

# Comportement dynamique des ponts-rails sous lignes à grande vitesse

Autor(en): **Gandil, Jacques / Ramondenc, Philippe**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte**

Band (Jahr): **64 (1991)**

PDF erstellt am: **15.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-49354>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## **Comportement dynamique des ponts-rails sous lignes à grande vitesse**

### **Dynamisches Verhalten von Eisenbahnbrücken auf Hochgeschwindigkeitsstrecken**

### **Dynamic Behaviour of Railway Bridges for High Speed Lines**

#### **Jacques GANDIL**

Chef DOA  
SNCF  
Paris, France

#### **Philippe RAMONDENC**

Chef div., DOA  
SNCF  
Paris, France

#### **RESUME**

Le comportement dynamique d'un ouvrage d'art à grande vitesse pour une circulation ferroviaire doit faire l'objet d'études particulières. Après avoir analysé l'incidence de la vitesse sur ce comportement et les conséquences qui en résultent en matière de sécurité et de confort, cet article décrit les justifications spécifiques de calcul qu'entraîne la grande vitesse. Enfin, sont données, en ce qui concerne les ouvrages mixtes, les dispositions constructives retenues à la SNCF pour répondre à ces exigences.

#### **ZUSAMMENFASSUNG**

Das dynamische Verhalten von Kunstbauten als Bestandteil von Hochgeschwindigkeits-Eisenbahnstrecken erfordert besondere Studien. Nach einer Analyse der Auswirkung der Geschwindigkeit auf das Tragwerksverhalten in Bezug auf Sicherheit und Komfort legt der Aufsatz die spezifischen Berechnungsgrundlagen dar. Schliesslich werden konstruktive Detailvorschriften für Verbundbrücken beschrieben.

#### **SUMMARY**

The dynamic behaviour of bridge structures for high speed railway lines requires specialized studies. After an analysis of the effects of speed on the structural behaviour related to safety and passenger comfort the paper presents the specific computational fundamentals. Finally, the detail requirements for composite structures for the French Railways are described.



## 1. INTRODUCTION

Situé sur une voie de communication pour en assurer la continuité, un ouvrage d'art doit garantir aux circulations l'empruntant le même degré de sécurité et de confort que celui existant par ailleurs. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine ferroviaire où la sécurité régit les actions et les pensées de tout cheminot. Ceci est encore plus vrai dans le domaine de la grande vitesse car, d'une part les effets dynamiques y accentuent tous les phénomènes pouvant avoir une incidence sur la sécurité, d'autre part s'agissant d'un moyen de transport de haute technologie, il serait inconcevable que le confort n'y soit pas optimum.

La S.N.C.F. dispose déjà d'un patrimoine important d'ouvrages sous lignes T.G.V. exploitées, certains d'entre eux ayant même été parcourus à des vitesses supérieures à 500 km/h. Tous ces ouvrages cependant sont soit en béton armé, soit en béton précontraint, soit à poutrelles enrobées. Les constatations faites sur ces premières familles d'ouvrages, comme les progrès réalisés ces dernières années par la construction métallique, ont permis à la S.N.C.F. de projeter plusieurs viaducs métalliques ou mixtes sur les lignes à grande vitesse en cours de construction (voir fig. 1). Ces types d'ouvrages avaient été absents jusqu'alors sur les lignes T.G.V. en exploitation, d'une part en raison d'une faible compétitivité au plan économique, d'autre part du fait que les études préalables permettant de s'assurer de leur bon comportement dynamique à grande vitesse n'étaient pas assez avancées.

## 2. INCIDENCE DE LA GRANDE VITESSE SUR LE COMPORTEMENT DES OUVRAGES

A des vitesses inférieures à 200 km/h, il n'existe que peu de phénomènes vibratoires entretenus, tout au moins pour l'ossature principale d'un ouvrage.

A grande vitesse, la fréquence excitatrice augmente par l'effet propre de la vitesse. Cet effet est lui-même fortement amplifié par l'utilisation de convois long (rame double) composé de matériels à écartement de bogies très régulier ; de ce fait, pendant le passage de la totalité de la rame n'apparaissent que peu de fréquences d'excitation secondaires susceptibles d'atténuer l'effet de l'excitation principale.

On peut se situer alors dans des plages de résonance où des amplifications dynamiques importantes peuvent se produire, et ce d'autant plus que la fréquence naturelle du pont non chargé est faible. Plus légers que leurs homologues en béton précontraint, les viaducs à ossature métallique peuvent y être particulièrement sensibles si aucune analyse de leur comportement dynamique n'est réalisée au stade des études préliminaires et si aucune disposition constructive spécifique n'est alors arrêtée. Les vérifications traditionnelles de résistance comme de déformations statiques ne sont plus suffisantes, il convient de procéder à une analyse du comportement vibratoire des tabliers.

## 3. SECURITE ET CONFORT

Des oscillations excessives des tabliers peuvent mettre en cause la sécurité des circulations ou tout simplement le confort des voyageurs.

### 3.1 La sécurité des circulations

La sécurité des circulations repose principalement sur la parfaite maîtrise en toutes circonstances :

- de la stabilité de la voie,
- d'une bonne qualité du contact rail-roue

#### 3.1.1 La stabilité de la voie

En France, la pose de voie ballastée a été retenue systématiquement jusqu'à présent sur les lignes à grande vitesse pour les facilités d'entretien mécanisé et les possibilités de réglage qu'elle autorise. La voie est équipée en outre de longs rails soudés, ce qui permet d'améliorer le confort et de réduire les nuisances. Selon les longueurs dilatables des tabliers, selon leur condition d'appui, la voie comporte ou non également des appareils de dilatation de voie aux extrémités mobiles des tabliers.

En pleine voie, pour des conditions normales de pose, de réglage et d'entretien, les seuls paramètres influant de façon significative sur les efforts dans les rails sont la température et les efforts de freinage et démarrage. Les efforts longitudinaux et transversaux développés dans la voie en raison de ces deux effets sont repris par le ballast en butée latérale ou par le frottement des traverses.

Au franchissement d'un ouvrage d'art, l'intensité et la distribution de ces efforts sont considérablement perturbés du fait que la voie repose sur une structure dilatable et déformable contrairement à ce qui se passe en pleine voie où elle repose sur une plate-forme inerte thermiquement et quasi indéformable au regard des déformations des ouvrages.

Le maintien de la continuité de la voie à chaque extrémité des ouvrages est à l'origine dès lors de tout un champ d'efforts d'origines diverses dans la voie et dans l'ouvrage et qui peuvent être préjudiciables au bon comportement de l'une comme de l'autre.

De nombreuses actions ou effets sont à l'origine de ces efforts dits d'interaction "voie-ouvrages d'art". Il s'agit principalement :

- a) des effets thermiques propres aux rails et aux tabliers,
- b) des effets de freinage et de démarrage,
- c) des déformations et oscillations de l'ouvrage induites par le passage des circulations.

Les effets a) et b) ne font pas l'objet du présent exposé ; il suffit de savoir cependant que la dilatation d'un tablier par forte température induit des efforts de compression très importants dans la voie côté extrémité mobile des tabliers, qu'en cas de freinage de circulation sur un tablier des efforts supplémentaires de compression très importants dans la voie viennent s'ajouter aux effets précédents.

Ces efforts de compression peuvent encore être aggravés en raison des déformations et des oscillations visées en c).

Au passage d'une circulation sur un tablier, en effet, ce dernier est le siège de déformations, d'oscillations, provoquant à l'extrémité mobile des tabliers des déplacements longitudinaux et des rotations des sections d'extrémité qui génèrent au niveau des rails des efforts. Ces efforts pour certains cas de chargement peuvent également être des efforts de compression qui viennent s'ajouter aux efforts dus aux effets thermiques (voir fig. 2) et aux effets de freinage.

Devant ces divers efforts de compression, le risque encouru est un flambage latéral de la voie. Pour s'y opposer, il faut disposer d'une excellente butée latérale offerte par le ballast et donc être assuré de la bonne cohésion de ce dernier en toutes circonstances.

Or, cette cohésion peut se trouver considérablement réduite :

- le long du tablier par les accélérations induites dans le ballast du fait des oscillations verticales du tablier,
- en extrémité du tablier par les petits déplacements longitudinaux oscillatoires résultant, au niveau du ballast, des déplacements d'ensembles longitudinaux du tablier et des rotations des sections d'extrémité induits par le passage des circulations.

### 3.1.2. Le contact rail-roue

La qualité du contact rail-roue sera assurée si la géométrie de l'ouvrage déformée est à tout instant compatible avec celle du convoi et si les accélérations verticales induites par les oscillations du tablier ne déchargent pas les essieux de façon excessive.

Pour assurer cette bonne qualité du contact rail-roue, trois limitations sont imposées au tablier en cours de déformation concernant respectivement les gauches pris par la voie en tout point du tablier, les déviations angulaires au droit des appuis principalement en extrémité de tablier, enfin les accélérations verticales induites dans les tabliers.

### 3.2. Le confort

L'analyse de la notion de confort, quant à elle, peut être plus rapidement faite : le confort des voyageurs est essentiellement affecté par le mouvement des voitures. Si les limites de gauche de voie résultant des considérations de sécurité sont suffisantes pour assurer un bon comportement transversal des voitures, il y a lieu, par une limitation de l'accélération verticale de la caisse, de s'assurer de leur bon comportement vertical.

Tout ce qui précède montre l'absolue nécessité de procéder à une analyse fine du comportement vibratoire des tabliers pour s'assurer qu'en toutes circonstances (y compris sous les amplifications résultant de phénomènes de résonance éventuels) les limitations prévues pour satisfaire aux problèmes de stabilité de la voie, de contact rail-roue et de confort seront respectées.



## 4. JUSTIFICATIONS PAR LE CALCUL

### 4.1 Considérations générales

Pour les ouvrages ordinaires et les conditions d'exploitation classiques, il était d'usage de régler les problèmes de sécurité et de confort par une seule obligation : ne pas dépasser telle valeur de flèche sous convoi de référence. Avec les grandes vitesses, il convient d'aller plus loin en imposant, ainsi qu'on vient de l'exposer, des limitations supplémentaires en matière d'accélération, de gauche et de déviation angulaire au droit des appuis d'ouvrages.

La réponse dynamique d'un tablier est fonction d'un certain nombre de paramètres très importants, notamment inertie, masse, amortissement dont la quantification est souvent malaisée :

- l'inertie d'un tablier évolue dans le temps du fait de son vieillissement (multiplication et propagation des fissures dans le béton par exemple),
- sa masse peut augmenter ou diminuer selon que les opérations d'entretien mécanisé de la voie conduisent à augmenter ou à réduire les épaisseurs de ballast.

On est ainsi conduit :

- pour la détermination des fréquences propres, (de la forme  $f_i = k_i \sqrt{\frac{I}{M}}$ ) à considérer deux situations extrêmes correspondant respectivement à masse mini/inertie maxi et masse maxi/inertie mini.
- pour l'amortissement à considérer les valeurs minima telles qu'elles résultent des nombreuses mesures et essais effectués sur les ouvrages réels. C'est ainsi que pour les ouvrages métalliques, la valeur retenue est 0,5 %.

Il convient de noter cependant que la réponse dynamique de certains types d'ouvrages courants ou spéciaux est bien connue désormais du fait des constatations faites et des nombreuses mesures effectuées sur les lignes T.G.V. en exploitation. Leur caractéristique de raideur (tant en flexion qu'en torsion) et de masse font qu'ils se situent loin des zones de résonance ou que leur amplification dynamique sont très limitées. C'est le cas par exemple des caissons en béton précontraint qui ne font donc l'objet que de vérifications minimum.

Ce n'est pas le cas des ouvrages à ossature métallique qui font donc l'objet d'études dynamiques complexes en plus des études habituelles.

### 4.2 Etude du comportement dynamique de l'ouvrage

Ces études sont exécutées dès la phase projet à l'aide de programmes de calculs de structures (SAP, FASTRUDL, ANSYS...) qui permettent, sur la base de la méthode aux éléments finis, de résoudre l'équation du mouvement dynamique des poutres en flexion, en chaque point du système :

$$m(x) \frac{d^2 y(t,x)}{dt^2} + c \frac{dy(t,x)}{dt} + \frac{d^2}{dx^2} EI(x) \frac{d^2 y(t,x)}{dx^2} = p(t,x)$$

La méthode suivie consiste dans un premier temps à déterminer les modes successifs de vibration de la structure, puis à calculer la réponse de cette dernière par superposition modale en choisissant des vitesses de trains susceptibles de conduire à des situations de résonance (voir fig. 3 et 4).

Différentes modélisations ont été étudiées. Il en ressort qu'un modèle unifilaire avec caractéristiques torsionnelles est satisfaisant pour les ponts-mixte bi-poutres, mais qu'un modèle spatial est nécessaire dès que ce type d'ouvrage est biais. Dans le cas d'un modèle spatial, il s'agit de rendre compte avec précision de la flexion différentielle des poutres dans le comportement général en torsion de l'ouvrage.

Le chargement dynamique de la structure se fait noeud par noeud, à l'aide du logiciel spécifique prenant en compte le maillage du modèle. Il simule le passage à différentes vitesses d'une rame double du T.G.V. sur l'une ou l'autre des deux voies du tablier (voir fig. 5 et 6).

Statistiquement, le passage de deux circulations à très grande vitesse sur un tablier, une par sens, ne génère pas d'amplification dynamique importante compte tenu des perturbations créées dans l'excitation. Elle est couverte, du point de vue résistance, par les calculs statiques majorés du coefficient dynamique réglementaire qui sont faits en chargeant les deux voies à l'aide du schéma de charges U.I.C. à 8 T/ml.

L'étude complète du comportement vibratoire d'un tablier comprend (voir fig. 7):

- une analyse modale de la structure,
- la recherche de vitesses critiques pour lesquelles des phénomènes de résonance sont à craindre,
- le calcul, à ces vitesses critiques ainsi qu'à des vitesses particulières de la ligne :

- . de la flèche maximum au droit de chaque voie dans chaque travée ,
- . des accélérations verticales dans l'axe de chaque voie ,
- . des rotations des sections d'appui sur chaque culée ,
- . du gauche de la voie.

#### 4.3. Etude du comportement dynamique du convoi

Par ailleurs, la S.N.C.F. a développé un programme qui permet l'analyse dynamique d'un ou de plusieurs ensembles bogies/caisses au passage sur l'ouvrage en mouvement tel qu'il résulte des calculs de structures décrits ci-avant. Il est possible, en effet, à partir des résultats de l'analyse dynamique du pont, de calculer le déplacement  $z_a(t)$  au droit d'un bogie donné et de calculer (voir fig. 8 et 9) le déplacement dans la caisse compte tenu des caractéristiques de sa suspension par intégration dans le temps de l'équation différentielle  $z(t)$

$$\text{classique : } \frac{d^2z}{dt^2} + 2\xi\omega_n \left( \frac{dz}{dt} - \frac{dza}{dt} \right) + \omega_n^2 (z(t) - z_a(t)) = 0 \quad \begin{array}{l} \omega_n: \text{ pulsation de l'ensemble bogie/caisse.} \\ \xi: \text{ ratio amortissement/amortissement critique} \end{array}$$

#### 4.4. Vérification à la fatigue

L'historique des contraintes tel qu'il résulte de l'étude dynamique sous circulations réelles T.G.V. est utilisé pour calculer l'endommagement de la structure sous circulations réelles. Les règles utilisées sont celles de la C.E.C.M. (repris dans l'Eurocode 3). Ce calcul vient compléter celui, traditionnel et réglementaire, fait selon les règles de l'U.I.C.

Il faut toutefois signaler que cette vérification ne s'avère pas dimensionnante dans le cas général. En effet, compte tenu des règles de dimensionnement résultant des vérifications dynamiques, les ondulations de contrainte lors du passage d'une rame T.G.V. sont en général sous le seuil de tronçure correspondant aux dispositions constructives retenues.

### 5. CONSEQUENCES DES ETUDES DYNAMIQUES SUR LA CONCEPTION DES OUVRAGES

Les conditions imposées en matière de déformation et d'accélération ( $g \leq 0,35g$  pour le tablier et  $g \leq 0,05g$  pour les caisses) imposent, pour les ouvrages mixtes bi-poutres auxquels se limite le présent exposé :

- une épaisseur de tablier voisine du 1/14<sup>e</sup> de la portée (à comparer au 1/18<sup>e</sup> pour les ponts sur lignes classiques) ;
- des épaisseurs de semelles surabondantes en travée vis-à-vis de la résistance, principalement sur les travées extrêmes des ouvrages continus qui doivent être aussi raides que les travées intermédiaires malgré, généralement, les différences de portée ;
- une épaisseur de dalle béton importante afin d'améliorer l'inertie de l'ouvrage et d'en augmenter la masse ;
- une rigidité torsionnelle importante obtenue par des pièces de pont de même hauteur que les poutres principales et espacées de 6 m (égal à l'écartement des poutres) et par un contreventement inférieur généralement en losange ;
- la limitation du biais des appuis.

### 6. CONCLUSION

Le passage à grande vitesse des groupes d'essieux nombreux et régulièrement espacés, tels qu'on les rencontre sur les rames T.G.V., induit, pour certains types d'ouvrages et dans certaines circonstances, des phénomènes de résonance qu'il convient de bien analyser si l'on veut bien maîtriser les problèmes de sécurité des circulations et de confort des voyageurs. Les nombreux essais effectués sur les lignes en cours d'exploitation à la S.N.C.F. jusqu'à des vitesses de 500 km/h, montrent que ces problèmes peuvent être résolus sans difficulté particulière. Les structures métalliques de type bi-poutre méritent cependant une attention spéciale en raison notamment de leur moindre masse, de leur faible amortissement et principalement de leur faible rigidité torsionnelle.



Figures diverses illustrant l'exposé sur le comportement vibratoire des ouvrages sous lignes à grande vitesse

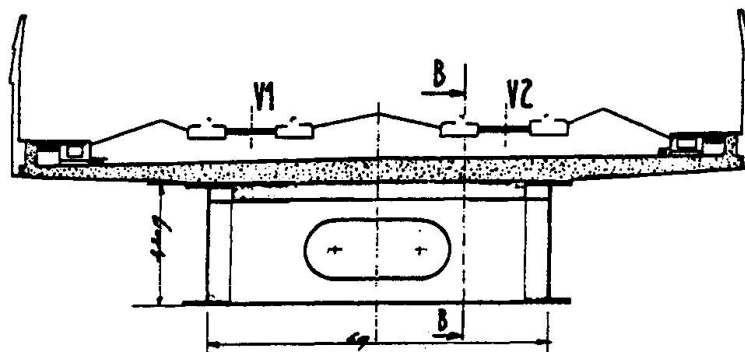


Fig. 1 : tablier bi-poutre acier béton

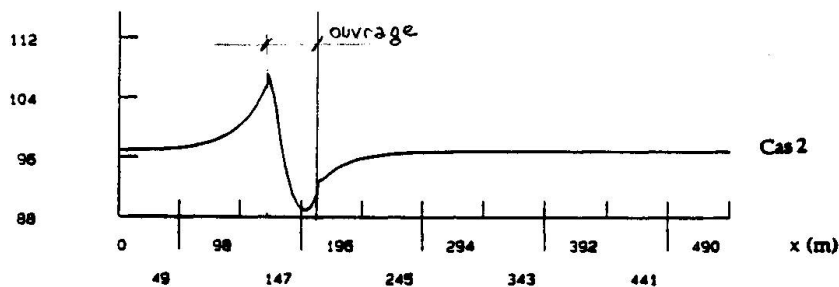


Fig. 2 : effort dans la voie sous effet thermique

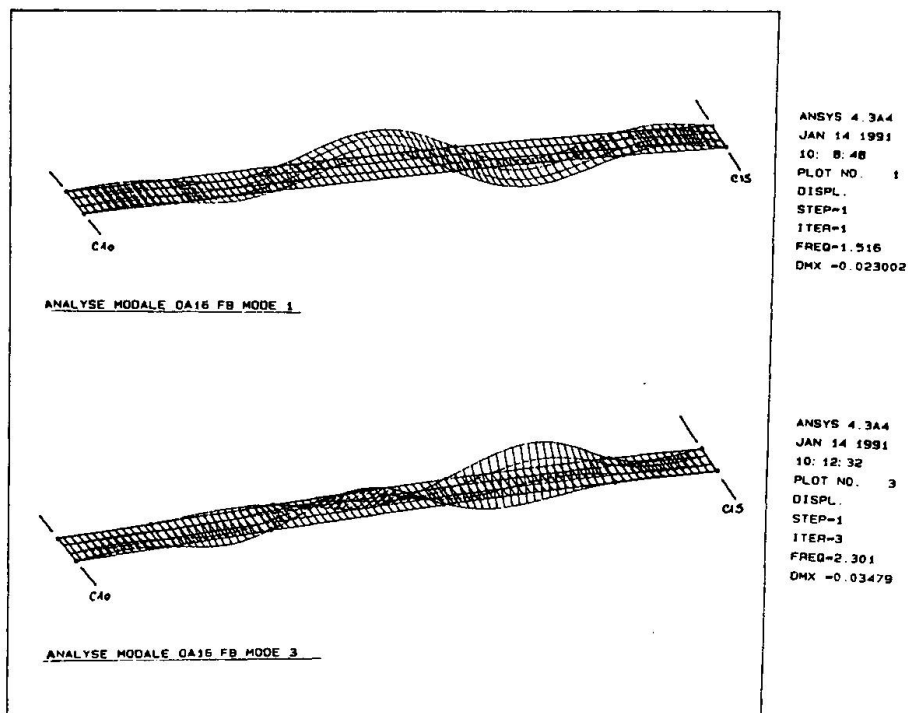


Fig. 3 : analyse modale tablier à 5 travées

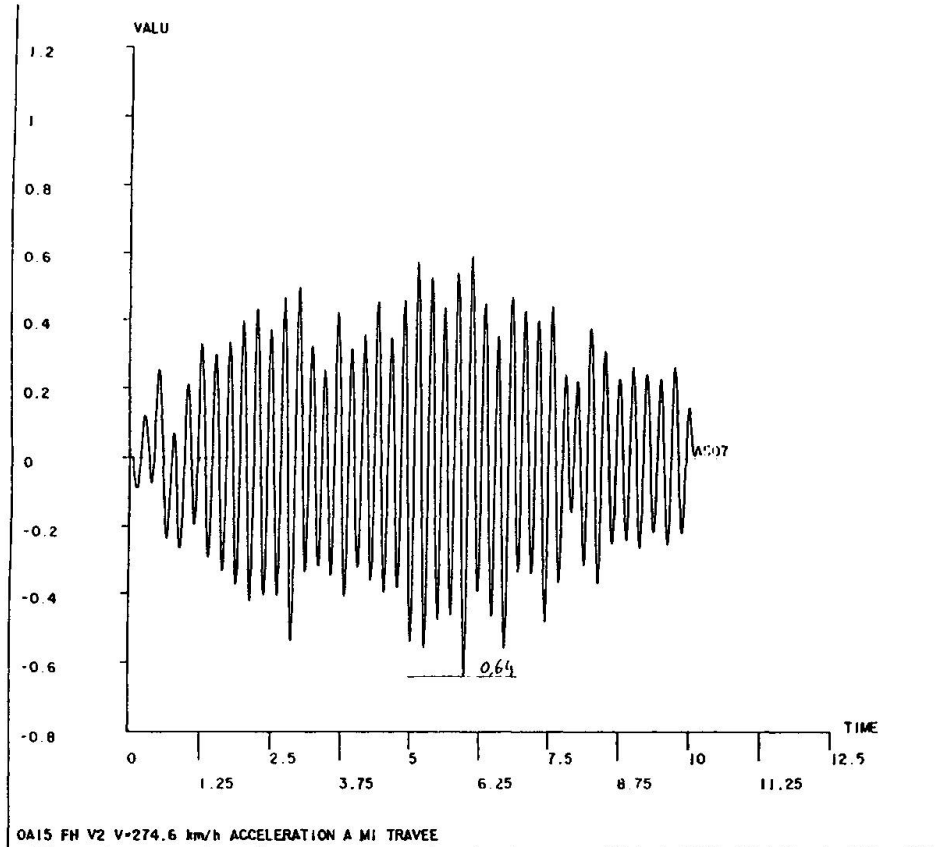


Fig. 4 : accélération en situation de résonance sur une travée intermédiaire

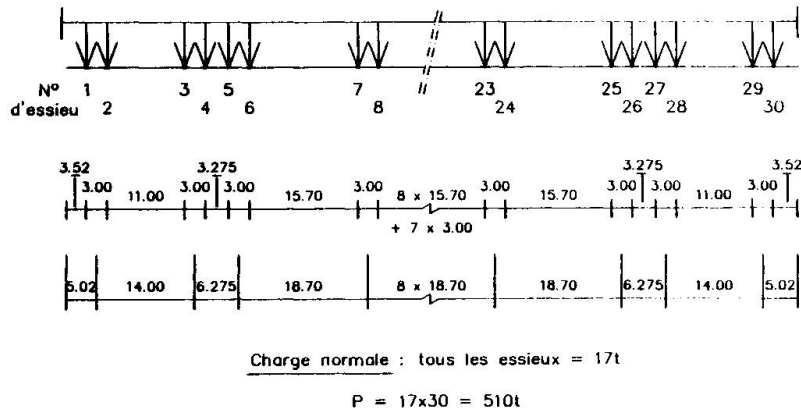


Fig. 5 : diagramme d'une rame double TGV

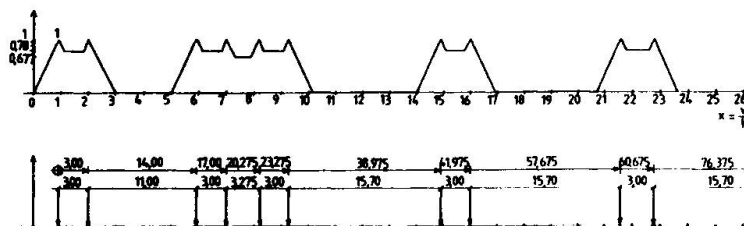


Fig. 6 : historique du chargement sur un noeud





VITESSE (km/h)	10	100	175	227.5	235.3	250	280	300.4	350	413.7	448.7
Accélération caisses (m/s <sup>2</sup> )	0	0.2	0.4	0.58	0.58	0.45	0.42	0.38	0.41	0.48	0.74
accélération ouvrage (m/s <sup>2</sup> )	0	0.5	1	1.85	2.2	1.4	1.14	1.14	1.36	2.83	2.82
flèches ouvrage (mm)	6.2	6.5	5.9	8.2	8.1	7.2	7.4	7.4	9.1	11.4	17.5
Rotation appui (10 <sup>-3</sup> rad)	0.29			0.53	0.58	0.4	0.36	0.32	0.34	0.41	0.56
Gauchage voie (mm/m)	0.04			0.08	0.08	0.05	0.07	0.07	0.1	0.15	0.13

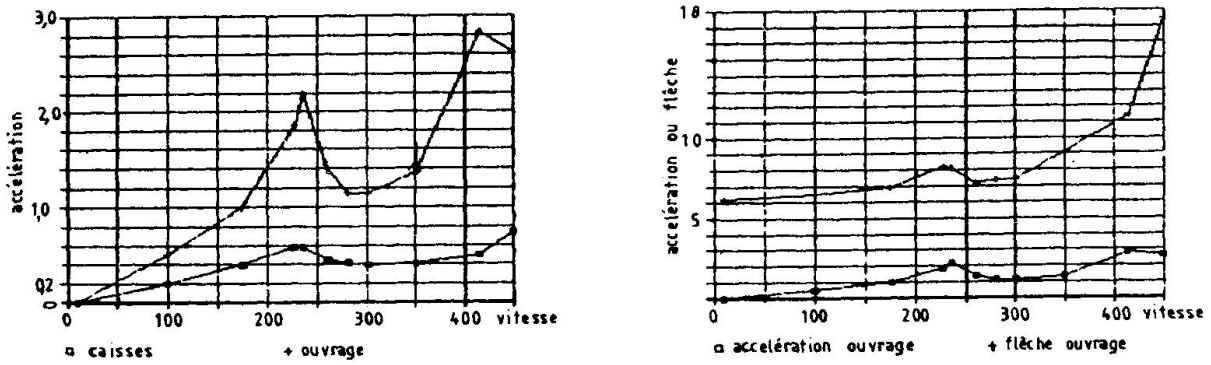


Fig. 7 : exemple d'analyse complète de comportement vibratoire

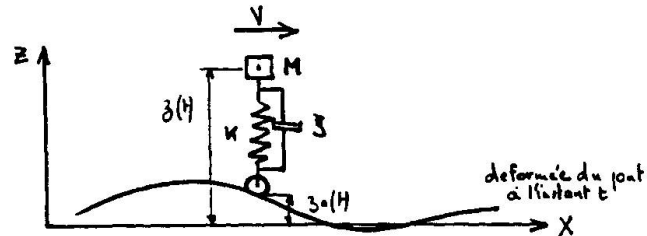


Fig. 8 : trajectoire des caisses - modélisation

N° DU BOGGIE	DEPL. VOIE (MM)	ACC. VOIE (M/S <sup>2</sup> )	DEPL. CAISSE (MM)	VIT. CAISSE (M/S)	ACC. CAISSE (M/S <sup>2</sup> )	IRLF
1	-5.065	.218	-5.261	-.025	.315	
2	-7.084	.374	-6.032	.028	-.297	
3	-6.851	.420	-5.207	.025	-.284	
4	-3.278	-.220	-1.839	-.009	-.115	
5	-2.342	.223	-2.587	-.012	.145	
6	-2.918	.260	-2.359	.011	.103	
7	-2.906	-.273	-2.625	.010	.145	
8	-3.104	-.190	-2.886	-.013	.159	
9	-3.040	-.208	-2.383	-.012	.136	
10	-3.462	.237	-2.401	.012	-.129	
11	-2.559	.213	-2.316	.011	.098	
12	-2.466	-.246	-2.129	-.010	-.134	
13	-4.309	.370	-4.207	.019	.235	
14	-4.990	.436	-4.613	.019	.246	
15	-5.643	.258	-4.679	.021	.224	
16	-5.289	-.297	-4.282	.018	.236	
17	-5.440	.331	-3.963	.018	-.229	
18	-5.038	.417	-3.786	-.018	.197	
19	-2.871	-.284	-2.517	.013	.129	
20	-2.101	.305	-1.721	-.007	.082	
21	-2.966	.351	-2.918	-.013	.152	
22	-3.184	.280	-2.220	-.012	.124	
23	-3.249	.460	-2.458	-.014	-.153	
24	-3.726	-.300	-3.533	.017	.169	
25	-2.851	-.260	-2.458	-.010	.132	
26	-2.459	-.325	-1.961	-.010	.113	
27	-2.725	.352	-2.716	-.016	-.205	
28	-6.965	.466	-5.944	-.026	-.327	
29	-7.333	.447	-5.990	.026	.298	
30	-5.770	.350	-4.331	.026	.310	

\*\*\*\*\* ANALYSE TERMINEE

Fig. 9 : exemple de comportement vibratoire des caisses à V 350 Km/h