

COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN PONT DE CHEMIN DE FER LORS DU PASSAGE D'UN CONVOI

Reçu le 10/12/2000 - Accepté le 14/10/2001

Résumé

Nous étudions dans cet article le comportement dynamique d'un pont de chemin de fer à plusieurs travées lors du passage d'un convoi. Le pont est modélisé par une poutre continue simplement appuyée aux extrémités avec des défauts de forme. Le convoi est modélisé par une série de modèles de véhicules à deux degrés de liberté. A l'aide de la méthode modale et l'approche lagrangienne, on détermine deux équations de mouvement couplées pont-convoi. La résolution de ces équations s'effectue par la méthode de Newmark.

Cette modélisation permet d'étudier les influences de l'amortissement de la suspension viscoélastique des véhicules, du nombre d'appuis intermédiaires et de la vitesse de roulement du convoi sur le comportement dynamique pont-convoi ainsi que sur l'interaction entre ces deux derniers. Enfin, nous comparons les résultats d'un convoi à un seul véhicule, avec ceux d'un convoi composé de deux véhicules en mouvement.

Mots clés : Pont de chemin de fer/ Comportement dynamique/ Analyse modale/ Poutre continue/ Force d'interaction.

Abstract

We study in this paper, the dynamic behavior of a multispan railway bridge excited by a moving train. The bridge is modeled by a pinned-pinned multispan beam with surface irregularities. The train is modeled by a serie of two degrees of freedom vehicles model. Using the modal method and lagrangian approach, two sets of coupled motion equations are formulated for the bridge-train. These equations are solved by Newmark's method.

This modeling makes possible to study the effects of the damping in the viscoelastic suspensions, the number of intermediate bridge supports and the train velocity upon the dynamic behavior of bridge-train, as well as the interaction between the last two structures. Finally, results for a convoy with one moving vehicle are compared with results for a convoy with two moving vehicles.

Key words : Railway bridge/ Dynamic behavior/ Modal analysis/ Multispan beam/ Interaction force.

A. REZAIGUIA

N. OUELAA

Laboratoire de Mécanique et Structures
B.P. 401, Université 08 Mai 1945
Guelma, Algérie

M. GUENFOUD

Laboratoire de Matériaux et Hydraulique
B.P. 401, Université 08 Mai 1945
Guelma, Algérie

ملخص

ندرس في هذا البحث السلوك الديناميكي للجسر سكة حديدية ذات حوامل متعددة أثناء عبور قطار. تم تمثيل الجسر بعارضة متعددة الحوامل وذات عيوب في الشكل. تم تمثيل القطار بمجموعة من عربات ذات درجتي حرية. بواسطة طريقتي الأنماط و لاغرانج، نشق معادلتين للحركة مترابطين، للجسر و القطار. حل هذين المعادلتين تم بطريقة نيومارك. وتسمح هذه الصياغة بدراسة تأثير تخامد الحامل الزيتي المرن للعربات، عدد الحوامل التي يوضع عليها الجسر و سرعة القطار على رد الفعل الديناميكي للجسر و القطار والتأثير المتبادل بينهما. في الأخير، نقارن نتائج قطار يتشكل من عربة بنتائج قطار يتشكل من عربتين.

الكلمات المفتاحية : جسر سكة حديدية/ سلوك ديناميكي/ تحليل نمطي/ عارضة متعددة الحوامل/ قوة تأثير متبادل.

La prédiction de la réponse dynamique des ponts lors du passage de charges d'exploitations le long des travées est un problème qui a pris de l'importance depuis déjà plusieurs décennies. Les charges mobiles (chariots, véhicules, convois, etc.) traversant les ponts à des vitesses normales provoquent des déplacements, des contraintes et des déformations plus dangereuses pour la structure que celles induites par des charges statiques. Plusieurs recherches ont été menées pour étudier la dynamique des ponts et pour modéliser la force d'interaction pont-convoi. Les premières études se sont penchées sur le développement de solutions analytiques pour des ponts à une seule travée excités par des cas simples de forces en mouvement [1-2]. Avec le développement de l'outil informatique, les chercheurs ont développé des solutions numériques pour résoudre les problèmes de ponts excités par des forces [3-7] ou des masses [8-10] en mouvement. Dans [11], les auteurs ont développé des modèles basés sur des formulations exactes du comportement des poutres continues excitées par des forces mobiles, basés sur l'approche de rigidités dynamiques exactes avec l'intégration des équations de mouvement dans l'espace des fréquences en utilisant l'algorithme de la transformée de Fourier. Dans [12], les auteurs ont utilisé la méthode de condensation dynamique pour développer un élément d'interaction pont-véhicule d'un pont de chemin de fer posé sur deux appuis simples lors du passage d'un convoi. Dans [13], on trouve une étude récente sur le problème de l'interaction pont-véhicule avec la prise en compte de l'effet

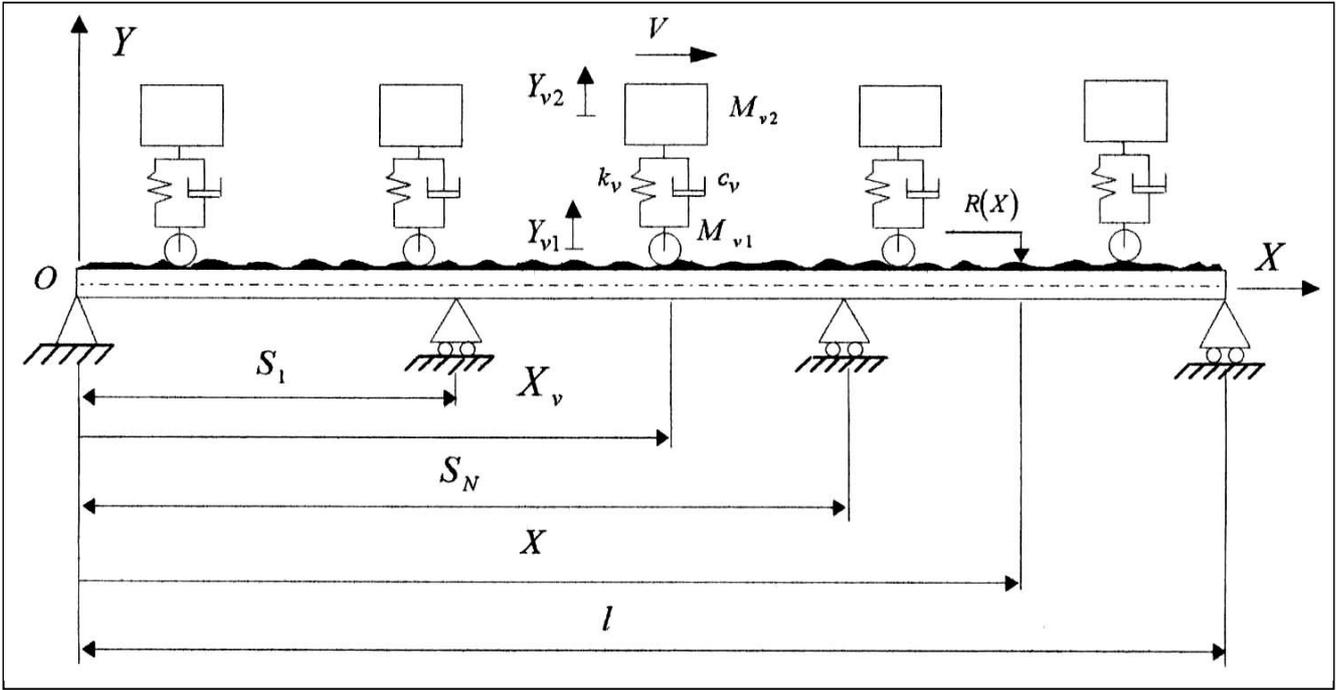


Figure 1: Poutre continue, excitée par n véhicules en mouvement.

de séparation et d'impact sur le comportement dynamique d'un pont de chemin de fer. Dans cette étude, la détermination des fréquences et des modes propres de vibration du pont est basée sur la méthode de rigidité dynamique exacte. Les résultats sont présentés pour une poutre sur deux appuis simples excitée par un modèle de véhicule à deux degrés de liberté en mouvement. Ils ont étudié l'influence de la rugosité sur le facteur d'amplification dynamique ainsi que l'effet de séparation et d'impact sur la force d'interaction pont-véhicule.

Nous présentons ici la modélisation vibratoire d'un pont de chemin de fer à plusieurs travées lors du passage d'un convoi composé de cinq véhicules. La modélisation tient compte de l'interaction pont-véhicules, des imperfections du chemin de roulement et d'un nombre d'appuis intermédiaires illimité. Le pont est modélisé par une poutre continue, les appuis intermédiaires par des ressorts linéaires de grande rigidité et le convoi par une série de modèles à deux degrés de liberté. En utilisant la méthode modale et l'approche lagrangienne, on détermine deux équations de mouvement couplées concernant le pont et le convoi. La résolution de ces équations s'effectue par la méthode de Newmark et selon un processus itératif.

I- THEORIE

La figure 1 représente la modélisation du système pont-convoi. Le pont est modélisé par une poutre continue simplement appuyée aux extrémités avec N appuis intermédiaires simples, le convoi est modélisé par n véhicules en mouvement qui se déplacent à une vitesse V . La masse du véhicule v est notée M_{v2} et la masse de sa roue M_{v1} . Ces deux masses sont liées par un ressort de raideur k_v et un amortisseur de constante d'amortissement c_v . La position du véhicule v est notée par $X_v(T)$ et le déplacement

transversal du pont par $W(X,T)$. Les imperfections de la voie de roulement sont représentées par $R(X)$. Les déplacements transversaux des masses M_{v1} et M_{v2} , mesurés à partir de la position d'équilibre statique, sont respectivement $Y_{v1}(T)$ et $Y_{v2}(T)$.

I.1- Détermination de la force d'interaction pont-véhicules

Les équations du mouvement du modèle de véhicule à deux degrés de liberté sont obtenues en utilisant la méthode de l'équilibre dynamique pour chacune des masses du véhicule. Les deux équations du mouvement sous forme matricielle s'écrivent:

$$\begin{bmatrix} M_{v1} & 0 \\ 0 & M_{v2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{Y}_{v1} \\ \ddot{Y}_{v2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{Y}_{v1} \\ \dot{Y}_{v2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_{v1} \\ Y_{v2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_v + P \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

où $P = -(M_{v1} + M_{v2})g$ est la force due aux effets de la gravité et F_v la force d'interaction entre la masse M_{v1} et la poutre. A partir de l'équation (1), on peut déterminer la force d'interaction:

$$F_v(T) = (M_{v1} + M_{v2})g + M_{v1}\ddot{Y}_{v1} + M_{v2}\ddot{Y}_{v2} \quad (2)$$

où \ddot{Y}_{v1} et \ddot{Y}_{v2} sont les accélérations transversales des masses M_{v1} et M_{v2} respectivement.

I.2- Détermination de l'équation du mouvement du pont projeté dans la base modale

L'équation du mouvement du pont projetée dans la base modale est obtenue en utilisant les équations de Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (3)$$

où q_i est la coordonnée généralisée et Q_i la force généralisée correspondante. L'énergie cinétique et l'énergie de déformation élastique de la poutre en flexion pure sont données par:

$$T_p = \frac{1}{2} m \int_0^l \left(\frac{\partial W}{\partial T} \right)^2 dX \quad (4)$$

$$V_p = \frac{1}{2} EI \int_0^l \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} \right)^2 dX \quad (5)$$

Les appuis intermédiaires d'abscisses $X = S_p$ ($p = 1, 2, \dots, N$) sont modélisés par des ressorts linéaires de grande rigidité et de même raideur k . L'énergie potentielle due aux appuis intermédiaires est donnée par:

$$V_s = \frac{1}{2} k (W^2(S_1) + \dots + W^2(S_N)) \quad (6)$$

où $W(S_p)$ est le déplacement transversal de la poutre évalué à $X=S_p$. Le travail virtuel des forces d'interactions $F_v(T)$ appliquées sur la poutre aux sections d'abscisses $X_v(T)$ pour un déplacement virtuel δW est:

$$\delta \mathfrak{S} = - \sum_{v=1}^{nv} F_v(T) \delta W(X_v(T)) \quad (7)$$

Par commodité, on utilise les quantités adimensionnelles suivantes:

$$\begin{aligned} t &= T \sqrt{EI/ml^4}; \quad x_v = X_v/l; \\ w &= W/l; \quad s_p = S_p/l; \\ \bar{k} &= kl^3/EI; \quad \bar{g} = gml^3/EI; \quad \bar{M}_{v1} = M_{v1}/ml; \\ \bar{M}_{v2} &= M_{v2}/ml; \quad \bar{k}_v = k_v l^3/EI; \\ y_{v1} &= Y_{v1}/l; \quad y_{v2} = Y_{v2}/l; \\ \xi_v &= c_v/2M_{v2}\omega_v; \quad \bar{\omega}_v = \omega_{p,1}/\omega_v \\ r &= R/l; \quad \bar{v} = V \sqrt{ml^2/EI}; \quad \bar{F}_v = F_v l^2/EI; \quad x = X/l \end{aligned} \quad (8)$$

où $\omega_{p,1} = \pi^2(EI/ml^4)^{1/2}$ est la première pulsation propre du pont, $\omega_v = (k_v/M_{v2})^{1/2}$ la pulsation propre du véhicule v , l la longueur du pont, m la masse du pont par unité de longueur, ξ_v le facteur d'amortissement dans la suspension du véhicule v et l_1 la longueur de la travée. Le lagrangien de la poutre continue s'écrit:

$$L = T_p - V_p - V_s \quad (9)$$

Compte tenu des expressions (4) à (6) et des quantités adimensionnelles (8), l'expression (9) devient:

$$L = \frac{EI}{2l} \left(\int_0^1 \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx - \int_0^1 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx - \bar{k} (w^2(s_1) + \dots + w^2(s_N)) \right) \quad (10)$$

En utilisant la méthode modale, le déplacement transversal sans dimension du pont est donné par:

$$w(x,t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \phi_i(x) \quad (11)$$

où les $q_i(t)$ sont les coordonnées généralisées à déterminer, et $\phi_i(x)$ les déformés propres du pont. En tenant compte des quantités adimensionnelles (8) et après projection de l'expression (7) dans la base modale, la force généralisée Q_i

a pour expression:

$$\begin{aligned} Q_i(t) &= - \frac{EI}{l} \sum_{v=1}^{nv} \left[(\bar{M}_{v1} + \bar{M}_{v2}) \bar{g} \phi_i(x_v(t)) + \bar{M}_{v2} \phi_i(x_v(t)) \ddot{y}_{v2}(t) + \right. \\ &\bar{M}_{v1} \phi_i(x_v(t)) \phi_j(x_v(t)) \ddot{q}_j(t) + 2\bar{v} \bar{M}_{v1} \phi_i(x_v(t)) \phi_j'(x_v(t)) \dot{q}_j(t) + \\ &\left. \left(\bar{v}^2 \bar{M}_{v1} \phi_i(x_v(t)) \phi_j''(x_v(t)) + \bar{a} \bar{M}_{v1} \phi_i(x_v(t)) \phi_j'(x_v(t)) \right) q_j(t) + \right. \\ &\left. + \bar{M}_{v1} \phi_i(x_v(t)) \left(\bar{v}^2 r''(x_v(t)) + \bar{a} r'(x_v(t)) \right) \right] \quad (12) \end{aligned}$$

où \bar{v} et \bar{a} sont respectivement la vitesse et l'accélération sans dimensions du convoi.

En projetant (10) dans la base modale (11), en utilisant les équations de Lagrange (3), et après factorisation, on obtient l'équation de mouvement du pont:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n m_{ij}^* \ddot{q}_j(t) + \sum_{j=1}^n c_{ij}^* \dot{q}_j(t) + \sum_{j=1}^n k_{ij}^* q_j(t) \\ + \sum_{v=1}^{nv} \bar{M}_{v2} \phi_i(x_v(t)) \ddot{y}_{v2}(t) = P_i^*(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (13)$$

avec m_{ij}^* , c_{ij}^* , k_{ij}^* et p_i^* respectivement les masses, les amortissements, les raideurs et les forces généralisées.

I.3- Projection de l'équation du mouvement de la masse M_{v2} dans la base modale

D'après le système d'équations (1) et en utilisant les quantités adimensionnelles (8), l'équation du mouvement de la masse M_{v2} du véhicule v s'écrit:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{v2} \ddot{y}_{v2}(t) + \bar{\lambda}_v \dot{y}_{v2}(t) + \bar{k}_v (y_{v2}(t)) - \bar{\lambda}_v \sum_{j=1}^n \phi_j(x_v(t)) \dot{q}_j(t) \\ - \sum_{j=1}^n \left(\bar{k}_v \phi_j(x_v(t)) + \bar{\lambda}_v \bar{v} \phi_j'(x_v(t)) \right) q_j(t) \\ = \bar{k}_v r(x_v(t)) + \bar{\lambda}_v \bar{v} r'(x_v(t)) \quad v = 1, 2, \dots, nv \end{aligned} \quad (14)$$

avec: $\bar{\lambda}_v = 2\pi^2 \bar{M}_{v2} \xi_v / \bar{\omega}_v$. y_{v2} , \dot{y}_{v2} , et \ddot{y}_{v2} respectivement le déplacement, la vitesse et l'accélération transversaux adimensionnelles de la masse M_{v2} pris à $x = x_v(t)$.

I.4- Projection de la force d'interaction pont-véhicules sans dimension dans la base modale

L'expression adimensionnelle de la force d'interaction (2) du véhicule v projetée dans la base modale et prise à $x = x_v(t)$ est:

$$\begin{aligned} \bar{F}_v(t) &= (\bar{M}_{v1} + \bar{M}_{v2}) \bar{g} + \bar{M}_{v2} \ddot{y}_{v2}(t) + \\ &+ \bar{M}_{v1} \left(\sum_{j=1}^n \phi_j(x_v(t)) \ddot{q}_j(t) + 2\bar{v} \sum_{j=1}^n \phi_j'(x_v(t)) \dot{q}_j(t) + \right. \\ &\left. + \sum_{j=1}^n \left(\bar{v}^2 \phi_j''(x_v(t)) + \bar{a} \phi_j'(x_v(t)) \right) q_j(t) + \bar{v}^2 r''(x_v(t)) + \bar{a} r'(x_v(t)) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

D'après (15), la force d'interaction dépend de la vitesse, de l'accélération du véhicule, des imperfections du chemin de roulement et du mouvement transversal du pont-convoi. Les deux équations du mouvement (13) et (14) du pont et du convoi respectivement sont couplées. Pour résoudre ces deux équations, on utilise la méthode de Newmark avec un processus itératif.

II- RESULTATS ET INTERPRETATION

Sur la base des développements mathématiques précédents, nous avons développé un logiciel en langage FORTRAN, permettant la résolution numérique des deux équations du mouvement couplées, en utilisant l'algorithme de l'accélération moyenne de Newmark ($\gamma = 0,5$ et $\beta = 0,25$) avec un calcul itératif. Ce schéma est inconditionnellement stable, de précision maximale; cependant, le choix du pas de temps est non limité [14]. Les résultats de cet article ne tiennent pas compte des défauts de forme du chemin de roulement, vue la complexité de définir le profil $R(X)$.

La vitesse de roulement du convoi est supposée constante. La structure du pont testé est modélisée par une poutre équivalente de longueur $l = 60$ m, de masse par unité de longueur $m = 34088$ kg/m, de moment quadratique $I = 3,81$ m⁴ et d'un module d'Young $E = 29,43.10^9$ N/m². La modélisation du pont est assez générale pour pouvoir introduire le nombre d'appuis intermédiaires et de véhicules voulu. Les véhicules du convoi étudié sont de masse $M_{v2} = 22000$ kg et de masse $M_{v1} = 220$ kg. La raideur et l'amortissement de la suspension viscoélastique sont respectivement, $k_v = 9.10^6$ N/m et $c_v = 1,8.10^5$ Ns/m. La convergence des résultats numériques dépend du nombre de modes, des conditions aux limites du pont et du nombre d'appuis intermédiaires et de leurs raideurs ($k = 10^{11}$ N/m). Pour un pont simplement appuyée à ses extrémités, la convergence s'effectue pour un nombre de modes $n = 2, 6, 8$ et 12 , pour un nombre d'appuis intermédiaires $N = 0, 1, 2$ et 3 respectivement. Le nombre d'itérations qui permet la convergence de l'interaction dynamique pont-convoi augmente avec l'augmentation du nombre de véhicules sur le pont et diminue avec l'augmentation de la vitesse de roulement du convoi.

Les pulsations propres du pont sont calculées par: $\omega_{p,i} = \lambda_i^2 (EI/ml_i^4)^{1/2}$, avec l_i la longueur de la travée, λ_i étant un paramètre sans dimension qui dépend des conditions aux limites, du nombre de modes et d'appuis intermédiaires [15]. Le tableau 1 montre les six premières pulsations propres du pont en rad/s.

Les résultats présentés dans cet article montrent les influences de l'amortissement des suspensions du convoi, du nombre d'appuis intermédiaires, de la vitesse de roulement du convoi et du nombre de véhicules qui composent le convoi sur le comportement dynamique (déplacements, vitesses et accélérations) et sur la force d'interaction pont-convoi.

Mode i	N = 0		N = 1		N = 2	
	λ_i	$\omega_{p,i}$	λ_i	$\omega_{p,i}$	λ_i	$\omega_{p,i}$
1	3,142	4,97	3,142	19,89	3,142	44,69
2	6,283	19,88	3,927	31,07	3,557	57,27
3	9,425	44,75	6,283	79,55	4,297	83,59
4	12,57	79,60	7,068	100,67	4,713	100,56
5	15,71	124,33	9,424	178,97	6,707	203,65
6	18,85	179	10,21	210,07	7,430	249,92

Tableau 1: Pulsations propres du pont en fonction de λ_i .

II.1- Influence du facteur d'amortissement sur le comportement dynamique du convoi

Les figures 2, 3 et 4, montrent l'influence du facteur d'amortissement visqueux des suspensions sur les déplacements, les vitesses et les accélérations transversaux des véhicules. Les remarques essentielles qu'on peut dégager de ces figures sont:

- La diminution sensible des amplitudes pour des coefficients d'amortissement $\xi_v = 0,15$ et $0,2$ en comparaison avec le cas sans amortissement.
- la disparition avec l'amortissement de l'amplification dynamique des déplacements, vitesses et accélérations transversaux des véhicules qui se manifeste pour $\xi_v = 0$.

La figure 5 montre l'influence de l'amortissement sur la force d'interaction pont-véhicule 1. On constate les mêmes effets que sur les figures précédentes.

II.2- Influence du nombre d'appuis sur le comportement dynamique pont-convoi

La figure 6 montre le déplacement transversal du pont sous la roue du véhicule 1 pour une vitesse de roulement 40 m/s et un amortissement $\xi_v = 0$, en fonction du nombre d'appuis intermédiaires du pont. On constate que l'ajout d'appuis intermédiaires diminue d'une manière importante l'amplitude des paramètres étudiés. Ces résultats permettent de déterminer le nombre d'appuis intermédiaires qu'il faut prendre pour limiter l'amplitude du déplacement transversal du pont. Dans le cas considéré, il suffit de prendre un seul appui intermédiaire ($N = 1$) pour limiter l'amplitude de vibration du pont; au-delà de $N = 1$, l'influence n'est plus significative.

La figure 7 montre l'influence du nombre d'appuis intermédiaires sur le déplacement transversal du pont sous la roue du véhicule 5 pour les mêmes conditions que précédemment. On observe une déflexion positive du pont à son extrémité droite. Ce phénomène peut être attribué à un tangage du pont dû à la sortie des quatre premiers véhicules (déchargement du pont).

La figure 8 montre l'influence du nombre d'appuis intermédiaires sur la force d'interaction pont-véhicule 1. On constate que la force d'interaction, à l'inverse du déplacement transversal, reste importante, même avec un appui intermédiaire. Pour la réduire, il faut prévoir deux appuis intermédiaires.

La figure 9, montre l'influence du nombre d'appuis intermédiaires sur le déplacement transversal du premier véhicule pour les mêmes conditions que précédemment. On peut faire les mêmes remarques que pour le pont.

La figure 10, montre le déplacement transversal du véhicule 5 pour 0, 1 et 2 appuis intermédiaires. Chacune des variations brusques qui apparaissent sur le déplacement du véhicule 5 correspond à la sortie d'un des véhicules qui composent le convoi. Ce phénomène de variation brusque sur le déplacement des véhicules est dû au tangage du pont (décharge du pont) au moment de chaque sortie d'un véhicule. On constate aussi une amplification du déplacement de la gauche vers la droite du pont pour $N = 0$.

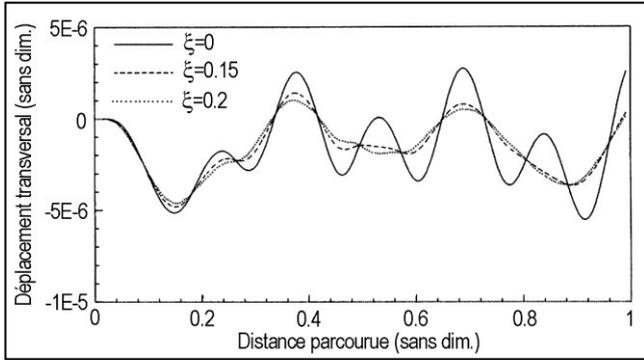


Figure 2: Influence du facteur d'amortissement ξ_v sur le déplacement transversal du véhicule 1, $V = 30$ m/s, $N = 2$.

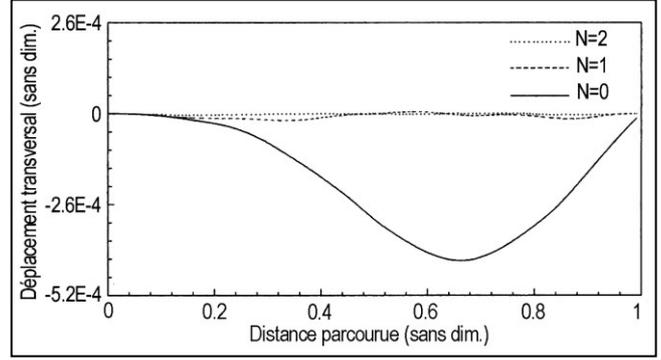


Figure 6: Influence du nombre d'appuis intermédiaires N sur le déplacement transversal du pont sous la roue du véhicule 1, $V = 40$ m/s, $\xi_v = 0$.

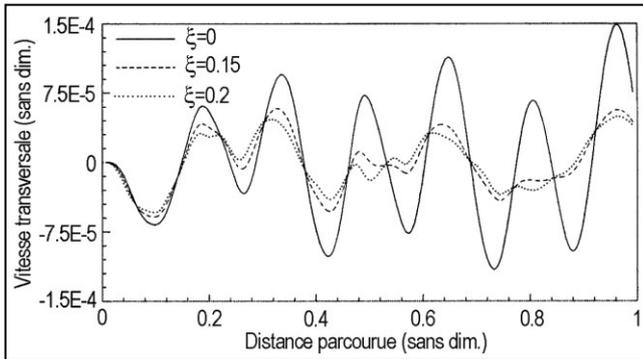


Figure 3: Influence du facteur d'amortissement ξ_v sur la vitesse transversale du véhicule 1, $V = 30$ m/s, $N = 2$.

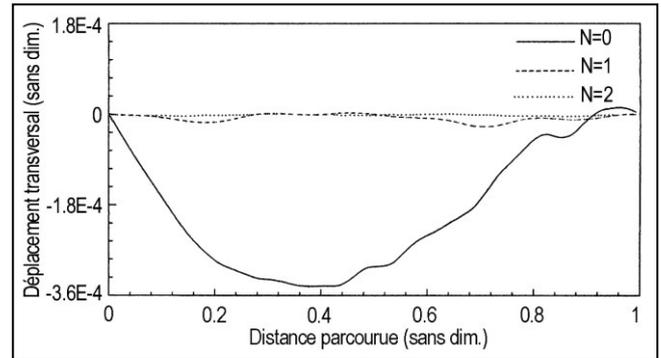


Figure 7: Influence du nombre d'appuis intermédiaires N sur le déplacement transversal du pont sous la roue du véhicule 5, $V = 40$ m/s, $\xi_v = 0$.

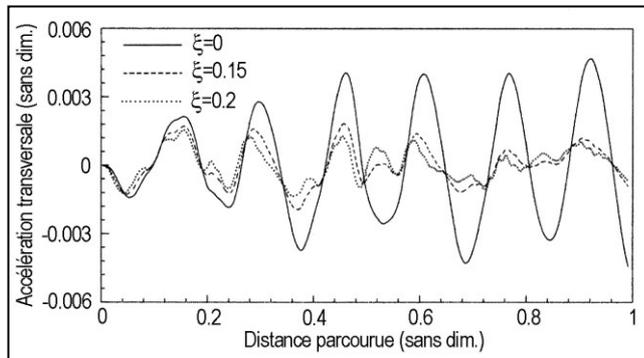


Figure 4: Influence du facteur d'amortissement ξ_v sur l'accélération transversale du véhicule 1, $V = 30$ m/s, $N = 2$.

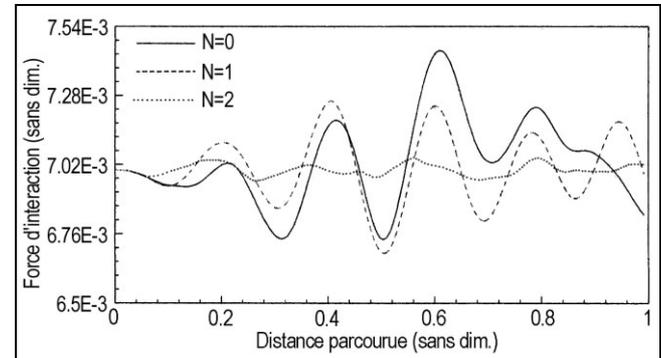


Figure 8: Influence du nombre d'appuis intermédiaires N sur la force d'interaction pont-véhicule 1, $V = 40$ m/s, $\xi_v = 0$.

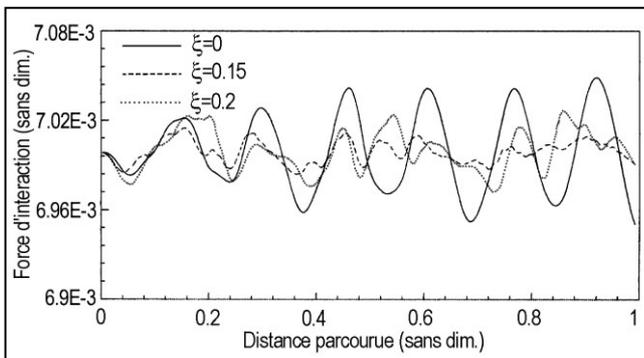


Figure 5: Influence du facteur d'amortissement ξ_v sur la force d'interaction pont-véhicule 1, $V = 30$ m/s, $N = 2$.

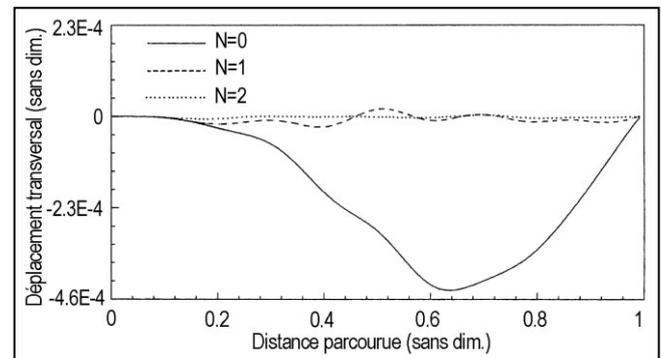


Figure 9: Influence du nombre d'appuis intermédiaires N sur le déplacement transversal du véhicule 1, $V = 40$ m/s, $\xi_v = 0$.

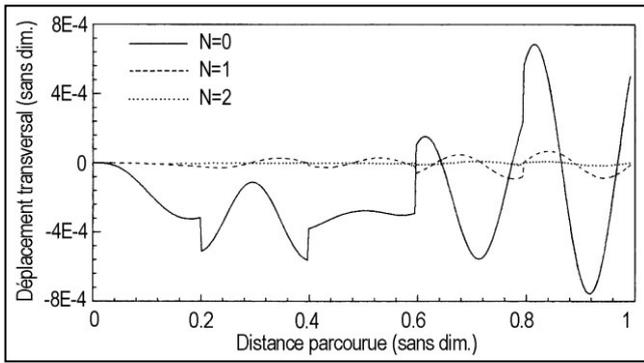


Figure 10: Influence du nombre d'appuis intermédiaires N sur le déplacement transversal du véhicule 5, $V = 40$ m/s, $\xi_v = 0$.

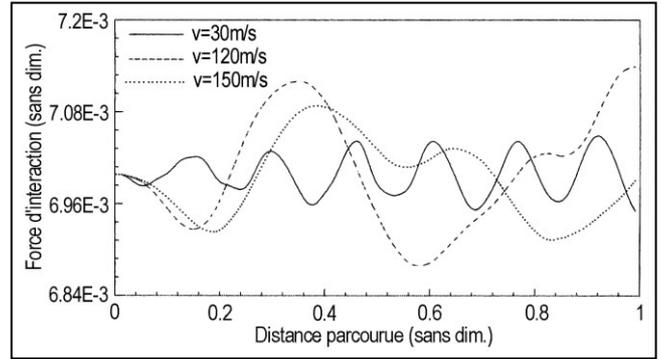


Figure 14: Influence de la vitesse horizontale des véhicules sur la force d'interaction pont-véhicule 1, $\xi_v = 0$, $N = 2$.

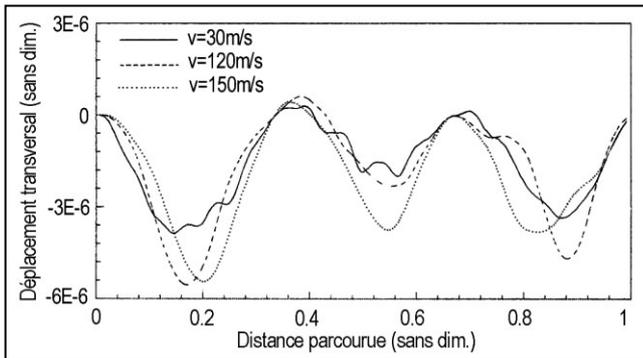


Figure 11: Influence de la vitesse horizontale des véhicules sur le déplacement transversal du pont sous la roue du véhicule 1, $\xi_v = 0$, $N = 2$.

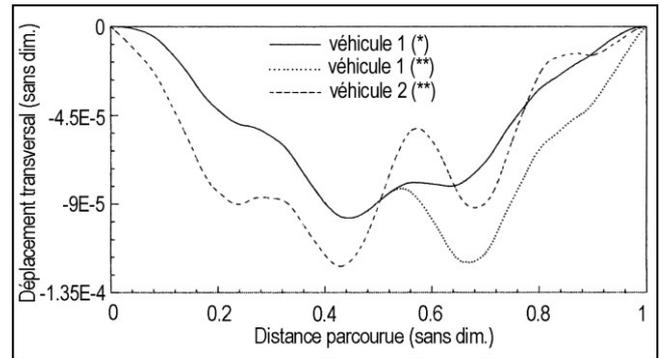


Figure 15: Influence du nombre de véhicules sur le déplacement transversal du pont sous chaque roue des véhicules, $\xi_v = 0.15$, $V = 30$ m/s, $N = 0$. (*): cas d'un véhicule en mouvement, (**): cas de deux véhicules en mouvement.

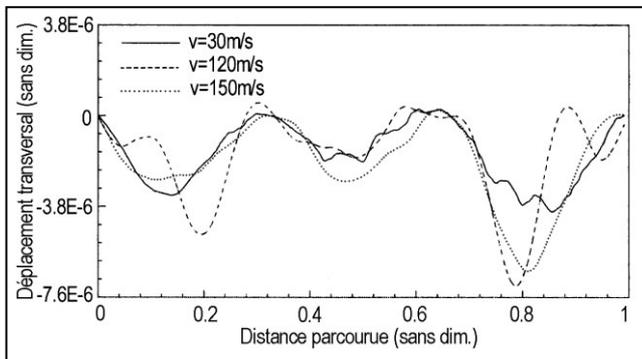


Figure 12: Influence de la vitesse horizontale des véhicules sur le déplacement transversal du pont sous la roue du véhicule 5, $\xi_v = 0$, $N = 2$.

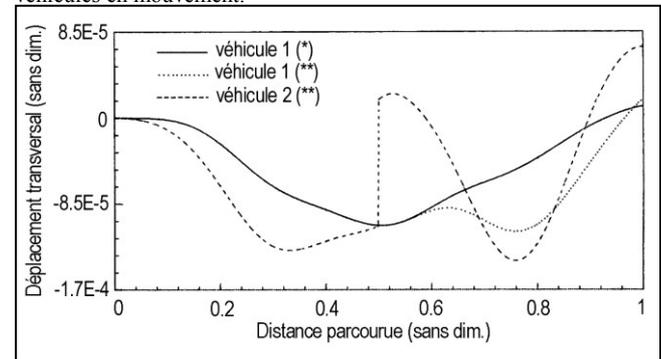


Figure 16: Influence du nombre de véhicules sur le déplacement transversal des véhicules, $\xi_v = 0.15$, $V = 30$ m/s, $N = 0$. (*): cas d'un véhicule en mouvement, (**): cas de deux véhicules en mouvement.

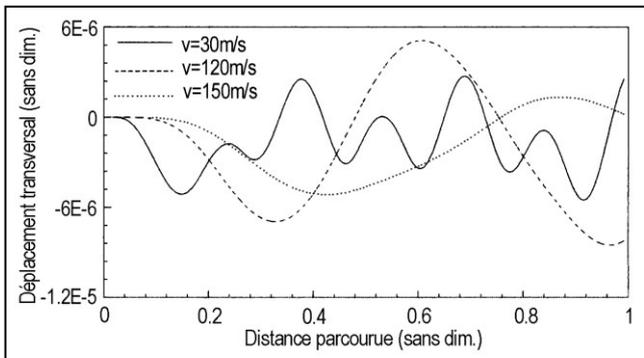


Figure 13: Influence de la vitesse horizontale des véhicules sur le déplacement transversal du véhicule 1, $\xi_v = 0$, $N = 2$.

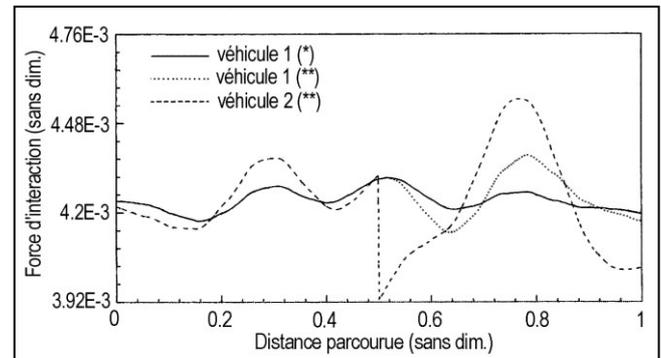


Figure 17: Influence du nombre de véhicules sur la force d'interaction pont-véhicules, $\xi_v = 0.15$, $V = 30$ m/s, $N = 2$. (*): cas d'un véhicule en mouvement, (**): cas de deux véhicules en mouvement.

II.3- Influence de la vitesse de roulement sur le comportement dynamique pont-convoi

Les figures 11 et 12 représentent les déplacements transversaux du pont sous les roues des véhicules 1 et 5 respectivement pour trois vitesses de roulement du convoi (30, 120 et 150 m/s) et dans le cas d'un pont avec deux appuis intermédiaires. Les remarques qu'on peut dégager de ces figures sont:

- la vitesse de roulement du convoi a une influence faible sur le déplacement transversal du pont entre les deux appuis intermédiaires. Cette influence devient un peu plus importante vers l'extrémité droite du pont sous la roue du véhicule 5 alors que pour le véhicule 1, elle est plus importante vers l'extrémité gauche: cela est dû à l'entrée et la sortie du convoi.
- à la sortie du dernier véhicule du convoi, à la vitesse 120 m/s, on constate un tangage du pont.

La figure 13 montre l'influence de la vitesse de roulement du convoi sur le déplacement transversal du véhicule 1. On observe une augmentation du déplacement transversal du véhicule 1 jusqu'à la vitesse 120 m/s, qui est une vitesse critique du roulement du convoi. Au-delà de cette vitesse, le déplacement décroît. La figure 14 représente la force d'interaction pont-convoi en fonction de la vitesse de roulement de ce dernier. On peut faire les mêmes remarques que pour le déplacement du véhicule 1 (Fig. 13).

II.4- Influence du nombre de véhicules sur le comportement dynamique pont-convoi.

Nous présentons respectivement sur les figures 15, 16 et 17 le déplacement transversal pont-convoi ainsi que la force d'interaction pour un pont de 25 m de longueur, sans appuis intermédiaires ($N=0$) et pour un coefficient d'amortissement $\xi_v = 0.15$ dans le cas d'un convoi composé d'un véhicule et de deux véhicules. On constate, sur la figure 15, qu'il y a bifurcation au milieu du pont entre la courbe en trait plein correspondant au véhicule 1 du convoi composé d'un seul véhicule et la courbe en trait pointillé correspondant au véhicule 1 du convoi composé de deux véhicules. Cette bifurcation du déplacement est due à l'entrée du deuxième véhicule sur le pont, ce qui augmente l'amplitude du déplacement transversal du pont au moment de l'entrée du deuxième véhicule. La troisième courbe représente le déplacement transversal du pont sous la roue du véhicule 2.

Pour la figure 16 qui présente le déplacement transversal du véhicule, on constate une variation brusque du déplacement transversal du deuxième véhicule qui apparaît juste au milieu du pont qui est due à la sortie du premier véhicule ce qui provoque une diminution brusque de l'amplitude. Les mêmes remarques peuvent être faites pour la force d'interaction (Fig. 17).

CONCLUSION

Nous avons étudié le comportement dynamique d'un pont de chemin de fer modélisé par une poutre continue

simplement appuyée à ses extrémités lors du passage d'un convoi de véhicules. Le convoi peut être composé d'un nombre de véhicules illimité. Chaque véhicule est modélisé par un système à deux degrés de liberté simulant la masse du véhicule, la masse de sa roue et sa suspension viscoélastique. La méthode modale et l'approche lagrangienne sont utilisées pour déterminer les équations du mouvement pont-convoi. La résolution numérique de ces équations est obtenue par la méthode de Newmark. L'analyse des résultats obtenus montre que:

- pour un pont de 60 m de longueur, un appui intermédiaire suffit pour réduire son déplacement transversal, alors qu'il faudrait au moins deux appuis pour réduire les amplitudes de la force d'interaction pont-convoi.
- la présence d'amortissement visqueux dans la suspension des véhicules diminue sensiblement les amplitudes des déplacements et des vitesses transversaux ainsi que la force d'interaction pont-véhicule.
- la vitesse de roulement du convoi a une influence faible sur le déplacement transversal du pont, alors qu'elle a une grande influence sur le déplacement transversal des véhicules. On observe une augmentation des déplacements jusqu'à la vitesse de 120 m/s; au-delà de cette vitesse, le déplacement décroît.
- Nous comptons poursuivre cette étude pour présenter des résultats sous forme d'amplification dynamique, voir l'influence de l'ordre de véhicule sur le comportement dynamique du pont et du convoi, et voir, dans la mesure du possible, l'influence des défauts de forme du chemin de roulement sur ces résultats.

REFERENCES

- [1]- Timoshenko S.P., "On the forced vibration of bridges", *Philosophical Magazine*, 6, (1922), pp.1018-1019
- [2]- Fryba L., "Vibration of solids and structures under moving loads", Groningen, The Netherlands, Noordhoff International, (1972).
- [3]- Ayre R.S., Ford G. and Jacobsen L.S., "Transverse vibration of two-span beam under the action of a moving constant force", American Society of Mechanical Engineers, *Journal of Applied Mechanics*, 17, (1950), pp.1-12.
- [4]- Florence A.L., "Traveling force on a Timoshenko beam", ASME, *Journal of Applied Mechanics*, 32, (1965), pp.351-358.
- [5]- Steele C.R., "The finite beam with a moving load", ASME, *Journal of Applied Mechanics*, 34, (1967), pp.111-118.
- [6]- Katz R., Lee C.W., Ulsoy A.G. and Scott R.A., "Dynamic stability and response of a beam subject to a deflection dependent moving load", ASME, *Journal of vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, 109, (1987), pp. 361-365.
- [7]- Lee H.P., "Dynamic response of a beam with intermediate point constraints subjected to a moving load", *Journal of Sound and Vibration*, 3, (1994), pp. 361-368.
- [8]- Nilson H.D. and Conover R.A., "Dynamic stability of a beam carrying moving masses", ASME, *Journal of Applied Mechanics*, 38, (1971), pp.1003-1006.
- [9]- Benedetti G.A., "Dynamic stability of a beam loaded by a sequence of moving mass particles", ASME, *Journal of Applied Mechanics*, 41, (1974), pp.1069-1071.

- [10]- Lee H.P., "Dynamic response of a beam on multiple supports with a moving mass", *Structural Engineering and Mechanics*, 3, (1996), pp. 303-312.
- [11]- Henchi K., Dhatt G., Talbot M. and Fafard M., "Dynamic behavior of multispan beams under moving loads", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 199, 1, (1997), pp.33-45
- [12]- Yang Y.B. and Yau J.D., "Vehicle-bridge interaction element for dynamic analysis", *Journal of Structural Engineering*, 11, (1997), pp. 1512-1518.
- [13]- Cheng Y.S., Au F.T.K., Cheung Y.K. and Zheng D.Y., "On the separation between moving vehicles and bridge", *Journal of Sound and Vibration*, 5, (1999), pp. 781-801.
- [14]- Geradin M. et Rixen D., "Théorie des vibrations, application à la dynamique des structures", édition 2, Masson, Paris, (1996).
- [15]- Blevins R.D., "Formulas for natural frequency and mode shape", Florida, Krieger Publishing Company, (1986), pp. 145. □