

Coefficients de majoration dynamique des charges routières sur les ouvrages d'art

Calcul et extrapolation

Application au pont de Bruneseau

Jean CARRACILLI

Chargé de recherche

Section Fonctionnement et ingénierie des ouvrages d'art

Division Fonctionnement et durabilité des ouvrages d'art

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

La reconversion des Eurocodes (EC) en Euronormes (EN) et leur maintenance périodique, en principe tous les cinq ans, sont l'occasion de mises à jour, de validations et de compléments d'étude. L'un des Eurocodes concerne la détermination des majorations dynamiques. Ces valeurs qui ont été estimées, dans la version précédente des Eurocodes, par l'intermédiaire de simulations numériques, doivent être affinées par des mesures sur ouvrage, pour le passage à la nouvelle version. Le pont de Bruneseau, situé sur le périphérique extérieur parisien, a été retenu pour cette étude.

Les mesures présentées dans cet article portent sur la détermination des valeurs maximales d'effets statique et dynamique et sur le calcul des coefficients de majoration dynamique (CMD) correspondants.

Un premier calcul a porté sur les coefficients de majoration dynamique traditionnels, c'est-à-dire ceux déterminés à partir d'un camion d'essai, mais selon deux méthodes dont les avantages sont analysés. Cependant, cette définition des coefficients de majoration dynamique n'est pas toujours représentative des valeurs réelles rencontrées sur les ouvrages. Deux définitions des coefficients de majoration dynamique sont donc proposées. Elles font appel, non pas à un seul véhicule comme dans le calcul précédent, mais aux configurations de trafic qui ont généré les effets maximaux. Ces définitions, outre leur meilleure représentativité du phénomène dans la plupart des cas (ligne d'influence longue ou implication de plusieurs voies de circulation), présentent l'avantage d'éviter la coupure du trafic. En revanche, elles nécessitent l'implantation d'une station de pesage à proximité de l'ouvrage.

Enfin, cet article étudie les valeurs extrêmes des effets du trafic routier en fonction des périodes de retour obtenues à partir d'histogrammes de dépassements de niveaux et au travers d'ajustements optimaux de la formule de Rice. Ces valeurs extrêmes conduisent notamment à la détermination des coefficients de majoration dynamique à prendre en compte, pour les périodes de retour de 1 000 ans préconisées par l'Eurocode.

MOTS CLÉS : 24 - Pont - Trafic - Voie de circulation - Poids lourd - Mesure - Vitesse - Déformation - Extensomètre.

Introduction

Lors de la préparation de l'Eurocode E.C.3.1 [1, 2], les effets dynamiques du trafic routier, faute de données expérimentales, ont été estimés par l'intermédiaire d'une simulation numérique consistant à déplacer sur un grand nombre de lignes d'influence des trains de véhicules lourds à différentes vitesses (ce qui se traduisait, notamment, par des espacements variables entre véhicules et des majorations dynamiques variables), avec une rugosité de chaussée de qualité moyenne. Cette solution n'était guère satisfaisante car les caractéristiques dynamiques des véhicules étaient mal connues. Toutes ces considérations ont milité pour une reprise de l'étude expérimentale et, notamment, pour une meilleure connaissance des effets dynamiques.

Cette étude présente d'abord le calcul traditionnel des coefficients de majoration dynamique (noté δ_1) obtenus expérimentalement par le passage d'un véhicule étalonné.

Cependant, les majorations dynamiques varient beaucoup en fonction de certains paramètres. C'est ainsi que l'état du revêtement joue un rôle prépondérant, non seulement pour le confort de l'utilisateur mais surtout pour son action catalysante sur différents paramètres agissant sur les phénomènes dynamiques comme la vitesse des poids lourds, la charge par essieu, etc. Il existe également des phénomènes de couplage entre la fréquence de résonance des véhicules (1 à 2 Hz pour la caisse et 10 à 20 Hz pour les roues) et celle de l'ouvrage (1 à 6 Hz pour le premier mode de flexion). Ces couplages peuvent augmenter l'effet dynamique.

La définition des δ_1 est donc peu représentative des valeurs réelles rencontrées sur la plupart des structures, ce qui nous a conduit à rechercher une autre approche qui consiste à prendre en compte la totalité du trafic se trouvant sur le pont à un instant donné, toutes voies de circulation confondues. Les coefficients de majoration dynamique ainsi définis sont notés δ_2 et δ_3 dans la suite de l'étude.

Les mesures dont il est rendu compte dans cet article concernent également le problème du choix du coefficient de majoration dynamique à appliquer sur des valeurs extrêmes d'effets, en particulier après extrapolation. Les valeurs extrêmes des coefficients de majoration dynamique, pour une période de retour donnée, sont déterminées par le calcul des valeurs extrêmes des déformations statiques et dynamiques. Ces calculs sont effectués à partir d'histogrammes de dépassements de niveau et au travers d'ajustements optimaux de la formule de Rice.

Définition des coefficients de majoration dynamique

On propose trois définitions des coefficients de majoration dynamique : la première correspond à la définition habituelle (δ_1) et les deux autres (δ_2 et δ_3) sont propres à cette étude.

❶ δ_1 est obtenu par le passage d'un seul véhicule. Il est obtenu en divisant l'amplitude maximale de la déformation ($A_{\max, \text{dyn}}$) produite par le passage de ce véhicule à la vitesse V , par l'amplitude maximale de la déformation produite par le même véhicule à l'arrêt ($A_{\max, \text{stat}}$).

$$\delta_1 = \frac{A_{\max, \text{dyn}}}{A_{\max, \text{stat}}} \text{ (d'un véhicule étalon)}$$

❷ δ_2 est obtenu par le passage non pas d'un seul véhicule mais d'un ensemble de véhicules se trouvant à un instant donné sur les différentes voies de circulation du pont. Le calcul est fait en divisant l'amplitude maximale de la déformation mesurée, produite par le trafic ($A_{\max, \text{dyn}}$) par l'amplitude maximale de la déformation calculée (A_{stat}) à partir de la même configuration du trafic qui a produit ($A_{\max, \text{dyn}}$).

$$\delta_2 = \frac{A_{\max, \text{dyn}}}{A_{\text{stat}}} \text{ (même configuration du trafic)}$$

❸ δ_3 est déterminé par une configuration de trafic comme dans le cas précédent, mais en divisant l'amplitude de la déformation maximale mesurée, produite par une configuration de trafic ($A_{\max, \text{dyn}}$) par l'amplitude de déformation maximale calculée ($A_{\max, \text{stat}}$) dans une séquence de temps donnée, sans chercher la concomitance des deux phénomènes.

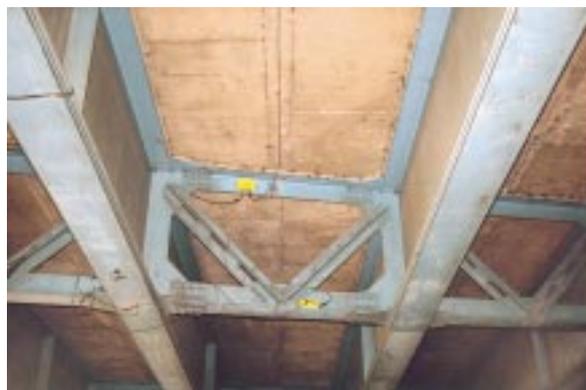
$$\delta_3 = \frac{A_{\max, \text{dyn}}}{A_{\max, \text{stat}}} \text{ (configurations du trafic différentes)}$$

Instrumentation d'un ouvrage et mesures

L'ouvrage choisi pour cette étude est le pont de Bruneseau [3] situé sur le périphérique extérieur parisien, près de la porte d'Ivry (fig. 1).



a. Vue générale.



b. et c. Vues de l'ossature métallique.

Fig. 1 - Pont de Bruneseau.

C'est un pont mixte d'une seule travée de 32 m, composé d'une dalle en béton de 30 cm d'épaisseur reposant sur sept poutres métalliques de hauteur constante égale à 2,5 m et espacées de 2,75 m et sur cinq entretoises de 2 m de hauteur et espacées de 8 m. Il comprend deux ouvrages indépendants reliés, pour la protection des personnes, par un caillebotis. Chaque demi-pont supporte quatre voies de circulation.

L'instrumentation est présentée sur la figure 2. Elle comprend :

- une jauge simple (j1) sous la semelle inférieure de la poutre 3 dans le sens longitudinal, à mi-travée ;
- une jauge simple (j4), sous la semelle inférieure de l'entretoise 3 à mi-distance entre les poutres 3 et 4 ;

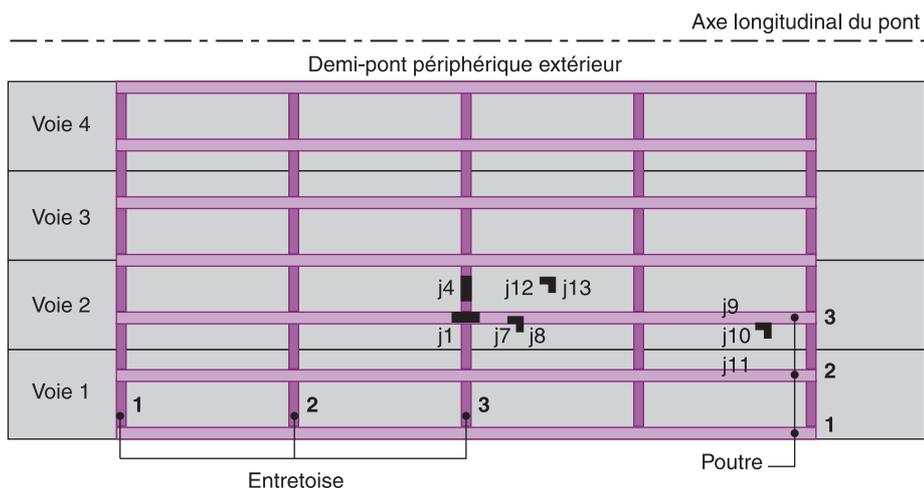


Fig. 2 - Plan d'implantation des jauges d'extensométrie.

- une jauge bidirectionnelle (j7, j8) sur la semelle inférieure de la poutre 3, près d'un raidisseur vertical à 1 m du milieu de la travée (respectivement sens longitudinal et transversal) ;
- une rosette (j9, j10 et j11) placée sur l'âme de la poutre 3, près de l'appui côté porte de Bercy, à 2 m de l'extrémité et aux trois quarts de la hauteur ;
- une jauge bidirectionnelle (j12, j13) sous et au milieu de la dalle en béton située entre les poutres 3 et 4 et les entretoises 3 et 4 (respectivement sens longitudinal et transversal).

Les déformations dynamiques sont obtenues directement par une chaîne de mesure comprenant, outre les jauges d'extensométrie implantées sur l'ouvrage, un système électronique de mesure pour PC et un conditionneur par voie de mesure qui assure l'alimentation des jauges, l'amplification, la numérisation et l'interface avec l'ordinateur.

La fréquence d'échantillonnage est de 75 Hz. Cette valeur est choisie en fonction de l'allure du signal. Pour réduire au maximum la place mémoire nécessaire, le signal n'est conservé que s'il dépasse un seuil fixé *a priori*. Cette fonction est assurée par un trigger (détecteur de franchissement de seuil) affecté à l'une des voies de mesure.

Dans cette étude, le seuil de déformation est de 40 μ déf. Lorsque ce seuil est franchi, le signal est enregistré pendant un temps donné (il est de 4 secondes dans cette étude) et le signal qui précède est conservé (durant 2 secondes).

Chaque signal isolé est donc enregistré pendant 6 secondes. Dans ces conditions, les signaux correspondant à une journée d'enregistrement occupent environ 200 Mo de place mémoire sur le PC.

Coefficients de majoration dynamique induits par un seul camion (δ_1)

Les données sont traitées pour obtenir les variations de déformation de chaque point instrumenté du pont. On

obtient ainsi la courbe des déformations produites par chaque passage sur l'ouvrage, hors trafic, d'un camion d'essai, de dimensions et de poids connus [3].

Mesures statiques

Les déformations statiques ont été obtenues par le passage d'un camion de caractéristiques géométriques et de poids connus, à très faible vitesse pour ne pas engendrer de majorations dynamiques sur le pont.

Le camion utilisé est le déflectographe à chassis long de 19 t (6 t : essieu avant et 13 t : essieu arrière) du Laboratoire régional de l'Ouest Parisien (LROP) de Trappes (fig. 3).

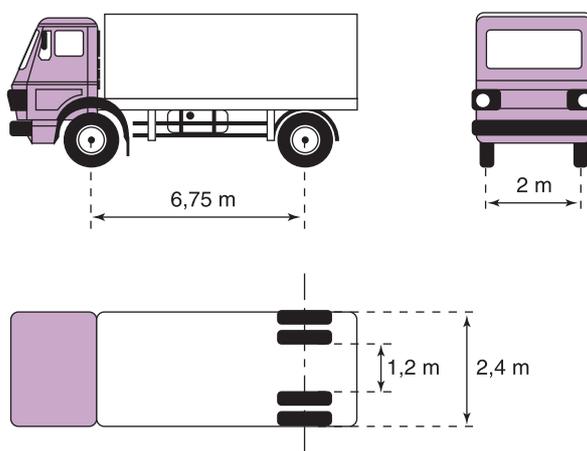


Fig. 3 - Camion d'essai.

Le camion circule sur le pont suivant trois positions latérales par voie, soit au total douze positions latérales.

Pour bien caler les mesures, un essai avec le camion à l'arrêt au milieu de la travée a été également effectué. Le camion est placé sur la chaussée de telle sorte que l'essieu arrière soit à la verticale des jauges j1 et j4.

L'amplitude maximale enregistrée lors du passage du camion d'essai est plus élevée quand le camion passe

sur la voie 1. Cela est dû à la rigidité transversale de la structure, comme le montre la ligne d'influence transversale déterminée à partir des douze passages statiques du camion et illustrée sur la figure 4.

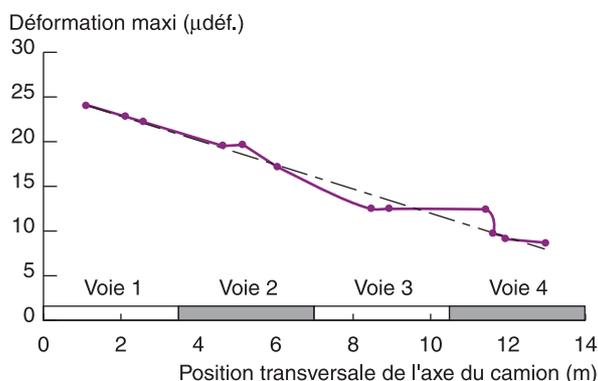


Fig. 4 - Influence de la position transversale du camion sur la déformation en j1.

Il est à noter que les jauges ont été implantées sous la voie 2 (cf. fig. 2) sur laquelle circule le plus grand nombre de poids lourds. La voie 1 est surtout empruntée par les véhicules qui quittent le boulevard périphérique par la bretelle située à la sortie du pont.

Mesures dynamiques

Elles sont réalisées à l'aide de jauges d'extensométrie implantées sur l'ouvrage. On appellera déformations dynamiques, ces déformations, car elles intègrent les majorations dynamiques induites par le trafic.

Ces mesures sont obtenues avec le camion d'essai (cf. fig. 3) circulant à 30, 40 et 60 km/h au milieu de la voie 2 et engendrant ainsi des majorations dynamiques. Les résultats sont présentés dans le tableau I. Les valeurs très faibles, inférieures à 10 µdef. (trame grise), sont données à titre indicatif.

Pour chacune des trois vitesses d'essai, huit passages ont été effectués, pour tenir compte de la dispersion des mesures inhérentes à ce type d'essai : excentrement transversal des véhicules par rapport à l'axe des voies,

de la vitesse et des conditions initiales (oscillation de la caisse du véhicule) à l'entrée sur le pont.

On observe, dans le tableau I, que les déformations les plus importantes se produisent sur la semelle inférieure de l'entretoise (jauge j4). L'amplitude de ces déformations augmente avec la vitesse. En outre, la dispersion est plus élevée à 40 km/h. On observe en effet, sur le signal issu de la jauge j4, la superposition de la déformation due au passage du camion et d'une vibration dont la fréquence est d'environ 8 Hz (fig. 5).

Les plus grandes dispersions sont données par les signaux de la jauge j1, elle-même soumise à la superposition d'une déformation sous charge et de vibrations de 3 Hz environ (fig. 6). À 60 km/h, cette dispersion diminue notablement alors que l'amplitude augmente.

Ces observations sont le reflet de la présence de vibrations dues à la résonance d'éléments du pont dont l'amplitude est sujette à de nombreux aléas comme la position et la vitesse du camion et les conditions initiales d'oscillation du camion (caisse et roues) à l'entrée du pont.

On a observé, lors des essais, des variations de la position transversale du camion par rapport à l'axe de la voie de ± 20 centimètres.

Ce sont les valeurs moyennes des déformations qui seront utilisées pour le calcul des δ_1 .

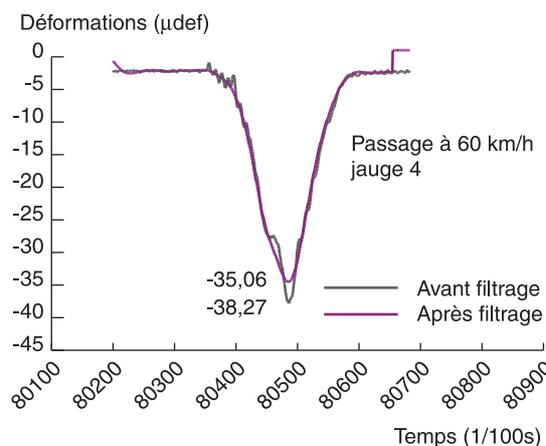


Fig. 5 - Signaux issues de la jauge j4, après le passage du camion test.

TABLEAU I
 δ_1 produit par le passage du camion en fonction de sa vitesse

| N° jauge | 30 km/h | | | 40 km/h | | | 60 km/h | | |
|----------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|
| | Dyn. | Stat. | CMD | Dyn. | Stat. | CMD | Dyn. | Stat. | CMD |
| j1 | 19,6 | 18,8 | 1,04 | 19,6 | 18,8 | 1,04 | 22,4 | 18,8 | 1,19 |
| j4 | 32,9 | 33,5 | 0,98 | 33,5 | 33,5 | 1,00 | 34,6 | 33,5 | 1,03 |
| j7 | 21 | 20,1 | 1,04 | 22,1 | 20,7 | 1,07 | 21,2 | 20,1 | 1,05 |
| j10 | 9,7 | 10 | 0,97 | 10,7 | 10 | 1,07 | 9,2 | 10 | 0,92 |
| j11 | 2,3 | 2 | 1,15 | 2,3 | 2 | 1,15 | 1,8 | 2 | 0,90 |
| j12 | 10,3 | 8,9 | 1,16 | 9,1 | 8,9 | 1,02 | 9,6 | 8,9 | 1,08 |
| j13 | 8,2 | 5,2 | 1,58 | 7,3 | 5,2 | 1,40 | 6,7 | 5,2 | 1,29 |

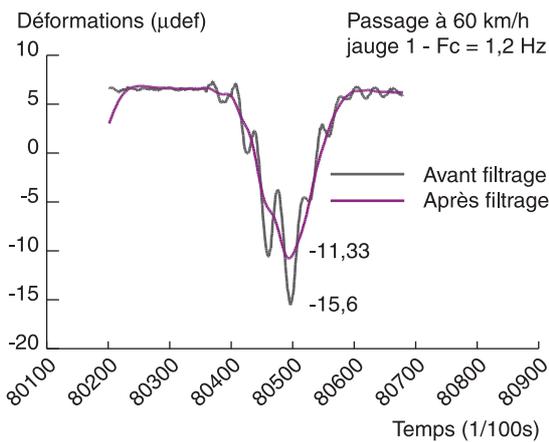


Fig. 6 - Signal issu de la jauge j1 après le passage du camion test.

Calcul des δ_1

Il existe deux méthodes de calcul des δ_1 (soient δ_1^1 et δ_1^2 les δ_1 obtenus par ces deux méthodes).

La première (δ_1^1), utilisée dans les calculs qui précèdent, consiste à mesurer la déformation produite par une charge dynamique (γ_d) et celle produite par cette même charge à l'arrêt (γ_{st}). Dans ce cas, le δ_1 s'écrit :

$$\delta_1^1 = \frac{\gamma_d}{\gamma_{st}}$$

Quelquefois, la valeur de la déformation statique est déterminée à partir de la valeur moyenne γ_m du signal produit par le passage du camion d'essai passant dans le trafic courant, sans la présence concomitante d'autres poids lourds. Dans ce cas :

$$\delta_1^2 = \frac{\gamma_d}{\gamma_m}$$

Notons que la valeur de δ_1 diffère d'une formule à l'autre. δ_1^1 est, en général, plus petit que δ_1^2 car γ_{st} est supérieur à γ_m . γ_m fait intervenir l'amortissement de la structure qui s'oppose, en la retardant, à la déformation.

Méthode 1

En utilisant la valeur moyenne de l'amplitude dynamique donnée et l'amplitude statique mesurée (tableau I) en chaque point instrumenté du pont, on obtient les coefficients de majoration dynamique δ_1 .

La valeur exacte de la vitesse du camion est calculée à partir des signaux issus des jauges. Ainsi, par exemple, le passage 8 a été effectué à 30 km/h, mais la vitesse réelle est de 7,67 m/s, soit 27,6 km/h. Lors des passages 4 à 40 et 60 km/h, la vitesse réelle du camion a été respectivement de 11,64 m/s (41,9 km/h) et 17,31 m/s (62,3 km/h).

Tous les δ_1 mesurés sont inférieurs à 1,1 pour une vitesse du véhicule n'excédant pas 40 km/h. À 60 km/h, les δ_1 augmentent très sensiblement, mais les diffé-

rentes zones instrumentées du pont ne réagissent pas de la même façon.

Méthode 2

Pour déterminer γ_m , on effectue en premier lieu une analyse du signal par FFT (transformée de Fourier rapide) qui donne les fréquences propres et ensuite un filtrage du signal (filtre Butterworth) qui élimine la fréquence du signal produit par les phénomènes dynamiques.

Un exemple est présenté ci-dessous avec le signal fourni par la jauge j1 pour un passage du camion à 60 kilomètres par heure.

Le spectre de fréquences obtenu pour la jauge j1 est présenté sur la figure 7. On observe, pour la jauge j1, une fréquence de résonance à 2,74 Hz. Cette valeur varie avec le type de sollicitation et est liée aux dimensions de l'élément de structure : poutre principale, entretoise, etc. Des couplages entre véhicules lourds et ouvrage sont parfois observés.

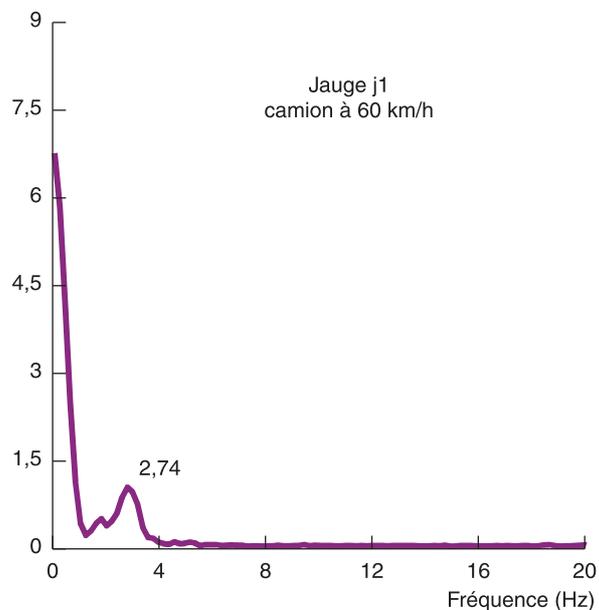


Fig. 7 - Spectre de fréquences issu de la FFT.

Cette méthode donne des valeurs du δ_1 plus élevées que la méthode 1 mais révèle les mêmes tendances. Cependant, elle est moins précise dans la mesure où elle fait appel à des paramètres supplémentaires : fréquence de coupure et ordre du filtre.

Néanmoins, elle présente l'avantage de permettre le calcul des δ_1 sans avoir besoin des valeurs statiques qui ne sont pas toujours disponibles. Il est possible également par cette méthode de faire le calcul à partir d'enregistrements en continu des effets du trafic dont on extrait les signaux de forte amplitude produits par le passage de camions lourdement chargés. Cela permet de déterminer les δ_1 dans les zones du pont qui ont été peu sollicitées par le camion d'essai de 19 tonnes (partie grisée du tableau II).

TABLEAU II
 δ_1^2 calculés par la méthode 2 (filtrage)

| | 30 km/h | | | 40 km/h | | | 60 km/h | |
|----------|-----------|----------|------|-----------|----------|------|-----------|----------|
| | Dynamique | Statique | CMD | Dynamique | Statique | CMD | Dynamique | Statique |
| jauge 1 | 19,2 | 18,2 | 1,05 | 18,2 | 17,3 | 1,05 | 22,3 | 17,3 |
| jauge 4 | 33,8 | 32,8 | 1,03 | 33,4 | 32,2 | 1,04 | 35,1 | 31,9 |
| jauge 7 | 20,8 | 19,9 | 1,05 | 22,1 | 20,2 | 1,09 | 21,3 | 18,8 |
| jauge 10 | 9,3 | 9,1 | 1,02 | 11,1 | 10,4 | 1,07 | 10 | 8,9 |
| jauge 12 | 10,8 | 10,5 | 1,03 | 9,1 | 8,9 | 1,02 | 9,8 | 9,2 |
| jauge 13 | 9,2 | 8,2 | 1,12 | | | | | |

Nota : ces calculs ont été effectués à partir des courbes déduites des signaux engendrés par le passage 8 du camion à 30 km/h et des passages 4 à 40 et 60 kilomètres par heure.

Conclusion

On observe que le δ_1 peut différer d'un point à l'autre de la structure et que ses valeurs les plus fréquentes sont inférieures à 1,10. Cependant, sous certaines conditions de vitesse (60 km/h sur cet ouvrage), elles atteignent 1,19 et 1,26, ce qui correspond à un couplage véhicule-pont qui se produit en certains points de la structure. En effet, ces valeurs ne sont observées que sur la jauge j1.

Le coefficient de majoration dynamique tel qu'il est défini dans cette étude varie en fonction des conditions d'essai. La prise en compte d'un seul véhicule dans la détermination du coefficient de majoration dynamique ne répond que partiellement aux conditions réelles de chargement des ouvrages qui supportent le plus souvent un ensemble de camions sur les différentes voies de circulation. C'est pourquoi nous proposons une autre approche qui prend en compte les configurations réelles du trafic.

Coefficients de majoration dynamique produits par l'ensemble des camions présents sur l'ouvrage

Coefficient de majoration dynamique noté δ_2

Détermination des δ_2 maximaux journaliers

Le calcul de δ_2 est obtenu à partir des amplitudes maximales mesurées et de l'amplitude des déformations statiques calculées au même moment.

Ces valeurs sont le reflet, non pas du passage d'un seul véhicule comme précédemment, mais de l'ensemble des véhicules circulant sur l'ouvrage toutes voies confondues au moment de l'enregistrement de l'amplitude maximale de déformation.

Ces résultats sont plus représentatifs des conditions réelles dès lors que la structure est sensible aux surcharges des autres voies de circulation ou que la ligne d'influence est suffisamment longue pour admettre plusieurs véhicules en même temps. Beaucoup d'ouvrages routiers répondent à ces critères

Contrairement au calcul précédent du δ_1 , qui nécessite la coupure du trafic, le calcul des δ_2 , est réalisé sous trafic courant, donc sans coupure mais impose l'implantation d'une station de pesage à proximité immédiate du pont.

Mesure des déformations sous trafic

L'ensemble du système d'acquisition de mesures placé dans le pont a permis d'enregistrer les déformations dues au trafic par période de 24 heures, pendant une semaine. Les résultats présentés dans cet article concernent le premier jour : du 8 au 9 juin 1999. On détermine ainsi les cinq maxima journaliers notés $A_{\max, \text{dyn}}^1$ à $A_{\max, \text{dyn}}^5$, (tableau III).

Mesure des charges des camions circulant sur la périphérie

Les effets statiques sont calculés en utilisant les configurations du trafic routier qui ont engendré les maxima dynamiques. On retrouve ces configurations dans les fichiers trafic enregistrés par la station de pesage SAFT2000 [6] située à 5 m après la sortie du pont. L'étape suivante consiste à introduire ces configurations de trafic et les lignes d'influence de l'effet recherché dans le programme CASTOR-LCPC [7] qui calcule les déformations statiques correspondantes.

Les lignes d'influence peuvent être soit issues de la note de calcul du pont, soit mesurées. Dans le cas présent, elles ont été déterminées à partir du déplacement d'un camion circulant à vitesse suffisamment lente pour ne pas engendrer de majorations dynamiques. On peut donc considérer qu'elles définissent bien l'effet statique.

TABLEAU III

Calcul des δ_2 pour les cinq premiers maxima et pour chaque jauge

| | Jauge j1 | Jauge j4 | Jauge j7 | Jauge j10 |
|---------------------------|----------|----------|----------|-----------|
| $A_{\max, \text{dyn}}^1$ | 67 | 90 | 69 | 40 |
| A_{stat}^1 | 23 | 45 | 34 | 25 |
| δ_2^1 | 2,90 | 2,10 | 2,10 | 1,6 |
| $A_{\max, \text{dyn}}^2$ | 64 | 84 | 66 | 37 |
| A_{stat}^2 | 34 | 40 | 40 | 29 |
| δ_2^2 | 1,88 | 2,10 | 1,65 | 1,28 |
| $A_{\max, \text{dyn}}^3$ | 63 | 81 | 66 | 36 |
| A_{stat}^3 | 33 | 54 | 31 | 27 |
| δ_2^3 | 1,91 | 1,50 | 2,13 | 1,33 |
| $A_{\max, \text{dyn}}^4$ | 60 | 80 | 65 | 35 |
| A_{stat}^4 | 31 | 52 | 41 | 26 |
| δ_2^4 | 1,94 | 1,54 | 1,59 | 1,35 |
| $A_{\max, \text{dyn}}^5$ | 57 | 78 | 61 | 33 |
| A_{stat}^5 | 23 | 44 | 38 | 27 |
| δ_2^5 | 2,48 | 1,77 | 1,61 | 1,22 |
| Moy. (δ_2) | 2,22 | 1,78 | 1,80 | 1,36 |
| Ecart-type (δ_2) | 0,46 | 0,27 | 0,26 | 0,15 |

On présente, dans le tableau III, les cinq valeurs de déformations statiques (A_{stat}^i) correspondant aux configurations de trafic ayant provoquées les maxima de déformation dynamique.

Les coefficients de majoration dynamique sont obtenus par le quotient des déformations dynamiques et statiques, telles qu'elles viennent d'être définies. Le tableau III présente ces valeurs et le δ_2 correspondant.

Les δ_2 varient beaucoup d'un point à l'autre de la structure (de 2,9 à 1,6). Le pesage de la voie 3 de circulation n'étant pas pris en compte dans cette étude, les déformations statiques calculées par CASTOR-LCPC doivent être un peu sous-estimées et, dans ce cas, entraîner une surestimation du coefficient de majoration dynamique.

On a noté que les déformations maximales enregistrées par les jauges au passage des camions sur les différentes voies de circulation du périphérique, et l'enregistrement de ces mêmes camions par la station de pesage ne sont pas synchrones. En effet, ces deux systèmes sont distants de 21 m et la configuration de camions qui a produit la déformation maximale enregistrées n'est plus tout à fait la même 21 m plus loin, les camions ne circu-

lant pas à la même vitesse. La configuration des charges ainsi modifiée peut être corrigée partiellement par CASTOR-LCPC, qui détermine la configuration, en supposant que la vitesse des véhicules est constante sur ces 21 m pour calculer l'effet statique correspondant.

Coefficient de majoration dynamique noté δ_3

Détermination des δ_3 maximaux journaliers

Le calcul du δ_3 est obtenu à partir des déformations maximales mesurées sous trafic et des déformations maximales calculées par CASTOR-LCPC.

Les déformations maximales calculées sont obtenues par le programme CASTOR-LCPC à partir du trafic mesuré et de la ligne d'influence déterminée précédemment sur le pont. On utilise le trafic routier passant sur les quatre voies du pont pendant 24 h et la ligne d'influence au niveau de chaque jauge (tableau IV).

Les δ_3 moyens varient beaucoup d'un point à l'autre de la structure (de 1,51 à 1,03). Les δ_3 les plus élevées sont observés sur la semelle inférieure de la poutre 3 (jauge j1).

TABLEAU IV

Calcul des δ_3 pour les cinq premiers maxima et pour chaque jauge

| | Jauge j1 | Jauge j4 | Jauge j7 | Jauge j10 |
|---------------------------|----------|----------|----------|-----------|
| $A_{\max, \text{dyn}}^1$ | 66 | 90 | 69 | 40 |
| $A_{\max, \text{stat}}^1$ | 45 | 64 | 53 | 37 |
| δ_3^1 | 1,47 | 1,41 | 1,30 | 1,08 |
| $A_{\max, \text{dyn}}^2$ | 64 | 84 | 66 | 37 |
| $A_{\max, \text{stat}}^2$ | 44 | 63 | 51 | 36 |
| δ_3^2 | 1,45 | 1,33 | 1,29 | 1,03 |
| $A_{\max, \text{dyn}}^3$ | 63 | 81 | 66 | 36 |
| $A_{\max, \text{stat}}^3$ | 41 | 58 | 51 | 35 |
| δ_3^3 | 1,54 | 1,40 | 1,29 | 1,03 |
| $A_{\max, \text{dyn}}^4$ | 60 | 80 | 65 | 35 |
| $A_{\max, \text{stat}}^4$ | 38 | 57 | 49 | 34 |
| δ_3^4 | 1,58 | 1,40 | 1,33 | 1,03 |
| $A_{\max, \text{dyn}}^5$ | 57 | 79 | 61 | 33 |
| $A_{\max, \text{stat}}^5$ | 38 | 57 | 47 | 33 |
| δ_3^5 | 1,50 | 1,39 | 1,30 | 1 |
| Moy. de δ_3 | 1,51 | 1,39 | 1,30 | 1,03 |
| Ecart type de δ_3 | 0,051 | 0,030 | 0,014 | 0,029 |

Pour la comparaison avec les δ_1 , il faut noter que la voie 3 de circulation n'est pas prise en compte dans le calcul de la valeur statique ce qui peut avoir une incidence sur la valeur du δ_3 .

Néanmoins, ces résultats très encourageants demandent à être confirmés par des calculs portant sur les jours suivants. La moindre dispersion de ces valeurs montre, en effet, l'intérêt de cette définition du coefficient de majoration dynamique.

Détermination des δ_3 maximaux sur une semaine

Les résultats obtenus pour le δ_3 sur 24 heures ont été étendus à une semaine de trafic.

Ce calcul est effectué, pour 24 heures et pour chacune des quatre jauges j1, j4, j7 et j10, à partir des cinq valeurs maximales $A_{\max, \text{dyn}}^i$, obtenues par l'enregistrement direct de la déformation, et des cinq valeurs maximales $A_{\max, \text{stat}}^i$, de la déformation calculée par CASTOR-LCPC.

On regroupe, dans le tableau V, la moyenne m et l'écart type σ des δ_3 , pour chacun des sept jours, pour établir la moyenne et l'écart type hebdomadaire.

Il ressort du tableau V que le coefficient de majoration dynamique moyen est 1,39 pour la jauge j1 placée sous la semelle inférieure de la poutre principale 3 (cf. fig. 1b). Cette valeur est la moyenne des cinq coefficients de majoration dynamique maximaux obtenus chaque jour pendant une semaine. Ces coefficients de majoration dynamique maximaux sont eux-mêmes la moyenne des cinq plus grands coefficients de majoration dynamique journaliers. La jauge j1 donne les δ_3 les plus élevés comme les δ_1 , précédemment.

On observe que la jauge j7, située elle aussi sur la semelle inférieure de la poutre maîtresse 3 à 3 m environ de j1, enregistre des majorations dynamiques plus faibles, mais avec la même dispersion. En réalité, les majorations dynamiques augmentent moins vite avec la charge en ce point qu'en j1.

La jauge j4, placée au milieu de la semelle inférieure de l'entretoise reliant les poutres maîtresses 3 et 4, présente des majorations dynamiques inférieures à celles observées sur j1 bien que l'amplitude des déformations maximales soit plus élevée. En effet, on observe en ce point les déformations les plus élevées. C'est très certainement dans la semelle inférieure des entretoises que les sollicitations en fatigue liées au comportement global de la structure sont les plus élevées.

La jauge j10, située sur l'âme de la poutre 3 près des appuis, enregistre peu d'effets dynamiques.

Le coefficient de majoration dynamique le plus faible (1,03 pour j1) est obtenu naturellement en fin de semaine (du samedi 12 au dimanche 13). En effet, les maximaux statiques et dynamiques sont obtenus pour des configurations de trafic et non pas pour un seul véhicule (sauf exception) et les valeurs maximales sont plus faibles que celles enregistrées les autres jours de la semaine. Il en serait tout autrement avec la définition des δ_1 , qui ne prend en compte qu'un seul véhicule.

Calcul des valeurs extrêmes

Pour estimer les déformations extrêmes subies par la structure, il est nécessaire d'extrapoler à des durées de vie de référence les déformations calculées à partir de CASTOR-LCPC, et celles mesurées directement sur l'ouvrage pendant une période courte (une semaine, un mois, etc.).

Méthode

Nous nous intéressons aux valeurs maximales des déformations [1] ayant une probabilité donnée α d'être dépassées pendant une période de référence T . À titre indicatif et conformément à l'Eurocode1 partie 1 (bases de conception), les valeurs recommandées de α et T pour ce type d'ouvrage sont de l'ordre de :

- > 0,01 à 0,005 pour α ,
- > et 100 à 150 ans pour T .

TABLEAU V
Caractéristiques des δ_3 par jauge

| Période par 24 h Début 11 h 30' | Jauge j1 | | Jauge j4 | | Jauge j7 | | Jauge j10 | |
|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| | m | σ | m | σ | m | σ | m | σ |
| Du mardi 8 au 9 juin | 1,51 | 0,048 | 1,39 | 0,03 | 1,3 | 0,014 | 1,29 | 0,035 |
| Du mercredi 9 au 10 juin | 1,47 | 0,095 | 1,44 | 0,056 | 1,28 | 0,092 | 1,17 | 0,037 |
| Du jeudi 10 au 11 juin | 1,72 | 0,067 | 1,48 | 0,056 | 1,49 | 0,026 | | |
| Du vendredi 11 au 12 juin | 1,25 | 0,035 | 1,14 | 0,027 | 1,1 | 0,044 | 0,92 | 0,06 |
| Du samedi 12 au 13 juin | 1,03 | 0,051 | 0,99 | 0,051 | 0,95 | 0,051 | 0,92 | 0,093 |
| Du dimanche 13 au 14 juin | 1,53 | 0,062 | 1,19 | 0,024 | 1,22 | 0,116 | 1 | 0,101 |
| Du lundi 14 au 15 juin | 1,25 | 0,098 | 1,16 | 0,092 | 1,09 | 0,106 | 1,02 | 0,048 |
| Semaine du 8 au 15 | 1,39 | 0,065 | 1,26 | 0,048 | 1,20 | 0,064 | 1,05 | 0,062 |

La valeur maximale de la déformation représente une valeur caractéristique qui dépend de deux paramètres α et T .

Si τ représente la période de retour, on peut montrer que, pour les valeurs faibles de α , on a :

$$\tau = \frac{T}{\alpha}$$

La méthode d'extrapolation utilisée [5] suppose que le processus X_t décrivant les variations de déformations est stationnaire et gaussien. Avec cette hypothèse, pour un niveau d'effet s donné, la moyenne $v(s)$ du nombre de dépassements d'un niveau dans le sens croissant (si $s > 0$) ou décroissant (si $s < 0$) pendant une période de référence T_{ref} s'exprime par la formule de Rice [8] :

$$v(s) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma'}{\sigma} e^{-\left(\frac{(s-m)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

Où m et σ sont respectivement la moyenne et l'écart type du processus X_t et σ' est l'écart type du processus dérivé X_t' .

L'estimation des paramètres m , σ et σ' s'obtient par ajustement de la loi de densité décrite ci-dessus sur l'histogramme des dépassements de niveau calculé pour une période d'une semaine, dans cette étude.

L'ajustement optimal est obtenu automatiquement [4, 5] à partir d'une série de tests statistiques tels que le test de Kolmogorov-Smirnov. Ces tests comparent deux distributions correspondant respectivement à la fonction ajustée (formule de Rice) et à la distribution des dépassement de niveau (courbe en escalier).

La valeur du test est déterminée par un seuil conventionnel β_0 . Ce dernier doit être compris entre 0,9 et 1.

Calcul des valeurs extrêmes de déformation

Déformations calculées à partir du trafic

L'extrapolation doit se faire à partir d'une semaine d'enregistrement au minimum. Il est admis que c'est la période en effet nécessaire pour que l'hypothèse de stationnarité du trafic soit satisfaite. Les histogrammes de dépassement de niveau déterminés par jour d'enregistrement sont donc sommés sur une semaine, pour chaque voie de mesure. Le calcul des valeurs extrêmes est obtenu à partir de ces histogrammes et pour différentes périodes de retour suivant la méthode décrite au paragraphe « Méthode » ci-dessus. Les résultats sont présentés pour les valeurs calculées dans le tableau VI, et pour les valeurs mesurées dans le tableau VII.

Ils représentent les valeurs extrêmes des déformations en fonction de périodes de retour de 1 à 100 000 semaines (c'est-à-dire de 1 semaine à 2 000 ans).

La valeur grisée du tableau VI représente la valeur extrême pour une période de retour de 1 000 ans préconisée par l'Eurocode.

TABLEAU VI
Déformations extrêmes calculées (statique)

| Rt semaines | Déformations calculées (µdéf.) | | | |
|-------------|--------------------------------|-----|-----|-----|
| | j1 | j4 | j7 | j10 |
| 1 | 55 | 84 | 69 | 37 |
| 5 | 61 | 91 | 77 | 42 |
| 10 | 63 | 94 | 80 | 44 |
| 50 | 68 | 100 | 88 | 48 |
| 100 | 70 | 103 | 91 | 50 |
| 500 | 75 | 109 | 98 | 55 |
| 1 000 | 77 | 111 | 101 | 56 |
| 5 000 | 82 | 117 | 107 | 61 |
| 10 000 | 84 | 119 | 110 | 63 |
| 50 000 | 89 | 125 | 117 | 67 |
| 100 000 | 90 | 127 | 119 | 69 |

Les valeurs de déformations extrêmes pour une période de retour R_t de 1 000 ans (50 000 semaines) demeurent faibles. Les valeurs les plus élevées sont obtenues par la jauge j4. Une interprétation de ce résultat est de dire qu'il existe 10 % de probabilité pour qu'une déformation (statique) de 125 µdéf. soit dépassée en 100 ans.

Le calcul des valeurs extrêmes a été effectué pour trois valeurs de β (seuil conventionnel de Kolmogorov-Smirnov, qui permet d'apprécier la qualité de l'ajustement), $\beta = 0,90, 0,95$ et $0,99$. Les résultats montrent que β est proche de 1.

Déformations mesurées sur l'ouvrage

Le même calcul est ensuite effectué à partir des données issues des mesures qui incluent les majorations dynamiques. Les résultats sont présentés dans le tableau VII et illustrés par les courbes de la figure 5.

TABLEAU VII
Valeurs extrêmes des déformations déduites des mesures jauge j1 (dynamique)

| Rt semaines | Déformations mesurées (µdéf.) | | |
|-------------|-------------------------------|-----|-----|
| | j1 | j4 | j7 |
| 1 | 78 | 111 | 80 |
| 5 | 84 | 118 | 86 |
| 10 | 87 | 121 | 89 |
| 50 | 93 | 127 | 95 |
| 100 | 96 | 130 | 97 |
| 500 | 101 | 136 | 102 |
| 1 000 | 103 | 139 | 104 |
| 5 000 | 109 | 144 | 109 |
| 10 000 | 111 | 146 | 111 |
| 50 000 | 115 | 152 | 116 |
| 100 000 | 117 | 154 | 118 |

Nota : le calcul des valeurs extrêmes pour la jauge j10 n'a pas été possible, car nous ne disposons que de six jours de mesures.

L'allure de ces courbes est très semblable. L'amplitude maximale des déformations croît très rapidement jusqu'à 500 semaines (10 ans) puis plus lentement jusqu'à 10 000 semaines (200 ans) et devient pratiquement asymptotique au-delà.

Détermination des coefficients de majoration dynamique à long terme

La détermination des δ_3 pour différentes périodes de retour est obtenue par le rapport des amplitudes extrêmes des déformations statiques et dynamiques indiquées respectivement dans les tableaux VI et VII.

Les résultats sont présentés dans le tableau VIII et illustrés par la figure 8, en fonction de différentes périodes de retour R_t et pour les jauges j1, j4 et j7.

Ces trois courbes ont la même allure. On retrouve bien, pour des périodes de retour d'une semaine, des valeurs voisines des maxima mesurés sur une semaine (cf. tableau V). En effet, les coefficients de majoration dynamique obtenus après une semaine de mesure s'élèvent à 1,39, 1,26 et 1,20 pour respectivement les jauges j1, j4 et j7 alors que le calcul des valeurs extrêmes conduit à 1,41, 1,32 et 1,20.

On observe sur ces courbes que les δ_3 décroissent quand les périodes de retour augmentent. L'explication est que les effets dynamiques augmentent moins vite que les charges statiques en fonction du temps. Cela veut dire que les valeurs extrêmes de déformation pour des périodes de retour élevées, voire pour 1 000 ans préconisés par l'Eurocode, doivent être associées à des coefficients de majoration dynamique plus faibles que ceux utilisés pour les valeurs caractéristiques fréquen-

TABLEAU VIII
 δ_3 déduits des valeurs extrêmes de déformation en fonction de R_t

| Rt semaines | δ_3 | | |
|-------------|------------|------|------|
| | j1 | j4 | j7 |
| 1 | 1,41 | 1,32 | 1,21 |
| 5 | 1,39 | 1,30 | 1,18 |
| 10 | 1,38 | 1,29 | 1,16 |
| 50 | 1,37 | 1,27 | 1,14 |
| 100 | 1,36 | 1,26 | 1,12 |
| 500 | 1,34 | 1,24 | 1,09 |
| 1 000 | 1,34 | 1,24 | 1,09 |
| 5 000 | 1,32 | 1,23 | 1,07 |
| 10 000 | 1,32 | 1,23 | 1,06 |
| 50 000 | 1,30 | 1,22 | 1,05 |
| 100 000 | 1,30 | 1,21 | 1,04 |

tes qui correspondent à des périodes de retour d'une semaine.

Conclusions

Cette étude avait pour but d'apporter une approche nouvelle pour la détermination des coefficients de majoration dynamique et de calculer des coefficients de majoration dynamique à partir de valeurs extrêmes ramenées à des périodes de retour de 1 000 ans et plus.

Les coefficients de majoration dynamique déterminés à partir de simulations numériques qui avaient prévalu lors de la préparation des Eurocodes, faute de résultats expérimentaux, ont montré les limites d'une telle méthode, du fait notamment de la mauvaise connaissance des caractéristiques dynamiques des véhicules lourds. La meilleure approche pour ce type de paramè-

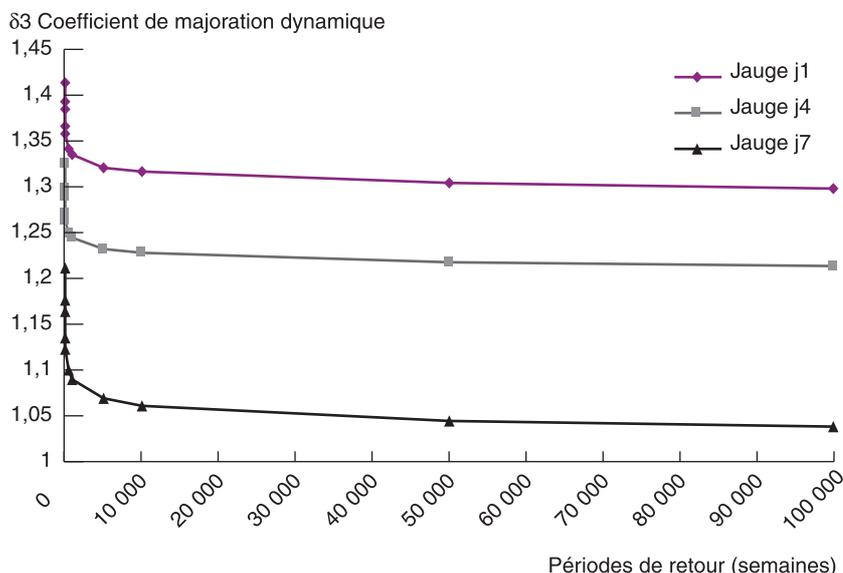


Fig. 8 - Valeurs extrêmes des δ_3 en fonction des périodes de retour.

tre, compte tenu de sa complexité, semble bien être l'expérimentation.

On observe ainsi que δ_1 , obtenu par un seul véhicule et qui représente le mode de détermination du coefficient de majoration dynamique utilisé dans la littérature, est toujours égal à 1,10 voire 1,15 et même 1,20, dans certains cas particuliers de couplage entre le véhicule et l'ouvrage. Il est bien adapté à l'étude des effets locaux. En outre, c'est un paramètre qu'il faudrait intégrer dans le calcul en fatigue.

Une autre approche du coefficient de majoration dynamique, proposée dans cette étude, consiste à prendre en compte dans le calcul, non pas un seul camion mais une configuration de camions disposés aléatoirement sur au moins deux voies voire trois ou quatre voies de circulation. En effet, les maxima de déformation rencontrés sous l'action du trafic routier sont presque toujours produits par plusieurs camions présents simultanément sur l'ouvrage. Deux définitions du coefficient de majoration dynamique ont été données dans ce cas et notées : δ_2 et δ_3 [3].

On a montré que les δ_2 conduisaient à des dispersions importantes. Le problème majeur est l'écart de temps séparant la mesure de la déformation maximale de la mesure des charges du trafic par la station placée à l'extérieur du pont. Ce décalage de temps entraîne un changement de configuration des charges, les camions ne circulant pratiquement jamais à la même vitesse sur

chacune des voies de circulation. En outre, cette méthode de calcul du coefficient de majoration dynamique présente l'inconvénient de surévaluer le coefficient de majoration dynamique. En effet, le coefficient de majoration dynamique est calculé en prenant la valeur statique au moment du maximum dynamique qui, en général, ne correspond pas au maximum statique.

Le calcul des δ_3 proposé dans cette étude est intéressant à plus d'un égard. Il conduit à une moindre dispersion des valeurs si l'on s'en réfère aux cinq maxima journaliers. En outre, il traduit mieux la réalité des surcharges sur les ouvrages, notamment pour les trafics denses sur lesquels les occurrences de la présence simultanée de plusieurs camions sur l'ouvrage sont importantes.

Enfin, les calculs des δ_3 , en fonction des valeurs extrêmes des déformations pour différentes périodes de retour, ont montré que les coefficients de majoration dynamique diminuaient avec l'augmentation des périodes de retour, ce qui traduit une augmentation plus lente des effets dynamiques par rapport aux effets statiques en termes de valeurs extrêmes. Cette observation devrait être prise en compte pour l'étalonnage des valeurs représentatives des modèles de charges pour les états-limites autre que les états-limites de fatigue, incluant l'amplification dynamique dans les valeurs objectives.

Remerciements. Ces travaux de recherche ont été rendus possibles grâce à une aide financière du SETRA. Je remercie Messieurs J.-A. Calgario et M. Prat, du SETRA, pour leur aide dans la définition du projet et leur soutien technique.

Je remercie également Monsieur B. Jacob du LCPC, pour sa collaboration dans l'élaboration du plan de travail.

L'instrumentation et les mesures ont été assurées par Messieurs R. Bernot, M. Estivin, J. Billo et S. Dubroca de la section SFIAO du LCPC, que j'ai plaisir à remercier.

Enfin je remercie la Ville de Paris pour la mise à disposition du pont de Bruneseau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CALGARIO J.-A. (1996), *Introduction aux Eurocodes : sécurité des constructions et bases de la théorie de la fiabilité*, Presses de L'ENPC.
- [2] JACOB B., KRETZ T. (1996), *Calibration of bridge fatigue loads under traffic conditions*. IABSE Colloquium : Basis of Design and Actions on structures (ECI), Delft, March 27-29.
- [3] CARRACILLI J., BERNOT R. (2000), *Coefficients de majoration dynamique, calcul et extrapolation aux valeurs extrêmes. Application au pont de Bruneseau*, Rapport interne SFIOA-LCPC, juillet.
- [4] CREMONA C. (1998), Extrapolation des effets du trafic par ajustement optimal de la formule de Rice, *Revue française de Génie civil*, Vol. 2, **3/1998**, pp. 353-366.
- [5] CREMONA C., CARRACILLI J. (1998), *Evaluation des valeurs extrêmes d'effets dus aux charges du trafic sur les câbles des ponts à haubans et des ponts suspendus*, COST 323, 2^e conférence européenne, Lisbonne, septembre 1998, pp. 261-268.
- [6] CHRISTORY, ROUSSEL, BRIANT (1995), *Première conférence européenne sur le pesage en marche des véhicules routiers*, pp. 443-450, Zurich, 8-10 mars 1995.
- [7] EYMARD R., JACOB B. (1989), Un nouveau logiciel : le programme CASTOR-LCPC, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **144**, novembre-décembre.
- [8] RICE S.O. (1954), *Mathematical analysis of random noise. Selected Papers in Noise and Stochastic Processes*, Ed. N. Wax, Dover, New-York, 1954.

ABSTRACT

Dynamic Increase Factors. Calculation and extrapolation Application to the Bruneseau bridge

J. CARRACILLI

The conversion of Eurocodes (EC) into European Standards (EN) and their periodic revision (in principle every five years) provide an opportunity to update them, validate them and conduct additional studies. One of the Eurocodes covers the determination of dynamic increases. The values of these were estimated in the previous version of the Eurocodes by means of numerical simulations but for the new version these must now be improved on the basis of measurements taken on structures. The Bruneseau bridge, on the Paris outer orbital motorway, was selected for the relevant study.

The measurements described in this paper relate to the determination of maximum values for static and dynamic effects and the calculation of the corresponding Dynamic Increase Factors (DIF).

An initial calculation involved conventional Dynamic Increase Factors, i.e. as determined using a test truck. Two different methods were applied, and the benefits of each are examined. However, the values obtained using this approach to Dynamic Increase Factors do not always correspond to the values actually observed on structures. Two definitions of Dynamic Increase Factors are therefore proposed. These are based not on the results from a single vehicle as was previously the case but on those from the traffic configurations that have produced the maximum effects. These definitions are not only more representative of the phenomenon in most cases (long influence line or consideration of several traffic lanes) they also have the advantage that the bridge can remain open to traffic. However, they do necessitate the installation of a weighing station near the structure.

Lastly, this paper analyses the extreme values of the effects of road traffic with reference to the return periods obtained from histograms of excessive levels and optimisation of Rice's formula. These extreme values lead, in particular, to a determination of Dynamic Increase Factors to be considered for the 1000 year return periods recommended in the Eurocode.