

LES INTERACTIONS LATÉRALES «PONTS – CONVOIS FERROVIAIRES»

par A. Winand et R. Keymeulen

RÉSUMÉ

Lors du franchissement des ponts par des convois ferroviaires, les interactions latérales entre ponts (ou éléments de la superstructure) et convois ferroviaires sont susceptibles de provoquer des mouvements indésirables des véhicules. L'analyse de ces interactions a exigé de nombreuses campagnes de mesures et études théoriques.

Les auteurs exposent les travaux du Comité D 181 de l'ERRI (European Rail Research Institute) dont ils furent Président et Membre. Les études paramétriques effectuées pour différents ponts parcourus par différents types de matériel roulant, validées par des mesures sur site, ont permis de formuler trois critères à prendre en compte lors du dimensionnement de la superstructure. Ces critères portent sur les forces latérales pour différents types de trafic (marchandise, classique à voyageurs et grande vitesse), sur la première fréquence propre de déformation latérale des ponts et sur la rigidité transversale de ceux-ci.

SUMMARY

When trains are passing on bridges, the lateral interactions between the bridges (or parts of the superstructure) and the trains are likely to result in undesirable lateral movements of the vehicles. The analysis of these interactions has required many measurement series and theoretical studies.

The authors present the activities of the D 181 Committee of ERRI (European Rail Research Institute) as past Chairman and Member respectively. The parametrical studies performed for different bridges and different types of trains, validated by site measurements, have allowed to express three criteria of particular importance for the design of the superstructure. These criteria relate to the lateral forces for different traffic types (goods, classical with passengers, high speed), to the first eigen value for the lateral deformation of the bridges and to the transverse rigidity of the latter.

A. Winand – Ingénieur en Chef Hre de la SNCB
Professeur à l'Université de Bruxelles

R. Keymeulen – Docteur en Sciences Appliquées
Ingénieur Principal, Chef de Division à la SNCB

1. – INTRODUCTION

Le Code UIC en vigueur prévoit que lors du franchissement des ponts et viaducs ferroviaires par les convois, les interactions latérales soient prises en compte forfaitairement par les effets d'une force unique de 100 kN agissant perpendiculairement à la voie au niveau du champignon du rail, et cela, dans la section la plus défavorable.

Cette règle méritait d'être revue à plus d'un titre dont le moindre n'est certes pas la prise en compte de l'importante augmentation des vitesses de circulation.

S'il est vrai que les actions latérales correspondantes ne sont pas de première importance pour les ponts « massifs » – en béton par exemple – il n'en est plus de même pour les ponts « souples » ainsi que nous allons le voir dans le présent article.

L'UIC – Union Internationale des Chemins de fer – a chargé de cette étude un Comité d'experts de l'ERRI – European Rail Research Institute –, en l'occurrence le Comité D181 – Forces latérales sur les ponts ferroviaires – dont les auteurs furent respectivement Président et Membre.

L'étude a comporté successivement l'élaboration de programmes de calcul et des campagnes de mesures sur ponts afin de les valider, des phases de calculs et d'interprétation de leurs résultats, et finalement la rédaction d'un **Projet de Recommandations** (nouveau texte du projet de Code UIC).

2. – PROGRAMMES DE CALCUL

La problématique des interactions latérales pont-convoi ferroviaire est complexe. Elle fait intervenir notamment le mouvement de lacet (*trajectoire plus ou moins sinusoïdale par rapport à l'axe de la voie*) des convois, les irrégularités de la voie, les diverses caractéristiques géométriques et inertielles du pont.

Trois programmes ont été élaborés :

- le programme VAMPIRE proposé par BRR – British Rail Research – à Derby ;
- le programme IDTBS proposé aux FS (*Chemins de fer italiens*) par la firme PROGE 77 à Rome ;
- le programme Programme SNCB proposé par la SNCB – Société Nationale des Chemins de fer Belges.

2,1. – Le programme VAMPIRE

Pour calculer le comportement dynamique de l'ouvrage, il est nécessaire de construire un modèle pour le pont, le convoi ferroviaire, la voie, ainsi que pour définir les interactions roue-rail.

- Pour le pont :

Le programme implique la connaissance des caractéristiques dynamiques du pont : fréquences propres de vibration latérale et les déformées modales correspondantes.

Celles-ci sont établies par la méthode des éléments finis, assemblant les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité du pont.

- Pour le convoi ferroviaire :

Celui-ci est modélisé sous forme d'un ensemble de masses rigides – *caisse, bogie, essieux* – reliées entre elles par des

liaisons élastiques – *ressorts* – linéaires et visqueuses non-linéaires – *amortisseurs* – ainsi que par une liaison par frottement sec. Les rigidités – *latérale et verticale* – sont couplées afin de pouvoir prendre en compte les mouvements de roulis de la caisse ; à cet effet, ces liaisons sont prévues selon les trois axes – *vertical, transversal et longitudinal*.

- Pour la voie :

Le programme VAMPIRE prend en compte la masse latérale de la voie, sa rigidité et ses coefficients d'amortissement – *latéral et vertical* – ainsi que ses irrégularités – *défauts de nivellement et de dressage*.

- Pour l'interaction roue-rail :

La relation entre la vitesse latérale de glissement de chaque roue par rapport au rail, d'une part, et la force qui en résulte, d'autre part, n'est pas linéaire. D'autre part, le déplacement relatif de chaque essieu par rapport à la voie est obtenu en comparant les déplacements absolus de l'essieu considéré et celui de la voie au point de contact.

2,2. – Le programme IDTBS

Il s'agit ici d'un programme tridimensionnel faisant appel à la méthode des éléments finis :

- Pour le pont :

On utilise les éléments « *poutre* » et des éléments « *barre* ». Le pont a été décomposé en un certain nombre de sous-structures pour rendre plus commode l'introduction des données d'entrée et accroître la vitesse d'exécution des calculs.

- Pour le convoi ferroviaire :

Le convoi ferroviaire considéré est l'ETR450 – *Pendolino* – comportant 11 voitures ; chacune d'elles est modélisée par un ensemble de 7 solides indéformables – *la caisse, 2 bogies et 4 essieux* – reliés entre eux par des liaisons visco-élastiques disposées selon les 2 axes – *transversal et vertical*. Chaque voiture compte ainsi 27 degrés de liberté – *5 pour la caisse et pour chaque bogie, et 3 pour chaque essieu*.

- Pour la voie :

Les irrégularités de la voie sont prises en compte non seulement au droit du pont mais encore sur une longueur de voie de 450 m précédant l'entrée et de 300 m au delà de la sortie de celui-ci.

- Pour l'interaction roue-rail :

A chaque position d'essieu, une sous-structure de pont est définie, située de part et d'autre du point de contact. Chaque sous-structure est modélisée par des nœuds propres à l'essieu et au rail.

Le modèle conduit à établir l'équation différentielle matricielle

$$M \cdot D'' + C \cdot D' + K \cdot D = F$$

où interviennent :

- le vecteur des déplacements : D ,
- les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité : M , C et K ,
- le vecteur des sollicitations appliquées : F .

2.3. – Le Programme SNCB

Ce programme original a été conçu de manière à répondre aux desiderata suivants :

- faire intervenir le nombre minimum de paramètres dont les valeurs peuvent être aisément déterminées ;
- prendre en compte les processus physiques complexes mis en jeu – *le mouvement de lacet, le mouvement relatif du mentonnet de roue par rapport au champignon de rail, les irrégularités transversales de la voie* – par des lois globales simples mais réalistes ;
- être de structure modulaire de façon à permettre, si nécessaire, l'ajout de degrés de liberté ou de contraintes supplémentaires ;
- pouvoir être validé par l'observation des signaux immédiatement accessibles ;
- permettre l'évaluation de grandeurs physiques difficilement accessibles par la mesure – *les forces induites au niveau de la voie, les déformations du tablier du pont.*

Pour ce faire, les modèles suivants ont été établis :

- Pour le pont :

La superstructure est assimilée à une poutre prismatique uniforme, simplement appuyée.

- Pour le convoi ferroviaire :

Chaque voiture est décrite par :

- les masses de la caisse, de chaque bogie et de chaque essieu,
- le moment d'inertie de la caisse autour de l'axe vertical, les coefficients d'élasticité et de frottement visqueux de la suspension secondaire,
- les déplacements transversaux de ces éléments par rapport à un référentiel absolu.

D'autre part, les hypothèses simplificatrices suivantes sont faites :

- les liaisons mécaniques entre voitures ne sont pas prises en compte,
- les caractéristiques des liaisons entre les éléments d'un même véhicule sont linéaires.

- Pour la voie :

Dans le cas de pose directe, les rails sont solidaires du tablier du pont. En pose ballastée, le rôle du ballast est assimilé à celui d'un ensemble de liaisons élastiques linéaires disposées entre la voie et le tablier du pont, et localisées au droit de chaque bogie. La souplesse du rail entre deux traverses est prise en compte en faisant varier les paramètres de chacune de ces liaisons selon la position du bogie correspondant le long de la voie.

- Pour l'interaction roue-rail :

Le déplacement transversal réel du bogie par rapport aux rails est approché par la résultante :

- d'un déplacement à caractère déterministe sinusoïdal – *la composante harmonique,*
- d'un déplacement à caractère aléatoire – *la composante due aux irrégularités de la voie.*

En ce qui concerne la structure de ce programme, le logiciel comprend :

- un pré-processeur permettant :

- l'introduction commode des valeurs des paramètres en jeu, ou d'en modifier certaines,
- la fixation des paramètres de calcul afin d'assurer la convergence de l'algorithme d'intégration.

- un processeur permettant de :

- construire, à chaque pas de calcul, les matrices de masse *M*, d'amortissement *C* et de rigidité *K* qui apparaissent comme coefficients de l'équation différentielle linéaire du second ordre qui simule le comportement dynamique de l'ensemble « pont-convoi »,
- intégrer cette équation matricielle, compte tenu des conditions initiales adéquates ; à cet effet, il importe de signaler que le modèle de la voie s'étend en deçà et au delà de l'ouvrage considéré.

- un post-processeur permettant :

- l'édition des résultats obtenus sous la forme de diagrammes ou de tableaux,
- le calcul de variables globales – *amplitudes maximales de déplacement, de vitesse, d'accélération, des forces induites au niveau de la voie, ...*

Il nous apparaît utile de résumer au tableau 1 les caractéristiques principales des trois programmes considérés.

TABEAU 1
Caractéristiques principales des trois programmes de calcul considérés

	Modèle SNCB	VAMPIRE	IDTBS
Modélisation du pont	Poutre simple de section constante	Analyse par éléments finis	Analyse par éléments finis
Modélisation du convoi	Véhicules divisés en 3 éléments à 1 degré de liberté (caisse + 2 bogies) reliés par des ressorts et des amortisseurs	Véhicules divisés en éléments à 6 degrés de liberté (caisse, bogies, essieux) reliés par des éléments de suspension divers	Modèle par éléments finis
Modélisation de la voie	Liaison élastique pour simuler le ballast avant le pont	Masse, rigidité et amortissement	Masse et rigidité
Interaction roue-rail	Le déplacement du bogie par rapport au rail est approché par une fonction sinus plus une fonction aléatoire	Loi de pseudo-glissement non-linéaire	Linéaire élastique
Calcul	Théorie des modes normaux	Théorie des modes normaux	Intégration directe par étapes dans le temps

3. – CAMPAGNES DE MESURES ET COMPARAISONS

AVEC LES RÉSULTATS DE CALCUL

Ces campagnes de mesures ont porté de manière détaillée sur trois ouvrages.

- Le premier est le pont des **FS** – *chemins de fer italiens* – enjambant la rivière **Brenta**, sur la ligne **Milano-Venèzia**,
- Le deuxième est un pont de l'ancien réseau des **ČSD** – *chemins de fer Tchécoslovaques* – enjambant la rivière **Váh**, près de **Šala**, sur la ligne **Marchegg-Szob**,
- Le troisième est un pont des **PKP** – *chemins de fer polonais* – au lieu-dit **Zawady**, sur la ligne **Warszawa-Katowice**.

D'autres ouvrages ont fait l'objet de campagnes de mesure limitées, néanmoins intéressantes.

Nous résumons les caractéristiques géométriques principales de tous ces ouvrages dans le tableau 2.

Ces campagnes de mesure avaient pour objectifs principaux :

- la mesure des forces latérales sur le pont,
- l'enregistrement du comportement du pont sous l'influence des forces latérales mesurées, notamment les accélérations et les déplacements latéraux,
- la détermination de l'effet du type de convoi et de sa vitesse de circulation sur les forces latérales et sur le comportement du pont.

Au pont des **FS**, des séries d'essais ont été mesurées avec la rame d'essai grande vitesse **ETR 500**, des trains commerciaux classiques – *trains de marchandises, trains à voyageurs, la rame Pendolino ETR 450* –. Lors de ces mesures, la vitesse maximale de circulation était de **200 km/h**.

Au pont des **ČSD**, les mesures ont été effectuées à l'aide d'une rame tractée par une locomotive du **type 350 (Bo-Bo)** circulant à des vitesses comprises entre **20 et 180 km/h**, ainsi que de nombreux trains commerciaux de marchandises et de voyageurs circulant à des vitesses atteignant **120 km/h**.

Au pont des **PKP**, outre des mesures effectuées à l'aide de trains commerciaux de voyageurs atteignant **160 km/h**, de nombreuses mesures ont été également effectuées sous une rame spéciale composée d'une voiture de mesure placée entre deux locomotives du **type EP 09 (Bo-Bo)** circulant à des vitesses comprises entre **5 et 200 km/h**.

Pour ces trois ouvrages, les mesures relevées étaient essentiellement constituées des valeurs d'accélération, de déplacement et de forces latérales dans le pont, des valeurs d'accélérations latérales et verticales dans la locomotive et, le cas échéant, la voiture de mesure de la rame de mesure. Des selles spéciales de mesure de charge – *base-plates des BR* – ont été placées sous les rails au milieu de la travée étudiée, afin d'enregistrer l'amplitude et la répartition des forces horizontales au rail. Les valeurs ont été filtrées à **20 Hz**; en effet, les valeurs non filtrées ne sont pas représentatives de déformations de la superstructure. D'autres ouvrages ont fait l'objet de campagnes réduites, limitées au trafic normal et sans l'usage des selles de mesure.

Le tableau 3 résume les valeurs des fréquences propres des superstructures obtenues pour les trois premiers ouvrages par les programmes **VAMPIRE**, **IDTBS** et **SNCB**, ainsi que celles obtenues par l'application de la méthode des travaux virtuels (calcul manuel), de même que celles mesurées.

Le tableau 4 reprend, à titre d'exemple, les valeurs des déplacements, des accélérations et des efforts latéraux relatifs au pont des **FS**, calculées par les mêmes programmes, d'une part, et mesurées, d'autre part.

Le tableau 5 donne les forces latérales maximales mesurées à l'aide des selles de mesure pour ces mêmes trois ouvrages.

Pour pouvoir comparer les valeurs calculées et mesurées, il importe de tenir compte des éléments suivants :

- pour les déplacements latéraux :

l'emplacement du point considéré est important – *centre de gravité d'une poutre maîtresse, membrure supérieure, membrure inférieure (cfr le schéma du pont des PKP donné à la figure 1)*.

- pour les accélérations transversales au pont :

la même remarque s'impose ; en outre, le rôle du filtrage est essentiel.

- pour les accélérations verticales et transversales sur les véhicules :

les valeurs dépendent de l'endroit où elles sont relevées – *dans une caisse, sur un châssis de bogie, sur un essieu*. On notera que les valeurs de l'accélération relevées dans les caisses de véhicule dépassent souvent les normes de confort souhaitées.

- pour les efforts latéraux :

il convient de souligner que ces efforts diffèrent selon qu'ils se rapportent à une roue, à un essieu, à un châssis de bogie, d'un coté, ou à une selle de mesure, à une traverse (deux selles), à un ensemble de quatre traverses (huit selles) ; cette dernière valeur se rapproche le plus de la force totale exercée sur la voie par un essieu.

4. – ÉTUDES PARAMÉTRIQUES

Au vu des résultats obtenus, le **Comité d'Experts** a décidé de procéder à une étude paramétrique. Compte tenu des disponibilités de travail de chacun des rédacteurs de programme, cette mission a été confiée au représentant de **BRR** – *British Rail Research*.

Les calculs ont été menés en deux phases successives.

Au cours de la première, le Comité a sélectionné un ensemble de valeurs pour chacun des paramètres considérés dans les modèles :

- Pour les ponts :

- portées : **20, 33, 54, 90 et 120 m**,
- rapports « flèche transversale/portée » – *expression de la rigidité transversale* : **1/4 000, 1/10 000 et 1/20 000**,
- masses par unité de longueur : **2, 6 et 10 tonnes/m**.

- Pour les véhicules, trois types de train caractéristique ont été pris en compte :

- un train de marchandises – *une locomotive des BR du type 56 et 9 wagons UIC*,
- un train de voyageurs – *une locomotive du type E444 et 5 voitures UIC*,

TABLEAU 2

Paramètres typiques des ponts ayant fait l'objet des mesures dans le comité D 181

Pont	Description				Dimensions				Poids			Ballastée
	Type	Tablier	Nb voies	Biais	Portée effective «l» [m]	Hauteur «h» axes des membrures [m]	Largeur «b» axes des membrures [m]	Centre poutre [m]	Total [t]	Total [t/m]	Tablier [t/m]	Oui/Non
CD	Treillis tablier sup	Longerons	1	0°	31,30	3,300	2,600	3,13	104	3,32		Non
FS	Treillis	Longerons	1	22°	52,08	7,000	5,000	4,34	177	3,40	2,40	Non
PKP	Bow-string	Ballasté	1	0°	75,00	12,500	5,000	–	550	7,32	6,20	Oui
BR Brotherton Pont 9	Treillis	Longerons	2	25°	73,91	8,020	9,296	3,81	783	10,33	2,74	Non
BR Brotherton Pont 9 (renforcé)	Treillis	Longerons renforcés	2	25°	73,91	8,020	9,296	3,81	862	11,38	4,30	Non
BR Doncaster Pont 332	Treillis	Longerons renforcés	2	0°	56,39	6,415	8,690	3,05	509	9,00	5,32	Non
SNCB	Treillis	Longerons	1	0°	119,25	10,500	5,400	6,625	657	5,51	3,00	Non
BR Newark Dyke Pont 278	Treillis	Longerons renforcés	1	0°	80,03	8,039	5,029	3,05	494	6,17	3,39	Non

TABLEAU 3
Comparaison des fréquences propres

Pont FS					
Mode	VAMPIRE (BRR) Grande-Bretagne	SNCB Belgique	IDTBS (FS) Italie	Calcul manuel (CFF) Suisse	Mesures
Premier mode latéral Tablier seulement	2,49	2,49	2,90	2,70	2,50
Premier mode vertical	4,61	–	4,51	4,80	4,70
Premier mode latéral Ensemble du pont	4,94	–	5,40	4,40	5,00
Second mode latéral Tablier seulement	9,38	9,96	9,20	9,96	–

Pont CD					
Mode	VAMPIRE (BRR) Grande-Bretagne	SNCB Belgique	IDTBS (FS) Italie	Calcul manuel (CFF) Suisse	Mesures in situ
Premier mode latéral Ensemble du pont	3,9	3,2	4,3	3,7	3,2
Premier mode vertical	7,1	–	7,5	6,9	7,7
Second mode latéral Ensemble du pont	9,3	12,8	9,2	6,1	8,9

Pont PKP					
Mode	VAMPIRE (BRR) Grande-Bretagne	SNCB Belgique	IDTBS (FS) Italie	Calcul manuel (CFF) Suisse	Mesures in situ
Premier mode latéral Tablier et arc en phase	1,11	1,16	1,05	1,2	1,16
Premier mode latéral Tablier et arc déphasés	1,66	–	1,31	1,84	1,55
Premier mode vertical antisymétrique	1,99	–	2,04	2,03	–
Second mode vertical symétrique	3,11	–	3,24	3,26	3,28

TABEAU 4
Comparaison calculs/mesures concernant la rame d'essai ETR 500

Pont FS											
Type	IDTBS (FS)			VAMPIRE b(BR)			SNCB			Site	Mesuré
Filtre [Hz]	Aucun			Passe-bas 20 Hz			2 premiers modes			Aucun	20
Vitesse [km/h]	180	300	350	180	300	350	180	300	350	180	180
Déplacement latéral du point δ_H [mm] : @1/2 de la poutre gauche	0,34	0,61	0,83	0,68	0,84	0,86	0,65	0,66	0,74	0,85	0,85
@1/2 de la poutre droite	0,56	0,95	1,12	0,68	0,84	0,86	0,65	0,66	0,74	-	-
Accélération latérale pont [m/sec ²] : @1/2 de la poutre gauche	19,0	21,5	23,7	0,76	0,82	1,56	0,55	1,3	1,6	18,0	3,05
@1/2 de la poutre droite	22,5	25,45	26,7	0,78	0,82	1,56	0,55	1,3	1,6	-	-
Accélération latérale de la caisse de loco au-dessus du bogie [m/sec ²]	1,24	2,07	5,49	0,27	0,42	0,40	0,13	0,17	0,19	-	0,75
Force latérale [kN] : - Essieu de loco	13,82	25,0	34,86	23,9	28,3	43,2	-	-	-	-	(50)*
- Bogie de loco	-	-	-	-	-	-	19	62	85	-	-
- Essieu voiture	6,2	8,2	13,5	15,2	17,0	36,1	-	-	-	-	(15)*
- Bogie voiture	-	-	-	-	-	-	21	47	57	-	-
@ Les valeurs différentes concernant les poutres de gauche et de droite sont imputables au biais important du pont. * Charge de roue et non pas charge par essieu.											

TABLEAU 5
Forces latérales maximales enregistrées aux selles de mesure

Pont	1 selle				4 traverses (c'est-à-dire 8 selles)			
	Type de train	Vitesse [km/h]	Filtre [Hz]	Force kN	Type de train	Vitesse [km/h]	Filtre [Hz]	Force kN
FS	ETR 450	100	30	1,60	ETR 450	100	30	6,3
	IC pass	140	30	4,33	IC pass	140	30	11,00
	Marchandises	116	30	9,50	Marchandises	116	30	23,5
					ETR 500 rame essai	180	20	[50] *
ČD	Express voyageurs	120	30	20,1	Express voyageurs	120	30	26,5
	Marchandises	50	30	14,4	Marchandises	50	30	25,1
	Rame d'essai	172	30	23,7	Rame d'essai	180	30	40,5
PKP	Express voyageurs	119	20	18,48	Express voyageurs	119	20	43,38
	Marchandises	-	-	-	Marchandises	-	-	-
	Rame d'essai	164	20	19,50	Rame d'essai	182	20	40,42

[*] Charge de roue enregistrée sur la voiture de mesure.

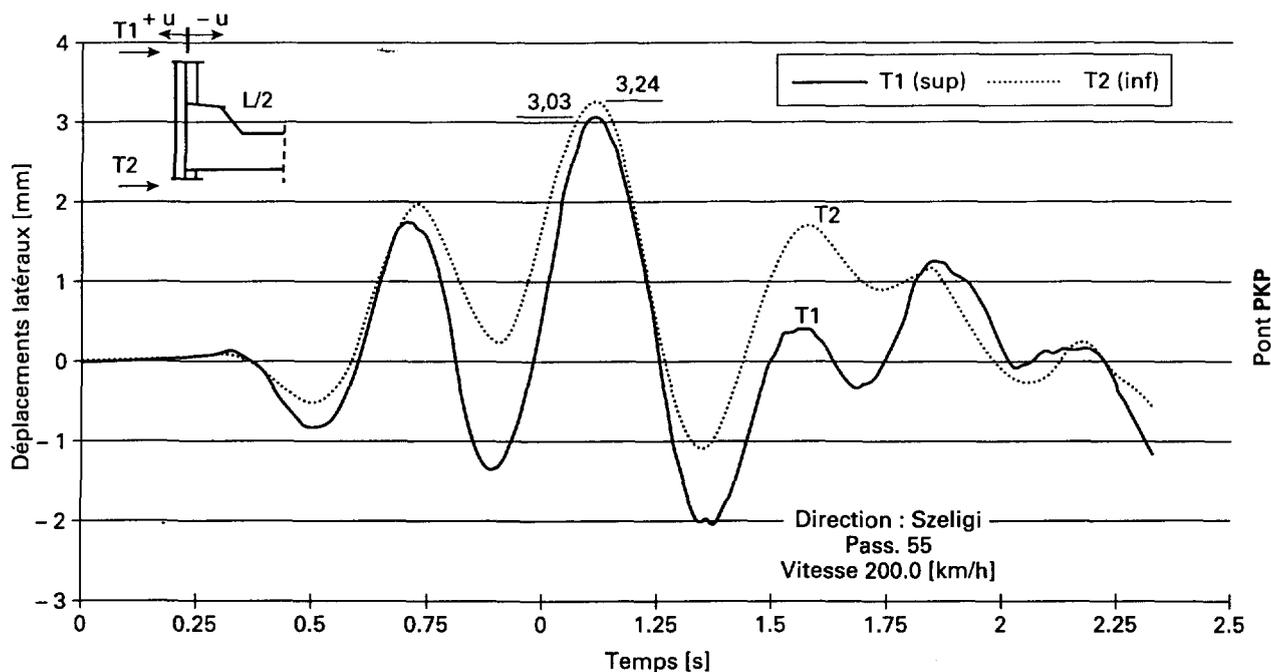


Fig. 1 – Déplacements latéraux sous convoi d'essai

- un train à grande vitesse – la rame *ETR 500 des FS*; par manque de données concernant la suspension latérale, il n'a pas été possible d'effectuer les calculs pour les rames TGV de la SNCF.
- Pour la voie, trois qualités caractéristiques de voie ont été considérées quant aux irrégularités :
 - la voie d'une ligne parcourue uniquement par des trains de marchandises,
 - la voie d'une ligne parcourue par des trains de voyageurs,
 - la voie d'une ligne grande vitesse de la DB.

Des longueurs de tronçons de voie de **500 m** ont été envisagées afin de présenter une longueur d'au moins **100 m** de part et d'autre du pont, suffisante pour initialiser le comportement des véhicules à l'entrée de l'ouvrage, d'une part, et pouvoir observer les oscillations naturelles à la sortie du pont, d'autre part.

- Pour le contact roue-rail :
 - inclinaison de rail : **1/20**,
 - cône de la roue (tangente au contact roue-rail, dans le sens latéral) : **0,05, 0,2 et 0,4**,
 - coefficient de frottement roue-rail : **0,3**.

Il était important d'effectuer les calculs à des instants suffisamment rapprochés les uns des autres de manière à approcher les valeurs maximales (valeurs de crête) qui, seules, sont retenues comme résultats de calcul.

La seconde phase a permis, sur base des résultats de la première, de déterminer les paramètres les plus influents quant au comportement dynamique de l'ouvrage – la longueur de la travée, sa rigidité transversale, sa première fréquence propre de déformation latérale, le nombre de travées successives si l'ouvrage est un viaduc, la qualité de la voie, ...

Dans le même ordre d'idée, différentes vitesses de circulation ont été considérées :

- pour les trains de marchandises : **60, 100 et 120 km/h** ;
- pour les trains de voyageurs classiques : **200 km/h** ;
- pour les trains à grande vitesse : **350 km/h**.

Il n'est pas opportun de reproduire ici l'ensemble des résultats obtenus. Cependant, à titre d'exemple, nous reproduisons les figures suivantes :

- **Figure 2** : le diagramme donnant la variation de l'amplitude maximale (de crête) de la force latérale totale, en fonction de la déviation standard des irrégularités de la voie dans le sens transversal, et ce, pour chacune des trois valeurs de cône de roue et la vitesse de circulation de **200 km/h**.
- **Figure 3** : idem figure 2 pour le cas du train à grande vitesse.

L'influence marquante des irrégularités de la voie ainsi que de la cône de roue a été clairement mise en évidence. Il est, par exemple, fortement conseillé de limiter cette cône de roue à la valeur de **0,05** pour les trains à grande vitesse, afin d'éviter l'apparition de forces latérales inacceptables; c'est cette valeur que le **Comité d'Experts** a retenue dans ce cas pour la détermination des valeurs maximales des forces latérales.

5. – CONCLUSIONS

Le tableau 6 constitue une synthèse des résultats de l'étude paramétrique sous la forme de l'intervalle statistique ($F_m + 3s$) de l'ensemble des valeurs maximales des forces latérales – appliquées au niveau du plan de roulement des rails, perpendiculairement à l'axe de la voie – calculées pour différents types de train et différentes vitesses de circulation.

Ces études nous ont permis d'énoncer trois critères :

- **Critère 1** : Critère des forces latérales à prendre en compte :
 - pour des éléments courts – *longerons non reliés par un contreventement de lacet*; il s'agit ici des **efforts aux roues** de la figure 4 qui sont au nombre de deux pour tenir compte de l'éventualité d'apparition simultanée de ces efforts (l'apparition simultanée de plus de deux forces est hautement improbable).
 - pour des éléments courts – *des longerons reliés par un contreventement ou par une dalle de platelage*; il s'agit ici des **efforts aux essieux** de la figure 4.

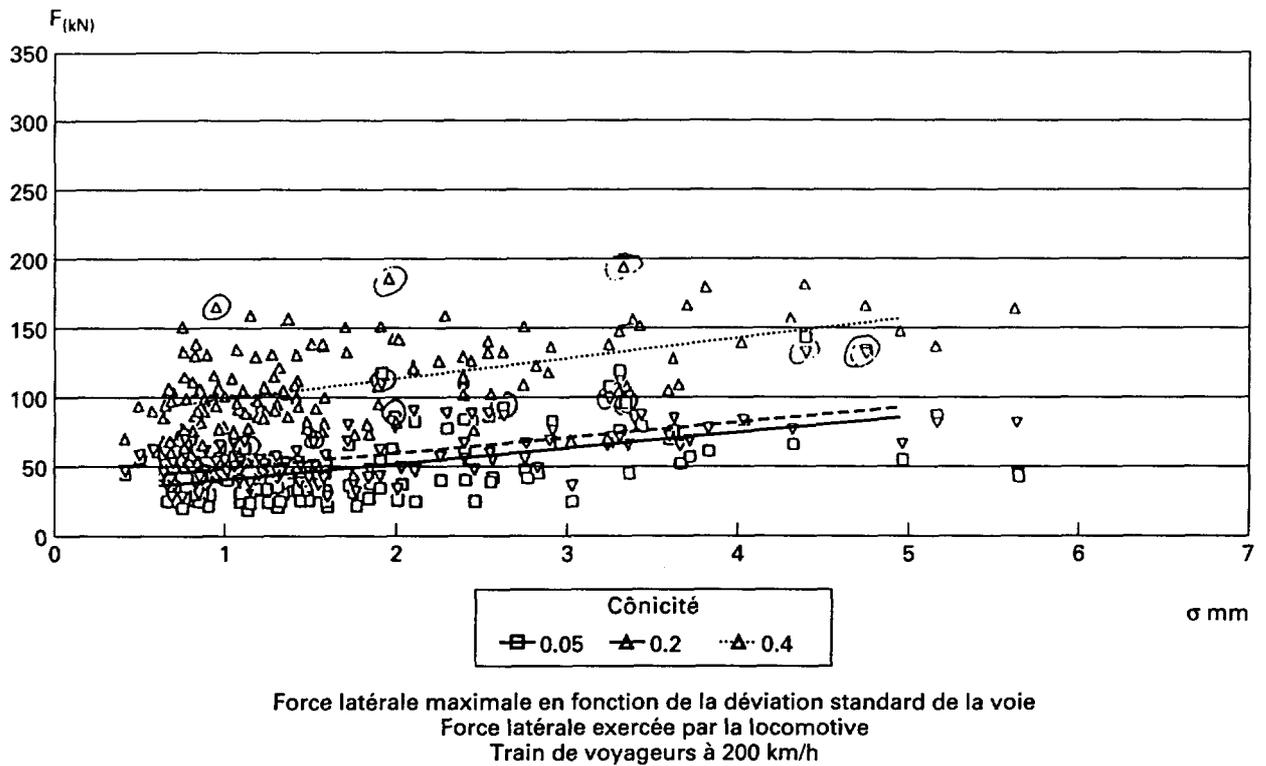


Fig. 2 – Étude paramétrique. Exemples de la force latérale totale de crête produite par un véhicule

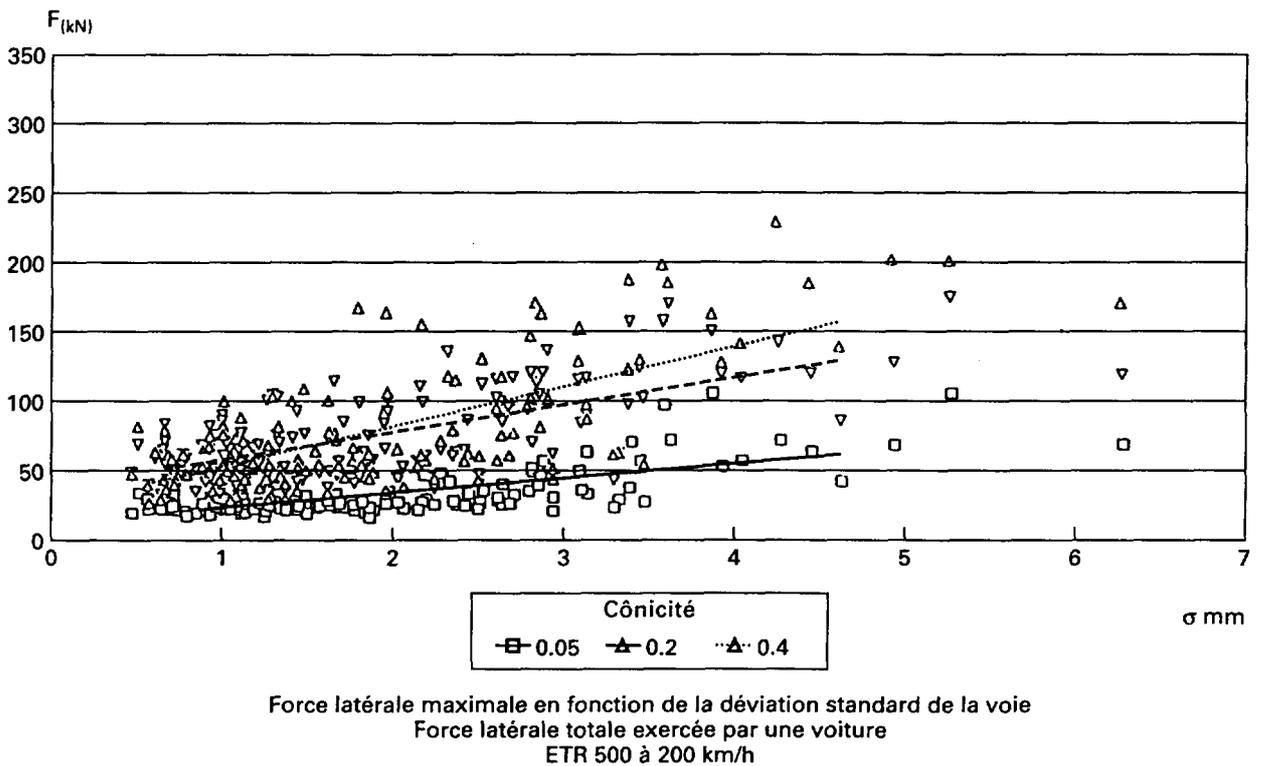


Fig. 3 – Étude paramétrique. Exemples de la force latérale totale de crête produite par un véhicule

TABLEAU 6

Tableau de synthèse des résultats de l'étude paramétrique donnant les forces latérales maxima statistiques ($F_m + 3s$) en kN

Force latérale maximum [kN] $F_m + 3s$	Locomotive Total	Voiture/Wagon Total	Locomotive Essieu	Voiture/Wagon Essieu	Locomotive Roue	Voiture/Wagon Roue	Valeurs de conicité	Déviaton standard de voie mm
Marchandises 60 km/h	50	60	20	35	20	20	0,05 0,2 0,4	0,49 - 6,2
Marchandises 100 km/h	90	160	25	90	25	50	0,05 0,2 0,4	0,45 - 6,2
Marchandises 120 km/h	75	110	30	60	25	45	0,05 0,2 0,4	0,43 - 6,2
Voyageurs 200 km/h	140	50	35	30	40	25	0,05	0,42 - 6,1
Grande vitesse 350 km/h	125	125	75	50	70	45	0,05	0,42 - 6,1
Voyageurs 200 km/h (roues usées)	190	80	65	30	40	35	0,2 0,4	0,42 - 6,1
Grande vitesse 350 km/h (roues usées)	330	225	140	85	90	55	0,2 0,4	0,42 - 6,1

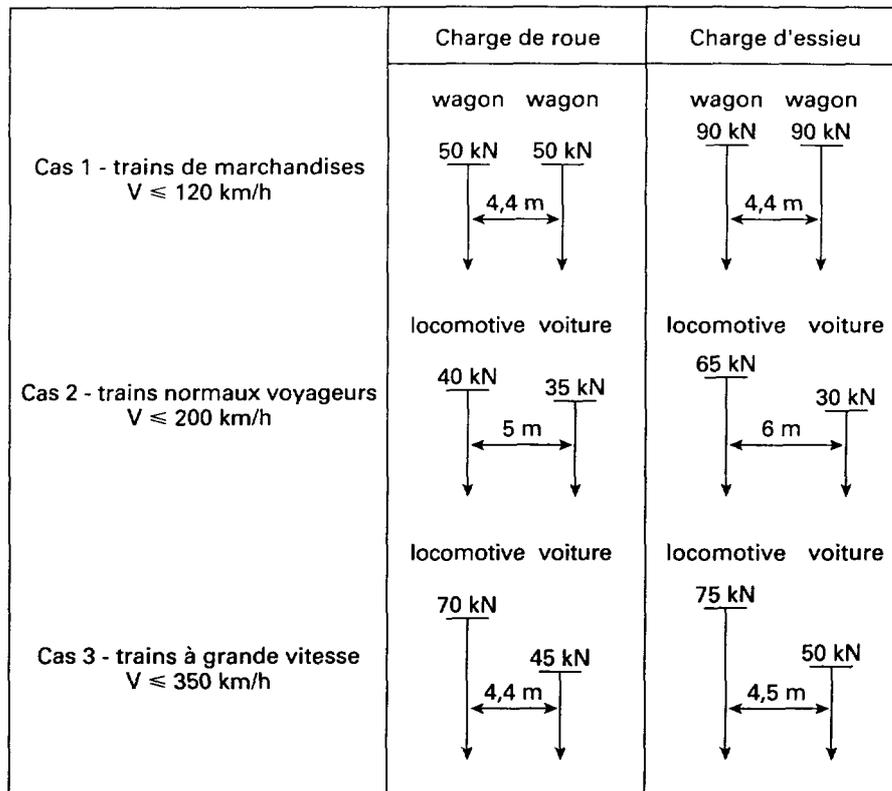


Fig. 4 – Forces latérales de roue et d'essieu pour les ponts

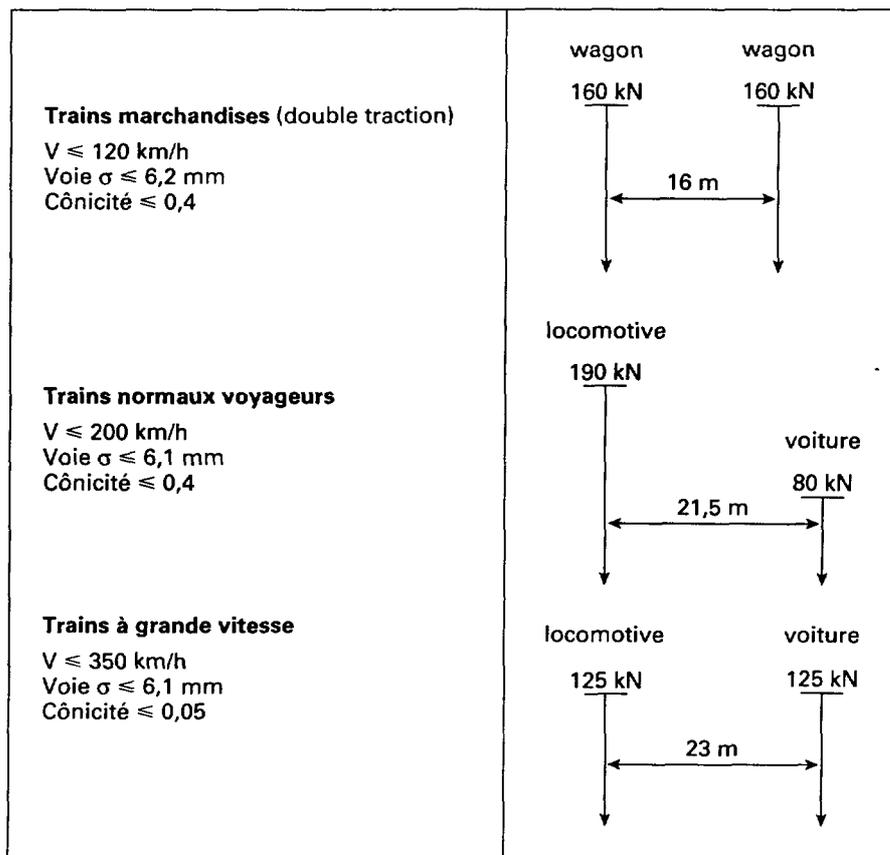


Fig. 5 – Actions des véhicules au plan de roulement des rails à l'aplomb de leur centre de gravité

- pour l'étude de la déformation latérale d'une travée, et donc aussi de la voie – *si importante pour la circulation à grande vitesse* – ou pour la détermination de la force latérale totale sur la structure ; on fera la distinction entre :
 - les petites portées : on prendra les efforts de la figure 4, ces efforts pouvant être répartis sur une longueur de voie correspondante à 4 traverses pour une voie ballastée et à 3 traverses pour une voie à fixation directe – *sans ballast*.
 - les portées pouvant supporter un véhicule entier - *locomotive ou voiture* : on prendra la **plus grande** des forces représentées à la figure 5, qui peut être répartie uniformément sur la longueur du véhicule.
 - les portées pouvant supporter au moins deux véhicules : on prendra les forces de la figure 5 qui peuvent également être réparties uniformément sur la longueur de deux véhicules.

Confronté à l'ensemble des ponts examinés par le Comité ou pour lesquels les membres du Comité disposaient de données suffisantes, ce critère s'est avéré trop peu sélectif. Aussi a-t-il été jugé opportun de lui associer les deux critères suivants.

– **Critère 2** : Critère de la première fréquence propre de déformation transversale du pont.

Afin d'éviter l'apparition de résonances du mouvement latéral des véhicules, il convient de fixer une valeur limite inférieure à la première fréquence propre de vibration latérale de la travée étudiée f_{lt} . Or la fréquence de résonance du mouvement latéral est comprise entre 0,5 et 0,7 Hz pour les voitures, et entre 0,7 et 1 Hz pour les locomotives. Nous proposons, dès lors, en sécurité,

$$f_{lt} \geq 1,2 \text{ Hz.}$$

– **Critère 3** : Critère de la rigidité transversale du pont.

La valeur supérieure de la déformabilité latérale du pont doit être limitée afin de maintenir les accélérations latérales des véhicules qui le franchissent dans des limites acceptables. D'autre part, la valeur inférieure de cette déformabilité est fixée par le coût de l'ouvrage.

Sur la base de la figure 6 où on a reporté la valeur du moment d'inertie transversale I_t en fonction de la portée L pour chacun des ouvrages considérés par le **Comité d'Experts ERII D181** et par le **Dr Ing A. DÖRING** (Allemagne) dans sa thèse de Doctorat, le **Comité** estime raisonnable d'imposer le critère suivant :

$$\frac{L^3}{E \cdot I_t} \leq 3 \left[\frac{\text{mm}}{\text{kN}} \right]$$

où on représente par :

L : la portée de la travée considérée, exprimée en mm,

E : le module d'élasticité, exprimé en kN/mm²,

I_t : le moment d'inertie transversal de la travée, exprimé en mm⁴.

Ce critère est plus contraignant que les propositions formulées dans le projet ENV 1991-3 ou dans le projet de Code UIC 776-2R ou encore dans la Thèse de Doctorat du **Dr Ing A. DÖRING**.

Pour les nouveaux ouvrages à construire, le **Critère 1** pourrait être formulé plus simplement comme suit :

- Pour les portées inférieures à 20 m ainsi que les éléments courts de pont – *tels que les longerons* – et les vitesses inférieures à 200 km/h, les forces latérales retenues – *appli-*

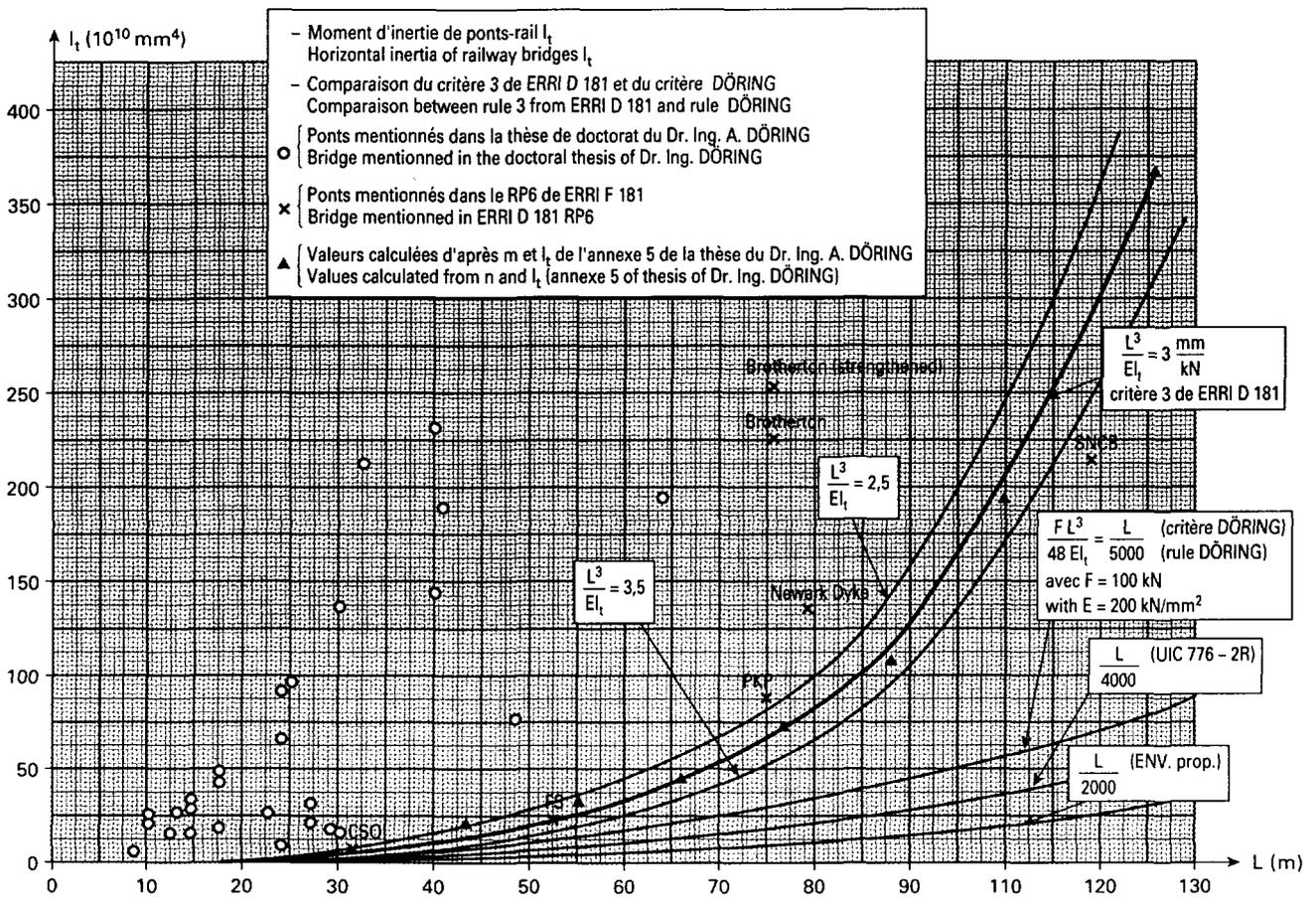


Fig. 6

quées au niveau du plan de roulement des rails, perpendiculairement à l'axe de la voie et à l'endroit le plus défavorable – seraient celles représentées à la figure 7 ci-dessous.

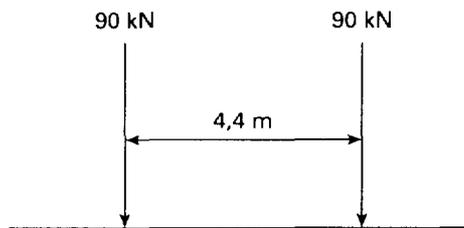


Fig. 7

Chacune de ces forces est à répartir sur une longueur égale à :

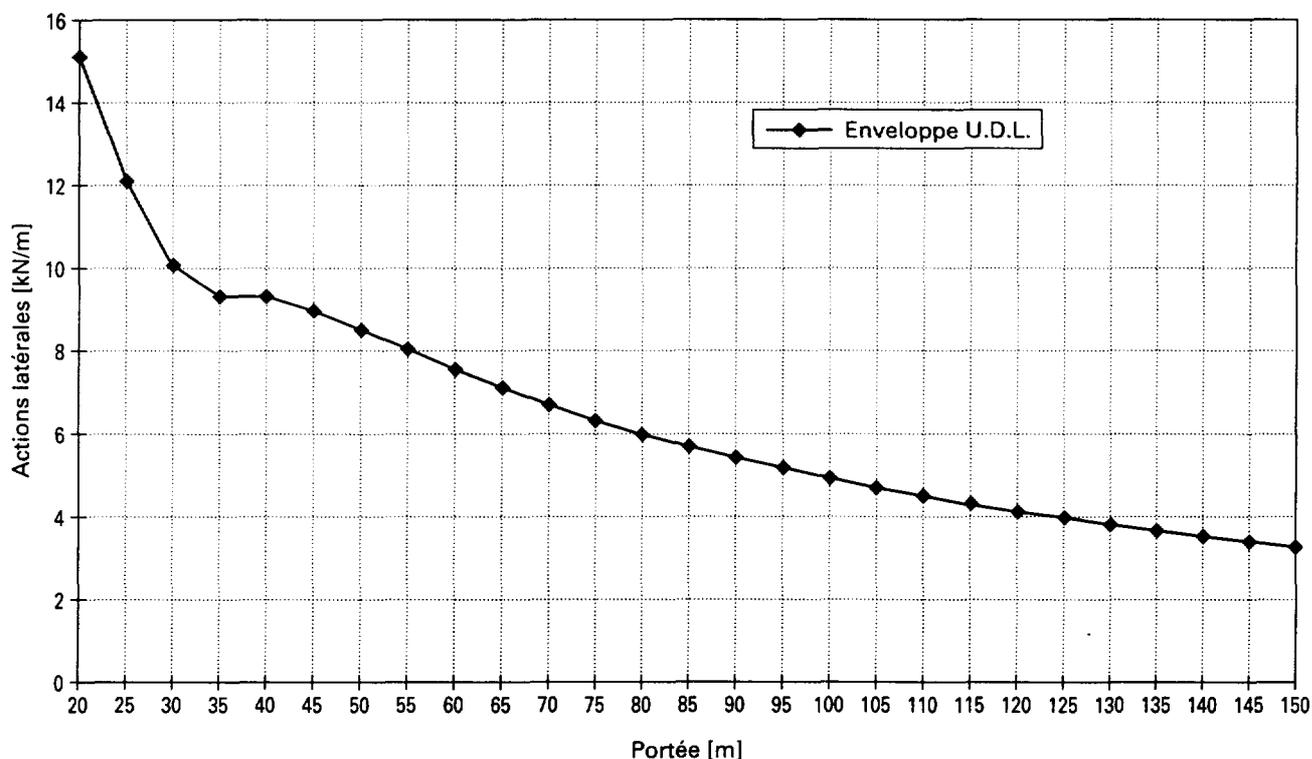
- 1,8 m pour la voie ballastée,
 - 1,2 m pour la pose directe.
- Pour les portées inférieures à 20 m et les vitesses supérieures ou égales à 200 km/h, ces forces devraient être multipliées par un coefficient de classification α égal à 0,91

pour tenir compte du fait que les convois les plus rapides ne sont pas les plus lourds. Ce coefficient α est mentionné au § 6.3.2 du projet de Norme Européenne ENV 1991-3 « Basis of design and actions on structures – Part 3 : Traffic loads on bridges ».

- Pour les portées supérieures ou égales à 20 m et les vitesses inférieures à 200 km/h, les forces concentrées seraient remplacées par une action uniformément répartie sur toute la longueur de la travée – figure 8 – ce qui simplifie les calculs, notamment de la déformation latérale du pont et donc aussi de la voie.
- Pour les portées supérieures ou égales à 20 m et les vitesses supérieures ou égales à 200 km/h, les forces concentrées seraient également remplacées par une action uniformément répartie sur toute la longueur de la travée – figure 8 –, et le coefficient de classification α serait aussi égal à 0,91.

Les actions données ci-dessus intègrent les effets dynamiques et ne doivent donc plus être multipliées par le coefficient dynamique ϕ .

Il est par contre essentiel de rappeler que ces actions impliquent le respect des valeurs limites données plus haut en matière d'irrégularités de la voie et de cœncité de roue.



* Action équivalente quant à la flèche transversale.

Fig. 8 – Action latérale uniformément répartie (UDL) à utiliser pour les nouveaux ponts de portée ≥ 20 m