Zeitschrift: IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte
Band: 37 (1982)

Artikel: Contribution à l'étude du problème de fatigue dans les ponts-routes
Autor: Jacquemond, J. / Hirt, M.A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-28992

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Contribution à l'étude du problème de fatigue dans les ponts-routes

Beitrag zum Problem des Ermüdungsverhaltens von Strassenbrücken

Fatigue Behaviour of Highway Bridges

J. JACQUEMOUD
Dr. ès sciences
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
Aix-la-Chapelle, République Fédérale d'Allemagne

M.A. HIRT
Professeur
ICOM-Construction Métallique
Lausanne, Suisse

RESUME
Les charges réelles du trafic routier, le calcul des actions de fatigue et le comportement des ponts mixtes constituent les trois volets de ce rapport. Un modèle de charge est élaboré sur la base de plusieurs mesures de trafic. Un schéma de calcul est testé pour l'évaluation des actions de fatigue du trafic routier à partir de ce modèle. Les propriétés d'un coefficient de linéarisation intervenant dans ce schéma réduisent le calcul à une simplicité compatible avec un usage pratique par l'ingénieur. Le comportement à la fatigue des ponts-routes mixtes est alors évalué et discuté.

ZUSAMMENFASSUNG
Die tatsächlichen Lasten des Schwerverkehrs, die Berechnung der ermüdungswirksamen Einwirkung, und das Ermüdungsverhalten von Verbundbrücken bilden die drei Abschnitte dieses Beitrages. Basierend auf mehreren Verkehrsmessungen wird ein Lastmodell hergeleitet, womit ein Berechnungsschema zur Abschätzung der Ermüdungswirkung des Strassenverkehrs überprüft wird. In diesem Schema wird ein Übertragungsfaktor verwendet, der die Berechnung sehr stark vereinfacht und für den praktisch tätigen Ingenieur zugänglich macht. Das Ermüdungsverhalten von Verbundbrücken wird abgeschätzt und besprochen.

SUMMARY
Actual traffic loads, equivalent loads for fatigue, and the behaviour of composite bridges make up the three parts of this contribution. A load model is derived from a number of traffic measurements. This model is used to check a calculation procedure for the fatigue evaluation of road traffic. In order to simplify this procedure a transfer factor is established. Finally, the fatigue behaviour of composite road bridges is evaluated and discussed.

1. INTRODUCTION

Les accidents d'ouvrages survenus par fatigue ont eu pour première conséquence une intensification de la recherche du côté de la résistance à la fatigue du matériau et des éléments structuraux. Les résultats obtenus ont changé le principe même de la vérification à la fatigue. Tout d'abord, l'idée d'une vie limitée des ouvrages a dû être acceptée ; ensuite, le concept du delta-sigma ($\Delta\sigma$) s'est imposé pour représenter les actions de fatigue.

La présente étude veut contribuer à une approche moderne pour effectuer la vérification à la fatigue des ponts-routes, en s'appuyant sur les règles de résistance nouvelles. Les charges sont tout d'abord considérées, avec à leur base des résultats de mesures du trafic. Une deuxième partie traite la question du calcul des sollicitations pour la fatigue avec l'intention de définir un schéma de calcul pour les vérifications pratiques. La troisième partie est une synthèse où les sollicitations calculées sont comparées aux résistances connues ; elle est réalisée pour les poutres maîtresses de ponts en construction mixte.

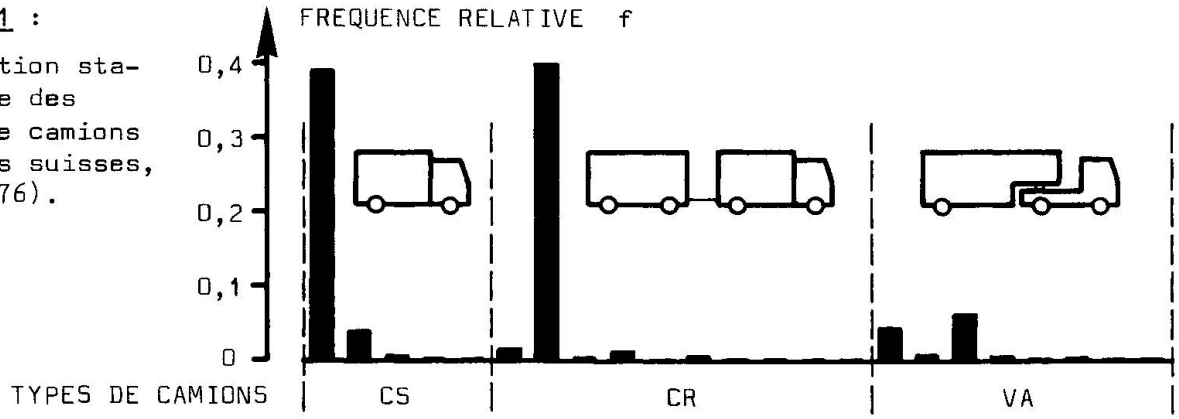
2. CHARGES DU TRAFIC ROUTIER

Dans le contexte d'une étude sur la fatigue, on comprend sous le terme charge les spectres des charges de service, c'est-à-dire leur description en fréquence et en intensité. Huit mesures de trafic effectuées sur le réseau suisse (1975-1976) et englobant un ensemble de 2340 camions sont à la base des résultats présentés ici. Les histogrammes des types de véhicules, de leurs poids totaux et de leurs géométries donnent une image, momentanée, du trafic routier réel [1] ; ils permettent aussi de mettre en évidence les aspects constitutifs généraux du trafic et d'établir un modèle de charge représentatif.

2.1 Types de véhicules

Une première distinction est d'abord faite entre les véhicules légers et les camions : sont considérés comme camions tous les véhicules ayant un poids total maximum admissible supérieur à 35 kN. On sépare de façon usuelle les camions en trois groupes : les camions solo (CS), les trains routiers (CR) et les véhicules articulés (VA). Dans chacun de ces groupes, on distingue différents types selon le nombre et l'arrangement des essieux.

FIGURE 1 : Répartition statistique des types de camions (mesures suisses, 1975-1976).



La fréquence relative de chaque type de camion est représentée à la FIGURE 1 pour la moyenne des huit trafics mesurés. Parmi une grande variété de types de véhicules (23 types observés), il apparait clairement que seuls trois ou quatre types sont statistiquement importants (89 % du trafic). Il s'agit du camion solo à deux essieux (CS10), du train routier à quatre essieux (CR42) et des véhicules articulés à trois ou quatre essieux (VA71 ou VA74).

Cette structure de trafic est, qualitativement, indépendante des conditions géographiques. Une évolution dans le temps est en revanche imprévisible ; elle dépend des circonstances historiques (parc de véhicules), techniques (innovation dans la construction), légales (charges limites) et économiques (type et volume de transports).

2.2 Poids totaux des véhicules lourds

Le deuxième paramètre essentiel dans ce propos est le poids total des véhicules lourds. La FIGURE 2 représente un exemple typique d'histogramme des poids totaux mesurés sur l'autoroute Lausanne-Genève.

Le domaine des poids des véhicules lourds est très large et va de 30 à 410 kN. La répartition statistique des poids totaux des véhicules est, dans la règle, bimodale. L'analyse de ces spectres montre que le prémier maximum est caractéristique des véhicules vides ; sa position peut cependant varier (de 80 à 150 kN) selon la proportion de véhicules du groupe des CS. Le deuxième maximum englobe tous les véhicules pleins, c'est-à-dire chargés à la limite légale ; sa position est de ce fait très stable et bien marquée, pour la Suisse, à 280 kN.

La distinction entre véhicules pleins et véhicules vides, l'importance prépondérante du poids légal maximal et celle, moins prononcée, du nombre relatif des véhicules de chaque groupe peuvent être considérées comme les éléments constitutifs des spectres des poids. Les variations de l'un ou l'autre de ces paramètres expliquent les différences observées entre les trafics. Pour les trafics de différents pays, on retrouve systématiquement des distributions bimodales avec un premier maximum fluctuant quelque peu dans les faibles poids et un deuxième maximum fixé à la limite légale maximale.

Une valeur particulièrement importante dans ce propos est le poids équivalent Q_e, défini comme la moyenne "$m^{ième}$" des poids Q_i, selon l'expression :

$$Q_e = (\Sigma_i \, Q_i^m \, f_i)^{1/m} , \qquad (1)$$

où f_i est la fréquence relative des classes de poids Q_i et m = 3 la pente des courbes de Wöhler ; cette définition sera justifiée ultérieurement. La valeur de Q_e varie assez fortement selon les trafics : le minimum mesuré est de 161 kN et le maximum de 232 kN ; la valeur pour l'ensemble des huit trafics suisses est de 182 kN.

2.3 Géométrie des véhicules lourds

La donnée géométrique la plus importante et la plus variable est la distance entre essieux extrêmes des véhicules. Elle varie entre 3 et 17 m et dépend principalement des types de véhicules. La FIGURE 3 donne les courbes des fréquences cumulées de ces distances pour les trois types principaux de véhicules. Les moyennes et écarts types sont quasi indépendants du trafic considéré. L'évolution dans ce domaine dépend essentiellement des innovations techniques dans la construction des véhicules.

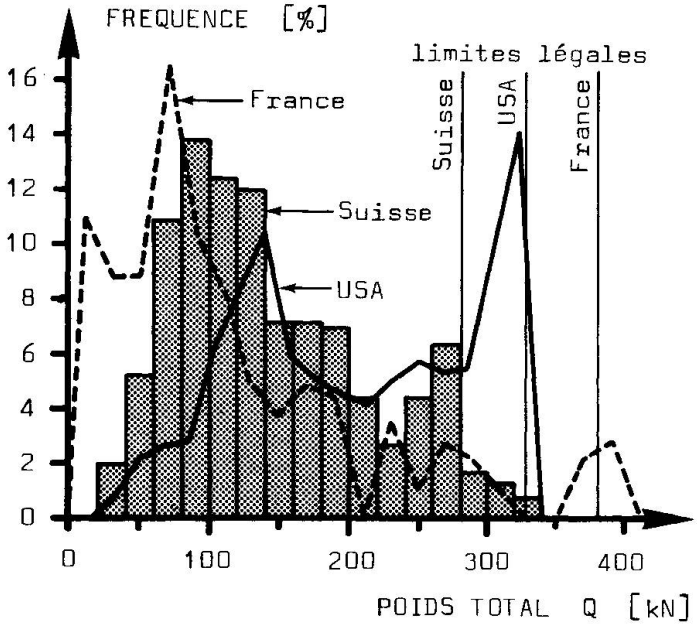


FIGURE 2 :

Histogramme des poids totaux de camions pesés en Suisse et comparaison avec deux autres trafics.

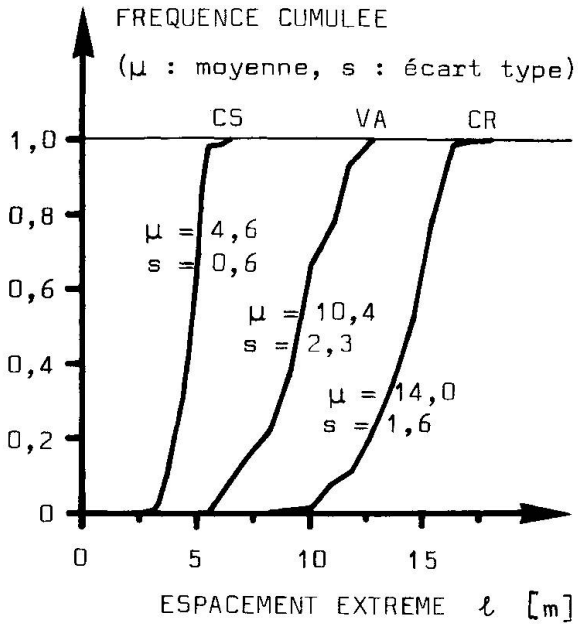
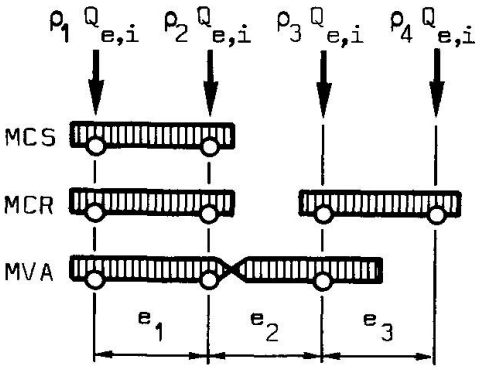


FIGURE 3 :

Distance entre les essieux extrêmes, pour les trois types principaux de véhicules.

2.4 Modèle de charge

L'intention de ce modèle (FIGURE 4) est de donner une image simple mais représentative du trafic réel, pour le calcul à la fatigue des ponts-routes. Il est constitué de trois chariots types correspondant aux trois groupes de véhicules. Les caractéristiques géométriques, les entr'axes et la proportion de la charge totale sur chaque essieu sont les valeurs moyennes mesurées. Chaque chariot type est donné avec une fréquence identique à celle du groupe de véhicules représenté. Enfin le poids de chaque chariot est admis égal au poids équivalent $Q_{e,i}$ des camions de chaque groupe.



TYPE	f *) [%]	$Q_{e,i}$ [kN]	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	e_1 [m]	e_2 [m]	e_3 [m]
MCS	44,7	115	0,43	0,57	—	—	4,56	—	—
MCR	42,5	217	0,25	0,37	0,20	0,18	4,70	5,12	4,14
MVA	12,8	218	0,27	0,37	0,36	—	3,29	6,07	—

*) f : fréquence relative de chaque type de chariot

FIGURE 4 : Schéma et caractéristiques des trois chariots types composant le modèle de charge du trafic.

3. CALCUL DES ACTIONS DE FATIGUE

3.1 Concept de résistance à la fatigue

Le concept de résistance reconnu dans ce travail est basé sur les courbes expérimentales de Wöhler ($\Delta\sigma$-N), spécifiques à chaque détail constructif et sur la règle de sommation des dommages de Miner. La méthode de comptage est le Rainflow. La pente des lignes de Wöhler est identique pour tous les détails et égale à m = 3 [2] [3] [4]. Le contenu de ce concept est résumé par les deux équations suivantes :

$$\log N = A - m \log \Delta\sigma \,, \tag{2}$$

$$X_e = (\Sigma_i X_i^m f_i)^{1/m} \,. \tag{3}$$

L'équation (2) définit les lignes de Wöhler et l'équation (3) donne la relation d'équivalence entre un spectre d'amplitudes aléatoires et une amplitude caractéristique équivalente, soit en particulier la contrainte équivalente $\Delta\sigma_e$.

3.2 Principe du calcul

Le but du calcul est de déterminer les actions de fatigue, soit un couple de valeurs ($\Delta\sigma_e$, N). L'image du trafic adoptée est celle d'une suite de camions canalisés dans une voie de circulation, indépendants les uns des autres et distants longitudinalement d'un multiple des longueurs d'influence des éléments considérés. Le nombre de cycles N est ainsi fixé identique au nombre de camions. Pour un élément de construction avec une longueur d'influence L et une valeur d'influence η, la détermination de la contrainte équivalente $\Delta\sigma_e$ suit alors le chemin suivant :

1.- Calcul des sollicitations $\Delta X_i'$ pour des charges concentrées identiques chacune au poids de l'un des k chariots du modèle de charge $Q_{e,i}$:

$$\Delta X_i' = \eta \, L \, Q_{e,i} \,. \tag{4}$$

2.- Calcul de la sollicitation équivalente $\Delta X_e'$ selon l'équation (3), avec les fréquences relatives f_i des k chariots types.

3.- Calcul de coefficients de réduction CRL_i sur les $\Delta X_i'$ pour la géométrie réelle de chaque chariot type.

4.- Calcul de la réduction globale CERL du $\Delta X_e'$ pour la géométrie réelle des chariots avec la relation :

$$CERL = \left[\frac{\Sigma_i^k \, CRL_i^m \, Q_{e,i}^m \, f_i}{\Sigma_i^k \, Q_{e,i}^m \, f_i} \right]^{1/m} \,. \tag{5}$$

5.- Calcul de la sollicitation équivalente ΔX_e :

$$\Delta X_e = \Delta X_e' \, CERL \,. \tag{6}$$

6.- Calcul de la contrainte équivalente avec le moment de résistance W de la fibre considérée :

$$\Delta\sigma_e = \Delta X_e / W \,. \tag{7}$$

En explicitant le terme ΔX_e selon les équations (3), (4) et (6), on obtient la relation simple pour $\Delta\sigma_e$:

$$\Delta\sigma_e = Q_e \text{ CERL } \eta \text{ L } W^{-1} , \qquad (8)$$

avec Q_e le poids équivalent du trafic complet selon l'équation (1). L'avantage de ce calcul gît dans sa simplicité tout d'abord et dans les propriétés du coefficient CERL défini ci-dessous.

3.3 Interprétation et valeurs du coefficient CERL

Dans une interprétation mathématique, le coefficient CERL est un coefficient de linéarisation de la fonction de transfert entre les charges et les sollicitations de fatigue. Son contenu est double : il représente en premier lieu le résultat de la combinaison linéaire des influences de chaque essieu dans le calcul des sollicitations et en deuxième lieu le résultat du comptage Rain-flow des amplitudes de sollicitations et de leur regroupement en une amplitude unique, équivalente quant au dommage.

La signification de ce facteur CERL pour l'ingénieur peut être soit celle d'un coefficient de réduction de la charge tenant compte des effets de fatigue, soit celle d'une sollicitation équivalente adimensionnelle, rapportée à la sollicitation correspondante d'une charge concentrée identique à Q_e.

La FIGURE 5 donne, en fonction de la portée, les valeurs de ce coefficient, pour le moment équivalent en travée d'une poutre infinie à travées et inertie constante (PIC). L'influence de la portée est monotone au-dessus de 10 m et les valeurs de CERL tendent asymptotiquement vers 1,0. Au-dessous de 10 m, le comportement est plus capricieux. Pour les très faibles longueurs d'influence, les essieux individuels deviennent déterminants ; lorsque L est nul, le coefficient CERL est identique au rapport du poids équivalent des essieux à celui des véhicules. On constate que l'arrangement des essieux en véhicules est très rapidement déterminant et qu'il est plus favorable que les essieux indépendants pour tout L inférieur à 15 m.

La sensibilité du coefficient CERL à la variation des caractéristiques géométriques des trois chariots types est concrétisée sur la FIGURE 5 par les courbes des valeurs limites. Ces courbes ont été calculées avec des longueurs de chariots

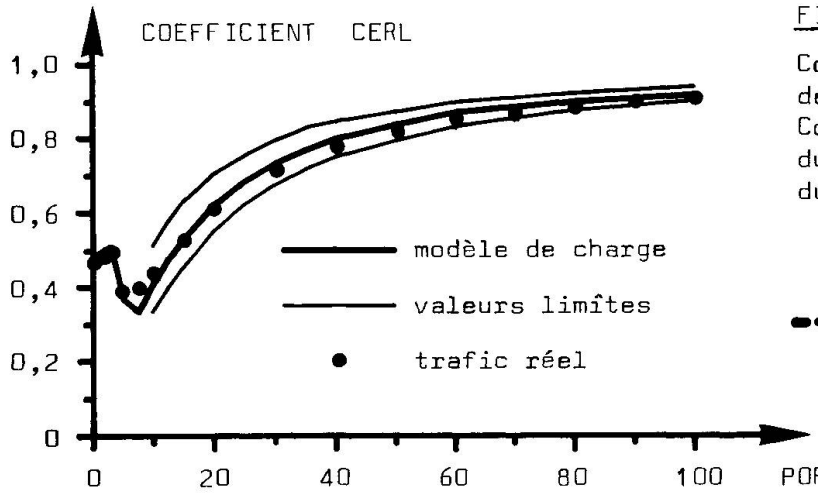
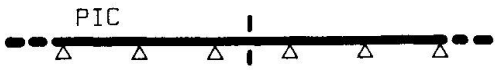


FIGURE 5 :

Coefficient CERL pour le calcul des sollicitations équivalentes. Comparaison des valeurs issues du modèle de charge avec celles dues au trafic réel.



égales aux valeurs moyennes moins un écart type et avec des poids relatifs d'essieux égaux aux valeurs moyennes plus un écart type. Elles représentent des situations extrêmes très peu probables. Les variations correspondantes du CERL restent à cet égard très modestes.

La validité de l'approximation géométrique du trafic réel par les trois seuls chariots types est démontrée par les points dénommés "trafic réel" sur la FIGURE 5. Ces points résultent d'un calcul effectué avec les 226 chariots réels d'un trafic mesuré. Ils sont pratiquement confondus avec les résultats du modèle de charge.

3.4 Propriétés du coefficient CERL

Le coefficient CERL ci-dessus défini et évalué présente deux propriétés très intéressantes :

1.- Il est quasi invariant avec le système statique : cette invariance vaut pour une même position de la section, en travée par exemple, ou pour tous les systèmes statiques envisagés. Le CERL reste dans une bande large de 0,04 en valeur absolue. Pour d'autres positions de la section, les valeurs varient plus sensiblement ; en particulier pour les moments sur appuis, une nouvelle courbe doit être calculée.

2.- Il est quasi invariant pour les différents trafics : la géométrie du trafic et sa structure, c'est-à-dire le nombre relatif de chaque type de véhicule, n'a également pratiquement pas d'influence sur le CERL. Ceci a été vérifié pour les huit trafics mesurés en Suisse, pour un trafic allemand et un trafic français. Comme le CERL est par définition indépendant de l'intensité Q_e en valeur absolue, on peut le considérer comme indépendant du trafic. Ces propriétés ont été rigoureusement vérifiées pour toutes les portées supérieures à 10 m.

3.5 Discussion de l'image de trafic

On a vu que les véhicules réels en tant qu'unités de charges sont très bien représentés par les trois chariots types du modèle de charge. L'image du flux de trafic est en revanche plus discutable : la distance entre véhicules est en réalité une variable aléatoire distribuée selon une loi négative exponentielle ou gamma. A cet effet, les sollicitations équivalentes issues du calcul déterministe simple proposé ici ont été comparées dans la FIGURE 6 à des simulations stochastiques de trafic [5]. Le calcul et la simulation ont été effectués pour une ligne d'influence de poutre simple en travée et pour une section transversale ouverte à deux poutres maîtresses. Le calcul déterministe ne considère qu'une seule voie de circulation mais la simulation tient compte d'une deuxième voie de circulation à gauche, chargée par un même trafic que la voie de droite. La simulation correspond à un trafic défini comme dense sur les deux voies, soit réalisée avec des distributions d'entre-distances entre véhicules égales au dixième des valeurs mesurées réelles.

La correspondance entre les résultats est excellente (FIGURE 6). Elle justifie les simplifications adoptées dans l'image du trafic. Deux mesures des contraintes sous trafic dans des ponts-mixtes ont de même confirmé absolument la validité du calcul effectué.

Ces observations peuvent être expliquées par l'analyse des effets de quelques combinaisons élémentaires de véhicules. Elles montrent clairement que les cas

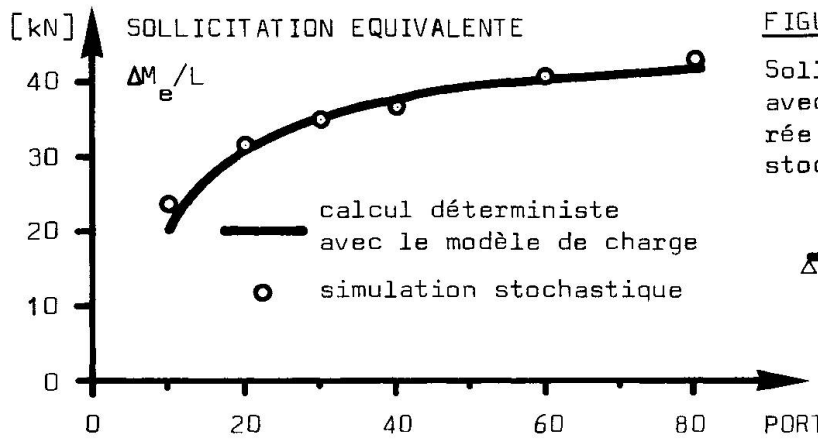


FIGURE 6 :

Sollicitation équivalente calculée avec le modèle de charge et comparée aux résultats des simulations stochastiques de trafic [5].

de présences multiples de véhicules dans les zones d'influence ne constituent pas un fait déterminant pour le calcul à la fatigue [1].

4. COMPORTEMENT DES PONTS-ROUTES MIXTES

Le modèle de calcul précédemment discuté a été appliqué au cas des poutres maîtresses de ponts-routes en construction mixte. Ce paragraphe donne un commentaire des résultats obtenus. Les durées de vie N sont calculées pour un détail constructif de type E (selon [4]). L'équation donnant N est :

$$\log N = 11{,}54 - 3 \log \Delta\sigma_e \,, \qquad (9)$$

et le $\Delta\sigma_e$ est déterminé selon l'équation (8). Les effets dynamiques ne sont pas considérés dans ce calcul.

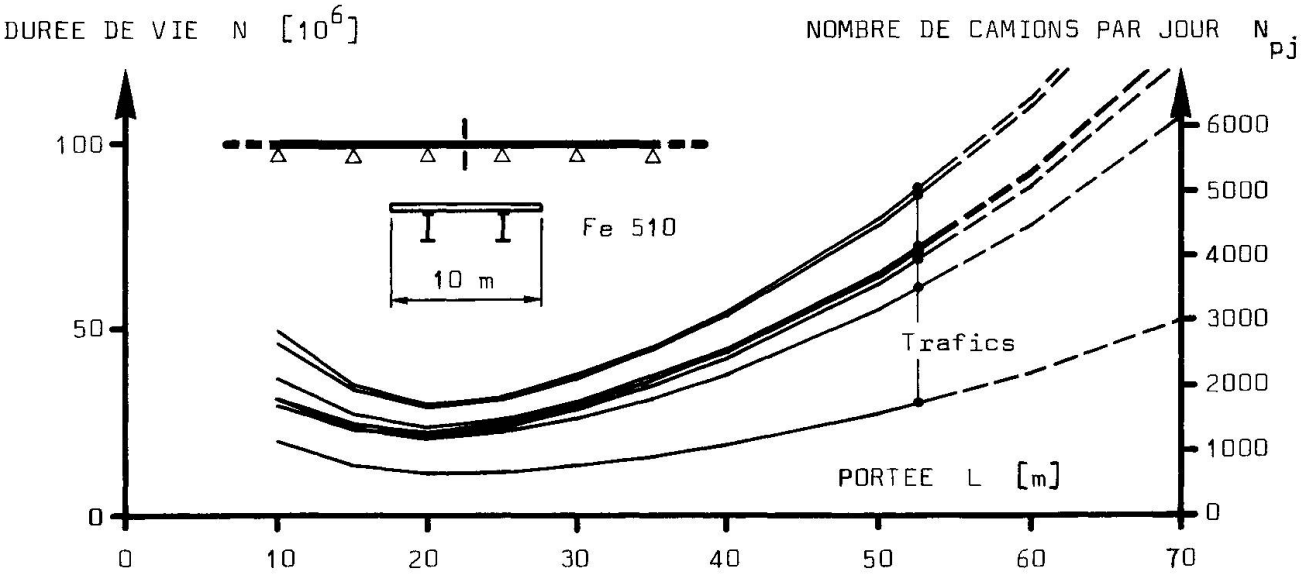


FIGURE 7 : Durée de vie calculée pour les ponts mixtes continus à deux poutres maîtresses ; influence du trafic et de la portée.

Les durées de vie obtenues sont représentées à la FIGURE 7 en fonction de la portée ; les différentes courbes correspondent à huit différents trafics. Le système statique considéré est la poutre continue infinie à travées égales. Les durées de vie N sont exprimées en nombre total de camions N ou en nombre de camions par jour N_{pj}, pour une vie totale de 70 ans à raison de 250 jours par an.

On constate que pour les portées de 20 à 30 m, les durées de vie sont minimales ; elles correspondent sur l'échelle de droite à un N_{pj} de l'ordre de 1000 camions par jour, montrant que dans cette zone la fatigue peut devenir déterminante. Les grandes portées sont en revanche peu sensibles à la fatigue ; au-delà de 50 à 55 m, on peut considérer que tout le spectre des contraintes est situé au-dessous de la limite d'endurance. L'influence de la portée provient (voir équation 8) de la variation non monotone du rapport CERL/W. L'influence du trafic provient de la fluctuation des poids équivalents Q_e; elle donne sur N des variations dans un rapport de 1 à 3, indépendamment de la portée. Une réglementation pratique devra, conséquemment à ces observations, inclure l'influence de la portée et distinguer les trafics en quelques classes d'intensité Q_e différentes.

Le calcul pour d'autres systèmes statiques, soit avec d'autres W et η dans l'équation (8), montre que les poutres continues sont les systèmes parmi les plus défavorables pour la fatigue ; par exemple, N est, pour une poutre simple, 4,5 fois supérieur aux valeurs de la FIGURE 7.

On voit, à l'aide de ces résultats, comment chaque influence peut être facilement reliée à l'un ou l'autre terme des équations (8) et (9). Une étude paramétrique détaillée selon ce mode est donnée dans la référence [1] ; elle inclut une estimation des effets de l'évolution des charges du trafic routier.

5. CONCLUSION

Ce travail contribue sous trois aspects à une meilleure connaissance des problèmes de fatigue dans les ponts-routes : les charges du trafic routier ont été abordées en premier, les résultats des mesures donnent une image locale du trafic et l'analyse statistique des données a permis de dégager ses aspects constitutifs généraux. Le résultat de la discussion sur les charges s'est concrétisé par l'élaboration d'un modèle de charge pour le trafic.

Le calcul des actions de fatigue était le deuxième objet traité. Il a été démontré ici que, pour la fatigue, les effets du trafic sont très bien représentés par les effets de trois véhicules types du modèle de charge. Un schéma de calcul pour la vérification pratique a été développé sur cette base ; il s'appuie sur un coefficient de réduction permettant de rapporter le calcul aux effets d'une charge élémentaire et possédant des propriétés remarquables.

Sur la base des informations acquises, le comportement à la fatigue des ponts-routes mixtes a été estimé et discuté. Les résultats qualitatifs et quantitatifs obtenus sont d'une part une base pour la conception et d'autre part un ensemble de repères et de critères pour la réglementation de la vérification à la fatigue des ponts-routes.

REFERENCES

[1] JACQUEMOUD, J. Analyse du comportement à la fatigue des ponts-routes. Thèse no 389, Ecole polytechnique fédérale, Lausanne, 1980.

[2] FISHER, J.W., FRANK, K.H., HIRT, M.A., McNAMEE, B.M. Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams. NCHRP Report No. 102, Highway Research Board, Washington D.C., 1970.

[3] SCHILLING, C.G., KLIPPSTEIN, K.H., BARSOM, J.M., BLAKE, G.T. Fatigue of Welded Steel Bridge Members under Variable-Amplitude Loadings. NCHRP Final Report, Project 12-12, Transportation Research Board, Washington D.C., 1975.

[4] Norme SIA 161 (1979) : Constructions métalliques. Société suisse des Ingénieurs et architectes, Zürich, 1979.

[5] BRULS, A. BAUS, R. Etude du comportement des ponts en acier sous l'action du trafic routier. Centre de recherches scientifiques et techniques de l'industrie des fabrications métalliques, Bruxelles, 1981.