

DETERMINATION DU FACTEUR D'AMPLIFICATION DYNAMIQUE DES PONTS PAR ELEMENTS FINIS

AKOUSSAH K. Esénam : Université du Bénin ; Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs
B.P. 1515 Lomé -TOGO

FAFARD Mario et HENCHI Kamel : Université Laval ; Faculté des Sciences et Génies
Département de Génie Civil, Québec, Canada, G1K 7P4.

Mots clés : Modèle numérique, Coefficient d'amplification dynamique, Analyse dynamique,
Interaction pont-vehicules, Eléments finis, Algorithme, Systèmes découplés.

RESUME

La recherche sur la réponse dynamique des ponts a commencé dans les années 50 après l'effondrement de certains ponts de chemin de fer en Angleterre. A ces débuts, la recherche était plutôt expérimentale et portait sur l'élaboration d'un facteur d'amplification dynamique à l'usage des ingénieurs praticiens à partir de plusieurs tests expérimentaux. En général, ce facteur dépendait seulement de la longueur des ponts. Cependant, il est maintenant admis que la réponse dynamique des ponts due aux charges mobiles (véhicules) dépend de plusieurs facteurs dont les caractéristiques géométriques du pont, les caractéristiques des véhicules, les profils dynamique et statique du pont, le trafic, etc.

Avec l'avènement des ordinateurs et pour tenir compte de tous ces facteurs, plusieurs chercheurs ont essayé d'aborder le problème de façon numérique en utilisant des modèles Pont-Véhicule très simplifiés à cause de la complexité des analyses. Depuis les derniers développements de l'informatique, des modèles numériques de plus en plus complexes ont vu le jour.

Dans cet article, nous présentons un modèle tridimensionnel aussi bien pour le pont que pour le véhicule pour simuler la réponse dynamique du pont. Les équations du mouvement du pont et du véhicule ont été découplés et un algorithme spécial a été mis au point pour simuler l'interaction entre le véhicule et le pont. Un exemple numérique est présenté pour valider le modèle en comparant nos résultats avec ceux obtenus lors d'un test réel effectué par le Ministère des Transports du Québec.

ABSTRACT

Bridge dynamic responses studies began in the 50's after the collapse of some railways bridges in England. At the beginning, researches were essentially experimental and only a dynamic amplification factor was proposed for Engineers after several tests. In general, this factor only depended on the length of bridges. However, it is well known that bridges dynamic response due to moving vehicles depends on many factors such as bridges geometrical properties, vehicles characteristics, static and dynamic profil of bridges, traffic etc...

Taking into account all these factors and with the availability of Computers, Researchers first of all tried to numerically solve the problem using very simple bridge-vehicles models but,

was soon limited by the complexity of analyses. With the recent development of Computer Science, complex numerical models are presented.

In this paper, we present a 3D model for the bridge and the vehicle as well to stimulate the dynamic response of the bridge. Motion equations of bridges and vehicles have been uncoupled and a special algorithm has been developed to simulate the interaction between the bridge and the vehicle. A numerical example is presented to assess the model, comparing our results to a test conducted by Quebec Department of Transportation.

I - INTRODUCTION

1.1 - Généralités

La réponse dynamique des ponts sous l'action de leurs charges mobiles a fait l'objet de plusieurs recherches depuis le début du siècle dernier suite aux effondrements de ponts ferroviaires en Grande Bretagne. En général, on cherche un coefficient ou un facteur d'amplification dynamique (FAD) que l'on pourrait appliquer à des charges statiques afin de simuler l'effet dynamique des charges mobiles.

Au tout début les chercheurs ont concentré leurs efforts sur des études expérimentales. Le lecteur pourra consulter les travaux de Paultre *et al* (1991, 1992) pour une revue assez détaillée de la littérature sur la détermination du FAD à l'aide de tests expérimentaux.

Plusieurs autres chercheurs ont abordé le problème sous son aspect analytique ; mais la complexité du phénomène dans son ensemble limitera les études analytiques à des cas très simples jusqu'aux années 50 où Biggs *et al* (1957) ont présenté un modèle numérique unidirectionnel pour étudier l'effet dynamique des véhicules sur le comportement des ponts. Dès lors, plusieurs modèles numériques ont été développés pour étudier le comportement dynamique des ponts sous l'effet des charges mobiles ou encore la dynamique de l'interaction pont-véhicule (Wang et Huang 1992 a et b ; Wang *et al* 1992 a et b, 1993 ; Huang *et al* 1992 ; Savard *et al* 1993 ; Fafard *et al*, 1993 ; Chatterjee *et al* 1994 ; Chang et Lee 1994 ; Henchi 1995). Une revue assez détaillée de la littérature sur l'approche numérique pour l'étude dynamique de l'interaction pont-véhicule a été présentée par Laflamme *et al* (1995).

Dans cet article, nous présentons un modèle numérique en trois dimensions pour simuler l'effet dynamique des véhicules sur le comportement des ponts en tenant compte du profil (statique et dynamique) de la chaussée (Fafard *et al*, 1993 ; Henchi, 1995). Un exemple numérique sera présenté pour valider et comparer nos résultats avec ceux obtenus par des tests expérimentaux.

1.2 - Définitions

Avant de présenter les équations de base, il s'avère important de préciser la définition de certains termes ou concepts utilisés tout le long de ce travail.

D'une façon générale, le FAD peut être défini comme étant le facteur par lequel on multiplie les sollicitations dues à la circulation routière sur le pont lors d'une analyse statique pour tenir compte implicitement de l'amplification dynamique des efforts ou des déplacements. Pour le calculer, nous utilisons la formule :

$$FAD = \frac{R_{\max}^D}{R_{\max}^S} \quad (1)$$

où R^D_{max} et R^S_{max} désignent respectivement les réponses dynamiques et statiques maximales des ponts qui peuvent être des déflexions ou des déformations qui se produisent aux sections critiques ou encore des réactions d'appuis. Ce sont les valeurs statiques et dynamiques maximales choisies parmi les résultats obtenus des différents cas de chargement et différentes vitesses considérés. Ces valeurs doivent être de même signe que celles dues uniquement au poids propre du pont.

Le profil de la chaussée compte essentiellement deux composantes :

- le profil statique, qui est une propriété géométrique du pont représentant les irrégularités de la chaussée, et
- le profil dynamique, qui représente les déformées engendrées par les charges sollicitant le pont. Dans ce qui suit, le profil de la chaussée désignera simplement le profil statique.

II - FORMULATION DE BASE

Le comportement dynamique du système pont-véhicules peut se résumer à l'interaction pont-véhicules. En effet, si nous considérons un véhicule circulant à vitesse constante sur une chaussée horizontale parfaitement lisse (situation idéale), au fur et à mesure que le véhicule progresse sur le pont, celui-ci se déforme en modifiant ainsi le profil dynamique de la chaussée. Sous l'hypothèse que le véhicule demeure en contact permanent avec la chaussée, le déplacement relatif des extrémités des amortisseurs du véhicule change l'intensité des charges sous chacun des pneus. La superstructure, sous l'effet des nouvelles sollicitations et des forces d'inertie, prend une nouvelle position d'équilibre qui induit une variation de l'intensité des charges appliquées, perturbant de nouveau la configuration d'équilibre du pont et ainsi de suite. On assiste ainsi à un processus d'ajustements successifs de la position des masses en vibration du véhicule et de la déformée du pont tout au long du parcours du véhicule. L'équation générale du mouvement dans le cas d'une analyse dynamique linéaire peut s'écrire à partir du principe des travaux virtuels (Savard *et al* 1993 ; Fafard *et al*, 1993 ; Henchi 1995):

$$W(u, \dot{u}, \ddot{u}) = W_{int}(u) - W_{ext}(u) + W_{IN}(\ddot{u}) + W_{AM}(\dot{u}) = 0 \quad (2)$$

où u , \dot{u} et \ddot{u} sont respectivement les champs des déplacements, des vitesses et des accélérations cinématiquement admissibles et les indices int, ext, IN et AM se réfèrent respectivement aux quantités interne, externe, d'inertie et d'amortissement.

L'équation (2) peut s'écrire en déplacement sous forme matricielle :

$$W(u, \dot{u}, \ddot{u}) = \int_V [\langle \delta e \rangle \{ \sigma \} - \langle \delta u \rangle \{ f_v \} + \langle \delta u \rangle (\rho \{ \ddot{u} \} + c \{ \dot{u} \})] dV$$

$$- \int_{S_e} \langle \delta u \rangle \{ f_s \} dS = 0 \quad (3)$$

où :

$\{ \sigma \}$ représente les composantes cartésiennes du tenseur des contraintes.

$\{e\}$ les composantes équivalentes du tenseur des déformations

$\{f_v\}$ les forces de volume

ρ et c respectivement la masse volumique et l'amortissement visqueux

$\langle \delta u \rangle$ champ des déplacements virtuels

$\{f_s\} = \langle \sigma \rangle \{n\}$ sur S_f proviennent des conditions mécaniques sur la frontière S_f (forces de surface) avec $\{n\}$ le vecteur normal à la surface.

Les symboles $\{ \}$ et $\langle \rangle$ désignent respectivement des vecteurs colonnes ou lignes.

Cette équation générale (équation 2 ou 3) sera spécialisée par la suite pour tous les éléments structuraux du pont (tablier, poutres etc) et pour les véhicules.

III - MODELISATION NUMERIQUE

La modélisation de l'interaction pont-véhicule tient nécessairement compte des trois aspects suivants :

- la structure du pont représentée par un modèle d'éléments finis constitués de coques, plaques et poutres ;
- le véhicule comme source d'excitation et représenté par un ensemble d'éléments de masses-ressorts-amortisseurs ;
- et finalement le profil de la chaussée qui représente l'interface entre le véhicule et le pont.

3.1 - Modélisation du pont

Sous l'hypothèse d'une analyse dynamique linéaire avec une loi de comportement élastique pour matériaux homogènes et isotropes, le pont a été modélisé par des éléments de coques et de poutres tridimensionnels. (Akoussah *et al*, 1995).

La dalle du pont a été modélisée avec des éléments de coque mince quadrilatéraux à huit noeuds DLQP (Discrete Linear Quadrilateral Plus) dont la formulation est basée sur la théorie discrète de Kirchhoff (Dhatt *et al*, 1986 a et b) qui suppose que l'énergie correspondant au cisaillement transversal est négligeable. L'élément DLQP est constitué de la superposition d'un élément de membrane d'élasticité plane appelé LSQ (Linear Strain Quadrilateral), d'un élément de plaque mince appelé DKQP (Discrete Kirchhoff Quadrilateral Plus) et d'un élément fictif de rotation dans le plan de l'élément (Fig.1) (Dhatt *et al*, 1986 b ; Batoz et Dhatt 1990 ; Savard *et al* 1993). Il possède six degrés de liberté aux noeuds sommets et trois aux noeuds milieux. Cet élément est plus coûteux que l'élément classique à quatre noeuds mais il est beaucoup plus performant pour simuler le comportement de structures fortement sollicitées en membrane.

Tous les éléments unidirectionnels du pont (poutres longitudinales, entretoises, s'il y a lieu) sont simulés avec un élément fini appelé DLLP (Discrete Linear Line Plus) où l'énergie de cisaillement transversal est négligée. Pour plus de détails, le lecteur peut consulter les travaux de Savard *et al* (1993). C'est un élément de poutre à 3 noeuds (15 DDL) compatible avec le DLQP (Fig.2). Tout comme ce dernier, il possède six degrés de liberté aux noeuds sommets et trois au noeud milieu.

L'équation générale (3) peut alors s'écrire pour le modèle de pont comme suit :

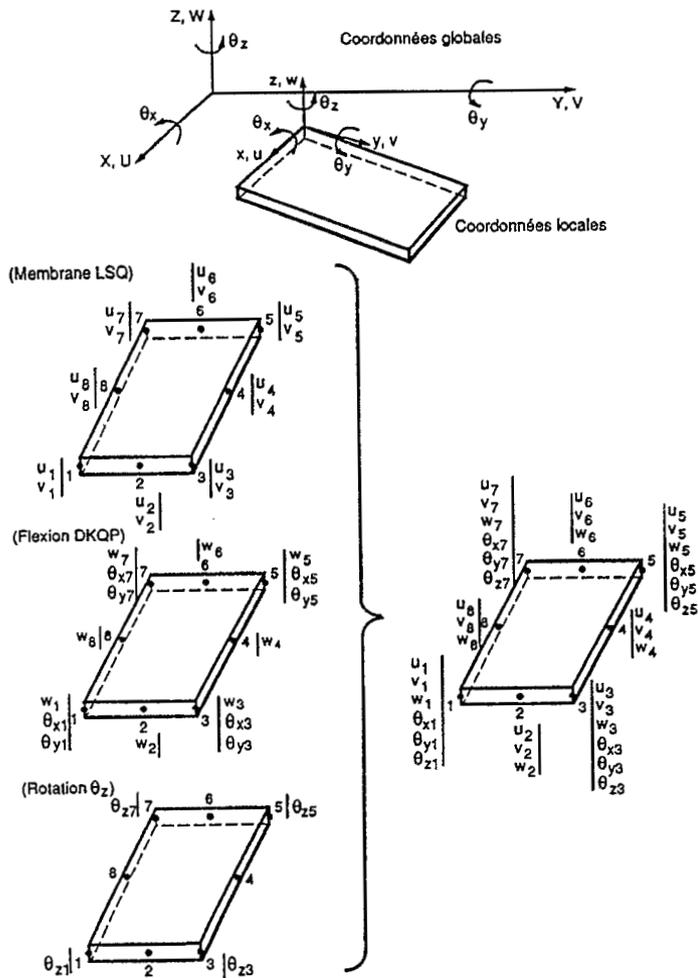


Fig. 1 - Construction de l'élément DLQP

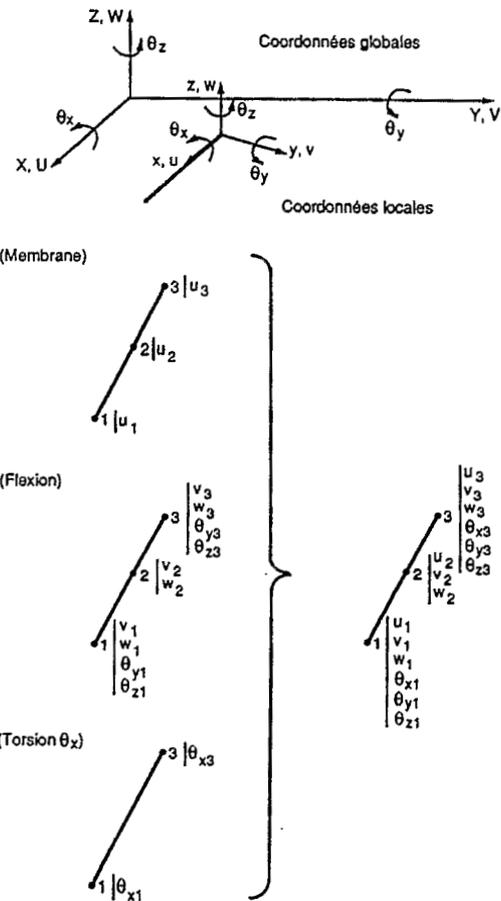


Fig. 2 - Construction de l'élément DLLP

$$M_p \ddot{U} + C_p \dot{U} + K_p U = F_{pv}^{int} \quad (4)$$

où M_p , C_p et K_p représentent respectivement les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité du système global (l'indice p désignant le pont) et F_{pv}^{int} représente le vecteur des forces d'interaction pont-véhicules.

3.2 - Modèle des véhicules

3.2.1 - Hypothèses

Les hypothèses pour la mise en équation du mouvement vibratoire du véhicule sont les suivantes :

1) Les pneus du véhicule demeurent en contact permanent avec la chaussée, et les déplacements des points de contact s'expriment par :

$$\bar{w}_i(t) = w(s_i, t) + r(s_i) \quad (5)$$

où :

$\bar{w}(s_i, t)$ est ici le déplacement vertical du pont au point de contact de coordonnées curvilignes s_i à l'instant t

$r(s_i)$ est la valeur de la profondeur (profil) de la chaussée au point de contact de coordonnées curvilignes s_i .

2) La charge du véhicule est représentée par un bloc infiniment rigide de masse m_v , reposant sur des amortisseurs à comportement linéaire dont le glissement relatif par rapport aux essieux est négligeable (Said 1984 ; Savard *et al*, 1993).

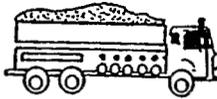
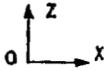
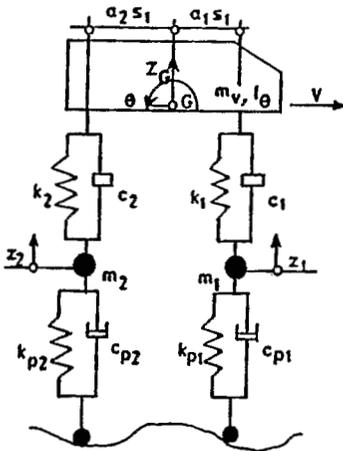
3) On considère que les rotations du véhicule sont petites.

Pour plus de détails, le lecteur peut consulter Wang et Huang, 1992 b, Savard *et al* 1993, Fafard *et al* 1993 et Henchi 1995.

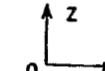
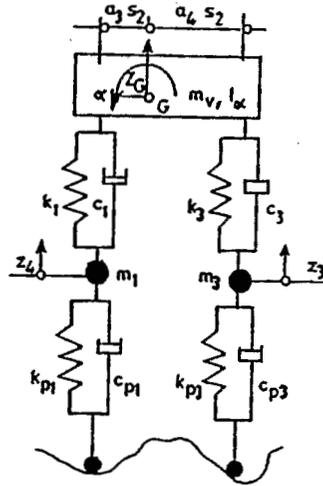
3.2.2 - Modèles des véhicules en trois dimensions

La modélisation des véhicules a été l'intérêt principal de ce travail. Nous présentons dans cet article, le modèle en trois dimensions à 7 degrés de liberté représentant un camion isolé (modèle utilisé lors des essais). Notons cependant que notre programme comporte également un modèle à 11 degrés de liberté représentant un tracteur et sa semi-remorque.

En considérant les hypothèses mentionnées ci-dessus et en prenant s comme la distance qui sépare les essieux d'une voiture et G son centre de gravité, on obtient (voir figure ci-dessous pour les notations) :



Véhicule isolé, vue de profil
Système à 7 degrés de liberté



Véhicule isolé, vue de face
Système à 7 degrés de

$$\langle q_i \rangle = \langle z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_{v1} \ z_{v2} \ z_{v3} \rangle$$

$$\begin{cases} \theta = (z_{v2} - z_{v1})/s_1 ; \alpha = (z_{v2} - z_{v4})/s_2 \\ z_G = z_{v2}(a_1 - a_2) + a_2 z_{v1} + a_4 z_{v4} \end{cases} \quad (6)$$

matrice masse

m_1	0	0	0	0	0	0
	m_2	0	0	0	0	0
		m_3	0	0	0	0
			m_4	0	0	0
				α_1	α_2	α_3
	sym				α_4	α_5
						α_6

avec:

$$\alpha_1 = m_v \left(a_2^2 + \frac{h^2}{s_1^2} \right) + \frac{I_0}{s_1^2}$$

$$\alpha_2 = m_v \left[(a_1 - a_4) a_2 - \frac{h^2}{s_1^2} \right] - \frac{I_0}{s_1^2}$$

$$\alpha_3 = m_v a_2 a_4$$

$$\alpha_4 = m_v \left[(a_1 - a_4)^2 + \frac{h^2}{s_1^2} \right] + \frac{I_0}{s_1^2} + \frac{I_{\alpha}}{s_2^2}$$

$$\alpha_5 = m_v (a_1 - a_4) a_4 - \frac{I_{\alpha}}{s_2^2}$$

$$\alpha_6 = m_v a_4^2 + \frac{I_{\alpha}}{s_2^2}$$

matrice d'amortissement

$c_1 + c_{p1}$	0	0	0	-c_1	0	0
	$c_2 + c_{p2}$	0	0	0	-c_2	0
		$c_3 + c_{p3}$	0	-c_3	c_3	-c_3
			$c_4 + c_{p4}$	0	0	-c_4
				$c_1 + c_3$	-c_3	c_3
	sym.				$c_2 + c_3$	-c_3
						$c_3 + c_4$

matrice de rigidité

$k_1 + k_{p1}$	0	0	0	-k_1	0	0
	$k_2 + k_{p2}$	0	0	0	-k_2	0
		$k_3 + k_{p3}$	0	-k_3	k_3	-k_3
			$k_4 + k_{p4}$	0	0	-k_4
				$k_1 + k_3$	-k_3	k_3
	sym.				$k_2 + k_3$	-k_3
						$k_3 + k_4$

vecteur sollicitation

$$\begin{pmatrix} -m_1 g + k_{p1} (w(x_1, y_1, t) + r(x_1, y_1)) + c_{p1} \left[\dot{w}(x_1, y_1, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_1} \dot{X}_1 \right] \\ -m_2 g + k_{p2} (w(x_2, y_2, t) + r(x_2, y_2)) + c_{p2} \left[\dot{w}(x_2, y_2, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_2} \dot{X}_1 \right] \\ -m_3 g + k_{p3} (w(x_3, y_3, t) + r(x_3, y_3)) + c_{p3} \left[\dot{w}(x_3, y_3, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_3} \dot{X}_1 \right] \\ -m_4 g + k_{p4} (w(x_4, y_4, t) + r(x_4, y_4)) + c_{p4} \left[\dot{w}(x_4, y_4, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_4} \dot{X}_1 \right] \\ -a_2 m_v g + m_v \frac{h}{s_1} \ddot{X}_1 \\ -(a_1 - a_4) m_v g - m_v \frac{h}{s_1} \dot{X}_1 \\ -a_4 m_v g \end{pmatrix}$$

3.3 - Modélisation du profil de la chaussée

Les imperfections et irrégularités du profil de la chaussée doivent être prises en compte dans la modélisation de l'interaction pont-véhicules. Des mesures expérimentales sur plusieurs ponts ont montré que le profil de la chaussée peut être assimilé à un processus aléatoire stationnaire gaussien de moyenne nulle (Honda *et al*, 1982 ; Savard *et al* 1993). Le profil est alors généré par des fonctions de puissance de densité spectrale :

$$r(x) = \sum_{n=1}^N \sqrt{4 S_r(\omega_{sk}) \Delta \omega_s} \cdot \cos(\omega_{sk} x + \varphi_k) \quad (7)$$

où :

$r(x)$ est le profil de la chaussée (m),

ω_{sk} est le nombre d'ondes (cycle/m),

φ_k est un nombre aléatoire pris entre 0 et 2π et

$S_r(\omega_s)$ est la rugosité (m^3/cycle) donnée par :

$$S_r(\omega_s) = A_r \left(\frac{\omega_s}{\omega_{s0}} \right)^{-\alpha} \quad (8)$$

où :

A_r est le coefficient de rugosité (m^3/cycle),

ω_{s0} est la fréquence de discontinuité dont la valeur est

égale à $\frac{1}{2\pi}$ cycle/m et

α a été fixé dans notre cas à **1,80**.

3.4 - Technique de résolution

La résolution du problème de l'interaction pont-véhicules peut se faire de deux manières

- On considère que les deux systèmes pont et véhicules développés précédemment forment un seul super-système : c'est la méthode couplée. Cette méthode demande beaucoup d'espace, mémoire (RAM), pour le stockage des matrices au moment de la résolution et exige une analyse modale du pont (Henchi, 1995).

- Une seconde méthode dite découplée consiste à résoudre le problème d'interaction pont-véhicules d'une manière découplée. Chaque système pont ou véhicule est résolu séparément. Un processus itératif cherche l'équilibre dynamique des forces entre les deux systèmes pont et véhicules en évaluant les forces d'interaction exercées par chaque système sur l'autre. Dans cette démarche que nous avons adoptée pour raison de coût de résolution (espace et temps de calcul),

le système discret du pont a été intégré par la méthode de Newmark de même que celui du véhicule (voir figure 3).

Le lecteur peut trouver les détails de notre algorithme de résolution dans Savard *et al*, 1993 et Henchi, 1995.

IV - EXEMPLE NUMERIQUE

Nous avons choisi de présenter dans cet article la simulation d'un test effectué par le Ministère des Transports du Québec sur un pont situé sur la rivière Portneuf dans la municipalité de Portneuf, dans la Province du Québec au CANADA (Fig.4). Pour tous les détails concernant les essais expérimentaux et les caractéristiques du pont, le lecteur peut consulter Laflamme *et al*, 1995 et le rapport de Halchini et Savard (1993).

Pour la simulation numérique, le type de maillage choisi pour la modélisation du pont est montré à la figure 5. Une calibration statique et dynamique du modèle pont s'avère indispensable afin de trouver toutes ses caractéristiques statiques et dynamiques qui simulent la réalité étant donné qu'il s'agit d'un vieux pont construit vers 1938. Le camion d'essai est montré à la figure 6. La figure 7 montre la localisation des jauges et les trajectoires du camion d'essai sur le modèle pont. Nous avons considéré un amortissement visqueux de type Rayleigh (Savard *et al*, 1993 ; Laflamme *et al*, 1995) pour le pont.

Le calcul du FAD selon l'équation (1) exige le calcul des réponses statiques et dynamiques. Les figures 8 : a et b montrent la corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques au niveau des jauges 3 et 8 pour le cheminement A dans le cas de l'analyse statique après calibration.

Les résultats du modèle numérique comparés aux résultats expérimentaux sont montrés aux figures 9 : a et b. Ces deux figures montrent les résultats dynamiques par rapport aux réponses statiques et ce pour deux jauges et un cheminement du véhicule seulement. Les tableaux 1 et 2 donnent des détails sur quelques cas représentatifs.

On constate qu'en général, pour un ouvrage de béton armé d'un certain âge, il est très difficile d'obtenir sa réponse exacte étant donné que ses caractéristiques mécaniques sont très difficiles à évaluer. Nous avons remédié à ce problème en procédant à une calibration, ce qui a permis d'obtenir une assez bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques. Une fois les études statiques et dynamiques complétées, le calcul du facteur d'amplification dynamique devient alors très facile à l'aide de l'équation (1). Il faut cependant noter que le FAD dépend du choix du type de réponses considéré (Akoussah *et al*, 1995) à savoir le déplacement, les déformations ou les réactions d'appuis.

V - CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article un modèle d'éléments finis tridimensionnel, capable de simuler l'interaction pont-véhicules. Une calibration du modèle s'est avérée indispensable pour simuler les ouvrages en béton armé dont les caractéristiques mécaniques se sont altérées dans le temps. Les réponses dynamiques et statiques maximales permettent de calculer des facteurs d'amplification dynamiques selon le type de réponse considéré (déplacements, déformations ou réactions d'appui). L'exemple numérique présenté montre une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques. Des recherches sont en cours pour le calcul automatique d'un FAD

- Calcul initial : $t = 0$
- * Calcul des matrices du pont M_p, C_p et K_p
- * Calcul des valeurs et vecteurs propres (si une analyse modale est nécessaire) : Φ_i et λ_i
- * Génération du profil de la route $r(x)$: $S_r(\omega_s) = A_r(\omega_s / \omega_{s0})^{2k}$
- * Lecture et calcul des conditions initiales
- * Choix du pas de temps Δt

• 1. Pour chaque pas de temps $t = t + \Delta t$

Avancement des véhicules :
$$\begin{cases} v_i = v_{i-\Delta t} + \Delta t \dot{v}_i \\ \underline{s}_i = \underline{s}_{i-\Delta t} + \Delta t v_{i-\Delta t} + \dot{v}_i (\Delta t)^2 / 2 \end{cases}$$

• 2. Pour chaque itération $k = k + 1$

. Approximation des vecteurs vitesses et déplacements de la structure, si $k = 1$

$$\begin{cases} \dot{U}_i = \dot{U}_{i-\Delta t} + \Delta t \ddot{U}_i \\ U_i = U_{i-\Delta t} + \Delta t \dot{U}_{i-\Delta t} + \ddot{U}_{i-\Delta t} (\Delta t)^2 / 2 \\ Z_i = Z_{i-\Delta t}; \ddot{Z}_i = \ddot{Z}_{i-\Delta t} \end{cases}$$

• 3. Pour chaque convoi

. Sélection du sens du parcours

• 4. Pour chaque véhicule

. Lecture des conditions initiales pour chaque nouveau véhicule.

. Évaluation de $\bar{w}_i, \dot{\bar{w}}_i, r$ et \dot{r} en chaque point de contact

. Calcul de la force d'interaction en chaque point de contact i .

$$\bar{F}^{int}_i = k_{pi}(\bar{w}_i + r_i) + c_{pi}(\dot{\bar{w}}_i + \dot{r}_i)$$

. Résolution (Newmark) : $M_v \ddot{Z} + C_v \dot{Z} + K_v Z = F_g + \bar{F}^{int}$ Véhicules

. Calcul des forces d'interaction qui agissent sur le pont en chaque point de contact.

$$F_i^{int} = k_{pi}(z_i - (\bar{w}_i + r_i)) + c_{pi}(\dot{z}_i - (\dot{\bar{w}}_i + \dot{r}_i))$$

. Stockage des forces dans le vecteur des forces global F_{pv}^{int}

. Résolution (Newmark) : $M_p \ddot{U} + C_p \dot{U} + K_p U = F_{pv}^{int}$ Pont

. si analyse modale : $\ddot{y}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = \phi_i^T F_{pv}^{int} = \mu_i^{int}$ et

$$U(t) = K_p^{-1} F_{pv}^{int} - \sum_{i=1}^r \phi_i (\ddot{y}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{y}_i) / \omega_i^2 : \text{correction du déplacement.}$$

sinon

. Test de convergence : $|(U_k - U_{k-1}) / U_{k-1}| \leq \epsilon$ si oui

Fig. 3 - Algorithme de résolution du modèle découplé de pont-véhicules (Henchi, 1995)

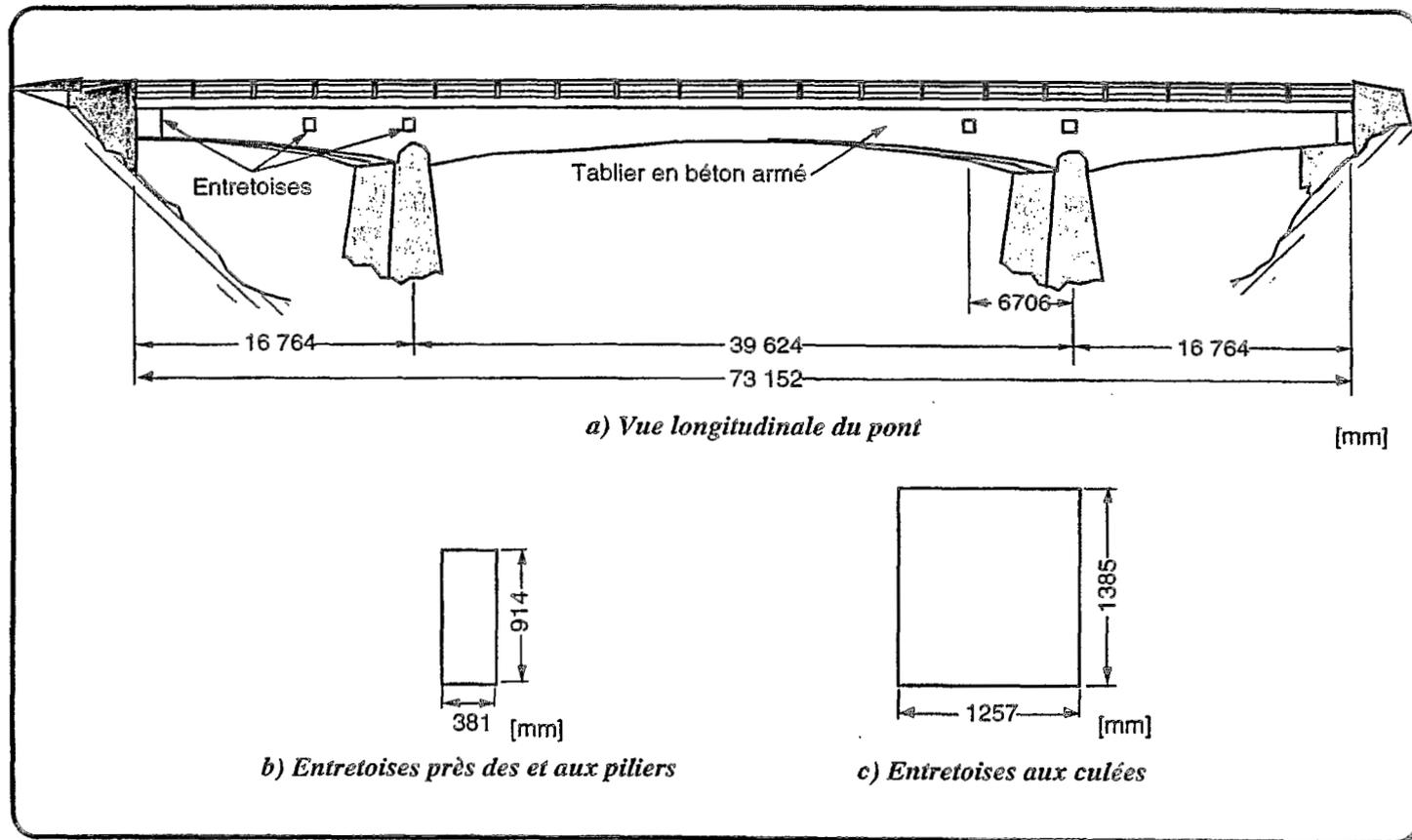
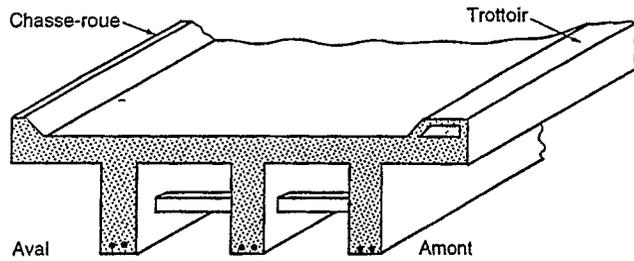
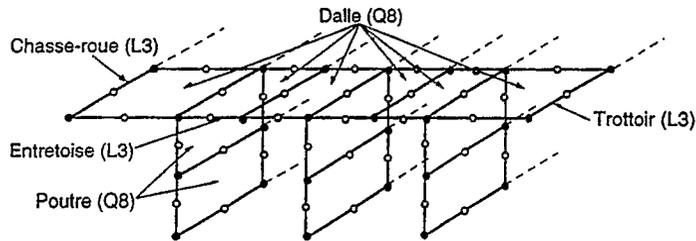


Fig. 4 - Vue longitudinale du pont de Portneuf et détails des entretoises

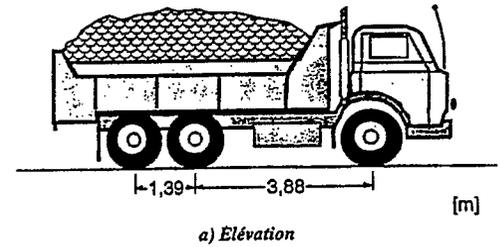


a) *Vue isométrique du tablier du pont réel*



b) *Maillage retenu*

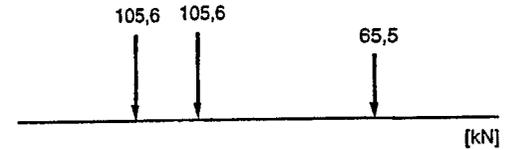
Fig. 5 - Type de maillage retenu pour la modélisation



a) *Elévation*



b) *Vue en plan*



c) *Charges totales appliquées par essieu*

Fig. 6 - Camion d'essai

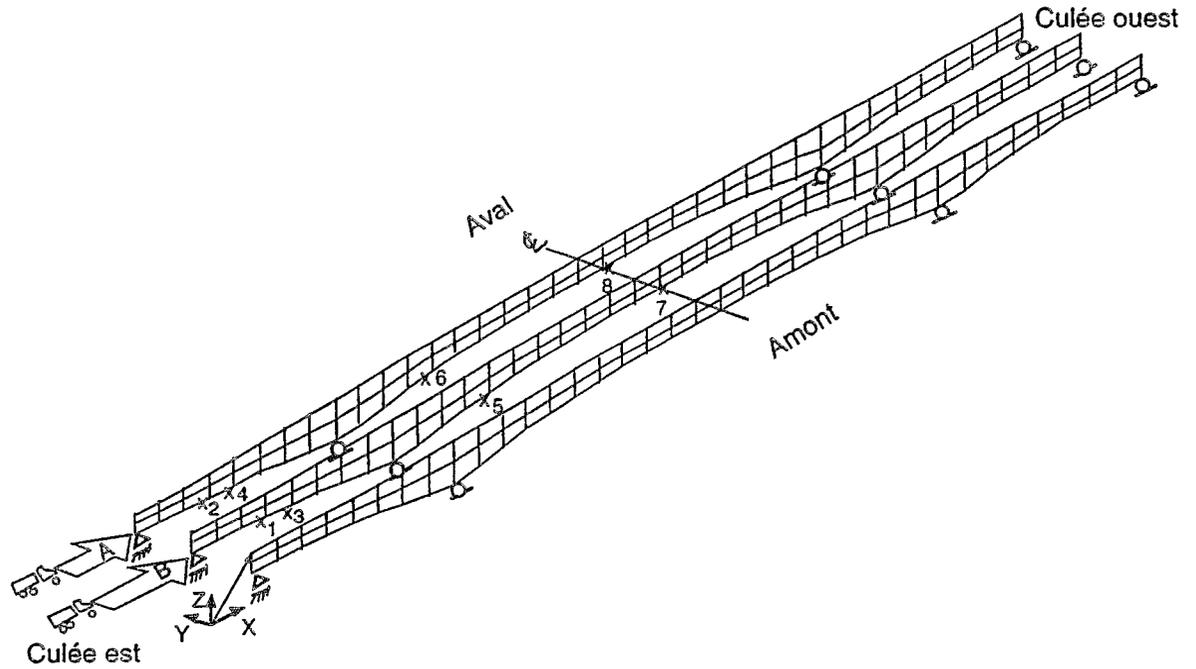
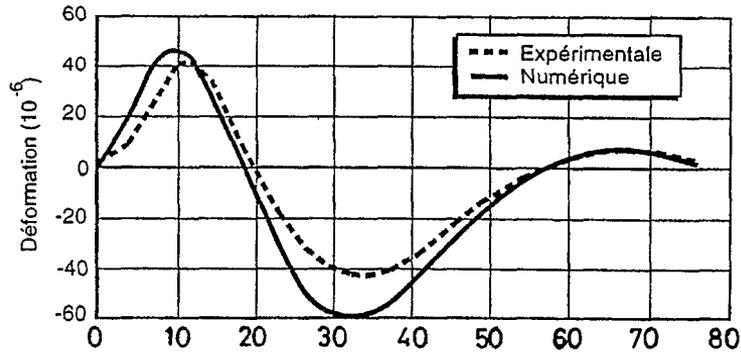
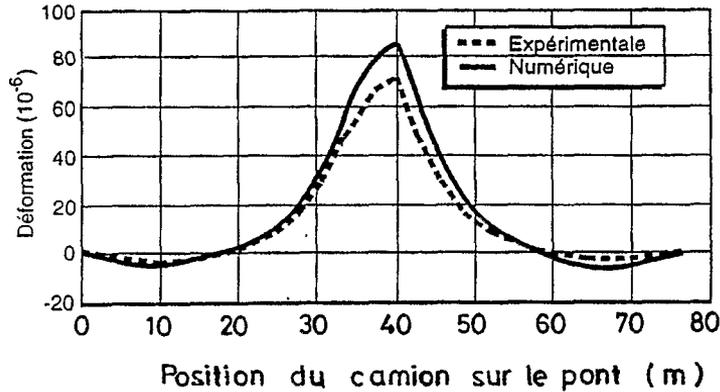


Fig. 7 - Trajectoires empruntées par le camion d'essai et localisation des jauges de calibration sur le modèle pont

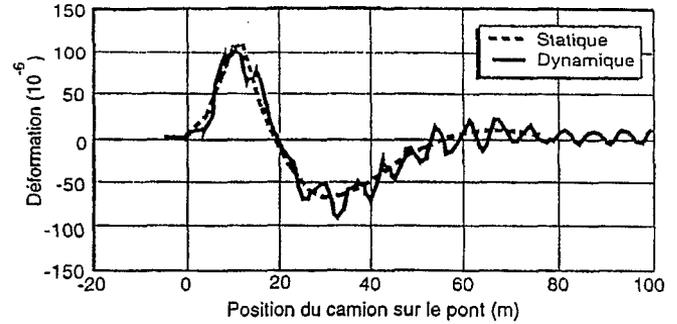


a) Jauge 3 : Cheminement A

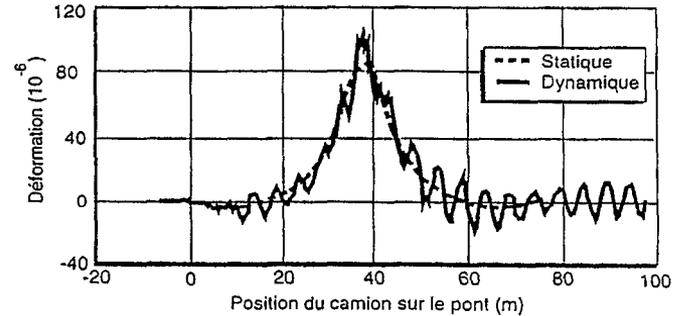


b) Jauge 8 : Cheminement A

Fig. 8 - Résultats de la calibration statique



a) Jauge 3, cheminement A, $v = 95,8$ km/h.



b) Jauge 8, cheminement A, $v = 75,0$ km/h.

Fig. 9 - Résultats de l'analyse dynamique

Tableau 1 - Cheminement B, v = 95,8 km/h

Jauge	Déformation maximale (10^{-6})		Écart (%)
	Expérimentale	Numérique	
1	-	63,1	-
	-	-27,0	-
2	46,2	78,7	70,5
	-32,1	-67,5	110,3
3	149,2	102,2	-31,5
	-69,4	-90,2	30,1
4	30,4	29,4	-3,3
	-33,5	-35,5	6,0
5	48,2	63,3	31,3
	-172,5	-83,8	-51,4
6	35,0	29,8	-14,9
	-114,0	-27,5	-75,9
7	95,0	77,6	-18,3
	-8,7	-8,4	-3,4
8	40,3	33,4	-17,1
	-14,8	-15,2	-2,7

Tableau 2 - Cheminement A, v = 92,1 km/h

Jauge	Déformations maximales (10^{-6})		Écart (%)
	Expérimentale	Numérique	
1	-	33,8	-
	-	-24,1	-
2	261,8	175,2	-33,1
	-58,1	-96,5	66,1
3	69,6	64,8	-6,9
	-65,0	-71,7	10,4
4	103,9	62,6	-39,7
	-71,4	-69,8	-2,2
5	30,8	41,3	34,1
	-81,6	-33,0	-59,6
6	42,4	70,7	66,7
	-116,6	-90,4	-22,5
7	43,1	30,7	-28,8
	-13,3	-8,3	-37,6
8	116,2	114,1	-1,8
	-18,3	-15,1	-17,5

unique pour le pont en tenant compte simultanément des déplacements et des forces sous forme d'énergie.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère de l'Éducation du Québec pour sa bourse d'excellence octroyée dans le cadre de cette étude. Les présents travaux ont été rendus possibles grâce aux subventions accordées par le Ministère des Transports du Québec, le CRSNG et le Fonds FCAR. Nos remerciements vont également à M. Martin Laflamme du Département de Génie Civil de l'Université Laval pour sa précieuse aide lors de l'exécution des travaux.

REFERENCES

- AKOUSSAH, K. E., FAFARD, M., TABLOT, M., BEAULIEU, D. 1995 Etude paramétrique du facteur d'amplification dynamique des charges pour des ponts à travée simple en béton armé. *Revue canadienne de Génie Civil* (à paraître).
- BIGGS, J.M., H.S. and LOUW, J.M. 1957. The vibration of simple span highway bridges. *ASCE Journal of the Structural Division*, **83**(2) : 1186-1232.
- CHANG, D. and LEE, H. 1994. Impact factors on simple-span highway girder bridges. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **120**(3): 704-715.
- CHATTERJEE, P.K., DATTA, T.K. and SURUNA, C.S. 1994. Vibration of suspension bridges under vehicular movements. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **120**(3) : 681-703.
- DHATT, G., MARCOTTE, L., MATTE, Y. and TABLOT, M., 1986a. Two new discrete Kirchhoff plate/shell elements. 4th Symposium on Numerical Methods in Engineering, Atlanta, USA.
- DHATT, G.S., MARCOTTE, L., MATTE, Y., 1986b. New discrete Kirchhoff elements for plates and shells, *Int. J. Num. Methods in Engineering*, **23** : 453-470.
- FAFARD, M., MALLIKARJUNA, and SAVARD, M., 1993. Dynamics of bridge-vehicle interaction. *Proceeding of the 2nd European Conference on Structural Dynamics (EURODYN)*, Ed. by T. Moan *et al* (Published by Balkema, Rotterdam), Trondheim, Norway, June 21-23, pp.951-960.
- HENCHI, K., 1995. Analyses dynamiques des ponts par éléments finis sous la sollicitation de véhicules mobiles. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Division M.N.M., France.
- HONDA, H., KAJIKAWA, Y. and KOBORI, T. 1982. Spectra of road surface roughness on bridges. *ASCE Journal of the Structural Division*, **108**(9) : 1956-1966.
- LAFLAMME, M., FAFARD, M., MALLIKARJUNA, et BOUDJELAL, M.T., 1995. Détermination du facteur d'amplification dynamique des ponts par une approche numérique et expérimentale. Contrat de recherche du MTQ, rapport GCS-95-04, Dép. de Génie Civil, Université Laval, Québec.
- PAULTRE, P., PROULX, J. and TALBOT, M. 1995. Dynamic testing procedures for highway bridges using traffic loads. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **121**(2) : 362-376.
- PAULTRE, P., CHALLAL, O. and PROULX, J. 1992. Bridge dynamics and dynamic amplification factors - a review of analytical and experimental findings. *Revue canadienne de Génie Civil*, **19**(2) : 260-278.

- PAULTRE, P., CHALLAL, O. et PROULX, J. 1991. Essais dynamiques des ponts - Etat des connaissances. Rapport de recherche SMS-91/02, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec.
- SAID, M. 1984. Dynamique des ouvrages d'art sous charges mobiles. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- SAVARD, M., FAFARD, M. et BEAULIEU, D. 1993. Etude par éléments finis du facteur d'amplification dynamique des charges dans les ponts sollicités par les véhicules routiers. Rapport GCT-93-07, Dép. de Génie Civil, Université Laval, Québec.
- WANG, T.L. and HUANG, D. 1992a. Computer modelling analysis in bridge evaluation. Rapport no FL/DOT/RM/42, Florida Department of Transportation.
- WANG, T.L. and HUANG, D. 1992b. Cable-stayed bridge vibration due to road surface roughness. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **118**(5) : 1354-1374.
- WANG, T.L., HUANG, D. and SHAHAWY, M. 1992a. Dynamic response of multigirder bridges. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **118**(8) : 2222-2238.
- WANG, T.L., SHAHAWY, M. and HUANG, D., 1992b. Impact in highway prestressed concrete bridges. *Computers & Structures*, **44**(3) : 525-534.
- WANG, T.L., SHAHAWY, M. and HUANG, D., 1993. Dynamic response of highway trucks due to road roughness. *Computers & Structures*, **49**(6) : 1055-1067.