par mètre courant ne diminue pratiquement plus à partir d'une longueur de file de 100 m. Sur la base de ces résultats, la valeur caractéristique du modèle de charge 2 a été admise comme étant une grandeur indépendante de la longueur de la file, couvrant les longueurs supérieures à 100 m. L'augmentation du poids par mètre courant des files plus courtes est donnée par le camion lourd du modèle de charge 1 qui doit être considéré conjointement avec le modèle de charge 2. Le dépouillement statistique correspondant est donné au tableau 3 pour les cas de la file à l'arrêt et en mouvement.

On peut remarquer que pour ce modèle de charge, l'hypothèse d'une distribution normale est tout à fait bonne, contrairement au modèle de charge 1. La valeur caractéristique a donc été calculée avec la relation (5), ce qui donne :

- pour la colonne à l'arrêt : $X^* = 19,2$ kN/m ;

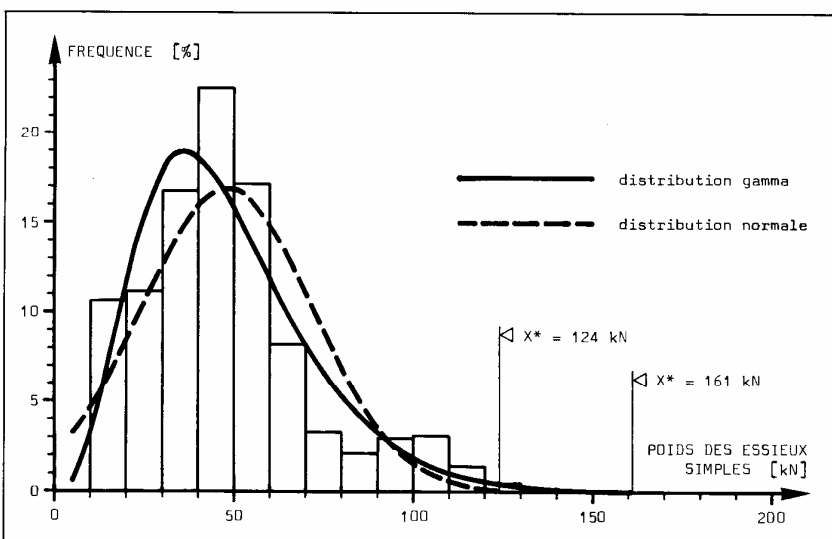


Fig. 6. — Histogramme du poids de 6611 essieux simples recensés en Suisse.

TABLEAU 3: Valeurs statistiques du poids par mètre courant des files de camions de longueur supérieure à 100 m.

		FILE A L'ARRÊT	FILE EN MOUVEMENT
Espacement entre camions	e	0,5 m	2,5 m
Valeur moyenne	m_x	13,9 kN/m	12,4 kN/m
Ecart type	s_x	1,66 kN/m	1,65 kN/m
Fractile 95 % observé	X_{95}	16,3 kN/m	15,0 kN/m
Valeur maximale observée	X_{max}	17,5 kN/m	15,9 kN/m
Valeur caractéristique	X^*	19,2 kN/m 7,7 kN/m ²	17,7 kN/m 7,1 kN/m ²
Valeur de dimensionnement	X_d	—	7,5 kN/m ²

— pour la colonne en mouvement :
 $X^* = 17,7$ kN/m.

Si l'on tient compte du coefficient dynamique ϕ_2 (variant de 1,1 à 1,4 selon le chapitre 6) à appliquer à la colonne en mouvement, on obtient une valeur de $\phi_2 \cdot X^*$ variant de 19,5 à 24,8 kN/m, supérieure aux 19,2 kN/m à considérer pour la colonne à l'arrêt. Ceci confirme le fait admis jusqu'ici qu'il fallait considérer le modèle de charge 2 comme une colonne en mouvement, ce cas étant plus défavorable que celui de la colonne à l'arrêt.

Remarque :

Le rapport X^*/X_{95} vaut cette fois-ci 1,18. Cette valeur est relativement faible, car la dispersion du poids par mètre courant des colonnes de camions de longueur supérieure à 100 m n'est pas très grande.

La valeur caractéristique X^* ainsi déterminée correspond à une charge répartie sur une largeur de 2,5 m d'une valeur de 7,1 kN/m². La relation (3) donne finalement une valeur de dimensionnement X_d arrondie de 7,5 kN/m² (tab. 2).

7.1.3 Modèle de charge 3

Les valeurs de dimensionnement de ce modèle de charge ont été calculées à l'aide d'une méthode probabiliste simplifiée [15]. Cette méthode, pouvant faire à elle seule l'objet d'une publication, n'est pas commentée en détail ici; seules les étapes principales sont résumées ci-après:

1^{re} étape: La valeur moyenne de la charge longitudinale d'un trafic mélangé de camions et de voitures à l'arrêt a tout d'abord été établie sur la base des données suivantes:

- la part moyenne des camions dans les différentes voies de circulation (tab. 1) [9] pour un trafic à 2, 3 et 4 voies (pour le trafic à 4 voies, on a simplement ajouté au trafic à 3 voies une voie ayant 0% de camions);
- les mesures de longueurs moyennes des camions [6] et des voitures [9] (y compris un écartement entre véhicules de 0,5 m);

- les mesures du poids par mètre courant moyen des camions du trafic Bâle-Zurich [6] et des voitures [9].

On a ainsi obtenu une valeur moyenne de la charge longitudinale égale à 6,70, 6,33 à 5,0, 4,5 et 3,5 kN/m² pour des largeurs respectivement 2, 3 et 4 voies de circulation.

2^e étape: Le fractile 95% de la charge longitudinale a ensuite été déterminé en combinant camions et voitures à l'aide de la loi binomiale, et en déterminant la combinaison du trafic ayant une proportion de camions qui ne sera dépassée que dans 5% des cas. A l'aide de ce résultat et des valeurs du fractile 95% du poids par mètre courant des camions du trafic Bâle-Zurich [6] et des voitures [9], la valeur du fractile 95% de la charge longitudinale a pu être établie en fonction de la longueur de la file de trafic arrêté; pour une longueur de 100 m, cette valeur vaut 11,40, 10,00 et 8,53 kN/m par voie pour un trafic à respectivement 2, 3 et 4 voies.

3^e étape: Avec la valeur moyenne et le fractile 95% de la charge longitudinale, les relations (5) et (6) permettent de déterminer la valeur caractéristique, dans l'hypothèse d'une distribution nor-

male de ces charges. La valeur caractéristique de la charge longitudinale résultant de ce calcul vaut alors 15,9, 13,6 et 11,4 kN/m pour un trafic à respectivement 2, 3 et 4 voies et pour une longueur de trafic arrêté de 100 m.

Remarque :

Le rapport entre la valeur caractéristique et le fractile 95% de la charge longitudinale vaut alors 1,39, 1,36 et 1,34 pour un trafic à respectivement 2, 3 et 4 voies et une longueur de file de 100 m. Ces valeurs se situent entre celles correspondant aux modèles de charge 1 et 2, la dispersion statistique de la charge longitudinale étant relativement moyenne.

4^e étape: La valeur caractéristique X^* du modèle de charge 3 a ensuite été établie en déterminant, selon le nombre de voies, le complément à rajouter au modèle de charge 2 pour égaler la charge longitudinale précédemment calculée. La figure 8 donne la variation de X^* (exprimé en kN/m² pour une largeur de voie de circulation admise à 3,0 m) en fonction de la longueur de la file arrêtée, pour un trafic à 2, 3 et 4 voies. Les valeurs caractéristiques de ce modèle de charge ont été choisies, comme pour le modèle de charge 2, indépendantes de la longueur de la file, avec comme valeurs déterminantes celles correspondant à une longueur de file de 100 m. Cette option est justifiée, comme précédemment, par la présence simultanée de la charge concentrée du modèle de charge 1 reproduisant sur la charge totale cette dépendance de la longueur. La comparaison avec des situations déterministes de files de 2 à 4 voies a par ailleurs confirmé cette option. Une régression logarithmique des courbes obtenues par la loi binomiale a finalement été effectuée (fig. 8), ce qui a permis d'établir la valeur caractéristique X^* du modèle de charge 3 à 4,80, 4,11 et 3,29 kN/m² pour un trafic à respectivement 2, 3 et 4 voies.

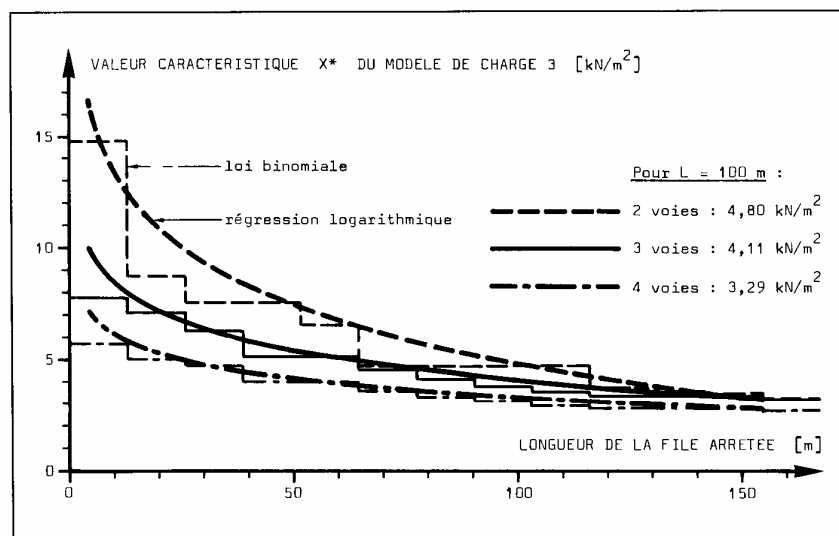


Fig. 8. — Variation de la valeur caractéristique X^* du modèle de charge 3 en fonction de la longueur de la file arrêtée.

5^e étape: La notion de nombre de voies a été transformée en largeur de chaussée en considérant que des largeurs de 9 et 13 m étaient des valeurs limites pour correspondre à un trafic à 2 et 3 voies. Le cas du trafic à 4 voies a été considéré pour l'ensemble des chaussées ayant une largeur supérieure à 13 m.

Sur cette base, et avec la relation (3), les valeurs de dimensionnement X_d arrondies du modèle de charge 3 ont été fixées à 5,0, 4,5 et 3,5 kN/m² pour des largeurs de chaussée de respectivement ≤ 9 m, ≤ 13 m et > 13 m (tab. 2).

7.2 Action accompagnante

Le cas de charge relatif à l'action accompagnante du trafic est composé uniquement du modèle de charge 3 (chap. 5). La valeur de dimensionnement de ce modèle de charge a été déterminée de façon à représenter la charge moyenne d'un trafic mélangé de voitures et de camions arrêtés. Cette situation de danger, tout en étant relativement fréquente surtout en milieu urbain, est en effet déterminante par rapport au trafic mélangé fluide.

Les mesures de trafic à disposition, à savoir:

- la part moyenne des camions dans le trafic routier [8];
- la longueur moyenne et le poids par mètre courant moyen des camions [6] et des voitures [9], ont permis d'estimer le poids par mètre courant moyen d'un trafic mélangé de camions et de voitures à 5,34 kN/m. Si l'on transforme cette valeur en charge répartie en admettant une largeur de voie de circulation de 3 m, on obtient 1,8 kN/m², ce qui donne une valeur de dimensionnement Q_a arrondie de 2,0 kN/m² indépendante de la largeur de la chaussée (tab. 2).

7.3 Charge de service

La vérification de l'aptitude au service vise principalement à assurer un bon fonctionnement de l'ouvrage et le confort de l'utilisateur. Ce cas de charge doit donc représenter une charge moyenne souvent rencontrée dans le trafic routier. C'est pour cela que les modèles de charge 1 et 3 sont utilisés (fig. 4).

Le modèle de charge 3 est le même que celui utilisé pour le trafic accompagnant. Il représente donc un trafic mélangé de camions et de voitures arrêtés sur la chaussée, et sa valeur de dimensionnement de 2,0 kN/m² correspond à la valeur moyenne pouvant être rencontrée (tab. 2).

La valeur de dimensionnement de modèle de charge 1 a été établie pour correspondre au poids d'un camion à 3 essieux de plus en plus fréquent dans le trafic lourd suisse. Son poids maximal légal est de 250 kN. Au vu de la fréquence des excès de charge allant jusqu'à 120% de la limite légale, il a été admis une

valeur de dimensionnement pour le poids total de ce modèle de charge 3 de 300 kN, soit 100 kN/essieux ou encore 50 kN/roue (tab. 2).

8. Conclusions

L'objectif de cet article était de donner des précisions sur les principes d'élaboration et les valeurs numériques des modèles de charge donnés dans le projet de norme SIA 160 qui a été soumis en consultation [2]. Des informations complémentaires sur l'évolution de ce travail et sur les décisions prises sont réunies dans la référence [15].

En guise de complément aux points abordés dans cet article, il nous semble encore utile de faire les remarques suivantes:

1. Les valeurs de dimensionnement des modèles de charge utilisés sont basées sur les résultats statistiques de mesures du trafic routier réel; ceci devrait faciliter le suivi de l'évolution du trafic. Lors de nouvelles mesures, les résultats pourraient être utilisés pour déterminer si les valeurs de dimensionnement doivent être adaptées ou non. L'effet d'une éventuelle augmentation du poids maximal légal des camions de 280 à 400 kN, pour s'aligner sur les limites en vigueur dans nos pays voisins, serait ainsi, par exemple, facilement quantifiables.
2. Des comparaisons entre les effets du trafic modélisé par les cas de charge routiers proposés et ceux de situations de danger réelles ont démontré que les modèles de charge assuraient une sécurité suffisante. On a ainsi pu vérifier par exemple que les cas de croisements de véhicules pour un trafic bidirectionnel étaient couverts même si l'on ne considérait que la largeur de la chaussée comme critère déterminant pour la valeur numérique du modèle de charge 3.
3. Précisons finalement que nous avons essayé, tout au long de ce travail de modélisation du trafic routier suisse, de ne raisonner qu'au niveau des charges sans considérer l'influence des différents systèmes statiques et matériaux de construction, influence qui doit être prise en compte dans les normes de matériaux.

Nous espérons avoir ainsi atteint par ce travail le but fixé par la révision de la norme de charge, à savoir une définition des cas de charge routiers adaptée au concept de sécurité du projet de norme.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes de la SIA, du LFEM et de l'ICOM qui ont soutenu leur travail, tant sur le plan financier que technique, et qui, par leurs conseils, ont aidé à une bonne mise en forme de cet article.

Bibliographie

- [1] NORME SIA 160, *Norme concernant les charges, la mise en service et la surveillance des constructions*. Zurich, SIA, 1970.
- [2] PROJET DE NORME SIA 160, *Actions sur les structures*. Zurich, SIA, 1985.
- [3] HIRT M. A., *Konzept des Normentwurfs SIA 160*. Schweizer Ingenieur und Architekt, Zürich, vol. 103, n° 11, 1985, pp. 206-209.
- [4] INSTRUCTION SIA 260, *Sécurité et comportement en service des structures porteuses*. Zurich, SIA, 1980.
- [5] CANTIENI R., *Statistische Untersuchung des Schwerverkehrs in der Schweiz*. Dübendorf, LFEM/EMPA F + E Nr. 10502, 1978.
- [6] JACQUEMOUD J., BEZ R., *Dépouillement statistique du trafic routier suisse*. Lausanne, EPFL, ICOM, rapport interne, 1980.
- [7] JACQUEMOUD J., *Analyse du comportement à la fatigue des ponts-routes*. Lausanne, EPFL, thèse n° 389, 1980.
- [8] OFFICE FÉDÉRAL DES ROUTES, *Statistische Erhebung von Achslasten des Schwerverkehrs*. Trafics Etoy, Mumpf, Gossau et Cresciano. Berne, OFR, 1975 + 1976.
- [9] JACQUEMOUD J., *Untersuchung zur Reduzierung der Verkehrslasten für das Bauvorhaben Rodenkirchen-Rheinbrücke Aachen, Rhein-Westf.* Technische Hochschule, Lehrstuhl für Stahlbau, 1982.
- [10] CANTIENI R., *Dynamische Belastungsversuche an Strassenbrücken in der Schweiz - 60 Jahre Erfahrung der LFEM/EMPA*. Dübendorf, LFEM/EMPA Forschungs- und Arbeitsbericht Nr. 116/1, 1983.
- [11] CANTIENI R., *Dynamische Belastungsversuche an der Bergspurbrücke Deibüel*. Dübendorf, LFEM/EMPA (publication en préparation).
- [12] BILLING J. R., *Estimation of the Natural Frequencies of Continuous Multi-Span Bridges*. Ontario Ministry of Transportation and Communications, Report RR 219, 1979.
- [13] NORME SNV 640520 a, *Planéité contrôle de la géométrie*. Zurich, Association suisse de normalisation, 1977.
- [14] NORME SNV 640521 a, *Planéité, exigences*. Zurich, Association suisse de normalisation, 1977.
- [15] BEZ R., *GT 3/SIA 160 - Charges routières*. Lausanne, EPFL, ICOM, rapport interne, 1985.

Adresse des auteurs:

Rolf Bez
ing. civil dipl. EPFL/SIA
EPFL - ICOM Construction métallique
GC - Ecublens
1015 Lausanne
Reto Cantieni
ing. civil dipl. EPFZ/SIA
LFEM/EMPA
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf
Joseph Jacquemoud
Dr ès sc. techn.,
ing. civil dipl. EPFL/SIA
Etat du Valais
Service des ponts et chaussées
1950 Sion