

# COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES DALLES DE ROULEMENT DES PONTS EN BÉTON SOLLICITÉS PAR LE TRAFIC ROUTIER

THÈSE N° 1964 (1999)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

**Claude BROQUET**

Ingénieur civil diplômé EPF  
de nationalité suisse et originaire de Movelier (JU)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. E. Brühwiler, directeur de thèse  
Prof. M. Badoux, rapporteur  
Dr S.F. Bailey, rapporteur  
Dr R. Cantieni, rapporteur  
Prof. M. Fafard, rapporteur  
Prof. F. Frey, rapporteur

Lausanne, EPFL  
1999



# Summary

The management of a network of existing road bridges involves interventions in order to maintain safety and the priority of these interventions is often determined by safety criteria. During the evaluation of safety, the dynamic effect of traffic actions is considered using equivalent static loads determined by multiplying the effect calculated using traffic load models by a dynamic amplification factor. During the evaluation of a deck slab, the application of inappropriate dynamic amplification factors could have significant financial implications, all the more since the local dynamic effects of overloaded trucks are determinant for this type of structural element.

Dynamic amplification factors defined in codes have usually been derived from the measurement of global traffic action effects in the main structural elements of bridges. Unfortunately, local dynamic effects in deck slabs have not been studied in detail until now. A better understanding of the dynamic behaviour of deck slabs will lead to the definition of more accurate dynamic amplification factors and avoid the use of values that are too conservative.

The behaviour of deck slabs of six typical Swiss highway bridges has been simulated in order to study their dynamic response during the passage of trucks. The structural arrangement of the deck slab was different for each of the six bridges. A parametric study was based on the simulation of various scenarios involving the passage of trucks for various combinations of speed, path and road surface roughness. Deck slab response was obtained by numerical simulation based on models of the bridge, truck and road surface. This system was resolved using a prediction - correction algorithm that considers the dynamic interaction between a bridge and trucks. Dynamic amplification factors were subsequently calculated from strains and deflections obtained from independent static and dynamic simulations.

The simulation of numerous scenarios enabled the evaluation of the influence of different parameters on the dynamic response of a deck slab:

- The road surface roughness was found to be one of the most important parameters, with an increase in roughness leading to an increase in dynamic amplification factors.
- An overloaded truck produces a lower dynamic amplification factor in a deck slab than an empty truck.
- The truck speed influences the dynamic interaction, but a clear relationship between speed and dynamic amplification factor could not be identified.
- The maximum dynamic amplification factor does not vary significantly from one point to another over a deck slab in a girder bridge.
- The structural arrangement of a deck slab in a girder bridge has little influence on dynamic amplification factors. Overall, the different deck slabs on the girder bridges studied were all equally sensitive to the dynamic effects of road traffic.
- In many cases considered for the framed slab bridge, the maximum dynamic amplification factor was found to occur over the supports. For such bridges, the sensitivity of the deck slab to the dynamic effects of road traffic is not uniform.

Finally, two approaches to evaluating deck slabs of existing road bridges are proposed. The first approach is only applicable in certain situations and involves a simplified evaluation using an updated traffic load model and a dynamic amplification factor. In situations where a simplified evaluation is not applicable, the second approach is to evaluate a deck slab using numerical or experimental analyses.

## Version abrégée

La gestion du parc des ponts existants nécessite des interventions destinées à rétablir la sécurité structurale des ponts-route. Les priorités dans ces interventions sont souvent déterminées par des critères de sécurité. Pour l'évaluation de la sécurité, les actions dynamiques du trafic sont remplacées par des charges statiques équivalentes normalisées correspondant à des modèles de charge de trafic majorés par un facteur d'amplification dynamique. Lors de l'évaluation des dalles de roulement, l'utilisation de facteurs d'amplification dynamique inadéquats peut avoir des conséquences financières importantes, d'autant plus que les efforts dans ces éléments sont principalement dus aux charges locales des camions lourdement chargés qui provoquent des vibrations importantes.

Les facteurs d'amplification dynamique normalisés sont fixés, la plupart du temps, sur la base de résultats d'essais réalisés sur des ponts et sont dérivés des effets globaux dans les éléments porteurs principaux de la structure. Malheureusement les effets dynamiques locaux dans les dalles n'ont jamais été étudiés en détail. Une meilleure connaissance des facteurs d'amplification dynamique pour les dalles améliorerait la précision de l'évaluation et éviterait d'utiliser des valeurs trop conservatrices.

Le comportement dynamique de la dalle de roulement de six ponts représentatifs du parc des ponts autoroutiers suisses a été analysé pour déterminer les réponses provoquées par le passage d'un camion. Ces ponts se différencient principalement par le système statique de leur dalle de roulement. Différentes situations de risque faisant intervenir des camions circulant sur des profils de chaussée à différentes vitesses en suivant plusieurs trajectoires ont été simulées dans le cadre d'une étude paramétrique. Pour obtenir les réponses dans la structure, une approche numérique est utilisée dans laquelle le pont, le véhicule et le profil de la chaussée sont modélisés. L'algorithme de résolution du système est basé sur un schéma de prédiction - correction qui considère l'interaction dynamique entre le pont et les véhicules. Les réponses statiques et dynamiques de différents efforts et déplacements provoqués dans la dalle de roulement par le passage d'un camion sont calculées lors d'analyses statiques et dynamiques indépendantes et permettent de déterminer les facteurs d'amplification dynamique.

Les différentes situations de risque simulées permettent d'évaluer l'influence de chaque paramètre dans les réponses dynamiques des dalles de roulement:

- La planéité de la chaussée apparaît comme un des paramètres qui affecte le plus les facteurs d'amplification dynamique. Une détérioration de la planéité due à l'usure du revêtement augmente les réponses dynamiques.
- La masse du camion influence favorablement les facteurs d'amplification dynamique puisque le véhicule chargé produit des facteurs d'amplification dynamique plus faibles que le camion vide.
- Les vitesses de passage du camion jouent un rôle dans l'interaction dynamique, mais aucune tendance entre les facteurs d'amplification dynamique et la vitesse ne peut être dégagée.
- Aux différents points répartis sur la dalle de roulement des ponts-poutre, les valeurs maximales atteintes par les facteurs d'amplification dynamique, pour les diverses situations de risque simulées, sont uniformes.
- Les différents systèmes statiques des dalles de roulement des ponts-poutre influencent peu les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants. Globalement les différentes

dalles de roulement des ponts-poutre ont une sensibilité uniforme vis-à-vis des sollicitations dynamiques provoquées par le trafic routier.

- Pour diverses situations de risque simulées sur un pont-cadre, des facteurs d'amplification dynamique plus importants sont observés dans les sections sur les appuis. Dans ces cas particuliers, la sensibilité de la dalle n'est pas uniforme.

Finalement une évaluation des dalles de roulement des ponts existants est proposée en deux volets. Le premier propose, à certaines conditions, une évaluation simplifiée basée sur une analyse statique dans laquelle les effets sont déterminés par l'application d'un modèle de charge actualisé majoré par un facteur d'amplification dynamique. Si l'évaluation simplifiée ne peut pas être appliquée, le deuxième volet propose une évaluation de la dalle de roulement basée sur une analyse dynamique dans laquelle intervient une approche numérique ou expérimentale.



# Table des matières

<b>Summary .....</b>	<b>i</b>
<b>Version abrégée.....</b>	<b>iv</b>
<b>Préface .....</b>	<b>xix</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>xxi</b>
<b>Notations.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ingénierie en ouvrages d'art.....	1
1.2 Actions sur les ponts.....	1
1.2.1 Généralités .....	1
1.2.2 Trafic routier .....	2
1.3 Dimensionnement et évaluation des ponts .....	2
1.4 Motivations et bénéfices.....	3
1.4.1 Importance du facteur d'amplification dynamique.....	3
1.4.2 Exemples d'évaluation de ponts .....	4
1.5 Objectifs de la recherche .....	5
1.6 Démarche.....	6
1.6.1 Description .....	6
1.6.2 Justifications.....	7
<b>2 État des connaissances.....</b>	<b>9</b>
2.1 Introduction .....	9
2.2 Nature des vibrations générées sur les ponts par les véhicules .....	10
2.2.1 Explication du phénomène.....	10
2.2.2 Les ponts .....	11
2.2.3 Le profil de la chaussée.....	12
2.2.4 Les véhicules.....	13
2.2.5 Interaction des éléments contribuant au phénomène .....	14
2.3 Définitions du facteur d'amplification dynamique .....	15
2.4 Normes et codes de dimensionnement .....	17
2.4.1 Généralités .....	17
2.4.2 En Suisse .....	18
2.4.3 En Europe.....	19
2.4.4 Au Canada.....	19
2.4.5 Aux États-Unis.....	19
2.4.6 Au Japon .....	20
2.5 Études numériques .....	20
2.5.1 Généralités .....	20
2.5.2 Modèles de pont .....	21
2.5.3 Modèle du profil de la chaussée.....	21
2.5.4 Modèles de véhicule.....	22
2.5.5 Résolution du système dynamique.....	24
2.6 Études expérimentales.....	24
2.6.1 Généralités .....	24

2.6.2	Tests avec véhicules d'essai .....	25
2.7	Influence des paramètres sur les facteurs d'amplification dynamique.....	27
2.8	Remarques finales .....	28
2.8.1	Bilan .....	28
2.8.2	Conclusion .....	28
<b>3</b>	<b>Ponts en béton en Suisse .....</b>	<b>31</b>
3.1	Introduction .....	31
3.2	Caractéristiques des ponts autoroutiers suisses .....	31
3.2.1	Généralités .....	31
3.2.2	Le système statique .....	32
3.2.3	La portée et l'élancement des poutres principales .....	32
3.2.4	Le type de sections transversales .....	32
3.2.5	La largeur du tablier .....	33
3.2.6	Le nombre et la position des poutres principales .....	33
3.2.7	L'épaisseur des dalles .....	33
3.2.8	Les entretoises et les éléments secondaires.....	34
3.2.9	Remarques pour la conception des ponts représentatifs .....	34
3.3	Description des ponts représentatifs.....	35
3.3.1	Généralités .....	35
3.3.2	Pont C1.....	35
3.3.3	Pont C1P .....	35
3.3.4	Pont C2.....	35
3.3.5	Pont P1 .....	37
3.3.6	Pont P2 .....	37
3.3.7	Pont D1 .....	38
3.4	Profil de la chaussée.....	39
3.4.1	Généralités .....	39
3.4.2	Critères pour caractériser le profil de la chaussée.....	39
3.4.3	Niveau de qualité de la planéité et valeurs limites.....	39
3.4.4	Profils des ponts représentatifs .....	39
3.5	Remarques finales .....	40
<b>4</b>	<b>Trafic sur les routes suisses.....</b>	<b>41</b>
4.1	Introduction .....	41
4.2	Caractéristiques du trafic des poids lourds en Suisse.....	41
4.2.1	Composition du trafic.....	41
4.2.2	Agressivité du trafic des poids lourds.....	43
4.2.3	Remarques.....	43
4.3	Description des propriétés des camions représentatifs.....	43
4.3.1	Géométrie, masse .....	43
4.3.2	Les suspensions.....	46
4.3.3	Les pneus.....	49
4.4	Remarques finales .....	50
<b>5</b>	<b>Modélisations numériques.....</b>	<b>51</b>
5.1	Introduction .....	51
5.2	Logiciel d'éléments finis "CLEF" .....	52
5.2.1	Généralités .....	52
5.2.2	Méthode de résolution du système dynamique .....	52
5.2.3	Algorithme de résolution .....	53
5.3	Ponts représentatifs.....	55



5.3.1	Modèles	55
5.3.2	Caractéristiques dynamiques	58
5.3.3	Grandeurs analysées	59
5.4	Profils de chaussée	59
5.4.1	Modèle	59
5.4.2	Profils	60
5.5	Véhicules représentatifs	61
5.5.1	Modèle	61
5.5.2	Caractéristiques dynamiques	62
5.5.3	Grandeurs analysées	64
5.6	Étude paramétrique	64
5.6.1	Réponses statiques	64
5.6.2	Réponses dynamiques	65
5.6.3	Ampleur de l'étude	67
5.7	Précision des résultats des simulations	67
5.7.1	Influence de la taille du maillage	67
5.7.2	Tests comparatifs avec des modèles partiels du pont C1	70
5.7.3	Conclusions	72
5.8	Remarques finales	72
<b>6</b>	<b>Analyse des réponses dynamiques</b>	<b>75</b>
6.1	Introduction	75
6.2	Définition des facteurs d'amplification dynamique	76
6.3	Analyse des réponses dynamiques du pont C1	79
6.3.1	Généralités	79
6.3.2	Caractéristiques des réponses du pont	79
6.3.3	Facteurs d'amplification dynamique	82
6.3.4	FAD - Influence de la vitesse des véhicules	84
6.3.5	FAD - Influence du profil de la chaussée	86
6.3.6	FAD - Influence du type de véhicule	88
6.3.7	FAD - Influence de la masse d'un véhicule	90
6.3.8	Forces appliquées par le camion	92
6.3.9	Remarques	95
6.4	Analyse des réponses dynamiques des autres ponts-poutre	95
6.4.1	Pont C1P	95
6.4.2	Pont C2	97
6.4.3	Pont P1	98
6.4.4	Pont P2	99
6.5	Analyse des réponses dynamiques du pont-cadre	99
6.5.1	Généralités	99
6.5.2	Caractéristiques des réponses du pont-cadre	100
6.5.3	Facteurs d'amplification dynamique	102
6.5.4	FAD - Influence de la vitesse des véhicules	104
6.5.5	FAD - Influence de la rugosité du profil	107
6.5.6	FAD - Influence du type de véhicule	108
6.5.7	Remarques	110
6.6	Réponses dynamiques des dalles de roulement	111
6.6.1	Sensibilité des dalles de roulement	111
6.6.2	Influence des paramètres principaux sur les réponses dynamiques	112
6.7	Remarques finales	113

<b>7</b>	<b>Analyses particulières</b> .....	<b>115</b>
7.1	Introduction .....	115
7.2	Effet des non-linéarités matérielles sur les FAD .....	116
7.2.1	Généralités .....	116
7.2.2	Démarche .....	116
7.2.3	Modèle en deux dimensions .....	116
7.2.4	Résultats des simulations .....	118
7.2.5	Caractéristiques dynamiques .....	121
7.2.6	Discussion .....	122
7.3	Modèles proposés pour le camion à trois essieux .....	122
7.3.1	Généralités .....	122
7.3.2	Systèmes de suspensions et de liaisons des essieux tandem .....	122
7.3.3	Conception des modèles .....	123
7.3.4	Hypothèses de base .....	124
7.3.5	Mise en équations du modèle 12_A .....	125
7.3.6	Mise en équations du modèle 12_B .....	127
7.3.7	Simulations avec les modèles de camion à trois essieux .....	130
7.3.8	Discussion .....	132
7.4	Remarques finales .....	132
<b>8</b>	<b>Application des facteurs d'amplification dynamique</b> .....	<b>133</b>
8.1	Introduction .....	133
8.2	Portée des facteurs d'amplification dynamique .....	134
8.3	Application des facteurs d'amplification dynamique .....	135
8.4	Évaluation simplifiée des dalles de roulement des ponts .....	138
8.5	Évaluation détaillée des dalles de roulement des ponts .....	140
8.5.1	Généralités .....	140
8.5.2	Simulations numériques .....	140
8.5.3	Essais dynamiques in situ .....	140
8.6	Remarques finales .....	141
8.6.1	Préliminaire .....	141
8.6.2	Conclusions .....	141
<b>9</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>143</b>
9.1	Buts poursuivis .....	143
9.2	Bénéfice de l'étude .....	143
9.3	Approche retenue .....	144
9.4	Conclusions .....	145
9.5	Suggestions pour des travaux futurs .....	145
	<b>Bibliographie</b> .....	<b>147</b>
<b>A</b>	<b>Plans des ponts</b> .....	<b>153</b>
A.1	Pont-cadre .....	153
A.2	Pont C1 .....	154
A.3	Pont C1P .....	155
A.4	Pont C2 .....	156
A.5	Pont P1 .....	157
A.6	Pont P2 .....	158
<b>B</b>	<b>Caractéristiques dynamiques des ponts</b> .....	<b>159</b>
B.1	Ponts-poutre .....	159
B.2	Pont-cadre .....	160

---

<b>C</b>	<b>Modèles de véhicule .....</b>	<b>161</b>
	C.1 Camion 12_A en 2 dimensions (5 degrés de liberté) .....	161
	C.2 Camion 12_B en 2 dimensions (6 degrés de liberté).....	163
	C.3 Camion 12_A en 3 dimensions (9 degrés de liberté) .....	165
	C.4 Camion 12_B en 3 dimensions (11 degrés de liberté).....	167
	<b>Curriculum vitae.....</b>	<b>171</b>



# Liste des figures

Figure 1.1	Enveloppe des moments transversaux dans la dalle d'un pont-poutre .....	4
Figure 1.2	Enveloppe des moments transversaux dans la dalle d'un pont-caisson.....	5
Figure 2.1	Véhicule idéalisé .....	10
Figure 2.2	Éléments des ponts .....	12
Figure 2.3	Profil statique d'un pont.....	13
Figure 2.4	Éléments des véhicules.....	14
Figure 2.5	Découpage des réponses en régions .....	16
Figure 2.6	Réponse statique et dynamique .....	17
Figure 2.7	Coefficient dynamique proposé .....	18
Figure 2.8	Modèles de véhicule à un et deux degrés de liberté .....	23
Figure 3.1	Portées principales et élancements des ponts .....	32
Figure 3.2	Dimensions courantes des dalles de roulement.....	33
Figure 3.3	Variantes de bordure .....	34
Figure 3.4	Section du pont C1P 1:100.....	35
Figure 3.5	Pont C1 .....	36
Figure 3.6	Section du pont C2 1:100 .....	37
Figure 3.7	Section du pont P1 1:100 .....	37
Figure 3.8	Section du pont P2 1:100 .....	38
Figure 3.9	Pont D1 .....	38
Figure 3.10	Définition de la valeur d'angle $W$ .....	39
Figure 4.1	Classification des véhicules .....	42
Figure 4.2	Proportion de chaque type de véhicules.....	42
Figure 4.3	Histogramme de l'espacement des essieux des camions 11 .....	44
Figure 4.4	Histogrammes de l'espacement des essieux des camions 12.....	44
Figure 4.5	Camions représentatifs .....	44
Figure 4.6	Histogrammes du poids total des camions 11 et 12 .....	45
Figure 4.7	Histogramme de la charge par essieu des camions 11 .....	45
Figure 4.8	Histogramme de la charge par essieu des camions 12 .....	45
Figure 4.9	Répartition des masses et charge par essieu des camions chargés .....	46
Figure 4.10	Répartition des masses et charge par essieu des camions vides.....	46
Figure 4.11	Relations force - déplacement mesurées .....	47
Figure 4.12	Courbes mesurées et ajustées .....	48
Figure 4.13	Courbes mesurées et ajustées .....	48
Figure 4.14	Lois de comportement des suspensions du camion 11 .....	49
Figure 4.15	Loi de comportement des suspensions arrières du camion 12 .....	49
Figure 4.16	Rigidité des pneus mesurée par Cantieni .....	50
Figure 5.1	Algorithme de résolution du système pont + véhicule .....	54
Figure 5.2	Schéma des éléments finis.....	55
Figure 5.3	Maillage du pont C1 .....	56
Figure 5.4	Maillage du pont D1 .....	57
Figure 5.5	Fonctions de densité spectrale des profils de la chaussée .....	60
Figure 5.6	Profil A avec ses propriétés.....	61
Figure 5.7	Profil B avec ses propriétés.....	61
Figure 5.8	Modèle de véhicule à 7 degrés de liberté .....	62
Figure 5.9	Cycles d'hystérésis réduits des suspensions .....	63

Figure 5.10	Modes de vibration du châssis des camions.....	64
Figure 5.11	Trajectoires pour le calcul des réponses statiques sur les ponts-poutre .....	65
Figure 5.12	Trajectoires pour le calcul des réponses statiques sur le pont-cadre.....	65
Figure 5.13	Positions transversales des camions sur les ponts.....	66
Figure 5.14	Modèles du pont C1 avec des maillages différents .....	68
Figure 5.15	Réponse statique du déplacement vertical de la dalle .....	68
Figure 5.16	Réponse statique du moment transversal dans la dalle .....	69
Figure 5.17	Maillage d'un tronçon du pont C1 (variante A).....	70
Figure 5.18	Maillage d'un tronçon du pont C1 (variante B).....	71
Figure 5.19	Répartition des moments transversaux dus au camion placé au bord .....	71
Figure 5.20	Répartition des moments transversaux dus au camion placé au milieu .....	72
Figure 6.1	Définition adoptée des FAD.....	77
Figure 6.2	Définition couramment utilisée des FAD.....	78
Figure 6.3	Réponse du déplacement vertical du caisson .....	79
Figure 6.4	Réponse du déplacement vertical de la dalle .....	80
Figure 6.5	Réponse du moment longitudinal dans la dalle.....	81
Figure 6.6	Réponse du moment transversal dans la dalle.....	81
Figure 6.7	FAD obtenus avec le camion 11 roulant sur la trajectoire centrale.....	82
Figure 6.8	FAD obtenus avec le camion 11 roulant sur la trajectoire du bord.....	83
Figure 6.9	FAD des moments transversaux dans une section de la dalle.....	84
Figure 6.10	Diagrammes des FAD des moments transversaux en fonction de la vitesse .....	85
Figure 6.11	Diagrammes des FAD des moments longitudinaux en fonction de la vitesse .....	85
Figure 6.12	Diagrammes des FAD des déplacements verticaux en fonction de la vitesse.....	86
Figure 6.13	Variation des FAD provoquée par une augmentation de la rugosité du profil....	87
Figure 6.14	Variation des FAD provoquée par une augmentation de la rugosité du profil....	87
Figure 6.15	Influence de la rugosité du profil de la chaussée.....	88
Figure 6.16	Variation des FAD provoquée par le passage d'un autre véhicule .....	89
Figure 6.17	Variation des FAD provoquée par le passage d'un autre véhicule .....	90
Figure 6.18	Camion 11 surchargé.....	91
Figure 6.19	Variation des FAD provoquée par une diminution de la masse du camion .....	91
Figure 6.20	Variation des FAD provoquée par une augmentation de la masse du camion....	92
Figure 6.21	Réponse de la force exercée par une roue avant du camion 11 .....	93
Figure 6.22	Réponse de la force exercée par une roue arrière du camion 11 .....	93
Figure 6.23	Histogramme de la force exercée par une roue avant du camion 11 .....	94
Figure 6.24	Histogramme de la force exercée par une roue arrière du camion 11 .....	94
Figure 6.25	Réponse du déplacement au milieu de la dalle .....	100
Figure 6.26	Réponse du moment longitudinal sur l'appui .....	101
Figure 6.27	Réponse du moment longitudinal au 1/4 de la portée .....	101
Figure 6.28	Réponse du moment transversal au 1/4 de la portée .....	102
Figure 6.29	FAD obtenus avec le camion 11 roulant sur la trajectoire centrale.....	103
Figure 6.30	FAD obtenus avec le camion 11 roulant sur la trajectoire du bord.....	103
Figure 6.31	Diagramme des FAD des moments longitudinaux en fonction de la vitesse ....	104
Figure 6.32	Diagrammes des FAD des moments transversaux en fonction de la vitesse ....	105
Figure 6.33	Diagramme des FAD des déplacements verticaux en fonction de la vitesse ....	105
Figure 6.34	Diagrammes des FAD de plusieurs effets aux mêmes endroits .....	106
Figure 6.35	Variation des FAD provoquée par une augmentation de la rugosité du profil..	107
Figure 6.36	Variation des FAD provoquée par une augmentation de la rugosité du profil..	108
Figure 6.37	Variation des FAD provoquée par le passage d'un autre véhicule .....	109
Figure 6.38	Variation des FAD provoquée par le passage d'un autre véhicule .....	110
Figure 7.1	Modèle en 2D du pont C1 .....	117

Figure 7.2	Modèle en 2D du camion 11 .....	117
Figure 7.3	Jauges numériques sur le modèle en 2D du pont C1 .....	118
Figure 7.4	Déplacements verticaux pour des modules d'élasticité réduits .....	118
Figure 7.5	Moments de flexion pour des modules d'élasticité réduits .....	119
Figure 7.6	FAD des déplacements verticaux pour des modules d'élasticité réduits .....	119
Figure 7.7	FAD des moments de flexion pour des modules d'élasticité réduits .....	120
Figure 7.8	FAD des moments et des déplacements dans une même section .....	120
Figure 7.9	Modes propres du modèle simplifié du pont C1 .....	121
Figure 7.10	Système de suspension des essieux tandem, type "walking beam" .....	122
Figure 7.11	Système de suspension des essieux tandem .....	123
Figure 7.12	Modèle 12_A du camion à trois essieux .....	124
Figure 7.13	Modèle 12_B du camion à trois essieux .....	124
Figure 7.14	Schéma d'équilibre des forces du modèle 12_A .....	125
Figure 7.15	Schéma d'équilibre des forces du modèle 12_B .....	127
Figure 7.16	Variation des forces produites par le modèle 12_A .....	131
Figure 7.17	Variation des forces produites par le modèle 12_B .....	131
Figure 8.1	Relation entre l'analyse statique et dynamique à l'état de service .....	134
Figure 8.2	Justification de l'utilisation d'un FAD unique .....	136
Figure 8.3	Justification de l'utilisation du FAD avec des modèles de charge .....	137
Figure 8.4	Justification de l'utilisation du FAD pour les vérifications à l'état ultime .....	137
Figure 8.5	Domaine d'application des FAD pour l'évaluation simplifiée des dalles .....	139
Figure A.1	Plan du pont-cadre .....	153
Figure A.2	Plan du pont C1 .....	154
Figure A.3	Plan du pont C1P .....	155
Figure A.4	Plan du pont C2 .....	156
Figure A.5	Plan du pont P1 .....	157
Figure A.6	Plan du pont P2 .....	158
Figure B.1	Modes et fréquences propres du pont-cadre .....	160
Figure C.1	Modèle en 2D du véhicule 12_A .....	161
Figure C.2	Modèle en 2D du véhicule 12_B .....	163
Figure C.3	Modèle en 3D du véhicule 12_A .....	165
Figure C.4	Modèle en 3D du véhicule 12_B .....	167





# Liste des tableaux

Tableau 2.1	Coefficients d'impact du code japonais .....	20
Tableau 3.1	Types de sections transversales .....	33
Tableau 3.2	Valeurs limites définissant la qualité de la planéité du revêtement .....	39
Tableau 4.1	Propriétés des pneus .....	50
Tableau 5.1	Caractéristiques des maillages des ponts .....	57
Tableau 5.2	Plage des fréquences de vibration des camions .....	63
Tableau 5.3	Simulations pour le calcul des réponses dynamiques .....	66
Tableau 5.4	Durée du pas de temps en fonction de la vitesse du véhicule .....	67
Tableau 6.1	Écart type et DLC pour les vitesses extrêmes considérées (40 et 120 km/h).....	94
Tableau 6.2	FAD des moments $m_y^{(-)}$ à l'encastrement du porte-à-faux (Pont C1P) .....	96
Tableau 6.3	FAD des moments $m_y^{(-)}$ à l'encastrement du porte-à-faux (Pont C2).....	98
Tableau 7.1	Fréquences propres du modèle simplifié du pont C1 .....	121
Tableau 7.2	Paramètres des modèles de véhicule .....	130
Tableau B.1	Fréquences propres des ponts-poutre .....	159



# Préface

Une meilleure connaissance des effets dynamiques dans les dalles de roulement de ponts améliore la précision de l'évaluation de la sécurité structurale des ponts existants et pourrait éviter des interventions (renforcements) aux conséquences financières importantes. Jusqu'à présent, les études du comportement dynamique des ponts se sont concentrées aux éléments porteurs longitudinaux tels que les poutres maîtresses. L'originalité du travail de thèse de Claude Broquet est l'étude du comportement dynamique de la dalle de roulement qui est, étant donné le contact direct entre les roues des véhicules et la structure, l'élément du pont le plus sensible aux effets dynamiques. Le défi était la modélisation tridimensionnelle du comportement dynamique de dalles de roulement de ponts en béton en considérant l'interaction entre le pont, le véhicule et le profil de la chaussée pour simuler le passage de véhicules.

Les puissances de calcul des ordinateurs modernes ont permis d'étudier ce problème à l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel. Ce modèle numérique a été développé par des chercheurs à l'Université Laval à Québec sous la direction du Professeur Mario Fafard. Pendant un séjour de 6 mois à l'Université Laval, Claude Broquet a réussi à apporter les adaptations nécessaires pour utiliser ce logiciel pour ses besoins.

Une étude paramétrique rigoureuse à l'aide de ce logiciel a permis de quantifier l'effet de plusieurs paramètres dans les réponses dynamiques des dalles de roulement; à savoir, la planéité de la chaussée, la masse du camion, les vitesses de passage du camion ainsi que les différents systèmes statiques des dalles de roulement. Pour les diverses situations de risque simulées, des facteurs d'amplification dynamique ont été déterminés.

Cette première thèse issue du MCS (Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages) apporte une amélioration des connaissances du comportement dynamique des dalles de roulement des ponts et elle permet de déduire des conclusions utiles et nouvelles quant à l'application des résultats pour l'évaluation de ponts existants.

Claude Broquet a fait preuve d'une grande rigueur scientifique, d'une grande ténacité, d'une facilité de développement de modèles physiques, d'un souci de rester proche de la réalité et d'un esprit de synthèse remarquable. Nous le remercions de son engagement et pour ses compétences.

Lausanne, mai 1999

Professeur Eugen Brühwiler



# Remerciements

Cette recherche a été effectuée au laboratoire de "Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages" du département de Génie Civil de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Elle est le fruit non seulement d'un travail individuel, mais celui de plusieurs personnes que je tiens à remercier. Parmi les personnes qui ont collaboré à cette thèse en offrant soit un support moral, soit un support technique, je pense en particulier à ma famille, à mes amis et à mes collègues. Sans doute des personnes auront involontairement été oubliées dans l'énumération suivante, pour cette raison je tiens, en premier, à toutes les remercier.

Je tiens tout d'abord à remercier ma famille et en particulier mes parents qui m'ont soutenu pour réaliser mes études et qui m'ont toujours encouragé dans mes entreprises. Je leur exprime toute ma reconnaissance pour avoir su créer les conditions pour favoriser, à ma sœur, à mes frères et à moi, notre épanouissement.

Je remercie le professeur René Walther qui m'a engagé après mon travail de diplôme effectué sous sa direction. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a témoignée durant les deux années que j'ai œuvré à sa chaire et pour m'avoir encouragé à me lancer dans ce travail de doctorat.

J'exprime toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, le professeur Eugen Brühwiler, qui m'a donné la possibilité d'effectuer cette recherche dans le domaine de la dynamique des ponts. Je le remercie pour l'aide précieuse apportée durant nos nombreuses discussions, pour ses conseils, ses encouragements et sa patience. Je salue également la qualité de nos contacts et la confiance témoignée.

Je remercie Dr Simon Bailey, adjoint scientifique au MCS, qui a apporté une large contribution à cette recherche. J'ai apprécié son esprit critique et son souci du détail autant au niveau technique que lors de la rédaction du présent document.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au professeur Mario Fafard, du département de Génie Civil de l'Université Laval à Québec, qui sans hésitation m'a offert la possibilité d'effectuer un stage au sein de son groupe. Je le remercie pour son accueil, sa disponibilité, ses encouragements et les nombreux échanges toujours très enrichissants. Je le remercie pour m'avoir donné la possibilité d'utiliser le logiciel d'éléments finis réalisé par ses chercheurs et pour m'avoir mis gracieusement à disposition les moyens informatiques nécessaires pour réaliser les simulations numériques.

Je remercie également Dr Mohamed Tahar Boudjelal, professionnel de recherche à l'Université Laval à Québec, pour les fructueuses discussions, pour les encouragements et pour le support technique très apprécié lors de mon stage à Québec.

Je remercie mes collègues parmi lesquels M. Miehlabradt, R. Gysler, M. Schläfli, G. Roelfstra, O. Bernard, P. Mivelaz, P. Béguin, A. Radojicic, R. Hajdin, B. Adey, V. Bujard, C. Benoit, S. Ramero, H. Ludescher, qui, chacun à leur manière, ont contribué à ce travail, soit par des conseils ou des questions, soit par des encouragements et surtout pour avoir contribué à la bonne entente au sein du laboratoire.

Finalement je remercie les membres du jury pour le temps consacré à la lecture attentive de la thèse et pour leurs commentaires: prof. E. Brühwiler, directeur du MCS/EPFL et directeur de thèse; prof. M. Badoux, IBAP/EPFL; Dr S. Bailey, adjoint scientifique au MCS/EPFL; Dr R. Cantieni, directeur du centre de la dynamique des structures à l'EMPA; prof. M. Fafard, département de Génie Civil de l'Université Laval à Québec; prof. F. Frey, directeur du LSC/EPFL et prof. W.-H. Graf directeur du LRH/EPFL et président du jury.



# Notations

## Majuscules latines:

AD	amplification dynamique
C	matrice d'amortissement
DLC	coefficient de charge dynamique
E	module d'élasticité
EI	rigidité flexionnelle
F	force de frottement
FAD	facteur d'amplification dynamique
G	fonction de densité spectrale
I	incrément dynamique; moment d'inertie de masse
K	matrice de rigidité
L	longueur d'une travée (portée)
M	matrice de masse; moment de flexion
P	force dans la suspension
P'	force dans le pneu
Q	action d'un essieu
R	réponse de l'ouvrage (déplacement, déformation, effort)
W	valeur d'angle (profil de la chaussée)

## Minuscules latines:

a	constante
$a_0, a_1$	constantes d'amortissement (Rayleigh)
c	coefficient d'amortissement
$c_c$	coefficient d'amortissement critique
c	centre de gravité
e	distance entre les essieux
f	fréquence, vecteur de force
g	accélération de la gravité
h	hauteur
i	numéro d'ordre
k	rigidité
m	masse; moment de flexion
n	fréquence spatiale
r	cote du profil de la chaussée
s	distance
sw	écart type des valeurs d'angle (profil de la chaussée)
t	temps
u	déplacement dans la direction x
v	déplacement dans la direction y; vitesse
v(t)	déplacement en fonction du temps
w	déplacement dans la direction z; flèche
x, y, z	coordonnées

## Majuscules grecques:

$\Delta$	incrément; différence; déplacement relatif
$\Phi$	coefficient dynamique
$\Omega$	fréquence angulaire spatiale

## Minuscules grecques:

$\beta$	paramètre dans la relation de Fancher
$\gamma$	facteur de charge
$\delta$	déplacement relatif
$\varepsilon$	déformation
$\theta$	rotation, angle de phase
$\mu$	moyenne
$\nu$	coefficient de Poisson
$\xi$	rapport d'amortissement
$\pi$	nombre pi
$\rho$	masse volumique
$\sigma$	écart type
$\phi$	coefficient dynamique
$\omega$	fréquence circulaire

## Indices:

$\neg_b$	pont
$\neg_c$	béton
$\neg_{\text{dyn}}$	dynamique
$\neg_{\text{ENV}}$	enveloppe
$\neg_G$	centre de gravité; poids propre
$\neg_i$	$i^{\text{ème}}$ élément
$\neg_L$	élément de liaison
$\neg_{\text{max}}$	maximal
$\neg_{\text{min}}$	minimal
$\neg_n$	valeur nominale
$\neg_Q$	action variable
$\neg_{\text{sta}}$	statique
$\neg_v$	véhicule
$\neg_{x, y, z}$	coordonnées

## Exposants:

$\neg^e$	valeur de l'élément fini e
----------	----------------------------



# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Ingénierie en ouvrages d'art

Durant ces dernières décennies, le réseau autoroutier suisse a été réalisé impliquant la création d'environ 3'500 ouvrages d'art. Alors que ces grandes réalisations arrivent à leur terme, bon nombre de travaux importants sont entrepris sur les structures des premiers tronçons autoroutiers construits au début des années 60. Aujourd'hui, compte tenu des investissements énormes qui ont été consentis, il est important de se donner les moyens de non seulement préserver la valeur de ces acquis, mais surtout de l'améliorer pour répondre aux besoins nouveaux.

Depuis le début de la construction du réseau des routes nationales, le trafic routier a fortement augmenté; la croissance est marquée autant par le nombre de véhicules que par le tonnage transporté par essieu. Les besoins futurs suivront la même tendance à laquelle l'ouverture de nos frontières au passage des camions de 40 tonnes va contribuer. L'effet du temps se manifeste aussi par le développement de mécanismes de dégradation qui, à moyenne ou longue échéance, ont de graves conséquences sur les structures. Ces mécanismes proviennent des agressions extérieures (actions climatiques et chimiques), de la qualité des caractéristiques du béton ainsi que des détails de construction peu appropriés ou mal exécutés.

Face à ces nouvelles données, le défi des ingénieurs est de mettre en place une politique de maintenance pour gérer de manière rationnelle ce patrimoine bâti. Actuellement les besoins d'intervention sur l'ensemble du parc des ponts sont justifiés sur la base de critères de sécurité. L'ingénieur de structure doit donc être capable d'estimer précisément la sécurité d'un pont, à un moment donné, en utilisant toutes les données disponibles aussi bien les informations concernant la capacité portante que celles relatives aux sollicitations effectives propres à l'ouvrage étudié et ceci, afin de considérer toutes les potentialités de la structure analysée.

Les activités de l'ingénieur de structure, marquées jusqu'alors par les besoins de développement de nouvelles infrastructures, s'adaptent pour répondre aux nouvelles exigences, toujours avec le souci de garantir la sécurité des usagers et des structures.

### 1.2 Actions sur les ponts

#### 1.2.1 Généralités

Les actions agissant sur un pont sont de nature fort diverse. L'action la plus importante est très souvent le poids propre de la structure porteuse associé à celui des éléments non porteurs, tels que le poids du revêtement, des bordures, des parapets et des divers équipements du pont (glissières, gaines techniques, évacuation des eaux, etc.). Par définition, le poids propre agit à

long terme et sollicite l'ouvrage de manière statique. Le pont est également sollicité par le milieu environnant par l'action du vent, des tremblements de terre, du tassement du sol de fondation ainsi que par les activités humaines représentées par les actions du trafic. Ces différentes actions ont un caractère variable et se produisent de manière intermittente avec des intervalles de temps très variables. De plus, lorsque ces actions se manifestent, leurs directions et leurs intensités sont variables dans le temps. Le vent, les tremblements de terre et le trafic sont donc des actions qui agissent de manière dynamique sur l'ouvrage. Pour la plupart des ponts, le trafic constitue l'action variable prédominante.

### **1.2.2 Trafic routier**

Le trafic routier varie d'un endroit à un autre et évolue en fonction du temps. En effet, suivant le tronçon de route, la composition et la densité du trafic change et l'évolution des besoins se répercute sur le trafic. L'action dynamique provoquée par le trafic routier sur un pont dépend de nombreuses variables liées aux flux de trafic, aux véhicules, au profil de la chaussée et au pont. Afin de simplifier l'analyse de l'ouvrage, ces actions dynamiques sont remplacées par des actions statiques équivalentes. Ces dernières sont constituées par un modèle de charge statique dont la valeur représentative est majorée par un facteur d'amplification dynamique. Cette manière de considérer l'action dynamique du trafic est proposée dans la plupart des normes de dimensionnement à travers le monde.

## **1.3 Dimensionnement et évaluation des ponts**

Lors du dimensionnement d'un nouveau pont, les facteurs d'amplification dynamique utilisés avec les modèles de charge de trafic doivent couvrir tous les effets dynamiques dans la structure (déformations, efforts et déplacements) alors que la charge du trafic et les paramètres qui déterminent le comportement dynamique du pont sollicité par les véhicules, ne sont pas encore connus avec précision. La méconnaissance de ces éléments spécifiques au trafic futur et à l'ouvrage, au stade du projet, nécessite des modèles de charge et des facteurs d'amplification dynamique conservateurs qui couvrent de nombreuses situations. Ces modèles et ces facteurs d'amplification dynamique sont, en principe, disponibles dans la plupart des normes de dimensionnement en vigueur.

L'évaluation d'un pont existant place l'ingénieur dans une situation beaucoup plus favorable, car celui-ci a, à sa disposition, toutes les informations sur l'ouvrage et les conditions d'exploitation de ce dernier. Les propriétés statiques et dynamiques de la structure de même que le trafic réel sont connus ou, tout au moins, peuvent être mesurés. Des modèles de charge de trafic et des facteurs d'amplification dynamique actualisés peuvent être établis, car les incertitudes qui ont prévalu au stade du projet, ont pu être levées ou, dans une certaine mesure, diminuées. L'évaluation permet alors d'obtenir une estimation de la sécurité structurale plus précise que celle effectuée lors du dimensionnement de l'ouvrage.

Si le modèle de charge de trafic actualisé est valable uniquement pour un tronçon de route spécifique, le facteur d'amplification dynamique est applicable seulement à un ouvrage particulier sur ce tronçon de route. L'effet dynamique est propre à l'ouvrage puisqu'il résulte d'une combinaison entre le mouvement du pont et les mouvements du véhicule causés par les irrégularités du profil de la chaussée.

Des recherches [13] [8] ont déjà été effectuées afin de proposer des modèles de charge de trafic actualisés. En ce qui concerne le facteur d'amplification dynamique, des travaux ont montré les paramètres qui influencent cette valeur et certains auteurs [37] [19] [3] ont relevé que ces facteurs d'amplification dynamique varient suivant l'endroit et suivant le type d'efforts étudiés sur un ouvrage. Si les résultats d'essais in situ livrent, en général, les facteurs

d'amplification dynamique des flèches des éléments porteurs principaux des ponts, les facteurs spécifiques aux effets locaux dans les dalles de roulement ne sont pas disponibles.

L'utilisation de facteurs d'amplification dynamique actualisés spécifiques à l'ouvrage ou à l'élément structural analysé permettrait, lors de l'évaluation, de considérer les effets dynamiques avec plus de précision tout en garantissant le niveau de sécurité exigé.

## 1.4 Motivations et bénéfices

### 1.4.1 Importance du facteur d'amplification dynamique

L'importance du facteur d'amplification dynamique dans le calcul des sollicitations d'un pont en béton dépend du rapport entre les charges de trafic et le poids propre de la structure porteuse et des éléments non porteurs. Si une charge uniformément répartie de  $4 \text{ kN/m}^2$  est considérée pour le modèle de charge de trafic et si la section d'un pont-caisson caractéristique des autoroutes suisses (Chapitre 3) sert de référence, alors le rapport entre les charges de trafic et le poids propre est estimé pour les éléments porteurs principaux du pont (poutres, caisson) à  $\frac{1}{4}$ . Ce même rapport est estimé à  $\frac{1}{2}$ , si l'intérêt se porte sur la dalle de roulement. Ces valeurs sont données sans considérer les facteurs de charge partiels différents pour ces deux types d'actions. Ce rapport peut encore augmenter si l'effet d'essieux fortement chargés est considéré dans le calcul des sollicitations de la dalle de roulement (voir 1.4.2). L'effet d'essieux lourdement chargés sur les poutres principales du pont est proportionnellement plus faible que sur la dalle de roulement.

Dans ce contexte, il apparaît clairement que le facteur d'amplification dynamique a plus d'importance dans le calcul des sollicitations de la dalle de roulement que dans celui des sollicitations des éléments porteurs principaux du pont.

Pour les futurs ponts, le choix de facteurs d'amplification dynamique mieux adaptés que ceux prescrits dans les normes de dimensionnement, a peu de conséquences sur les coûts totaux. En effet, malgré l'importance des facteurs d'amplification dynamique dans le calcul des sollicitations de la dalle de roulement d'un pont, une réduction de ces facteurs d'amplification dynamique a peu d'influence sur les sections choisies. Dans ces éléments structuraux les critères de durabilité sont souvent déterminants par rapport aux critères de résistance. De plus, si les facteurs d'amplification dynamique prescrits dans les codes de dimensionnement couvrent, dans la plupart des cas, largement les actions dynamiques réelles, le bénéfice constitue une réserve attribuée à l'évolution future des charges du trafic routier.

Lors de l'évaluation d'un pont existant, le choix approprié d'un facteur d'amplification dynamique actualisé, basé sur des données spécifiques à l'ouvrage étudié, permet de réduire les sollicitations de dimensionnement des dalles de roulement dans des proportions appréciables. Les valeurs actualisées permettent d'éviter, dans certains cas, des renforcements des dalles de roulement des ponts. De telles interventions sont toujours délicates, car elles constituent une gêne importante pour l'exploitation de l'ouvrage et coûtent cher compte tenu de la surface des ponts sur lesquels elles pourraient potentiellement se justifier. De plus, le renforcement des dalles au moyen d'une couche de béton supplémentaire peut entraîner des mesures d'intervention sur les éléments porteurs principaux et par voie de conséquence sur l'infrastructure de l'ouvrage. Le défi de pouvoir proposer une démarche d'évaluation, qui considère les charges dynamiques actualisées du trafic, est donc d'un enjeu économique très grand.

### 1.4.2 Exemples d'évaluation de ponts

Pour illustrer les propos du paragraphe précédent, les sollicitations à l'état limite ultime de deux ponts sont évaluées afin de montrer la proportion de chaque action dans les sollicitations totales [20]. Les évaluations sont basées sur des modèles déterministes standard pour le calcul des sollicitations. Les facteurs de charge ainsi que les modèles de charge de trafic définis dans la norme suisse SIA 160 [83] sont adoptés. L'enveloppe des moments transversaux dans la dalle de roulement d'un pont-poutre (Figure 1.1) et d'un pont-caisson (Figure 1.2) est présentée.

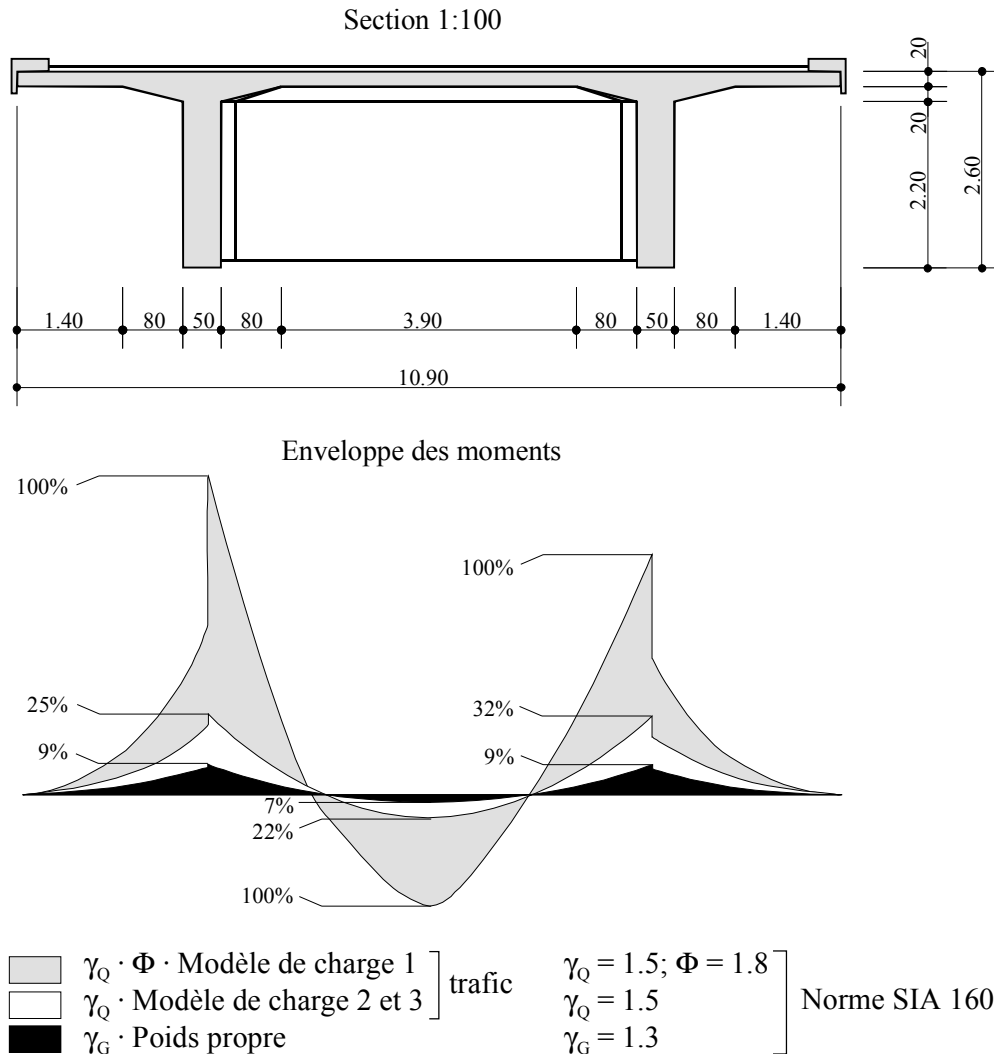


Figure 1.1 Enveloppe des moments transversaux dans la dalle d'un pont-poutre

Les résultats montrent que le modèle de charge 1 qui représente des essieux fortement chargés, majoré par le coefficient dynamique fixé dans la norme suisse à 1.8 et par le facteur de charge  $\gamma_Q$  contribue, dans les sections déterminantes, à plus de 70% de la sollicitation de dimensionnement. Ces valeurs élevées laissent envisager que des facteurs d'amplification dynamique adaptés à chaque situation, associés à des modèles de charge statiques actualisés, permettraient, dans certains cas, de réduire de manière appréciable les sollicitations de dimensionnement dans les dalles de roulement et ainsi d'éviter des interventions.

À la vue de ces deux exemples qui constituent des cas représentatifs des ouvrages autoroutiers suisses, il paraît intéressant d'étudier les effets dynamiques provoqués par le

trafic routier dans la dalle de roulement des ponts en béton, dans le but d'effectuer des évaluations plus précises de ces éléments structuraux.

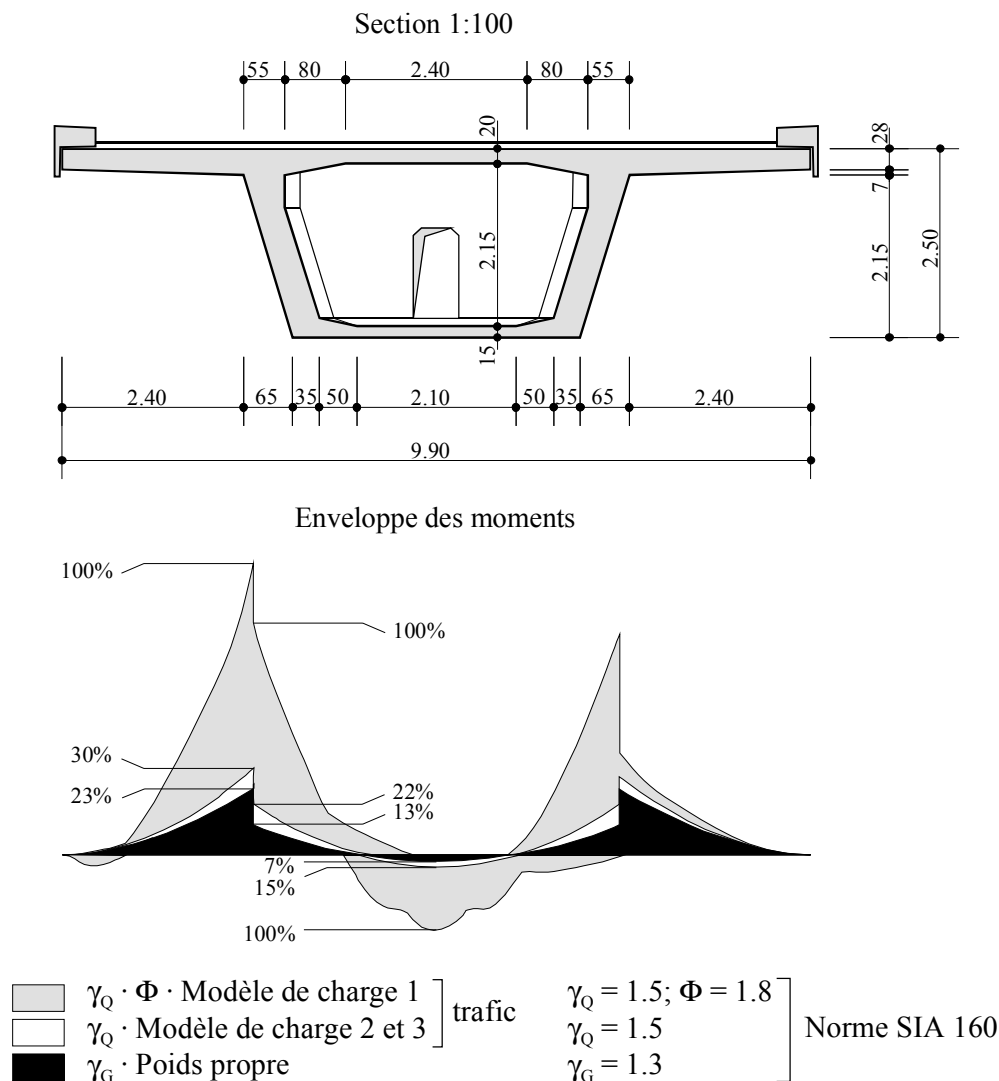


Figure 1.2 Enveloppe des moments transversaux dans la dalle d'un pont-caisson

## 1.5 Objectifs de la recherche

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier les effets dynamiques provoqués par le trafic routier sur les ponts en béton caractéristiques de la Suisse pour déterminer les facteurs d'amplification dynamique qui majorent les effets statiques utilisés pour la vérification des états limites des dalles de roulement des ponts en béton.

Le but principal comprend les trois aspects suivants :

- Déterminer les facteurs d'amplification dynamique qui permettent de représenter les effets dynamiques dans la dalle de roulement des ponts.
- Déterminer la sensibilité aux sollicitations dynamiques provoquées par le trafic routier de différentes dalles de roulement de plusieurs ponts caractéristiques de la Suisse.
- Proposer des moyens pour évaluer les facteurs d'amplification dynamique des dalles de roulement des ponts en béton en considérant tous les états limites.

À différents endroits répartis sur la dalle de roulement, les réponses dynamiques générées par le passage de camions fournissent la répartition des effets dynamiques maximums. Ces valeurs établies pour plusieurs effets (déplacements, déformations, efforts) déterminent par rapport à une référence statique les facteurs d'amplification dynamique dont les valeurs permettent de localiser sur la dalle les zones où les amplifications dynamiques sont importantes. La synthèse des résultats obtenus fournira des facteurs d'amplification dynamique spécifiques pour les dalles de roulement des ponts en béton.

Sur la base des valeurs des facteurs d'amplification dynamique, il est possible de déterminer quels sont les systèmes statiques des dalles de roulement des ponts les plus sensibles aux effets dynamiques. Les tendances ainsi dégagées seront utiles lors de l'évaluation du comportement dynamique pour identifier l'importance des effets dynamiques en fonction de la disposition de la dalle de roulement.

Les résultats issus des deux premiers points doivent permettre de proposer des moyens pour évaluer le comportement dynamique des dalles de roulement selon une approche déterministe basée sur des modèles de charge de trafic et des facteurs d'amplification dynamique déterminés en fonction de l'ouvrage analysé. La définition de facteurs d'amplification dynamique actualisés complète la démarche d'évaluation proposée par Bailey [8] et permet de considérer avec plus d'objectivité et de précision les effets dynamiques.

## 1.6 Démarche

### 1.6.1 Description

L'introduction au **chapitre 1** place cette recherche dans le cadre des travaux qui ont été menés en Suisse ces dernières années afin de mettre en place des démarches cohérentes pour le dimensionnement et l'évaluation des ponts, notamment en ce qui concerne les actions engendrées par le trafic routier. La motivation et les bénéfices sont expliqués et complétés par des exemples. Les objectifs sont exposés et suivis par la présentation et la justification de la démarche retenue.

L'état des connaissances dans le domaine de la dynamique des ponts est dressé au **chapitre 2**. Le texte débute par une description détaillée du phénomène dynamique qui a lieu lorsqu'un véhicule traverse un pont. Les différents paramètres qui interviennent dans le comportement du système sont décrits. La notion de facteur d'amplification dynamique est exposée et les différentes définitions utilisées couramment pour décrire l'amplification des effets dus aux charges statiques de trafic sont présentées. L'état de l'art passe inévitablement par l'inventaire des méthodes usuelles utilisées pour traiter les effets dynamiques dus au trafic; les informations recueillies dans les normes en vigueur sont, à ce titre, très intéressantes. Les modèles numériques utilisés pour simuler le passage de véhicules sur les ponts sont décrits ainsi que les principales méthodes de résolution des équations différentielles du mouvement. Le domaine de la dynamique des ponts laisse encore aujourd'hui une large place aux études expérimentales. Dans ce contexte, les méthodes les plus utilisées et les buts poursuivis sont présentés.

La première étape est d'identifier les ponts les plus représentatifs du parc autoroutier de Suisse afin de choisir un nombre limité d'ouvrages qui servent de base à l'étude. Les données et les réflexions qui ont conduit à la conception de six ponts représentatifs des ouvrages autoroutiers suisses, sont présentées au **chapitre 3**. Pour compléter le chapitre, les critères employés pour qualifier le profil de la chaussée sont exposés ainsi que les valeurs limites qui déterminent la qualité de la planéité du revêtement bitumineux couvrant le pont.

Le **chapitre 4** traite du trafic des autoroutes suisses. L'étude des caractéristiques du trafic des poids lourds en Suisse permet de définir des camions représentatifs. Les propriétés de ces

véhicules établies sur la base de mesures de trafic et de mesures sur des camions sont définies en détail.

Les ponts définis au chapitre 3 et les poids lourds étudiés au chapitre 4 constituent les données essentielles pour mettre sur pied des simulations numériques du passage d'un véhicule sur un pont. Au **chapitre 5**, l'algorithme de résolution de l'interaction dynamique entre le pont et les véhicules, implanté dans le logiciel d'éléments finis, est exposé. Les vibrations libres des modèles décrits des ponts et des véhicules sont calculées afin de fixer leurs propriétés dynamiques. Les simulations numériques sont organisées dans le cadre d'une étude paramétrique dont le choix des variables est discuté et motivé. Finalement, la précision des résultats des simulations numériques est abordée en relation avec la taille du maillage des modèles d'éléments finis des ponts.

Les résultats des simulations numériques sont livrés dans le **chapitre 6**. La définition retenue du facteur d'amplification dynamique est présentée et motivée de même que ces avantages et inconvénients. L'étude paramétrique sur les différents ponts situe la valeur des facteurs d'amplification dynamique dans les dalles de roulement pour différentes situations de risque liées au trafic et à la qualité du profil de la chaussée. La comparaison des facteurs d'amplification dynamique obtenus dans des situations de risque semblables sur les différents ponts permet de juger la sensibilité des dalles de roulement vis-à-vis des sollicitations dynamiques provoquées par le trafic routier.

Au **chapitre 7**, des aspects particuliers qui constituent des prolongements de l'étude sont traités. Les effets non linéaires dus à la fissuration des sections sont analysés pour déterminer leurs influences sur le comportement dynamique de la structure et sur les facteurs d'amplification dynamique à l'approche de l'état ultime.

Deux modèles de véhicule qui font défaut dans le logiciel d'éléments finis, sont développés pour représenter des camions à trois axes avec des essieux tandem.

Au **chapitre 8**, des réflexions sont menées pour utiliser, lors des vérifications des états limites des dalles de roulement, les facteurs d'amplification dynamique déterminés par les simulations numériques. Des moyens sont proposés pour évaluer les dalles de roulement des ponts en considérant les effets dynamiques provoqués par le trafic routier.

Finalement le **chapitre 9** apporte des conclusions aux résultats du travail ainsi que des directions pour les recherches futures dans ce domaine.

### 1.6.2 Justifications

Contrairement à beaucoup d'autres études sur le sujet, l'intérêt est porté sur les dalles de roulement des ponts plutôt qu'aux poutres principales ou, plus généralement, au système porteur principal de la structure. Ce choix est motivé par la part importante des sollicitations dues aux charges du trafic dans les sollicitations totales de dimensionnement de ces éléments structuraux et par l'importance des économies réalisables grâce à l'évaluation précise de leur sécurité. Un des aspects originaux du travail est de baser l'étude sur les dalles de roulement représentatives de la majorité des ponts autoroutiers suisses.

Les intérêts cités rendent l'analyse numérique du comportement dynamique plus attractive par rapport à l'analyse expérimentale, car les études paramétriques sont plus aisées et la collecte des données à des endroits choisis est indépendante des contraintes pratiques rencontrées lors d'essais in situ. En effet, dans des conditions réelles, il est pratiquement impossible de comparer des résultats mesurés sur deux ouvrages avec des dalles différentes, tant la géométrie de la structure et le profil de la chaussée peuvent varier. De plus, si sur un modèle numérique il est aisé de collecter des résultats dans les sections déterminantes de la dalle, il est impossible sur un ouvrage en exploitation de fixer des instruments de mesure sur la partie supérieure de la dalle pour mesurer, par exemple, les déformations de l'armature supérieure. Pour ces raisons, les simulations numériques sont privilégiées par rapport aux essais in situ.





## Chapitre 2

# État des connaissances

### 2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'exposer le phénomène étudié et de faire un tour d'horizon des démarches utilisées pour analyser le comportement dynamique des ponts sollicités par des charges de trafic mobiles.

L'étude de la littérature permet d'identifier les paramètres importants qui entrent en jeu et d'établir les exigences nécessaires pour modéliser de manière aussi réaliste que possible les effets dynamiques dans les dalles de roulement des ponts en béton.

Le contenu des différentes sections se résume de la manière suivante:

- **Nature des vibrations générées sur les ponts par les véhicules**

Une description détaillée du phénomène d'interaction dynamique qui se développe lorsqu'un véhicule traverse un pont, est effectuée et complétée par l'étude des paramètres principaux qui contribuent au phénomène.

- **Définitions du facteur d'amplification dynamique**

La notion de facteur d'amplification dynamique est exposée ainsi que les différentes définitions couramment utilisées. Les méthodes employées pour déterminer ces facteurs sont discutées.

- **Normes et codes de dimensionnement**

Les normes et les codes de dimensionnement reflètent les méthodes utilisées pour traiter les effets dynamiques dus au trafic dans les différents pays. L'analyse des codes montre la diversité des approches pour fixer les facteurs d'amplification dynamique dont les valeurs peuvent être différentes d'un document à l'autre. Sur la base de quelques codes nationaux, l'évolution des approches utilisées est exposée.

- **Études numériques**

Les principaux modèles numériques qui ont été proposés pour représenter le comportement dynamique des ponts traversés par des véhicules sont exposés ainsi que les méthodes de résolution des systèmes dynamiques couramment employées. La modélisation des ponts, du profil de la chaussée et des véhicules est présentée séparément.

- **Études expérimentales**

Les études expérimentales réalisées pour déterminer le comportement dynamique des ponts sont présentées brièvement. Les essais effectués avec des véhicules sont décrits plus en détail; l'évolution de la technique, les paramètres mesurés, les types de mesures et les traitements des résultats sont abordés.

- **Influence des paramètres sur les facteurs d'amplification dynamique**

Sur la base des résultats d'études livrés dans la littérature, les principaux paramètres qui déterminent le phénomène d'interaction dynamique entre le pont et les véhicules sont mis en évidence et leur importance relative est, dans la mesure du possible, quantifiée.

## 2.2 Nature des vibrations générées sur les ponts par les véhicules

### 2.2.1 Explication du phénomène

Afin de bien cerner le phénomène étudié, une description détaillée des effets dynamiques occasionnés par le passage d'un véhicule sur un pont est présentée.

En premier lieu, la situation où un véhicule mobile représenté par une force constante traverse une poutre simple à une vitesse constante  $v$  est considérée. La poutre est caractérisée par la portée, la rigidité et la masse linéaire. À chaque instant  $t$ , la force mobile se trouve à l'abscisse  $x = v \cdot t$  le long de la poutre et provoque une déformée différente. Pour passer d'un état déformé à un autre durant un intervalle de temps  $\Delta t$  chaque élément infinitésimal de la poutre subit une accélération. En plus des forces élastiques, la poutre est donc sollicitée par des forces d'inertie et des forces d'amortissement. Les forces d'inertie causent des oscillations de la poutre qui, après le passage de la force mobile, retrouve peu à peu sa position de repos par l'entremise des forces d'amortissement.

La situation décrite correspond au cas où la masse du véhicule traversant le pont est très faible en regard de la masse de la structure. Dans le cas contraire, les effets d'inertie liés à la masse mobile doivent être pris en compte. Cette masse mobile, lors de son parcours sur la poutre, modifie les propriétés vibratoires de la structure. Les modes et les fréquences de vibration du système en régime forcé varient durant le passage de la masse mobile.

Pour des raisons de sécurité et de confort, les véhicules routiers sont conçus de manière à minimiser les accélérations verticales au niveau du châssis. Dans ce but, la structure du véhicule est posée sur les essieux par l'intermédiaire de la suspension. Afin de simplifier, un véhicule peut être idéalisé par un système constitué de deux masses, l'une représentant le châssis et la carrosserie et l'autre les essieux et les roues. Ces masses sont liées entre elles par un ressort matérialisé par la suspension (Figure 2.1).

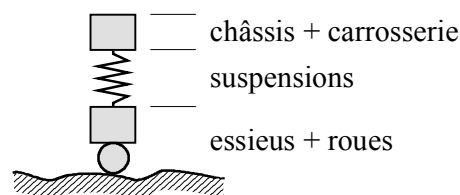


Figure 2.1 Véhicule idéalisé

Considérons que ce modèle de véhicule roule à vitesse constante sur une surface lisse sur laquelle est aménagée un obstacle de forme sinusoïdale. Avant d'atteindre l'aspérité, les masses ne présentent aucun mouvement vertical. Au moment de franchir l'obstacle, la masse inférieure qui suit la forme du profil, provoque un déplacement relatif des extrémités du ressort ce qui modifie la force appliquée sur le sol. Dès lors que les masses se déplacent verticalement, des forces d'inertie et d'amortissement s'activent et provoquent les oscillations du véhicule qui influencent également la force exercée sur la surface de roulement.

Un pas supplémentaire dans la compréhension des effets dynamiques qui ont lieu lors du passage d'un véhicule sur un pont consiste à admettre que le véhicule idéalisé décrit

précédemment circule à vitesse constante sur une chaussée horizontale et parfaitement lisse d'un pont. Dans ces conditions, à l'approche du pont, le véhicule exerce sous ses pneus une force constante correspondant à sa charge statique. Dès l'entrée du véhicule sur le pont et au fur et à mesure de sa progression, le pont se déforme et ainsi modifie le profil de la chaussée. Un déplacement relatif des extrémités du ressort modélisant les suspensions du véhicule survient, et en considérant que le véhicule reste en contact permanent avec la chaussée, l'intensité de la charge développée sous les pneus est modifiée. Sous ces nouvelles actions, les forces élastiques dans la structure tendent à redéfinir la configuration d'équilibre et, combinées aux forces d'inertie, causent les oscillations de la structure. Le profil actualisé de la chaussée influence le mouvement du véhicule par l'entremise des suspensions qui subissent à nouveau un déplacement relatif de leurs extrémités. La configuration d'équilibre du véhicule amène une variation de l'intensité des charges appliquées, perturbant à nouveau l'équilibre du pont. Ce processus d'ajustements successifs de la position des masses en vibration du véhicule et de la déformée de la structure se poursuit tout au long du parcours du véhicule. Une fois le pont franchi, ses vibrations s'amenuisent grâce aux forces d'amortissement.

La situation réelle est similaire à celle décrite ci-dessus avec, en plus, d'autres sources d'excitation pouvant affecter la vibration du véhicule. Les irrégularités dans le profil statique de la chaussée, les conditions initiales de vibration des véhicules conditionnées par l'état de la chaussée à l'approche du pont, la présence d'autres véhicules simultanément sur le pont et les forces causées par l'accélération, le freinage ou l'action du vent sont des facteurs qui génèrent une variation de l'intensité des charges appliquées sur le pont. Lors du franchissement du pont, ces facteurs influencent le mouvement du véhicule et conduisent la structure à se déformer sous l'action de charges d'intensités sans cesse actualisées. Dans ce contexte, le véhicule et le pont sont considérés comme deux systèmes vibratoires intimement couplés.

Les explications fournies dans les paragraphes précédents montrent que les éléments qui entrent en jeu sont nombreux. Les paramètres intervenant dans l'interaction dynamique du véhicule et du pont sont décrits dans le but d'apporter des précisions nécessaires à la compréhension du phénomène vibratoire.

### 2.2.2 Les ponts

La géométrie et le système statique font de chaque pont un ouvrage particulier avec un comportement statique et dynamique spécifique. Les principales caractéristiques qui dictent le comportement de l'ouvrage sont la masse, la rigidité et l'amortissement (Figure 2.2).

La **masse** de la superstructure comporte la masse de la structure porteuse, du revêtement, des parapets, des trottoirs et de tous les équipements du pont. La masse est un facteur dominant pour les fréquences de vibration du pont.

La **rigidité** d'un pont est déterminée principalement par le matériau, par les dimensions et par le type de section. Les ponts dont la section est formée d'un caisson, assurent une plus grande rigidité vis-à-vis de la flexion transversale et de la torsion que les ponts composés de poutres indépendantes. Ce dernier type est très influencé par les entretoises ou les diaphragmes qui lient transversalement les poutres entre elles. Les éléments secondaires tels que le revêtement, les trottoirs et les parapets accroissent la rigidité globale de la structure. Une rigidité élevée contribue à augmenter les fréquences de vibration du pont.

L'**amortissement** caractérise la dissipation d'énergie lors des vibrations de la structure. Par définition, l'amortissement est un phénomène thermodynamique, car il implique un transfert d'énergie mécanique vers une autre forme d'énergie qui est soit thermique soit de radiation [19]. Une distinction existe entre l'**amortissement matériel** et l'**amortissement structural**. La différence dépend essentiellement de la manière dont les limites sont fixées entre chacun. L'amortissement matériel correspond aux pertes d'énergie au niveau moléculaire dans le matériau. Cet amortissement dépend de la fréquence, de la température, du type de

déformation, de l'amplitude et de la géométrie de la structure. L'amortissement structural est de nature principalement frictionnel et correspond à l'énergie dissipée aux interfaces entre les parties distinctes d'une structure, telles que les joints, les appuis, les liaisons (connexion acier - béton des ponts mixtes). En principe, plus les vibrations de la superstructure sont importantes, plus l'infrastructure participe au mouvement d'ensemble et, par conséquent, l'amortissement structural devient important par rapport à l'amortissement total.

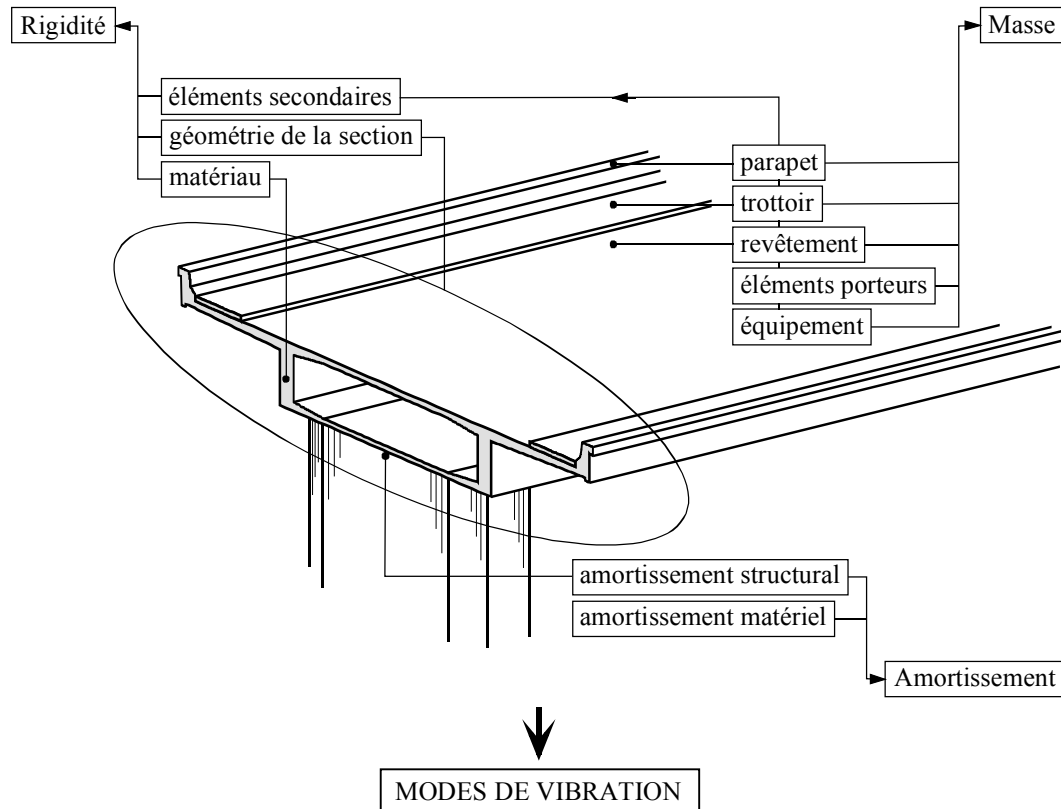


Figure 2.2 Éléments des ponts

Plusieurs méthodes existent pour quantifier l'amortissement (half-power band-width method, resonant amplification method, resonance energy loss per cycle method [32]), mais la plus utilisée dans le domaine des ponts est, sans doute, celle de la diminution des vibrations libres (free-vibration decay method) qui permet d'évaluer le décrément logarithmique. Même si l'amortissement structural est de type frictionnel, cette approche admet que l'amortissement global est essentiellement de type visqueux, c'est-à-dire que l'amplitude du mouvement décroît de façon exponentielle avec le nombre de cycles. La valeur du décrément logarithmique est pratique, bien que le rapport d'amortissement exprimé en pour-cent fournit une meilleure image de l'amortissement. L'amortissement tend à réduire les oscillations de hautes fréquences plus rapidement que celles de basses fréquences et atténue ainsi la contribution des modes supérieures de la structure.

### 2.2.3 Le profil de la chaussée

Le **profil** de la chaussée est un élément d'un grand intérêt pour l'étude du comportement dynamique d'un pont. Une distinction est faite entre le **profil statique** qui représente les irrégularités de la chaussée en fonction de la position et le **profil dynamique** qui correspond aux déflexions causées par les charges appliquées sur le pont. Le profil statique est déterminé par le profil en long de la route auquel est superposé les dénivellations aux appuis, les tassements différentiels des fondations ou les défauts d'alignement des travées, les contre-

flèches, les flèches dues aux effets différés et la rugosité du revêtement (Figure 2.3). Ces différentes composantes proviennent des tolérances de construction, des conditions d'exploitation ou des effets du temps. Les irrégularités du profil statique de la chaussée ont pour effet d'induire et d'entretenir les oscillations de la charge sur le système de suspension du véhicule.

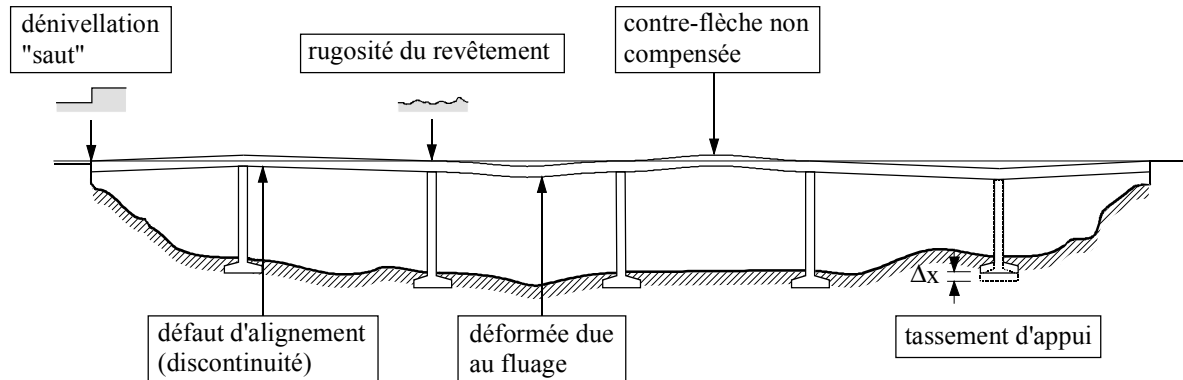


Figure 2.3 Profil statique d'un pont

#### 2.2.4 Les véhicules

Dans le cadre d'une étude sur le comportement dynamique des ponts, les poids lourds, à cause de leur masse élevée, sont les véhicules qui retiennent le plus l'attention. La connaissance de leur comportement dynamique est donc essentielle.

La géométrie des poids lourds définit le **nombre et l'espacement des essieux** et influence la **répartition des masses**. Ces paramètres déterminent l'intensité et la position des charges statiques appliquées sur l'ouvrage.

Les **systèmes de suspensions** des camions sont classés dans deux catégories principales qui sont d'une part, les systèmes composés de lames d'acier et d'autre part, les systèmes pneumatiques. Les suspensions à lames d'acier sont les plus répandues, mais la tendance actuelle est plutôt favorable aux systèmes pneumatiques. La suspension est caractérisée par sa rigidité et son amortissement. Le frottement qui se développe entre les lames des suspensions en acier cause un fort amortissement et rend les suspensions efficaces uniquement au-delà d'un seuil minimum, contrairement aux suspensions pneumatiques qui sont opérationnelles pour toutes intensités de l'amplitude des vibrations.

Les **pneus** influencent également les mouvements vibratoires des véhicules routiers. Pour tenir compte des vibrations causées par la flexibilité des pneus, le système de suspension et le pneu doivent être dissociés. La structure du pneu caractérisée par le nombre et la disposition des bandes de caoutchouc qui la constitue ainsi que la pression d'air de gonflage influencent la rigidité du pneu et son amortissement.

L'ensemble des paramètres cités (Figure 2.4) déterminent les propriétés modales du véhicule, à savoir les modes et les fréquences associées qui composent les mouvements vibratoires du camion lorsque ce dernier roule sur une chaussée. Quatre types d'oscillations caractérisent le mouvement d'un véhicule:

- le **bondissement**

Le bondissement correspond au mouvement vertical de la masse du véhicule.

- le **tangage**

Le tangage est le mouvement du véhicule autour d'un axe perpendiculaire à son axe longitudinal et ses effets sont couplés à ceux des oscillations verticales (bondissement).

- le **roulis**

Le roulis représente le balancement de la masse du véhicule autour de son axe longitudinal et provient de l'effet de roulement.

- le **sautillement**

Le sautillement caractérise le mouvement vertical des essieux.

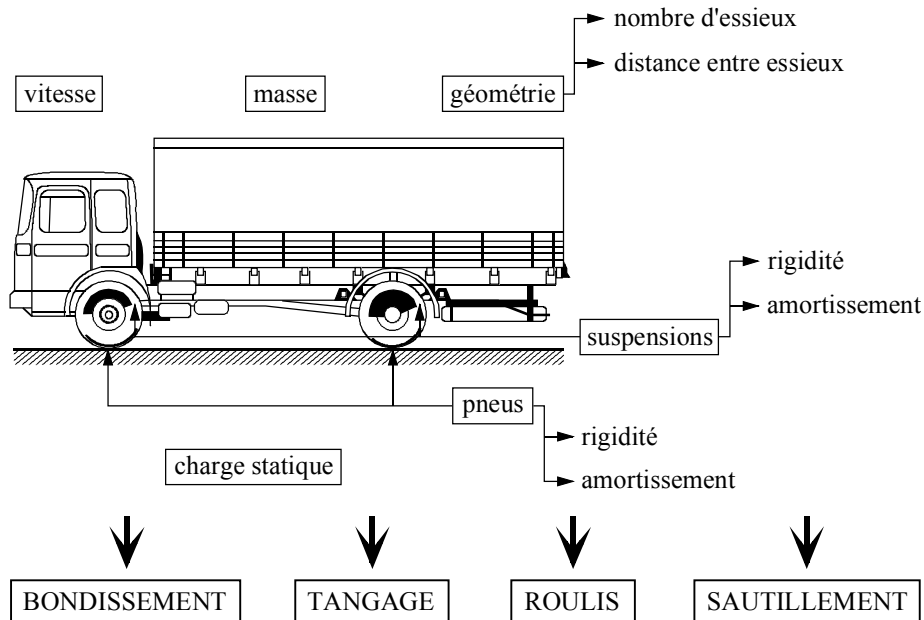


Figure 2.4 Éléments des véhicules

Il faut également mentionner comme éléments importants, le **nombre** et la **vitesse** des véhicules circulant sur le pont. Le nombre de véhicules qui chargent simultanément l'ouvrage modifie le comportement vibratoire de ce dernier. La vitesse détermine la durée du régime de vibrations forcées auquel l'ouvrage est soumis.

### 2.2.5 Interaction des éléments contribuant au phénomène

Plusieurs paramètres décrits dans les paragraphes précédents n'ont pas seulement une influence directe sur le comportement dynamique des ponts traversés par des véhicules, mais, de plus, ils interviennent en interaction avec d'autres facteurs.

Suivant la valeur du **rapport des masses** défini par la masse totale du véhicule divisée par la masse totale de la superstructure, le contenu en fréquence des vibrations du pont change dans le temps, car la mobilité des charges fait varier la distribution des masses du système pont + véhicule. Si l'amplitude des oscillations de la masse du véhicule est grande, la sensibilité de la réponse du pont à la variation du rapport des masses dépend aussi du **rapport des fréquences**. Ce rapport est exprimé par la fréquence des oscillations verticales du véhicule divisée par la fréquence fondamentale du pont. Des vibrations de grandes amplitudes sont observées en cas de résonance, lorsqu'une force perturbatrice sollicite un système vibratoire avec une fréquence égale à celle du système. Dans le cas des ponts, il est plus approprié de parler d'un phénomène de quasi-résonance, car la quantité d'énergie transmise au pont n'est pas infinie et la vibration forcée ne dure pas suffisamment longtemps pour que la résonance se développe.

L'influence de la **vitesse** est indissociable de l'**espacement des essieux** du véhicule et du **profil de la chaussée**. La vitesse représente le moyen par lequel la chaussée devient la force perturbatrice du véhicule. La vitesse et la rugosité de la chaussée sont les paramètres qui

privilégient les mouvements des véhicules selon un mode plutôt qu'un autre. La vitesse du véhicule associée à l'espacement des essieux déterminent la fréquence d'application des charges sur un élément structural. Différentes valeurs de cette fréquence peuvent être déterminées pour un véhicule constitué de plusieurs essieux. Pour de faibles vitesses, l'espacement des essieux tandem doit être considéré, alors que pour des vitesses plus élevées, l'espacement de base, en considérant le tandem comme un seul essieu, devient plus important.

### 2.3 Définitions du facteur d'amplification dynamique

Le facteur d'amplification dynamique est une valeur qui majore les effets statiques d'un pont causés par la charge statique d'un véhicule mobile, pour tenir compte des effets dynamiques provoqués par le passage de ce véhicule. Cette approche revient à considérer les effets dynamiques comme des effets statiques supplémentaires pour lesquels le principe de superposition s'applique pour autant que le comportement de la structure reste linéaire.

Suivant les auteurs et suivant les pays, la désignation et la définition du facteur d'amplification dynamique est quelque peu différente, bien que l'objectif commun soit de fournir une valeur qui permette de considérer les effets dynamiques liés au trafic pour conserver le caractère statique de l'analyse des ponts. Le terme de facteur d'amplification dynamique est le plus répandu et est défini de la manière suivante:

$$\text{Amplification Dynamique (AD)} = \frac{R_{\text{dyn}} - R_{\text{sta}}}{R_{\text{sta}}} \quad (2.1)$$

où  $R_{\text{dyn}}$  = réponse dynamique maximum

$R_{\text{sta}}$  = réponse statique maximum

$$R_{\text{dyn}} = R_{\text{sta}} (1 + \text{AD}) \quad (2.2)$$

$$\text{Facteur d'Amplification Dynamique (FAD)} = (1 + \text{AD}) \quad (2.3)$$

Par conséquent, le rapport entre la réponse<sup>1</sup> dynamique et la réponse statique qui représente le facteur d'amplification dynamique, est très souvent utilisé:

$$\text{FAD} = \frac{R_{\text{dyn}}}{R_{\text{sta}}} \quad (2.4)$$

La notion de facteur d'impact ou d'incrément dynamique exprimé en pour-cent est également utilisée dans la littérature:

$$I (\%) = \left( \frac{R_{\text{dyn}}}{R_{\text{sta}}} - 1 \right) \times 100\% \quad (2.5)$$

Les termes "facteur dynamique" ou "coefficient dynamique" sont couramment mentionnés et correspondent au terme "facteur d'amplification dynamique".

Certains auteurs [15] ont proposé des définitions plus fines des facteurs d'amplification dynamique, notamment pour les ponts composés de plusieurs travées. Des régions séparées sont définies pour un pont typique à trois travées, relativement à la localisation où les réponses maximales sont attendues (Figure 2.5).

<sup>1</sup> Le terme "réponse" correspond à la réponse de divers effets dans le pont (déplacements, déformations, efforts et réactions d'appui).

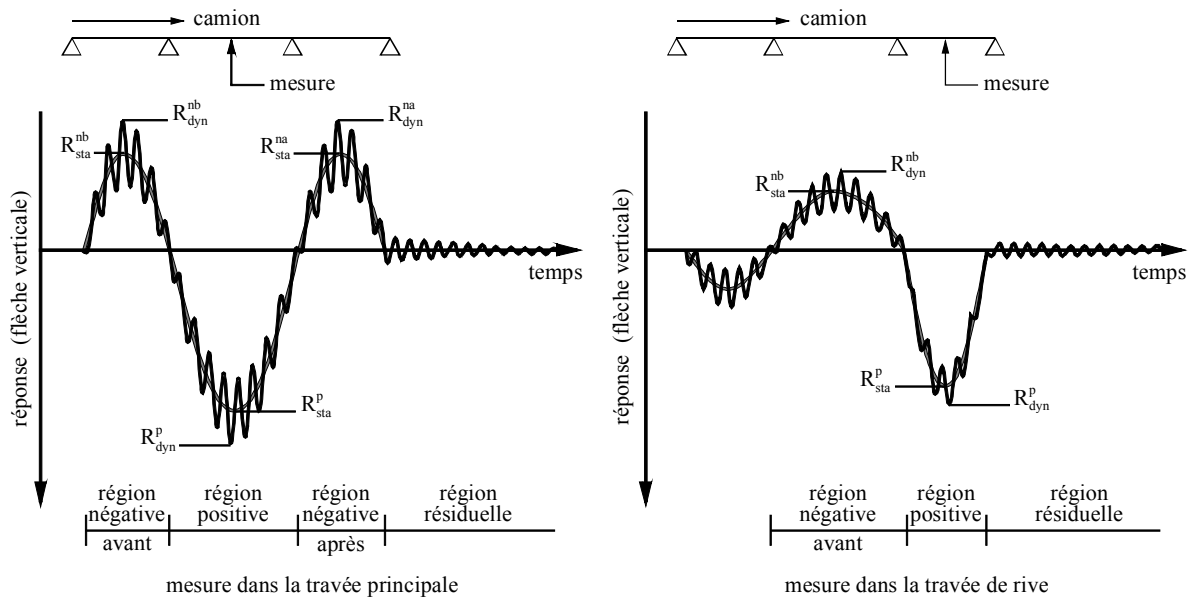


Figure 2.5 Découpage des réponses en régions

Dans la région positive, le véhicule est localisé dans la même travée que la jauge observée; dans la région négative, le véhicule est placé dans la travée adjacente. Dans la région résiduelle, le pont est en vibrations libres. Une fois les valeurs maximales des réponses statiques et dynamiques déterminées dans chaque région, un facteur d'amplification dynamique peut être calculé pour chacune d'elle. Afin d'éviter une surestimation de l'amplification dynamique, les réponses dynamiques sont rapportées à la réponse statique la plus grande de l'effet mesuré à différents endroits dans une même section [16].

En fait, les facteurs d'amplification dynamique sont des quantités qui dépendent de variables aléatoires et devraient être traités sur une base statistique comme cela se fait pour les charges statiques. Une méthode pour définir une valeur de dimensionnement du facteur d'amplification dynamique a été proposée dans le code ontarien de 1979 [66].

Des divergences plus marquées existent dans la définition des facteurs d'amplification dynamique calculés à partir d'un enregistrement des réponses statiques et dynamiques d'une structure [10]. La réponse statique utilisée pour définir le facteur d'amplification dynamique est, dans certain cas, celle obtenue à l'instant  $t_{dyn}$  où la réponse dynamique maximale est obtenue ou encore à l'instant  $t_{sta}$  où la réponse statique maximale est obtenue. Les réponses maximales statiques et dynamiques ne surviennent généralement pas pour une même position de la charge (Figure 2.6). De plus, la section critique où se produit la réponse statique maximale n'est pas nécessairement la même que celle où se produit la réponse dynamique maximale le long du pont.

Les réponses statiques obtenues par le traitement des réponses dynamiques au moyen d'une série de filtres créent encore de nouvelles distinctions entre les définitions du facteur d'amplification dynamique [10].



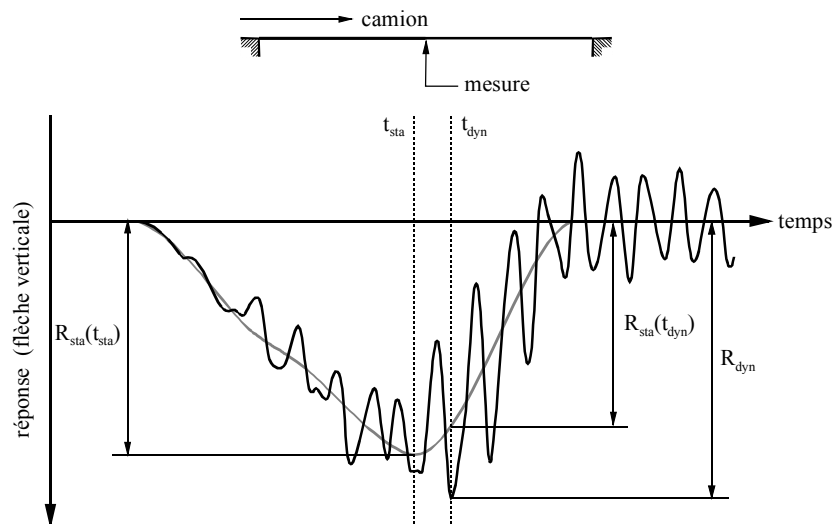


Figure 2.6 Réponse statique et dynamique

Le calcul des facteurs d'amplification dynamique à partir des déformations statiques et dynamiques est préférable, car le dimensionnement est basé sur la grandeur des efforts qui sollicitent les éléments structuraux. Les charges statiques sont amplifiées pour occasionner les efforts maximaux prévisibles ou attendus. Les facteurs d'amplification dynamique estimés à l'aide des déplacements verticaux ne sont pas forcément adéquats, car les efforts maximaux ne sont généralement pas proportionnels aux déplacements.

## 2.4 Normes et codes de dimensionnement

### 2.4.1 Généralités

Dans la plupart des normes, dans l'optique du dimensionnement des ponts, les charges dynamiques des véhicules sont pris en compte en multipliant les charges statiques modélisant le trafic par un facteur d'amplification dynamique. Les facteurs d'amplification dynamique mentionnés dans les normes de dimensionnement sont des valeurs maximales qui doivent couvrir les situations extrêmes pouvant survenir sur un ouvrage. Le facteur d'amplification dynamique est basé sur les résultats de campagnes d'essais dynamiques effectués sur des ouvrages existants. Ces facteurs étaient généralement donnés en fonction soit de la portée, soit de la fréquence fondamentale de vibration (premier mode de flexion longitudinale) du pont. La philosophie de cette approche découle du fait que les effets dynamiques les plus importants sont rencontrés lorsqu'une fréquence de vibration du pont est approximativement égale à une des fréquences de vibration des poids lourds. En général, la vibration suivant le premier mode de flexion longitudinale domine la réponse globale de la structure à une fréquence qui correspond souvent à la bande de fréquences dans laquelle se situe les oscillations verticales des véhicules. La plupart des codes recommandaient l'application d'un facteur d'amplification dynamique décroissant pour une augmentation de la portée du pont.

Plus récemment, le facteur d'amplification dynamique a été défini par une valeur unique dans la norme de dimensionnement suisse [83], américaine [5] et canadienne. Le choix d'un facteur d'amplification dynamique indépendant de la fréquence fondamentale ou de la portée permet de simplifier le calcul des charges de trafic lors de la conception de l'ouvrage alors que tous les paramètres nécessaires pour déterminer les caractéristiques dynamiques ne sont pas encore connus.

Les relations ou les valeurs préconisées pour le facteur d'amplification dynamique ne prennent pas en compte tous les paramètres liés au pont (type de pont, amortissement, profil

de la chaussée) et les paramètres liés au véhicule (vitesse, masse, type de suspension, type de véhicule). Les facteurs d'amplification dynamique fournis par les normes masquent en fait la réalité de l'interaction complexe entre le mouvement de l'ouvrage et celui du ou des véhicules qui le traversent.

Bien que les charges utiles modélisant le trafic routier soient différentes d'un pays à l'autre, cela n'explique pas les différences importantes des facteurs d'amplification dynamique proposés dans les différents codes nationaux. La comparaison des facteurs d'amplification dynamique donnés dans les différentes normes est très délicate, car d'une part, les modèles de charge sont variés et d'autre part, certains codes prescrivent l'application du facteur d'amplification dynamique à l'ensemble des modèles de charge alors que d'autres les appliquent seulement à certains types de modèles de charge.

Les facteurs d'amplification dynamique tirés de quelques normes de dimensionnement des ponts routiers sont brièvement résumés ci-dessous afin de donner un ordre de grandeur des valeurs et de montrer l'évolution au cours des années. Les termes employés pour désigner les facteurs d'amplification dynamique dans les documents originaux ont été conservés ou traduits le plus fidèlement possible.

#### 2.4.2 En Suisse

Les normes SIA 160 de 1956 [80] et de 1970 [82] définissaient le *coefficient dynamique* de la même manière. Dans ces deux éditions, les charges de trafic étaient toutes augmentées par un *coefficient dynamique*  $\phi_2$  qui dépendaient de la portée de l'élément calculé.

$$\phi_2 (\%) = 5 \cdot \frac{100 + L}{10 + L} \quad \text{où } L \text{ est la portée en [m]} \quad (2.6)$$

Ce coefficient était valable pour tous les types de ponts à l'exception des voûtes en béton ou en maçonnerie. Dans ces cas, la moitié de la valeur du coefficient était considérée.

Dans la norme SIA 160 de 1956, il était mentionné que ce coefficient était valable pour des chaussées avec seulement de petites irrégularités et que si cette condition n'était pas assurée, le *coefficient dynamique* était augmenté de 50% [80].

Lors de l'élaboration de la norme SIA 160 de 1989 et suite aux travaux de Cantieni [22], un *coefficient dynamique* dépendant de la fréquence fondamentale du pont a été proposé (Figure 2.7), mais, par soucis de simplicité, cette option a été abandonnée au profit d'une valeur constante.

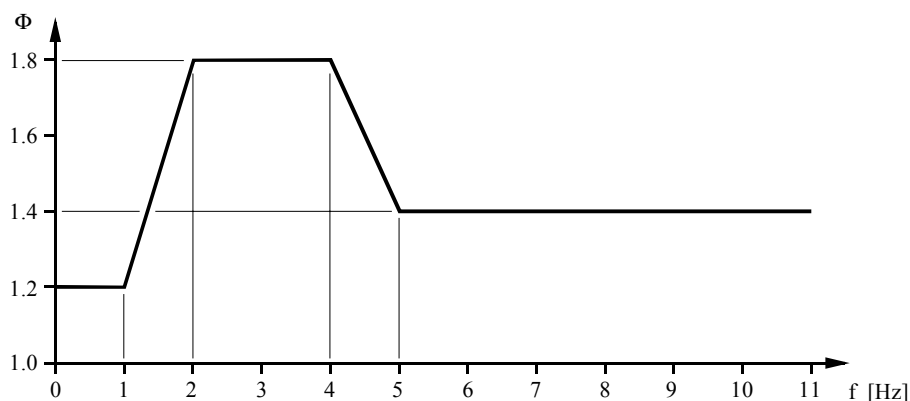


Figure 2.7 Coefficient dynamique proposé

La norme de charge actuelle en Suisse [83] propose une valeur unique  $\Phi = 1.8$  pour le *coefficient dynamique* qui majore un modèle de charge représentant l'action concentrée d'un

groupe d'essieux. Cette majoration s'applique lors de la vérification de chaque état limite. La norme précise que "la sensibilité d'une structure porteuse à l'égard des actions dynamiques du trafic dépend de la fréquence fondamentale de ses modes propres de vibration verticale et de la qualité du revêtement [83]". Il est mentionné que "le *coefficient dynamique* tient compte du comportement des structures pour une fréquence fondamentale défavorable et que la qualité du revêtement doit remplir des exigences minimales [83]".

Cette dernière édition de la norme présente un changement par rapport aux précédentes où le *coefficient dynamique* était donné en fonction de la portée de l'élément structural considéré.

### 2.4.3 En Europe

Selon l'Eurocode 1 [33], l'amplification dynamique est incluse dans les modèles de charge de trafic excepté pour ceux destinés à la vérification de la fatigue. Il est mentionné dans l'Eurocode 1 que "le facteur d'amplification dynamique dépend de plusieurs paramètres, bien qu'il soit établi pour une rugosité moyenne du revêtement et pour des suspensions normales de véhicules. Dans les cas les plus défavorables, il peut atteindre la valeur de 1.7. Des valeurs encore plus défavorables peuvent être atteintes pour un revêtement très rugueux ou s'il y a un risque de résonance. Ces cas doivent être évités par une qualité appropriée et des mesures de dimensionnement". Les critères d'évaluation de la qualité et les mesures de dimensionnement à prendre ne sont pas précisés.

### 2.4.4 Au Canada

La première édition du code OHBDC (Ontario Highway Bridge Design Code) de 1979 [66] a été établie en introduisant un concept de chargement dynamique différent de celui défini par le code AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) ceci, principalement, en raison de l'introduction de la philosophie des états limites. L'amplification dynamique éq. (2.1) "*Dynamic Load Allowance*" était fixée à 0.4 pour les tabliers et à 0.35 pour les poutres dont la longueur ne dépasse pas 12 m. Une valeur de l'amplification dynamique variant de 0.30 à 0.45 était fixée pour les éléments principaux longitudinaux en fonction de la fréquence du mode fondamentale de flexion de la structure. Lorsque les fréquences de la structure se situaient entre 2.5 et 4.5 Hz, la valeur supérieure de l'amplification dynamique était utilisée (0.45). Suite aux essais effectués par Billing [15], le code a été révisé en 1983 [67] et l'amplification dynamique était définie en fonction de la fréquence fondamentale de l'ouvrage. La valeur de l'amplification dynamique était fixée à 0.2 et, pour des fréquences entre 2.5 et 4.5 Hz, à 0.4.

La dernière édition du code ontarien de 1992 [68] propose une valeur constante de l'amplification dynamique en fonction du nombre d'essieux du modèle de charge utilisé. Une valeur de 0.3 est donnée pour les camions à deux essieux et une valeur de 0.25 pour des véhicules avec trois essieux et plus.

La norme canadienne CAN/CSA-S6-88 [6] inspirée du code de l'Ontario suit les mêmes recommandations que la version de 1983 de ce dernier. La future norme canadienne CHBDC (Canadian Highway Bridge Design Code) qui remplacera la norme CAN/CSA-S6-88 utilisera la même approche que la norme ontarienne de 1992.

### 2.4.5 Aux États-Unis

Les prescriptions établies par "American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)" proposaient déjà en 1931 une amplification dynamique en fonction de la longueur du pont avec une valeur maximale de 0.25.

$$I = \frac{50}{L + 160} \quad \text{où } L \text{ est en [pieds]} \quad \text{ou} \quad I = \frac{15.24}{L + 48.77} \quad \text{où } L \text{ est en [m]} \quad (2.7)$$

Le code AASHTO actualisé en 1992 [1] mentionnait que les charges utiles routières devaient être augmentées pour le calcul des éléments structuraux de la superstructure et des piles pour tenir compte des effets dynamiques dus aux vibrations et aux chocs et que la valeur de l'incrément "*impact allowance or increment*" était exprimée comme une fraction des contraintes des charges utiles et devait être déterminée par la relation (2.8).

$$I = \frac{50}{L + 125} \quad \text{où } L \text{ est en [pieds]} \quad \text{ou} \quad I = \frac{15.24}{L + 38.1} \quad \text{où } L \text{ est en [m]} \quad (2.8)$$

De plus, l'amplification dynamique I "*impact fraction*" était limitée à la valeur maximale de 0.3.

Dans la dernière révision du code AASHTO de 1994 [5], la charge vive spécifiée est considérée comme une combinaison du véhicule standard HS20 et d'une charge uniformément distribuée de 9.8 kN/m (640 lb/ft). L'amplification dynamique "*Dynamic Load Allowance*" est exprimée comme une constante simple égale à 0.33 qui majore l'effet du véhicule seulement.

### 2.4.6 Au Japon

Les spécifications japonaises concernant les ponts routiers [59] stipulent que les contraintes des charges utiles doivent être augmentées par les effets d'impact. Le coefficient d'impact ne doit pas être appliqué aux charges sur les trottoirs ainsi qu'aux câbles principaux et aux poutres rigides des ponts suspendus. Le coefficient d'impact pour les superstructures doit être calculé en utilisant les longueurs de portée données dans un tableau en fonction du type de système statique. Les coefficients d'impact dépendent encore du type de matériau (acier, béton armé et béton précontraint) ainsi que du type de charge (uniforme ou ponctuelle).

Les relations qui permettent de déterminer le coefficient d'impact, selon les cas, sont reproduites dans le tableau ci-dessous.

Type de matériau	Coefficient d'impact	Type de charge appliquée
Pont en acier	$i = \frac{20}{50 + L}$ où L est en [m]	Charges concentrées et réparties
Pont en béton armé	$i = \frac{20}{50 + L}$	Charges concentrées
	$i = \frac{7}{20 + L}$	Charges réparties
Pont en béton précontraint	$i = \frac{20}{50 + L}$	Charges concentrées
	$i = \frac{10}{25 + L}$	Charges réparties

Tableau 2.1 Coefficients d'impact du code japonais

## 2.5 Études numériques

### 2.5.1 Généralités

Afin de représenter le comportement dynamique des ponts traversés par des véhicules, une grande variété de modèles numériques ont été proposés. Ces modèles se distinguent principalement par la manière de représenter le pont, le profil de la chaussée et le véhicule.

Les systèmes d'équations différentielles du mouvement établis sur la base des modèles ont été résolus à l'aide de diverses méthodes numériques.

### 2.5.2 Modèles de pont

Traditionnellement, les tabliers des ponts ont été modélisés comme des poutres avec ou sans degrés de liberté à la torsion et comme des plaques orthotropes pour résoudre les problèmes dynamiques. Pour les ponts à moyenne et longue portée, la modélisation en poutre est efficace pour représenter le comportement global. Dans les autres situations et pour l'étude des effets dynamiques locaux, un modèle avec des plaques orthotropes représente la flexibilité transversale de manière plus réaliste. Le choix entre des modèles de type "poutre" ou "plaque" est dicté par le modèle de véhicule disponible, en particulier si ce dernier permet ou non de représenter l'effet de roulis.

Par le passé des méthodes analytiques ont été proposées pour résoudre le problème de l'interaction dynamique entre un véhicule et un pont, mais la complexité des structures et des conditions de chargement limitent les solutions à quelques cas simples. La méthode des éléments finis, aujourd'hui largement employée dans tous les domaines de l'ingénierie, est très attrayante, car elle permet de réaliser des modèles de structures complexes et d'utiliser des approximations numériques pour résoudre une grande variété de problèmes. Dans l'approche par éléments finis, les ponts peuvent être modélisés par des éléments de coques, de plaques et de poutres tridimensionnelles. Ces éléments développés par différents auteurs se distinguent souvent par le nombre de nœuds et le nombre de degrés de liberté. Les matrices élémentaires de masse et de rigidité sont assemblées afin de former les matrices globales de la structure. La matrice d'amortissement est le plus souvent constituée par une combinaison linéaire de la matrice de masse et de rigidité. Ces données complétées par le vecteur de forces représentent les équations du mouvement du pont.

### 2.5.3 Modèle du profil de la chaussée

Le profil a été traité en considérant soit des irrégularités locales, soit la rugosité répartie sur la surface complète de la chaussée.

Les défauts d'alignement et les sauts aux joints de dilatation des ponts [43] [44], de même que les irrégularités locales (nids de poules, ...) [75] ont été simulés afin d'évaluer l'influence de telles discontinuités sur les effets dynamiques provoqués par des véhicules en mouvement sur un pont.

La rugosité des revêtements routiers a été étudiée, entre autre, par Dodds et Robson [36] ainsi que par Honda et al [50]. La description de la surface de la chaussée peut être admise comme la réalisation d'un processus aléatoire gaussien à deux dimensions, homogène et isotrope. Pour un tel processus, les fonctions de corrélation fournissent une description statistique. L'isotropie permet une description complète par une seule fonction de corrélation ou une seule fonction de densité spectrale évaluée à partir des mesures de profils longitudinaux.

La fonction de densité spectrale  $S(n)$  établie par Dodds et Robson [36] est la suivante:

$$S(n) = \begin{cases} S(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-w_1}, & n \leq n_0 \\ S(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-w_2}, & n \geq n_0 \end{cases} \quad (2.9)$$

où  $S(n_0)$  est le coefficient de rugosité ou la valeur de la densité spectrale à la fréquence de discontinuité  $n_0$  ( $n_0 = 1/2\pi$  cycle/m) et  $w_1$  et  $w_2$  sont les exposants de rugosité spectrale.

La fonction de densité de puissance spectrale  $S_r(\Omega)$  proposée par Honda et al [50] est donnée ci-dessous:

$$S_r(\Omega) = \begin{cases} a\Omega_c^{-n}, & \Omega \leq \Omega_c \\ a\Omega^{-n}, & \Omega > \Omega_c \end{cases} \quad (2.10)$$

où  $a$  est le coefficient de rugosité,  $n$  est l'exposant de rugosité spectrale et  $\Omega$  est la fréquence de rugosité (rad/m).  $\Omega_c$  représente une fréquence de discontinuité en dessous de laquelle la fonction de densité de puissance spectrale reste constante.

Marcondes et al [64] ont donné des fonctions ajustées de densités de puissance calculées à partir de mesures. Les différences principales tiennent dans les valeurs de ces fonctions pour les grandes longueurs d'ondes.

Sous l'impulsion du groupe de travail ISO TC 108, une proposition pour la classification de la rugosité des chaussées a été développée sur la base d'un paramètre du spectre  $\Phi(\Omega_0)$  avec un exposant constant  $w=2$  [58]. La densité spectrale de la rugosité  $\Phi(\Omega)$  est définie par une fonction exponentielle qui, dans un graphique où l'échelle des axes est logarithmique, est représentée par une droite (Figure 5.5).

$$\Phi(\Omega) = \Phi(\Omega_0) \cdot \left[ \frac{\Omega}{\Omega_0} \right]^{-2} \quad (2.11)$$

Des méthodes ont été développées pour générer numériquement le profil de la chaussée à partir de la fonction de densité de puissance spectrale par la technique de simulation de Monte-Carlo [26], [56]. Le profil représenté par un processus aléatoire gaussien et stationnaire peut être généré par une transformée inverse de Fourier:

$$r(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{4S(\Omega_n)\Delta\Omega} \cos(\Omega_n t - \theta_n) \quad (2.12)$$

où  $S(\Omega_n)$  est la fonction de densité de puissance spectrale,  $\Omega_n$  est la fréquence circulaire et  $\theta_n$  est l'angle de phase distribué uniformément de 0 à  $2\pi$ .

#### 2.5.4 Modèles de véhicule

Les modèles de véhicule se distinguent principalement par le type d'analyse (2 ou 3 dimensions), par le nombre de degrés de liberté, par la disposition des masses et par les lois de comportement des suspensions et des pneus. Les modèles sont décrits en considérant un ordre croissant des degrés de liberté.

Le véhicule mobile a d'abord été remplacé par une seule force mobile constante et concentrée où les forces d'inertie associées sont complètement absentes [86], [46], [40]. Le caractère dynamique des charges appliquées par le camion a aussi été considéré par une composante constante et une composante dynamique variant sinusoidalement avec une amplitude égale à 10% de la charge statique [28]. Certains auteurs [2] ont considéré l'effet de la masse du véhicule et proposent des solutions pour résoudre le cas d'une masse mobile concentrée et constante traversant une poutre avec diverses configurations d'appuis. Par la suite, un système mécanique à un degré de liberté a été employé pour mieux représenter le mouvement du véhicule (Figure 2.8a) [40]. L'extension du modèle à deux degrés de liberté a permis de distinguer la masse du châssis de celle des essieux et de considérer les fréquences de vibration différentes de ces deux éléments (Figure 2.8b). Dans ces deux cas, la plupart du

temps, des relations linéaires ont été attribuées aux ressorts et, parfois, aux amortisseurs visqueux qui lient les masses.

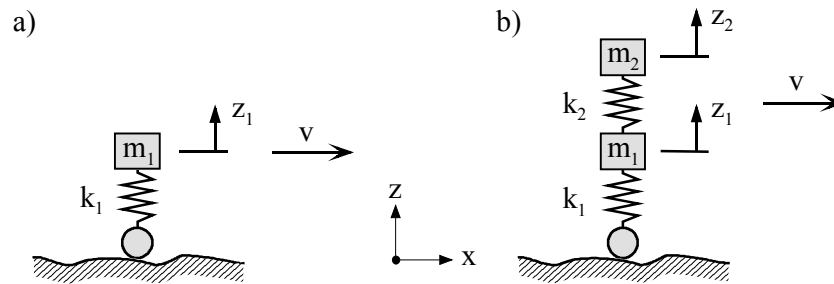


Figure 2.8 Modèles de véhicule à un et deux degrés de liberté

Les modèles décrits en deux dimensions sont valables pour autant que la portée du pont soit grande par rapport à l'espacement des essieux. Si tel n'est pas le cas, chaque essieu du véhicule doit être modélisé. Dans ce cas, le modèle de camion à deux essieux est constitué du châssis considéré comme un corps rigide posé sur deux ressorts avec, en parallèle, un amortisseur visqueux [34]. D'autres auteurs ont amélioré ce modèle en suspendant un corps rigide sur deux essieux dont les masses sont indépendantes du corps rigide et où les suspensions et les pneus sont représentés. Le système forme un modèle de véhicule à 4 degrés de liberté. Les résultats obtenus avec ces types de modèles ont montré que plusieurs modes de vibration influencent la réponse du pont alors que, si le véhicule est considéré comme une force constante, concentrée et mobile, la contribution de seulement quelques modes suffit pour représenter adéquatement la réponse. Les oscillations du véhicule sur ses suspensions ont également une influence significative sur les réponses des ponts.

En 1970, Veletsos et Huang introduisent une représentation en deux dimensions d'un véhicule à trois essieux. Le système de suspension est constitué par un ressort avec en parallèle un amortisseur de Coulomb. Les pneus sont modélisés par un ressort uniquement. La masse totale du véhicule est concentrée au-dessus de la suspension. La force de frottement dans le système de suspension est représentée par une relation force - déplacement bilinéaire [89]. Mulcahy propose un modèle similaire avec quelques améliorations, telles que l'adjonction d'amortisseurs visqueux au niveau des pneus et des suspensions et la distinction entre la masse des essieux et celle du châssis [69]. Gupta et Traill-Nash idéalisent le camion standard HS 20-44 du code AASHTO à deux essieux selon le modèle de Veletsos pour déterminer l'effet dynamique du freinage, du mouvement initial du véhicule et du profil de la chaussée sur les déformées de ponts à une seule travée [43], [44].

Wang et Huang utilisent un modèle de véhicule non linéaire en 2 dimensions avec 7 degrés de liberté. Le modèle comporte cinq masses représentant le tracteur, la remorque et les deux essieux du tracteur ainsi que celui de la remorque. Les forces de suspension sont composées d'une force élastique linéaire et une force de frottement constante. Le comportement est caractérisé par une loi bilinéaire qui permet de représenter les hystérèses produites dans les suspensions lors du cheminement du véhicule. La rigidité et l'amortissement du pneu sont linéaires [51], [91]. Huang, Wang et Shahawy proposent également des véhicules en trois dimensions qui représentent respectivement les véhicules de dimensionnement H-20-44 et HS-20-44 du code américain AASHTO [90], [52], [53], [92]. Un premier modèle avec deux essieux simples comporte 7 degrés de liberté et le second, un camion semi-remorque à trois essieux simples, est modélisé avec 12 degrés de liberté. Ces modèles tridimensionnels constituent une extension des modèles développés en 2 dimensions.

Ces modèles de véhicules ont été repris par Hwang et Nowak qui ont utilisé les relations établies et calibrées par Fancher [38] pour représenter le comportement des suspensions [56]. Ces relations sont basées sur des courbes de charge et de décharge non linéaires et sur des

courbes de forme exponentielle assurant la transition entre la courbe de charge et celle de décharge.

Savard et al ont utilisé des modèles de véhicules similaires à ceux de Huang, Wang et Shahawy et ont modélisé le comportement de la suspension par un ressort linéaire et un amortisseur visqueux. Des modèles de camions à deux essieux simples sont utilisés ainsi que des modèles de camions semi-remorques en 2D et en 3D [79]. Récemment, ces modèles ont été améliorés par Boudjelaal [19] qui a utilisé pour les suspensions les lois de comportement non linéaires établies par Fancher.

Dans la plupart des modèles de véhicules, les essieux tandem d'un camion ou les essieux tridem d'une remorque sont considérés indépendants les uns des autres, bien que ces configurations d'essieux soient conçues avec des éléments de liaison pour répartir les charges entre les essieux. En 1970, Page a étudié ces types d'essieux et a proposé des modèles afin de tenir compte du couplage qui existe entre les essieux tandem [73]. Ces modèles ont rarement été intégrés dans un modèle de véhicule complet. Récemment, Green, Cebon et Cole ont utilisé un modèle de véhicule semi-remorque où l'essieu tandem de la remorque a été modélisé avec un élément de liaison [42].

L'effet de l'intensité aléatoire des charges des camions dû à l'interaction entre le pont et le véhicule a été étudié. La force d'interaction aléatoire en fonction du temps a été générée à partir d'une fonction de densité de puissance spectrale de la force mesurée sur des véhicules légers [57]. Le flux des véhicules a été représenté par un train de forces concentrées avec des intensités aléatoires et l'arrivée des forces sur l'ouvrage a été déterminé par une loi de Poisson [81].

### 2.5.5 Résolution du système dynamique

La formulation générale du système pont + véhicule est exprimée par des équations qui décrivent les mouvements des véhicules et du pont. Les équations de mouvement du pont et de chaque véhicule sont résolues par des schémas d'intégration directe (différences finies, Newmark, ...[32] [11]) pour calculer les déplacements, les vitesses et les accélérations aux degrés de liberté définis sur le pont. Une autre alternative consiste, en premier lieu, à déterminer les modes et les fréquences correspondantes du pont lors d'une analyse en vibration libre et ensuite d'appliquer les techniques d'analyse modale standard (modes propres, vecteurs de Ritz, ...[32] [11]) pour découpler les équations de mouvement du pont. Le système réduit peut être résolu dans le domaine du temps. Récemment, Henchi et al ont développé un algorithme efficace pour résoudre le problème de l'interaction entre le véhicule et le pont d'une façon couplée [49].

En général, à cause de l'interaction entre le véhicule et le pont, le système d'équations est couplé. Dans certains cas, les non-linéarités introduites dans les lois de comportement, en particulier pour représenter les systèmes de suspension des camions, exigent une solution itérative à chaque pas de temps nécessaire à la progression des véhicules [11].

## 2.6 Études expérimentales

### 2.6.1 Généralités

Les essais dynamiques réalisés sur les ponts ont pour objectif de déterminer les caractéristiques dynamiques principales de l'ouvrage, c'est-à-dire la forme des premiers modes de vibration ainsi que la fréquence et l'amortissement correspondant. Ces informations permettent de vérifier les hypothèses de calcul admises lors de la conception de l'ouvrage dont le comportement dynamique sous l'action du vent, des séismes ou du trafic a fait l'objet d'études. Les résultats des essais in situ sont souvent utilisés pour calibrer un modèle numérique de la structure. Parallèlement à l'identification des caractéristiques dynamiques, le



but des essais est d'étudier la réponse d'un pont sollicité par le passage des véhicules afin de déterminer les facteurs d'amplification dynamique ou, plus rarement, la sensibilité des piétons vis-à-vis des vibrations.

Les essais dynamiques se différencient par le moyen utilisé pour exciter le pont afin de le faire vibrer. Les oscillations sont provoquées par un choc, par des générateurs hydrauliques, par des véhicules d'essai, par le trafic normal, par le vent, par le freinage d'un véhicule ou par la libération soudaine d'une charge statique ou d'un déplacement imposé. Ces essais sont effectués à la fin de la construction, durant la vie de l'ouvrage ou à des intervalles réguliers, afin de déceler des détériorations ou des dégâts qui se manifestent par de légères modifications des caractéristiques dynamiques de la structure.

Contrairement aux caractéristiques dynamiques qui peuvent être évaluées à partir des différents types d'essais, les facteurs d'amplification dynamique sont uniquement établis dans des conditions de trafic normal et contrôlé [17].

### 2.6.2 Tests avec véhicules d'essai

Les mesures dynamiques in situ de la réponse d'un pont au passage d'un véhicule d'essai sont effectuées depuis longtemps et sont, aujourd'hui, encore nécessaires pour déterminer les facteurs d'amplification dynamique. Jusqu'au milieu de ce siècle, l'approche analytique du problème était très difficile, car il était impossible d'intégrer les équations différentielles du mouvement du système constitué d'un véhicule mobile sur un pont. Ceci a été rendu possible grâce à la mise en œuvre des méthodes d'intégration numérique pas à pas et plus particulièrement au développement des moyens de calcul électronique modernes. Les modèles mathématiques qui ont alors été développés pour traduire le comportement vibratoire d'un pont chargé par le trafic routier, ne considéraient souvent que certains paramètres et parfois pas les plus déterminants. Les études expérimentales qui considèrent tous les éléments n'ont, de ce fait, jamais perdues de leur importance face aux simulations numériques.

Dans le même temps, la technique des essais dynamiques in situ s'est fortement améliorée au niveau de la saisie, de la collecte et du traitement des données. Les instruments de mesures mécaniques ont été remplacés par des appareils électriques branchés sur des systèmes d'acquisition de données électroniques. Les signaux ont pu être digitalisés et enregistrés sur des bandes magnétiques et, depuis peu, sur des supports de grande capacité. Le traitement des signaux effectué par les analyseurs de spectre et, maintenant, par des logiciels aux possibilités étendues facilitent l'interprétation des résultats autant dans le domaine du temps que dans celui des fréquences.

Dans la suite, les essais dynamiques sur les ponts sont abordés plus en détail en privilégiant toutefois, les éléments qui présentent un intérêt en relation avec ce travail. Les paramètres mesurés, le type de mesure ainsi que les traitements des résultats couramment effectués sont traités.

Les mesures couramment effectuées lors d'un essai dynamique se limitent souvent aux déplacements des poutres principales au milieu de la plus grande travée d'un pont. Des mesures dans les sections voisines au  $\frac{1}{4}$  et au  $\frac{3}{4}$  de la portée ainsi que dans les travées adjacentes sont également entreprises. En raison des conditions d'accessibilité sous l'ouvrage et du faible nombre de canaux ou des limitations de stockage des appareils d'acquisition de données, le nombre de mesures effectuées lors d'essais se limite souvent à moins de dix. Les mesures de déformation effectuées à l'aide de jauges collées soit sur la structure métallique, soit sur l'armature sont utilisées plutôt pour des investigations liées aux problèmes de fatigue et très rarement dans le contexte des essais visant à déterminer les facteurs d'amplification dynamique. L'explication réside dans le fait que les mesures de déplacement ont traditionnellement été utilisées pour évaluer les facteurs d'amplification dynamique.

La planéité de la chaussée constitue un élément important qui détermine la valeur des facteurs d'amplification dynamique d'un pont. Paradoxalement, le profil réel de la chaussée est rarement mesuré préalablement à un essai dynamique avec des camions d'essai. Plusieurs méthodes de mesure ont été développées pour caractériser le profil. En Suisse, la qualité de la planéité d'un revêtement routier est définie par la dispersion de la valeur de l'angle formé par deux droites déterminées par trois points du profil espacés de 1 m chacun sur un tronçon de 250 m (3.4.2). Un équipement mobile constitué de trois roues placées l'une derrière l'autre permet d'enregistrer les valeurs nécessaires à la classification de la chaussée. Les mesures effectuées avec un profilomètre complétées par un nivellement permettent d'acquérir l'image du profil qui peut être traitée numériquement pour établir la dispersion des valeurs d'angle ou le spectre de la rugosité de la chaussée. Aujourd'hui, des appareils sophistiqués embarqués dans un véhicule permettent d'obtenir rapidement des informations sur les caractéristiques du profil de la chaussée parcourue.

Bien qu'elle ne soit pas indispensable pour un essai dynamique, l'instrumentation des véhicules permet une meilleure compréhension de l'interaction dynamique entre le pont et le véhicule. Les forces exercées par les roues sur le sol et le comportement des suspensions ont été mesurés lors d'essais de grande envergure [1], [22]. La variation des forces appliquées par les roues a été déterminée par la déformation du pneu mesurée au moyen d'un faisceau lumineux réfléchi sur la chaussée [22]. L'accélération verticale et les déformations de cisaillement de l'essieu à proximité du moyeu de la roue permettent de déduire la variation de la force produite par le camion sur le pont [25]. Lors de tests [1], les déplacements relatifs des suspensions ont été mesurés au moyen de potentiomètres. Les essais sur un pont avec un véhicule instrumenté nécessitent un système d'acquisition embarqué à bord du camion et un second au sol pour recueillir les mesures effectuées sur l'ouvrage. Afin de pouvoir exploiter pleinement les résultats, les appareils sont synchronisés lorsque le véhicule équipé de capteurs franchit l'entrée du pont.

La vitesse du véhicule est un paramètre important des essais in situ. En général, elle doit être maintenue constante pendant la phase d'approche et durant la traversée du pont. La vitesse est contrôlée au tachymètre et est souvent mesurée par un système externe placé sur le camion. Pour certains essais, seule la valeur moyenne, établie à partir de la durée de parcours sur le pont, est calculée.

Les essais dynamiques sur les ponts sont parfois complétés par des tests préalables sur le véhicule et sur le pont afin de déterminer leurs modes et leurs fréquences de vibration, l'amortissement, la charge statique appliquée sur chaque roue, etc.

Les résultats des essais dynamiques sur les ponts, dans des conditions de trafic contrôlé, se présentent, en général, sous la forme de diagrammes où le facteur d'amplification dynamique est exprimé en fonction de la vitesse de passage. La force moyenne exercée par chaque essieu peut être reportée dans un graphique similaire. L'analyse dans le domaine des fréquences des réponses du véhicule et du pont permet de connaître les fréquences des forces des roues, les modes de vibration du véhicule en régime forcé et d'étudier les phénomènes d'interaction qui se développent lorsque le camion chemine sur le pont.

Une des difficultés de la définition des facteurs d'amplification dynamique est qu'elle implique la connaissance des réponses statiques et dynamiques de la structure. Des tests statiques et dynamiques doivent donc être effectués pour les mêmes cas de chargement sur chacune des structures expérimentées. Des tests statiques ne peuvent évidemment pas être effectués dans les conditions d'un pont instrumenté pour mesurer sa réponse dynamique causée par le trafic. Si dans certains cas, le passage lent (2 - 3 km/h) du véhicule d'essai à travers le pont permet d'établir la réponse "statique" ou quasi-statique qui est utilisée pour calculer le facteur d'amplification, il est aussi possible d'estimer la réponse statique en éliminant à l'aide de filtres les composantes dynamiques de la réponse dynamique. De cette

approche sont apparues d'autres définitions pour le facteur d'amplification dynamique ce qui crée souvent des nuances entre les résultats d'essais différents.

Les essais in situ sont un excellent moyen pour comprendre les phénomènes d'interaction entre le véhicule et le pont, néanmoins ils ne permettent pas d'effectuer des études paramétriques complètes. Par exemple, le profil de la chaussée ne peut pas constituer un paramètre d'étude, car, à de rares exceptions près, il n'est pas envisageable de changer le revêtement. L'influence de certains éléments structuraux des ponts sur les facteurs d'amplification dynamique est difficile à déterminer, car, entre deux ponts similaires, la qualité de planéité différente du revêtement à l'approche ou sur le pont anéantit toutes comparaisons objectives. Pour l'étude de certains paramètres, l'analyse numérique est plus attrayante malgré toutes les difficultés liées à la modélisation adéquate du phénomène complexe de l'interaction dynamique entre les véhicules et le pont.

## 2.7 Influence des paramètres sur les facteurs d'amplification dynamique

Les principaux paramètres et leur influence ont été établis sur la base des essais expérimentaux et des analyses numériques effectués par le passé.

La réponse dynamique des ponts routiers au passage de poids lourds est déterminée par la relation entre le spectre de fréquences de la force dynamique appliquée par les roues et la fréquence propre fondamentale du pont. La majorité des ponts routiers modernes ont leur première fréquence propre entre 2 et 5 Hz [21] ce qui correspond à la bande de fréquences dans laquelle le châssis des poids lourds vibrent. Le spectre de la force dynamique appliquée par une roue n'est pas constant et dépend de la vitesse du véhicule et du spectre de la rugosité du profil de la chaussée. Cette correspondance des fréquences peut conduire à une amplification importante de la réponse dynamique. Des essais ont permis de constater que les amplifications dynamiques les plus importantes (50 - 70%) se produisent sur des ponts dont la fréquence propre fondamentale se situe entre 2.5 et 4 Hz. Lors d'essais réalisés avec des véhicules circulant sur une planche posée sur la chaussée, les amplifications dynamiques les plus grandes (180 - 230%) ont été observées pour des ouvrages dont la première fréquence propre est dans les bandes de 1.5 - 3 Hz et 7 - 15 Hz [23]. Ces deux plages démontrent qu'à basse vitesse, la planche excite les mouvements du châssis du véhicule, alors qu'à des vitesses plus élevées, les mouvements de sautellement des essieux sont excités.

La géométrie en plan de l'ouvrage associée à la masse et à la rigidité influencent les modes et les fréquences de vibration. Les ponts rectilignes formés de poutres sont légèrement plus sensibles aux sollicitations dynamiques que les ponts courbes ou biais. Les modes de ces types de ponts ont des fréquences de vibration en flexion et en torsion plus rapprochées, donc plusieurs modes contribuent de manière significative à la réponse et, par conséquent, le phénomène de quasi-résonance apparaît plus difficilement.

Bien qu'en principe un rapport d'amortissement élevé réduise la réponse dynamique, l'amortissement semble ne pas avoir une influence essentielle sur le facteur d'amplification dynamique.

Dans la majorité des essais in situ, les imperfections de la chaussée et les irrégularités sont désignées comme étant le facteur principal influençant la réponse du pont. Les facteurs d'amplification dynamique sont dépendants d'un véhicule particulier dans le sens où chaque camion avec sa géométrie, sa masse, ses suspensions, ses pneus, sa position sur le pont et sa vitesse est excité différemment par le profil de la chaussée.

Les véhicules simples génèrent des facteurs d'amplification dynamique plus importants que ceux produits par les véhicules articulés. De plus, lorsqu'il y a plusieurs véhicules sur le pont, la réponse dynamique augmente moins par rapport à la réponse statique. La présence

simultanée de camions aux caractéristiques dynamiques diverses rend plus difficile les situations de quasi-résonance entre le pont et les véhicules [23].

Le poids du véhicule influence les facteurs d'amplification dynamique, mais la tendance ne se manifeste pas systématiquement dans le même sens. La plupart du temps l'augmentation de la masse du véhicule entraîne une diminution des facteurs d'amplification dynamique, cependant, dans certaines situations difficiles à identifier, l'inverse se produit.

Les résultats d'essais expérimentaux ont montré que pour les poids lourds dotés d'un système de suspension à lames d'acier, la masse du véhicule oscille la plupart du temps sur les pneus. Un mouvement des suspensions n'a lieu que pour des profils très irréguliers et que pour quelques cycles d'oscillations seulement. Lorsque la suspension est inactive, le passage du véhicule génère des facteurs d'amplification dynamique plus importants que dans le cas où la suspension fonctionne. Cet effet tend à réduire la différence entre des facteurs d'amplification dynamique observés pour deux qualités de revêtement différentes pour lesquelles, dans le premier cas, les suspensions sont passives alors que dans l'autre situation, l'amplitude des mouvements suffit à "débloquer" les suspensions.

Les facteurs d'amplification dynamique obtenus à partir de points de mesure éloignés de la position du véhicule sont plus grands que pour les points de mesure placés directement sous la charge du véhicule.

## 2.8 Remarques finales

### 2.8.1 Bilan

Les effets dynamiques qui ont lieu dans un pont lorsqu'un véhicule le traverse sont décrits en considérant chacun des éléments importants qui participent au phénomène. Les propriétés des ponts, du profil de la chaussée et des véhicules sont commentées afin de donner une vue d'ensemble de la manière dont chaque paramètre influence les mouvements de la structure.

Les définitions des facteurs d'amplification dynamique et leurs valeurs proposées dans les normes de dimensionnement renseignent sur la façon dont les effets dynamiques sont traités et considérés dans la pratique courante dans différents pays.

Les différents modèles numériques relatifs aux ponts, à la description du profil de la route et aux véhicules et leurs développements sont évoqués. Cette description permet de juger de la difficulté de considérer objectivement l'ensemble des paramètres intervenant dans le phénomène d'interaction entre le pont et les véhicules qui le traversent.

Le sujet des effets dynamiques dans les ponts provoqués par le trafic routier ne peut être abordé sans évoquer un aperçu des études expérimentales menées dans ce domaine. Les essais in situ réalisés dans le but d'établir les facteurs d'amplification dynamique sont décrits et notamment les aspects relatifs aux types de mesures sur l'ouvrage et sur les véhicules d'essai ainsi que les mesures du profil de la chaussée. Les méthodes de mesures et le traitement des résultats sont discutés brièvement.

Finalement, sur la base de l'étude de la littérature, l'influence des variables principales est dégagée.

### 2.8.2 Conclusion

Pour conclure cet état des connaissances, les exigences principales que doit satisfaire un modèle numérique pour analyser le comportement dynamique des dalles de roulement des ponts en béton sollicités par le passage de poids lourds sont exposées:

1. L'analyse du comportement dynamique de la dalle de roulement impose une modélisation en trois dimensions du pont et des véhicules.

2. Le modèle de la dalle du pont représentera le plus fidèlement possible l'état de déformation de cet élément structural.
3. L'analyse de la structure du pont dans le domaine élastique linéaire est suffisant lorsque les charges de trafic sont considérées au niveau de service.
4. Le profil réel de la chaussée doit être modélisé et les simulations devront respecter le profil établi.
5. Les modèles de véhicules représenteront les mouvements du châssis et des essieux obtenus par dissociation des masses de ces éléments.
6. Les modèles de véhicules doivent considérer le comportement des suspensions et des pneus.
7. L'interaction entre le véhicule et le pont est nécessaire pour simuler le comportement du pont. En d'autres termes, les mouvements du pont influencent les mouvements du véhicule qui à son tour modifie ceux du pont.



## Chapitre 3

# Ponts en béton en Suisse

### 3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de définir un certain nombre de ponts représentatifs de l'ensemble du parc des ouvrages autoroutiers suisses. Ces ponts représentatifs sont sélectionnés en fonction du système statique et de la rigidité de leur dalle de roulement, car l'étude du comportement dynamique de ces éléments structuraux constitue l'intérêt de ce travail de recherche. Le choix des ouvrages représentatifs implique, dans le contexte de cette étude, la définition de la structure porteuse et du profil de la chaussée.

Le contenu de ce chapitre est divisé en trois sections:

- **Caractéristiques des ponts autoroutiers suisses**

La démarche adoptée pour établir des ouvrages représentatifs est d'étudier les caractéristiques des ponts suisses afin de dégager les tendances générales qui seront utilisées pour concevoir les ponts représentatifs. Une base de données regroupant 200 ponts est utilisée à ces fins. L'analyse permet d'établir une liste de critères qui définissent les ponts représentatifs.

- **Description des ponts représentatifs**

Pour limiter l'étude, six ponts sont retenus. Ces ouvrages sont conçus en fonction des résultats de l'analyse des ouvrages suisses. Ces six ponts représentatifs dont le comportement dynamique fait l'objet de l'étude, sont décrits et les plans sont disponibles à l'annexe A.

- **Description du profil de la chaussée des ponts**

Le choix des profils des ponts représentatifs revient à établir le niveau de qualité de la planéité du revêtement et les critères qui permettent de la définir. Un critère pratique employé dans la norme suisse est utilisé dans ce but ainsi que les valeurs applicables aux routes à grand débit.

### 3.2 Caractéristiques des ponts autoroutiers suisses

#### 3.2.1 Généralités

Les ponts en béton existants en Suisse présentent une grande variété de caractéristiques liées à leur situation, à leur taille, à leur géométrie et à leur système statique. Afin d'isoler certains ouvrages typiques, une série de caractéristiques choisies est analysée.

L'analyse des ponts est menée en s'appuyant sur les informations issues d'une base de données regroupant environ 200 ponts suisses sur lesquels des essais de charge ont été effectués ces 20 dernières années [39]. L'échantillon correspond à des ponts, principalement en béton armé et précontraint, répartis sur différentes catégories de routes (autoroutes, routes principales). Les ponts présents dans la base de données constituent un échantillon particulier des ponts en Suisse, car ce sont des structures de taille jugée moyenne à grande dont l'importance a justifié un essai de charge statique. Les ponts de petite taille, en général d'une seule travée (5 - 15 m), tels que les passages inférieurs, sont peu représentés malgré leur nombre important, car ces ponts ne font pas systématiquement l'objet de tests à leur réception. À défaut d'une base de données plus exhaustive regroupant tous les types de ponts et dans laquelle des informations relatives à la géométrie des structures sont disponibles, la base de données citées est utilisée et des adaptations sont apportées dans le souci de considérer la plupart des types d'ouvrages.

Les éléments décrits dans les paragraphes suivants sont retenus pour caractériser les ponts autoroutiers suisses. La plupart des informations figurant dans ces paragraphes sont tirées soit directement de la base de données des ponts testés à l'IBAP/EPFL, soit du rapport [39].

### 3.2.2 Le système statique

Les systèmes statiques longitudinaux des ponts figurant dans la base de données sont à 85% des systèmes composés de poutres appuyées sur des piles. Les 15% restants sont constitués par des cadres simples, des cadres avec des béquilles, des arcs ou des systèmes haubanés. Les ponts de plus d'une travée sont, en règle générale, continus sur les appuis.

### 3.2.3 La portée et l'élancement des poutres principales

L'élancement est le rapport de la hauteur de la section sur la portée. Pour les ponts dont la hauteur est variable, la hauteur employée pour déterminer l'élancement est définie par la hauteur moyenne de la section sur les appuis et au milieu de la travée. La fréquence des portées principales situées entre 20 et 100 m et la fréquence des élancements correspondants pour l'échantillon analysé sont présentées à la figure 3.1.

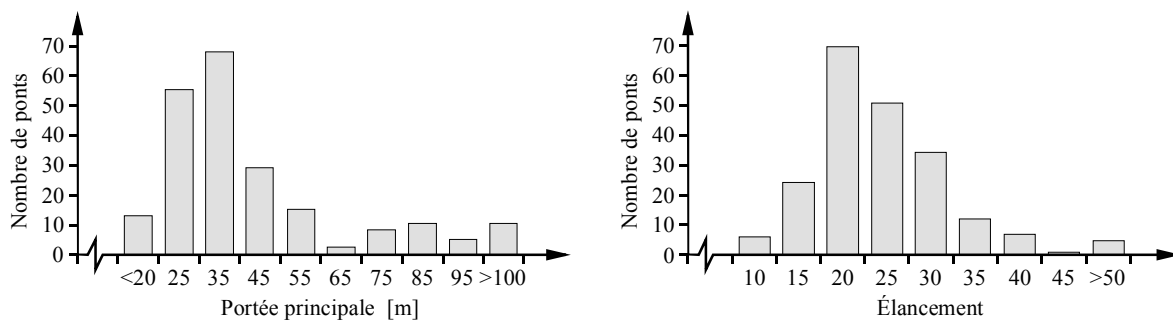


Figure 3.1 Portées principales et élancements des ponts

### 3.2.4 Le type de sections transversales

Les sections transversales sont regroupées dans quatre différents types (Tableau 3.1).

Le type de section transversale est dépendant de la portée des ponts. Les dalles ou les sections pleines sont caractéristiques des ponts de courte portée, tels que les ponts-cadre des passages inférieurs ou les ponts de portées inférieures à 25 m. Pour les travées plus longues, entre 30 et 70 m, les ponts dont la hauteur de la section est constante, sont bien adaptés. Les portées plus importantes sont franchies avec des ponts qui ont des sections à hauteurs variables.







Type de section transversale		Nombre [%]
Dalle		15
Section ouverte		45
Caisson à hauteur constante		28
Caisson à hauteur variable		12

Tableau 3.1 Types de sections transversales

La rigidité à la torsion des ponts-caisson leur permet de s'adapter à quasiment tous les tracés. Ces sections fermées ont été fréquemment utilisées ces dernières années, car elles s'adaptent bien à la construction par poussage.

### 3.2.5 La largeur du tablier

Pour les ponts autoroutiers sur lesquels circule un trafic unidirectionnel, la largeur du tablier se situe généralement entre 11.5 et 13.5 m, car la chaussée est occupée au minimum par deux voies de 3.75 m, une bande d'arrêt d'urgence de 2.50 m et des bordures d'environ 0.70 m chacune. Ces largeurs varient quelque peu suivant l'autoroute et l'époque de construction.

### 3.2.6 Le nombre et la position des poutres principales

Le nombre d'éléments porteurs est déterminé par la largeur du tablier. Pour les largeurs mentionnées (3.2.5), le système porteur principal des ponts-poutre est composé de deux poutres maîtresses ou d'un caisson unicellulaire.

Les poutres des ponts dont la section est ouverte, sont disposées pour que les moments transversaux dus au poids propre de la dalle soient égaux de chaque côté des poutres pour éviter leur torsion. Pour les ponts constitués d'un caisson, les porte-à-faux de la dalle sont plus grands, car le critère d'équilibre des moments sur les âmes est moins important. Des porte-à-faux relativement larges ont été réalisés dans le but de réduire la largeur du caisson et ainsi d'appuyer la section du pont sur une seule pile. Cette disposition évite les piles multiples et les piles de type "marteau" qui, souvent, compromettent l'esthétique de l'ouvrage.

### 3.2.7 L'épaisseur des dalles

Pour les tabliers constitués de deux éléments porteurs et dont la largeur correspond aux valeurs données (3.2.5), des dalles de roulement très minces (18 - 20 cm) ont été réalisées, par soucis d'économies, jusqu'au début des années 70. Par la suite, des critères de durabilité essentiellement ont conduit à construire des dalles avec des épaisseurs plus généreuses. Pour cette dernière génération de ponts, l'épaisseur des dalles de roulement est relativement uniforme d'une structure à l'autre. La dalle centrale, épaisse de 22 cm au milieu, est renforcée par des goussets près des âmes. Les porte-à-faux ont soit une épaisseur qui varie d'une façon linéaire d'une extrémité à l'autre, soit une hauteur constante avec des goussets à proximité des poutres (Figure 3.2).

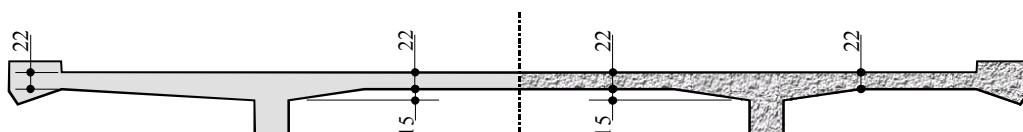


Figure 3.2 Dimensions courantes des dalles de roulement

### 3.2.8 Les entretoises et les éléments secondaires

Les entretoises sont nécessaires, car elles contribuent à la rigidité de l'ensemble de la structure. Les entretoises espacées régulièrement assurent la répartition des charges entre les poutres des ponts à section ouverte. Certaines de ces entretoises ont une hauteur correspondant à celle de la section, alors que d'autres ont une hauteur réduite et sont placées dans la partie inférieure de la section.

Pour les ponts dont la section est fermée, des entretoises sont disposées uniquement aux extrémités et sur les appuis intermédiaires, car la rigidité du caisson rend d'autres entretoises inutiles.

Les éléments secondaires influencent le poids propre et la rigidité de la structure. Le revêtement constitué principalement de béton bitumineux représente une couche de 8 - 10 cm d'épaisseur. Les bordures sont essentiellement de deux types; soit les bordures basses en béton garnies de barrières avec des glissières, soit les parapets massifs en béton destinés aux ouvrages très hauts ou en milieu urbain (Figure 3.3). L'influence de ces éléments de bord sur le comportement statique est déterminée par leur forme et par leur mode de construction (éléments préfabriqués ou coulés en place).

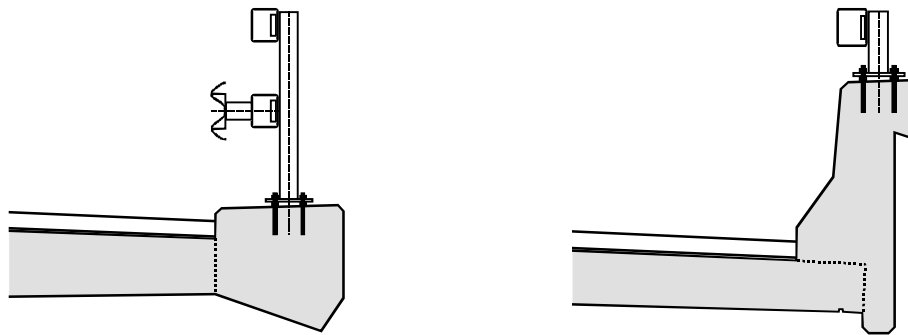


Figure 3.3 Variantes de bordure

### 3.2.9 Remarques pour la conception des ponts représentatifs

L'analyse des caractéristiques des ponts suisses permet d'établir certaines tendances:

- Les ponts-poutre continus avec des portées de 30 à 40 m sont fréquents.
- Les tabliers d'environ 13 m de large des ponts-poutre sont composés de sections ouvertes ou fermées avec deux poutres maîtresses ou deux âmes.
- L'épaisseur des dalles de roulement des ponts-poutre est relativement uniforme.
- Des entretoises intermédiaires lient les poutres maîtresses en l'absence de dalle inférieure.
- Les ponts-cadre d'une longueur inférieure à 15 m sont répandus sur le réseau autoroutier.
- Les tabliers des ponts-cadre sont constitués d'une dalle massive en béton armé.
- Des parapets massifs en béton et des bordures avec des glissières constituent les éléments de bord des dalles de roulement.

Les éléments cités permettent de définir des ponts représentatifs des ouvrages de petites et moyennes dimensions. Ces ouvrages sont conçus dans le but d'obtenir diverses dalles de roulement pour lesquelles une étude paramétrique de leur comportement dynamique sera réalisée.

### 3.3 Description des ponts représentatifs

#### 3.3.1 Généralités

Cinq ponts parmi les six choisis sont des ponts-poutre et le sixième est un pont-cadre. Une élévation et un système statique longitudinal commun aux ponts-poutre sont établis et un système flottant de poutre continue sur quatre appuis avec des portées de respectivement 32, 40 et 32 m est retenu. La longueur des travées permet d'équilibrer les moments dus au poids propre dans la superstructure aux appuis intermédiaires. Le choix d'une seule disposition longitudinale facilite les comparaisons des effets dynamiques dans la dalle de roulement. La largeur totale des tabliers est fixée à 13.5 m et pour couvrir le plus grand nombre d'ouvrages, des variantes avec des sections ouvertes et des caissons sont proposées.

Pour le pont-cadre, un ouvrage constitué d'une dalle de 11 m de portée et de 13.5 m de large a été retenu.

#### 3.3.2 Pont C1

La superstructure du pont C1 (Figure 3.5) formée d'un caisson et d'une dalle avec des porte-à-faux de 3.25 m de long constitue l'exemple représentatif des ponts autoroutiers suisses de ce type. La dalle de roulement à une section constante sur toute la longueur de l'ouvrage. Les âmes du caisson ont une épaisseur constante et sont verticales, bien que beaucoup de ponts formés d'un caisson ont des âmes inclinées afin de diminuer la largeur de la dalle inférieure. Cette dernière s'épaissit progressivement vers les appuis avec l'augmentation des efforts de compression. Les bordures participent à la rigidité de la section.

#### 3.3.3 Pont C1P

Cet ouvrage est similaire au pont C1 à l'exception des bordures (Figure 3.4). Les parapets massifs en béton augmentent les efforts dans les porte-à-faux de la dalle, par conséquent, leurs sections sont un peu plus généreuses en comparaison de celles du pont C1. De telles bordures rigidifient la section totale de l'ouvrage et améliorent la répartition des charges appliquées par les roues des poids lourds.

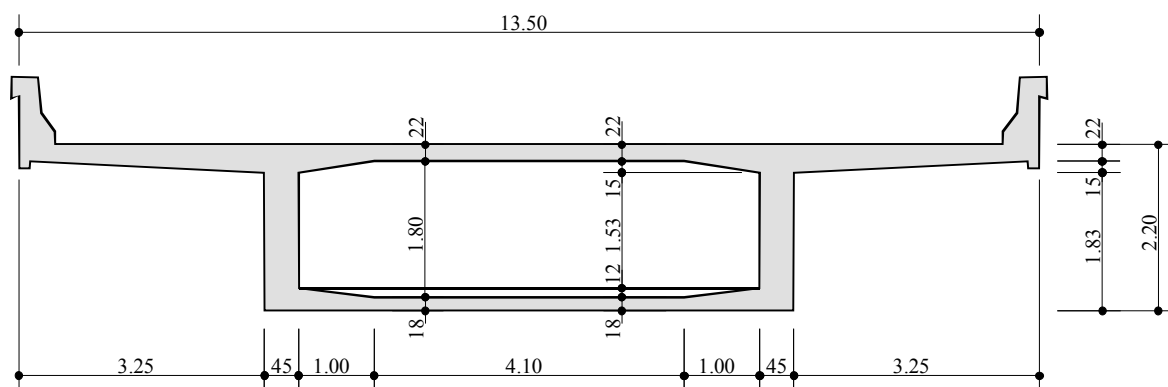


Figure 3.4 Section du pont C1P 1:100

#### 3.3.4 Pont C2

Les porte-à-faux relativement larges de certains ponts-caisson retiennent l'attention, car la flexibilité de ces éléments structuraux peut influencer de manière importante le comportement dynamique du tablier. La variante du pont C2 (Figure 3.6) présente des porte-à-faux de 4.00 m de long pour lesquels l'épaisseur de la dalle est ajustée en proportion des efforts. La taille du caisson est réduite pour conserver une largeur totale du tablier de 13.5 m. L'épaisseur de la dalle de roulement entre les âmes est maintenue à 22 cm.

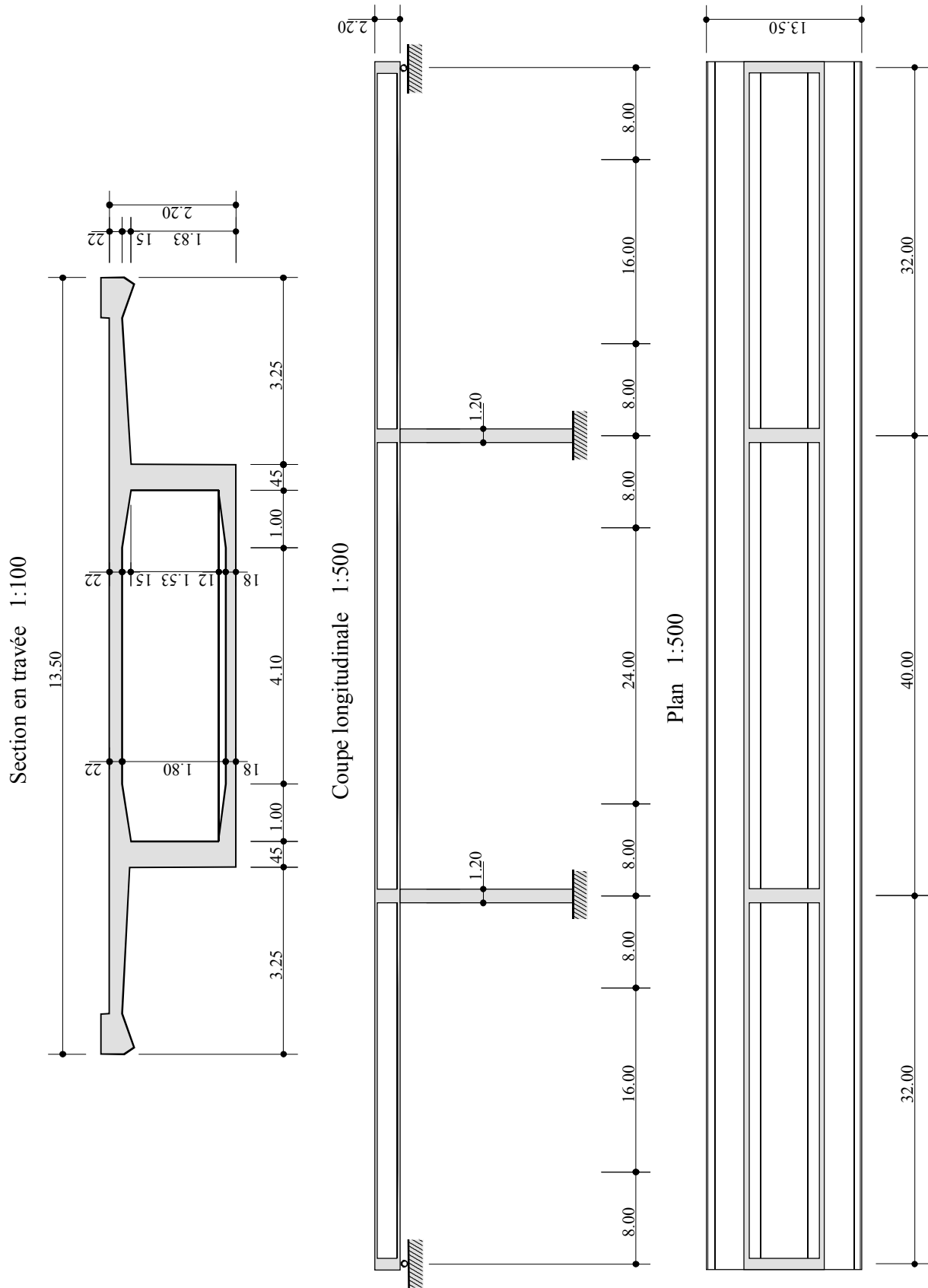


Figure 3.5 Pont C1

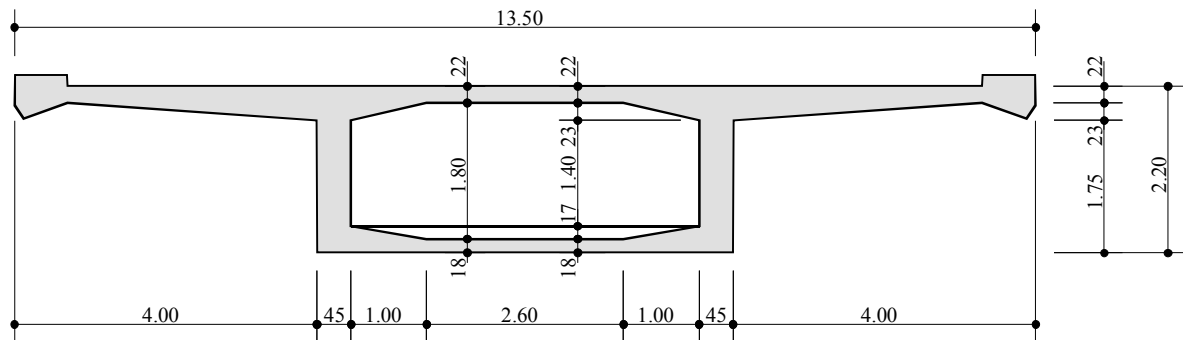


Figure 3.6 Section du pont C2 1:100

### 3.3.5 Pont P1

La superstructure du pont P1 (Figure 3.7) est constituée d'une section ouverte. La section de la dalle est renforcée aux appuis pour favoriser le flux des contraintes. La disposition des poutres principales dans la section est choisie selon des considérations statiques. Les ponts de ce type ont généralement un élancement inférieur aux ouvrages formés d'un caisson, car, en l'absence de dalle inférieure, la matière est moins bien disposée pour assumer les efforts de compression près des appuis intermédiaires. La hauteur de la section est donc fixée à 2.50 m et la largeur des poutres est augmentée de 0.50 à 1.00 m aux appuis. La structure est rigidifiée par des entretoises partielles placées à 8 m d'intervalle entre les poutres. Ces éléments sont placés dans la partie inférieure de la section.

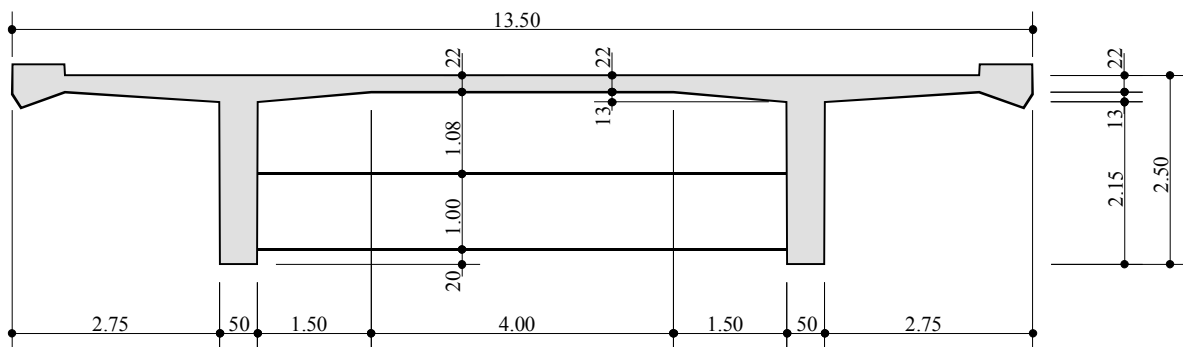


Figure 3.7 Section du pont P1 1:100

### 3.3.6 Pont P2

Cet ouvrage est identique au pont P1 à l'exception des entretoises dont la hauteur correspond à celle des poutres (Figure 3.8). Ces entretoises constituent des appuis supplémentaires de la dalle de roulement.

Le système statique des dalles de roulement des ponts P1 et P2 est intéressant, car, dans le premier cas, la dalle présente, sous l'action des charges utiles, une déformée de forme cylindrique alors que, dans la seconde situation, la déformée a une courbure dans la direction longitudinale et transversale. L'importance des effets dynamiques pour l'une ou l'autre n'est pas, a priori, évidente.

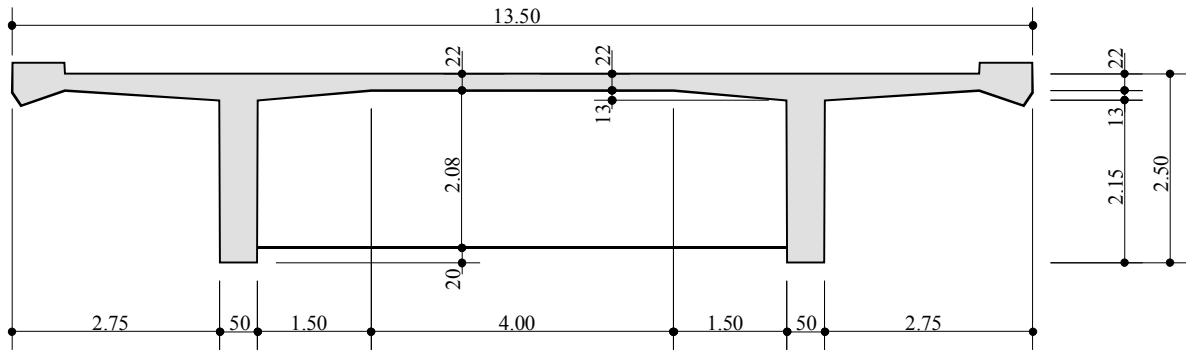
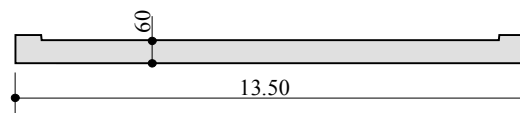


Figure 3.8 Section du pont P2 1:100

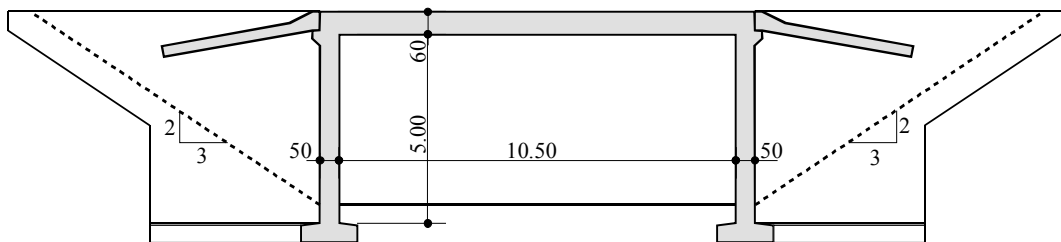
### 3.3.7 Pont D1

Le pont-cadre (Figure 3.9) caractérise les passages inférieurs. La dalle pleine dont l'épaisseur est constante et dont la largeur est maintenue à 13.5 m comme pour les ponts précédents, supporte le trafic de l'autoroute. Les bordures du tablier ont, en général, une forme relativement simple. La dalle est liée rigidement aux murs porteurs qui sont tenus latéralement de part et d'autre par des murs d'aile.

Section 1:200



Coupe longitudinale 1:200



Plan 1:200

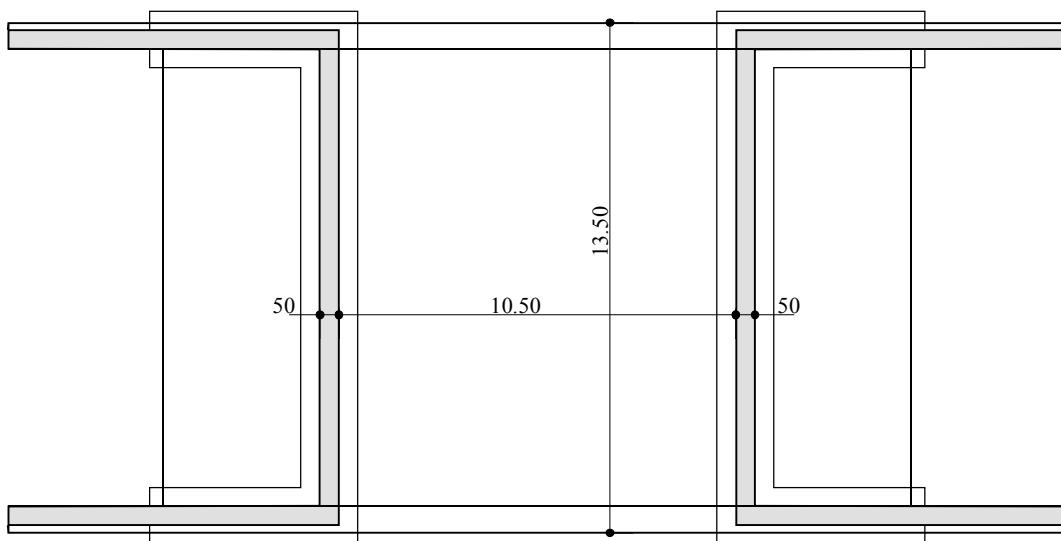


Figure 3.9 Pont D1

## 3.4 Profil de la chaussée

### 3.4.1 Généralités

Le profil de la chaussée détermine directement l'excitation du véhicule qui vibre en interaction avec le pont. La définition du niveau de qualité de la planéité de la chaussée est, par conséquent, un élément important qui influence les réponses dynamiques du pont.

Parmi les éléments intervenant dans le profil statique de la chaussée d'un pont (2.2.3), seule la rugosité du revêtement est considérée.

### 3.4.2 Critères pour caractériser le profil de la chaussée

Afin de conserver la méthode pratique utilisée en Suisse pour déterminer la qualité d'un revêtement routier, les critères de la norme SNV 640 521b "Planéité" [88] sont appliqués. Ce document définit la qualité de la planéité du profil longitudinal de la chaussée à l'aide de deux valeurs:

- La valeur d'angle  $W$  [‰] correspond à l'angle formé par deux droites définies par trois points du profil espacés de 1 m chacun (Figure 3.10).

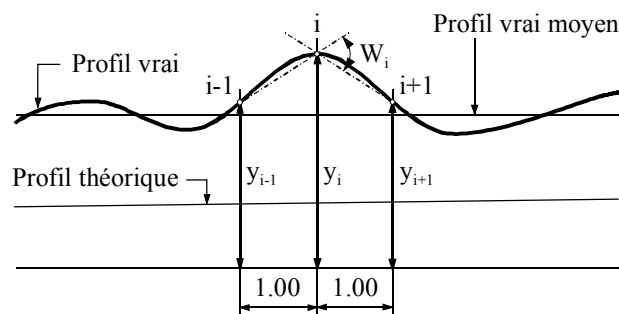


Figure 3.10 Définition de la valeur d'angle  $W$

- L'écart type  $sw$  [‰] des valeurs d'angle  $W$  pour un tronçon de 250 m de long.

### 3.4.3 Niveau de qualité de la planéité et valeurs limites

Des valeurs limites, ne devant pas être dépassées à la réception de la chaussée, sont données en fonction du type de route. Durant l'utilisation du revêtement, les valeurs de réception de la planéité longitudinale peuvent être multipliées par 2 pour la valeur d'angle  $W$  et par 2.5 pour l'écart type  $sw$  des valeurs  $W$  (Tableau 3.2).

	Valeurs de réception		Valeurs durant l'utilisation	
	$W$ [‰]	$sw$ [‰]	$W$ [‰]	$sw$ [‰]
Routes à grand débit	10	1.6	20	4
Routes principales	14	2.2	28	5.5

Tableau 3.2 Valeurs limites définissant la qualité de la planéité du revêtement

Les valeurs relatives à  $W$  définissent l'importance des défauts locaux acceptés, alors que celles fixées pour l'écart type  $sw$  limitent la rugosité générale du revêtement.

### 3.4.4 Profils des ponts représentatifs

Afin d'évaluer l'influence de la qualité de la planéité de la chaussée des ponts sur les réponses dynamiques de ces derniers, deux profils différents (A et B) sont déterminés. Leurs caractéristiques sont en tous points pareilles, seule l'amplitude de la rugosité diffère d'un à

l'autre. L'amplitude est établie pour que les valeurs  $W$  et  $sw$  soient, pour le profil A, supérieures aux valeurs limites de réception afin de représenter un état d'utilisation courant. Pour le profil B,  $W$  et  $sw$  sont choisis afin de définir une chaussée usée pour laquelle les valeurs limites supérieures sont dépassées.

### 3.5 Remarques finales

L'étude des caractéristiques d'ouvrages suisses a permis d'établir six ponts jugés représentatifs de l'ensemble du parc des ponts autoroutiers suisses.

- Pont C1 : pont à trois travées formé d'un caisson à hauteur constante
- Pont C1P : pont à trois travées formé d'un caisson à hauteur constante avec des parapets massifs en béton
- Pont C2 : pont à trois travées formé d'un caisson à hauteur constante avec de larges porte-à-faux
- Pont P1 : pont à trois travées à section ouverte constitué de deux poutres maîtresses liées par des entretoises partielles
- Pont P2 : pont à trois travées à section ouverte constitué de deux poutres maîtresses liées par des entretoises complètes
- Pont D1 : pont-cadre composé d'une dalle encastrée sur des murs (passage inférieur)

Des critères définis par la norme SNV 640 521b "Planéité" [88] sont utilisés pour fixer le niveau de qualité de la planéité du profil de la chaussée. Selon les valeurs limites recommandées dans ce texte, le niveau de qualité de la planéité de deux profils est établi pour les ponts représentatifs.



## Chapitre 4

# Trafic sur les routes suisses

### 4.1 Introduction

Les charges de trafic les plus significatives, soit pour le dimensionnement, soit pour l'évaluation des ponts, sont celles appliquées par les poids lourds. Ces véhicules provoquent des efforts et des déplacements importants de la structure comparativement aux mêmes effets produits par le trafic des véhicules légers. L'amplitude des mouvements créés est suffisante pour mobiliser des forces d'inertie non négligeables. Dans le cadre de l'analyse du comportement dynamique des ponts sollicités par le trafic routier, où les véhicules interagissent avec le pont en mouvement, l'étude et la définition des propriétés des poids lourds sont nécessaires.

Le but de ce chapitre est de définir des camions représentatifs parmi les poids lourds circulant en Suisse et d'établir les propriétés qui déterminent le comportement dynamique de ces véhicules.

Ce chapitre se compose de deux parties principales:

- **Caractéristiques du trafic des poids lourds en Suisse**

L'étude de la composition du trafic des poids lourds basée sur des mesures de trafic fournit la proportion de chaque type de camions. Les différents types de véhicules sont analysés en fonction des effets dynamiques qu'ils engendrent sur les ponts. Les informations issues des mesures de trafic et des essais dynamiques permettent de choisir deux camions représentatifs du trafic des poids lourds en Suisse.

- **Description des propriétés des camions représentatifs**

Chaque élément du véhicule est analysé afin de déterminer le comportement dynamique de l'ensemble. Les données relatives aux charges des essieux et à la géométrie des véhicules obtenues par des mesures de trafic sont complétées par des valeurs tirées de diverses sources pour déterminer l'ensemble des propriétés des véhicules.

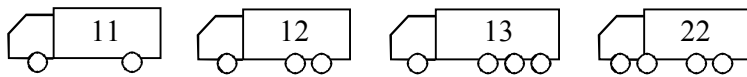
### 4.2 Caractéristiques du trafic des poids lourds en Suisse

#### 4.2.1 Composition du trafic

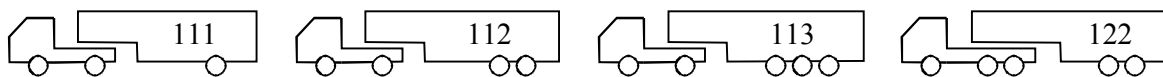
Les mesures de trafic effectuées durant l'année 1996 sur l'autoroute A1 à Mattstetten près de Berne [12] fournissent une image de la composition du trafic routier du Plateau suisse. Environ 800 mille véhicules de plus de 3.5 tonnes ont été dénombrés sur cet axe en 1996 et représentent entre 15 - 20% du nombre total de véhicules.

La composition du trafic des poids lourds est exprimée par le pourcentage des différents types de véhicules reproduits à la figure 4.1. Cette méthode de classification [8] décrit explicitement les groupes d'essieux et les différents arrangements des corps de chaque camion. Chaque chiffre entre 1 et 3 représente le nombre d'axes dans un groupe d'essieux et un zéro correspond à la discontinuité entre le camion et sa remorque. Suivant le schéma établi, les limites légales de poids qui dépendent essentiellement de la configuration des essieux, sont les mêmes pour tous les véhicules au sein de la même classe.

Camions simples



Camions semi-remorques



Camions avec remorques

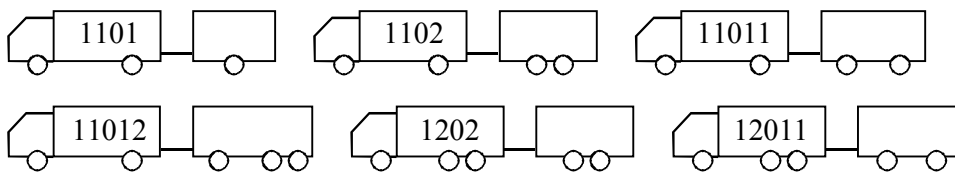


Figure 4.1 Classification des véhicules

Les 14 classes de véhicules représentent plus de 99% des poids lourds circulant en Suisse. La proportion des véhicules dans chacune des classes, selon les comptages de 1996, est donnée sous forme d'histogramme (Figure 4.2).

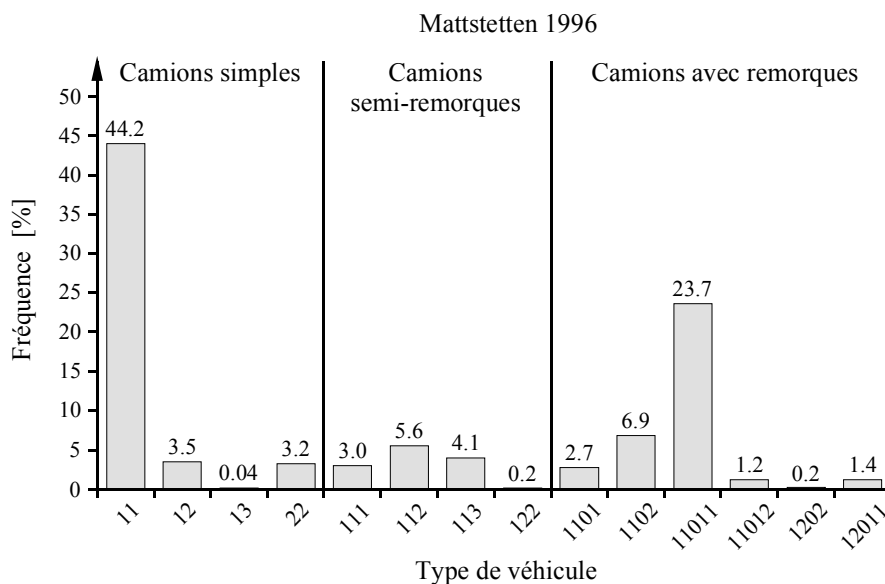


Figure 4.2 Proportion de chaque type de véhicules

Globalement les poids lourds sont groupés en trois catégories principales dont l'importance est exprimée en pour-cent.

- les camions simples (11 - 22) 51%
- les camions semi-remorques (111 - 122) 13%
- les camions avec une remorque (1101 - 12011) 36%

L'analyse des mouvements des corps d'un véhicule générés par le déplacement du camion sur une chaussée rugueuse permet de faire une distinction dans la catégorie des camions avec une remorque. Les remorques et les camions liés par un système d'attache articulé (11011, 11012, 12011) peuvent être considérés comme deux véhicules simples indépendants se déplaçant l'un derrière l'autre (11 + 11, 11 + 12, 12 + 11). Pour les remorques appuyées sur le camion (1101, 1102, 1202), les mouvements de l'un et de l'autre sont interdépendants et le comportement se rapproche de celui d'un camion semi-remorque (111, 112, 122). De cette distinction résulte essentiellement deux catégories de véhicules qui sont d'une part celle des camions simples et d'autre part celle des semi-remorques.

#### 4.2.2 Agressivité du trafic des poids lourds

Dans le but d'étudier le comportement dynamique des dalles de roulement des ponts sollicités par le trafic routier, les catégories de véhicules sont classées en fonction des facteurs d'amplification dynamique des effets qu'elles produisent sur les ponts. Les résultats d'essais dynamiques réalisés en Suisse [22] avec différents types de véhicules et différents convois circulant sur un pont-poutre conduisent aux constatations suivantes:

- Les réponses dynamiques produites par un convoi de poids lourds ou des camions placés côte à côte sont caractérisées par des facteurs d'amplification dynamique inférieurs à ceux issus des réponses d'un véhicule isolé.
- Les camions semi-remorques (111 - 122) sont moins agressifs que les véhicules simples.
- Les facteurs d'amplification dynamique déterminants sont, en général, dus à la présence d'un seul camion sur l'ouvrage.

Bien que des essais similaires n'aient pas été effectués sur d'autres types de ponts, la conception, la géométrie et le comportement dynamique similaires entre le pont testé et les ponts-poutre représentatifs définis dans ce travail permettent de considérer avec raison ces constatations.

#### 4.2.3 Remarques

Les véhicules simples sont donc les plus représentés parmi les poids lourds et les plus agressifs vis-à-vis des amplifications dynamiques produites. Le choix du camion de type 11 s'impose par sa proportion élevée parmi les poids lourds. Le second véhicule est choisi dans la catégorie des camions simples. Bien qu'il ne représente que 3.5% des poids lourds, le camion de type 12 est retenu.

Ces deux véhicules constituent les camions représentatifs qui sont utilisés dans ce travail de recherche.

### 4.3 Description des propriétés des camions représentatifs

#### 4.3.1 Géométrie, masse

La géométrie d'un camion est définie principalement par l'espacement des essieux, par la longueur totale et par la largeur du véhicule. Selon la géométrie, la charge de chaque essieu traduit la répartition de la masse du véhicule. L'analyse des paramètres cités sur la base de mesures de trafic effectuées durant l'année 1996 sur l'autoroute A1 à Mattstetten [12] définit les camions représentatifs.

Le mode de la distribution de l'espacement des essieux de chaque type de camions fixe les dimensions principales (Figure 4.3 et Figure 4.4). L'espacement entre les deux premiers essieux du camion 12 est caractérisé par une distribution multi-modale. Dans ce cas, la valeur dont la fréquence est la plus forte détermine l'espacement.

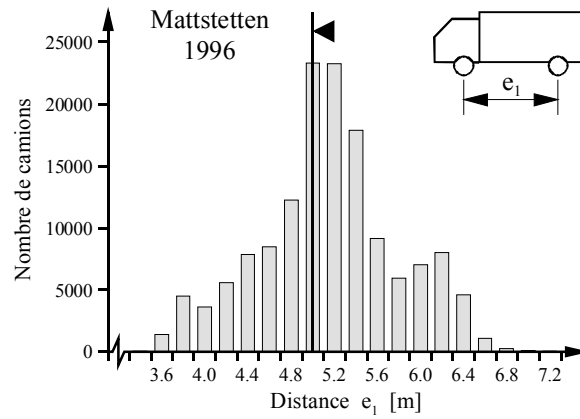


Figure 4.3 Histogramme de l'espacement des essieux des camions 11

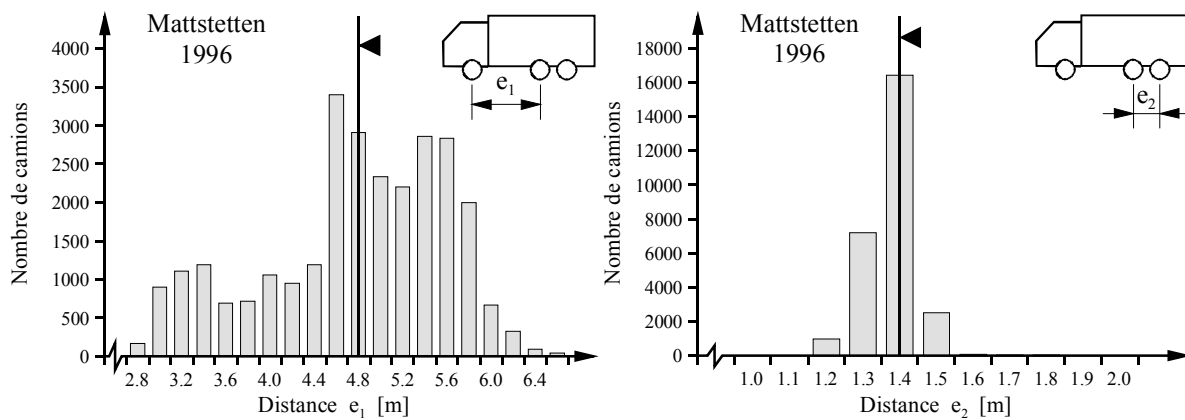


Figure 4.4 Histogrammes de l'espacement des essieux des camions 12

La largeur des camions est fixée par la législation sur le transport routier; la limite maximale en Suisse est fixée actuellement à 2.50 m. Cette valeur a été relevée dans le courant des années 80 de 2.30 à 2.50 m.

Sur la base de ces valeurs, les camions représentatifs des véhicules à deux essieux (type 11) et à trois essieux (type 12) ont les géométries suivantes (Figure 4.5):

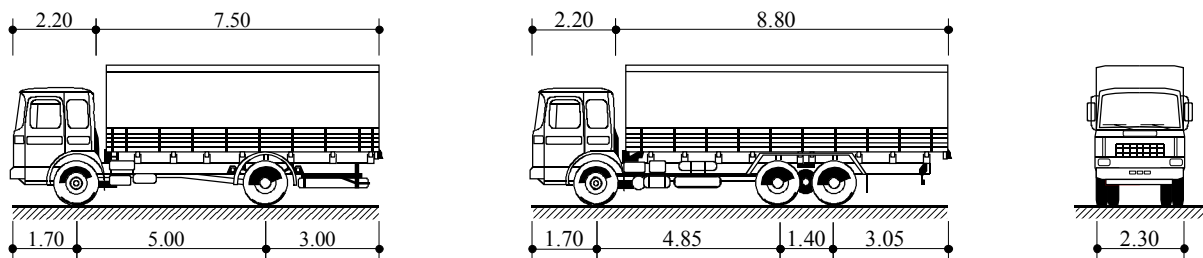


Figure 4.5 Camions représentatifs

La charge maximale de chacun des essieux d'un camion chargé est réglementée de même que la charge totale du véhicule. La valeur limite est fixée en fonction du type de camions et de la configuration des essieux [12]. Les histogrammes fournissent la distribution des poids des camions (Figure 4.6) et des charges par essieu (Figure 4.7 et Figure 4.8) mesurés à Mattstetten pour les deux types de camions.

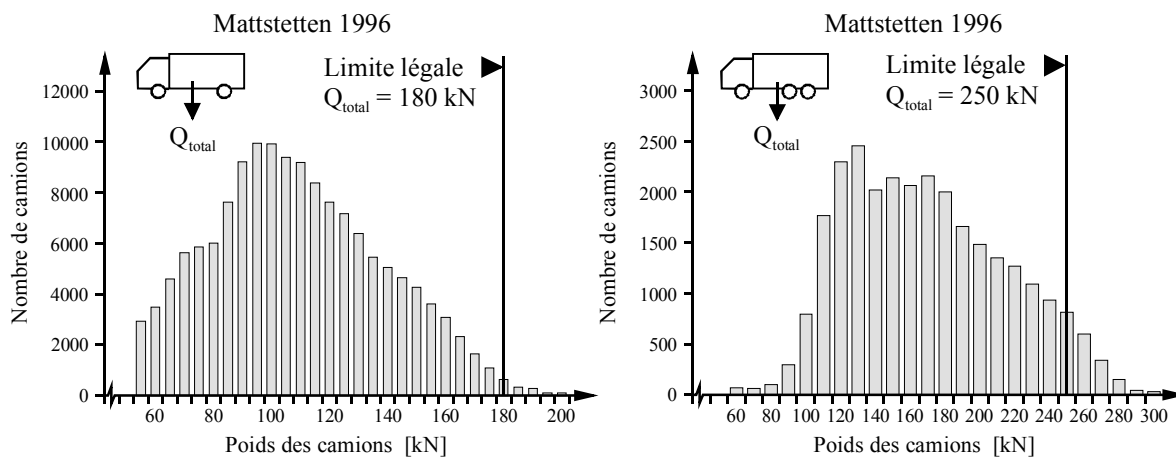


Figure 4.6 Histogrammes du poids total des camions 11 et 12

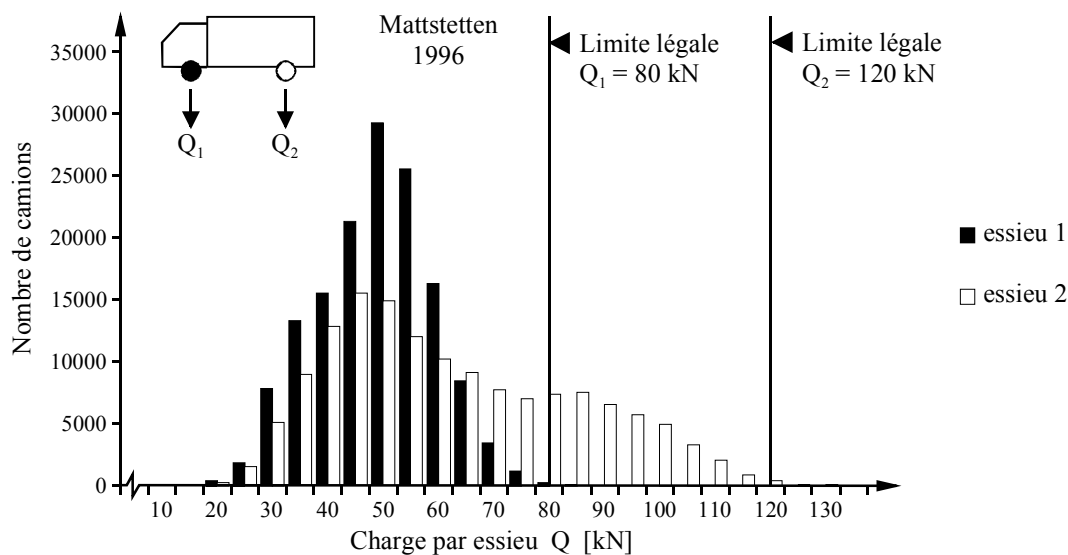


Figure 4.7 Histogramme de la charge par essieu des camions 11

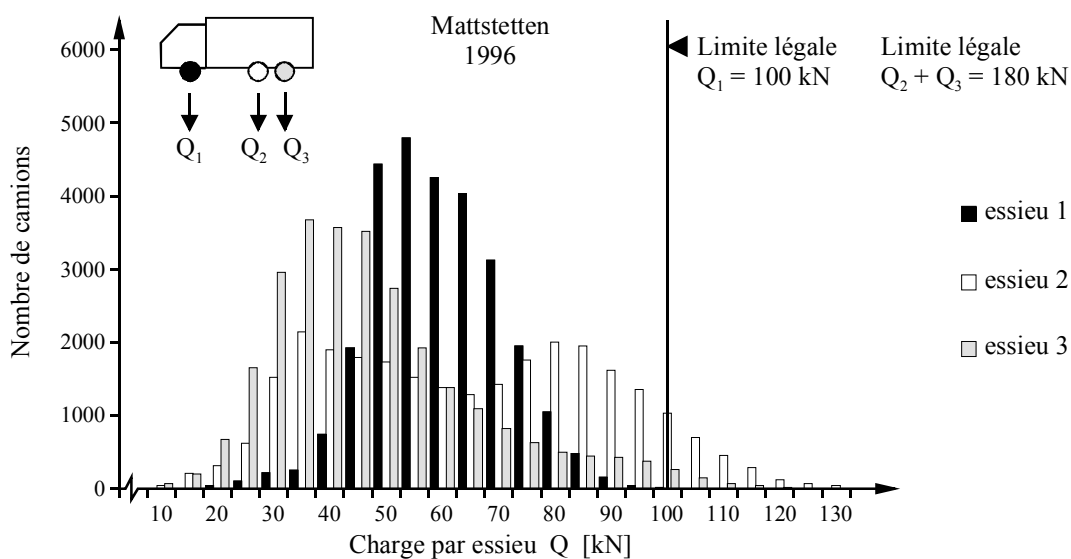


Figure 4.8 Histogramme de la charge par essieu des camions 12

Les charges des deux camions représentatifs sont déterminées afin que la différence de poids soit suffisamment importante. Le poids total du camion 11 est fixé à environ 160 kN, légèrement en dessous de la limite légale, et celui du camion 12 est établi à environ 280 kN ce qui est supérieur au poids légal de ce type de camion. Les charges par essieu sont déterminées pour être cohérentes avec la charge totale et les distributions données (Figure 4.7 et Figure 4.8). Les charges par essieu adoptées pour chaque camion (Figure 4.9) déterminent la répartition des masses. Des distributions uniformes sont considérées pour la cabine et pour la plate-forme du véhicule. Un camion vide se distingue d'un camion chargé par une différence de masse dans la partie arrière. Pour démontrer la cohérence de la construction de ces deux camions, la répartition des masses et la charge par essieu sont données également pour le véhicule vide (Figure 4.10).

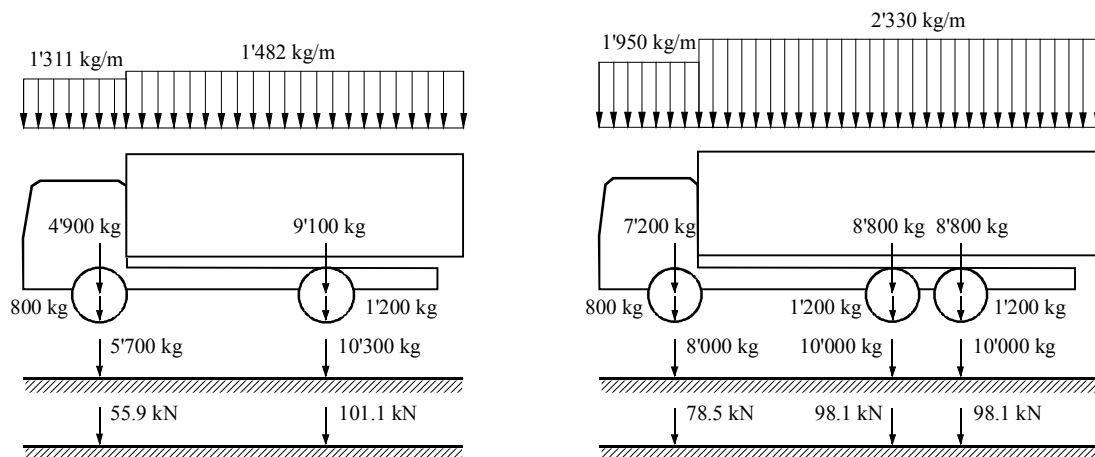


Figure 4.9 Répartition des masses et charge par essieu des camions chargés

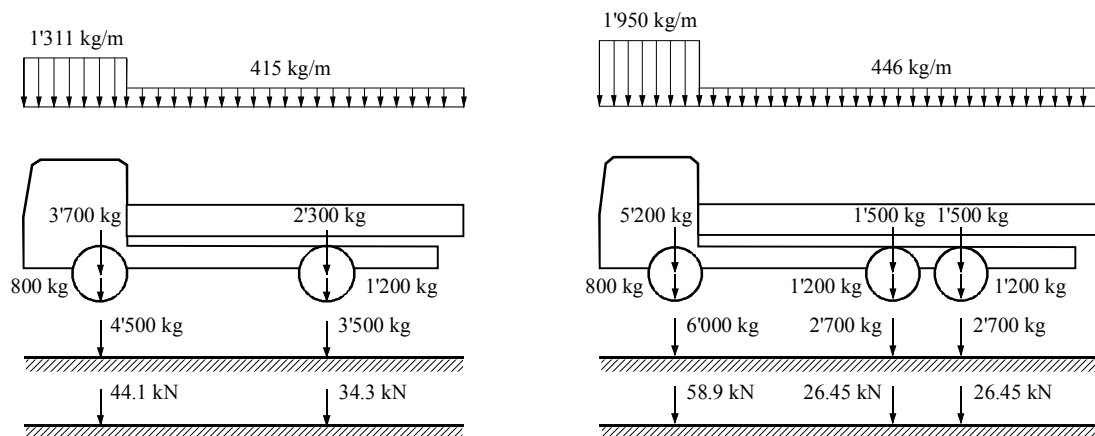


Figure 4.10 Répartition des masses et charge par essieu des camions vides

### 4.3.2 Les suspensions

Les suspensions sont des éléments importants dans la conception d'un véhicule, car elles diminuent fortement les mouvements du châssis et les accélérations ressenties par le conducteur. En conséquence, elles doivent être suffisamment flexibles, tout en limitant les déplacements verticaux du châssis entre les situations où le camion est vide ou chargé. Le compromis entre les deux fonctions est souvent obtenu en équipant les essieux avant et arrières d'un véhicule avec des suspensions différentes. Les suspensions des essieux avant sont conçues surtout en fonction de critères de confort qui se traduisent par une limitation des

accélérations au niveau de la cabine. Les suspensions arrières sont construites en fonction de critères statiques puisque ce sont les essieux arrières qui portent les charges les plus importantes. Le rôle des suspensions est également d'absorber les mouvements du véhicule générés par un profil de chaussée chaotique. L'amortissement de la suspension qui représente la dissipation d'énergie, détermine la vitesse avec laquelle le véhicule retrouve son équilibre après avoir été excité.

Le comportement d'une suspension est caractérisé par la relation charge - déplacement. Ces relations doivent donc être établies pour chacune des suspensions qui équipent les camions.

Dans le cadre de ce travail, le type de suspensions est restreint aux systèmes en acier constitués d'un empilement de lames métalliques entre lesquelles un mouvement est possible.

Des travaux ont été effectués dans le but d'établir des relations force - déplacement pour des suspensions particulières à lames d'acier [22], [38], [61]. En Suisse, Cantieni [22] a mesuré les courbes de charge et de décharge des suspensions de camions composés de deux essieux simples. Sur la base de mesures expérimentales effectuées sur des suspensions en acier aux États-Unis, Fancher et al [38] ont ajusté une relation mathématique éq. (4.1) qui permet de simuler le comportement de la suspension.

$$P_i = P_{ENV_i} + (P_{i-1} - P_{ENV_i}) \cdot e^{-\frac{|\delta_i - \delta_{i-1}|}{\beta}} \quad (4.1)$$

pour  $\delta_i > \delta_{i-1}$ ,  $P_{ENV} =$  courbe enveloppe de charge

pour  $\delta_i < \delta_{i-1}$ ,  $P_{ENV} =$  courbe enveloppe de décharge

où  $P_i$  est la force dans la suspension à l'étape  $i$ ,  $P_{ENV}$  est la force de l'enveloppe correspondant à la courbe de charge ou de décharge,  $\delta_i$  est le déplacement relatif de la suspension à l'étape  $i$  et  $\beta$  est un paramètre qui décrit la manière dont la force de suspension approche les courbes enveloppe lors d'un cycle d'hystérésis. Suivant l'évolution du déplacement relatif (augmentation, diminution), des valeurs différentes de  $\beta$  peuvent être spécifiées.

Compte tenu des objectifs fixés dans ce travail de recherche, il est légitime d'adopter les relations force - déplacement des suspensions mesurées par Cantieni sur quatre camions tests qui ont été utilisés lors d'essais dynamiques [22]. Les courbes mesurées sont données à la figure 4.11.

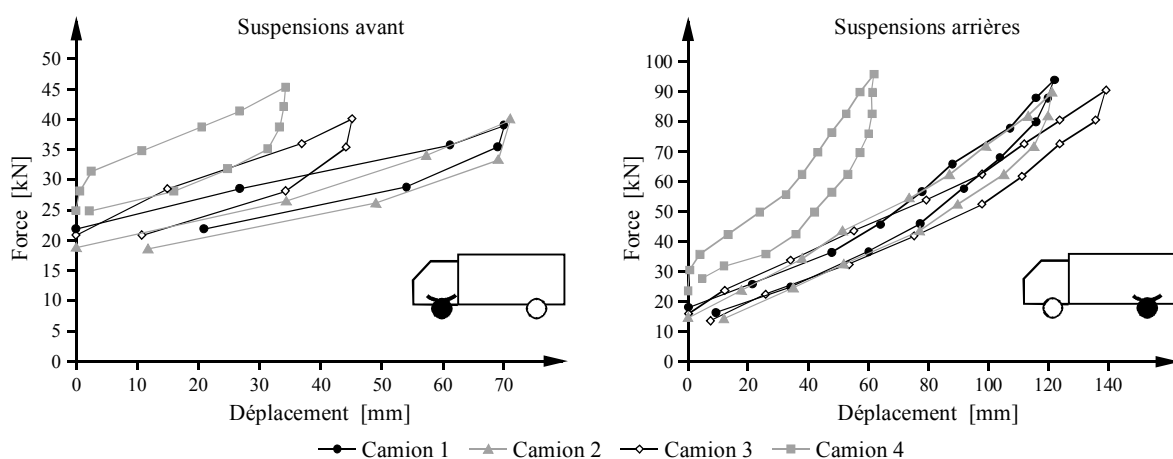


Figure 4.11 Relations force - déplacement mesurées

Afin d'établir le comportement des suspensions des deux camions représentatifs circulant en Suisse, des courbes de charge et de décharge sont calées sur les courbes des suspensions avant

et arrières de deux des quatre camions analysés<sup>1</sup> (Figure 4.12 et Figure 4.13). Des relations mathématiques du même type que celles proposées par Fancher représentent les courbes ajustées. La validité de la relation établie par Fancher pour caractériser le comportement des suspensions des camions suisses est vérifiée, car des comportements similaires ont été mesurés sur certaines suspensions aux États-Unis et en Suisse. Les tests de Fancher montrent que les courbes de charge et de décharge des suspensions avant s'approchent d'une droite alors que celles des suspensions arrières sont, en général, non linéaires. Des relations similaires sont considérées pour les suspensions des camions représentatifs.

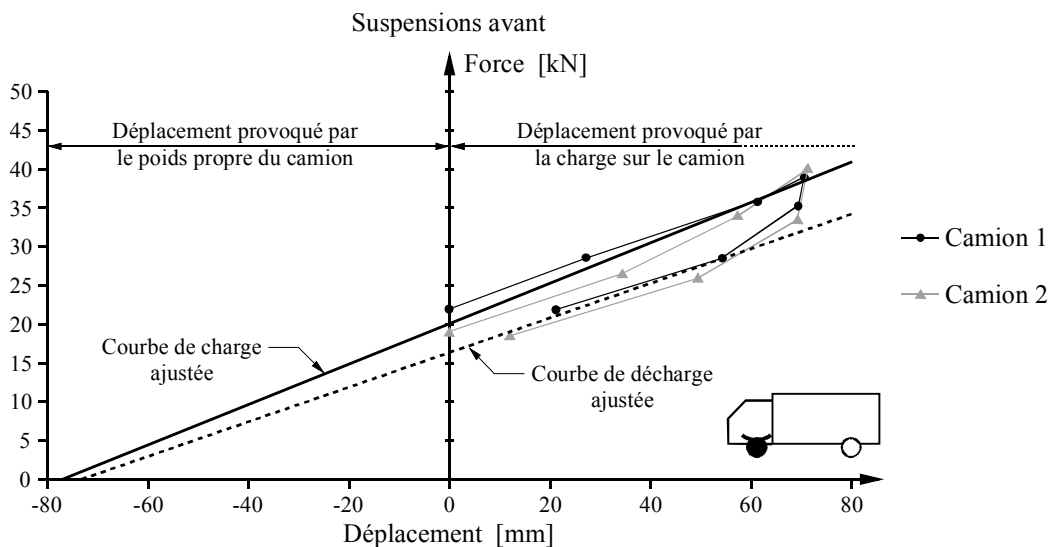


Figure 4.12 Courbes mesurées et ajustées

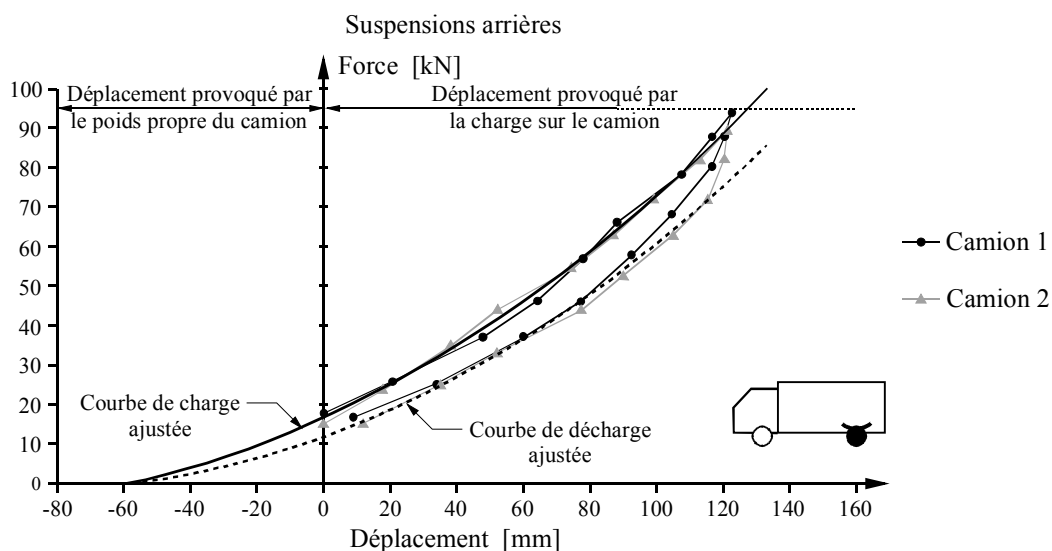


Figure 4.13 Courbes mesurées et ajustées

Le nombre de points mesurés par Cantieni pour établir les relations force - déplacement est faible, en particulier dans les zones de transition entre les courbes de charge et de décharge; pour cette raison, certaines valeurs intervenant dans la relation de Fancher sont admises en se basant toutefois sur les valeurs proposées dans [38] pour des suspensions similaires.

<sup>1</sup> La quatrième suspension est d'une conception différente; de plus, le camion équipé de ces suspensions était destiné à être exporté sur un autre continent.



Le comportement des suspensions du camion représentatif 11 est caractérisé par les relations suivantes pour les suspensions avant et arrières respectivement (Figure 4.14).

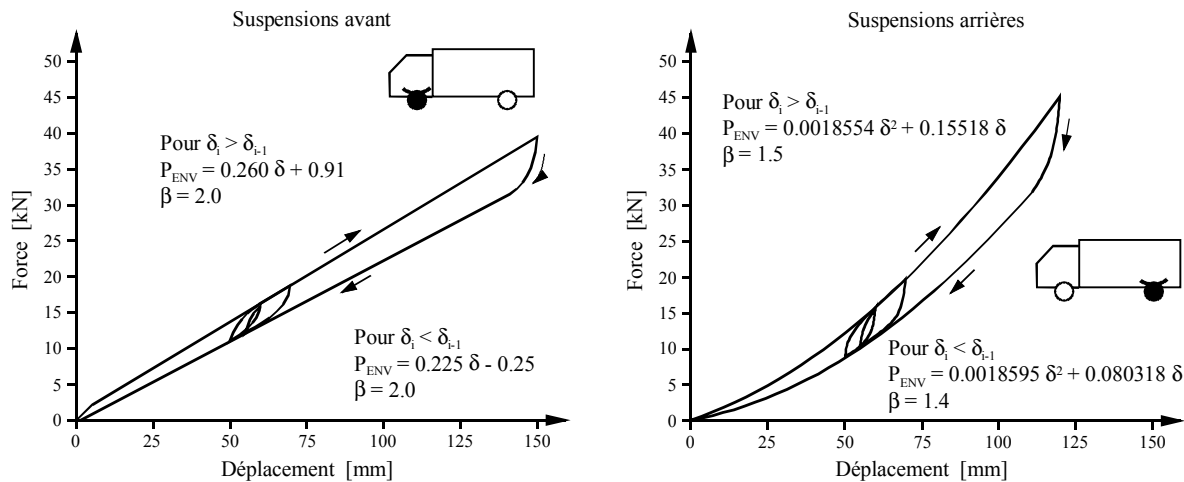


Figure 4.14 Lois de comportement des suspensions du camion 11

Pour le camion du type 12, les suspensions avant sont les mêmes que celles du camion 11. Faute de mesures, la loi de comportement de la suspension des essieux tandem a été admise équivalente à la relation force - déplacement de deux suspensions d'un essieu arrière simple (Figure 4.15). Cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée, car aucun résultat de mesures effectuées sur ce type de suspensions n'a pu être obtenu.

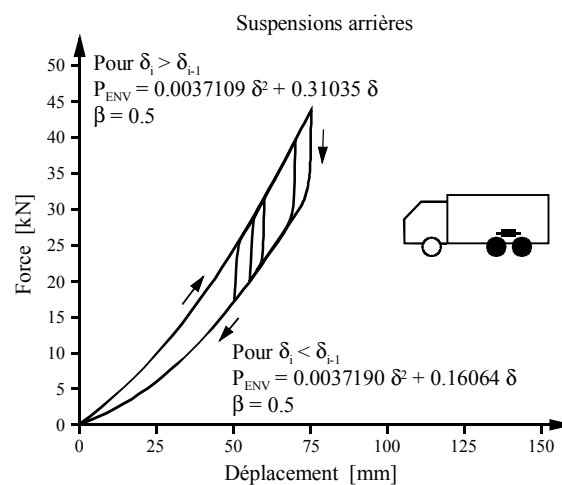


Figure 4.15 Loi de comportement des suspensions arrières du camion 12

### 4.3.3 Les pneus

Lorsque la chaussée est suffisamment lisse, les véhicules munis de suspensions à lames d'acier vibrent essentiellement sur les pneus. Le comportement des pneus est principalement influencé par la structure du pneu et par la pression de gonflage [22], [61]. Le comportement des pneus est non linéaire surtout pour les faibles charges. Dans la zone de charge correspondant à l'utilisation courante, le comportement peut toutefois être considéré comme linéaire. Tout comme les suspensions, les pneus présentent un comportement dissipatif [61]; cependant l'hystérésis est faible comparativement au même effet observé dans les suspensions. Le comportement des pneus des camions d'essais dont les suspensions ont été analysées (4.3.2), a été mesuré par Cantieni [22]. Les résultats sont présentés dans le

diagramme (Figure 4.16) où la rigidité est donnée en fonction de la charge pour des pressions de gonflage et des structures de pneus différentes (radiale et diagonale).

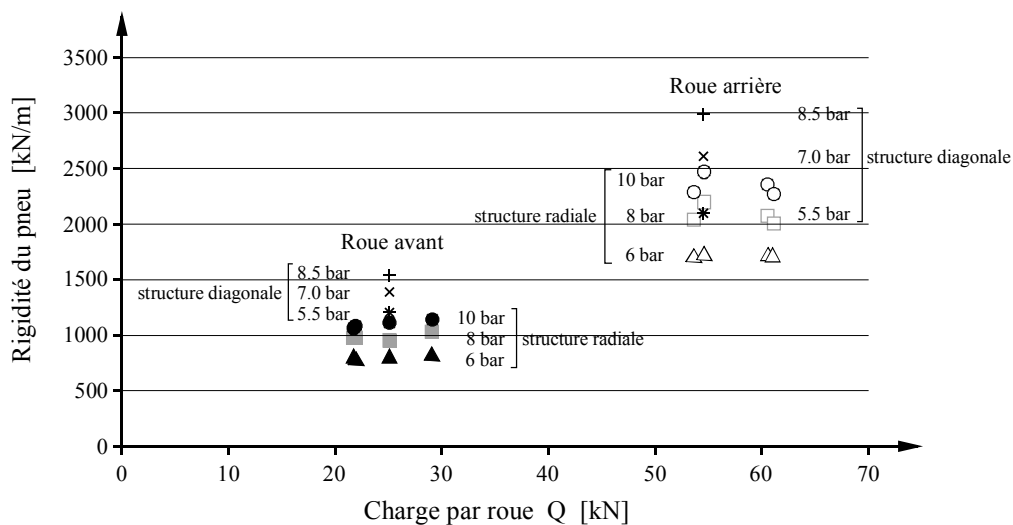


Figure 4.16 Rigidité des pneus mesurée par Cantieni

Les pneus des camions représentatifs sont caractérisés par une rigidité constante et un amortissement de type visqueux défini par un rapport d'amortissement (Tableau 4.1). Un rapport d'amortissement équivalent à 5% de l'amortissement critique a été admis pour chaque roue. En regardant des valeurs proposées dans la littérature, cette valeur constitue un bon compromis à défaut de résultats de mesures plus précises.

	Roues avant	Roues arrières
Rigidité k [kN/m]	1'000	2'000
Rapport d'amortissement $\xi$ [-]	5%	5%
Amortissement c [Ns/m]	2'000	3'464

Tableau 4.1 Propriétés des pneus

#### 4.4 Remarques finales

Deux camions représentatifs des poids lourds circulant en Suisse ont été définis compte tenu des informations obtenues par des mesures de trafic et par des essais dynamiques. Un camion de 16 tonnes à deux essieux simples et un camion de 28 tonnes à trois essieux ont été choisis pour l'analyse. Les propriétés liées aux systèmes de suspensions et aux pneus ont été étudiées, car ces éléments sont importants pour décrire de manière réaliste les mouvements des véhicules.

Les difficultés rencontrées dans cette partie du travail de recherche se situent au niveau de la définition du comportement des suspensions et des pneus par rapport à la grande diversité des modèles existants. L'étude s'est limitée aux suspensions à lames d'acier alors que la variété des suspensions pneumatiques est tout aussi grande. Très peu d'études ont été entreprises pour définir les relations force - déplacement de ces éléments qui sont fondamentaux pour le comportement des véhicules. Des travaux sont encore nécessaires pour étudier les suspensions et surtout pour déterminer les variations de leurs propriétés.

## Chapitre 5

# Modélisations numériques

### 5.1 Introduction

L'étude du comportement dynamique des ponts est réalisée par une approche numérique. Les six ponts caractéristiques du réseau autoroutier sont donc modélisés au moyen d'éléments finis. Les profils de la chaussée ainsi que les deux camions représentatifs des poids lourds sont également représentés par un modèle mathématique. Le système dynamique composé de ces trois éléments est résolu à l'aide d'un logiciel qui intègre les équations différentielles du mouvement en considérant l'interaction dynamique entre le pont et les véhicules. Les simulations numériques du passage des véhicules sur chaque pont sont effectuées dans le cadre d'une étude paramétrique dans laquelle différentes variables liées aux ponts, aux profils de la chaussée et aux véhicules sont analysées. Les modèles sont testés afin d'étudier la précision des résultats.

Le but de ce chapitre est de construire l'étude numérique afin d'obtenir les effets dynamiques dans la dalle de roulement des ponts qui sont traversés par des poids lourds.

Le chapitre se compose des six sections suivantes:

- **Logiciel d'éléments finis "CLEF"**

Une des applications de ce logiciel a été conçue pour évaluer les effets dynamiques provoqués par le trafic routier dans les ponts et permet d'étudier le comportement dynamique de la dalle de roulement. La méthode implantée dans le logiciel pour résoudre le système dynamique permet de considérer efficacement les nombreux paramètres qui interviennent dans le phénomène d'interaction dynamique. La description de l'algorithme de résolution basé sur un schéma de prédiction - correction, montre les différentes étapes de l'analyse numérique.

- **Ponts représentatifs**

Les modèles des ponts représentatifs sont constitués des éléments finis disponibles dans la librairie du logiciel "CLEF". Les modèles sont utilisés tout d'abord pour calculer les modes et les fréquences propres de vibration de chaque structure. Les effets dynamiques intéressants sur chacun des ponts sont définis en vue de l'étude paramétrique.

- **Profils de chaussée**

La méthode utilisée pour générer les profils de chaussée dont les exigences de qualité ont été émises au chapitre 3, est exposée. Les profils de chaussée calculés par le logiciel "CLEF" lors des simulations, sont construits.

- **Véhicules représentatifs**

Le modèle de véhicule décrit est utilisé pour déterminer les modes et les fréquences propres de vibration des deux camions représentatifs.

- **Étude paramétrique**

L'étude paramétrique effectuée pour étudier le comportement dynamique des dalles de roulement est séparée en deux parties. Dans la première, les effets statiques dus à la charge des véhicules sont calculés dans les différents ponts en considérant uniquement les forces élastiques. La référence statique ainsi établie permet de quantifier les facteurs d'amplification dynamique. Les effets dynamiques sont déterminés dans la seconde partie de l'étude. Les paramètres testés sur chaque pont sont exposés ainsi que la manière de conduire une analyse dynamique numérique.

- **Précision des résultats**

Les maillages des modèles d'éléments finis des ponts représentatifs sont établis afin de limiter le temps de calcul tout en garantissant une précision suffisante. Des modèles avec des maillages différents sont comparés et les différences constatées sont expliquées en considérant les aspects liés à la modélisation par éléments finis.

## 5.2 Logiciel d'éléments finis "CLEF"

### 5.2.1 Généralités

Le logiciel d'éléments finis "CLEF" employé pour effectuer les simulations du passage d'un véhicule sur un pont a été développé au sein du Groupe Interdisciplinaire de Recherche en Éléments Finis (GIREF) de l'Université Laval de Québec [35]. Une des applications du logiciel est l'évaluation des effets dynamiques dans les ponts sollicités par des véhicules mobiles afin de déterminer les facteurs d'amplification dynamique. L'étude du comportement dynamique des ponts constitués de poutres multiples caractéristiques de la plupart des ouvrages en Amérique du Nord, nécessite une modélisation de la structure en trois dimensions afin de représenter le plus fidèlement possible la distribution des charges des roues des véhicules entre les différentes poutres qui supportent la dalle de roulement en béton. Le logiciel "CLEF" permet une telle modélisation du pont et des véhicules [79] [19] et respecte les conditions énoncées au chapitre 2 (2.8.2).

Les simulations effectuées jusqu'ici avec le programme de calcul ont été réalisées dans le but de déterminer les facteurs d'amplification dynamique relatifs aux flèches verticales des ponts, aux déformations dans les poutres principales ou aux réactions d'appui. Les simulations numériques ont été comparées avec des mesures réalisées sur des ponts au Québec par le Ministère des Transports du Québec (MTQ) [45]. Une bonne correspondance entre les résultats a confirmé la validité du modèle numérique [62] [37].

En résumé, les études antérieures visaient le comportement dynamique global longitudinal des ponts.

### 5.2.2 Méthode de résolution du système dynamique

De manière générale, un système dynamique est décrit par un système d'équations différentielles donné sous une forme matricielle:

$$M \cdot \ddot{v}(t) + C \cdot \dot{v}(t) + K \cdot v(t) = f(t) \quad (5.1)$$

- où
- M est la matrice de masse
  - C est la matrice d'amortissement
  - K est la matrice de rigidité

$f$  est le vecteur des forces appliquées

$v(t)$ ,  $\dot{v}(t)$  et  $\ddot{v}(t)$  sont les vecteurs des déplacements, des vitesses et des accélérations

Deux méthodes peuvent être appliquées pour résoudre le système dynamique pont + véhicule: soit la méthode couplée, soit la méthode découplée.

La méthode de résolution couplée considère le système pont + véhicule comme un seul système vibratoire et consiste à construire les matrices de masse  $M$ , d'amortissement  $C$  et de rigidité  $K$  pour toutes nouvelles positions du véhicule sur le pont; c'est-à-dire qu'à chaque pas de temps  $t$  les matrices sont actualisées. Ces matrices incluent des termes relatifs au pont et aux véhicules; or, compte tenu du nombre de degrés de liberté important du pont, cette démarche peut être extrêmement coûteuse en temps de calcul. Récemment, Henchi et al ont développé une méthode pas à pas utilisant le schéma des différences centrales pour résoudre efficacement le système d'équations couplées [49].

Le logiciel "CLEF" utilise la méthode de résolution découplée dans laquelle les équations dynamiques sont résolues séparément pour le pont et pour les véhicules. L'algorithme de résolution tient compte du couplage qui existe entre ces systèmes par l'ajustement de la valeur des degrés de liberté communs définis aux points de contact entre les roues et le pont [79] [19]. Cette approche basée sur un schéma de prédiction - correction permet de calculer une seule fois et de façon indépendante les matrices  $M$ ,  $C$ , et  $K$  du pont et des véhicules. Les systèmes d'équations différentielles découplés représentant le mouvement du pont et celui de chaque véhicule, sont résolus par une intégration numérique directe basée sur le schéma implicite de Newmark [32] [11].

La méthode découplée permet de considérer aisément le comportement non linéaire des suspensions des véhicules (4.3.2). Les équations d'équilibre des véhicules sont résolues par un processus itératif. Le schéma de Newton-Raphson [11] combiné avec le schéma de Newmark est utilisé pour construire l'algorithme de résolution des systèmes des véhicules munis de suspensions non linéaires [19].

### 5.2.3 Algorithme de résolution

L'algorithme de résolution du système pont + véhicule implanté dans le logiciel "CLEF" est représenté schématiquement (Figure 5.1) et est décrit en détail dans [19].

L'algorithme débute par la construction des systèmes d'équations qui représentent respectivement le pont et chaque véhicule. Le système relatif au pont est créé par l'assemblage des matrices élémentaires de masse  $M^e$  et de rigidité  $K^e$  propres aux éléments finis qui décrivent l'ouvrage (5.3.1). Une combinaison linéaire des matrices globales  $M_b$  et  $K_b$  de la structure définit la matrice d'amortissement globale  $C_b$ . Le système de chaque véhicule est défini par le logiciel dans lequel sont implantés différents modèles de camions.

Les conditions initiales de vibration du pont et des véhicules sont introduites dans l'analyse et sont définies au moment où l'essieu avant du premier véhicule entre sur le pont. Le pont est supposé être dans son état d'équilibre statique au début du processus de résolution. Les véhicules sont en vibration lorsqu'ils entrent sur le pont, car la rugosité de la chaussée suffit à les exciter.

Les véhicules sont avancés sur le pont selon la vitesse de chacun et l'amplitude de la rugosité de la chaussée est évaluée aux points de contact entre le pont et les roues des véhicules.

Pour chaque pas de temps, l'analyse est initiée par une approximation de la configuration de la structure au pas courant à partir de la solution obtenue au pas précédent. Cette estimation est effectuée lors de la première itération seulement.

Un premier processus itératif est effectué au niveau du système de chaque véhicule et permet d'atteindre l'équilibre dans lequel intervient le comportement non linéaire dissipatif des suspensions. Les déplacements et les vitesses aux degrés de liberté de chaque véhicule

sont estimés à partir de la solution du pas précédent. Les forces dans les suspensions sont ensuite calculées. Le déplacement et la vitesse du pont sont évalués aux points de contact. Le vecteur des sollicitations équivalentes peut alors être calculé. Le système est intégré selon le schéma de Newmark combiné avec le schéma de Newton-Raphson. Le processus est répété jusqu'à ce que le test de convergence soit satisfait.

Un deuxième processus itératif s'enchaîne afin de corriger l'approximation de la configuration du pont effectuée au début du pas de temps par une série d'ajustements entre les forces d'interaction appliquées par chaque véhicule et la déformée de la structure. Pour les nouvelles configurations des véhicules, le vecteur des charges appliquées sur la structure est déterminé et le système d'équations linéaires de la structure est résolu. Si le test de convergence de ce processus échoue, la configuration de chaque véhicule est actualisée en fonction de la nouvelle configuration du pont.

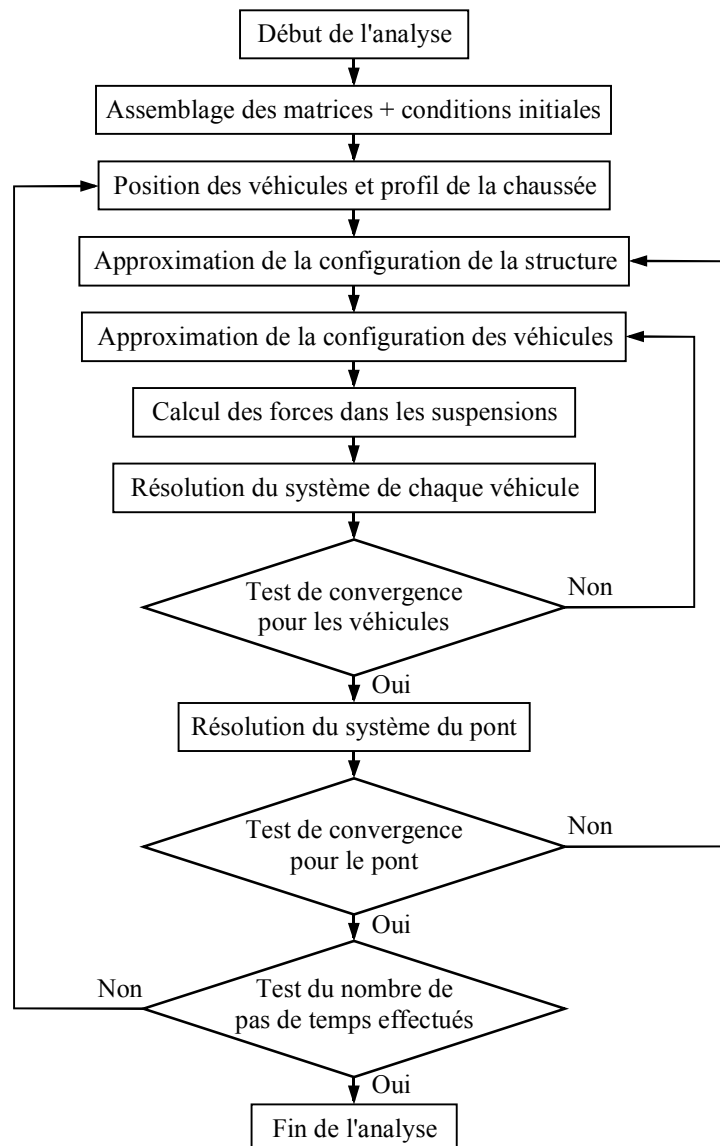


Figure 5.1 Algorithme de résolution du système pont + véhicule

Pour les deux processus, le test de convergence est évalué en considérant le vecteur  $U_j$  associé à la  $j^{\text{ième}}$  configuration et le vecteur  $U_{j-1}$  associé à la  $(j-1)^{\text{ième}}$  configuration de la structure du

pont ou des véhicules selon le processus traité. Le test de convergence implique le calcul de la norme suivante:

$$\left| \frac{U_j - U_{j-1}}{U_{j-1}} \right| \leq \text{tolérance} \tag{5.2}$$

La tolérance est fixée à  $10^{-3}$  pour les deux processus [19].

Les deux processus itératifs sont interrompus lorsque la correction apportée par la dernière itération est inférieure à la tolérance prescrite. Lorsqu'il y a convergence pour le premier processus itératif, la convergence du deuxième est nécessaire avant de passer au prochain pas de temps. Généralement, deux itérations par pas de temps pour chaque processus sont nécessaires pour assurer la convergence.

L'analyse se déroule ainsi par pas de temps successifs jusqu'à ce que tous les véhicules, selon leur trajectoire et leur vitesse, soient sortis du pont.

### 5.3 Ponts représentatifs

#### 5.3.1 Modèles

Les six ponts représentatifs décrits au chapitre 3 sont modélisés en trois dimensions avec des éléments finis afin de réaliser l'analyse de leur comportement dynamique. Les maillages des ponts sont constitués de deux types d'éléments finis [79]:

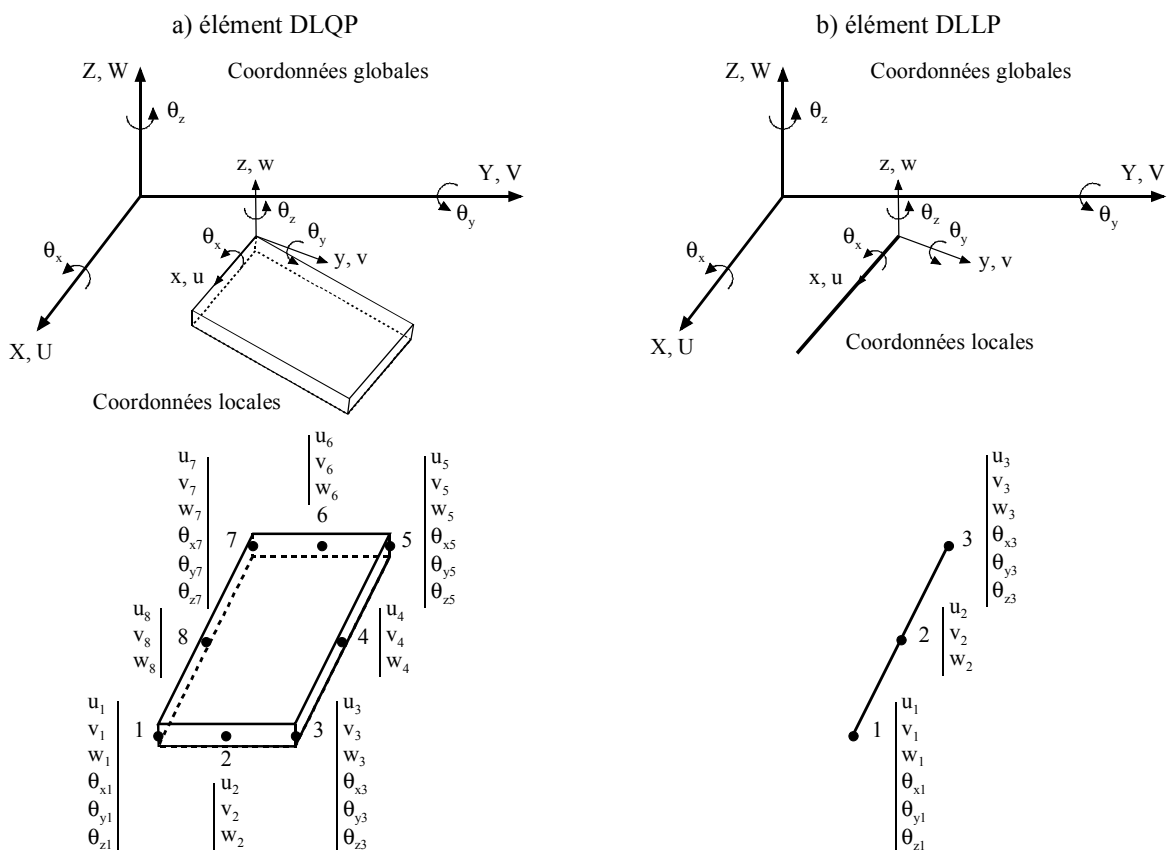


Figure 5.2 Schéma des éléments finis

- L'élément de coque utilisé est un élément quadrilatéral à 8 nœuds DLQP ("Discrete Linear Quadrilateral Plus") avec 36 degrés de liberté dont la formulation est basée sur la théorie

discrète de Kirchhoff qui suppose que l'énergie de cisaillement transversal est négligée. Cet élément, défini avec une épaisseur constante, possède six degrés de liberté aux nœuds d'angles et trois aux nœuds placés sur les bords (Figure 5.2a).

- L'élément de poutre tridimensionnelle employé est un élément à 3 nœuds avec 15 degrés de liberté compatible avec l'élément de coque DLQP. L'élément DLLP ("Discrete Linear Line Plus") pour lequel l'énergie de cisaillement transversal est négligée possède six degrés de liberté aux nœuds d'extrémités et trois au nœud central (Figure 5.2b).

Essentiellement les éléments de coque sont utilisés, seuls les bordures et les parapets sont représentés par des éléments de poutre excentrés collés sur le bord des éléments de coque de la dalle de roulement. Le choix de la taille du maillage dans les deux directions principales est dicté par un certain nombre de contraintes.

Transversalement:

- la position des âmes et des poutres principales
- l'épaisseur variable de la dalle de roulement et de la dalle inférieure
- la répartition des masses dans la section
- la précision des résultats (5.6)

Longitudinalement:

- la position des appuis et des entretoises intermédiaires
- l'épaisseur variable de la dalle inférieure des caissons et des poutres des ponts P1 et P2
- la répartition longitudinale de la masse
- la représentation des modes de vibration locaux dans les dalles
- la distribution des charges des roues (5.6)

Les maillages des cinq ponts-poutre sont similaires afin de faciliter les analyses et de fournir des résultats d'une précision équivalente sur chaque structure.

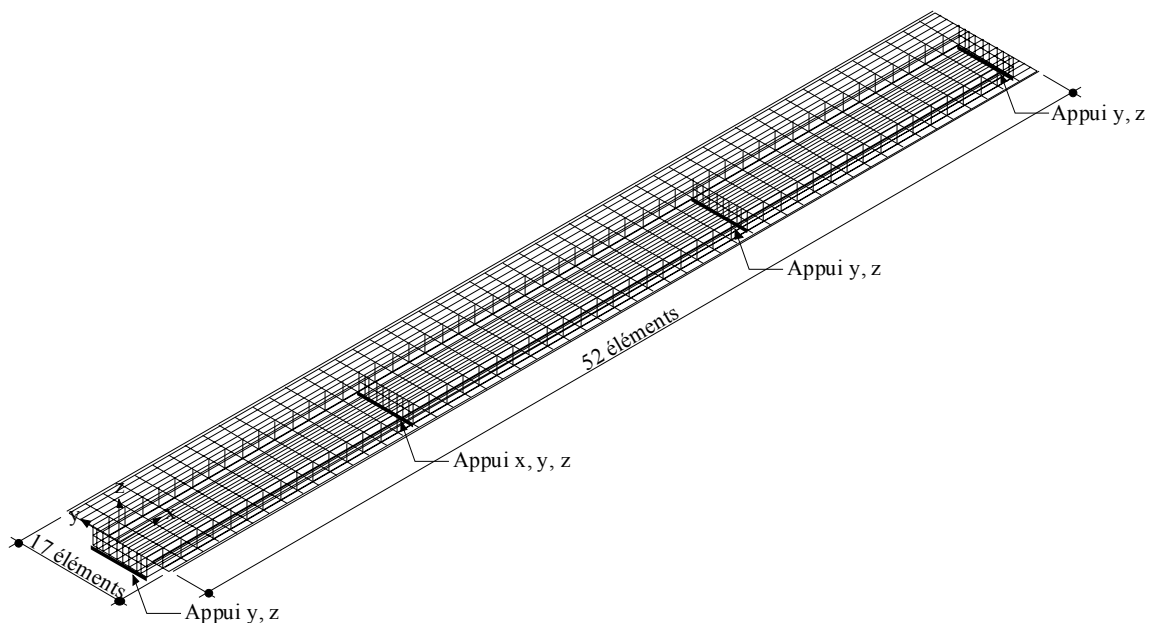


Figure 5.3 Maillage du pont C1

Ces ponts sont divisés en 52 tronçons de 2 m sur chacun desquels est placé longitudinalement un élément. Transversalement 17 éléments de largeur variable couvrent chaque tronçon. Les dalles de roulement sont ainsi modélisées par 884 éléments. Les bordures ou parapets sont constitués par  $2 \times 52$  éléments de poutre tridimensionnelle excentrés par rapport à leur axe de discrétisation. Les âmes des caissons et les poutres de chaque tronçon sont simulées par deux



éléments placés sur la hauteur. Le maillage des dalles inférieures des caissons correspond à celui des dalles de roulement. La discrétisation des entretoises est cohérente avec le maillage des dalles et des âmes ou des poutres. Le système d'appuis des cinq ponts est composé d'appuis linéaires verticaux et transversaux disposés sous les quatre entretoises principales. Les ponts sont fixés longitudinalement sur un des appuis. À titre d'exemple pour les ponts-poutre, le maillage du pont C1 est présenté (Figure 5.3).

Le passage inférieur (pont D1) est modélisé par une dalle dont deux côtés sont encastrés et les deux autres sont libres. L'hypothèse concernant le système d'appuis s'écarte peu de la réalité, car les murs latéraux rigidifient les murs porteurs.

Le maillage de la dalle comporte  $20 \times 20$  éléments de coque et  $2 \times 20$  éléments de poutre tridimensionnelle représentant les bordures (Figure 5.4).

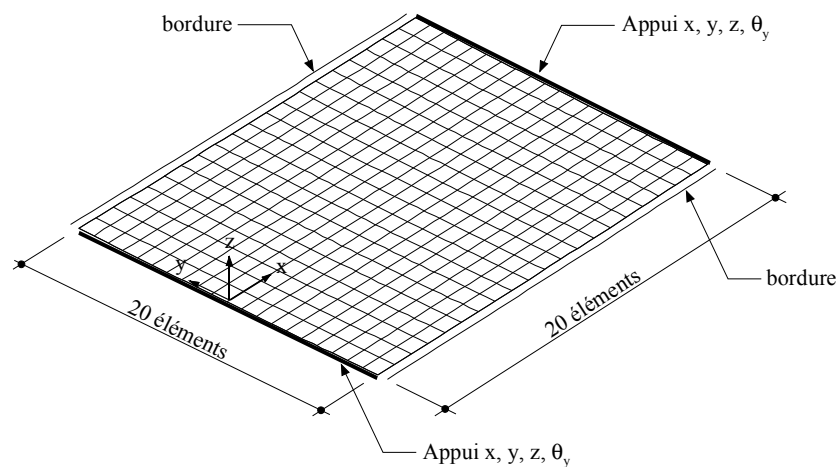


Figure 5.4 Maillage du pont D1

Un plan du maillage de chaque pont est présenté dans l'annexe A. Le nombre d'éléments, de nœuds et de degrés de liberté de chaque modèle de pont est donné (Tableau 5.1).

Ponts	Nombre d'éléments de coque	Nombre d'éléments de poutre	Nombre de nœuds	Nombre de degrés de liberté
Pont C1	1'632	104	4'872	19'311
Pont C1P	1'632	104	4'872	19'311
Pont C2	1'512	104	4'524	17'961
Pont P1	1'290	104	4'191	16'704
Pont P2	1'400	104	4'291	17'004
Pont D1	400	40	1'281	4'794

Tableau 5.1 Caractéristiques des maillages des ponts

Afin de définir la rigidité et la masse des structures modélisées, les propriétés suivantes du béton sont utilisées:

- la masse volumique  $\rho = 2'500 \text{ kg/m}^3$
- le module d'élasticité  $E_c = 35'000 \text{ kN/m}^2$
- le coefficient de Poisson  $\nu = 0.2$

Le revêtement des dalles de roulement constitué de béton bitumineux est considéré dans la répartition des masses, mais ne contribue pas à la rigidité de la structure. La masse volumique

des éléments de la dalle de roulement est donc augmentée afin de tenir compte de la masse du revêtement.

### 5.3.2 Caractéristiques dynamiques

Le comportement dynamique des ponts est caractérisé par la masse, la rigidité et l'amortissement. Les matrices  $M$  et  $K$  définissent les modes et les fréquences propres de vibration de chaque pont et la matrice  $C$  caractérise l'amortissement.

Le calcul des valeurs propres et des vecteurs propres de l'équation de fréquence des six ponts est réalisé par la méthode d'itérations dans un sous-espace [32]. Les fréquences des modes propres qui se situent dans la bande de 0 - 15 Hz sont intéressantes, car elles correspondent à celles des véhicules lourds. En général, les vingt premiers modes permettent de couvrir cette plage de fréquences. Parmi les vingt premiers modes de vibration des ponts-poutre, les modes dont la fréquence est en dessous de  $\sim 9$  Hz, sont des modes globaux qui influencent les mouvements des éléments porteurs principaux. Ces modes s'échelonnent de  $\sim 3$  à  $\sim 9$  Hz avec des différences de l'ordre de 1 Hz. Au-delà de  $\sim 9$  Hz apparaît une multitude de modes de vibration de la dalle de roulement et des entretoises caractérisés par des fréquences de vibration proches les unes des autres ( $\Delta f < 0.5$  Hz). Il faut remarquer que la distinction entre ces deux types de modes de vibration n'est pas toujours évidente. Les modes de vibration du pont-cadre ont des fréquences élevées par rapport à celles des ponts-poutre. La fréquence du mode fondamental de flexion se situe à 19.4 Hz. Les différents modes ont des fréquences espacées les unes des autres (5 modes entre 19.4 et 54 Hz). Un tableau des fréquences des modes de vibration de chaque pont est donné dans l'annexe B.

Plutôt que d'évaluer les termes de la matrice d'amortissement qui sont généralement inconnus, il est physiquement raisonnable et plus commode de définir l'amortissement d'un système dynamique en utilisant le rapport d'amortissement de chaque mode. Expérimentalement, les rapports d'amortissement modaux  $\xi_n$  peuvent être déterminés ou estimés avec une bonne précision.

L'amortissement de Rayleigh qui définit la matrice  $C$  par une combinaison linéaire des matrices  $M$  et  $K$ , conduit à la relation suivante entre le rapport d'amortissement et la fréquence de chaque mode [32].

$$\xi_n = \frac{a_0}{2\omega_n} + \frac{a_1\omega_n}{2} \quad (5.3)$$

où  $a_0$  et  $a_1$  sont respectivement les constantes d'amortissement proportionnelles à la masse et à la rigidité.

Les constantes d'amortissement de Rayleigh  $a_0$  et  $a_1$  sont évaluées par la solution d'une paire d'équations simultanées, si les rapports d'amortissement  $\xi_1$  et  $\xi_2$  associés à deux fréquences spécifiques  $\omega_1$  et  $\omega_2$  des modes de vibration de la structure sont connus.

$$a_0 = 2\omega_1\omega_2 \frac{\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad a_1 = 2 \frac{\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (5.4)$$

Les termes de la matrice d'amortissement sont donnés par l'équation générale (5.5) établie pour chaque terme.

$$C = a_0M + a_1K \quad (5.5)$$

En pratique,  $\omega_1$  correspond généralement à la fréquence fondamentale du système et  $\omega_2$  est choisi parmi les fréquences des modes qui dominent la réponse dynamique. En conséquence,

les modes dont les fréquences sont situées entre les deux fréquences choisies, ont des rapports d'amortissement inférieurs à ceux fixés. Les modes dont les fréquences sont plus élevées que  $\omega_2$ , ont des rapports d'amortissement supérieurs à  $\xi_2$ , qui augmentent de façon monotone avec la fréquence. Il en résulte que les modes de haute fréquence contribuent peu à la réponse à cause de leur grand rapport d'amortissement.

Pour les ponts représentatifs, les fréquences choisies correspondent aux deux premiers modes verticaux de flexion symétrique du tablier. Ces deux modes contribuent de manière significative à la réponse dynamique du pont dans l'hypothèse où les modes propres de la structure sont peu influencés par la masse du véhicule et où la torsion engendrée par la charge d'un camion est faible.

Le rapport d'amortissement du mode fondamental de flexion verticale est déterminé à partir des informations figurant dans la base de données des ponts testés à l'IBAP/EPFL [39]. Pour des ponts similaires à ceux étudiés, la valeur moyenne du rapport d'amortissement vaut  $\xi_1 = 1.2\%$ . Ce rapport correspond aux valeurs données dans la littérature [21]. Le rapport d'amortissement des modes supérieurs est rarement mesuré. La valeur de  $\xi_2 = 2\%$ , couramment admise par d'autres chercheurs, est choisie dans le cadre de cette étude.

### 5.3.3 Grandeurs analysées

Pour les dalles de roulement, les déplacements verticaux au milieu d'un champ de dalle et à l'extrémité des porte-à-faux présentent de l'intérêt de même que les moments transversaux sur les appuis et au centre des dalles. Les moments longitudinaux dans les dalles sont moins importants, car les contraintes selon cette direction sont généralement déterminées par la flexion des éléments porteurs principaux (âmes des caissons et poutres maîtresses), néanmoins ces efforts donnent des indications sur la répartition des charges locales appliquées par les roues des véhicules.

Pour les cinq ponts-poutre, 42 jauges numériques<sup>1</sup> sont réparties sur chaque tablier. Les réponses statiques et dynamiques sont calculées dans six sections transversales (A à F) situées à chaque quart des portées et, pour des raisons de symétrie, dans la première moitié de la superstructure. En plus des réponses de la dalle de roulement, les déplacements verticaux au milieu des deux premières travées sous les âmes des caissons ou sous les poutres maîtresses sont calculés pour évaluer d'éventuelles différences entre le comportement dynamique de la dalle et celui des éléments porteurs principaux.

39 jauges numériques sont placées sur le pont D1. Les moments dans la dalle sont calculés dans cinq sections transversales et longitudinales afin de saisir le comportement général de la structure. Le déplacement vertical au milieu de la travée est déterminé sous chaque bordure et au milieu de la dalle.

Le plan de chaque pont représentatif est reproduit dans l'annexe A avec la position des jauges numériques qui définissent les réponses calculées lors des simulations numériques.

## 5.4 Profils de chaussée

### 5.4.1 Modèle

Les profils de chaussée sont générés par le logiciel "CLEF" à l'aide de fonctions de densité spectrale  $G_d(n)$  et d'un angle de phase  $\theta_j$  choisi aléatoirement entre 0 et  $2\pi$  [79] [19].

$$r(x) = \sum_{j=1}^N \sqrt{4G_d(n_j)\Delta n} \cos(n_j x - \theta_j) \quad (5.6)$$

<sup>1</sup> Le terme "jauge numérique" est défini par analogie aux jauges de mesure utilisées lors d'essais expérimentaux.

La forme et l'amplitude des fonctions de densité spectrale  $G_d(n)$  sont établies pour que les deux profils utilisés dans ce travail respectent les critères exposés sous 3.4.4.

Les fonctions de densité spectrale sont décrites par deux segments de droite dans un graphique où les échelles sont logarithmiques (amplitude et fréquence). Les fonctions utilisées pour générer les profils A et B sont représentées dans le diagramme proposé dans [58] (Figure 5.5).

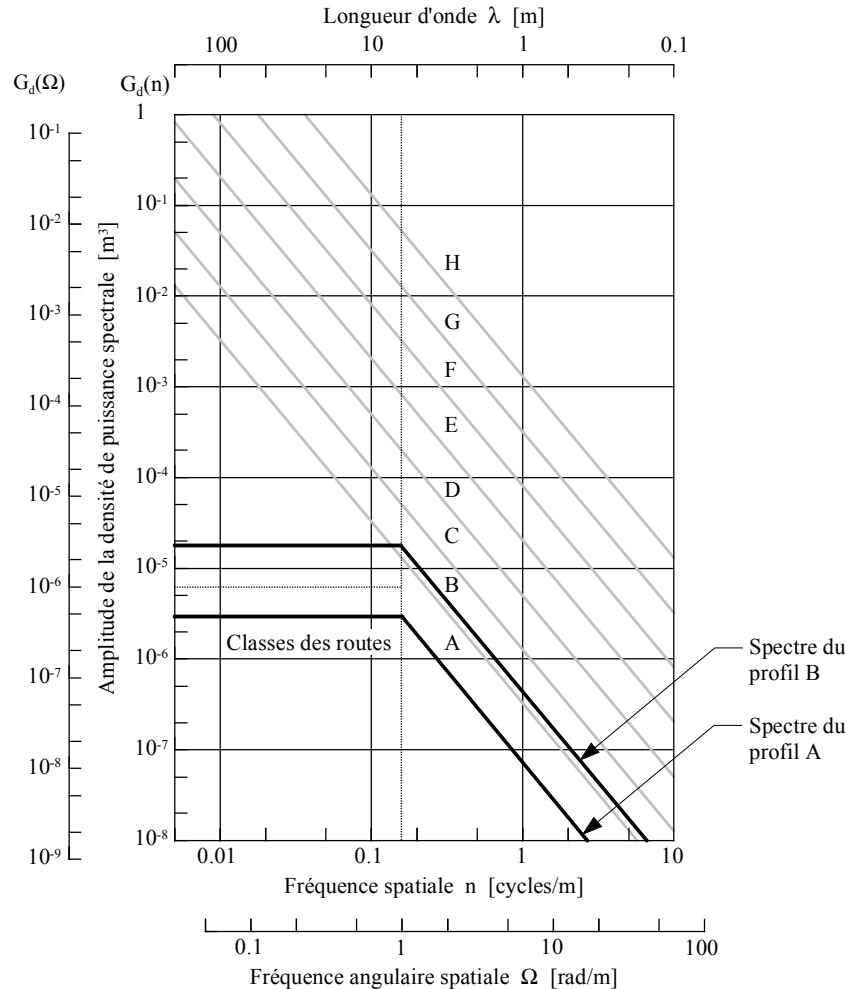


Figure 5.5 Fonctions de densité spectrale des profils de la chaussée

La fréquence de discontinuité se situe à  $1/2\pi$  [cycle/m]. Pour les courtes longueurs d'ondes  $> 1/2\pi$  [cycle/m], la pente du spectre est fixée à 2 telle que proposée par [58]. Une droite horizontale est choisie pour décrire l'amplitude des composantes de basse fréquence spatiale  $< 1/2\pi$  [cycle/m], car, dans cette plage de fréquences, les longueurs d'ondes s'approchent des portées des ponts représentatifs. Par conséquent, la déformée de la structure due aux contre-flèches, aux effets du fluage, aux défauts d'alignement des coffrages, etc. devrait être considérée. Pour éviter de favoriser artificiellement ces composantes qui peuvent créer des incohérences du profil, une fonction de densité spectrale horizontale est fixée.

#### 5.4.2 Profils

Les deux profils sont donnés avec leur valeur d'angle  $W$  et l'écart type correspondant  $sw$  calculés sur un tronçon de 250 m (Figure 5.6 et Figure 5.7). Les profils sont identiques sur toute la largeur de la chaussée et sont déterminés à partir de l'abscisse  $x = -5$  m située 5 m avant l'entrée du pont. La portion de chaussée précédant le pont permet d'initier les mouvements du véhicule avant que ce dernier atteigne l'ouvrage. Pour les ponts-poutre dont la

longueur est de 104 m, le profil de la chaussée du pont s'étend de l'abscisse  $x = 0$  m à  $x = 104$  m. Pour le pont D1, le profil est compris entre les abscisses  $x = 0$  et  $x = 11$  m.

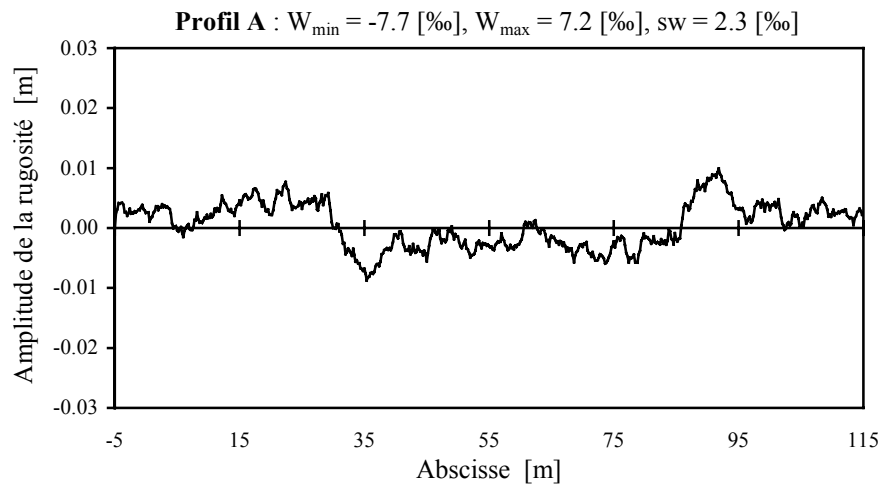


Figure 5.6 Profil A avec ses propriétés

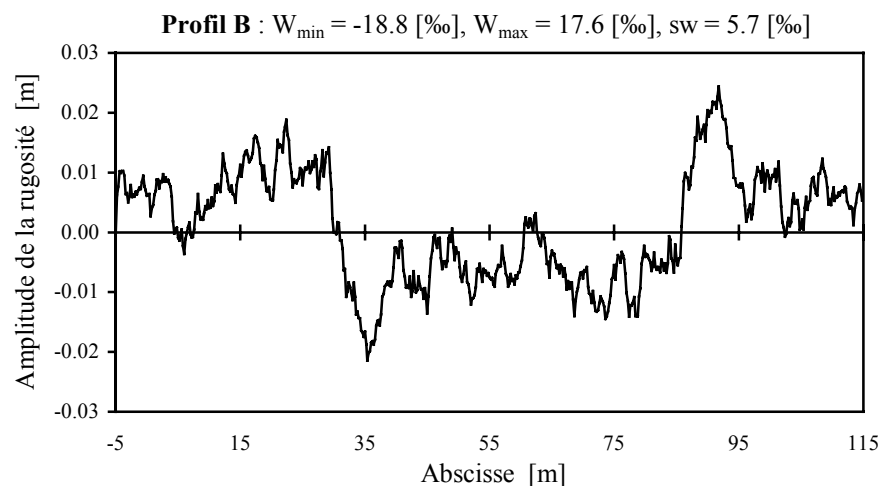


Figure 5.7 Profil B avec ses propriétés

## 5.5 Véhicules représentatifs

### 5.5.1 Modèle

Les deux camions représentatifs dont les propriétés ont été évaluées au chapitre 4, sont modélisés en trois dimensions par un système à 7 degrés de liberté. Ce modèle de véhicule (Figure 5.8) est implanté dans le logiciel d'éléments finis "CLEF".

Le châssis du véhicule est considéré comme un corps infiniment rigide de masse  $m_v$  posé sur des suspensions caractérisées par un comportement non linéaire dissipatif (4.3.2). Les masses inférieures  $m_i$  représentent la masse des roues, des essieux, de la transmission et du mécanisme de direction du véhicule. Les pneus sont modélisés par une combinaison en parallèle d'un ressort et d'un amortisseur visqueux dont les valeurs caractéristiques ont été définies (Tableau 4.1).

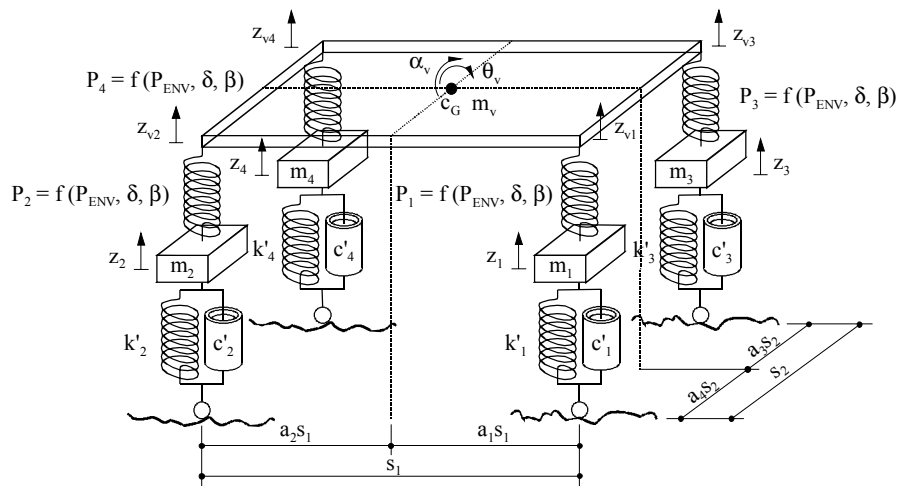


Figure 5.8 Modèle de véhicule à 7 degrés de liberté

Les déplacements verticaux du corps du véhicule sont décrits par trois des quatre variables  $z_{vi}$  (hypothèse de corps rigide). Le déplacement vertical de chaque masse  $m_i$  est exprimé par les variables  $z_i$  où  $i = 1$  à 4.

Les hypothèses suivantes, relatives au modèle de véhicule, sont émises pour établir les équations du mouvement obtenues en appliquant le principe des travaux virtuels:

- Les pneus du véhicule demeurent en contact permanent avec la chaussée.
- Les quatre jambes du véhicule conservent leur orientation par rapport au corps rigide.
- La rotation du véhicule est considérée petite.

Toutes les informations complémentaires relatives à ce modèle sont disponibles dans [79].

Le camion 11 est représenté correctement par ce modèle à 7 degrés de liberté, car tous les éléments du véhicule sont considérés. Ce modèle ne permet pas de modéliser des essieux tandem, tels que ceux placés à l'arrière du camion 12. La seule manière de considérer les essieux tandem consiste à les représenter par un seul essieu équivalent. L'action des essieux tandem est ainsi concentrée au centre du groupe d'essieux.

Cette simplification implique que d'une part, la disposition des charges sur la structure ne correspond pas exactement à la réalité et que d'autre part, le mouvement déphasé d'un des essieux par rapport à l'autre n'est pas considéré.

La représentation d'essieux tandem ou tridem par un essieu équivalent se justifie pour l'analyse des éléments porteurs principaux de ponts dont la portée est grande par rapport à la longueur du véhicule. Dans ces situations, l'action des essieux tandem ou d'un essieu équivalent, bien qu'elle soit différente, ne provoque pas de différences notables. L'analyse des effets dans une dalle de roulement ou dans un pont dont la portée est petite relativement à la taille du camion, peut montrer des différences importantes si l'action de chacun des essieux est considérée ou si l'action du groupe d'essieux est concentrée.

Malgré les défauts évoqués, le modèle à 7 degrés de liberté est utilisé pour représenter le camion 12, car des modèles plus précis ne sont pas encore implantés dans le logiciel "CLEF".

Afin de modéliser avec plus de précision le camion 12, des modèles intégrant des essieux tandem sont développés dans le chapitre 7.

### 5.5.2 Caractéristiques dynamiques

Le modèle de véhicule (Figure 5.8) est utilisé pour calculer les modes et les fréquences propres des deux camions représentatifs. Le comportement non linéaire des suspensions (4.3.2) implique que les fréquences propres varient en fonction de la rigidité des suspensions. Les fréquences de chaque mode de vibration sont alors données par une plage de fréquences.

Lorsque le profil de la chaussée présente une rugosité importante, la variation des forces dans les suspensions est grande et les cycles d'hystérésis de la suspension sont décrits principalement par les courbes de charge et de décharge. Les fréquences de vibrations du véhicule sont alors minimales, car la rigidité des suspensions est faible. Pour cette situation, la rigidité des suspensions de chaque essieu est définie par la rigidité tangente évaluée sur la courbe de charge pour la charge statique de l'essieu du camion chargé.

Lorsque le véhicule roule sur une chaussée dont la planéité est de bonne qualité, l'amplitude de ses mouvements n'est souvent pas assez importante pour que la variation des forces dans les suspensions dépasse la différence de force entre la courbe de charge et de décharge. Les cycles d'hystérésis sont décrits alors uniquement par la courbe de transition exponentielle définie dans la relation de Fancher éq. (4.1). Lors de ces cycles réduits, la suspension est presque bloquée et présente une rigidité plus élevée (Figure 5.9).

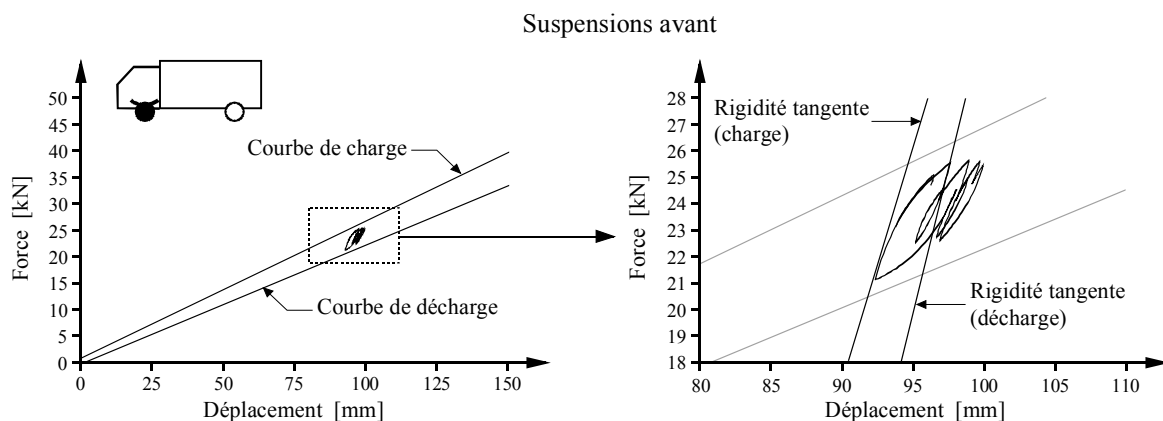


Figure 5.9 Cycles d'hystérésis réduits des suspensions

Suivant la valeur attribuée au paramètre  $\beta$  dans la relation de Fancher éq. (4.1), la rigidité est différente sur les courbes de transition entre une phase de charge et de décharge; en conséquence les fréquences sont déterminées avec la rigidité la plus importante (décharge).

Chacune des deux situations est caractérisée par des rigidités minimales et maximales des suspensions qui définissent la plage des fréquences propres de chaque mode de vibration des deux camions (Tableau 5.2). Les trois modes de vibration du châssis des camions sont présentés (Figure 5.10).

Mode	Fréquence [Hz]	
	Camion 11	Camion 12
Tangage	1.14 - 1.87	0.90 - 1.51
Roulis	1.50 - 2.38	1.45 - 2.49
Bondissement	1.55 - 2.46	1.53 - 2.62
Sautillement roue avant	8.95 - 12.61	8.95 - 12.55
Sautillement roue arrière	10.50 - 14.48	10.47 - 17.40

Tableau 5.2 Plage des fréquences de vibration des camions

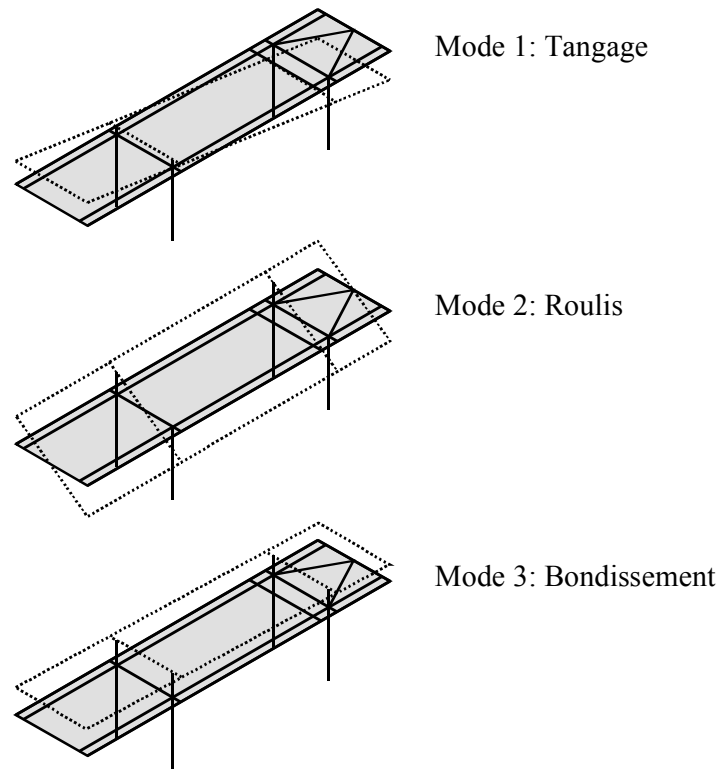


Figure 5.10 Modes de vibration du châssis des camions

### 5.5.3 Grandeurs analysées

Lors des simulations du passage d'un des camions sur les ponts représentatifs, des informations relatives au véhicule sont saisies. Le but est de détecter d'éventuelles différences dans le comportement du camion d'une situation de risque à l'autre et de vérifier le comportement correct du modèle de véhicule. Concrètement, des jauges numériques enregistrent les forces appliquées par chacune des roues du véhicule sur le pont ainsi que les forces et les déplacements relatifs des suspensions.

## 5.6 Étude paramétrique

### 5.6.1 Réponses statiques

Dans le but d'évaluer les facteurs d'amplification dynamique des effets dans les ponts, la connaissance des réponses statiques est indispensable. La première étape de l'étude paramétrique consiste donc à établir les réponses statiques aux différentes jauges numériques réparties sur la structure. Les réponses statiques sont calculées par le logiciel "CLEF" en déplaçant, par pas successifs, le véhicule sur la longueur du pont. Les charges statiques exercées par chacune des roues du camion sont alors appliquées sur la dalle de roulement. Le calcul des effets statiques diffère de celui des effets dynamiques par l'absence des forces d'inertie et d'amortissement.

Afin d'établir l'effet statique maximum<sup>2</sup> provoqué par un véhicule aux différentes jauges numériques, plusieurs passages selon des trajectoires différentes sont simulés sur les ponts-poutre (Figure 5.11) et sur le pont-cadre (Figure 5.12).

<sup>2</sup> La justification du calcul de l'effet statique maximum est développée au chapitre 6 (6.2 Définition des facteurs d'amplification dynamique)



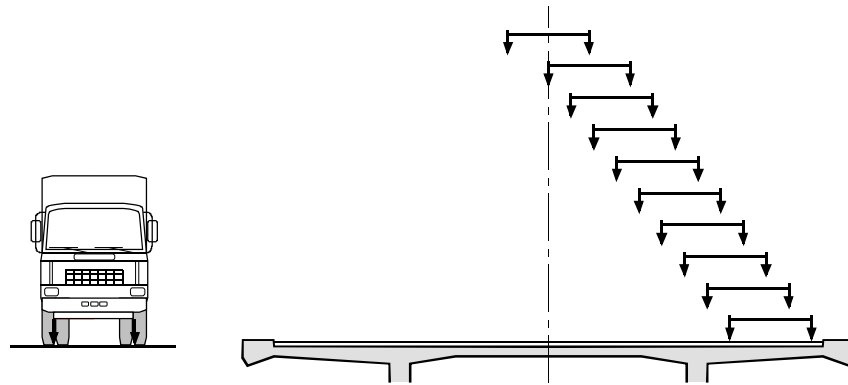


Figure 5.11 Trajectoires pour le calcul des réponses statiques sur les ponts-poutre

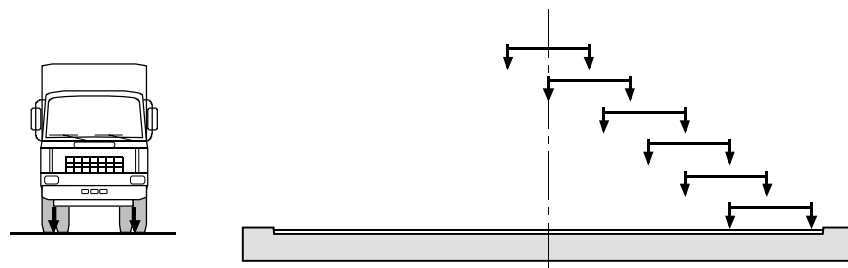


Figure 5.12 Trajectoires pour le calcul des réponses statiques sur le pont-cadre

112 simulations sont nécessaires pour calculer les réponses statiques aux jauges numériques sur les ponts, pour les deux véhicules représentatifs et pour les différentes trajectoires.

### 5.6.2 Réponses dynamiques

La partie principale de l'étude paramétrique concerne le calcul des réponses dynamiques des ponts. Les variables principales sont les suivantes:

- **le pont**

Parmi les six ponts, le pont C1 et le pont D1 constituent les ouvrages de référence qui sont étudiés en détail. Pour les autres structures, seule l'influence de leurs particularités sur les effets dynamiques est analysée.

- **le profil de la chaussée**

Les deux profils de chaussée (profil A et profil B) générés automatiquement dans le logiciel "CLEF" (5.4) sont considérés lors des simulations.

- **le véhicule**

Les camions 11 et 12 (4.3) sont représentés par le modèle de véhicule à 7 degrés de liberté implanté dans le logiciel "CLEF" (5.5.1).

- **la trajectoire du véhicule**

Deux trajectoires des camions sont déterminées pour effectuer les analyses dynamiques sur les six ponts. La position transversale des véhicules est choisie selon des considérations statiques. Pour obtenir le moment de flexion maximum à l'encastrement du porte-à-faux de la dalle de roulement, le véhicule est placé au bord de la chaussée. La position du camion dont une des roues est placée à l'axe du pont, détermine la deuxième trajectoire pour laquelle le moment maximum au milieu de la dalle de roulement est atteint.

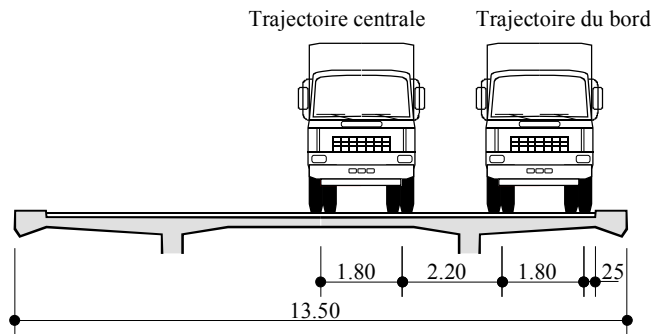


Figure 5.13 Positions transversales des camions sur les ponts

- **la vitesse du véhicule**

Cinq vitesses différentes sont utilisées pour réaliser l'étude paramétrique. Elles s'échelonnent entre 40 et 120 km/h par intervalle de 20 km/h. La limite supérieure correspond à la vitesse maximale autorisée sur les autoroutes suisses. Les vitesses inférieures à 40 km/h ne sont pas testées, car la condition de trafic caractérisée par ces vitesses (trafic congestionné) est différente de celle retenue où un seul camion est simulé.

En fonction des cinq variables de l'étude paramétrique, 120 simulations sont conduites sur les six ponts (Tableau 5.3).

Pont	Profil	Véhicule	Trajectoire	Vitesse [km/h]	Nombre
Pont C1	2	2	milieu / bord	40, 60, 80, 100, 120	40
Pont C1P	2	2	bord	80, 100	8
Pont C2	2	2	bord	80, 100	8
Pont P1	2	2	milieu / bord	80, 100	16
Pont P2	2	2	milieu	80, 100	8
Pont D1	2	2	milieu / bord	40, 60, 80, 100, 120	40

Tableau 5.3 Simulations pour le calcul des réponses dynamiques

L'analyse dynamique est conduite en respectant certaines conditions afin d'assurer la convergence des solutions et la cohérence entre les différentes simulations.

Pour tenir compte correctement du profil de la chaussée lors de l'analyse, le pas de temps doit être relativement court. Étant donné que les irrégularités du profil de la chaussée peuvent être localisées, il est essentiel que le véhicule progresse par pas de courte durée pour ne pas les escamoter. De plus, un petit pas de temps est choisi pour ne pas occasionner des erreurs cumulatives lors des analyses dynamiques.

Pour l'étude paramétrique, il est nécessaire que les véhicules cheminent sur le même profil de chaussée, indépendamment de leur vitesse et de l'espacement de leurs essieux. Ce but est atteint en fixant la distance parcourue sur le pont par le véhicule entre deux pas de temps consécutifs à  $\Delta x = 0.05$  m. L'intervalle de temps  $\Delta t$  qui correspond à cette distance permet d'éviter des erreurs (élongation périodique, affaissement d'amplitude) pour la plage des vitesses étudiées [19]. De plus, les distances entre les essieux des deux camions représentatifs sont des multiples de la valeur de  $\Delta x$ . Pour chaque vitesse du véhicule traversant le pont, le pas de temps est alors adapté pour que les roues des camions passent sur le même profil (Tableau 5.4).

Vitesse		$\Delta t$ pour $\Delta x = 0.05$ m
[km/h]	[m/s]	
40	11.11	4.50e-03
60	16.67	3.00e-03
80	22.22	2.25e-03
100	27.78	1.80e-03
120	33.33	1.50e-03

Tableau 5.4 Durée du pas de temps en fonction de la vitesse du véhicule

Les simulations débutent lorsque l'essieu avant du camion se situe 5.0 m avant l'entrée du pont. De cette façon, en entrant sur l'ouvrage, le véhicule est déjà animé par un mouvement de vibration. Pour franchir complètement les ponts-poutre dont la longueur est de 104 m, le véhicule parcourt une distance totale de 120 m réalisée en 2400 pas de temps.

Pour le pont-cadre dont la longueur (11 m) est inférieure à celle des ponts-poutre, 540 pas de temps couvrant une distance de 27 m permettent d'effectuer le franchissement.

Afin de limiter la taille des fichiers de résultats et pour faciliter le traitement des données issues du programme "CLEF", les valeurs des jauges numériques sont stockées tous les quatre pas de temps. Autrement dit, les réponses fournies à chaque jauge sont définies pour des avancements des véhicules correspondant à  $\Delta x = 0.2$  m. Pour le pont D1, le stockage des résultats est effectué à chaque pas de temps ( $\Delta x = 0.05$  m).

### 5.6.3 Ampleur de l'étude

Les simulations sont réalisées sur un serveur *SiliconGraphics* du type *Challenge* équipé de 4 processeurs (CPU) d'une fréquence de  $\sim 200$  MHz et de 1 gigabyte de mémoire vive (RAM). La durée moyenne pour accomplir une simulation sur le pont C1 dont le nombre de degrés de liberté est le plus important, est d'environ 10.5 heures. L'ensemble des simulations effectuées sur les six ponts a nécessité la somme d'environ 800 heures de calcul (temps CPU).

## 5.7 Précision des résultats des simulations

### 5.7.1 Influence de la taille du maillage

La durée d'une analyse dynamique simulant le passage du camion sur un pont est directement influencée par le nombre de degrés de liberté du système et par conséquent, par le nombre d'éléments finis qui définissent la structure. Afin d'optimiser les simulations, l'influence de la taille du maillage sur la précision des résultats est étudiée.

Deux variantes de modèle du pont C1 sont testées (Figure 5.14). La première correspond au modèle décrit précédemment (5.3.1) et la seconde compte la moitié moins d'éléments. En effet, la longueur des éléments dans la direction longitudinale est doublée. Le nombre d'éléments placés transversalement est maintenu pour représenter correctement les variations d'épaisseur de la dalle.

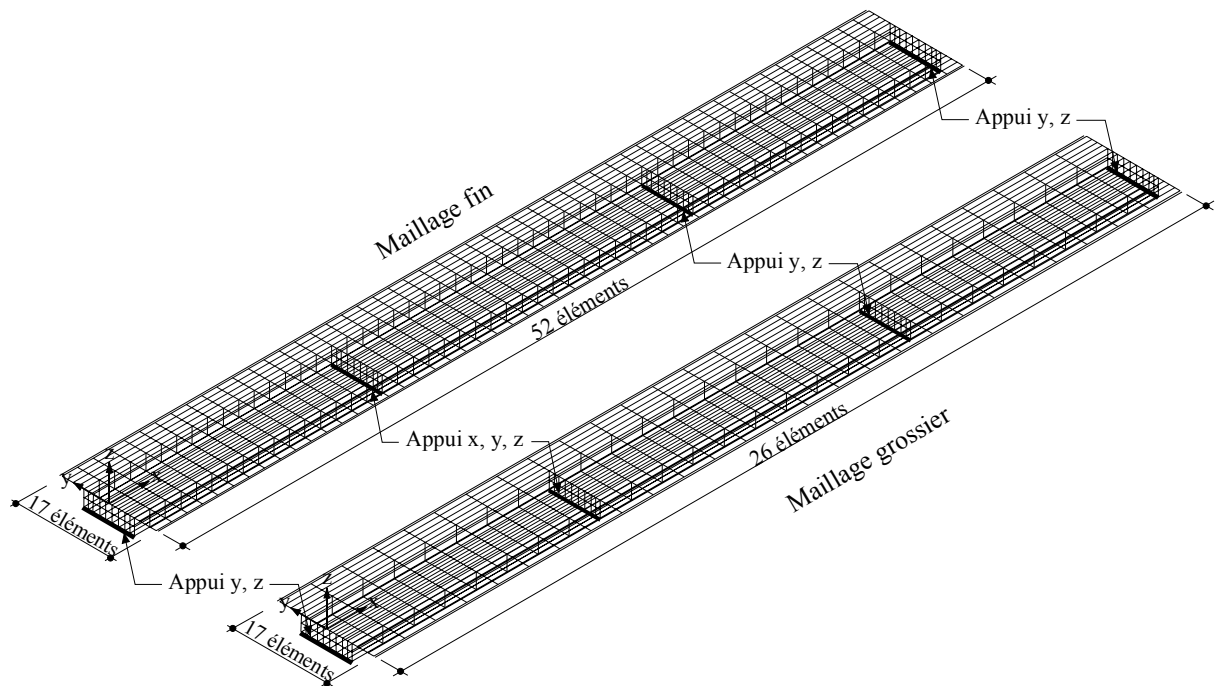


Figure 5.14 Modèles du pont C1 avec des maillages différents

Des simulations effectuées sur les deux modèles avec le camion 11 circulant sur la trajectoire centrale permettent d'évaluer les performances des deux maillages. La comparaison des réponses statiques enregistrées dans la dalle et dans les poutres principales conduit aux constatations suivantes:

- Les déplacements verticaux  $w$  au milieu de la dalle de roulement dépendent de la densité du maillage (Figure 5.15).

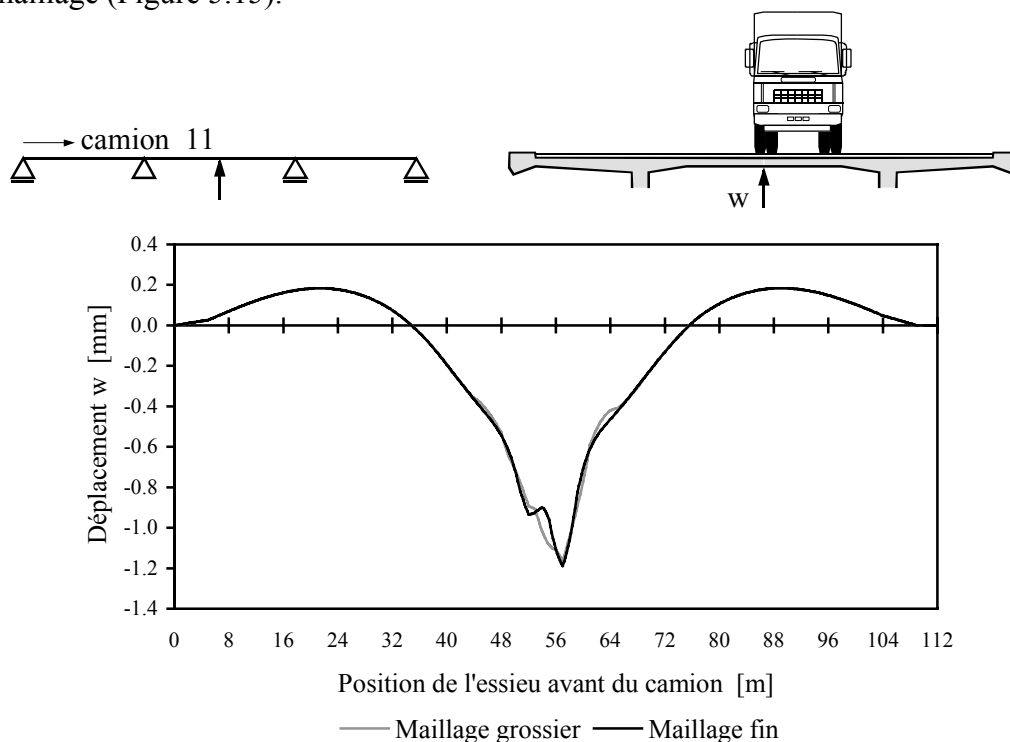


Figure 5.15 Réponse statique du déplacement vertical de la dalle

- Les moments longitudinaux  $m_x$  et transversaux  $m_y$  sont influencés par la taille du maillage (Figure 5.16).

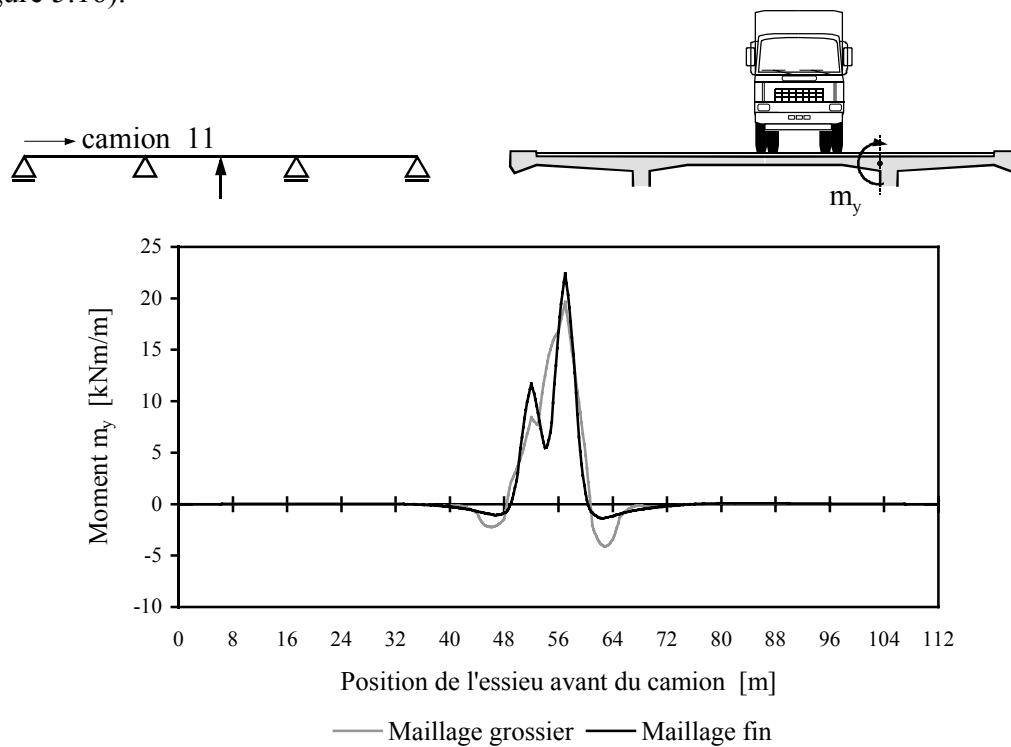


Figure 5.16 Réponse statique du moment transversal dans la dalle

- Les déplacements verticaux sous les âmes du caisson ne sont pas modifiés par la finesse du maillage.

La continuité des contraintes aux interfaces des éléments, la manière dont les charges des roues sont appliquées sur le modèle et la capacité de représenter des variations importantes et localisées des contraintes, sont les facteurs qui sont à l'origine des différences observées.

La méthode des éléments finis permet d'obtenir une solution approchée dont la précision dépend de la finesse du maillage et du type d'élément. Dans le cas général de la flexion des plaques minces, le champ des déplacements d'un élément est approché par une fonction de classe  $C^1$ , c'est-à-dire que le champ des déplacements est continu jusqu'à sa dérivée d'ordre 1. Cette condition (classe  $C^1$ ) relative au degré du polynôme qui représente les déplacements sur l'élément, est nécessaire pour que l'énergie de déformation emmagasinée à l'interface de deux éléments soit nulle. Le champ des contraintes ou des moments qui est proportionnel aux courbures, présente, par conséquent, des discontinuités aux interfaces des éléments qui constituent la structure [60].

Des tests effectués avec le maillage grossier du pont C1 montrent que pour la discrétisation choisie, la discontinuité des contraintes aux interfaces des éléments est faible. La majorité des jauges numériques sont placées le long des bords des éléments. Pour l'évaluation des contraintes ou des moments, les régions à proximité des points de Gauss donnent de meilleurs résultats comparativement aux nœuds d'angle où les fonctions d'interpolation fournissent les moins bonnes approximations.

La manière dont la charge du véhicule transmise par les roues est appliquée sur le modèle d'éléments finis, est une autre cause des différences entre les résultats observés. Dans le

programme "CLEF", les charges transmises par les roues, considérées comme des charges concentrées disposées quelque part sur un élément, sont appliquées sur le modèle par l'intermédiaire de charges nodales équivalentes [79]. Le calcul de ces charges suppose que les termes liés aux degrés de liberté de rotation n'apparaissent pas dans le choix des fonctions d'interpolation qui déterminent la variation du déplacement sur l'élément. Le vecteur des charges nodales équivalentes pour l'élément est constitué uniquement de forces verticales et non de moments. L'erreur résultant de cette approximation dépend de la densité du maillage.

La troisième cause des différences est liée à la taille des éléments et à la géométrie des véhicules. Les charges transmises par les roues du camion sur le pont créent localement une forte variation de contraintes ou de moments dans la dalle. Un maillage dense permet une meilleure approximation des variations locales de contraintes autour du point d'application des charges. Cet effet est visible sur le graphique présenté (Figure 5.16).

### 5.7.2 Tests comparatifs avec des modèles partiels du pont C1

Afin de mieux apprécier la précision des simulations, des tests statiques complémentaires sont effectués sur deux modèles partiels du pont C1. Un tronçon de 20 m de long du tablier du pont C1 appuyé longitudinalement sous chacune des âmes est modélisé en considérant deux maillages différents:

- Le premier maillage (variante A) correspond en tous points à celui décrit (5.3) (Figure 5.17).
- Le second maillage (variante B) est construit en imposant que chaque surface de contact entre les roues du camion et le pont correspond à un élément (Figure 5.18). Des éléments de taille réduite sont disposés longitudinalement de part et d'autre des zones où les charges sont appliquées.

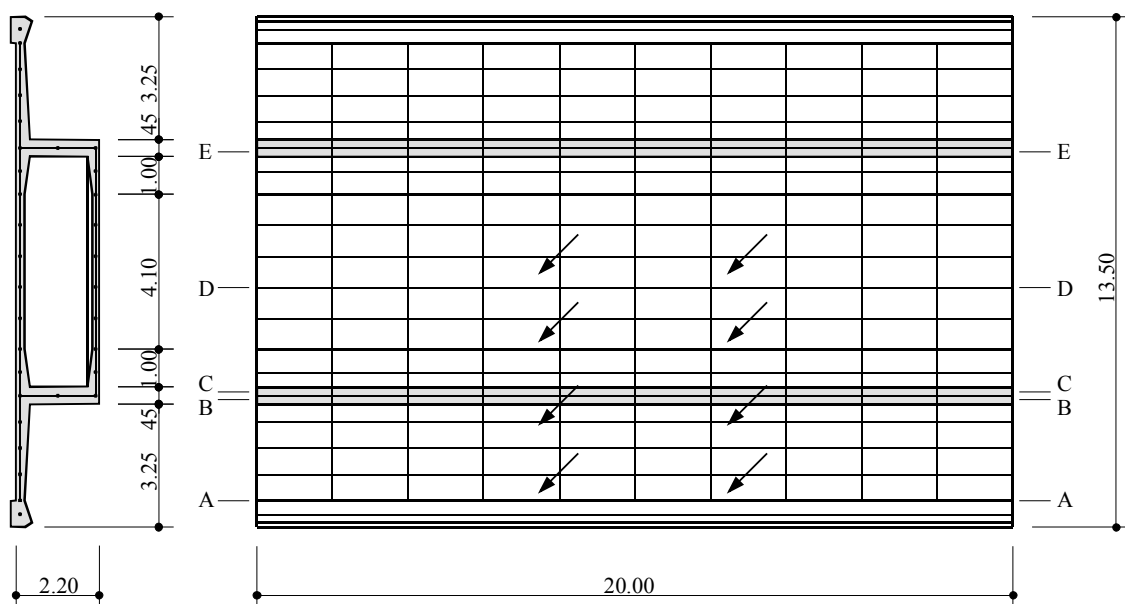


Figure 5.17 Maillage d'un tronçon du pont C1 (variante A)

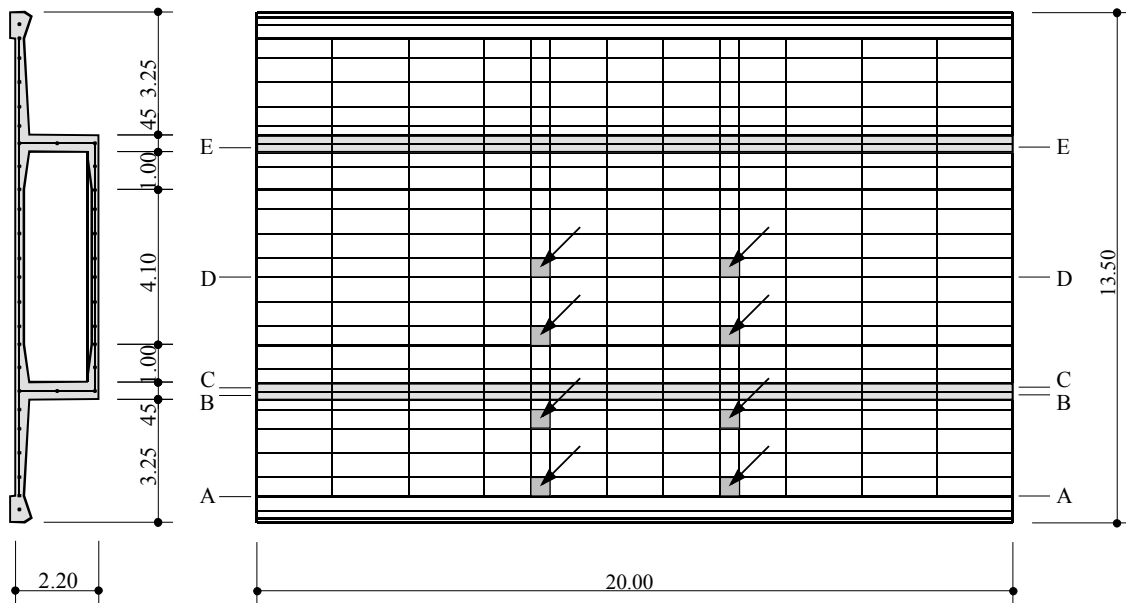


Figure 5.18 Maillage d'un tronçon du pont C1 (variante B)

Les efforts dans les deux modèles (variante A et B) sont calculés pour deux positions du camion 11. Les charges sont posées sur les trajectoires utilisées lors des simulations du passage du véhicule sur le pont.

Les moments transversaux dans la dalle de roulement sont présentés, car ces efforts sont déterminants pour la dalle de roulement et constituent la majorité des grandeurs calculées lors des simulations numériques. Les moments transversaux  $m_y$  présentés dans différentes coupes longitudinales (A - E) sont comparés pour juger de l'influence de la taille des éléments des modèles. Les moments dus à la charge du camion 11 placé au bord du porte-à-faux de la dalle sont présentés (Figure 5.19) ainsi que ceux dus à la même charge placée sur la trajectoire centrale (Figure 5.20).

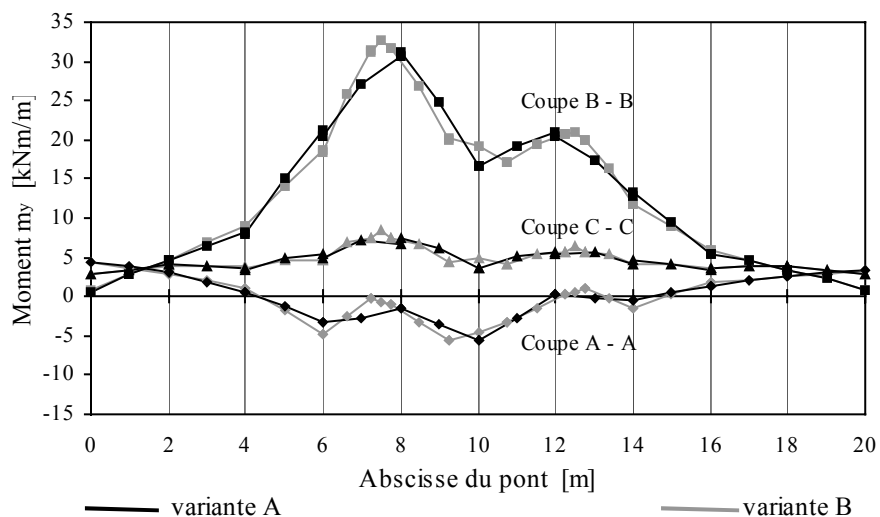


Figure 5.19 Répartition des moments transversaux dus au camion placé au bord

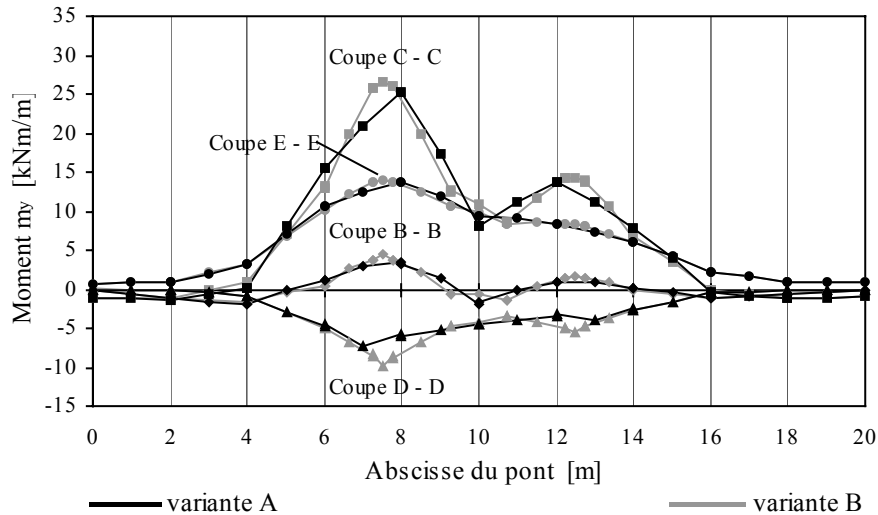


Figure 5.20 Répartition des moments transversaux dus au camion placé au milieu

La comparaison met en évidence le fait que les moments transversaux à proximité des points d'application des charges sont influencés par le maillage. La différence est due principalement au fait qu'un maillage plus dense représente mieux les variations provoquées par des charges appliquées ponctuellement.

Malgré les différences observées, les valeurs maximales sur lesquelles sera concentré l'intérêt dans la suite de cette recherche, sont peu influencées par la taille des éléments des deux maillages.

### 5.7.3 Conclusions

Les problèmes cités sont déterminants pour l'analyse des effets locaux dans la dalle de roulement des ponts et plus généralement pour les éléments structuraux sur lesquels s'appliquent directement les charges. Lors de l'étude du comportement global de l'ouvrage caractérisé par les effets dans les poutres principales, la taille du maillage n'est pas aussi importante, car les forces concentrées correspondant à la charge du camion sont diffusées dans la dalle avant de solliciter les poutres principales.

Sur la base des tests effectués avec ces différents modèles et des temps de calcul nécessaires à chaque simulation ( $\sim 10$  et  $\sim 5$  heures avec respectivement le maillage fin et le maillage grossier du pont C1), le maillage fin paraît le plus approprié pour effectuer l'étude paramétrique.

## 5.8 Remarques finales

Le logiciel d'éléments finis "CLEF" remplit les conditions exposées à la fin du chapitre 2 pour simuler le passage de poids lourds sur des ponts en béton. Le comportement dynamique des dalles de roulement des ponts peut donc être analysé par une approche numérique.

Les modèles des ponts permettent de calculer les efforts et les déplacements dans la structure lorsque celle-ci est sollicitée par un véhicule mobile. Préalablement à l'étude du régime de vibrations forcées imposé par les véhicules, les vibrations libres de chaque structure ont été étudiées.

Les profils de la chaussée, dont la qualité de la planéité caractérise un revêtement autoroutier normal et usé, selon la norme suisse, ont été générés à partir d'une fonction de densité spectrale basée sur un spectre normalisé et sur des considérations pratiques liées à la géométrie du pont.



Un modèle de véhicule à 7 degrés de liberté implanté dans le logiciel "CLEF" a été utilisé pour représenter les deux camions représentatifs, bien que le modèle ne permette pas de modéliser tous les éléments du camion 12. Le modèle de véhicule a été employé pour analyser les vibrations libres de chaque camion.

L'étude paramétrique a été organisée afin de déterminer les réponses statiques et dynamiques des ponts sollicités par le passage des camions. Ces réponses sont nécessaires pour établir les facteurs d'amplification dynamique de la structure. La manière de conduire les analyses dynamiques a été expliquée.

Les temps de calcul importants que requiert ce genre de problèmes ont nécessité des réflexions relatives au maillage des structures. Des tests comparatifs ont montré qu'un maillage relativement dense de la dalle de roulement est nécessaire pour représenter les variations importantes et locales des moments provoqués par l'application de la charge du camion exercée par les roues.

Les informations recueillies aux chapitres 3 et 4 ont été utilisées pour réaliser les modèles des ponts, des profils de la chaussée et des véhicules. Le comportement de ces modèles en vibrations libres a été étudié pour vérifier leur bonne conception. L'étude paramétrique dont les variables ont été exposées, permettra de caractériser le comportement dynamique des dalles de roulement des ponts représentatifs sollicités par des véhicules circulant dans diverses conditions.



## Chapitre 6

# Analyse des réponses dynamiques

### 6.1 Introduction

Les réponses déterminées, lors des analyses statiques et dynamiques réalisées sur les six ponts, sont utilisées pour établir les facteurs d'amplification dynamique des effets dans les dalles de roulement. Les facteurs d'amplification dynamique sont calculés selon une nouvelle définition adoptée dans laquelle la référence statique, constituée par l'enveloppe de l'effet considéré, est indépendante de la trajectoire du véhicule. Cette définition met clairement en évidence les facteurs d'amplification dynamique importants pour l'évaluation de la structure.

Les facteurs d'amplification dynamique des effets dans les dalles de roulement déterminés pour plusieurs situations de risque renseignent sur les paramètres qui influencent les réponses dynamiques. La connaissance des facteurs d'amplification dynamique pour des situations de risque particulières ainsi que de leur sensibilité vis-à-vis des paramètres principaux constitue des informations précieuses pour apprécier les différentes situations et pour appliquer ces facteurs dans le cadre de l'évaluation d'ouvrages. Les facteurs d'amplification dynamique issus des simulations du passage de camions sur les différents ponts représentatifs constituent l'élément qui permet de juger la sensibilité des différents systèmes statiques de dalles de roulement vis-à-vis des sollicitations dynamiques provoquées par le trafic routier.

Le contenu de ce chapitre est décomposé en cinq sections:

- **Définition des facteurs d'amplification dynamique**

La définition adoptée pour calculer les facteurs d'amplification dynamique est exposée et motivée. Un exemple illustre la différence entre la définition adoptée et la définition couramment utilisée.

- **Analyses des réponses dynamiques du pont C1**

Les résultats obtenus sur le pont C1, qui fait office d'ouvrage de référence, sont présentés. Les caractéristiques des réponses des différents effets sont décrites afin de distinguer les effets locaux des effets globaux. Les facteurs d'amplification dynamique sont exprimés en fonction des paramètres choisis de l'étude paramétrique. L'influence de la trajectoire, de la vitesse, du type et de la masse du véhicule de même que l'importance de la rugosité du profil sur les facteurs d'amplification dynamique est ainsi mise en évidence. La distribution des forces exercées par le camion au cours de son passage sur le pont est déterminée et constitue un moyen de comparaison supplémentaire entre les différentes situations de risque traitées.

- **Analyses des réponses dynamiques des autres ponts-poutre**

Les résultats obtenus sur les ponts C1P, C2, P1 et P2 sont comparés avec ceux établis sur l'ouvrage de référence (pont C1) afin de déterminer la sensibilité de chacune des dalles aux sollicitations produites par le trafic routier.

- **Analyses des réponses dynamiques du pont-cadre**

Les résultats du pont-cadre qui se différencie des autres structures par plusieurs aspects, sont présentés indépendamment de ceux des ponts-poutre. Les caractéristiques des réponses dynamiques sont analysées en fonction des effets calculés et du type de chargement. Les facteurs d'amplification dynamique sont exprimés en fonction de la vitesse, de la trajectoire et du type de véhicule ainsi que de la rugosité du profil de la chaussée.

- **Réponses dynamiques dans les dalles de roulement**

La sensibilité des dalles de roulement de sections typiques des ponts représentatifs des ouvrages autoroutiers suisses est discutée et expliquée sur la base des facteurs d'amplification dynamique issus des simulations. L'influence de chaque paramètre est résumée afin de fournir des éléments destinés à apprécier les différentes situations de risque.

## 6.2 Définition des facteurs d'amplification dynamique

Les facteurs d'amplification dynamique constituent un moyen pour représenter les effets dynamiques provoqués dans la structure par l'action du trafic à partir des effets statiques connus. La référence statique utilisée pour représenter les effets dynamiques est définie par l'enveloppe de chaque effet dans le pont. Ces enveloppes sont déterminées ponctuellement aux jauges numériques placées sur le pont en considérant toutes les positions que peut occuper un camion donné sur la chaussée. Une valeur sur une enveloppe est déterminée par la valeur maximale des réponses statiques calculées pour plusieurs trajectoires du véhicule réparties sur la chaussée. Les trajectoires sur les ponts-poutre (Figure 5.11) et sur le pont-cadre (Figure 5.12) définies au chapitre précédent sont utilisées pour établir les enveloppes des effets statiques.

Les facteurs d'amplification dynamique sont alors définis par les relations suivantes:

$$FAD_{ENV}^{(+)} = \frac{R_{DYN\ max}^{(+)}}{R_{ENV\ sta}^{(+)}} \quad FAD_{ENV}^{(-)} = \frac{R_{DYN\ max}^{(-)}}{R_{ENV\ sta}^{(-)}} \quad (6.1)$$

où:  $R_{DYN\ max}$  représente pour une jauge numérique, la valeur maximale de la réponse dynamique pour une trajectoire spécifique du camion.

$R_{ENV\ sta}$  représente pour une jauge numérique, la valeur sur l'enveloppe déterminée par les réponses statiques obtenues pour toutes les trajectoires que peut emprunter le véhicule.

Les réponses du moment transversal  $m_y$  calculé dans la dalle de roulement du pont C1 pour différentes trajectoires du camion sont utilisées pour illustrer cette définition des facteurs d'amplification dynamique (Figure 6.1).

Les réponses sont illustrées sur des graphiques où le temps, présenté sur l'abscisse, est exprimé par la position occupée par l'essieu avant du camion sur le pont. À l'abscisse 0 m, cet essieu entre sur le pont. Cette représentation permet de faire figurer sur le même graphique, la

réponse dynamique (trait noir) et la réponse statique (trait gris) pour laquelle le temps n'a pas de sens.

La valeur sur l'enveloppe du moment transversal à l'endroit considéré est calculée à partir des réponses obtenues des dix trajectoires du camion et correspond à la valeur maximale de la réponse statique obtenue lorsque le camion circule sur la trajectoire ②. La valeur maximale de la réponse dynamique du moment transversal à l'endroit considéré permet de déterminer le facteur d'amplification dynamique pour chacun des trois passages présentés.

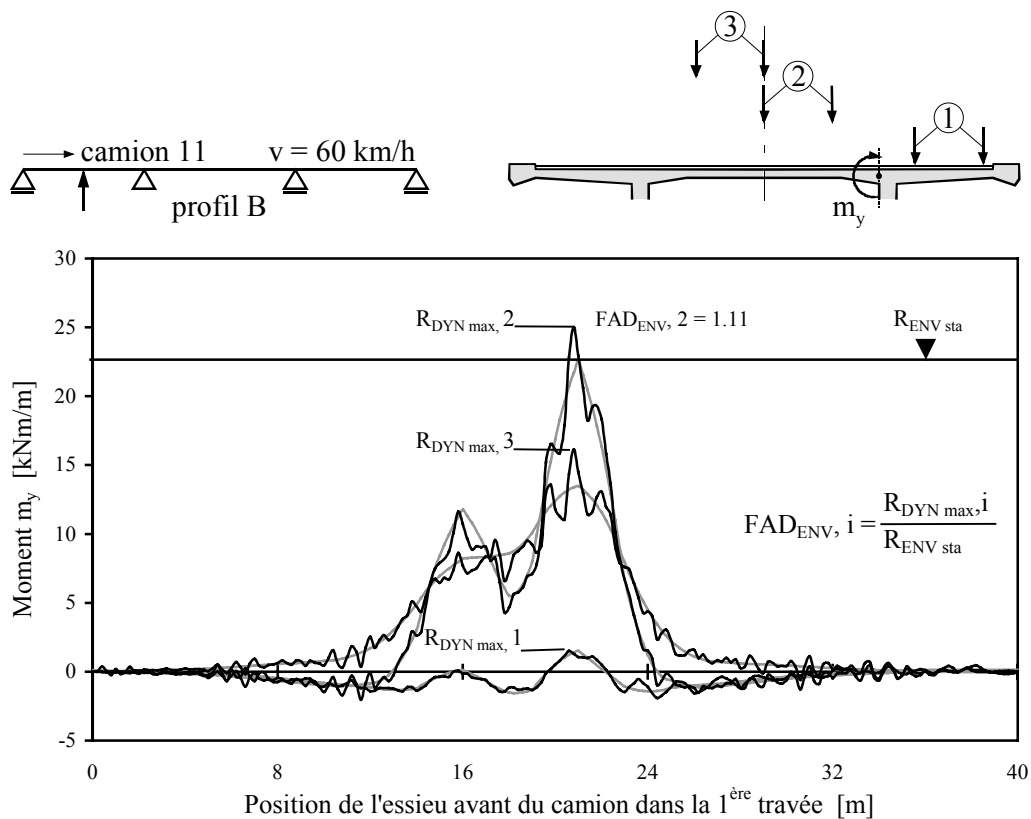


Figure 6.1 Définition adoptée des FAD

Cette définition éq. (6.1) s'applique de manière indépendante dans le domaine des valeurs positives et négatives de l'effet dynamique, car la valeur d'une jauge peut changer de signe en fonction de la position du véhicule durant son parcours. Une valeur signée du facteur d'amplification dynamique se rapporte à la valeur maximale de la réponse de même signe. Selon cette définition, le facteur d'amplification dynamique dont la valeur est comprise entre 0 et 1 signifie que la valeur maximale de la réponse dynamique pour la trajectoire spécifiée est inférieure à la valeur de l'enveloppe statique. Pratiquement, seuls les facteurs d'amplification dynamique supérieurs à 1.0 sont intéressants.

Le choix d'une enveloppe statique pour définir les facteurs d'amplification dynamique évite que la référence statique soit dépendante d'une trajectoire particulière des véhicules. Les enveloppes des effets statiques sont nécessaires pour le dimensionnement ou l'évaluation statique des ponts; par conséquent, elles peuvent être utilisées pour représenter les effets dynamiques.

La définition adoptée du facteur d'amplification dynamique éq. (6.1) est préférée à celle utilisée couramment qui propose un rapport entre les valeurs maximales des réponses dynamiques et statiques d'un effet à un endroit donné pour la même trajectoire du véhicule.

$$FAD^{(+)} = \frac{R_{DYN\ max}^{(+)}}{R_{STA\ max}^{(+)}} \quad FAD^{(-)} = \frac{R_{DYN\ max}^{(-)}}{R_{STA\ max}^{(-)}} \quad (6.2)$$

où:  $R_{DYN\ max}$  représente pour une jauge numérique, la valeur maximale de la réponse dynamique pour une trajectoire spécifique du camion.

$R_{STA\ max}$  représente pour une jauge numérique, la valeur maximale de la réponse statique pour la même trajectoire du camion.

Les réponses du moment transversal  $m_y$  calculées dans la dalle de roulement du pont C1 sont reprises pour présenter cette seconde définition (Figure 6.2). Les valeurs maximales des réponses dynamiques et statiques du moment transversal à l'endroit considéré, correspondant à une même trajectoire du camion, sont utilisées pour calculer les facteurs d'amplification dynamique pour chacun des trois passages présentés.

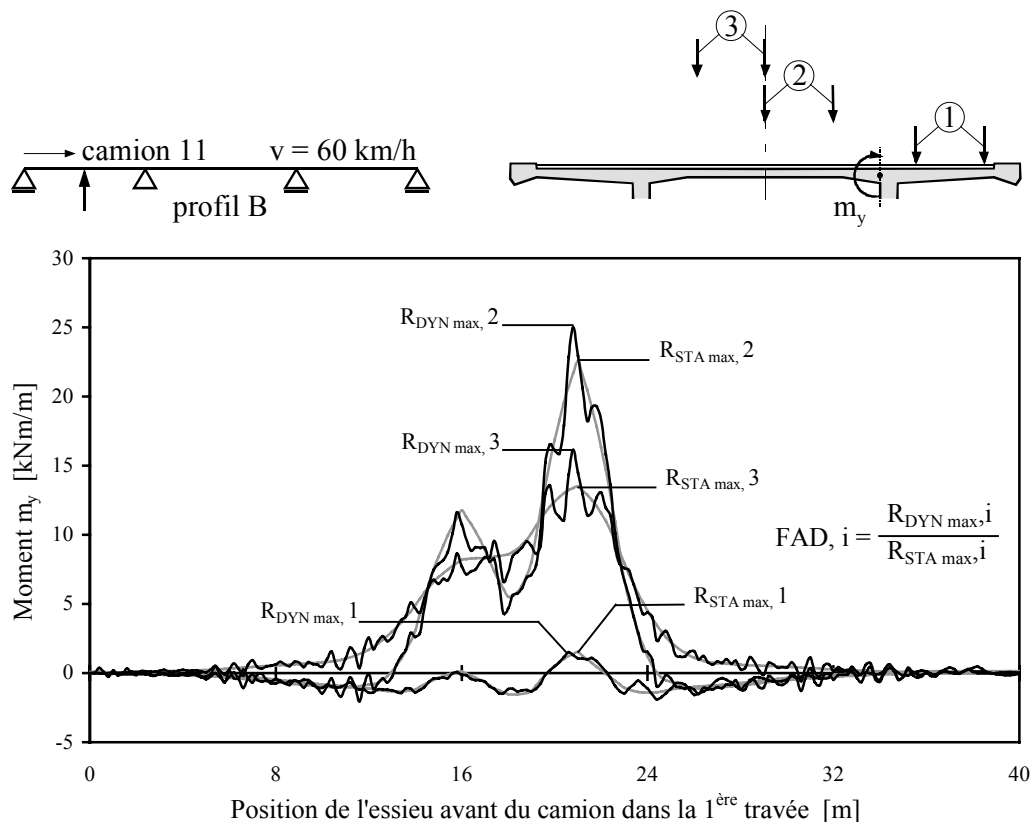


Figure 6.2 Définition couramment utilisée des FAD

Cette définition éq. (6.2) a le désavantage de ne pas différencier un facteur d'amplification dynamique grand qui multiplie un effet statique déterminant pour la structure et un facteur d'amplification dynamique grand qui multiplie un effet statique faible par rapport à sa valeur déterminante. Une telle distinction est pourtant nécessaire, car l'amplification dynamique n'est pas proportionnelle aux effets statiques. L'application de l'équation (6.2) aux effets dans une dalle conduit souvent à des facteurs d'amplification dynamique inférieurs dans les sections déterminantes par rapport aux autres sections. En effet, la valeur faible des effets statiques dans les zones peu sollicitées génère des facteurs d'amplification dynamique grands.

Dans le cas de l'analyse dynamique d'un pont modélisé par une poutre en deux dimensions, la définition couramment utilisée du facteur d'amplification dynamique correspond tout à fait à celle adoptée. La notion d'enveloppe introduite fait apparaître des différences, lorsque ces définitions sont appliquées aux effets dans les dalles de roulement.

### 6.3 Analyse des réponses dynamiques du pont C1

#### 6.3.1 Généralités

Les quarante simulations dynamiques effectuées sur le pont C1 correspondent au nombre de combinaisons maximales obtenues avec les quatre paramètres étudiés; à savoir: le type, la trajectoire et la vitesse du camion ainsi que le profil de la chaussée. De plus, 20 simulations statiques réalisées avec les deux camions représentatifs sur 10 trajectoires différentes fournissent les enveloppes de chaque effet statique dans le pont.

#### 6.3.2 Caractéristiques des réponses du pont

Les déplacements verticaux du caisson ou de la dalle de roulement ainsi que les moments longitudinaux et transversaux de la dalle déterminent 42 jauges numériques sur le pont C1 dont les réponses calculées sont caractéristiques de chaque effet.

- Les réponses des jauges numériques du déplacement vertical du caisson sont influencées pendant le parcours du camion sur toute la longueur du pont (Figure 6.3). Ces réponses traduisent les mouvements globaux du pont.

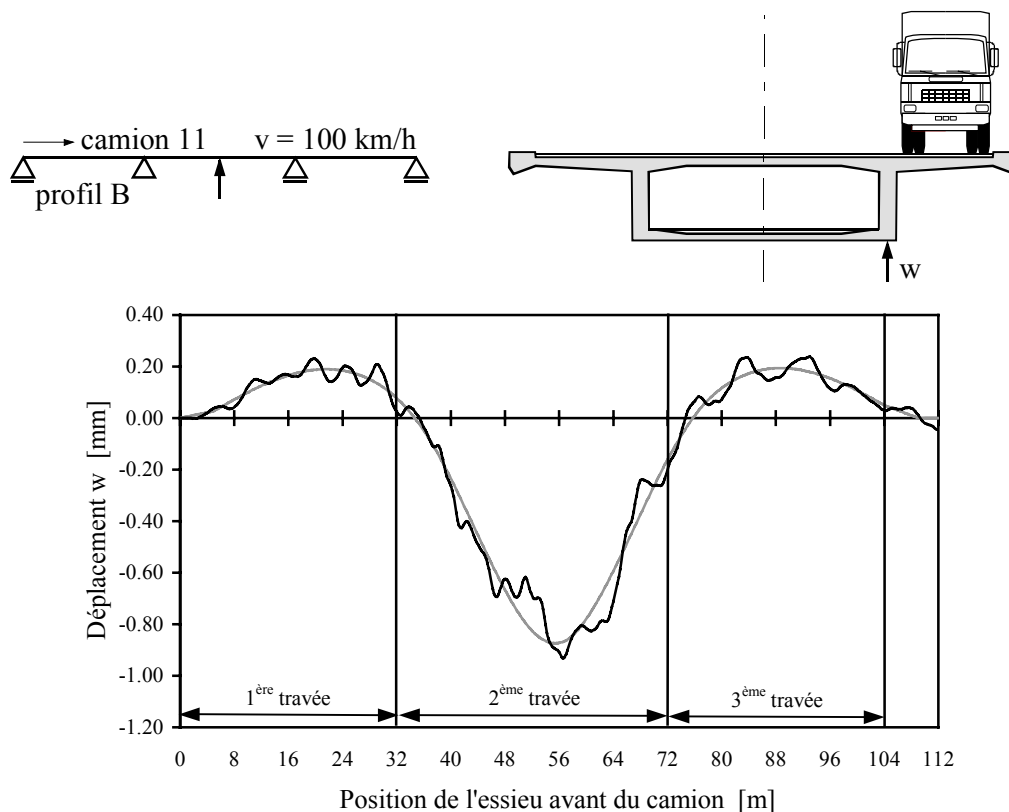


Figure 6.3 Réponse du déplacement vertical du caisson

- Les réponses des jauges numériques du déplacement vertical de la dalle de roulement du pont ont les mêmes caractéristiques que les précédentes auxquelles se superposent les déplacements locaux de la dalle. Ces déplacements locaux sont dus à la flexion de la dalle

provoquée par la charge localisée du camion (Figure 6.4). Les réponses dynamiques des déplacements verticaux de la dalle montrent que les vibrations de fréquence élevée  $> 10$  Hz ont des amplitudes supérieures à celles des réponses des déplacements verticaux du caisson. Les réponses des déplacements verticaux de la dalle représentent la superposition des effets globaux et locaux dans le pont.

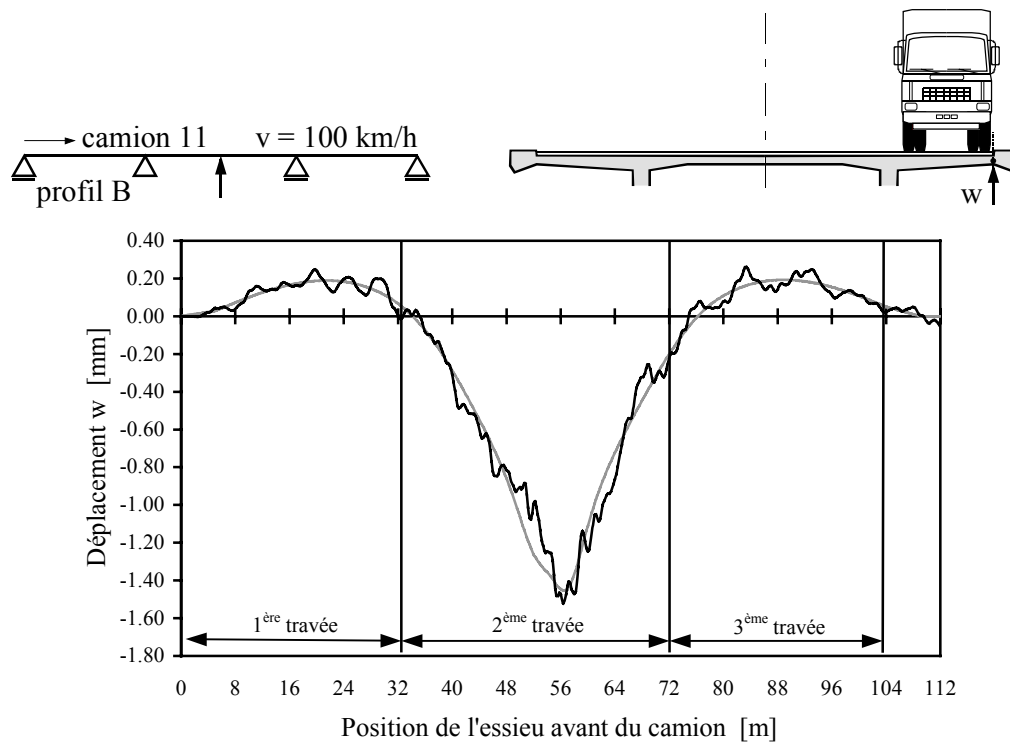


Figure 6.4 Réponse du déplacement vertical de la dalle

- Les réponses des moments longitudinaux (Figure 6.5) et transversaux (Figure 6.6) dans la dalle de roulement sont principalement influencées lorsque le camion se déplace à proximité de la jauge numérique considérée. La longueur de la zone d'influence du véhicule pour le moment à l'endroit considéré dépend de la trajectoire du camion. Lorsque le véhicule circule dans la partie centrale de la dalle de roulement, les appuis de ce panneau de dalle constitués par les âmes et les entretoises limitent les courbures principales à cet élément de structure. Si, par contre, le véhicule se déplace sur les porte-à-faux, la flexion de cet élément provoque des courbures qui s'étendent au centre de la dalle et sur la travée adjacente. La longueur de la zone d'influence du moment longitudinal correspond à celle du moment transversal puisque ces efforts sont liés par le coefficient de Poisson. Les réponses des moments dans la dalle de roulement expriment les effets locaux dans le pont.



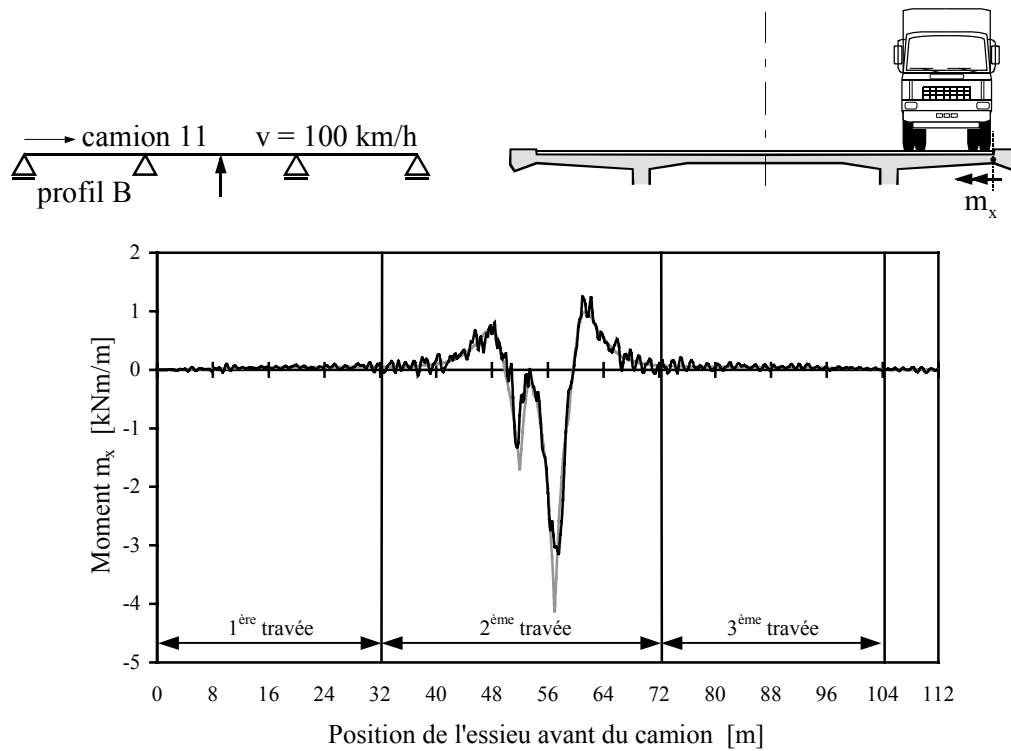


Figure 6.5 Réponse du moment longitudinal dans la dalle

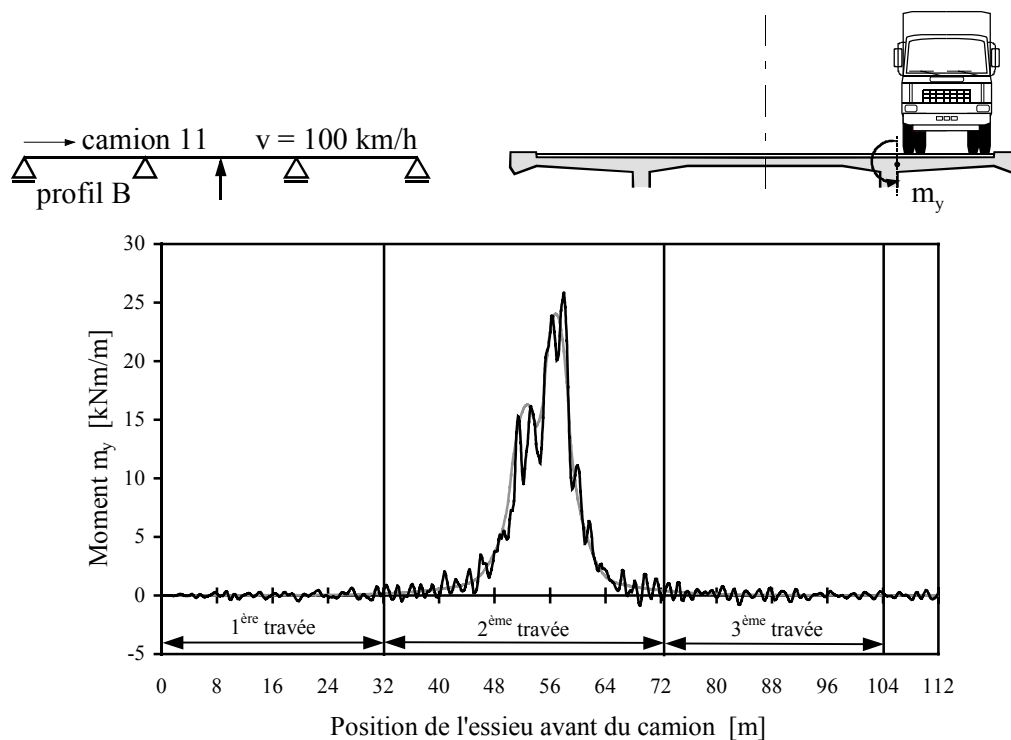


Figure 6.6 Réponse du moment transversal dans la dalle

Les effets dynamiques dus au trafic routier peuvent être qualifiés par la vitesse de déformation. Les réponses des déformations à la surface de la dalle de roulement fournissent par dérivation ces vitesses dans les deux directions  $\dot{\epsilon}_x$  et  $\dot{\epsilon}_y$ .

À titre d'exemple, le passage du camion 11 à la vitesse de 120 km/h suivant la trajectoire centrale provoque au milieu de la dalle de roulement, dans la section située au milieu de la travée principale, des vitesses de déformation maximales de  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Les vitesses maximales sont atteintes lorsque les essieux du camion passent à proximité immédiate de l'endroit considéré.

Le module d'élasticité du béton  $E_c$  augmente avec un accroissement des vitesses de déformation. L'augmentation du module d'élasticité se chiffre à 10% pour  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$  [7]. Dans le cadre de ce travail, le calcul des effets dynamiques dans le pont avec un module d'élasticité statique est donc justifié.

### 6.3.3 Facteurs d'amplification dynamique

Les facteurs d'amplification dynamique  $FAD^1$  des moments transversaux  $m_y$  et des moments longitudinaux  $m_x$  de la dalle de roulement ainsi que des déplacements verticaux  $w$  de la dalle et des poutres principales du pont C1 sont calculés, pour les passages simulés, avec la définition adoptée. Pour chaque type d'efforts ou de déplacements, la valeur maximale et minimale de la réponse dynamique et la valeur correspondante sur l'enveloppe statique - positive et négative - sont représentées par des barres verticales, à l'emplacement de la jauge numérique repéré sur une vue en trois dimensions de la moitié du tablier du pont C1 (Figure 6.7 et Figure 6.8). La hauteur des barres représentant un même effet est à l'échelle afin de donner la répartition des efforts ou des déplacements analysés. Le rapport de la hauteur des barres de l'effet dynamique et statique fournit le facteur d'amplification dynamique. Les facteurs d'amplification dynamique dont la valeur est supérieure à 1.0, sont reportés soit au-dessus, soit au-dessous des barres en fonction du sens de l'effet considéré.

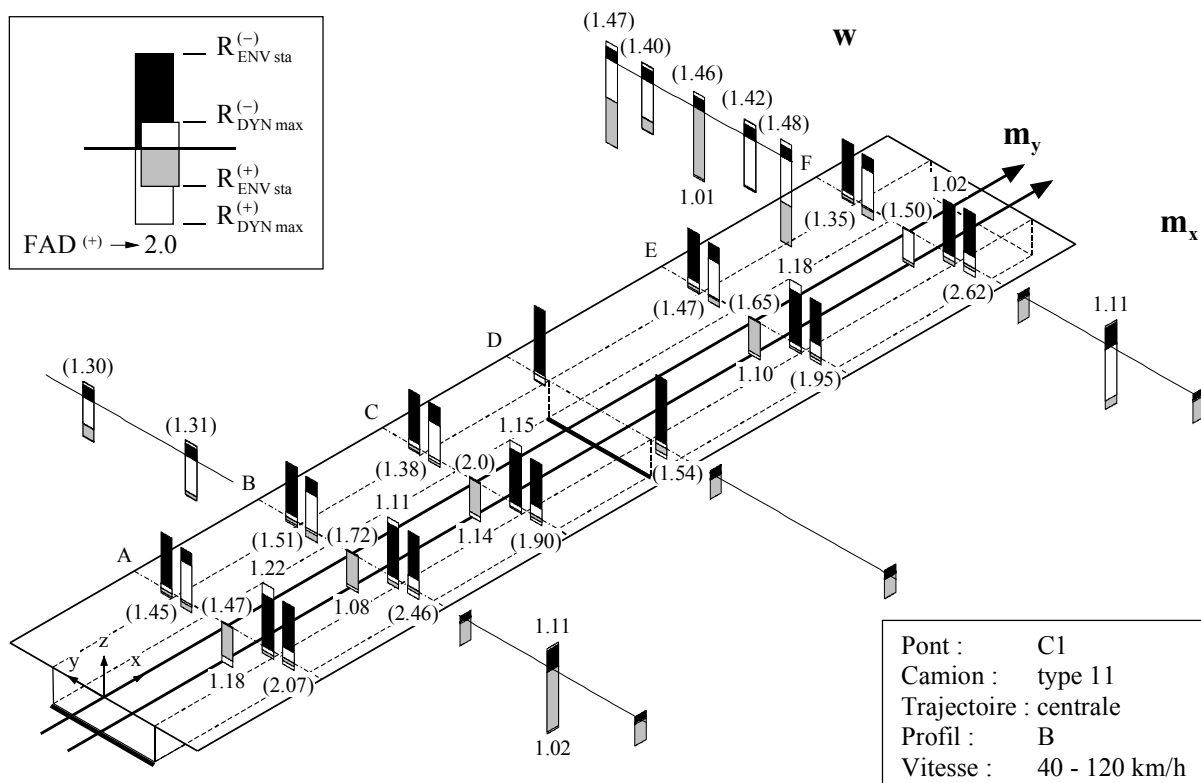


Figure 6.7 FAD obtenus avec le camion 11 roulant sur la trajectoire centrale

<sup>1</sup> Les facteurs d'amplification dynamique  $FAD_{ENV}$  sont dorénavant notés FAD, car seule la définition adoptée éq. (6.1) est utilisée pour quantifier ces valeurs.

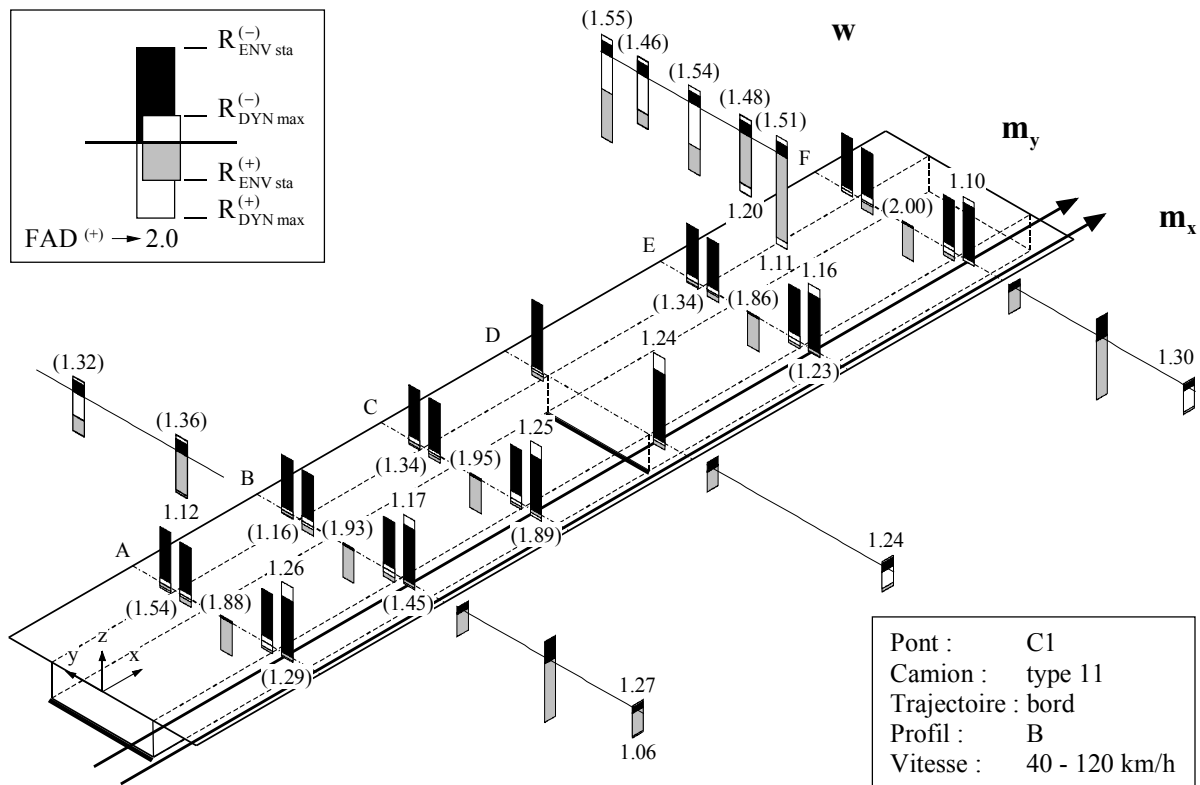


Figure 6.8 FAD obtenus avec le camion 11 roulant sur la trajectoire du bord

Les facteurs d'amplification dynamique sont établis avec la valeur maximale atteinte, à chaque jauge, par les réponses dynamiques calculées en considérant les cinq vitesses de passage du camion. Les résultats présentés correspondent aux simulations effectuées avec le camion 11 circulant sur le profil B suivant la trajectoire centrale (Figure 6.7) et suivant la trajectoire du bord (Figure 6.8).

Chaque facteur d'amplification dynamique est particulier, car les valeurs obtenues diffèrent en fonction du sens de l'effet, du type d'effet et de la localisation dans la structure. Globalement les facteurs d'amplification dynamique s'échelonnent entre 1.01 et 2.62. Ces valeurs sont les facteurs à appliquer pour majorer l'enveloppe statique des déplacements ou des moments afin d'obtenir la valeur maximale de l'effet provoqué par un véhicule routier à un endroit donné dans le pont.

Certains effets dus à l'action variable du trafic soulagent les effets du poids propre, alors que d'autres les accentuent. Cette distinction entre les effets soulageants et les effets déterminants permet de séparer les facteurs d'amplification dynamique. Des parenthèses différencient les facteurs d'amplification dynamique des effets soulageants parmi les autres (Figure 6.7 et Figure 6.8).

Les valeurs maximales des réponses des moments transversaux  $m_y$  dans la section située au milieu de la première travée (Figure 6.7) sont reprises pour illustrer la distinction entre les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants et soulageants (Figure 6.9).

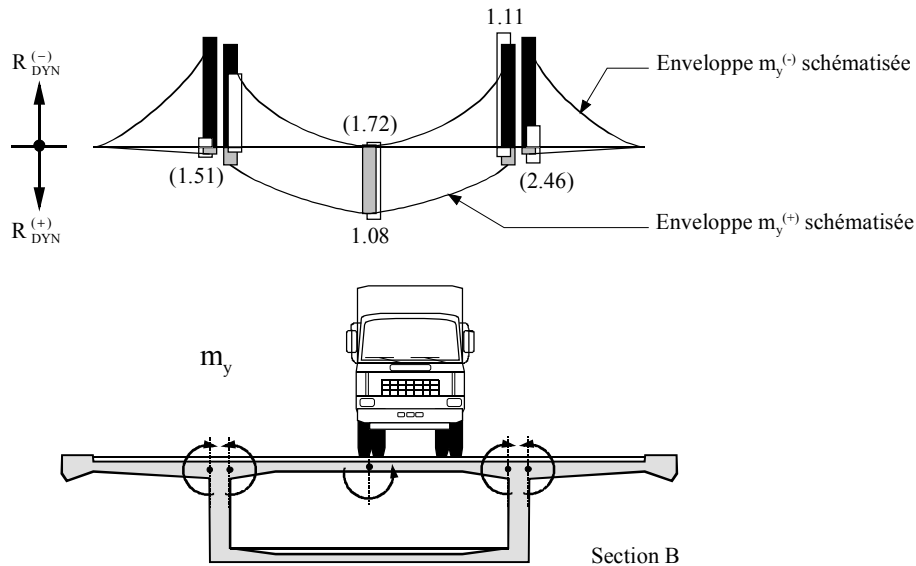


Figure 6.9 FAD des moments transversaux dans une section de la dalle

Les facteurs d'amplification dynamique les plus élevés (2.46, 1.51, 1.72) majorent les moments positifs  $m_y^{(+)}$  de la dalle au droit des âmes et le moment négatif  $m_y^{(-)}$  au milieu de la dalle. Ces moments sont tous soulageants, car ils agissent dans le sens opposé à celui des moments provoqués par le poids propre. Les facteurs d'amplification dynamique de 1.11 et 1.08 sont plus importants, car ils majorent le moment déterminant respectivement sur l'âme  $m_y^{(-)}$  et au milieu de la dalle de roulement  $m_y^{(+)}$ .

En conclusion, la distinction entre les deux types d'effets (déterminants et soulageants) sépare les facteurs d'amplification dynamique en fonction de leur importance pour le dimensionnement où les effets du trafic sont superposés aux effets du poids propre.

#### 6.3.4 FAD - Influence de la vitesse des véhicules

L'influence de la vitesse du camion est montrée dans des diagrammes où les facteurs d'amplification dynamique, à chacune des jauges numériques, sont donnés pour des vitesses différentes du camion. Afin de faciliter la compréhension, les résultats obtenus pour chaque vitesse sont reliés par des droites. Ces lignes n'ont, en réalité, aucun sens physique, car les facteurs d'amplification dynamique ne varient pas linéairement avec la vitesse. Les résultats des simulations où le camion 11 circule sur le profil B suivant la trajectoire centrale, sont présentés seulement pour la section située au milieu de la première travée (section B). Les facteurs d'amplification dynamique des effets positifs et négatifs sont présentés sur des diagrammes séparés où les facteurs des effets déterminants et soulageants sont symbolisés respectivement par des traits noirs et des traits gris (Figure 6.10, Figure 6.11 et Figure 6.12).

En général, les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants varient peu avec la vitesse du véhicule. Certains effets soulageants dont les valeurs sur l'enveloppe statique sont petites, ont des facteurs d'amplification dynamique élevés qui varient beaucoup avec la vitesse. Pour ces effets, la valeur maximale de la réponse dynamique peut être le double de la valeur correspondante sur l'enveloppe statique. Les variations des facteurs d'amplification dynamique des effets aux différentes jauges numériques en fonction de la vitesse ne reflètent pas une tendance particulière. Si les facteurs d'amplification dynamique de certains effets présentent des maximums ou des minimums pour une vitesse particulière, l'apparition de ces valeurs de pointe n'est pas systématique.

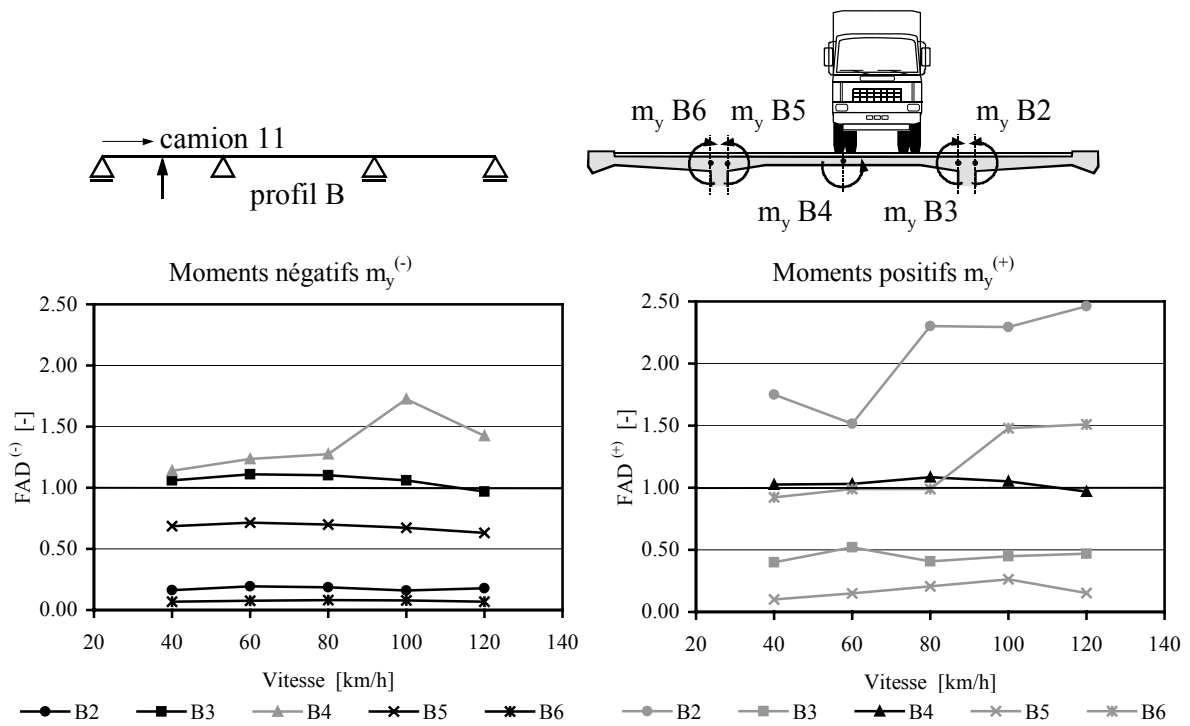


Figure 6.10 Diagrammes des FAD des moments transversaux en fonction de la vitesse

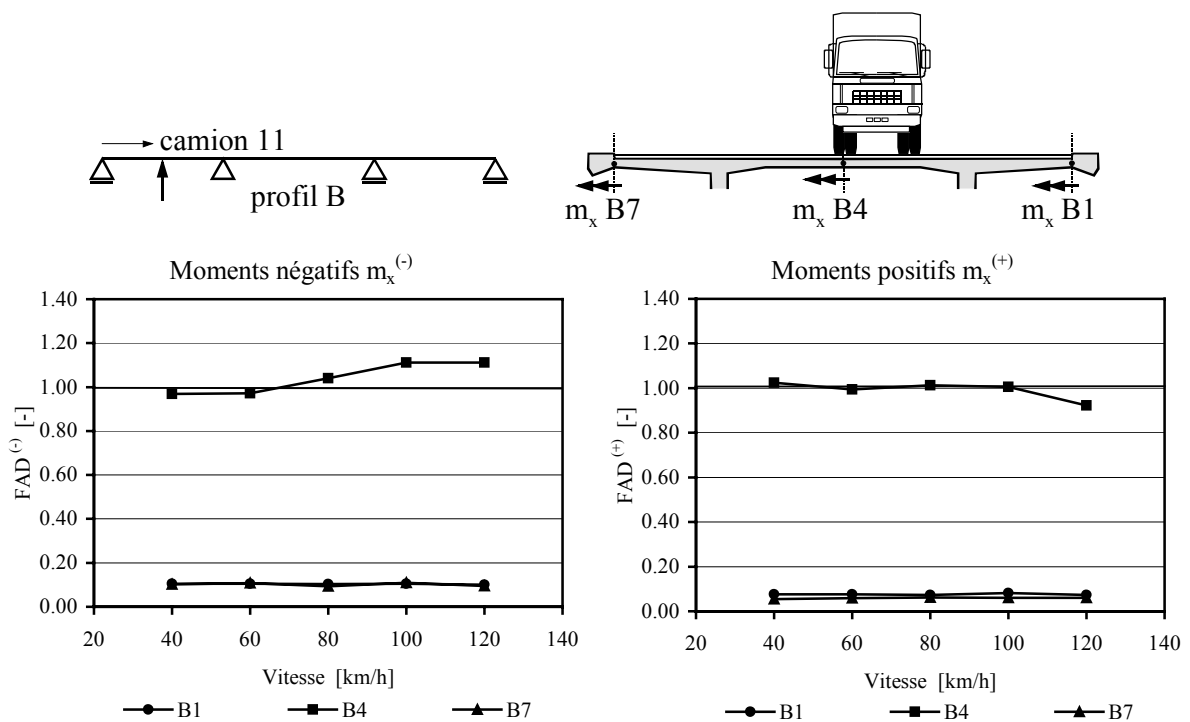


Figure 6.11 Diagrammes des FAD des moments longitudinaux en fonction de la vitesse

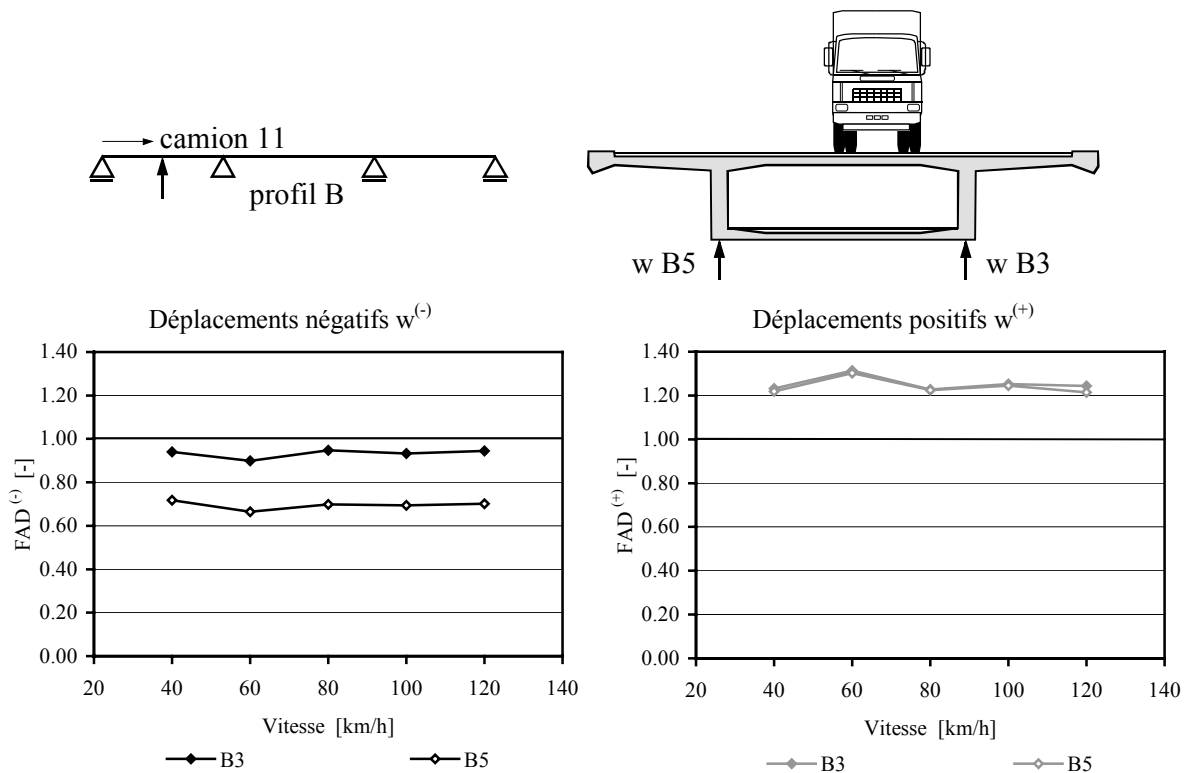


Figure 6.12 Diagrammes des FAD des déplacements verticaux en fonction de la vitesse

Ces diagrammes montrent également que la distinction effectuée entre les effets déterminants et soulageants ainsi que la définition adoptée éq. (6.1) mettent bien en évidence les facteurs d'amplification dynamique importants dans une section.

La valeur maximale de chacune des lignes brisées (Figure 6.10, Figure 6.11 et Figure 6.12) correspond au facteur d'amplification dynamique de chaque jauge numérique de la section transversale B (Figure 6.7).

### 6.3.5 FAD - Influence du profil de la chaussée

Des simulations numériques sont effectuées pour juger l'influence de la rugosité du profil de la chaussée sur les facteurs d'amplification dynamique de la dalle de roulement. Les facteurs d'amplification dynamique de chaque type d'efforts ou de déplacements sont représentés par des barres verticales, à l'emplacement de chaque jauge numérique, sur une vue en trois dimensions de la moitié du tablier du pont C1 (Figure 6.13 et Figure 6.14). La hauteur des barres grises correspond à la valeur des facteurs d'amplification dynamique des réponses calculées avec le profil A. La hauteur des barres noires traduit les résultats obtenus sur le profil B. La différence entre la hauteur des barres, à une jauge numérique donnée, rapportée sur la hauteur de la barre grise équivaut à la variation exprimée en pour-cent des facteurs d'amplification dynamique provoquée par une augmentation de la rugosité du profil. Les variations des facteurs d'amplification dynamique supérieurs à 1.0 sont reportées soit au-dessus, soit au-dessous des barres, à l'endroit considéré, en fonction du sens de l'effort ou du déplacement. Les facteurs d'amplification dynamique illustrés correspondent aux valeurs maximales déterminées à chacune des jauges numériques en considérant les cinq vitesses de passage du camion. Les résultats sont issus des simulations réalisées avec le camion 11 circulant sur la trajectoire centrale (Figure 6.13) et sur la trajectoire du bord (Figure 6.14).

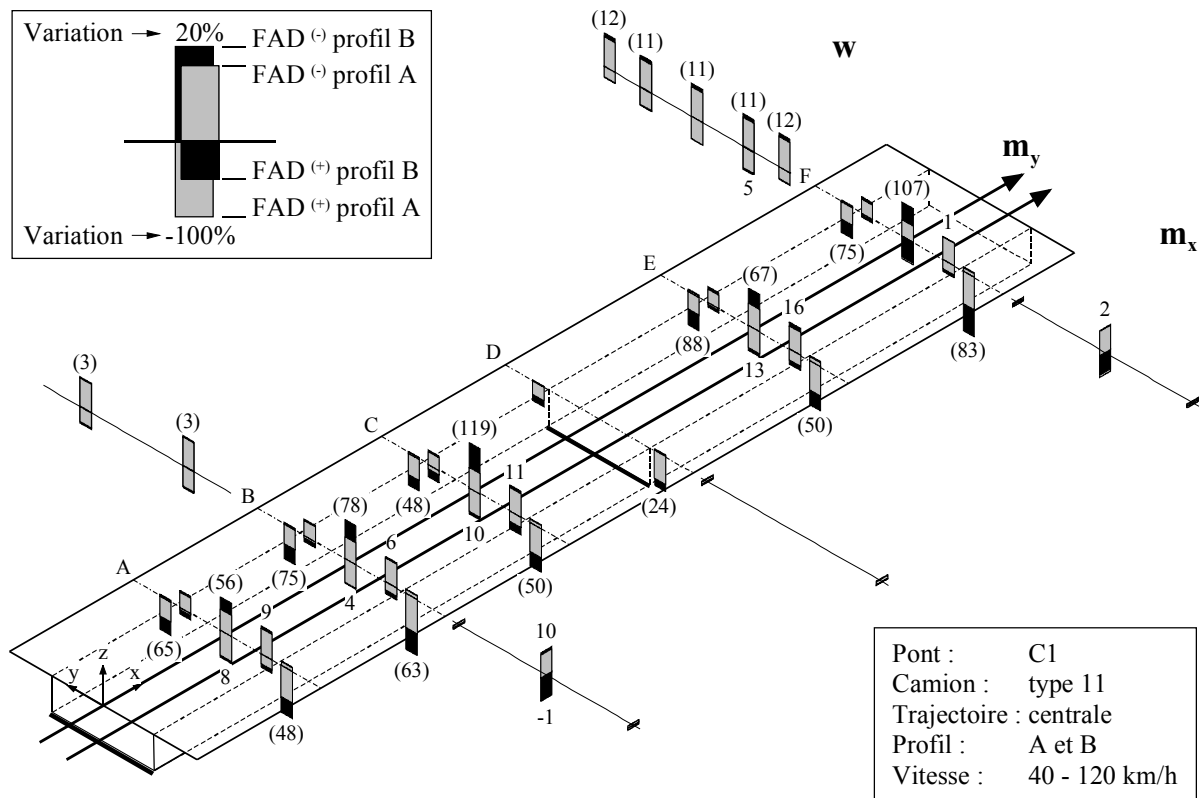


Figure 6.13 Variation des FAD provoquée par une augmentation de la rugosité du profil

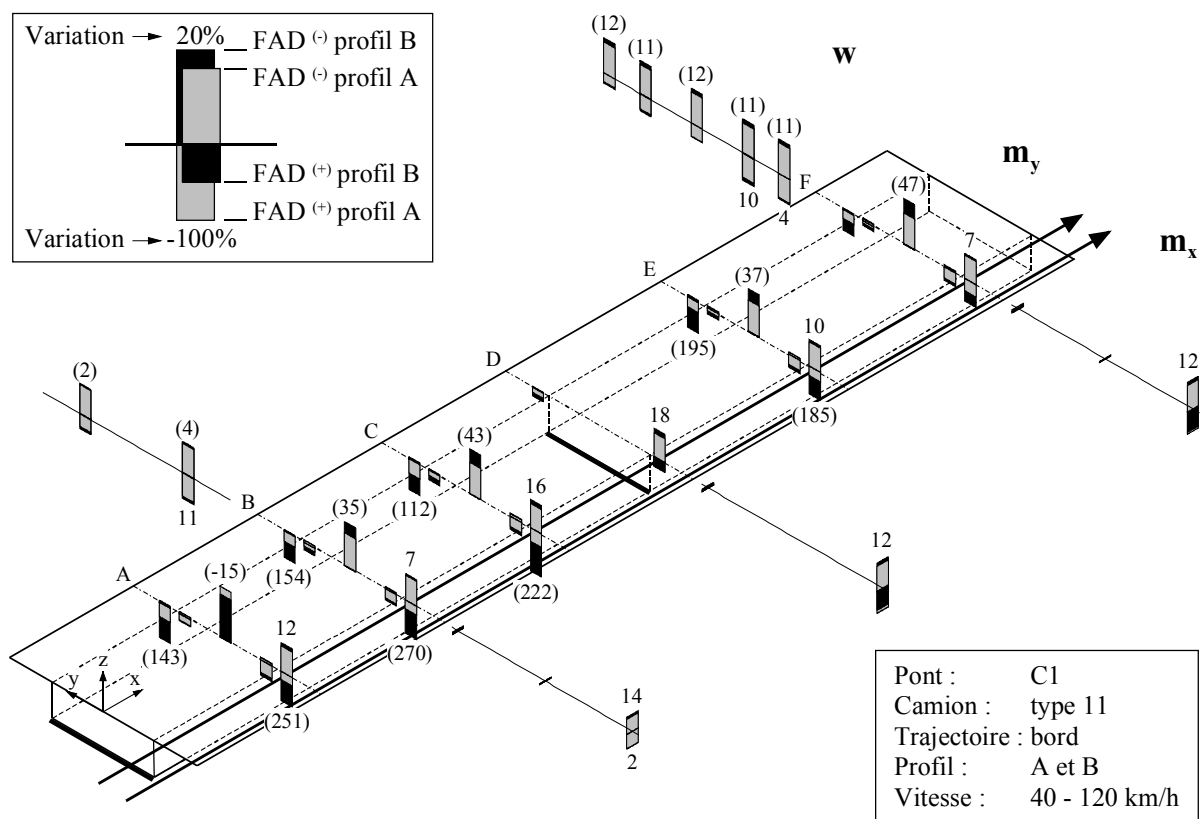


Figure 6.14 Variation des FAD provoquée par une augmentation de la rugosité du profil

À part quelques exceptions, une augmentation de la rugosité du profil de la chaussée entraîne une augmentation des facteurs d'amplification dynamique des effets dans la dalle de roulement. Les variations sont très hétérogènes d'une jauge numérique à l'autre; néanmoins les tendances déjà observées (6.3.3) se confirment. Comme précédemment, la distinction entre les facteurs d'amplification dynamique attribués aux effets soulageants et aux effets déterminants met en évidence les valeurs importantes. Les efforts déterminants dans les sections les plus sollicitées sont influencés modérément (maximum 18%), alors que certains efforts soulageants sont très sensibles à l'accroissement de la rugosité du profil de la chaussée (maximum 270%). Les facteurs d'amplification dynamique des moments transversaux  $m_y$  dans la section située au milieu de la première travée, calculés pour le profil B (Figure 6.9), sont repris et comparés avec les facteurs d'amplification dynamique correspondant au profil A. La variation des facteurs d'amplification dynamique supérieurs à 1.0 peut ainsi être appréciée par rapport aux valeurs sur l'enveloppe des moments transversaux  $m_y$  qui constituent la référence statique (Figure 6.15).

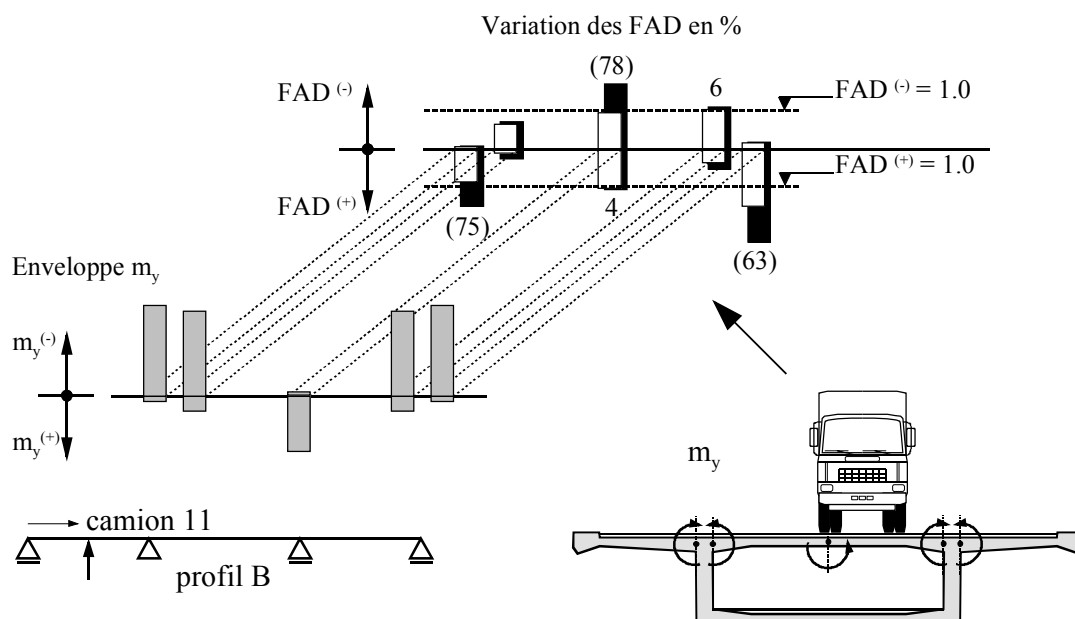


Figure 6.15 Influence de la rugosité du profil de la chaussée

L'influence de la rugosité du profil est évaluée à partir des simulations réalisées avec le camion 12 plutôt que le camion 11. Les tendances déjà décrites se retrouvent également lorsque le camion 12 sollicite le pont. À chacune des jauges numériques, les variations des facteurs d'amplification dynamique dues à l'accroissement de la rugosité du profil de la chaussée, pour les deux camions testés, sont du même ordre de grandeur, en particulier pour les valeurs importantes. Les différences entre les variations des facteurs d'amplification dynamique observées pour chaque camion montrent que la rugosité du profil de la chaussée n'est pas un paramètre indépendant qui affecte la réponse dynamique de l'ouvrage, mais plutôt qu'elle contribue à l'excitation de chaque véhicule sollicitant le pont.

### 6.3.6 FAD - Influence du type de véhicule

L'influence du type de véhicule sur les facteurs d'amplification dynamique des effets dans la dalle de roulement est démontrée par les résultats des simulations menées avec le camion 11 et le camion 12. Une représentation analogue à celle utilisée pour évaluer l'influence du profil de la chaussée sur les facteurs d'amplification dynamique est retenue (Figure 6.13 et Figure 6.14). La hauteur des barres noires représente la valeur des facteurs d'amplification dynamique des réponses calculées avec le camion 11. La même propriété des barres grises



correspond aux résultats obtenus avec le camion 12. Les facteurs d'amplification dynamique représentés par ces deux types de barres propres à chaque camion ne majorent pas la même enveloppe statique, car celle-ci est différente pour chaque camion. À une jauge numérique donnée, la différence entre la hauteur des barres rapportée à la hauteur de la barre noire correspond à la variation, exprimée en pour-cent, des facteurs d'amplification dynamique provoquée par le passage d'un autre véhicule lors des différentes simulations. Les variations des facteurs d'amplification dynamique supérieures à 1.0 apparaissent ainsi que les barres à chaque emplacement des jauges numériques et pour chaque effet étudié.

Les facteurs d'amplification dynamique présentés sont les valeurs maximales déterminées à chacune des jauges numériques en considérant les cinq vitesses de passage du camion. Les résultats proviennent des simulations menées avec les deux camions roulant sur le profil B suivant la trajectoire centrale (Figure 6.16) et la trajectoire du bord (Figure 6.17).

Comme pour les analyses précédentes, la distinction entre les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants et soulageants permet de dégager les valeurs essentielles. Les variations des facteurs d'amplification dynamique des effets soulageants sont, dans ce but, notées entre parenthèses (Figure 6.16 et Figure 6.17) et sont, en général, plus importantes que celles des différents effets déterminants qui sont, indépendamment de leur signe, du même ordre de grandeur (4% pour  $w$  et  $m_y$  et 16% pour  $m_x$ ).

L'influence du type de véhicule sur les facteurs d'amplification dynamique des effets dans la dalle de roulement est déterminée également avec le profil A de la chaussée. Pour cette nouvelle situation, les observations présentées ci-dessus sont également valables.

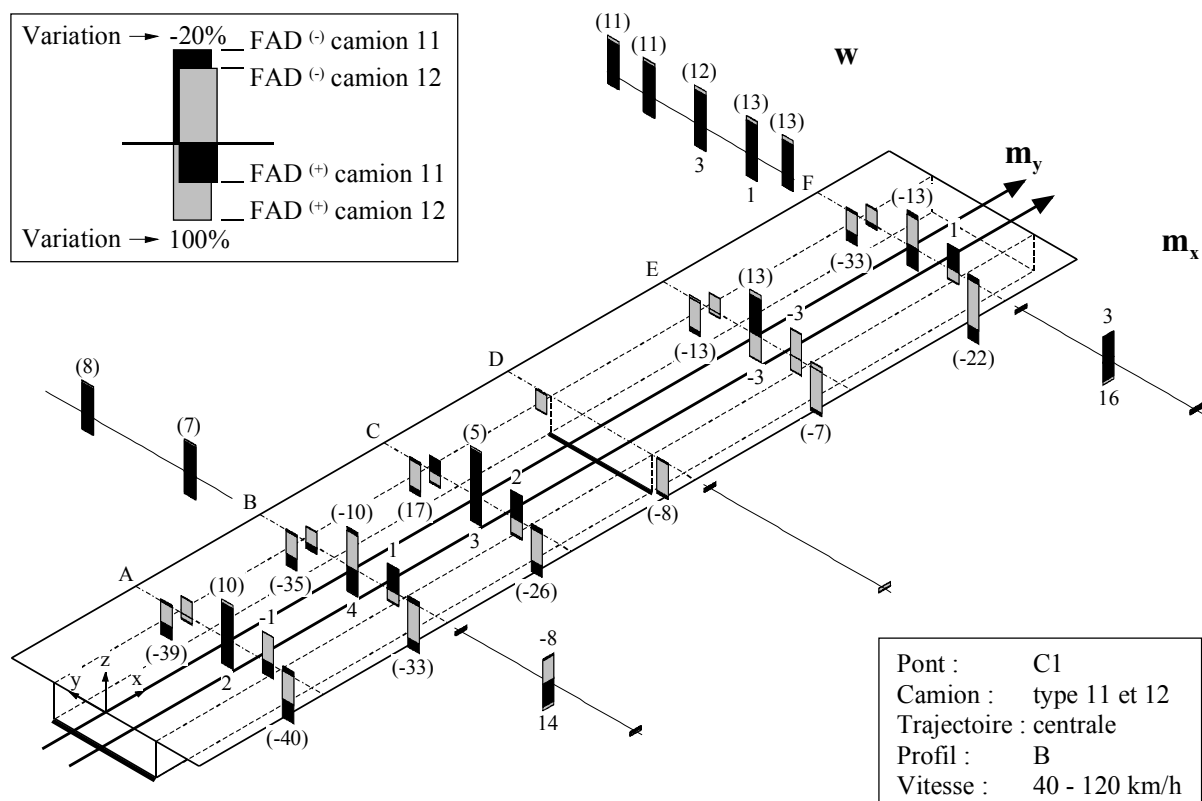


Figure 6.16 Variation des FAD provoquée par le passage d'un autre véhicule

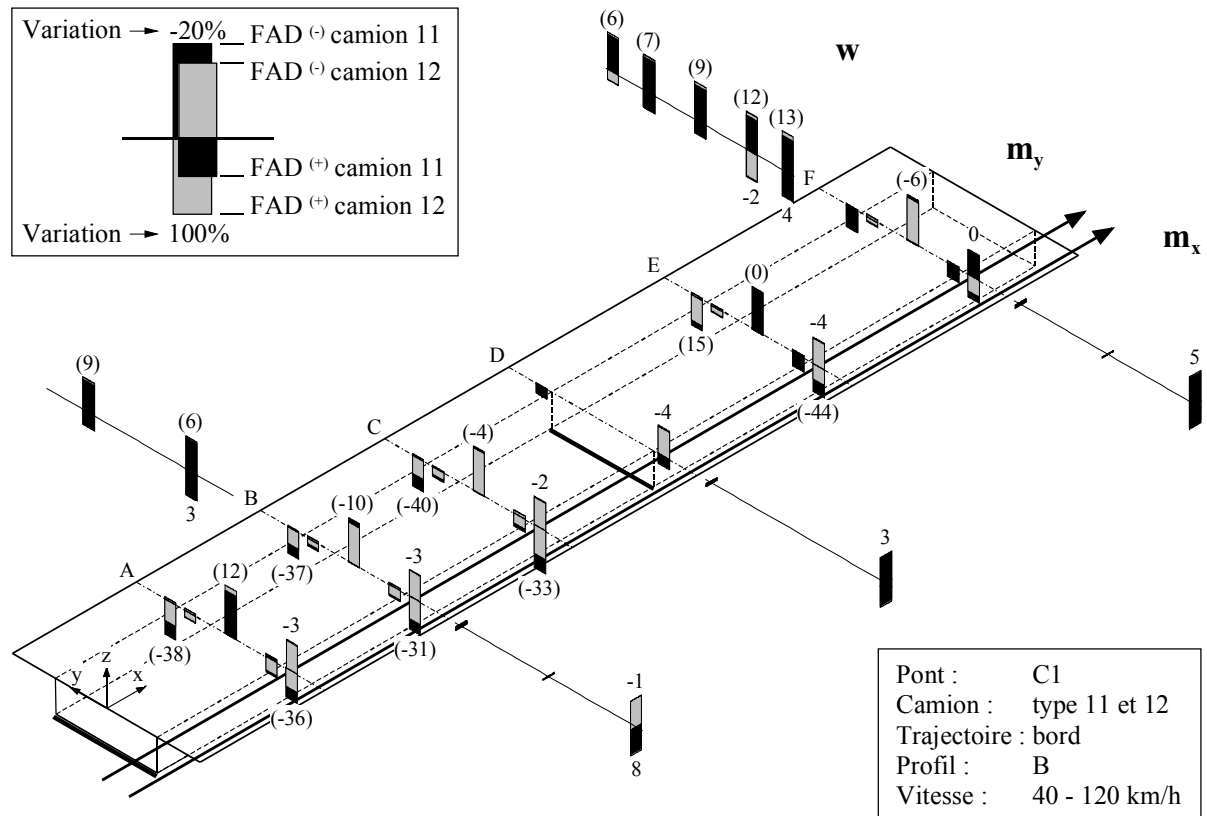


Figure 6.17 Variation des FAD provoquée par le passage d'un autre véhicule

L'influence du type de véhicule reste difficile à juger, car des camions différents impliquent des changements de plusieurs paramètres (géométrie, masse, caractéristiques des suspensions). Étant donné que les facteurs d'amplification dynamique majorent des enveloppes statiques différentes, il ne faut pas perdre de vue les valeurs maximales des effets dynamiques dans la structure.

### 6.3.7 FAD - Influence de la masse d'un véhicule

La masse d'un camion est, sans doute, le paramètre lié au véhicule qui varie le plus. La différence de masse entre le camion vide et chargé peut entraîner des changements de comportement dynamique et, par conséquent, des sollicitations appliquées dans un pont. L'influence de la masse du camion sur les facteurs d'amplification dynamique des effets dans la dalle de roulement est évaluée à l'aide de simulations numériques complémentaires effectuées avec le camion 11 chargé à des niveaux différents. Le camion 11 vide (Figure 4.10) et le camion 11 chargé, au-delà du poids légal, jusqu'à un poids total de 211.9 kN (Figure 6.18) sont employés à ces fins. Deux simulations numériques sont réalisées avec chaque chargement du camion 11 circulant sur le profil B suivant la trajectoire centrale aux vitesses de 80 et 100 km/h.

La détermination des facteurs d'amplification dynamique nécessite le calcul de l'enveloppe statique de chaque effet pour les différents niveaux de charge du camion 11. La répartition différente de la charge totale sur les deux essieux ne permet pas de déduire une nouvelle enveloppe d'une autre déjà connue.

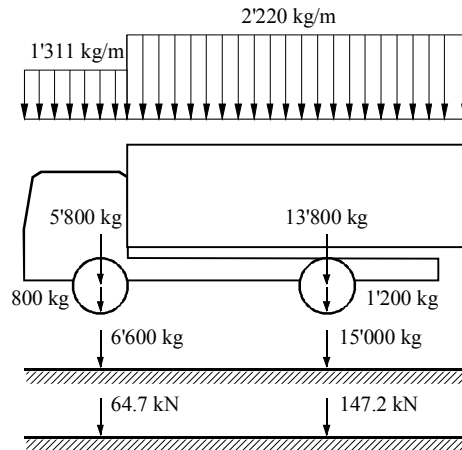


Figure 6.18 Camion 11 surchargé

Les facteurs d'amplification dynamique des effets provoqués par le camion 11 vide (78.4 kN) et par le camion 11 surchargé (211.9 kN) sont comparés indépendamment à ceux dus au camion 11 chargé (157.0 kN). Une représentation similaire à celle employée pour exprimer l'influence du type de véhicule sur les facteurs d'amplification dynamique est choisie (Figure 6.16 et Figure 6.17). Pour les deux comparaisons, la hauteur des barres noires représente les facteurs d'amplification dynamique des réponses calculées avec le camion 11 chargé. La hauteur des barres grises correspond aux résultats fournis par le camion 11 vide (Figure 6.19) et par le camion 11 surchargé (Figure 6.20). La variation des facteurs d'amplification dynamique provoquée par le changement de masse du véhicule est donnée en pour-cent pour les facteurs d'amplification dynamique supérieurs à 1.0. Les facteurs d'amplification dynamique présentés sont les valeurs maximales atteintes à chaque jauge numérique en considérant deux vitesses du véhicule (80 et 100 km/h).

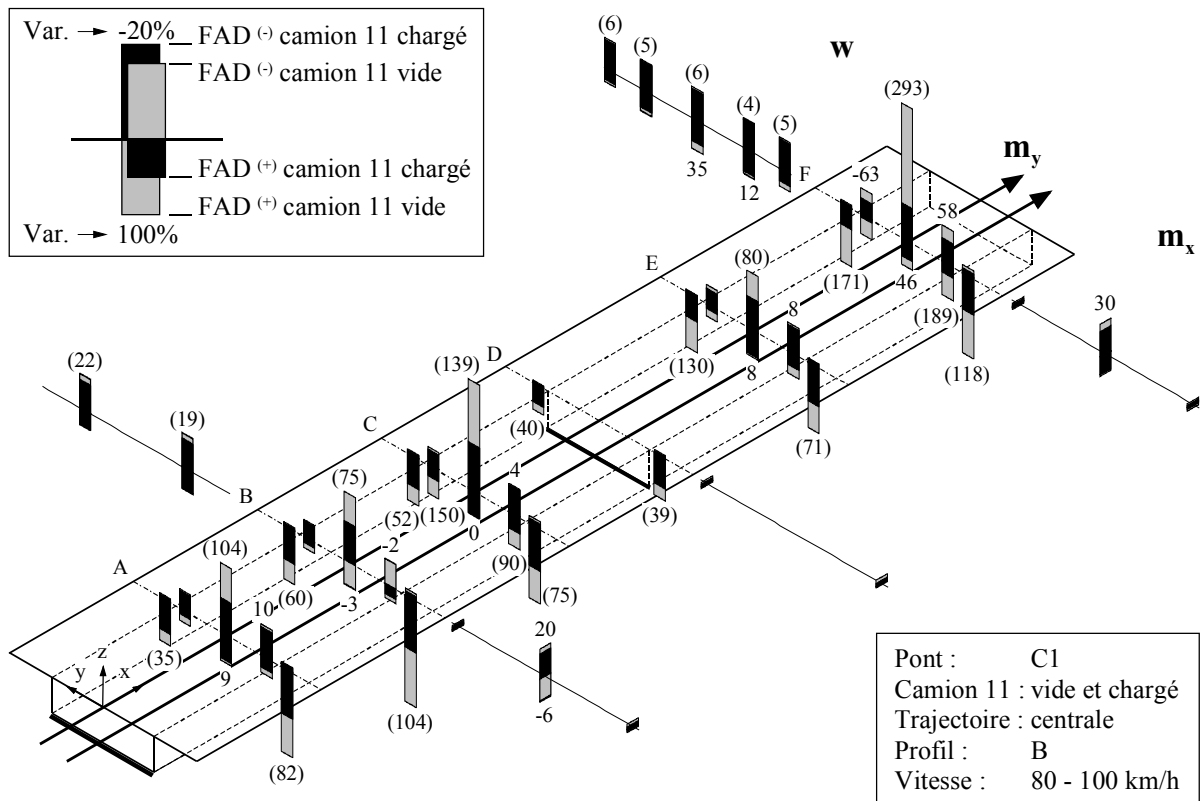


Figure 6.19 Variation des FAD provoquée par une diminution de la masse du camion

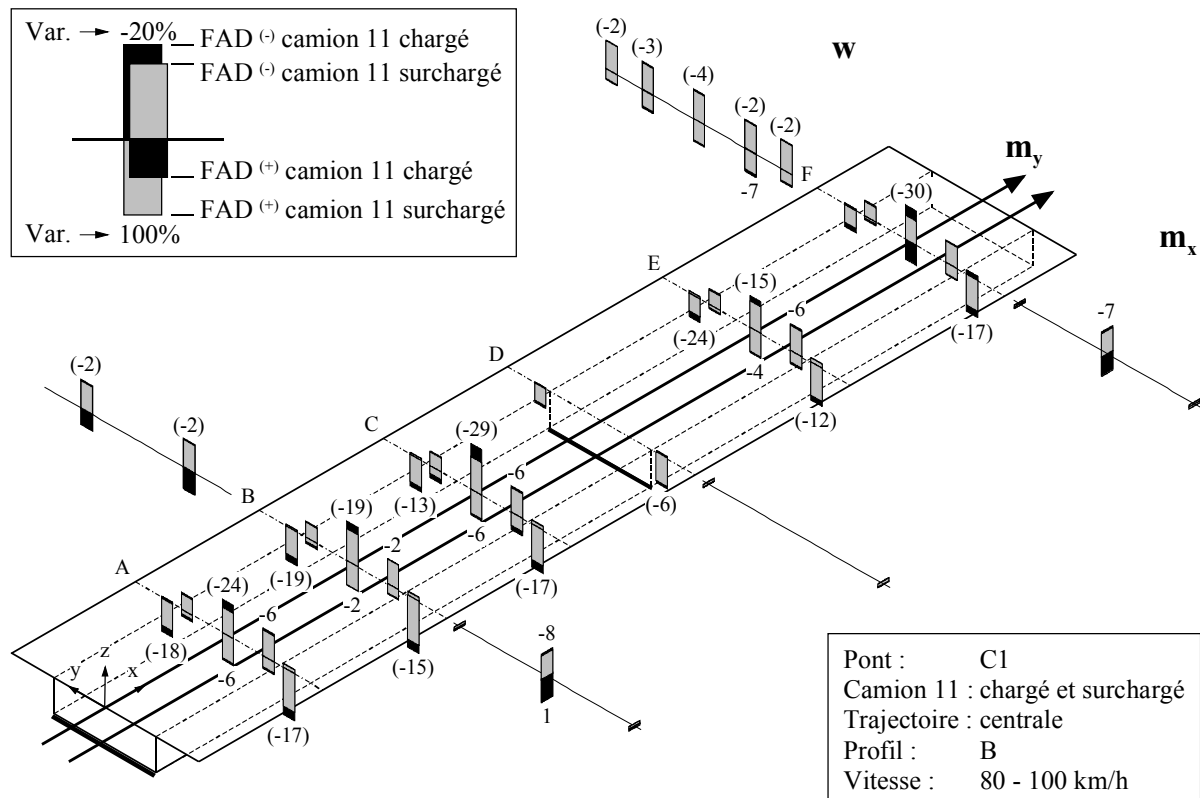


Figure 6.20 Variation des FAD provoquée par une augmentation de la masse du camion

Les résultats prouvent que pour le camion 11, les facteurs d'amplification dynamique diminuent avec un accroissement de la masse du véhicule, car, mises à part quelques valeurs isolées, les facteurs d'amplification dynamique résultant du passage du camion 11 vide sont plus grands que ceux obtenus avec le camion chargé et que la tendance inverse se produit lorsque le camion 11 surchargé traverse le pont. La séparation entre les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants et soulageants montre que ces derniers sont fortement influencés par la masse du camion. Les différents effets déterminants analysés présentent des variations des facteurs d'amplification dynamique du même ordre de grandeur (maximum 10% à l'exception de la section au milieu de la travée centrale où les variations sont plus importantes 60%).

### 6.3.8 Forces appliquées par le camion

Afin de compléter l'analyse des réponses des effets dans la dalle de roulement du pont C1, les forces appliquées par le camion durant son trajet sur le pont sont analysées. Des parallèles entre l'action imposée par le camion et les réponses de la dalle de roulement peuvent ainsi être tirés, même si l'importance et le sens des forces d'inertie et d'amortissement sont difficiles à juger.

La réponse de la force exercée par chacune des roues du camion sur le pont est calculée lors des simulations numériques. La réponse de la force transmise sur la dalle du pont par une roue avant (Figure 6.21) et une roue arrière (Figure 6.22) du camion 11 roulant à la vitesse de 100 km/h sur le profil B suivant la trajectoire centrale est présentée dans une forme similaire aux réponses des moments de flexion et des déplacements. La force exercée par la roue varie en fonction du temps autour d'une valeur moyenne qui correspond à la force statique. L'analyse de la distribution de ces forces de roues permet une meilleure comparaison entre les différents passages effectués avec le camion.

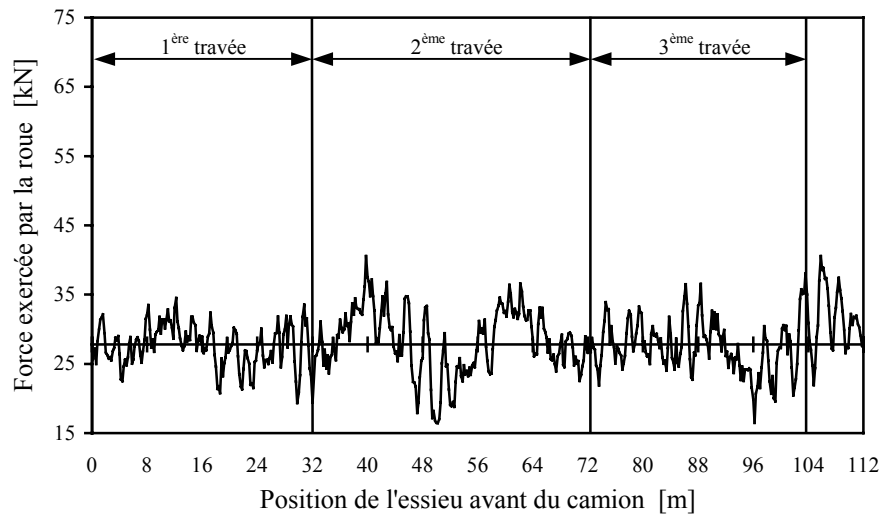


Figure 6.21 Réponse de la force exercée par une roue avant du camion 11

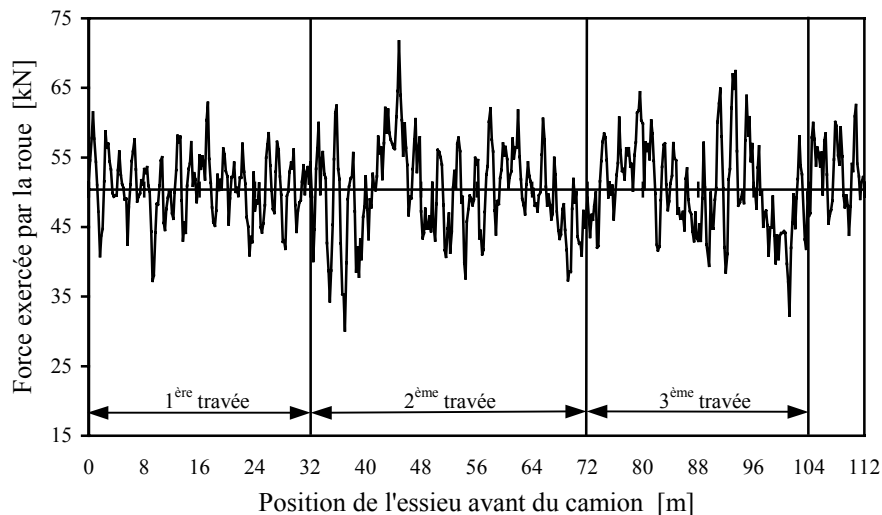


Figure 6.22 Réponse de la force exercée par une roue arrière du camion 11

La fréquence avec laquelle une force de roue, appartenant à une classe donnée, apparaît durant le parcours du camion sur le pont est exprimée dans un histogramme. Les forces exercées par la roue avant et arrière du camion 11 (Figure 6.21 et Figure 6.22) sont présentées dans des histogrammes (Figure 6.23 et Figure 6.24). Les roues du camion exercent sur le pont des forces distribuées approximativement selon une loi normale. La moyenne et l'écart type de la force appliquée par chacune des roues déterminent donc une distribution normale ajustée sur chaque histogramme.

L'écart type fournit un élément de comparaison entre les différentes simulations réalisées sur ce pont. Afin de s'affranchir des difficultés liées à la grandeur de la charge statique appliquée par les différentes roues du véhicule, l'écart type est rapporté à la force dynamique moyenne de la roue et définit ainsi le coefficient de charge dynamique ("Dynamic Load Coefficient, DLC") [84].

$$\text{Coefficient de charge dynamique (DLC)} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (6.3)$$

où  $\mu$  est la force dynamique moyenne exercée par la roue  
 $\sigma$  est l'écart type des forces exercées par la roue sur le pont

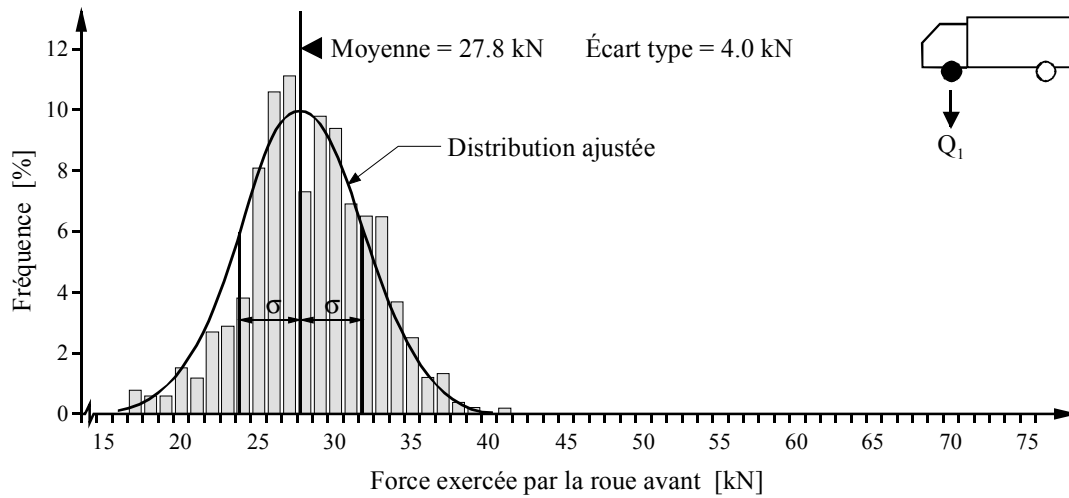


Figure 6.23 Histogramme de la force exercée par une roue avant du camion 11

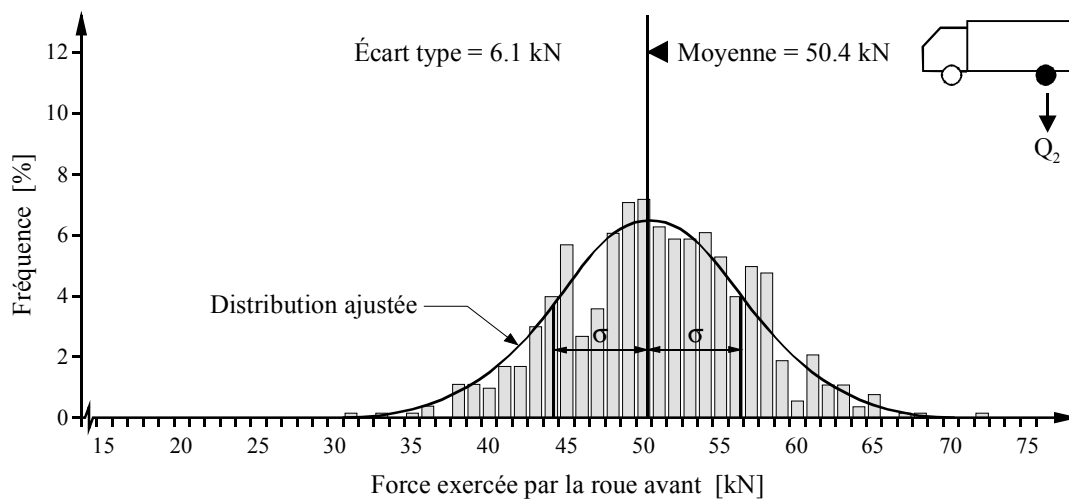


Figure 6.24 Histogramme de la force exercée par une roue arrière du camion 11

L'écart type et le coefficient de charge dynamique (DLC) pour les vitesses extrêmes considérées (40 et 120 km/h) sont donnés pour une roue avant et arrière de chaque camion circulant sur les deux profils de chaussée suivant la trajectoire centrale (Tableau 6.1).

Trajectoire centrale		Profil A		Profil B	
		$\sigma$ [kN] (40 - 120 km/h)	DLC [%] (40 - 120 km/h)	$\sigma$ [kN] (40 - 120 km/h)	DLC [%] (40 - 120 km/h)
Camion 11	Roue avant	1.1 - 1.8	4.1 - 6.5	2.6 - 4.6	9.3 - 16.4
	Roue arrière	2.3 - 2.8	4.5 - 5.5	4.4 - 6.9	8.7 - 13.7
Camion 12	Roue avant	1.3 - 2.0	3.4 - 5.0	2.9 - 4.6	7.4 - 11.8
	Roue arrière	4.4 - 5.4	4.5 - 5.5	7.7 - 12.7	7.8 - 12.9

Tableau 6.1 Écart type et DLC pour les vitesses extrêmes considérées (40 et 120 km/h)

L'analyse de ces valeurs conduit aux constatations suivantes:

- Le coefficient de charge dynamique (DLC) augmente avec la vitesse du véhicule. Les valeurs aux vitesses intermédiaires indiquent que cet accroissement n'est pas linéaire; néanmoins une tendance peut être dégagée. Les différences entre les coefficients de charge dynamique des vitesses extrêmes restent modérées (maximum 7% pour la roue avant du camion 11 roulant sur le profil B).
- Les coefficients de charge dynamique des roues du camion 11 sont plus élevés que ceux du camion 12. Ce résultat prouve que le camion 11 (16 tonnes) est le plus agressif des deux camions représentatifs utilisés.
- La différence entre les coefficients de charge dynamique obtenus sur les deux profils de chaussée permet d'expliquer l'augmentation des facteurs d'amplification dynamique due à la variation de ce paramètre (Figure 6.13 et Figure 6.14).
- Les résultats relatifs à la trajectoire du bord sont jugés équivalents à ceux de la trajectoire centrale livrés ci-dessus (Tableau 6.1). Aucune différence significative des écarts types ou des coefficients de charge dynamique n'est apparue entre ces deux situations.

### 6.3.9 Remarques

L'analyse des résultats des simulations numériques sur le pont C1 mène aux conclusions suivantes:

- Les facteurs d'amplification dynamique sont particuliers à un effet (déplacements, moments), à un endroit et à une situation de risque.
- La définition adoptée des facteurs d'amplification dynamique ainsi que la distinction entre les facteurs d'amplification dynamique liés aux effets déterminants et soulageants mettent en évidence les valeurs importantes pour l'évaluation de la dalle de roulement.
- Les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants établis pour une même situation de risque ont des valeurs homogènes dans les différentes sections. Bien que les facteurs d'amplification dynamique de chaque effet soient différents au même endroit, les valeurs restent dans le même ordre de grandeur.
- Bien que la vitesse du véhicule influence les facteurs d'amplification dynamique, aucune tendance ne se dégage.
- La différence de rugosité entre les profils A et B entraîne un accroissement des facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants allant jusqu'à 20%.
- L'influence du type de véhicule sur les facteurs d'amplification dynamique entraîne des variations de l'ordre de  $\pm 5\%$  pour les facteurs des déplacements et des moments transversaux.
- L'augmentation de la masse du camion 11 provoque une diminution des facteurs d'amplification dynamique. Les variations des facteurs d'amplification dynamique sont hétérogènes même pour les effets déterminants.
- Les coefficients de charge dynamique (DLC) déterminés pour les forces des roues des deux camions montrent que le camion 11 est le plus agressif des deux véhicules.

## 6.4 Analyse des réponses dynamiques des autres ponts-poutre

### 6.4.1 Pont C1P

À la différence du pont C1, la dalle de roulement de cet ouvrage est limitée par des parapets massifs en béton armé solidaires de la structure porteuse. La modification de la rigidité de la dalle de roulement apportée par ces éléments de bordure rend l'étude du comportement dynamique des porte-à-faux particulièrement intéressante. Lors des simulations numériques,

seule la trajectoire du bord est utilisée par les camions dont les vitesses de passage sont de 80 et 100 km/h.

Par comparaison avec les résultats obtenus sur le pont C1, les enveloppes statiques des efforts et des déplacements provoqués par le camion 11, dans le tablier du pont C1P, ont les caractéristiques suivantes:

- Les moments transversaux dans la dalle à l'encastrement du porte-à-faux  $m_y^{(-)}$  sont plus petits ( $m_y^{(-)} = 17.3$  kNm/m dans le pont C1P et  $m_y^{(-)} = 24.1$  kNm/m dans le pont C1).
- Les moments longitudinaux dans la dalle le long des parapets  $m_x^{(+)}$  sont inférieurs ( $m_x^{(+)} = 2.3$  kNm/m dans le pont C1P et  $m_x^{(+)} = 4.1$  kNm/m dans le pont C1).
- Les flèches verticales  $w$  sous les âmes au milieu des travées sont également plus faibles (dans la travée principale,  $w_{\max} = 0.8$  mm dans le pont C1P et  $w_{\max} = 0.9$  mm dans le pont C1).
- Les flèches verticales  $w$  à l'extrémité des porte-à-faux sont plus petites (dans la travée principale,  $w = 1.2$  mm dans le pont C1P et  $w = 1.5$  mm dans le pont C1).

En résumé, les parapets liés à la structure porteuse améliorent la répartition des moments locaux provoqués dans la dalle par des charges ponctuelles et rigidifient longitudinalement le tablier du pont.

Les facteurs d'amplification dynamique des effets calculés dans la dalle de roulement du pont C1P se distinguent de ceux du pont C1 par les aspects suivants:

- Les facteurs d'amplification dynamique des moments transversaux déterminants, à l'encastrement du porte-à-faux de la dalle de roulement, sont les valeurs qui présentent le plus d'intérêts pour les situations de risque analysées où le camion se déplace sur la trajectoire du bord (Figure 6.8). Ces facteurs d'amplification dynamique déterminés avec chacun des camions représentatifs circulant sur le profil de chaussée B sont donnés pour les six sections étudiées (Tableau 6.2). La comparaison des résultats des deux ponts montre que ces facteurs d'amplification dynamique sont légèrement plus petits dans le pont C1P.

FAD $m_y^{(-)}$	Camion 11 profil B		Camion 12 profil B	
	Pont C1	Pont C1P	Pont C1	Pont C1P
Section A	1.26	1.21	1.21	1.20
Section B	1.10	1.09	1.10	1.09
Section C	1.25	1.20	1.22	1.18
Section D	1.24	1.25	1.15	1.13
Section E	1.12	1.08	1.07	1.08
Section F	1.10	1.06	1.10	1.09

Tableau 6.2 FAD des moments  $m_y^{(-)}$  à l'encastrement du porte-à-faux (Pont C1P)

- Les facteurs d'amplification dynamique des flèches  $w^{(-)}$  à l'extrémité du porte-à-faux (section F) sont très proches ( $FAD^{(-)} = 1.08$  pour le pont C1P et  $FAD^{(-)} = 1.06$  pour le pont C1).

Les coefficients de charge dynamique des roues de chaque camion ne montrent pas de différences sur les deux ponts.



Globalement, les différences entre les facteurs d'amplification dynamique calculés sur le pont C1 et le pont C1P sont faibles (Tableau 6.2) et ne traduisent en aucun cas un changement de comportement de la dalle de roulement face aux actions dynamiques du trafic. Les modes de vibration de la dalle de roulement du pont C1P ont des fréquences propres inférieures à celles des modes de la dalle du pont C1. Bien que le pont C1P ait, contrairement au pont C1, des fréquences propres entre 10 et 11 Hz proches de la fréquence du mode de sautellement des essieux arrières des camions, cette correspondance n'a pas de conséquences sur les réponses dynamiques.

#### 6.4.2 Pont C2

Les simulations numériques sur le pont C2 sont réalisées avec des véhicules circulant au bord de la chaussée sur les larges porte-à-faux, afin de déterminer l'influence de cette conception de la section transversale sur les réponses dynamiques de la dalle de roulement. Les paramètres des simulations sont pareils à ceux choisis pour le pont C1P, car, dans les deux situations, les changements de géométrie de la section modifient la rigidité des porte-à-faux de la dalle.

Les résultats du pont C2 sont analysés par comparaison avec ceux obtenus sur le pont C1 qui constitue l'ouvrage de référence. Les enveloppes statiques des efforts et des déplacements engendrés par le camion 11 ont les caractéristiques suivantes:

- Les moments transversaux dans la dalle de roulement sont plus importants à l'encastrement des porte-à-faux  $m_y^{(-)}$  ( $m_y^{(-)} = 33.5$  kNm/m dans le pont C2 et  $m_y^{(-)} = 24.1$  kNm/m dans le pont C1) et ont diminué dans la partie de la dalle située entre les âmes ( $m_y^{(-)} = 19$  kNm/m et  $m_y^{(+)} = 12.1$  kNm/m dans le pont C2,  $m_y^{(-)} = 22.5$  kNm/m et  $m_y^{(+)} = 14.6$  kNm/m dans le pont C1).
- Les moments longitudinaux  $m_x^{(+)}$  près des bordures sont plus grands ( $m_x^{(+)} = 4.9$  kNm/m dans le pont C2 et  $m_x^{(+)} = 4.1$  kNm/m dans le pont C1).
- Les flèches verticales sous les âmes sont plus petites pour le pont C2, alors que les déplacements verticaux sous la dalle à l'extrémité des porte-à-faux sont plus grands ( $w = 1.7$  mm dans le pont C2 et  $w = 1.5$  mm dans le pont C1).

La dimension des porte-à-faux  $a$ , de manière générale, augmenté leur souplesse.

Les facteurs d'amplification dynamique des effets dans la dalle de roulement du pont C2 sont comparés à ceux du pont C1.

- Les facteurs d'amplification dynamique des moments transversaux déterminants à l'encastrement du porte-à-faux de la dalle  $m_y^{(-)}$  sont encore les valeurs les plus intéressantes. Les résultats relatifs au pont C1 déjà présentés (Tableau 6.2) sont repris pour être comparés avec les facteurs d'amplification dynamique calculés pour la dalle du pont C2. Bien que ces facteurs soient proches (Tableau 6.3), il semble que le pont C2 est très légèrement moins sensible que le pont C1 aux effets dynamiques.
- Les facteurs d'amplification dynamique des moments longitudinaux  $m_x^{(+)}$  dans la dalle au niveau des bordures sont très proches. Les variations correspondent à celles qui apparaissent pour les facteurs d'amplification dynamique des moments transversaux  $m_y^{(-)}$  (Tableau 6.3).
- Les facteurs d'amplification dynamique des flèches verticales  $w$  sont légèrement plus grands dans le pont C2, mais les variations de ces facteurs entre les deux ponts sont du même ordre que celles des moments de flexion.

FAD $m_y^{(-)}$	Camion 11 profil B		Camion 12 profil B	
	Pont C1	Pont C2	Pont C1	Pont C2
Section A	1.26	1.26	1.21	1.23
Section B	1.10	1.10	1.10	1.10
Section C	1.25	1.12	1.22	1.14
Section D	1.24	1.26	1.15	1.15
Section E	1.12	1.07	1.07	1.03
Section F	1.10	1.05	1.10	1.03

Tableau 6.3 FAD des moments  $m_y^{(-)}$  à l'encastrement du porte-à-faux (Pont C2)

En résumé, les facteurs d'amplification dynamique déterminés dans le pont C2 correspondent bien avec ceux du pont C1. La rigidité des porte-à-faux n'a pas de conséquences sur les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants dans les dalles de roulement pour les situations de risque considérées.

### 6.4.3 Pont P1

Les simulations numériques sont effectuées avec les deux camions représentatifs circulant sur les deux trajectoires afin d'évaluer les différences entre les facteurs d'amplification dynamique des effets calculés dans une dalle de roulement d'une section ouverte (pont P1) et d'une section fermée (pont C1).

Par comparaison avec les résultats obtenus sur le pont C1, les enveloppes statiques des efforts et des déplacements provoqués par le camion 11 dans le tablier du pont P1 ont les propriétés suivantes:

- L'écartement plus important des poutres maîtresses par rapport à celui des âmes des ponts formés d'un caisson implique des moments transversaux plus importants dans la partie médiane de la dalle et, par conséquent, des moments plus faibles à l'encastrement du porte-à-faux causés par la faible dimension de ce dernier. La présence d'une entretoise dans la section considérée influence les moments transversaux dans la dalle de roulement.
- Les moments longitudinaux  $m_x^{(+)}$  au centre de la dalle sont plus grands ( $m_x^{(+)} = 11.7$  kNm/m pour le pont P1 et  $m_x^{(+)} = 10.5$  kNm/m pour le pont C1). La même tendance apparaît pour les moments près des bordures ( $m_x^{(+)} = 4.4$  kNm/m pour le pont P1 et  $m_x^{(+)} = 4.1$  kNm/m pour le pont C1).
- La section du pont P1 est plus souple que celle des autres ponts, car, malgré une hauteur statique plus grande, les flèches verticales sous les poutres du pont P1 sont plus grandes ( $w_{\max} = 1.4$  mm pour le pont P1 et  $w_{\max} = 0.9$  mm pour le pont C1).
- Les flèches verticales sont plus grandes à l'extrémité du porte-à-faux ( $w = 2.1$  mm pour le pont P1 et  $w = 1.5$  mm pour le pont C1) et au milieu de la dalle ( $w = 1.7$  mm pour le pont P1 et  $w = 1.2$  mm pour le pont C1).

La dalle de roulement du pont P1 est rendue plus souple par le fait que les poutres liées ponctuellement par des entretoises réalisent des appuis qui permettent plus de rotation que les appuis fournis par les âmes d'un caisson. La section ouverte est dans son plan plus flexible que la section fermée.

Les facteurs d'amplification dynamique des effets calculés dans la dalle de roulement du pont P1 se différencient des valeurs obtenues sur le pont C1 de la manière suivante:

- Malgré les différences entre les sections types des deux ponts, les facteurs d'amplification dynamique des moments transversaux déterminants dans les sections les plus sollicitées ne s'écartent pas de  $\pm 0.05$  par rapport aux facteurs du pont C1 présentés précédemment (Figure 6.7 et Figure 6.8). Seuls les facteurs d'amplification dynamique des moments transversaux soulageants au milieu de la dalle sont plus importants, car les valeurs sur l'enveloppe statique de ces moments ont diminué.
- Les facteurs d'amplification dynamique des moments longitudinaux dans la dalle du pont P1 ne s'écartent pas de  $\pm 0.1$  des valeurs calculées dans le pont C1. La dispersion des facteurs d'amplification dynamique des moments longitudinaux est plus grande que celle des moments transversaux.
- Les différences entre les facteurs d'amplification dynamique des flèches verticales du pont P1 et du pont C1 sont du même ordre de grandeur que les différences entre les facteurs d'amplification dynamique des moments transversaux.

Globalement les facteurs d'amplification dynamique qui majorent les effets déterminants (moments transversaux, moments longitudinaux et déplacements verticaux) dans la dalle de roulement du pont P1 sont en moyenne équivalents aux valeurs calculées pour le pont C1. Les différences de rigidité entre une section ouverte et une section fermée ont peu d'influence sur les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants dans la dalle de roulement.

#### 6.4.4 Pont P2

À la différence du pont P1, les entretoises du pont P2 ferment complètement la section et servent d'appui à la dalle de roulement. Cette modification affecte principalement la partie centrale de la dalle de roulement. En conséquence, les passages des deux camions représentatifs sur la trajectoire centrale sont simulés numériquement pour évaluer l'influence de ce changement sur le comportement dynamique de la dalle de roulement.

Les résultats obtenus sur le pont P2 sont comparés, pour des raisons de similitude, avec ceux du pont P1. Seules les différences décelées entre les résultats des deux ponts sont développées.

Parmi les efforts et les déplacements calculés, seuls les moments longitudinaux au milieu de la dalle sont différents. Les appuis constitués par les entretoises provoquent des moments négatifs; ce cloisonnement engendre des moments plus importants dans la dalle centrale.

Il n'y a pas de différences significatives entre les facteurs d'amplification dynamique déterminés dans une section transversale avec ou sans entretoise. Les facteurs d'amplification dynamique des différents effets calculés sont en moyenne équivalents aux facteurs déterminés pour les effets correspondants dans le pont P1.

En résumé, les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants dans les dalles de ces deux ponts sont semblables. Bien que les entretoises modifient les moments longitudinaux dans la dalle de roulement, ces changements n'affectent pas le comportement dynamique de cette dernière.

## 6.5 Analyse des réponses dynamiques du pont-cadre

### 6.5.1 Généralités

Compte tenu des variables de l'étude paramétrique, 40 simulations numériques sont effectuées sur le pont D1 pour déterminer les réponses dynamiques aux 37 jauges numériques disposées sur la dalle. Les enveloppes statiques des effets provoqués par les deux camions sont calculées à partir des réponses de 20 simulations numériques.

### 6.5.2 Caractéristiques des réponses du pont-cadre

Les réponses du pont D1 sont illustrées, comme celles du pont C1, sur des graphiques où l'abscisse représente la position occupée par l'essieu avant du camion lors de son passage à travers le pont. Les positions du véhicule pour lesquelles chacun des essieux applique sa charge sur l'ouvrage, sont représentées par des segments de droite limités par des flèches qui marquent l'entrée et la sortie de chaque essieu sur le pont (Figure 6.25 à Figure 6.28). La faible longueur du pont par rapport à la distance entre les essieux du camion implique trois chargements distincts de l'ouvrage. Successivement, lors du parcours du véhicule sur le pont D1, l'essieu avant du camion sollicite seul l'ouvrage jusqu'à ce que le deuxième essieu arrive sur le pont, puis la charge totale du camion agit jusqu'au moment où le premier essieu quitte le pont; finalement l'essieu arrière seul charge la dalle. Selon la jauge numérique, les réponses dynamiques ont des caractéristiques particulières influencées par les trois chargements décrits.

- La réponse du déplacement vertical de la dalle dans la section au milieu de la travée (Figure 6.25) fait apparaître des vibrations qui correspondent essentiellement au mode fondamental de flexion dont la fréquence est de 19.4 Hz (Figure B.1). Le sens des réponses statiques des flèches verticales est toujours négatif (vers le bas) indépendamment de la position du camion sur le pont.

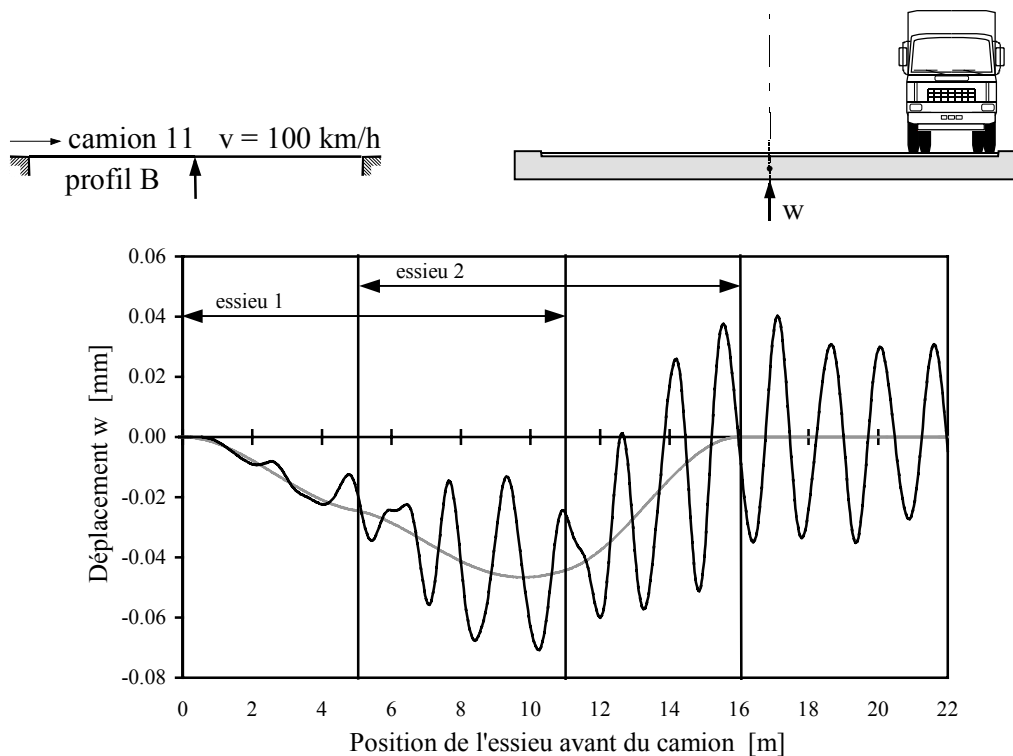


Figure 6.25 Réponse du déplacement au milieu de la dalle

- Les réponses des jauges numériques du moment longitudinal dans les sections sur les appuis sont caractérisées principalement par une fréquence de vibration de  $\sim 19$  Hz. Dans la zone où seul l'essieu avant est sur la dalle, les vibrations ont une fréquence plus élevée  $\sim 60$  Hz et les amplitudes sont réduites (Figure 6.26). Les réponses statiques des moments longitudinaux sur les appuis ne changent pas de sens lorsque le camion traverse le pont sur des trajectoires différentes.

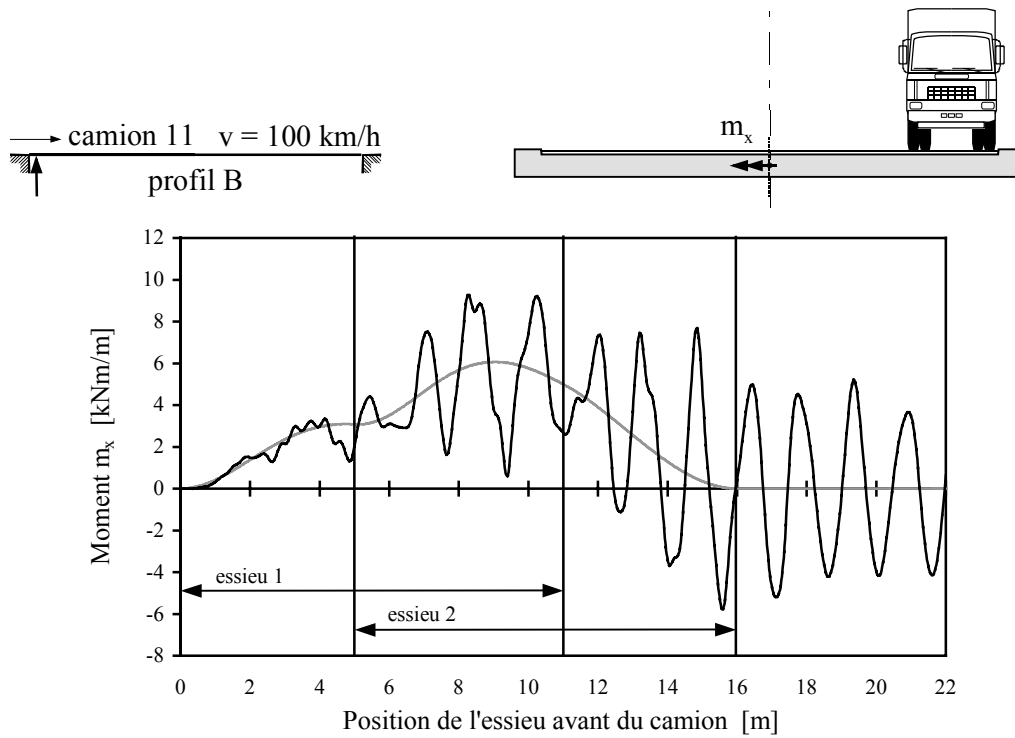


Figure 6.26 Réponse du moment longitudinal sur l'appui

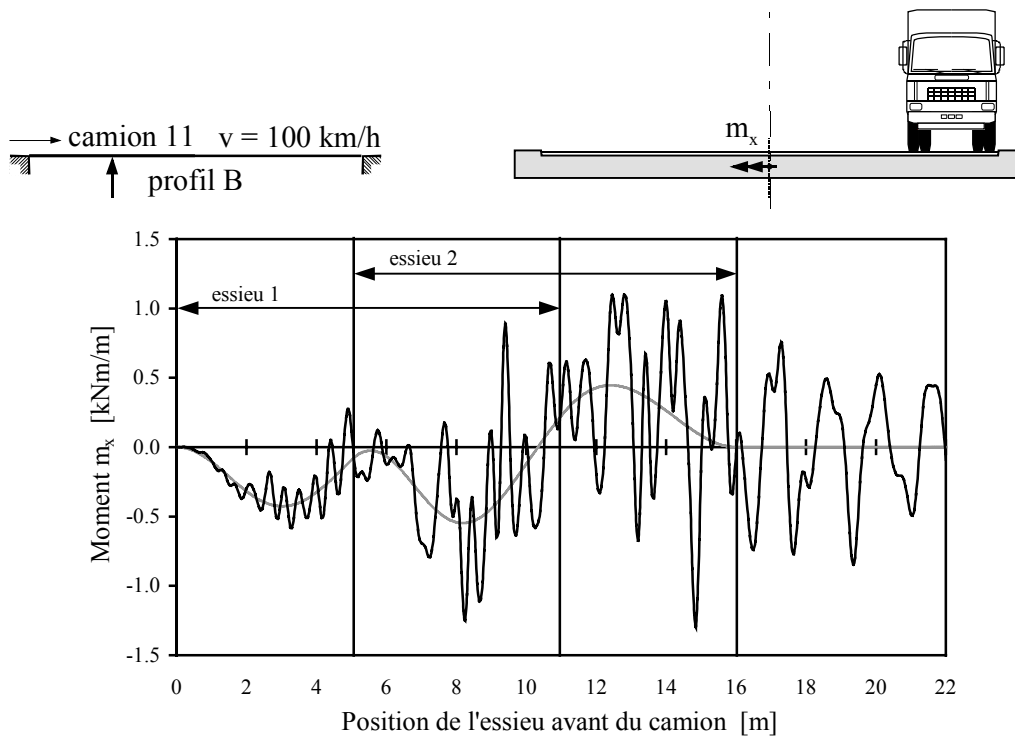


Figure 6.27 Réponse du moment longitudinal au 1/4 de la portée

- Les réponses des jauges numériques du moment longitudinal et transversal dans les sections situées au  $\frac{1}{4}$  et au  $\frac{3}{4}$  de la portée sont influencées par plusieurs modes de vibration. Dans la zone où le premier essieu sollicite seul la dalle, les vibrations sont déterminées par un mode dont la fréquence est  $\sim 60$  Hz. Lorsque le camion a traversé

totallement le pont, les vibrations des modes supérieurs sont amorties et le pont vibre selon son mode fondamental dont l'amortissement est plus faible (Figure 6.27 et Figure 6.28). Le sens de la réponse de ces moments est déterminé par la trajectoire empruntée par le camion et par sa position longitudinale sur la dalle.

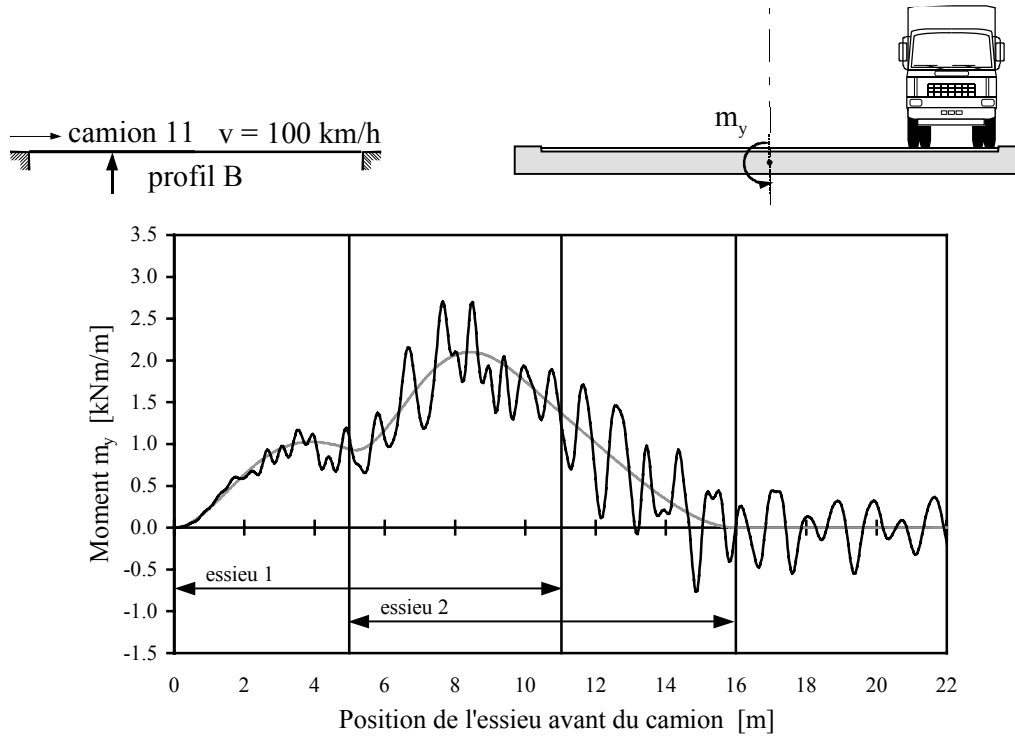


Figure 6.28 Réponse du moment transversal au 1/4 de la portée

### 6.5.3 Facteurs d'amplification dynamique

Les facteurs d'amplification dynamique des réponses calculées aux différentes jauges numériques sont établis selon la définition adoptée éq. (6.1). Les facteurs d'amplification dynamique du pont D1 sont présentés de manière identique à ceux du pont C1 (6.3.3). Les valeurs maximales et minimales des réponses dynamiques sont présentées par des barres blanches verticales. Les valeurs sur l'enveloppe statique positive et négative sont symbolisées respectivement par des barres grises et des barres noires. Ces barres sont disposées, pour chaque type d'effets calculés, à l'emplacement de la jauge numérique sur une vue en trois dimensions de la dalle du pont-cadre dont les appuis sont représentés par des traits épais (Figure 6.29 et Figure 6.30). La hauteur des barres représentant un même effet est à l'échelle afin d'en saisir la répartition. Les facteurs d'amplification dynamique supérieurs à 1.0 sont reportés, soit au-dessus, soit au-dessous des barres en fonction du sens de l'effet considéré.

La valeur maximale, atteinte à chaque jauge par les réponses dynamiques calculées en considérant les cinq vitesses de passage du camion 11, est utilisée pour établir les facteurs d'amplification dynamique présentés. Les résultats sont issus des simulations effectuées avec le camion 11 circulant sur le profil B suivant la trajectoire centrale (Figure 6.29) et la trajectoire du bord (Figure 6.30).

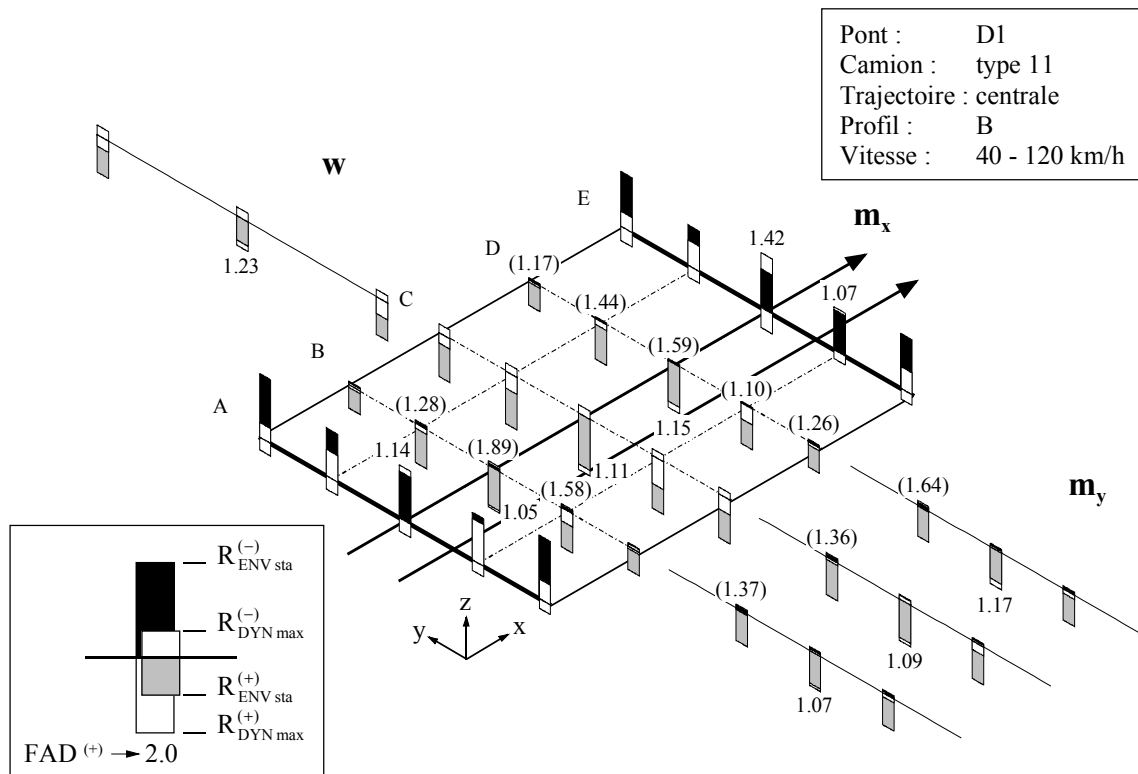


Figure 6.29 FAD obtenus avec le camion 11 roulant sur la trajectoire centrale

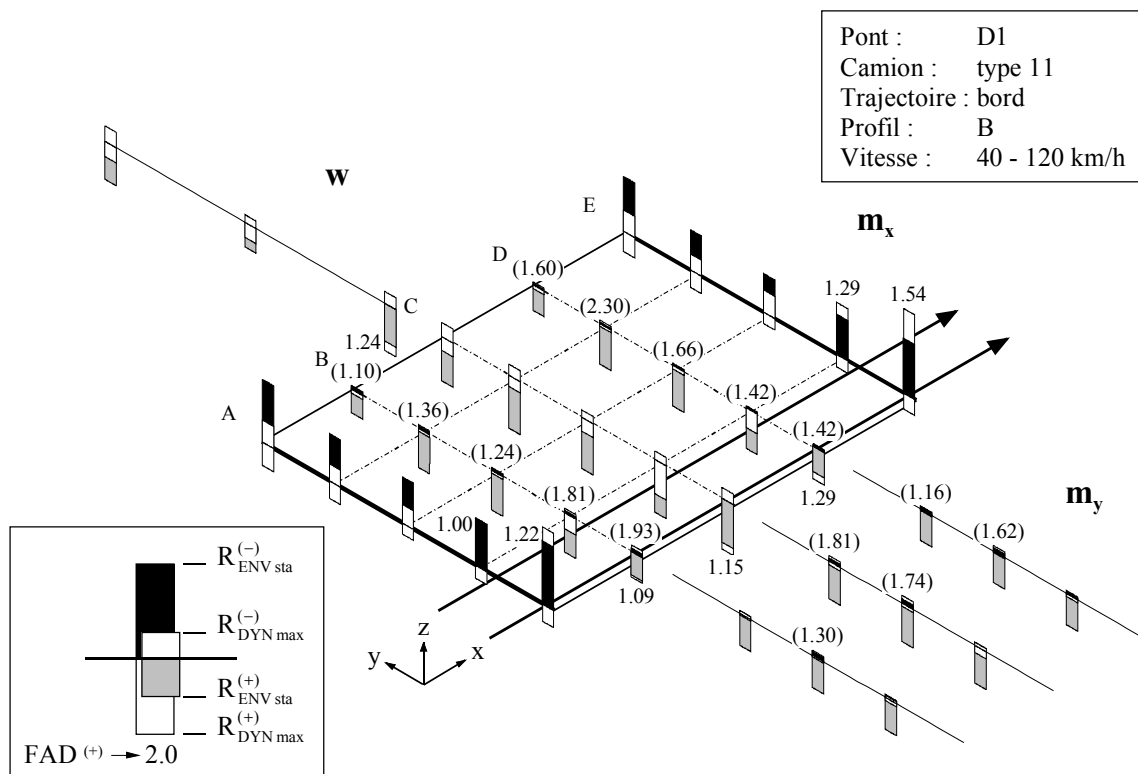


Figure 6.30 FAD obtenus avec le camion 11 roulant sur la trajectoire du bord

Dans les deux situations présentées, les facteurs d'amplification dynamique maximums interviennent pour les moments longitudinaux  $m_x^{(-)}$  et transversaux  $m_y^{(-)}$  qui tendent les fibres supérieures au milieu du champ de dalle (section B, C, D). Ces moments soulagent ceux

provoqués par le poids propre de la structure. Leurs facteurs d'amplification dynamique sont notés entre parenthèses pour être distingués des facteurs des effets déterminants.

Pour les moments déterminants, les facteurs d'amplification dynamique les plus élevés sont localisés dans le sillage de la trajectoire du véhicule. Les valeurs maximales de 1.42 (Figure 6.29) et 1.54 (Figure 6.30) majorent les moments longitudinaux déterminants sur l'appui à la sortie du pont. Les réponses maximales qui déterminent ces facteurs élevés, sont atteintes lorsque seul l'essieu arrière est encore sur le pont. Ces valeurs importantes s'expliquent par le fait que la réponse dynamique des moments longitudinaux dans cette section est influencée principalement par le mode fondamental de flexion (19.4 Hz) excité par les vibrations de l'essieu arrière du camion (14.5 Hz).

#### 6.5.4 FAD - Influence de la vitesse des véhicules

Les facteurs d'amplification dynamique des moments et des déplacements aux jauges numériques disposées dans la section C au milieu du pont sont présentés en fonction des vitesses de passage du camion. Comme à la section 6.3.4, les facteurs d'amplification dynamique obtenus pour chaque vitesse sont reliés par des droites pour améliorer la lisibilité des figures. Ces lignes, entre deux résultats, ne tracent pas la variation des facteurs d'amplification dynamique en fonction de la vitesse.

Les réponses obtenues avec le camion 11 circulant sur le profil de chaussée B suivant la trajectoire centrale sont à l'origine des facteurs d'amplification dynamique présentés. Les facteurs d'amplification dynamique des effets positifs et négatifs sont, s'ils existent, présentés sur des diagrammes séparés où les facteurs des effets déterminants et soulageants sont symbolisés respectivement par des traits noirs et des traits gris (Figure 6.31, Figure 6.32 et Figure 6.33).

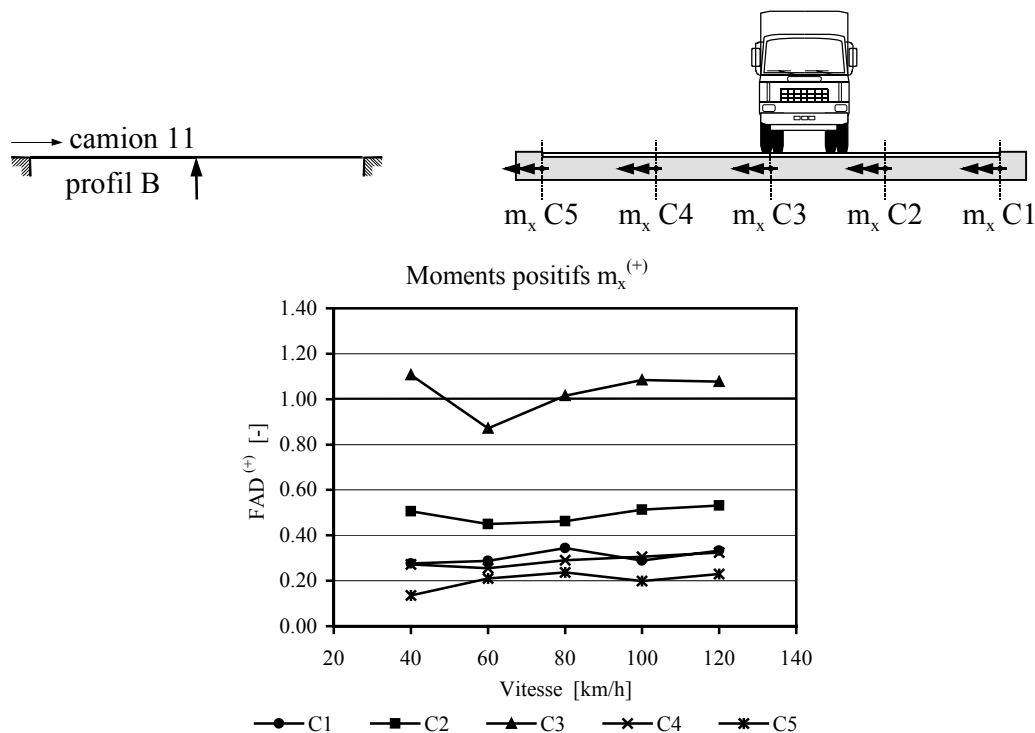


Figure 6.31 Diagramme des FAD des moments longitudinaux en fonction de la vitesse



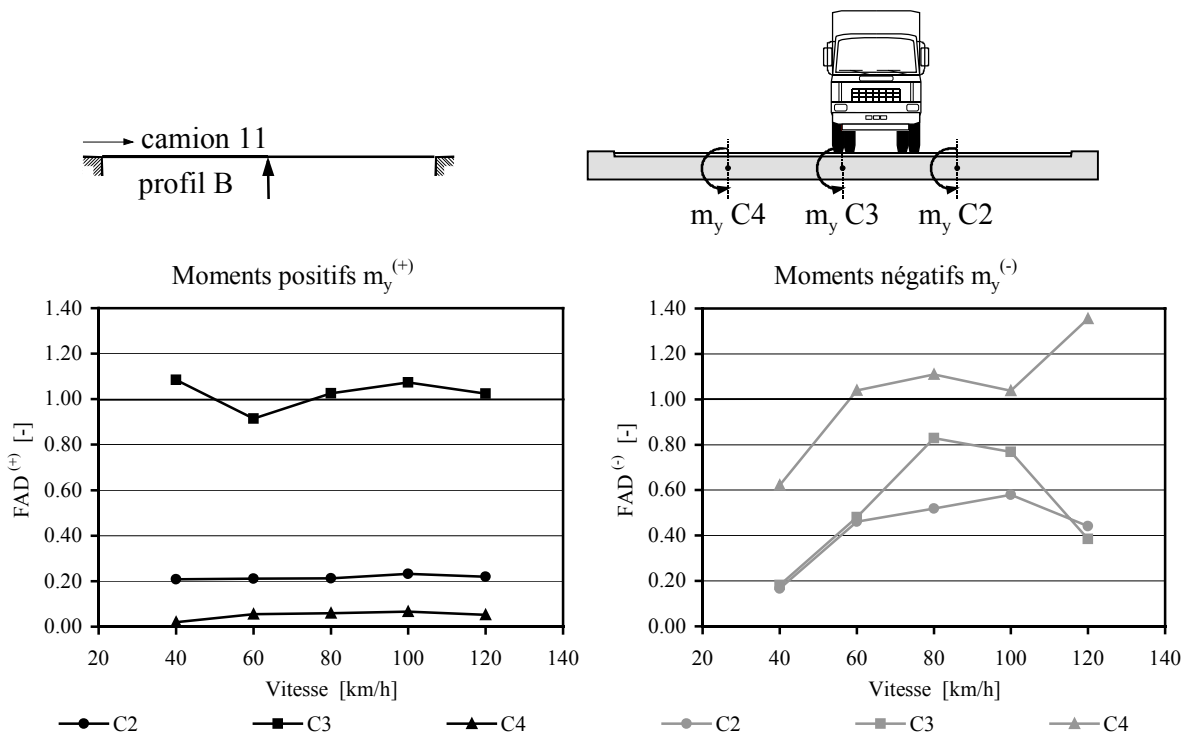


Figure 6.32 Diagrammes des FAD des moments transversaux en fonction de la vitesse

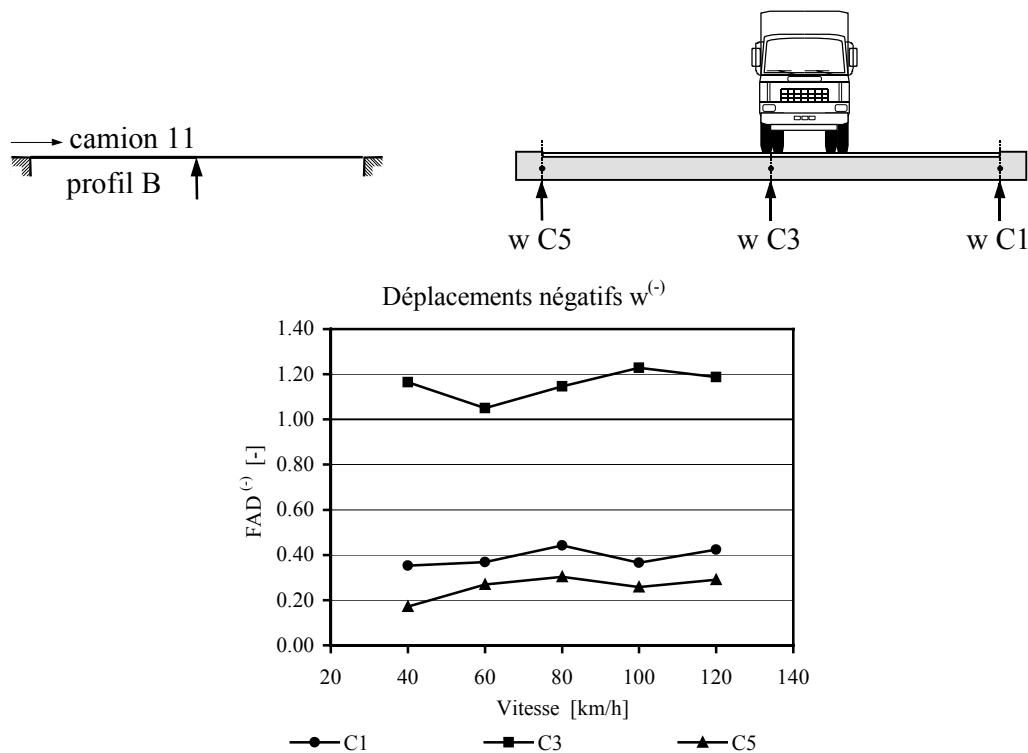


Figure 6.33 Diagramme des FAD des déplacements verticaux en fonction de la vitesse

Les facteurs d'amplification dynamique des moments soulageants  $m_y^{(-)}$  sont les plus influencés par la vitesse du véhicule, car la valeur correspondante sur l'enveloppe statique est petite.

Les variations des facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants aux différentes jauges numériques en fonction de la vitesse ne permettent pas de dégager une tendance. Les valeurs maximales ou minimales des facteurs d'amplification dynamique à un endroit donné n'apparaissent pas pour les mêmes conditions aux autres jauges numériques.

Les résultats dans la section C au milieu du pont donnent l'occasion de mettre en relation les facteurs d'amplification dynamique des moments transversaux et longitudinaux ainsi que ceux des déplacements verticaux calculés aux mêmes endroits dans le pont. Les diagrammes exprimant les facteurs d'amplification dynamique en fonction de la vitesse aux trois points particuliers (C1, C3, C5) permettent une comparaison objective (Figure 6.34). Les facteurs d'amplification dynamique de chaque effet réagissent de manière similaire aux différentes vitesses, mais les facteurs des moments sont toujours inférieurs à ceux des déplacements.

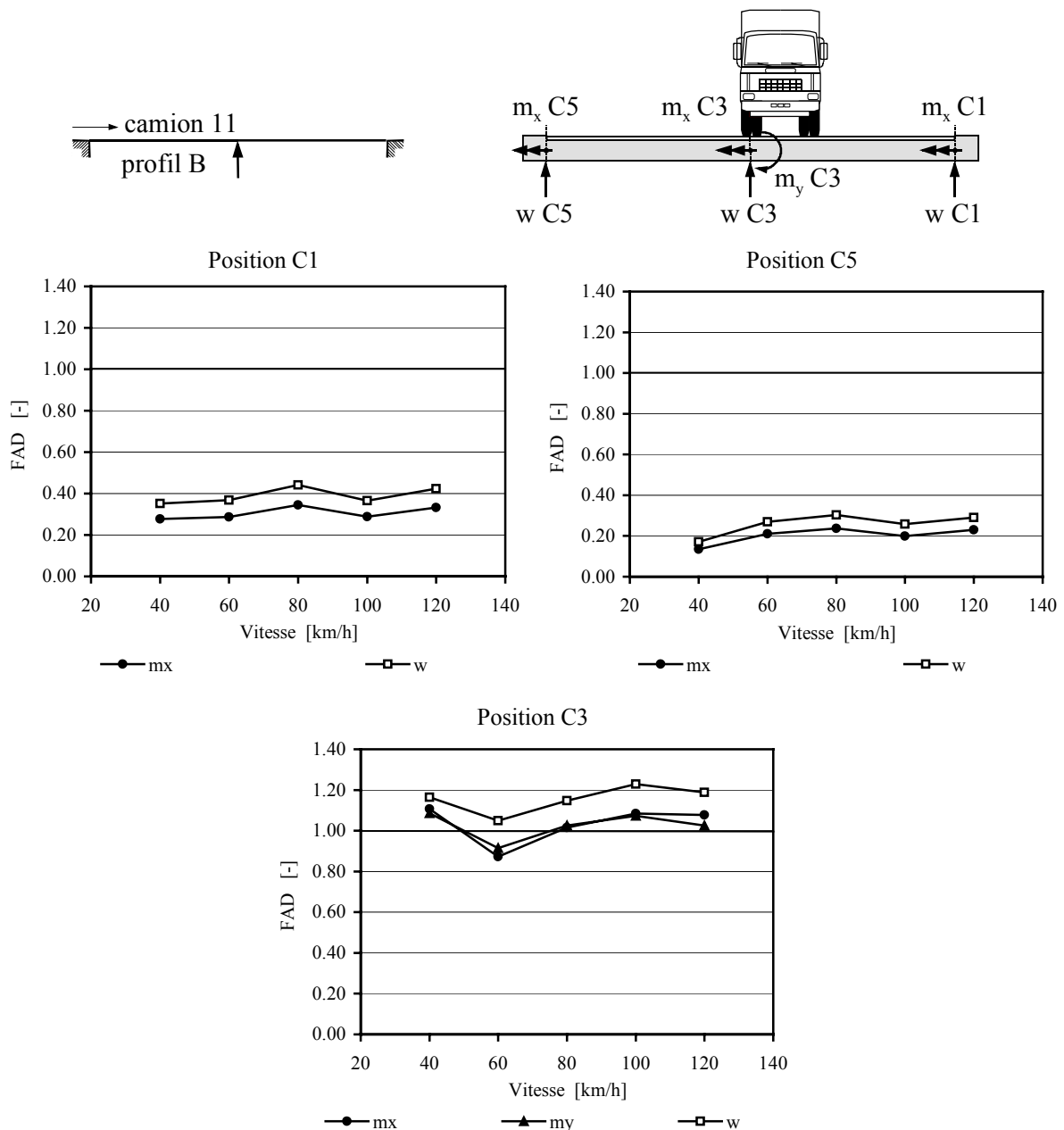


Figure 6.34 Diagrammes des FAD de plusieurs effets aux mêmes endroits

### 6.5.5 FAD - Influence de la rugosité du profil

Les simulations numériques réalisées sur le pont D1 avec les deux profils donnent des informations sur l'influence de la rugosité de la chaussée sur les facteurs d'amplification dynamique. Comme pour le pont C1, les facteurs d'amplification dynamique de chaque effet sont représentés par des barres verticales, à l'emplacement de chaque jauge numérique sur une vue en trois dimensions de la dalle du pont-cadre (Figure 6.35 et Figure 6.36). La hauteur des barres grises et noires correspond à la valeur des facteurs d'amplification dynamique des réponses calculées respectivement avec le profil A et avec le profil B. La différence entre la hauteur des barres, à une jauge numérique donnée, rapportée sur la hauteur de la barre grise correspond à la variation des facteurs d'amplification dynamique provoquée par une augmentation de la rugosité du profil. Les variations des facteurs d'amplification dynamique supérieures à 1.0 sont reportées aux barres correspondantes. Les facteurs d'amplification dynamique illustrés correspondent aux valeurs maximales déterminées à chacune des jauges numériques en considérant les cinq vitesses de passage du camion. Les résultats correspondent aux simulations réalisées avec le camion 11 circulant sur la trajectoire centrale (Figure 6.35) et sur la trajectoire du bord (Figure 6.36).

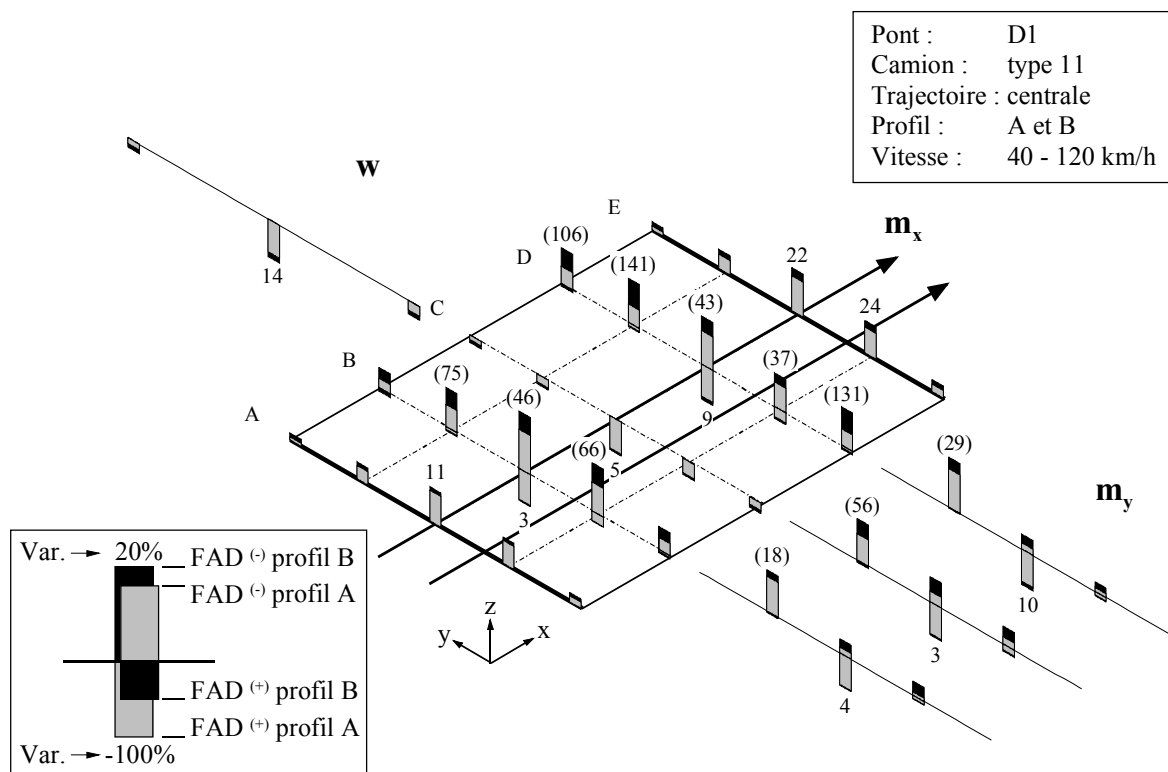


Figure 6.35 Variation des FAD provoquée par une augmentation de la rugosité du profil

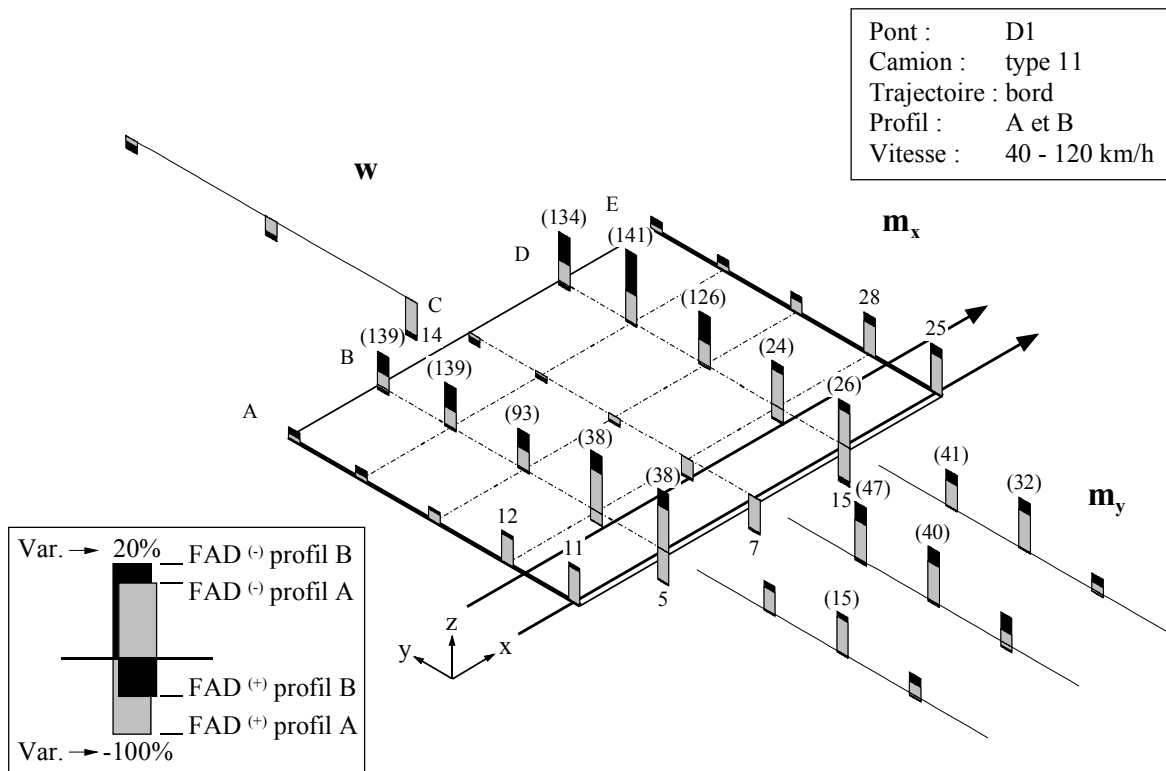


Figure 6.36 Variation des FAD provoquée par une augmentation de la rugosité du profil

Pour les deux situations présentées (Figure 6.35 et Figure 6.36) ainsi que celles où le camion 12 est utilisé, mais dont les résultats ne sont pas illustrés, une augmentation de la rugosité du profil entraîne, à toutes les jauges numériques, une augmentation des facteurs d'amplification dynamique.

Les variations des facteurs d'amplification dynamique des moments longitudinaux  $m_x$  et des flèches verticales  $w$  dans une section transversale de la dalle sont différentes d'une jauge numérique à l'autre. La variation est plus faible pour les facteurs d'amplification dynamique grands qui se situent dans le sillage du véhicule, que pour les facteurs des jauges éloignées des trajectoires sur lesquelles les charges sont appliquées. Cette constatation se vérifie aussi bien pour les valeurs positives et négatives des moments.

Les moments soulageants dans les sections transversales au  $\frac{1}{4}$  et au  $\frac{3}{4}$  de la portée sont plus sensibles à l'augmentation de la rugosité du profil que les effets calculés aux autres jauges numériques.

La variation des facteurs d'amplification dynamique des moments longitudinaux est plus importante aux jauges numériques placées dans les sections à la sortie du pont qu'à celles disposées dans les sections à l'entrée. Le profil B excite davantage les mouvements des essieux arrière du camion dont la fréquence (14.5 Hz) s'approche le plus de celle du mode fondamental de flexion du pont (19.4 Hz). De plus, lorsque l'essieu arrière est encore sur le pont, la masse du camion tend à diminuer la fréquence de vibration du pont à une valeur inférieure à 19 Hz.

### 6.5.6 FAD - Influence du type de véhicule

Les simulations menées avec les deux camions représentatifs sur le pont-cadre, dans les mêmes conditions, permettent de comparer les facteurs d'amplification dynamique résultant des réponses produites par chacun des camions. Une représentation similaire à celle retenue pour évaluer l'influence du profil de la chaussée sur les facteurs d'amplification dynamique est utilisée (Figure 6.35 et Figure 6.36). La hauteur des barres noires et des barres grises

représente les facteurs d'amplification dynamique des réponses calculées respectivement avec le camion 11 et avec le camion 12. Les facteurs d'amplification dynamique représentés par ces deux types de barres ne majorent pas la même enveloppe statique qui est différente pour chaque camion. À une jauge numérique donnée, la différence entre la hauteur des barres rapportée à la hauteur de la barre noire correspond à la variation, exprimée en pour-cent, des facteurs d'amplification dynamique provoquée par le passage d'un autre véhicule lors des différentes simulations. Les variations des facteurs d'amplification dynamique supérieures à 1.0 sont reportées aux barres correspondantes. Les facteurs d'amplification dynamique présentés sont les valeurs maximales déterminées à chacune des jauges numériques en considérant les cinq vitesses de passage du camion. Les résultats sont issus des simulations réalisées avec les deux camions roulant sur le profil B suivant la trajectoire centrale (Figure 6.37) et la trajectoire du bord (Figure 6.38).

Les variations des facteurs d'amplification dynamique provoquées par le passage d'un autre véhicule sont diverses et traduisent tantôt une diminution, tantôt une augmentation sans qu'il soit possible de dégager une tendance en fonction du type d'effort ou des différentes sections.

Les facteurs d'amplification dynamique des moments longitudinaux soulageants dans la section transversale placée au  $\frac{3}{4}$  de la portée sont sensibles au changement du type de camion, en particulier les jauges numériques disposées à proximité immédiate de l'application des charges. Ces facteurs d'amplification dynamique élevés sont causés par les réponses en vibrations libres de la dalle dont les amplitudes sont plus grandes pour le camion 12 que pour le camion 11.

Pour les efforts déterminants, une diminution des facteurs d'amplification dynamique à proximité des trajectoires des roues semble se généraliser.

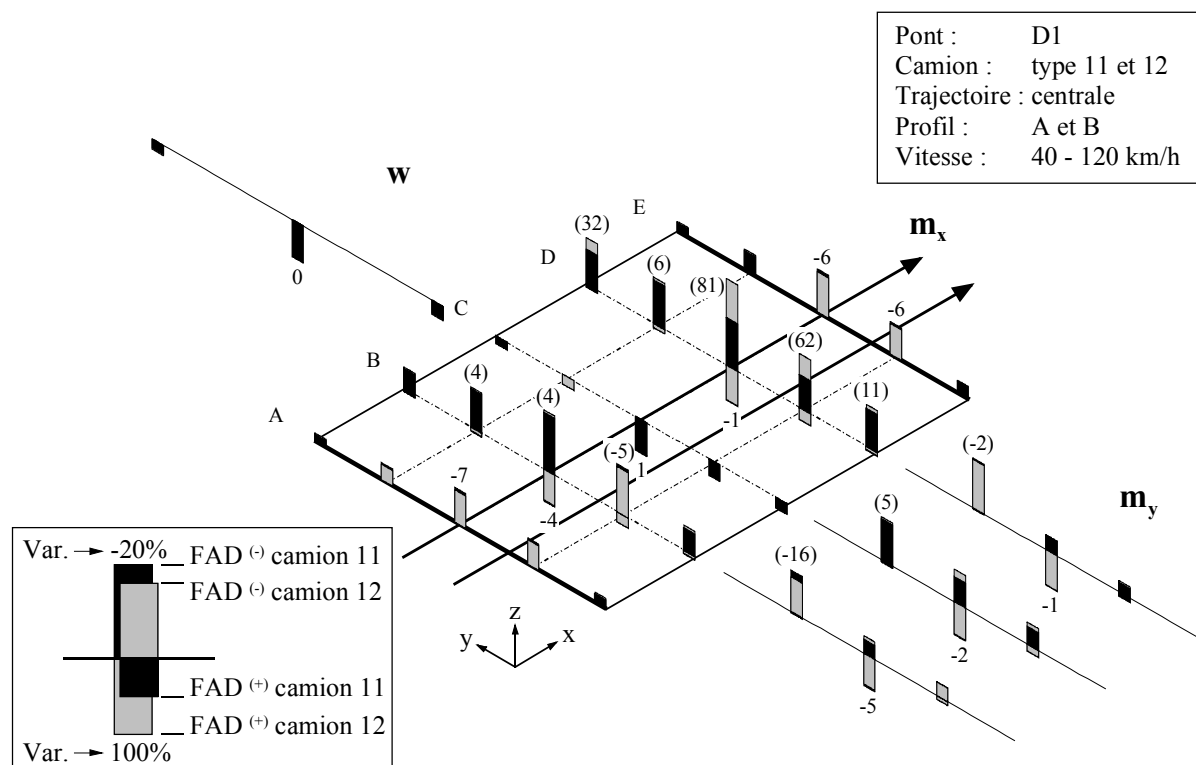


Figure 6.37 Variation des FAD provoquée par le passage d'un autre véhicule

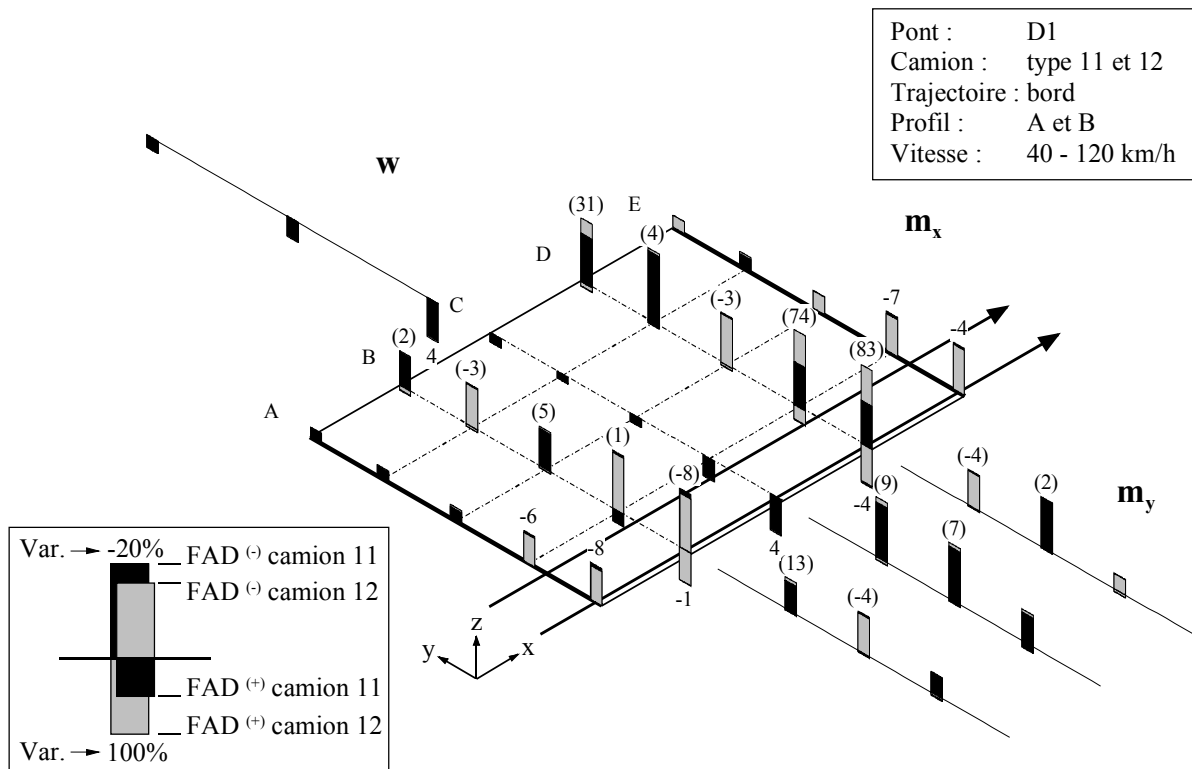


Figure 6.38 Variation des FAD provoquée par le passage d'un autre véhicule

### 6.5.7 Remarques

L'analyse des réponses dynamiques des effets calculés dans le pont-cadre se résume de la manière suivante:

- Les réponses des effets déterminés dans la dalle du pont-cadre présentent des caractéristiques différentes selon le type d'effet, sa localisation et le chargement appliqué sur la dalle. Les caractéristiques des vibrations propres à un effet évoluent entre la période où seul l'essieu avant du camion sollicite la structure et la période durant laquelle l'essieu arrière applique sa charge sur la dalle. Le régime de vibrations libres qui se développe après le passage du camion se différencie du régime de vibrations forcées durant lequel plusieurs modes dominent les réponses.
- Les nombreuses jauges numériques réparties sur cette dalle aux dimensions réduites ainsi que le système statique simple du pont montrent, plus clairement que dans les ponts-poutre, la répartition des réponses dynamiques maximales. La définition adoptée des facteurs d'amplification dynamique dans laquelle la référence statique correspond à une enveloppe, fournit les valeurs maximales là où les réponses dynamiques sont maximales. Pour les effets étudiés, les facteurs d'amplification dynamique maximums se situent dans le sillage de la trajectoire empruntée par le véhicule.
- La vitesse du véhicule intervient dans le phénomène d'interaction dynamique qui détermine les réponses de la structure. L'influence de la vitesse sur les facteurs d'amplification dynamique ne se traduit pas par une tendance.
- À un endroit donné sur la dalle, les facteurs d'amplification dynamique des moments (transversaux et longitudinaux) sont toujours inférieurs à ceux des déplacements verticaux. Ces résultats confirment la distinction des facteurs d'amplification dynamique issus des mesures de déplacement et des mesures de déformation (2.3).
- Une augmentation de la rugosité du profil de la chaussée entraîne une augmentation des facteurs d'amplification dynamique. Les résultats dans le pont-cadre montrent, de manière

plus évidente que dans les ponts-poutre, que cette variation est plus faible pour les facteurs d'amplification dynamique élevés qui sont dans le sillage de la trajectoire du véhicule que pour les autres.

- Les facteurs d'amplification dynamique des effets déterminants localisés à proximité de l'application des charges varient moins que les autres, lorsqu'un autre camion circule sur l'ouvrage.
- Les sections à la sortie du pont sont plus sensibles aux sollicitations dynamiques provoquées par les véhicules. Des facteurs d'amplification dynamique élevés apparaissent dans ces sections même pour les effets déterminants. Les facteurs d'amplification dynamique des effets dans ces sections sont plus sensibles que ceux des autres sections aux paramètres principaux qui influencent les réponses dynamiques (rugosité du profil, type de camion).

## 6.6 Réponses dynamiques des dalles de roulement

### 6.6.1 Sensibilité des dalles de roulement

L'analyse détaillée des réponses dynamiques du pont C1 et du pont D1 ainsi que des autres ponts-poutre permet de tirer des conclusions sur le comportement dynamique des dalles de roulement des ponts en béton représentatifs du parc du réseau autoroutier suisse.

Les facteurs d'amplification dynamique déterminés en référence aux enveloppes des effets statiques produits dans le pont par un véhicule sont utilisés pour comparer le comportement dynamique des dalles de roulement sollicitées par le trafic routier.

Bien que chaque facteur d'amplification dynamique soit une valeur propre à un effet localisé dans la structure et à une situation de risque, les facteurs des effets déterminants sont du même ordre de grandeur dans les différentes parties d'une dalle de roulement. En effet, les facteurs calculés à l'encastrement des porte-à-faux ne se distinguent pas de ceux établis au milieu de la dalle lorsque le véhicule sollicite au maximum ces sections. De plus, les facteurs d'amplification dynamique des effets dans la dalle de roulement présentent des valeurs homogènes entre chaque section transversale, indépendamment du fait que celles-ci soient situées dans la travée de rive ou dans la travée principale. Cette constatation se résume dans la phrase suivante:

*La sensibilité des différentes parties d'une dalle de roulement aux effets dynamiques provoqués par le trafic routier est uniforme.*

Cette remarque ne s'applique pas au pont-cadre étudié pour lequel des facteurs d'amplification dynamique plus importants apparaissent sur l'appui (sortie du pont) par rapport aux valeurs à l'intérieur du champ de dalle.

Les simulations numériques réalisées sur les cinq ponts-poutre ont fourni des réponses dynamiques caractérisées par des facteurs d'amplification dynamique en moyenne équivalents sur chaque pont. Les particularités de la section type de chaque pont qui déterminent le système d'appuis de la dalle et sa rigidité, n'influencent donc pas les facteurs d'amplification dynamique des effets dans la dalle de roulement de ces ponts. Si les facteurs d'amplification dynamique traduisent la sensibilité de la dalle de roulement aux effets dynamiques provoqués par le trafic routier, alors la remarque suivante s'applique aux ponts-poutre du réseau autoroutier.

*La sensibilité des dalles de roulement aux effets dynamiques provoqués par le trafic routier n'est pas influencée par le type de section transversale.*

Cette uniformité dans le comportement dynamique des dalles de roulement différentes s'explique par les propriétés dynamiques similaires des ponts-poutre. Les modes propres sont séparés en deux parties qui sont d'une part, les modes globaux des ponts et d'autre part, les modes de vibration locaux qui déterminent principalement les mouvements des dalles. Pour tous les ponts-poutre, cette séparation intervient approximativement à la fréquence de 9 Hz (Tableau B.1).

Le châssis des deux véhicules représentatifs étudiés n'a pas de fréquences propres qui correspondent à celles des modes de vibration globaux des ponts. Les fréquences de vibration du châssis des véhicules sont trop basses par rapport à celles des ponts pour développer un phénomène de quasi-résonance entre les deux systèmes. Cette constatation est une des raisons pour laquelle les facteurs d'amplification dynamique des flèches verticales sous les âmes des caissons ou sous les poutres maîtresses n'ont pas de valeurs très élevées.

Bien que tous les ponts aient plusieurs fréquences propres dans une plage commune avec les fréquences de vibration des essieux des camions représentatifs (Tableau B.1), cette correspondance n'a pas causée des réponses dynamiques élevées dans les dalles de roulement. Le nombre de modes de vibration aux formes variées dans la plage des fréquences de vibration des essieux des camions évite qu'un seul mode domine la réponse des dalles avec de fortes amplitudes.

Contrairement aux ponts-poutre pour lesquels plusieurs modes existent dans la plage des fréquences excitées par les véhicules, très peu de modes participent à la réponse du pont-cadre, car les fréquences propres sont élevées et très espacées (Figure B.1). Les facteurs d'amplification dynamique élevés déterminés pour les moments de flexion sur l'appui à la sortie du pont sont provoqués par des vibrations dominées essentiellement par le mode fondamental de flexion du pont. La fréquence de ce mode (19.4 Hz) peut être excitée par les vibrations des essieux des camions.

Les réponses dynamiques maximales des effets dans le pont sont le résultat d'un régime de vibrations forcées imposé par le véhicule. Les fréquences des vibrations forcées qui déterminent la réponse des éléments porteurs principaux du pont, lors du passage du véhicule, sont peu différentes des fréquences propres des modes globaux, car la masse du véhicule est faible par rapport à la masse du pont. Pour les dalles de roulement, la situation est différente, car la masse du véhicule est importante par rapport à la masse de la dalle. Les fréquences des vibrations forcées dans la dalle sont plus influencées que celles des poutres principales par la masse du véhicule qui sollicite l'ouvrage. La présence du véhicule sur le pont implique que les fréquences des vibrations forcées de la dalle sont inférieures aux fréquences propres de la dalle.

### **6.6.2 Influence des paramètres principaux sur les réponses dynamiques**

Les simulations numériques réalisées sur les différents ponts ont montré que la qualité de la planéité du revêtement est un paramètre qui affecte les facteurs d'amplification dynamique. Les deux profils de chaussée utilisés se distinguent uniquement par l'amplitude de la rugosité et sont représentatifs d'une chaussée moyenne et d'une chaussée usée d'une autoroute suisse.

Les changements intervenus entre ces deux états, au niveau des réponses dynamiques calculées, correspondent à un accroissement maximum d'environ 20% des facteurs d'amplification dynamique dans les sections déterminantes pour lesquelles les facteurs d'amplification dynamique sont les plus élevés.

*La qualité de la planéité de la chaussée est un des paramètres qui a le plus d'influence sur les réponses dynamiques des effets dans les dalles de roulement. Les facteurs d'amplification dynamique des dalles de roulement des ponts peuvent subir un accroissement d'environ 20% au cours de la durée de vie de la couche d'usure du revêtement.*



Les simulations numériques effectuées avec les deux camions représentatifs ont fait apparaître des différences entre les facteurs d'amplification dynamique calculés pour les effets dynamiques déterminants dans les sections les plus sollicitées. La variation des résultats obtenus avec chacun des véhicules se traduit par un accroissement ou une diminution maximum de  $\pm 10\%$ . En effet, l'influence du type de véhicule peut conduire soit à une augmentation, soit à une diminution des facteurs d'amplification dynamique. Plusieurs raisons peuvent expliquer les résultats observés; en particulier, la masse et la géométrie du véhicule ainsi que la rigidité des suspensions qui sont spécifiques à chaque modèle de véhicule.

*Les facteurs d'amplification dynamique calculés pour les réponses des effets dynamiques provoqués par un camion à deux essieux ou à trois essieux dans la dalle de roulement ne permettent pas de dégager une tendance entre les deux types de véhicule.*

La masse du véhicule est un paramètre important qui intervient dans l'interaction qui se développe entre le pont et le véhicule. La masse du camion, y compris celle de son chargement, détermine d'une part, la répartition de la charge sur les essieux et d'autre part, les fréquences des modes propres de vibration. L'augmentation de la charge statique sur les essieux et sur les suspensions modifie l'amortissement de ces dernières. Selon les lois de comportement des suspensions en acier, l'amortissement augmente en fonction de la charge. L'augmentation de la masse provoque une diminution des fréquences de vibrations des modes de tangage, de roulis et de bondissement. Les fréquences du pont et, en particulier, celles de la dalle en régime de vibrations forcées sont aussi influencées par la masse du véhicule. Les facteurs d'amplification dynamique augmentent avec une diminution de la charge du camion; toutefois, les effets dynamiques demeurent plus importants pour un camion plus lourd, même si les facteurs d'amplification dynamique sont plus petits que ceux obtenus des réponses dynamiques provoquées par un camion plus léger. Pour le camion à deux essieux, les facteurs d'amplification dynamique diminuent en moyenne de 15 à 20% entre les situations où le camion est vide (8 tonnes) et surchargé (21.6 tonnes).

*Les facteurs d'amplification dynamique dans les dalles de roulement des ponts dépendent de la masse du véhicule. Les facteurs d'amplification dynamique diminuent lorsque la masse du camion augmente.*

Les résultats ne permettent pas de dégager une tendance pour les facteurs d'amplification dynamique en fonction de la vitesse de passage du véhicule. Bien que la vitesse du véhicule qui traverse le pont influence les facteurs d'amplification dynamique, il n'y a pas une relation croissante ou décroissante de ce paramètre avec les facteurs d'amplification dynamique.

*Pour des profils de chaussée dont la rugosité est homogène, la vitesse n'est pas un paramètre déterminant pour les facteurs d'amplification dynamique.*

## 6.7 Remarques finales

Deux des objectifs principaux de l'étude sont atteints dans ce chapitre. En effet, les réponses des effets dans les dalles de roulement des ponts ont permis, par le biais d'une nouvelle définition, de calculer les facteurs d'amplification dynamique. Sur la base de ces facteurs établis pour diverses situations de risque, la sensibilité de diverses dalles de roulement vis-à-vis des sollicitations provoquées par le trafic routier est déterminée.

Les éléments suivants ont permis d'atteindre ces objectifs:

- La définition adoptée des facteurs d'amplification dynamique met clairement en évidence les valeurs importantes nécessaires à l'évaluation des dalles de roulement des ponts.

- Le facteur d'amplification dynamique est une valeur particulière à un effort donné, à un endroit précis dans la structure et à une situation de risque particulière.
- Pour les ponts-poutre, la sensibilité des différentes parties de la dalle de roulement aux effets dynamiques provoqués par le trafic routier est uniforme. Des réserves sont émises pour le pont-cadre pour lequel la sensibilité est plus importante sur les appuis par rapport au champ intérieur de la dalle.
- La sensibilité des dalles de roulement aux effets dynamiques provoqués par le trafic routier n'est pas influencée par le type de section du pont.
- Pour les profils de chaussée dont la rugosité est homogène, la vitesse n'est pas un paramètre déterminant pour les facteurs d'amplification dynamique.
- Les facteurs d'amplification dynamique de la dalle de roulement d'un pont peuvent subir un accroissement d'environ 20% au cours de la durée de vie de la couche d'usure du revêtement fixée selon la norme SNV 640 521b "Planéité" [88].
- Les facteurs d'amplification dynamique calculés pour les réponses des effets dynamiques provoqués dans la dalle de roulement par un camion à deux essieux ou à trois essieux ne permettent pas de dégager une tendance entre les deux types de véhicule.
- Les facteurs d'amplification dynamique dans la dalle de roulement d'un pont dépendent de la masse du véhicule. Les facteurs d'amplification dynamique diminuent lorsque la masse du camion augmente.

Ces conclusions relatives à la sensibilité des dalles de roulement des ponts aux effets dynamiques provoqués par le trafic routier ainsi que l'influence des principaux paramètres sur les facteurs d'amplification dynamique seront exploitées pour proposer une évaluation simplifiée des dalles de roulement basée sur des charges statiques majorées par des facteurs d'amplification dynamique (Chapitre 8).

## Chapitre 7

# Analyses particulières

### 7.1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'apporter des compléments et des prolongements à l'étude. Dans ce cadre, le comportement dynamique de la structure est étudié en relation avec les états limites fixés pour le dimensionnement ou l'évaluation de l'ouvrage. Des modèles de véhicule avec des essieux tandem sont également proposés pour représenter fidèlement les charges de ce type d'essieux sur les dalles. Le contenu du chapitre est divisé en deux parties:

- **Effet des non-linéarités matérielles sur les facteurs d'amplification dynamique**

Les analyses qui ont permis de déterminer les facteurs d'amplification dynamique des effets dans les dalles de roulement ont été effectuées avec des charges de service et un matériau élastique linéaire. Une réflexion sur la validité de ces facteurs à l'état de service et à l'état ultime est nécessaire préalablement à leur application dans le cadre de l'évaluation des ponts aux états limites.

Des simulations numériques sont effectuées avec un modèle en deux dimensions du pont C1. Pour les différents passages du camion simulés, la rigidité de la poutre est localement modifiée pour approcher le comportement dynamique du pont à l'état ultime. Les modifications de comportement provoquées par les non-linéarités matérielles sont évaluées sur la base des facteurs d'amplification dynamique et des fréquences propres de vibration.

- **Modèles proposés pour les camions à trois essieux**

Le calcul des effets dynamiques dans les dalles de roulement des ponts sollicités par des véhicules mobiles nécessite que la disposition des charges appliquées par le modèle du véhicule soit aussi réaliste que possible. Le modèle de camion à deux essieux utilisé (Figure 5.8) constitue, à ce titre, un modèle approximatif du camion 12 caractérisé par des essieux tandem à l'arrière (5.5.1). Deux modèles de véhicule à trois axes munis d'essieux tandem sont proposés pour remédier aux inconvénients du modèle existant. Les équations différentielles du mouvement pour chacun d'eux sont développées selon l'approche des travaux virtuels. Ces deux nouveaux modèles de véhicule n'ont pas été utilisés lors des simulations numériques sur les ponts représentatifs; néanmoins des tests sont effectués sur une surface rigide.

## 7.2 Effet des non-linéarités matérielles sur les FAD

### 7.2.1 Généralités

L'étude des effets dynamiques provoqués dans les dalles de roulement des ponts par le trafic routier a été effectuée avec des charges dont le niveau correspond à l'état de service. Le calcul des effets dynamiques engendrés dans le pont par ces actions a été réalisé en admettant un comportement élastique linéaire du béton constituant la structure. Les facteurs d'amplification dynamique établis dans le chapitre précédent sont donc valables à l'état de service dans une structure qui présente un comportement élastique linéaire.

Afin d'appliquer les résultats obtenus au chapitre 6 pour dimensionner ou évaluer un pont, il est nécessaire de déterminer si les facteurs d'amplification dynamique établis sur la base des effets produits par des charges de service sont directement utilisables pour majorer les effets statiques provoqués par les charges ultimes. L'état ultime implique un comportement non linéaire de la structure caractérisé par la formation de fissures jusqu'au développement d'un mécanisme de ruine. L'influence du niveau de charge et du comportement non linéaire de la structure sur les facteurs d'amplification dynamique doivent être étudiés pour considérer l'état ultime.

Actuellement, selon les normes en vigueur, aucune distinction n'est établie entre les facteurs d'amplification dynamique applicables à l'état de service et à l'état ultime. En principe, une seule valeur est utilisée indépendamment de l'état limite considéré, bien que les valeurs des facteurs d'amplification dynamique soient, en général, basées sur les résultats d'essais in situ représentant un état de service de l'ouvrage testé.

À notre connaissance, aucune étude n'a été effectuée en relation avec les facteurs d'amplification dynamique et les effets non linéaires qui ont lieu à l'état ultime.

Les simulations numériques effectuées avec le camion 11 transportant trois charges différentes (6.3.7) ont montré que le niveau de charge influence favorablement les facteurs d'amplification dynamique.

L'étude de l'influence des non-linéarités matérielles d'un pont en béton sur les effets dynamiques provoqués dans la dalle de roulement par un véhicule mobile est complexe, car la résolution d'un tel système dynamique nécessite deux processus itératifs: le premier pour résoudre l'interaction dynamique entre le pont et le véhicule et le second pour tenir compte du comportement non linéaire de la structure. Pour éviter des calculs coûteux en temps, une démarche simplifiée est appliquée afin d'obtenir une appréciation de l'influence des non-linéarités matérielles sur les facteurs d'amplification dynamique.

### 7.2.2 Démarche

La démarche simplifiée pour étudier l'influence des non-linéarités matérielles d'un pont en béton sur les facteurs d'amplification dynamique consiste à diminuer progressivement le module d'élasticité dans les zones fissurées de la structure. Les zones fissurées sont définies au préalable pour permettre le développement d'un mécanisme de ruine probable pour la structure considérée. Un modèle simple du pont est employé pour faciliter l'application de cette démarche. Cette méthode conserve le caractère linéaire de l'analyse tout en fournissant une approximation de l'influence des non-linéarités matérielles.

### 7.2.3 Modèle en deux dimensions

Le pont C1 est modélisé en deux dimensions avec des éléments finis de type "poutre" (Figure 5.2b). Afin de considérer la variation de l'épaisseur de la dalle inférieure du caisson, l'ouvrage

est séparé en tronçons de trois types différents sur chacun desquels les propriétés des éléments finis sont constantes (Figure 7.1).

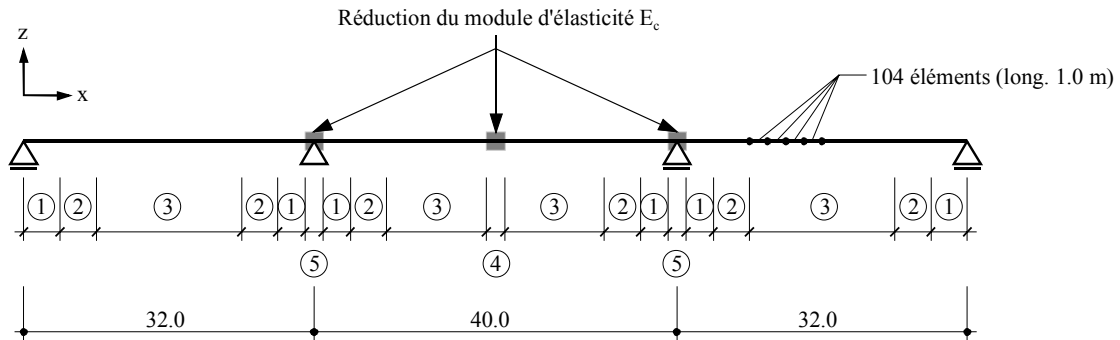


Figure 7.1 Modèle en 2D du pont C1

Un module d'élasticité de  $E_c = 35'000 \text{ kN/m}^2$  est admis pour le béton en dehors des zones fissurées et la masse volumique est fixée à  $\rho = 2'500 \text{ kg/m}^3$ .

Les zones fissurées sont localisées sur les appuis intermédiaires et au milieu de la travée principale. Lors des différentes simulations numériques, le module d'élasticité dans les zones fissurées est réduit progressivement de 100% à 75%, 50% et 25%. La rigidité de la section du pont C1, lorsque les armatures sont plastifiées, correspond à environ 25% de la rigidité calculée en stade homogène.

L'amortissement basé sur un amortissement de Rayleigh (5.3.2) est défini avec les mêmes rapports d'amortissement modaux que ceux du modèle en trois dimensions.

Le profil B (5.4), dont la qualité de la planéité correspond à celle d'un revêtement autoroutier usé, est utilisé lors des simulations numériques du passage du camion.

Le modèle du véhicule (Figure 7.2) est défini dans un plan pour être cohérent avec la modélisation du pont. La masse de chacune des roues d'un essieu est regroupée pour représenter la masse totale de l'essieu. Les lois de comportement des suspensions individuelles sont modifiées pour modéliser la suspension sur chacun des essieux de même que la rigidité et l'amortissement des pneus. Le véhicule en deux dimensions présente les mêmes caractéristiques dynamiques que le camion défini dans l'espace, à l'exception du mouvement de roulis.

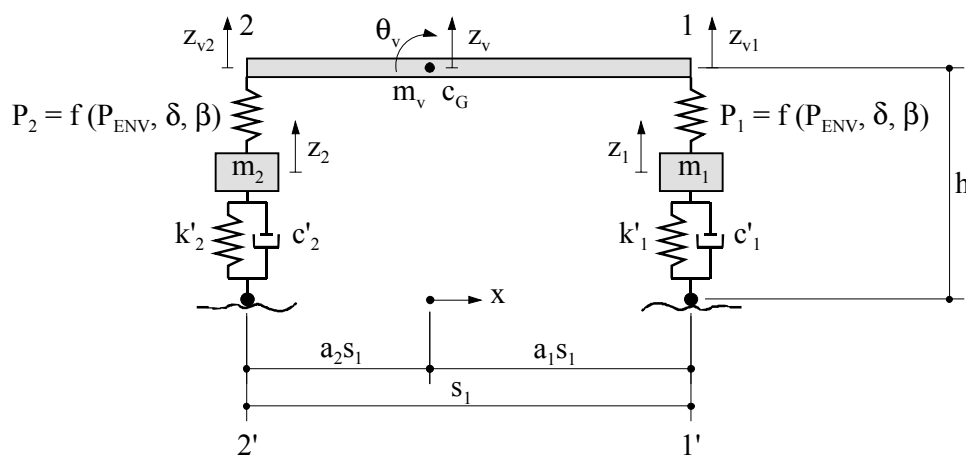


Figure 7.2 Modèle en 2D du camion 11

Des passages du camion circulant à la vitesse de 100 km/h sont effectués pour déterminer les réponses dynamiques des efforts et des déplacements du pont. Dix jauges numériques sont placées sur le modèle afin de calculer les effets pour lesquels les facteurs d'amplification dynamique sont déterminés (Figure 7.3). Les facteurs d'amplification dynamique obtenus pour chaque passage en considérant une réduction progressive du module d'élasticité fournissent une indication sur l'influence des non-linéarités matérielles.

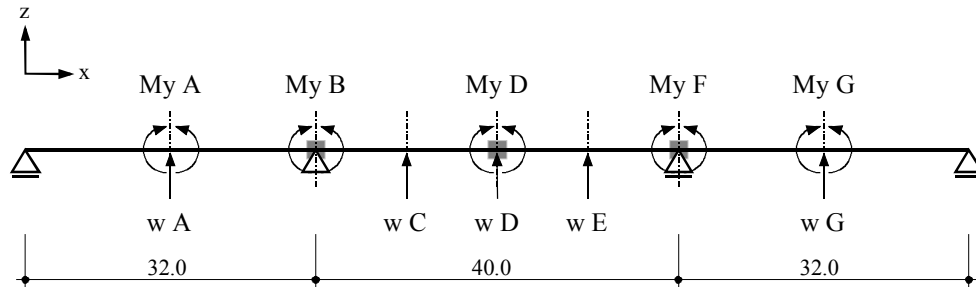


Figure 7.3 Jauges numériques sur le modèle en 2D du pont C1

#### 7.2.4 Résultats des simulations

Les déplacements verticaux et les moments de flexion maximums déterminés par les réponses statiques produites par le camion 11 sont exprimés en fonction des modules d'élasticité réduits dans les zones fissurées sur les appuis intermédiaires et au milieu de la travée principale (Figure 7.4 et Figure 7.5). Les effets positifs et négatifs sont présentés sur des graphiques séparés dans lesquels les effets déterminants et soulageants sont symbolisés respectivement en noir et en gris. Les facteurs d'amplification dynamique correspondants, exprimés en fonction des modules d'élasticité réduits dans les sections fissurées, sont présentés sur des graphiques semblables pour les déplacements verticaux (Figure 7.6) et pour les moments de flexion (Figure 7.7).

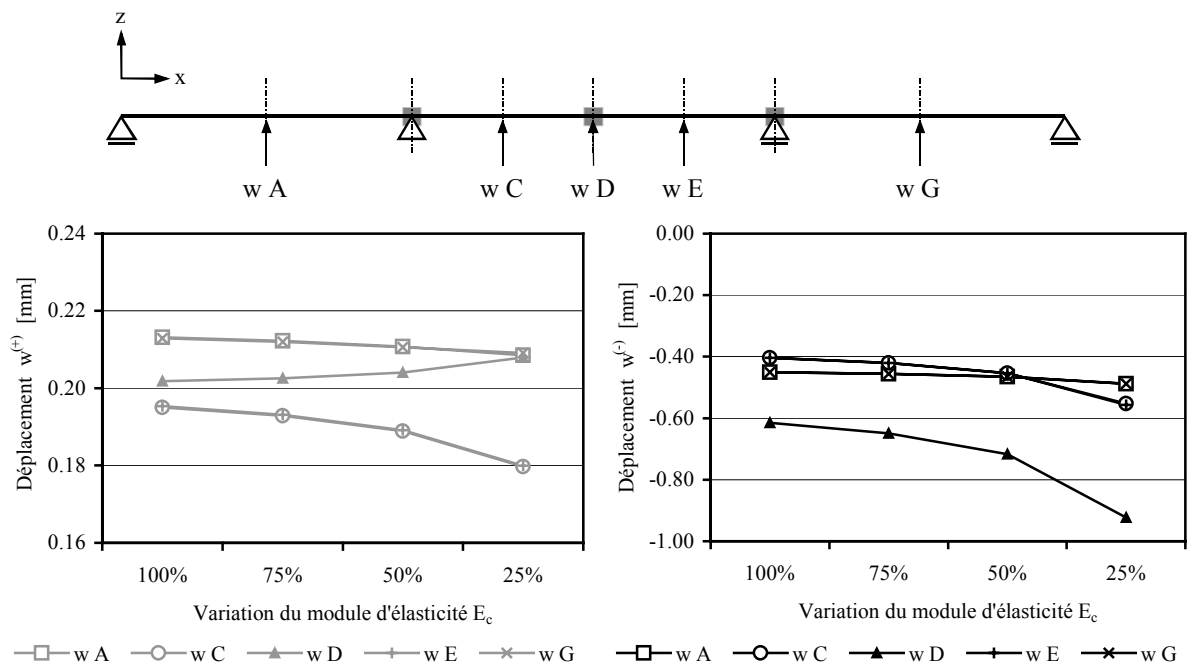


Figure 7.4 Déplacements verticaux pour des modules d'élasticité réduits

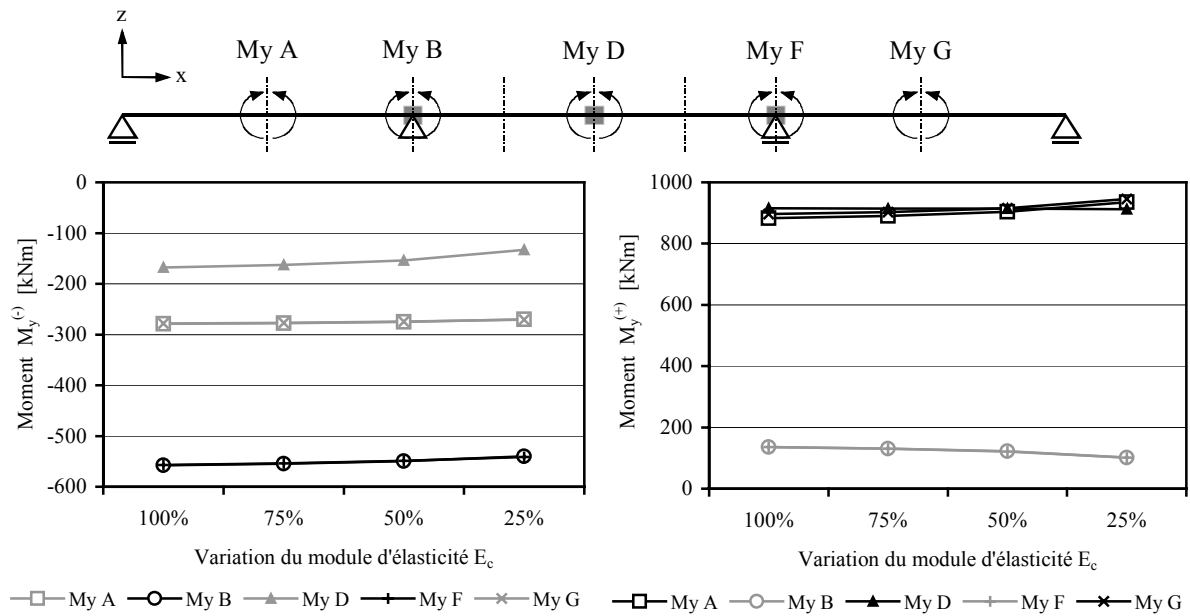


Figure 7.5 Moments de flexion pour des modules d'élasticité réduits

Une diminution de la rigidité sur les appuis intermédiaires et au milieu de la travée principale entraîne une augmentation des flèches  $w^{(-)}$  dans les trois travées. Les moments négatifs  $M_y^{(-)}$  sur les appuis diminuent. Les moments positifs  $M_y^{(+)}$  dans les deux travées de rive augmentent alors que le moment  $M_y^{(+)}$  au milieu de la travée principale reste constant. Les moments soulageants (symbolisés en gris) diminuent dans toutes les sections.

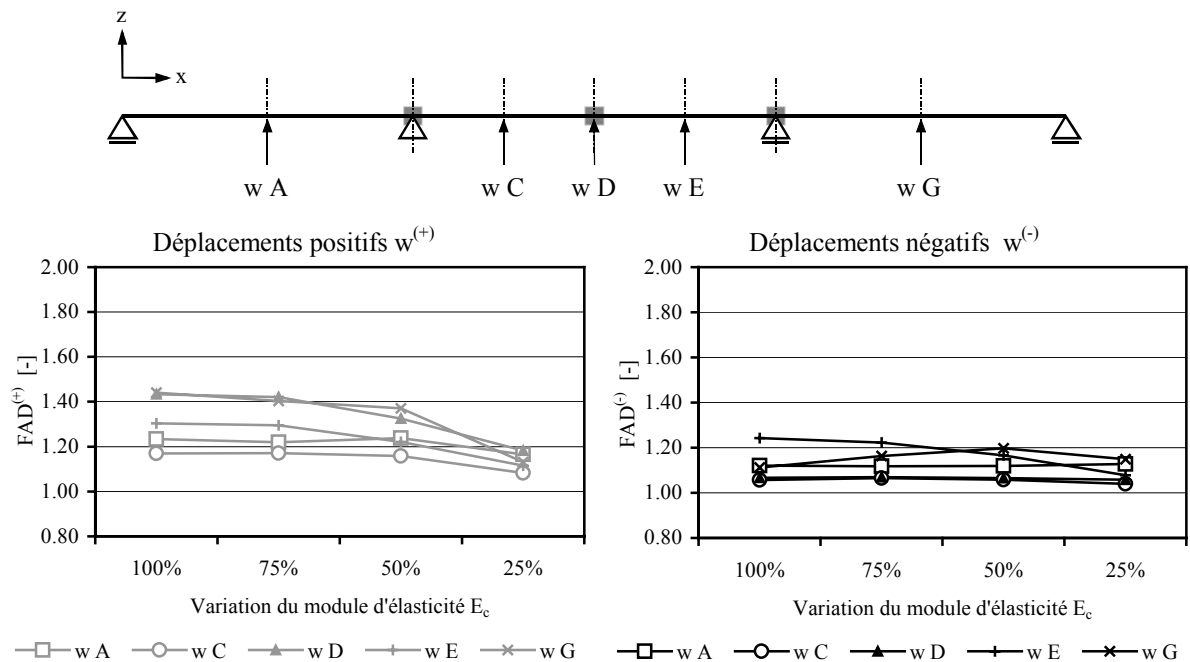


Figure 7.6 FAD des déplacements verticaux pour des modules d'élasticité réduits

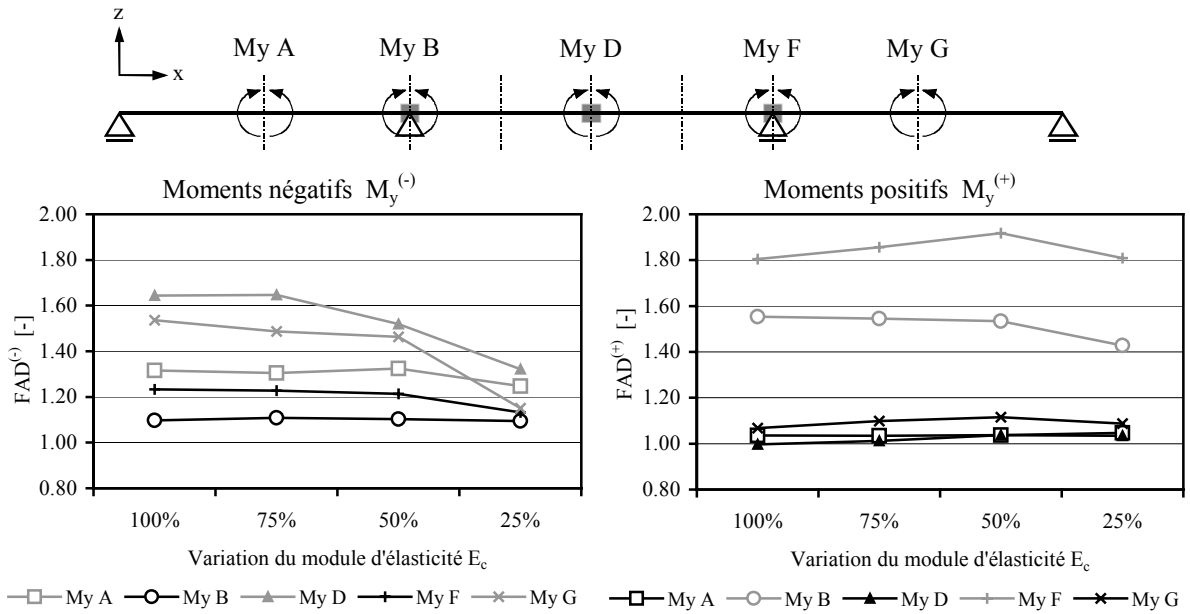


Figure 7.7 FAD des moments de flexion pour des modules d'élasticité réduits

Les facteurs d'amplification dynamique des déplacements verticaux  $w^{(-)}$  sont peu influencés par la réduction locale de la rigidité de la poutre, malgré les variations dans la section E (1.18 - 1.24) et G (1.11 - 1.16). La modification de la rigidité sur les appuis intermédiaires et au milieu de la travée principale influence peu les facteurs d'amplification dynamique des moments déterminants  $M_y^{(-)}$  dans les sections B et F et  $M_y^{(+)}$  dans les sections A, D et G.

Dans une même section, le facteur d'amplification dynamique du moment déterminant est plus faible que celui du déplacement vertical (Figure 7.8).

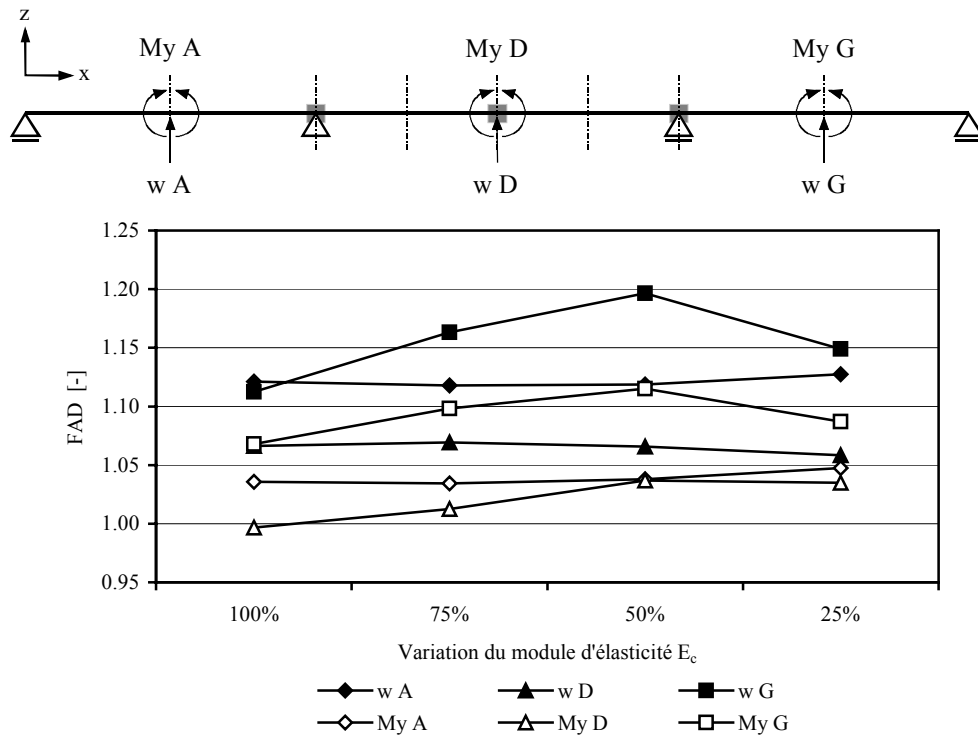


Figure 7.8 FAD des moments et des déplacements dans une même section



Les facteurs d'amplification dynamique des effets soulageants (déplacements et moments) sont toujours supérieurs à ceux des effets déterminants, ce qui est en accord avec les résultats obtenus sur les modèles en trois dimensions des différents ponts. De plus, les facteurs d'amplification dynamique déterminés sur le modèle en deux dimensions sont proches de ceux obtenus pour les effets dans les dalles de roulement.

### 7.2.5 Caractéristiques dynamiques

Les modes et les fréquences propres du modèle simplifié du pont C1 sont déterminés en considérant la réduction du module d'élasticité du béton dans les zones fissurées afin d'apprécier la variation des caractéristiques dynamiques (Tableau 7.1).

Le changement de rigidité entraîne une diminution des fréquences propres, mais les formes modales ne sont pas influencées (Figure 7.9).

Modes	Fréquences [Hz]			
	$E_c = 35'000 \text{ kN/m}^2$	$E_c = 26'250 \text{ kN/m}^2$	$E_c = 17'500 \text{ kN/m}^2$	$E_c = 8'750 \text{ kN/m}^2$
1	3.58	3.54	3.46	3.24
2	5.50	5.46	5.38	5.21
3	6.86	6.70	6.41	5.85
4	12.02	11.83	11.48	10.60
5	13.78	13.68	13.48	13.04
6	15.73	15.55	15.19	14.17
7	19.43	19.31	19.11	18.74
8	21.30	20.98	20.48	19.62

Tableau 7.1 Fréquences propres du modèle simplifié du pont C1

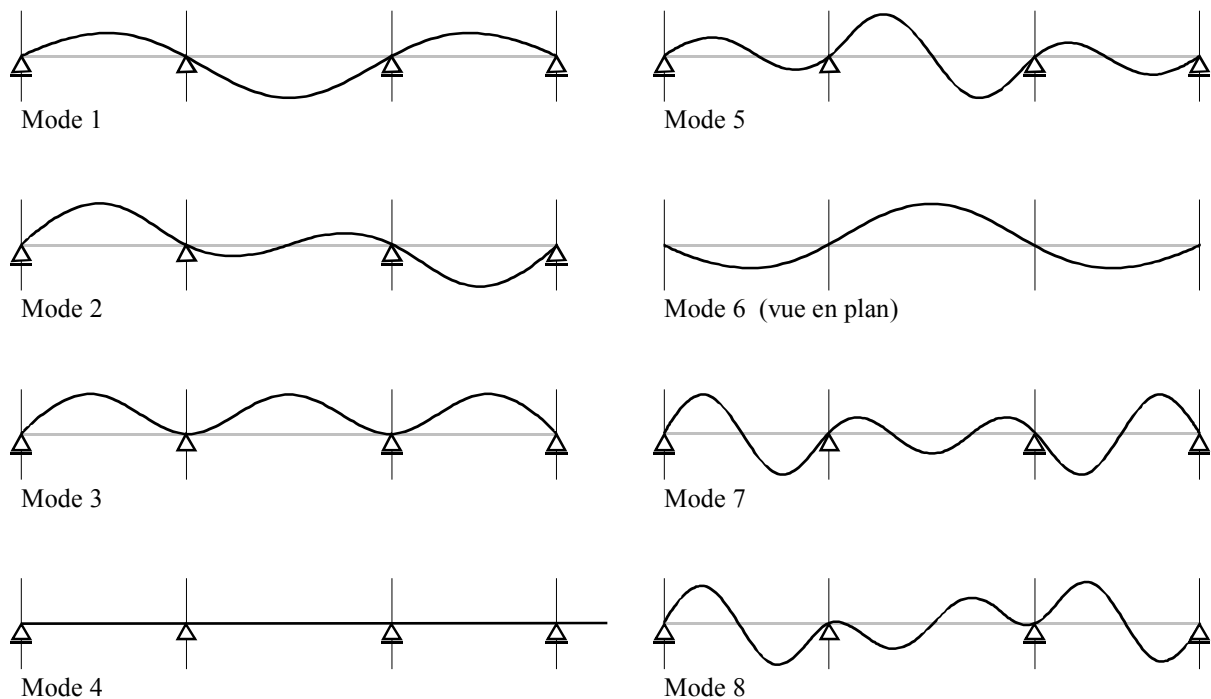


Figure 7.9 Modes propres du modèle simplifié du pont C1

### 7.2.6 Discussion

La faible variation des facteurs d'amplification dynamique induite par les modifications de la rigidité apportées au modèle du pont C1 s'explique par les changements relativement faibles intervenus au niveau des modes et des fréquences propres de la structure. Ces modifications n'ont pas décalé suffisamment les fréquences du pont relativement à celles du véhicule pour développer un phénomène de quasi-résonance.

Les résultats obtenus n'excluent pas que dans certaines situations spécifiques, un décalage des fréquences de vibration du pont permet de synchroniser les mouvements du pont et du véhicule ou, au contraire, de rompre une synchronisation existante. Il en résulterait respectivement une augmentation ou une diminution des facteurs d'amplification dynamique.

Ces résultats, basés sur les calculs effectués dans une poutre, sont aussi valables pour les dalles dans la mesure où le comportement d'une dalle à l'approche de la ruine est déterminé, tout comme pour les poutres, par le développement de fissures dans les zones fortement sollicitées. Par analogie avec le cas des poutres, la diminution locale de la rigidité à l'intérieur de ces zones fissurées qui définissent les lignes de rupture, influence peu le comportement dynamique de la structure.

La simplicité de l'approche utilisée pour analyser l'effet des non-linéarités matérielles sur le comportement dynamique du pont traversé par un véhicule nécessite toutefois quelques réserves relatives aux conclusions.

## 7.3 Modèles proposés pour le camion à trois essieux

### 7.3.1 Généralités

Le modèle de véhicule à 7 degrés de liberté (Figure 5.8) est trop approximatif pour considérer correctement des camions à trois essieux avec des essieux tandem à l'arrière, car la disposition des charges est très grossière et le mouvement de tangage du tandem n'est pas représenté. Le but est donc de développer des modèles de véhicule à trois axes avec des essieux tandem pour simuler la disposition et la variation de l'intensité des charges exercées sur un pont par ces véhicules en fonction du temps.

### 7.3.2 Systèmes de suspensions et de liaisons des essieux tandem

Plusieurs configurations d'essieux tandem existent pour équiper les camions simples, les tracteurs des semi-remorques ou les remorques. Deux variantes avec des suspensions à lames d'acier sont retenues pour le camion simple à trois essieux (Figure 7.10 et Figure 7.11).

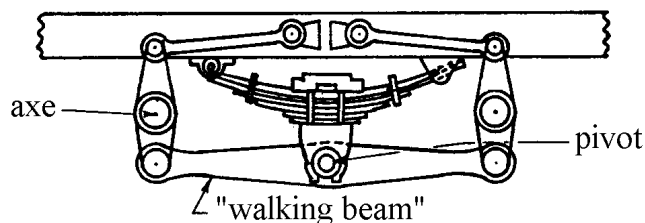


Figure 7.10 Système de suspension des essieux tandem, type "walking beam"

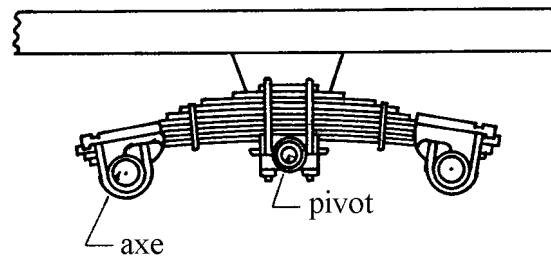


Figure 7.11 Système de suspension des essieux tandem

### 7.3.3 Conception des modèles

Pour des raisons de clarté et de simplicité, les développements sont effectués pour une représentation en deux dimensions des véhicules. L'extension vers la troisième dimension ne pose pas de difficultés particulières.

Les deux modèles étudiés se basent sur le modèle de véhicule à deux essieux (5.5.1). Le système à 7 degrés de liberté modélisant le véhicule à deux essieux simples se réduit, en deux dimensions, à 4 variables indépendantes décrivant respectivement le mouvement vertical des deux essieux et des deux extrémités du corps du véhicule. Seule la partie arrière constituée par la masse de l'essieu, les suspensions et les pneus est modifiée. Dans les développements suivants, le comportement des suspensions est représenté par une rigidité constante et par un amortissement visqueux. Le comportement non linéaire des suspensions (4.3.2) pourra être considéré, lors de la résolution du système, par le biais de la rigidité tangente [19].

Pour le premier type d'essieux tandem (walking beam) (Figure 7.10), le pivot se déplace essentiellement verticalement par rapport au châssis du véhicule et ce mouvement dépend de la flexibilité de la suspension. Dans le modèle (Figure 7.12), ce point est lié au corps du véhicule par un ressort représentant la suspension à laquelle un amortisseur visqueux est ajouté en parallèle. La déformation de la poutre pivotante est très faible comparée au déplacement relatif de la suspension; par conséquent, cet élément est considéré comme infiniment rigide. Les essieux du tandem de masse  $m_i$  sont attachés à chacune des extrémités de la poutre dont la masse est confondue à celle des essieux. Les pneus des roues de chaque essieu sont modélisés, comme dans le modèle de véhicule à deux essieux, par un montage en parallèle d'un ressort et d'un pot visqueux. Le champ de déplacements de ce modèle de véhicule (Modèle 12\_A) est défini à l'instant  $t$  par 6 variables indépendantes:  $z_1(t)$ ,  $z_2(t)$ ,  $z_3(t)$ ,  $z_v(t)$ ,  $\theta_v(t)$ , et  $x_v(t)$ .

Dans la deuxième variante d'essieux tandem (Figure 7.11), la suspension et la liaison constituent un seul élément aux extrémités duquel sont fixés les axes. Le mouvement de chaque essieu par rapport au châssis peut se décomposer d'une part, par un mouvement de rotation sans déformation autour du pivot et d'autre part, par un mouvement vertical de l'essieu dû à la flexibilité des lames de la suspension sans rotation de ces dernières. La distinction de ces mouvements facilite la modélisation. La rotation de l'ensemble est représentée par le mouvement d'une barre pivotante infiniment rigide de masse  $m_L$  attachée à l'extrémité du corps rigide du véhicule (Figure 7.13). La flexion de chacun des porte-à-faux formant la suspension est modélisée par un ressort et un amortisseur visqueux liés à chaque extrémité de la barre pivotante et aux masses  $m_i$  indépendantes des deux essieux. Comme dans le modèle précédent, les pneus des roues de chaque essieu sont représentés par un ressort et un pot visqueux mis en parallèle. Les mouvements de ce modèle de véhicule (Modèle 12\_B) sont décrits à l'instant  $t$  par 7 variables indépendantes:  $z_1(t)$ ,  $z_2(t)$ ,  $z_3(t)$ ,  $z_v(t)$ ,  $\theta_v(t)$ ,  $\theta_L(t)$  et  $x_v(t)$ .

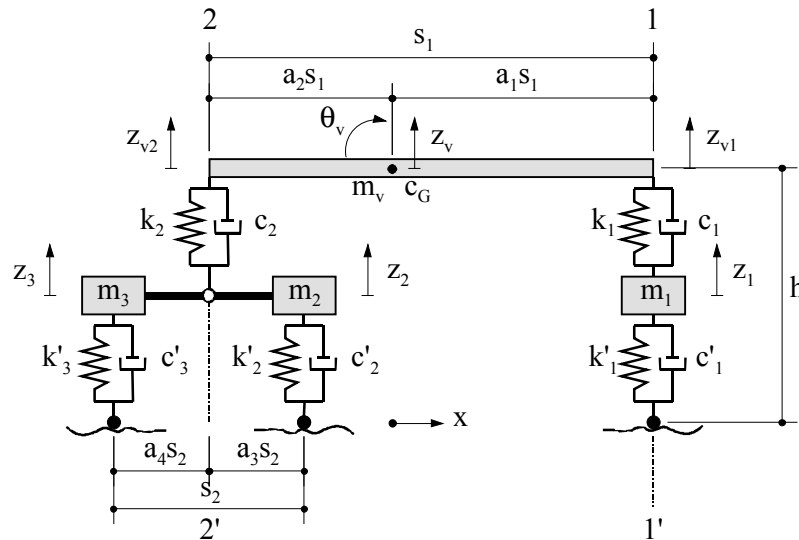


Figure 7.12 Modèle 12\_A du camion à trois essieux

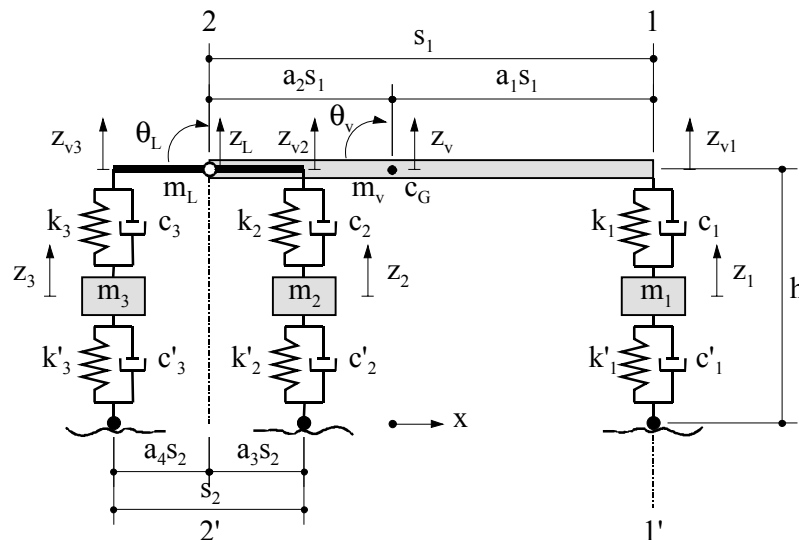


Figure 7.13 Modèle 12\_B du camion à trois essieux

Ces deux modèles proposés ne tiennent pas compte du frottement qui existe au niveau du pivot.

La démarche conduisant aux équations de mouvement de ces modèles de véhicule est similaire. Les éléments essentiels du développement de ces deux modèles sont décrits pour aboutir finalement aux équations de mouvement du système. Dans l'annexe C, les équations de mouvement sont résumées sous la forme des matrices de masse  $M$ , d'amortissement  $C$ , de rigidité  $K$  et du vecteur force  $F$  pour les deux modèles en deux dimensions développés ci-dessous ainsi que pour les modèles correspondants en trois dimensions.

### 7.3.4 Hypothèses de base

Les hypothèses suivantes constituent la base du développement mathématique des deux modèles de véhicule:

1. Les pneus du véhicule demeurent en contact permanent avec la chaussée. Les cotes  $w_i$  des points de contact s'expriment par:

$$w_i(t) = w(x_i(t), y_i(t), t) + r(x_i(t), y_i(t)) \quad (7.1)$$

où  $w(x_i, y_i, t)$  est le déplacement vertical du pont au point de contact de coordonnées  $x_i$  et  $y_i$  à l'instant  $t$  et  $r(x_i, y_i)$  est la cote du profil de la chaussée au point  $x_i, y_i$ .

2. Les axes 1-1' et 2-2' conservent leur orientation par rapport au véhicule. Le glissement relatif du corps rigide par rapport aux essieux est considéré comme négligeable.

$$x_v = x_1 - a_1 s_1 \cos \theta_v + (h + \Delta_1 + \Delta'_1) \sin \theta_v \quad (7.2)$$

où  $\Delta_1$  est le déplacement relatif des extrémités de la suspension définie par  $k_1$  et  $c_1$  et  $h$  est la cote du centre de gravité du véhicule mesurée depuis le niveau initial de la chaussée.

3. La rotation du véhicule est considérée petite

$$\begin{aligned} \cos \theta_v &\cong 1 \\ \sin \theta_v &\cong \theta_v \end{aligned} \quad (7.3)$$

ainsi, en négligeant les termes de second ordre en  $\Delta_1$ ,  $x_v$  s'écrit:

$$x_v = x_1 - a_1 s_1 + h \theta_v \quad (7.4)$$

Les équations de mouvement des véhicules sont établies en appliquant le principe des travaux virtuels qui stipule que pour tout champ de déplacements cinématiquement admissible, le travail effectué par les efforts internes et externes est nul.

### 7.3.5 Mise en équations du modèle 12\_A

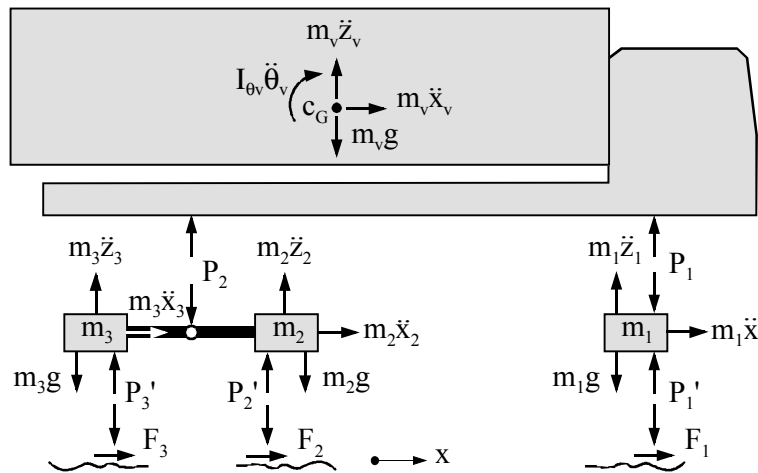


Figure 7.14 Schéma d'équilibre des forces du modèle 12\_A

L'équation des travaux virtuels appliquée au modèle 12\_A prend la forme suivante:

$$\begin{aligned} W = \sum_{i=1}^2 P_i \Delta_i^* + \sum_{j=1}^3 [P_j' \Delta_j^* + m_j \ddot{z}_j z_j^* + m_j g z_j^* + m_j \ddot{x}_j x_j^* + F_j x_j^*] \\ + [m_v \ddot{z}_v z_v^* + m_v g z_v^* + m_v \ddot{x}_v x_v^* + I_{\theta_v} \ddot{\theta}_v \theta_v^*] = 0 \end{aligned} \quad (7.5)$$

où les différents termes sont définis comme suit:

- $W$  est le travail virtuel total du véhicule  
 $P_i, P_j'$  sont les forces dans les suspensions et dans les pneus

$F_j$	sont les forces de frottement au contact des pneus et de la chaussée
$m_j$	sont les masses des roues et des essieux
$m_v, I_{\theta_v}$	sont respectivement la masse et le moment d'inertie de la masse du corps du véhicule
$g$	est l'accélération de la gravité
$\Delta_i, \Delta_i^*, \Delta_j', \Delta_j'^*$	sont respectivement les déplacements relatifs et les déplacements relatifs virtuels des suspensions et des pneus
$x_j, x_j^*, z_j, z_j^*$	sont respectivement les déplacements et les déplacements virtuels des pneus selon l'axe horizontal et vertical
$x_v, x_v^*, z_v, z_v^*$	sont respectivement les déplacements et les déplacements virtuels du corps du véhicule selon l'axe horizontal et vertical
$\theta_v, \theta_v^*$	sont respectivement la rotation et la rotation virtuelle du corps du véhicule

La rotation  $\theta_v$  et les déplacements  $x_v$  et  $z_v$  sont exprimés en fonction des variables cinématiques  $z_{vi}$  pour rendre homogène l'ensemble des variables du modèle.

$$\theta_v = \frac{z_{v2} - z_{v1}}{s_1}$$

$$x_v = x_1 + \frac{h}{s_1}(z_{v2} - z_{v1}) - a_1 s_1$$

$$z_v = a_1 z_{v2} + a_2 z_{v1} \quad (7.6)$$

Les déplacements relatifs des suspensions  $\Delta_i$  et des pneus  $\Delta_j'$  sont donnés par:

$$\Delta_1 = z_{v1} - z_1, \quad \Delta_2 = z_{v2} - (a_4 z_2 + a_3 z_3)$$

$$\Delta_j' = z_j - w(x_j, y_j, t) - r(x_j, y_j) \quad j=1, 2, 3 \quad (7.7)$$

et les déplacements relatifs virtuels correspondants  $\Delta_i^*$  et  $\Delta_j'^*$  sont:

$$\Delta_1^* = z_{v1}^* - z_1^*, \quad \Delta_2^* = z_{v2}^* - (a_4 z_2^* + a_3 z_3^*)$$

$$\Delta_j'^* = z_j^* - w^* - \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_j} x_j^* \quad j=1, 2, 3 \quad (7.8)$$

Le comportement des suspensions et des pneus est linéaire et l'amortissement est de type visqueux.

$$P_1 = k_1(z_{v1} - z_1) + c_1(\dot{z}_{v1} - \dot{z}_1)$$

$$P_2 = k_2(z_{v2} - a_4 z_2 - a_3 z_3) + c_2(\dot{z}_{v2} - a_4 \dot{z}_2 - a_3 \dot{z}_3)$$

$$P_j' = k_j' [z_j - w(x_j, y_j, t) - r(x_j, y_j)] + c_j' [\dot{z}_j - \dot{w}(x_j, y_j, t) - \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_j} \dot{x}_j] \quad j=1, 2, 3 \quad (7.9)$$

L'équation des travaux virtuels permet d'obtenir les équations pour chaque degré de liberté du modèle 12\_A en remplaçant les différents termes par les relations données éq. (7.6 à 7.9) et en rejetant la solution triviale pour laquelle tous les déplacements, vitesses et accélérations sont nuls.

$$\mathbf{z}_1 \begin{aligned} & m_1 \ddot{z}_1 + (k_1 + k_1') z_1 - k_1 z_{v1} + (c_1 + c_1') \dot{z}_1 - c_1 \dot{z}_{v1} = \\ & - m_1 g + k_1' [w(x_1, y_1, t) + r(x_1, y_1)] + c_1' \left[ \dot{w}(x_1, y_1, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_1} \dot{x}_1 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{z}_2 \quad & m_2 \ddot{z}_2 + (k_2 a_4^2 + k'_2) z_2 + k_2 a_3 a_4 z_3 - k_2 a_4 z_{v2} + (c_2 a_4^2 + c'_2) \dot{z}_2 + c_2 a_3 a_4 \dot{z}_3 - c_2 a_4 \dot{z}_{v2} = \\
 & - m_2 g + k'_2 [w(x_2, y_2, t) + r(x_2, y_2)] + c'_2 [\dot{w}(x_2, y_2, t) + (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x})_{x=x_2} \dot{x}_1] \\
 \mathbf{z}_3 \quad & m_3 \ddot{z}_3 + k_2 a_3 a_4 z_2 + (k_2 a_3^2 + k'_3) z_3 - k_2 a_3 z_{v2} + c_2 a_3 a_4 \dot{z}_2 + (c_2 a_3^2 + c'_3) \dot{z}_3 - c_2 a_3 \dot{z}_{v2} = \\
 & - m_3 g + k'_3 [w(x_3, y_3, t) + r(x_3, y_3)] + c'_3 [\dot{w}(x_3, y_3, t) + (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x})_{x=x_3} \dot{x}_1] \\
 \mathbf{z}_{v1} \quad & - k_1 z_1 + k_1 z_{v1} - c_1 \dot{z}_1 + c_1 \dot{z}_{v1} + \ddot{z}_{v1} [m_v a_2^2 + m_v \frac{h^2}{s_1^2} + \frac{I_{\theta v}}{s_1^2}] + \ddot{z}_{v2} [m_v a_1 a_2 - m_v \frac{h^2}{s_1^2} - \frac{I_{\theta v}}{s_1^2}] = \\
 & - a_2 m_v g + m_v \frac{h}{s_1} \ddot{x}_1 \\
 \mathbf{z}_{v2} \quad & - k_2 a_4 z_2 - k_2 a_3 z_3 + k_2 z_{v2} - c_2 a_4 \dot{z}_2 - c_2 a_3 \dot{z}_3 + c_2 \dot{z}_{v2} + \ddot{z}_{v1} [m_v a_1 a_2 - m_v \frac{h^2}{s_1^2} - \frac{I_{\theta v}}{s_1^2}] \\
 & + \ddot{z}_{v2} [m_v a_1^2 + m_v \frac{h^2}{s_1^2} + \frac{I_{\theta v}}{s_1^2}] = - a_1 m_v g - m_v \frac{h}{s_1} \ddot{x}_1 \\
 \mathbf{x}_1 \quad & - P'_1 (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x})_{x=x_1} - P'_2 (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x})_{x=x_2} - P'_3 (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x})_{x=x_3} + F_1 + F_2 + F_3 \\
 & + m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3 + m_v \ddot{x}_1 + m_v \frac{h}{s_1} [\ddot{z}_{v2} - \ddot{z}_{v1}] = 0
 \end{aligned} \tag{7.10}$$

### 7.3.6 Mise en équations du modèle 12\_B

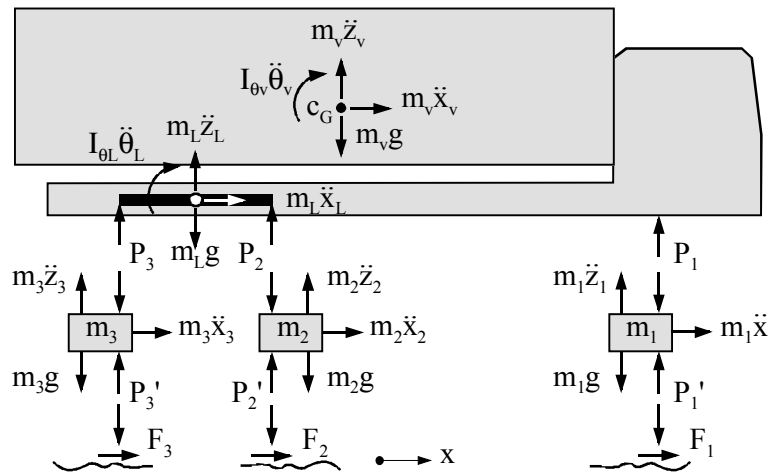


Figure 7.15 Schéma d'équilibre des forces du modèle 12\_B

L'équation des travaux virtuels appliquée au modèle 12\_B prend la forme suivante:

$$\begin{aligned}
 W = & \sum_{i=1}^3 P_i \Delta_i^* + \sum_{j=1}^3 [P'_j \Delta'_j{}^* + m_j \ddot{z}_j z_j^* + m_j g z_j^* + m_j \ddot{x}_j x_j^* + F_j x_j^*] \\
 & + \sum_{k=v,L} [m_k \ddot{z}_k z_k^* + m_k g z_k^* + m_k \ddot{x}_k x_k^* + I_{\theta k} \ddot{\theta}_k \theta_k^*] = 0
 \end{aligned} \tag{7.11}$$

où les différents termes sont définis comme suit:

$W$  est le travail virtuel total du véhicule

$P_i, P_j'$	sont les forces dans les suspensions et dans les pneus
$F_j$	sont les forces de frottement au contact des pneus et de la chaussée
$m_j$	sont les masses des roues et des essieux
$m_k, I_{\theta k}$	sont respectivement la masse et le moment d'inertie de la masse du corps du véhicule et de la liaison des essieux tandem
$g$	est l'accélération de la gravité
$\Delta_i, \Delta_i^*, \Delta_j', \Delta_j'^*$	sont respectivement les déplacements relatifs et les déplacements relatifs virtuels des suspensions et des pneus
$x_j, x_j^*, z_j, z_j^*$	sont respectivement les déplacements et les déplacements virtuels des pneus selon l'axe horizontal et vertical
$x_k, x_k^*, z_k, z_k^*$	sont respectivement les déplacements et les déplacements virtuels du corps du véhicule et de la liaison des essieux tandem selon l'axe horizontal et vertical
$\theta_k, \theta_k^*$	sont respectivement la rotation et la rotation virtuelle du corps du véhicule et de la liaison des essieux tandem

Les rotations  $\theta_v$  et  $\theta_L$  ainsi que les déplacements  $x_v, x_L, z_v$  et  $z_L$  sont exprimés en fonction des variables cinématiques  $z_{vi}$  pour rendre homogène l'ensemble des variables du modèle.

$$z_L = a_3 z_{v3} + a_4 z_{v2}$$

$$z_v = a_1 a_3 z_{v3} + a_1 a_4 z_{v2} + a_2 z_{v1}$$

$$\theta_L = \frac{z_{v3} - z_{v2}}{s_2}$$

$$\theta_v = \frac{a_3 z_{v3} + a_4 z_{v2} - z_{v1}}{s_1}$$

$$x_L = x_1 - s_1 + \frac{h}{s_1} (a_3 z_{v3} + a_4 z_{v2} - z_{v1})$$

$$x_v = x_1 - a_1 s_1 + \frac{h}{s_1} (a_3 z_{v3} + a_4 z_{v2} - z_{v1}) \quad (7.12)$$

Les déplacements relatifs des suspensions  $\Delta_i$  et des pneus  $\Delta_j'$  sont donnés par:

$$\Delta_i = z_{vi} - z_i \quad i = 1, 2, 3$$

$$\Delta_j' = z_j - w(x_j, y_j, t) - r(x_j, y_j) \quad j = 1, 2, 3 \quad (7.13)$$

et les déplacements relatifs virtuels correspondants  $\Delta_i^*$  et  $\Delta_j'^*$  sont:

$$\Delta_i^* = z_{vi}^* - z_i^* \quad i = 1, 2, 3$$

$$\Delta_j'^* = z_j^* - w^* - \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_j} x_j^* \quad j = 1, 2, 3 \quad (7.14)$$

Le comportement des suspensions et des pneus est linéaire et l'amortissement est visqueux.

$$P_i = k_i (z_{vi} - z_i) + c_i (\dot{z}_{vi} - \dot{z}_i) \quad i = 1, 2, 3$$

$$P_j' = k_j' [z_j - w(x_j, y_j, t) - r(x_j, y_j)] + c_j' [\dot{z}_j - \dot{w}(x_j, y_j, t) - \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_j} \dot{x}_j] \quad j = 1, 2, 3 \quad (7.15)$$



L'équation des travaux virtuels permet d'obtenir les équations de chaque degré de liberté du modèle 12\_B en remplaçant les différents termes par les relations données éq. (7.12 à 7.15) et en rejetant la solution triviale pour laquelle tous les déplacements, vitesses et accélérations sont nuls.

$$\begin{aligned}
& m_1 \ddot{z}_1 + (k_1 + k'_1) z_1 - k_1 z_{v1} + (c_1 + c'_1) \dot{z}_1 - c_1 \dot{z}_{v1} = \\
\mathbf{z}_1 & - m_1 g + k'_1 [w(x_1, y_1, t) + r(x_1, y_1)] + c'_1 \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 \ddot{z}_2 + (k_2 + k'_2) z_2 - k_2 z_{v2} + (c_2 + c'_2) \dot{z}_2 - c_2 \dot{z}_{v2} = \\
\mathbf{z}_2 & - m_2 g + k'_2 [w(x_2, y_2, t) + r(x_2, y_2)] + c'_2 \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 \ddot{z}_3 + (k_3 + k'_3) z_3 - k_3 z_{v3} + (c_3 + c'_3) \dot{z}_3 - c_3 \dot{z}_{v3} = \\
\mathbf{z}_3 & - m_3 g + k'_3 [w(x_3, y_3, t) + r(x_3, y_3)] + c'_3 \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] \\
& - k_1 z_1 + k_1 z_{v1} - c_1 \dot{z}_1 + c_1 \dot{z}_{v1} + \ddot{z}_{v1} \left[ m_v a_2^2 + (m_v + m_L) \frac{h^2}{s_1^2} + \frac{I_{\theta v}}{s_1^2} \right] \\
\mathbf{z}_{v1} & + \ddot{z}_{v2} \left[ m_v a_1 a_2 a_4 - (m_v + m_L) \frac{a_4 h^2}{s_1^2} - \frac{a_4}{s_1^2} I_{\theta v} \right] + \ddot{z}_{v3} \left[ m_v a_1 a_2 a_3 - (m_v + m_L) \frac{a_3 h^2}{s_1^2} - \frac{a_3}{s_1^2} I_{\theta v} \right] \\
& = -a_2 m_v g + (m_v + m_L) \frac{h}{s_1} \ddot{x}_1 \\
& - k_2 z_2 + k_2 z_{v2} - c_2 \dot{z}_2 + c_2 \dot{z}_{v2} + \ddot{z}_{v1} \left[ m_v a_1 a_2 a_4 - (m_v + m_L) \frac{a_4 h^2}{s_1^2} - \frac{a_4}{s_1^2} I_{\theta v} \right] \\
\mathbf{z}_{v2} & + \ddot{z}_{v2} \left[ m_v a_1^2 a_4^2 + m_L a_4^2 + (m_v + m_L) \frac{a_4^2 h^2}{s_1^2} + \frac{a_4^2}{s_1^2} I_{\theta v} + \frac{I_{\theta L}}{s_2^2} \right] \\
& + \ddot{z}_{v3} \left[ m_v a_1^2 a_3 a_4 + m_L a_3 a_4 + (m_v + m_L) \frac{a_3 a_4 h^2}{s_1^2} + \frac{a_3 a_4}{s_1^2} I_{\theta v} - \frac{I_{\theta L}}{s_2^2} \right] \\
& = -a_1 a_4 m_v g - a_4 m_L g - (m_v + m_L) \frac{a_4 h}{s_1} \ddot{x}_1 \\
& - k_3 z_3 + k_3 z_{v3} - c_3 \dot{z}_3 + c_3 \dot{z}_{v3} + \ddot{z}_{v1} \left[ m_v a_1 a_2 a_3 - (m_v + m_L) \frac{a_3 h^2}{s_1^2} - \frac{a_3}{s_1^2} I_{\theta v} \right] \\
\mathbf{z}_{v3} & + \ddot{z}_{v2} \left[ m_v a_1^2 a_3 a_4 + m_L a_3 a_4 + (m_v + m_L) \frac{a_3 a_4 h^2}{s_1^2} + \frac{a_3 a_4}{s_1^2} I_{\theta v} - \frac{I_{\theta L}}{s_2^2} \right] \\
& + \ddot{z}_{v3} \left[ m_v a_1^2 a_3^2 + m_L a_3^2 + (m_v + m_L) \frac{a_3^2 h^2}{s_1^2} + \frac{a_3^2}{s_1^2} I_{\theta v} + \frac{I_{\theta L}}{s_2^2} \right] \\
& = -a_1 a_3 m_v g - a_3 m_L g - (m_v + m_L) \frac{a_3 h}{s_1} \ddot{x}_1 \\
& - P'_1 \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_1} - P'_2 \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_2} - P'_3 \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_3} + F_1 + F_2 + F_3 \\
\mathbf{x}_1 & + m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3 + (m_v + m_L) \ddot{x}_1 - (m_v + m_L) \frac{h}{s_1} \dot{z}_{v1} \\
& + (m_v + m_L) \frac{a_4 h}{s_1} \dot{z}_{v2} + (m_v + m_L) \frac{a_3 h}{s_1} \dot{z}_{v3} = 0
\end{aligned} \tag{7.16}$$

La dernière équation de chaque système ( $x_1$ ) contient des termes difficiles à évaluer comme les forces de frottement  $F_j$ . Ces forces exercent peu d'influence sur le comportement dynamique du pont. Pour simplifier l'analyse, l'histoire de la progression du véhicule est supposée connue et cette équation peut être négligée. La fonction  $x_1(t)$  doit être une donnée du problème.

### 7.3.7 Simulations avec les modèles de camion à trois essieux

Des analyses sont effectuées afin de tester les deux modèles de véhicule. Le système d'équations de mouvement est résolu par intégration directe par la méthode de Newmark à accélération constante [32]. Un programme de calcul est réalisé pour simuler le déplacement du véhicule sur une surface rigide rugueuse générée aléatoirement. Le programme qui résout des modèles de véhicule à  $n$  degrés de liberté, est valable aussi bien pour le modèle 12\_A que pour le modèle 12\_B.

Les paramètres utilisés pour chaque modèle de véhicule (Tableau 7.2) correspondent à ceux du camion représentatif de type 12 (Chapitre 4). La rigidité des suspensions de chaque essieu est définie par la rigidité tangente évaluée sur les diagrammes force - déplacement (Figure 4.14 et Figure 4.15) pour la charge statique de l'essieu du camion chargé. L'amortissement visqueux dans les suspensions est fixé à 10% de l'amortissement critique.

Définitions	Paramètres	Modèle 12_A	Modèle 12_B
<b>Géométrie:</b>			
hauteur	$h$ [m]	1.8	1.8
espacement entre l'essieu avant et le tandem	$e$ [m]	5.55	5.55
position du centre de gravité	$c_g$ [m]	3.95	3.95
rapport des longueurs:			
$a_1$	$a_1$ [-]	0.71	0.71
$a_2$	$a_2$ [-]	0.29	0.29
$a_3$	$a_3$ [-]	0.50	0.50
$a_4$	$a_4$ [-]	0.50	0.50
<b>Masses:</b>			
du véhicule	$m_v$ [kg]	24'800	24'800
de la liaison entre essieux	$m_L$ [kg]	-	100
de l'essieu avant	$m_1$ [kg]	800	800
du 1 <sup>er</sup> essieu arrière	$m_2$ [kg]	1'200	1'200
du 2 <sup>ème</sup> essieu arrière	$m_3$ [kg]	1'200	1'200
moment d'inertie de la masse du véhicule	$I_{\theta v}$ [kgm <sup>2</sup> ]	241'359	241'359
moment d'inertie de la masse de la liaison	$I_{\theta L}$ [kgm <sup>2</sup> ]	-	75
<b>Rigidités:</b>			
de la suspension avant	$k_1$ [N/m]	520'000	520'000
de la (des) suspension(s) des essieux tandem	$k_2$ [N/m]	2'348'000	1'174'000
	$k_3$ [N/m]	-	1'174'000
des pneus avant	$k'_1$ [N/m]	2'000'000	2'000'000
des pneus du 1 <sup>er</sup> essieu arrière	$k'_2$ [N/m]	4'000'000	4'000'000
des pneus du 2 <sup>ème</sup> essieu arrière	$k'_3$ [N/m]	4'000'000	4'000'000
<b>Amortissements:</b>			
de la suspension avant	$c_1$ [Ns/m]	12'194	12'194
de la (des) suspension(s) des essieux tandem	$c_2$ [Ns/m]	40'715	20'357
	$c_3$ [Ns/m]	-	20'357
des pneus avant	$c'_1$ [Ns/m]	4'000	4'000
des pneus du 1 <sup>er</sup> essieu arrière	$c'_2$ [Ns/m]	6'928	6'928
des pneus du 2 <sup>ème</sup> essieu arrière	$c'_3$ [Ns/m]	6'928	6'928

Tableau 7.2 Paramètres des modèles de véhicule

Bien que les deux types de suspensions des essieux tandem soient différents, les rigidités sont choisies pour que les véhicules présentent le même comportement statique afin d'avoir une

base de comparaison. Ce choix a pour conséquence que les variations des forces appliquées sur la chaussée par les essieux de chaque modèle de véhicule sont proches (Figure 7.16 et Figure 7.17). La majeure partie du temps, les mouvements verticaux des essieux tandem sont déphasés ce qui entraîne une diminution de la variation globale de la force produite par le groupe d'essieux sur le sol. Seulement pour des conditions particulières du profil de la chaussée associées à l'espacement des essieux arrières et à la vitesse, les déplacements verticaux des essieux tandem se font en phase.

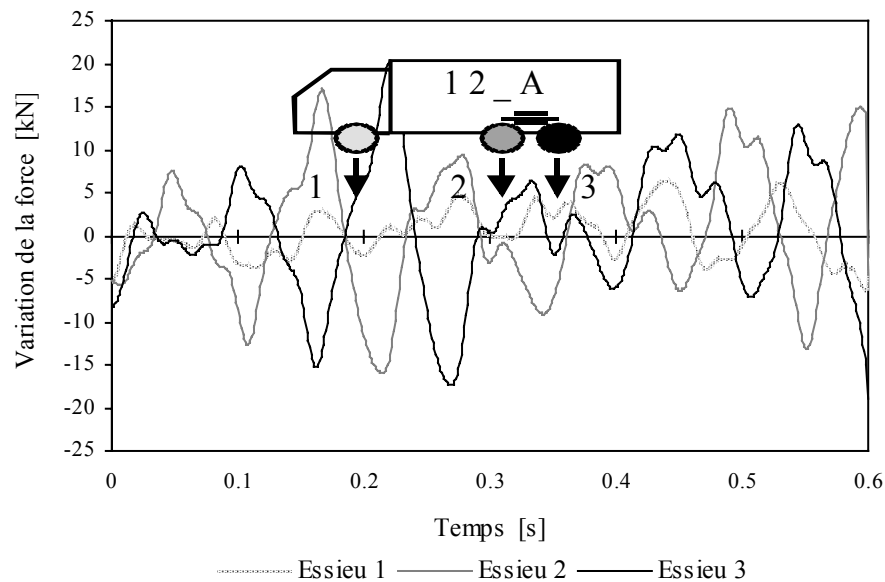


Figure 7.16 Variation des forces produites par le modèle 12\_A

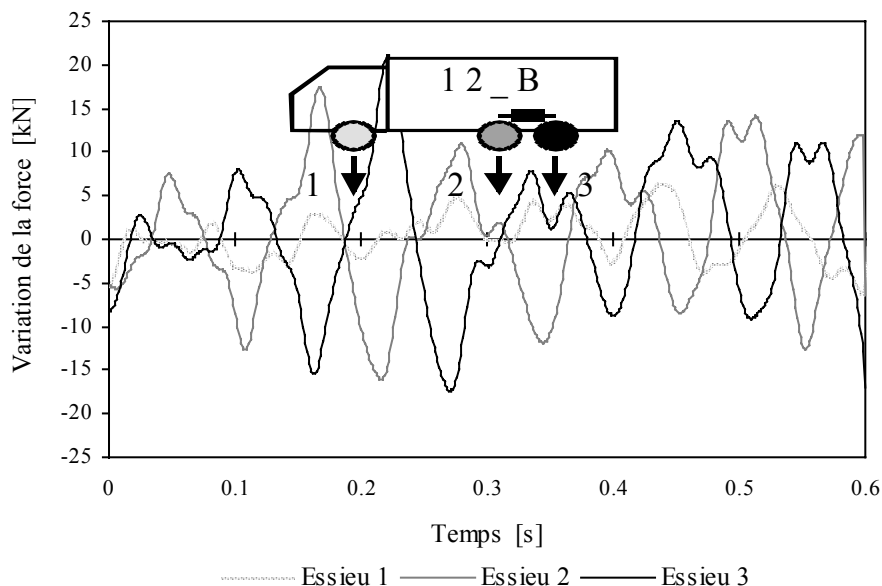


Figure 7.17 Variation des forces produites par le modèle 12\_B

### 7.3.8 Discussion

Ces résultats démontrent que les objectifs fixés sont atteints, car les deux modèles proposés permettent à la fois de simuler une disposition fidèle des charges des roues et le mouvement des essieux tandem déterminé par la liaison entre les axes.

Ces modèles sont plus favorables du point de vue statique, car contrairement au modèle de véhicule à deux essieux utilisé pour représenter le camion 12, où la charge totale des essieux tandem est concentrée sur deux points d'application, les nouveaux modèles représentent chaque roue. La répartition des charges des essieux tandem évite ainsi des concentrations d'efforts dans la structure. Au niveau dynamique, le mouvement déphasé des essieux tandem implique que la somme des variations des forces appliquées par chacun des essieux tandem est plus petite que la variation de la force appliquée par l'essieu équivalent du modèle de véhicule à deux essieux simples (5.5.1).

Les avantages apportés par ces modèles de véhicule à trois essieux sont principalement aux bénéfices des éléments structuraux placés à proximité de l'application des charges, donc des dalles de roulement.

## 7.4 Remarques finales

Les simulations du passage d'un véhicule sur un modèle en deux dimensions du pont C1 en considérant une diminution locale de la rigidité sur les appuis intermédiaires et au milieu de la travée principale, ont permis d'approcher le comportement dynamique de la structure à l'état ultime. Malgré les changements importants de la rigidité locale provoqués par le développement de fissures, le comportement dynamique du pont est peu modifié. Dans le cas particulier étudié, les facteurs d'amplification dynamique ont été peu influencés par les effets non linéaires.

Les équations du mouvement de deux modèles de véhicule avec des essieux tandem ont été développées en deux et en trois dimensions sur la base du principe des travaux virtuels. Les tests effectués avec ces modèles ont montré la validité de leur conception. Ces modèles de véhicule peuvent directement être implantés dans le logiciel d'éléments finis "CLEF", car ils sont cohérents avec les modèles déjà disponibles.

## Chapitre 8

# Application des facteurs d'amplification dynamique

### 8.1 Introduction

Ce chapitre traite de l'application des facteurs d'amplification dynamique obtenus dans les chapitres précédents pour l'évaluation des dalles de roulement des ponts en béton existants. Après avoir rappelé la portée des facteurs d'amplification dynamique, leur champ d'application est étendu afin de les utiliser avec des modèles de charge de trafic pour vérifier les états limites. Une démarche est proposée en deux volets pour évaluer une dalle de roulement en considérant les effets dynamiques provoqués par le trafic. Le premier volet pose les conditions pour effectuer une évaluation simplifiée basée sur une analyse statique et le second ouvre la voie d'une évaluation détaillée fondée sur une analyse dynamique.

Le chapitre comporte les quatre sections suivantes:

- **Portée des facteurs d'amplification dynamique**

La distinction entre l'analyse dynamique et l'analyse statique est mise en évidence pour montrer la signification des facteurs d'amplification dynamique. Un parallèle est tracé entre l'approche retenue dans ce travail et celle utilisée dans le domaine des essais dynamiques sur les ponts. Le caractère spécifique des facteurs d'amplification dynamique est abordé ainsi que les conséquences que cela entraînent pour son utilisation.

- **Application des facteurs d'amplification dynamique**

Quelques raisonnements fondés sur des tendances exprimées par les résultats des simulations numériques, permettent de justifier l'application des facteurs d'amplification dynamique avec des modèles de charge de trafic, lors de la vérification des états limites des dalles de roulement des ponts existants.

- **Évaluation simplifiée des dalles de roulement des ponts**

Si certaines conditions liées au pont, à la qualité de la planéité de la chaussée et au véhicule sont remplies, afin de rester dans les limites des cas traités dans cette étude, alors il est possible d'évaluer la dalle de roulement d'un pont existant de manière simplifiée. La méthode permet d'évaluer les effets dynamiques dans la dalle d'un pont en considérant un modèle de charge statique majoré par un facteur d'amplification dynamique.

- **Évaluation détaillée des dalles de roulement des ponts**

L'étude des effets dynamiques dans la dalle de roulement d'un pont par une approche numérique ou expérimentale, constitue une alternative à l'évaluation simplifiée dans les situations non couvertes par cette dernière ou lorsque des analyses plus pointues permettent

d'éviter des interventions. Les possibilités d'étudier les effets dynamiques par des moyens numériques ou expérimentaux sont discutées ainsi que les avantages et les inconvénients de telles approches pour l'évaluation des dalles de roulement des ponts existants.

## 8.2 Portée des facteurs d'amplification dynamique

L'objectif est d'utiliser les résultats de l'étude réalisée pour évaluer les états limites des dalles de roulement des ponts. Pour cela, il est nécessaire de préciser la portée des facteurs d'amplification dynamique obtenus à l'aide des simulations numériques réalisées.

L'étude effectuée qui concerne l'état de service des ponts fait intervenir deux types d'analyses (Figure 8.1) dont les éléments sont décrits ci-dessous. L'analyse dynamique, où un camion d'une certaine masse se déplace sur un pont, doit être clairement distinguée de l'analyse statique où la charge du camion est multipliée par un facteur d'amplification dynamique.

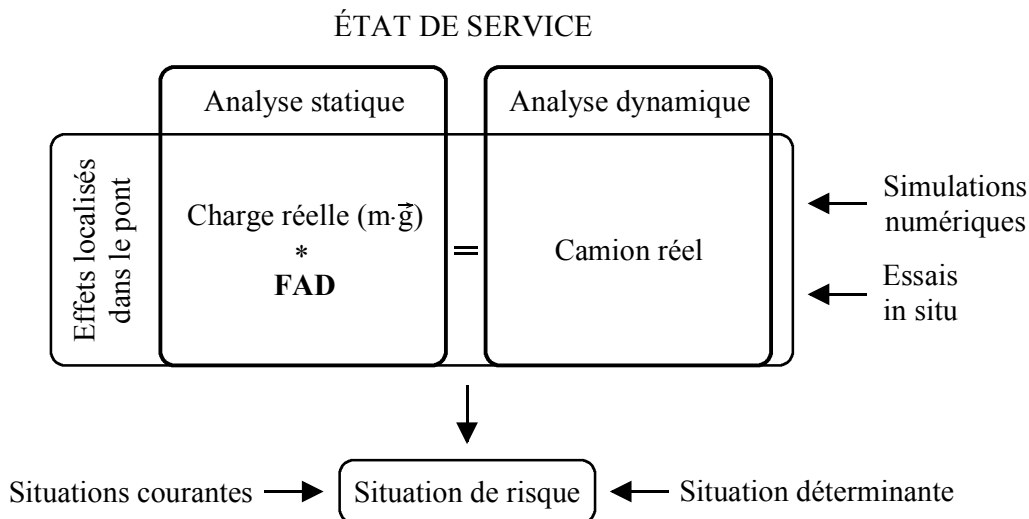


Figure 8.1 Relation entre l'analyse statique et dynamique à l'état de service

Dans l'analyse dynamique, le camion est modélisé par un système de masses concentrées vibrant en interaction avec le pont. En plus des forces élastiques, les forces d'inertie et d'amortissement participent à l'équilibre du système.

Dans l'analyse statique, le camion est représenté par sa charge statique correspondant à son poids ( $m \cdot g$ ). Les forces élastiques seules équilibrent le pont sollicité par la charge statique du camion.

Pour un certain effet dans le pont (déformations, déplacements, efforts), les valeurs maximales de la réponse obtenue par l'analyse dynamique et par l'analyse statique permettent de déterminer le facteur d'amplification dynamique. Le maximum d'un effet provoqué dans le pont par un camion est, de ce fait, équivalent au maximum de cet effet provoqué par le poids du camion majoré par un facteur d'amplification dynamique. En réalité, le facteur d'amplification dynamique masque le phénomène complexe de l'interaction dynamique entre le pont et le véhicule.

Les simulations qui ont conduit aux différents facteurs d'amplification dynamique localisés sur les dalles de roulement (Chapitre 6), correspondent à diverses situations de risque pour les ouvrages étudiés. Ces situations de risque constituent des événements courants qui se produisent régulièrement sur les ponts. Les paramètres définis relatifs aux ponts, aux profils de la chaussée ou aux camions, ont été déterminés pour évaluer les effets dynamiques

auxquels est soumis un pont autoroutier dans des conditions d'exploitation courantes. L'étude ne permet pas de démontrer que les simulations réalisées constituent des situations de risque déterminantes pour les ouvrages représentatifs, car une des difficultés de l'étude de l'interaction dynamique entre les véhicules et le pont est de déterminer les combinaisons de paramètres qui génèrent les réponses dynamiques les plus grandes. Les situations de risque déterminantes, dues à des combinaisons défavorables de certains paramètres, sont difficiles à définir et constituent, d'une certaine façon, les limites de l'étude paramétrique effectuée dans ce travail de recherche.

Toutefois, les 80 simulations effectuées sur les ponts-poutre ont permis de déterminer environ 3'200 facteurs d'amplification dynamique des effets dans les différentes dalles de roulement et les tests sur le pont-cadre ont fournis 1'600 facteurs d'amplification dynamique. Ces nombreuses valeurs constituent un échantillon relativement important pour apprécier les valeurs des facteurs d'amplification dynamique. Il serait illusoire de pouvoir déterminer la valeur maximale de chaque effet dynamique dans les différentes parties d'une dalle de roulement, car la probabilité de dépasser cette valeur établie n'est pas nulle, quelque soit les moyens utilisés; ceci est un état de fait qu'il s'agit d'accepter. Il faut également rappeler que l'étude a été effectuée en considérant un comportement linéaire élastique du béton. Un dépassement de la résistance à la traction du béton provoqué par une réponse dynamique élevée conduirait à une redistribution d'efforts qui peut être relativement importante étant donné que les réponses dynamiques maximales n'apparaissent pas simultanément dans toute la structure.

La distinction établie entre l'analyse dynamique et l'analyse statique s'applique aussi bien aux simulations numériques qu'aux essais in situ réalisés sur des ponts dans des conditions de trafic contrôlé. Dans le domaine expérimental, les mesures fournissent les effets dynamiques, alors que les effets statiques nécessaires pour évaluer les facteurs d'amplification dynamique sont déduits à partir d'une série de mesures statiques ou par traitement des réponses dynamiques au moyen de filtres [10]. Le caractère artificiel des réponses statiques et, par conséquent, des facteurs d'amplification dynamique apparaît encore mieux dans le domaine expérimental.

D'un point de vue scientifique, les facteurs d'amplification dynamique sont valables pour un effet localisé sur une structure et pour des conditions particulières liées au véhicule et au profil de la chaussée. Cette réalité est démontrée par les facteurs d'amplification dynamique différents déterminés au même endroit de la structure pour les flèches verticales et les moments de flexion. Les facteurs d'amplification dynamique obtenus lors des simulations numériques doivent donc être considérés comme des valeurs spécifiques à un état et non comme des valeurs globales couvrant des situations a priori moins défavorables. Les facteurs d'amplification dynamique ne s'appliquent donc pas, sans distinction, aux modèles de charge normalisés destinés à vérifier les états limites.

L'étude paramétrique réalisée dans ce travail fournit néanmoins des tendances qui permettent d'apprécier les situations différentes à partir desquelles il est possible de tirer des conclusions.

### **8.3 Application des facteurs d'amplification dynamique**

Malgré les réserves émises sur la portée véritable des facteurs d'amplification dynamique, leur champ d'application peut être étendu pour les besoins de l'évaluation des dalles de roulement des ponts-route. Le raisonnement développé ci-après, basé sur des tendances observées, permet de justifier l'utilisation des facteurs d'amplification dynamique avec des modèles de

charge pour la vérification des états limites. Les mêmes raisons justifient l'utilisation des facteurs d'amplification dynamique déterminés à partir d'essais in situ pour majorer les modèles de charge employés pour vérifier les différents états limites d'un pont.

Le premier pas consiste à justifier l'utilisation d'un seul facteur d'amplification dynamique pour majorer la charge d'un camion considéré à l'état de service, au lieu de facteurs d'amplification dynamique particuliers à chaque effet localisé dans la structure (Figure 8.2).

La sensibilité uniforme des différentes dalles de roulement des ponts-poutre vis-à-vis des sollicitations dynamiques, de même que l'uniformité des résultats dans les différentes parties de la dalle d'un pont, incitent à adopter une seule valeur pour les facteurs d'amplification dynamique destinés à l'évaluation des effets dynamiques dans les dalles de roulement des ponts.

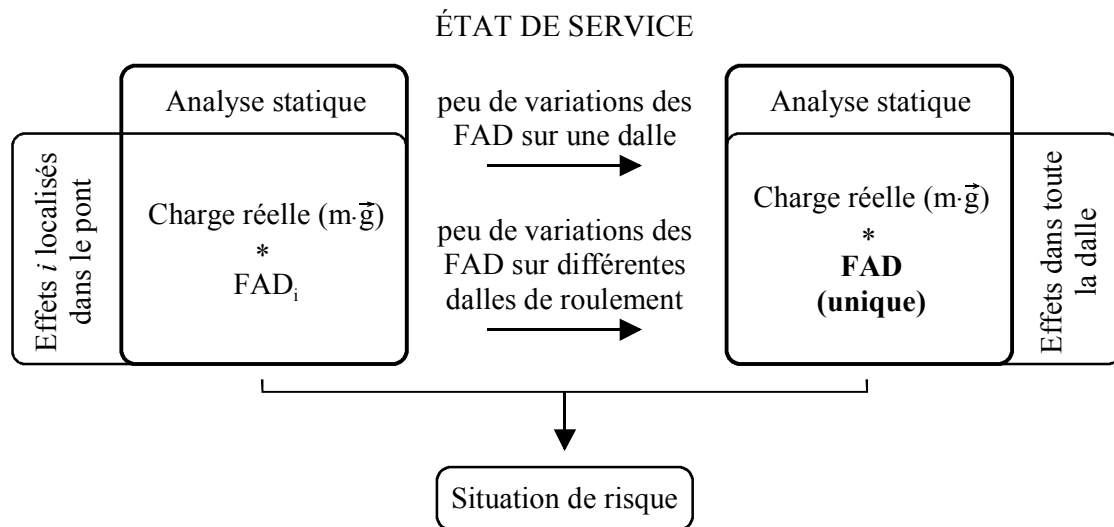


Figure 8.2 Justification de l'utilisation d'un FAD unique

*Ces résultats de l'étude paramétrique permettent d'affirmer qu'un seul facteur d'amplification dynamique peut remplacer les facteurs d'amplification dynamique particuliers à chaque effet et localisés sur la dalle de roulement.*

Le deuxième pas consiste à justifier l'application des facteurs d'amplification dynamique déterminés à partir des effets dynamiques produits par un seul camion, pour majorer les modèles de charge actualisés utilisés pour évaluer l'état de service du pont (Figure 8.3).

En général, les modèles de charge de trafic se composent de charges réparties représentant des colonnes de véhicules ainsi que de charges ponctuelles modélisant les essieux d'un véhicule lourdement chargé. Les modèles de charge actualisés fournissent, pour un ouvrage particulier, l'action déterminante du trafic routier. L'évaluation d'une dalle de roulement, largement déterminée par les moments de flexion transversale, est influencée principalement par l'action locale d'essieux surchargés, alors que les charges réparties apportent comparativement une contribution limitée [20].

Les facteurs d'amplification dynamique établis expérimentalement sur un pont similaire aux ponts-poutre étudiés, ont montré des valeurs supérieures lorsque les sollicitations sont provoquées par un seul camion plutôt que par un convoi de véhicules [23].

L'effet favorable, au niveau dynamique, d'une masse élevée du véhicule sur les facteurs d'amplification dynamique justifie l'application conservatrice des facteurs d'amplification dynamique avec des modèles dont la charge est supérieure à celle du camion réel simulé.





faiblement le comportement dynamique du pont. Les variations influencent relativement peu les facteurs d'amplification dynamique. De plus, la fissuration des sections accroît l'amortissement structural, car le mouvement dans les fissures entraîne une dissipation supplémentaire de l'énergie transmise par le véhicule à la structure.

L'augmentation de la charge entre l'état de service et l'état ultime peut entraîner une diminution des facteurs d'amplification dynamique, car, selon les résultats des simulations numériques, un véhicule de masse élevée est favorable par comparaison avec un véhicule plus léger.

*Pour les raisons énoncées, les facteurs d'amplification dynamique déterminés à l'état de service semblent applicables à l'état ultime.*

Pour conclure, il apparaît que le champ d'application des facteurs d'amplification dynamique établis dans ce travail, rigoureusement limité aux effets dynamiques calculés pour des situations de risque particulières, peut être étendu pour vérifier les dalles de roulement selon la démarche propre à l'évaluation des ponts-route.

## 8.4 Évaluation simplifiée des dalles de roulement des ponts

Les résultats issus des simulations (Chapitre 6) et le raisonnement développé précédemment (8.3) permettent de proposer une évaluation simplifiée des effets dynamiques dans une dalle de roulement d'un pont existant. Une évaluation simplifiée peut s'appliquer à des ouvrages similaires à ceux analysés et pour certaines conditions, car le caractère déterministe de l'étude réalisée ne permet pas de considérer toutes les situations de risque possibles. Les principaux choix qui ont déterminé les paramètres de l'étude, sont brièvement rappelés afin de définir les limites de l'application de l'évaluation simplifiée proposée (Figure 8.5).

Les ouvrages étudiés se limitent aux ponts autoroutiers en béton dont la géométrie est déterminée par les exigences du tracé liées à ce type de route. Les ouvrages dont le tracé en plan est fortement incurvé et dont le profil longitudinal présente des particularités sont a priori écartés.

Les études sur les ponts-poutre ont été effectuées pour un seul système statique longitudinal caractérisé par des portées fixées, car l'intérêt s'est porté sur la section transversale et, plus particulièrement, sur la dalle de roulement pour laquelle l'application de facteurs d'amplification dynamique est intéressante. Les sections transversales analysées sont composées de deux éléments porteurs principaux qui supportent la dalle dont la rigidité est influencée par diverses dispositions.

Les ponts-cadre dont la conception est dictée principalement par la portée exigent plus de prudence. La portée qui varie de 6 à 15 m pour ce type d'ouvrage influence la fréquence du mode de flexion fondamental qui caractérise les vibrations responsables des réponses dynamiques élevées observées dans les sections sur les appuis du pont étudié. Une correspondance entre les fréquences de vibration des essieux du camion et celle du mode de flexion fondamental du pont peut provoquer des réponses dynamiques importantes.

Les ouvrages autoroutiers suisses doivent respecter les exigences relatives à la qualité de la planéité de la chaussée définies dans la norme SNV 640 521b [88] (Tableau 3.2). Les défauts du revêtement bitumineux, tels que les flaches ou les ornières marquées ainsi que les nids de poules parfois visibles sur des ponts situés sur des routes secondaires ou en milieu urbain, qui provoquent des sollicitations dynamiques importantes sont exclus de l'étude. En principe,

l'apparition de ce genre de défauts exceptionnels sur les autoroutes est considérée comme une situation de risque accidentelle pour laquelle des interventions d'entretien sont requises.

Les deux camions utilisés dans cette étude sont définis par des paramètres déterministes qui fixent leur géométrie, leurs répartitions de masse, leurs suspensions et leurs pneus; par conséquent, d'autres véhicules du même type définis avec d'autres variables (par exemple, l'espacement des essieux) peuvent provoquer des effets dynamiques encore plus élevés. Ces camions sont, malgré tout, représentatifs du trafic des poids lourds du Plateau suisse et ils correspondent au type de véhicules le plus agressif vis-à-vis des effets dynamiques dans les ponts.

*Si la dalle de roulement étudiée en vue de son évaluation présente les caractéristiques énoncées relativement à la structure du pont, au profil de la chaussée et aux véhicules, une évaluation simplifiée basée sur un facteur d'amplification unique pour la dalle majorant un modèle de charge de trafic est proposée pour vérifier tous les états limites (Figure 8.5).*

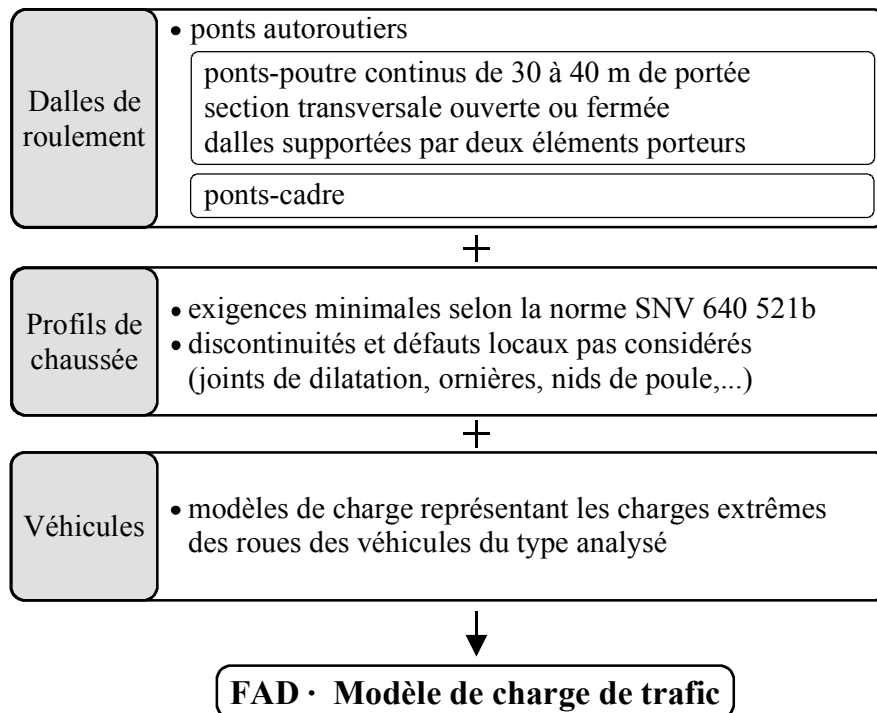


Figure 8.5 Domaine d'application des FAD pour l'évaluation simplifiée des dalles

Dans le cadre de l'évaluation simplifiée, l'action statique des véhicules doit être représentée par des modèles de charge dont les valeurs représentatives correspondent aux charges extrêmes des roues des types de camions étudiés. Les facteurs d'amplification dynamique déterminés au chapitre 6 pour les différentes situations de risque simulées ainsi que les tendances dégagées de l'influence des paramètres principaux sur les facteurs d'amplification dynamique donnent des indications pour le choix du facteur d'amplification dynamique à utiliser.

Il est important de noter que l'évaluation proposée, basée sur l'utilisation d'un facteur d'amplification dynamique, constitue uniquement un moyen destiné à conserver le caractère statique et simplifié de l'analyse des ponts et que ces facteurs ne permettront jamais de

représenter complètement les phénomènes d'interaction dynamique qui interviennent entre le pont et le véhicule.

Si la dalle de roulement du pont étudié se situe hors des limitations fixées pour l'application de l'évaluation simplifiée, une étude dynamique doit être envisagée.

## **8.5 Évaluation détaillée des dalles de roulement des ponts**

### **8.5.1 Généralités**

L'évaluation des dalles de roulement peut être effectuée directement à partir des résultats d'une étude dynamique réalisée au moyen de simulations numériques ou d'essais in situ. Le but d'une telle étude est de déterminer les effets dynamiques provoqués par le trafic routier dans un pont pour vérifier précisément les états limites de la structure.

Dans cette approche, la notion de modèles de charge de trafic et de facteurs d'amplification dynamique est donc abandonnée au profit des actions réelles matérialisées par la masse vibrante d'un véhicule mobile sur la surface rugueuse d'un pont.

L'objectif des paragraphes suivants est de mettre en évidence les possibilités des simulations numériques et des essais in situ, ainsi que leurs avantages et inconvénients, dans le cadre de l'évaluation des effets dynamiques dans les dalles de roulement des ponts existants.

### **8.5.2 Simulations numériques**

L'étude menée a démontré la faisabilité de l'analyse des effets dynamiques dans les dalles de roulement des ponts au moyen d'une approche numérique. Cette possibilité constitue une voie dans le cadre de l'évaluation des ponts sollicités par des véhicules routiers. Les effets dynamiques ainsi calculés constituent une aide précieuse pour saisir le comportement dynamique du pont et, plus particulièrement, de sa dalle de roulement.

Actuellement, l'utilisation plus large d'un outil d'analyse tel que le logiciel d'éléments finis employé pour réaliser cette étude, est limitée principalement par le manque de connaissances du comportement de la multitude de véhicules qui sillonnent les routes. En effet, plusieurs variables spécifiques aux véhicules sont nécessaires pour réaliser de telles analyses et, malheureusement, les informations disponibles dans ce domaine sont plutôt maigres.

L'avantage principal de l'analyse numérique basée sur la méthode des éléments finis est de quantifier directement les effets dynamiques (efforts internes, déplacements) utilisés dans les critères de vérification dans toute la structure. Un autre avantage de l'approche numérique est de pouvoir réaliser facilement des analyses de sensibilité afin de faire des prévisions sur les conséquences liées à l'évolution de certains paramètres introduits dans les modèles (dégradation du profil de la chaussée).

### **8.5.3 Essais dynamiques in situ**

Les essais dynamiques effectués sur les ponts dans des conditions de trafic libre ou contrôlé constituent un bon moyen pour évaluer le comportement dynamique d'un pont. Les méthodes utilisées pour effectuer ce genre d'essais sont actuellement bien éprouvées (2.6). Généralement les informations recueillies lors de tels essais sont limitées à quelques points de mesures et nécessitent une interprétation avant d'être employées. Les déplacements ou les déformations mesurés exigent un traitement pour obtenir les efforts internes nécessaires pour vérifier les sections de l'ouvrage selon les critères de vérifications des états limites.

Souvent de tels essais exigent une organisation relativement importante et nécessitent des interruptions de trafic qui perturbent l'exploitation de l'ouvrage.

## 8.6 Remarques finales

### 8.6.1 Préliminaire

L'évaluation d'une dalle de roulement d'un pont existant implique une vérification des états limites. Outre la capacité portante, les actions agissant sur la structure doivent être évaluées avec précision afin de considérer toutes les potentialités de la structure. L'action du trafic qui est souvent la plus importante parmi les actions variables, doit être déterminée en considérant son caractère dynamique influencé par le mouvement du véhicule en interaction avec celui du pont. Les vérifications doivent donc être effectuées par une analyse dynamique ou, dans certaines conditions, par une analyse statique dans laquelle les actions dynamiques sont substituées par des charges de remplacement définies par des charges statiques majorées par un facteur d'amplification dynamique.

### 8.6.2 Conclusions

- Les résultats de l'étude permettent d'étendre l'application des facteurs d'amplification dynamique à des modèles de charge de trafic pour évaluer les effets dynamiques des dalles de roulement des ponts existants.
- En restant dans les limites des cas étudiés dans ce travail, les effets dynamiques dans les dalles de roulement des ponts-poutre existants peuvent être évalués, de manière simplifiée, avec des charges statiques majorées par un facteur d'amplification dynamique unique.
- Ce travail de recherche a montré que l'évaluation d'un pont est réalisable par une approche numérique et que cette possibilité doit être utilisée à l'avenir pour évaluer ces éléments structuraux.
- L'approche expérimentale et numérique permet d'évaluer les effets dynamiques dans les dalles de roulement au-delà des limites fixées pour une évaluation simplifiée.



## Chapitre 9

# Conclusion

### 9.1 Buts poursuivis

Ce travail de recherche présente une étude sur les effets dynamiques provoqués par le trafic routier dans les dalles de roulement des ponts en béton. L'objectif est de déterminer les facteurs d'amplification dynamique qui majorent les effets statiques utilisés pour la vérification des états limites des dalles de roulement des ponts. Le but principal regroupe les trois aspects suivants:

- Déterminer les facteurs d'amplification dynamique qui permettent de représenter les effets dynamiques dans les dalles de roulement des ponts.
- Déterminer la sensibilité aux sollicitations dynamiques provoquées par le trafic routier de différentes dalles de roulement de plusieurs ponts.
- Proposer des moyens pour évaluer les facteurs d'amplification dynamique des dalles de roulement des ponts en béton en considérant tous les états limites.

### 9.2 Bénéfice de l'étude

L'utilisation rationnelle des moyens financiers destinés à l'entretien du parc des ponts exige que des priorités dans les interventions soient établies sur la base de critères de sécurité. L'évaluation permet de déterminer le niveau de sécurité de l'ouvrage en se basant soit sur des données standardisées fournies dans les normes de dimensionnement en vigueur, soit sur des données propres à l'ouvrage considéré qui représentent les sollicitations et la résistance intervenant dans les critères de vérification. La connaissance du trafic local et des particularités de chaque pont permet donc d'effectuer une évaluation plus précise de la sécurité de l'ouvrage.

L'évaluation de ponts en béton menée en suivant les recommandations des normes suisses de dimensionnement [83] ont conduit à la conclusion que les efforts de dimensionnement dans les dalles de roulement sont déterminés principalement par des essieux lourdement chargés, majorés par un facteur d'amplification dynamique [20]. Des facteurs d'amplification dynamique spécifiques aux dalles de roulement permettent de définir les efforts de dimensionnement avec plus de précision en évitant les simplifications conservatrices inhérentes aux valeurs normalisées. L'étude du comportement dynamique des dalles de roulement sollicitées par le trafic permet d'évaluer précisément les effets dynamiques dans ces éléments structuraux et ainsi d'éviter des interventions de renforcement dont les conséquences financières sont importantes.

### 9.3 Approche retenue

L'étude de la littérature a défini l'ensemble des paramètres qui déterminent le comportement dynamique des ponts sollicités par le passage de véhicules lourds (Chapitre 2). L'analyse des recherches effectuées dans le domaine numérique et expérimental a fixé les limites des deux approches, leurs avantages et leurs inconvénients respectifs. L'approche numérique a été préférée, car elle offre d'une part la possibilité d'effectuer de manière simple des études paramétriques et d'autre part, la liberté de définir les informations souhaitées.

Le but est de simuler numériquement le passage de véhicules sur plusieurs ponts afin de déterminer les facteurs d'amplification dynamique à partir des effets calculés dans leur dalle de roulement. Les simulations représentent des situations courantes qui traduisent les effets dynamiques auxquels sont soumis quotidiennement les dalles de roulement des ponts. Les simulations qui considèrent l'interaction dynamique entre le pont et les véhicules sont caractérisées par les éléments suivants (Chapitre 5):

- modélisation en trois dimensions du pont et du véhicule
- comportement linéaire élastique du pont
- modélisation du profil de la chaussée
- modélisation du véhicule par un système de masses concentrées
- comportement non linéaire dissipatif des suspensions
- comportement linéaire des pneus

Les modèles de ponts représentent six ouvrages représentatifs du parc des ponts autoroutiers suisses qui se différencient principalement par le système statique de leur dalle de roulement. Des critères normalisés qui fixent les exigences de qualité de la planéité du revêtement des autoroutes suisses, ont été utilisés pour établir les profils de chaussée (Chapitre 3). Les véhicules modélisés représentent deux camions caractéristiques du trafic des poids lourds du Plateau suisse. Le modèle de véhicule a nécessité l'élaboration des lois de comportement des suspensions en acier et des pneus (Chapitre 4). Les propriétés dynamiques (modes et fréquences) des différents ponts et des véhicules ont situé le comportement dynamique de ces structures.

Une définition des facteurs d'amplification dynamique différente de celle couramment utilisée a été adoptée pour son application aux effets dans les dalles de roulement.

Lors de l'étude paramétrique effectuée sur les six ponts, l'influence des deux camions, de deux trajectoires, de deux profils de chaussée et de cinq vitesses de passage sur les effets dynamiques a été analysée. La comparaison des facteurs d'amplification dynamique obtenus dans des situations semblables sur les différents ponts permet de juger la sensibilité des dalles de roulement vis-à-vis des sollicitations dynamiques provoquées par les deux camions (Chapitre 6).

L'utilisation des facteurs d'amplification dynamique pour évaluer la sécurité des dalles de roulement nécessite des réflexions sur les états limites et en particulier sur l'état ultime. Les effets non linéaires dus à la fissuration des sections ont été évalués par une approche simplifiée pour déterminer leurs influences sur le comportement dynamique de la structure et sur les facteurs d'amplification dynamique à l'approche de l'état ultime (Chapitre 7).

Le champ d'application des facteurs d'amplification dynamique déterminés par les simulations numériques est élargi pour les utiliser lors des vérifications des états limites des dalles de roulement. Une évaluation simplifiée basée sur des facteurs d'amplification dynamique peut, dans certaines situations, remplacer une évaluation détaillée dans laquelle les effets dans la dalle sont déterminés par une étude dynamique numérique ou expérimentale (Chapitre 8).



## 9.4 Conclusions

En fonction des objectifs fixés au début du travail de recherche, les résultats mènent aux conclusions suivantes:

1. La sensibilité aux sollicitations dynamiques des dalles de roulement des ponts-poutre étudiés n'est pas influencée par leur système statique.  
En conséquence, il n'y a pas lieu de distinguer les dalles en fonction de leurs caractéristiques statiques pour appliquer des facteurs d'amplification dynamique. Du point de vue des effets dynamiques, toutes les conceptions des dalles étudiées sont équivalentes.
2. La sensibilité aux sollicitations dynamiques dans les différentes sections déterminantes de chaque dalle de roulement des ponts-poutre étudiés est uniforme.  
En conséquence, il n'est pas nécessaire de distinguer les différentes parties d'une dalle de roulement pour appliquer des facteurs d'amplification dynamique.
3. L'influence des paramètres principaux sur les facteurs d'amplification dynamique des dalles de roulement est résumée de la manière suivante:
  - Les facteurs d'amplification dynamique peuvent subir un accroissement d'environ 20% au cours de la durée de vie de la couche d'usure du revêtement d'une autoroute.
  - Les facteurs d'amplification dynamique dépendent de la masse du véhicule. Ils diminuent lorsque la masse du véhicule augmente.
  - Les facteurs d'amplification dynamique sont indépendants de la vitesse du véhicule lorsque le profil de la chaussée présente une rugosité homogène.
4. Les modèles de véhicule à trois essieux avec des essieux tandem simulent fidèlement la position des roues sur la dalle ainsi que le mouvement de ce type d'essieux. Les développements effectués permettraient d'implanter facilement ces modèles dans le logiciel d'éléments finis "CLEF".
5. Le comportement dynamique et les facteurs d'amplification dynamique semblent faiblement influencés par des diminutions locales importantes de la rigidité d'une structure dues à des fissures. Ces conclusions établies sur la base des résultats de simulations réalisées sur un pont modélisé simplement par une poutre sont également valables pour les dalles.
6. Une évaluation des dalles de roulement des ponts existants est proposée en deux volets:
  - Pour les situations similaires à celles analysées dans cette étude, une évaluation simplifiée, basée sur un facteur d'amplification dynamique unique majorant un modèle actualisé de charge de trafic, est proposée.
  - Pour les autres situations, une évaluation des effets dynamiques réalisée soit par une approche numérique, soit par une approche expérimentale doit être envisagée.

## 9.5 Suggestions pour des travaux futurs

Ce travail a montré que le domaine étudié est vaste et qu'il peut être abordé de plusieurs manières. Afin de concentrer les efforts sur quelques aspects, il était nécessaire de limiter l'étendue de l'étude. Au cours des études menées, des problèmes non résolus ou partiellement résolus ont été rencontrés et sont suggérés pour des travaux futurs:

1. Les effets dynamiques dans les dalles de roulement provoqués par le camion représentatif à trois essieux (camion 12) devraient être calculés avec un des modèles développés dans ce travail pour tenir compte des essieux tandem.

2. Les réponses dynamiques devraient être étudiées dans le domaine des fréquences. L'identification des modes et des fréquences de vibration de la dalle en régime forcé permettrait d'approfondir les connaissances sur les phénomènes qui déterminent les réponses de la structure sollicitée par le passage des véhicules. Les résultats des simulations effectuées pourraient constituer les données de base de cette analyse.
3. Les effets dynamiques calculés dans les dalles de roulement devraient être validés par des essais in situ, en particulier sur les ponts-cadre pour lesquels peu d'analyses expérimentales ont été effectuées. Bien que les effets dynamiques simulés dans les poutres aient déjà été validés [37], il est nécessaire d'effectuer ces vérifications également pour les dalles de roulement.
4. Des informations plus complètes sur les paramètres qui caractérisent les véhicules seraient utiles pour des analyses futures.
5. L'étude des facteurs d'amplification dynamique en relation avec les critères de vérifications aux différents états limites devrait être approfondie.
6. Des analyses couvrant des situations extrêmes devraient être effectuées dans le but de fournir des bornes supérieures pour les facteurs d'amplification dynamique.

## Bibliographie

- [1] AASHO, The AASHO road test, Report 4, Highway Research Board, Special Report 61D, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, D.C., 1962
- [2] Akin J.E., Mofid M., Numerical solution for response of beams with moving mass, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No 1, pp 120-131, Houston, 1989
- [3] Akoussah E., Fafard M., Talbot M., Beaulieu D., Étude paramétrique du facteur d'amplification dynamique des charges pour des ponts à travée simple en béton armé, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, pp313-322, Québec, 1997
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specification for Highway Bridges (AASHTO), Section 3, Loads, 15<sup>th</sup> Edition, Washington D. C., 1992
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials, LRFD Bridge Design Specifications (AASHTO), 1<sup>st</sup> Edition, Washington D. C., 1994
- [6] Association canadienne de normalisation, Calcul des ponts-routes, CAN/CSA-S6-88, Willowdale, Ontario
- [7] Bachmann H., Ammann W., Vibrations in structures induced by man and machines, *Structural Engineering documents 3e*, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 1987
- [8] Bailey S.F., Basic principles and load models for the structural safety evaluation of existing road bridges, Thèse EPFL N° 1467, Lausanne, 1996
- [9] Bailey S.F., Bez R., A parametric study of traffic load effects in medium span bridges, *Canadian Society for Civil Engineering, Developments in short and medium span bridge engineering '94*, Halifax, pp 503-514, Lausanne, 1994
- [10] Bakht B., Pinjarkar S.G., Review of dynamic testing of highway bridges, *Structural Research Report, SRR-89-01*, Ministry of Transportation of Ontario, Downsview, Ontario, 1989
- [11] Bathe K.-J., *Finite element procedures in engineering analysis*, Prentice-Hall, 1982
- [12] Bassetti A., Bailey S.F., Dépouillement et analyse des mesures du trafic routier, Année 1996, Rapport de mandat N°657-3, ICOM, Lausanne, 1997
- [13] Bez R., Bailey S.F., Haesler V., Modèles de charge actualisés pour l'évaluation de la sécurité structurale de ponts-routes existants, Publication ICOM 304, Lausanne, 1995
- [14] Bez R., Cantieni R., Jacquemoud J., Modélisation du trafic routier suisse, *Ingénieurs et Architectes Suisses*, Vol. 111, No 23, Lausanne, 1985
- [15] Billing J.R., Dynamic test of bridges in Ontario, 1980: Data capture, test procedures and data processing, MTC Research and Development Report SRR-82-02, Ontario Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ontario, 1982
- [16] Billing J.R., Dynamic loading and testing of bridges in Ontario, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, pp 833-843, Downsview, 1984

- [17] Billing J.R., Agarwal A.C., The art and science of dynamic testing of highway bridges, Canadian Society for Civil Engineering, Developments in short and medium span bridge engineering '90, Toronto, pp 531-544, Downsview, 1990
- [18] Blejwas T.E., Feng C.C., Ayre R.S., Dynamic interaction of moving vehicles and structures, Journal of Sound and Vibration, Vol. 67, No 4, pp 513-521, Stillwater, 1979
- [19] Boudjelal M.T., Fafard M., Gakwaya A., Modélisation de l'amortissement par une approche thermodynamique et son application à l'analyse dynamique de l'interaction pont-véhicule, Rapport GCS-97-10, GIREF, Université Laval, Québec, 1997
- [20] Broquet C., Schläfli M., Brühwiler E., Évaluation des dalles de roulement des ponts en béton, Ingénieurs et Architectes Suisses, Vol. 123, No 25, 1997
- [21] Cantieni R., Dynamic load tests on highway bridges in Switzerland - 60 years experience of EMPA, EMPA Report No. 211, Duebendorf, 1983
- [22] Cantieni R., Dynamische Belastungsversuche an der Bergspurbrücke Deibüel, EMPA Forschungs- und Arbeitsbericht Nr. 116/4, Teile A und B, Duebendorf, 1988
- [23] Cantieni R., Dynamic behaviour of highway bridges under the passage of heavy vehicles, EMPA Report No. 220, Duebendorf, 1992
- [24] Cantieni R., Deger Y., Pietrzko S., Modal analysis of a concrete arch bridge: linking experiment and analysis, Canadian Society for Civil Engineering, Developments in short and medium span bridge engineering '94, Halifax, pp 557-567, Duebendorf, 1994
- [25] Cantieni R., Heywood R., Dynamic interaction between vehicle and infrastructure experiment, Report on the tests performed in Switzerland and Australia, OECD DIVINE Project, Element 6, Bridge research, 1997
- [26] Cebon D., Newland D.E., The artificial generation of road surface topography by the inverse FFT method, Proceedings of 8th IASVD Symposium, The dynamics of vehicles on roads and on tracks, pp 29-43, Cambridge, 1983
- [27] Chan T.H.T., O'Connor C., Wheel loads from highway bridge strains: field studies, Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No 7, pp 1751-1771, Hong Kong, 1990
- [28] Chan T.H.T., O'Connor C. Vehicle model for highway bridge impact, Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No 7, pp 1772-1793, Hong Kong, 1990
- [29] Chang D., Lee H., Impact factors for simple-span highway girder bridges, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No 3, pp 705-715, Séoul, 1994
- [30] Chatterjee P.K., Datta T.K., Surana C.S., Vibration of suspension bridges under vehicular movement, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No 3, pp 681-703, New Delhi, 1994
- [31] Chatterjee P.K., Datta T.K., Surana C.S., Vibration of continuous bridges under moving vehicles, Journal of Sound and Vibration, Vol. 169, No 5, pp 619-632, New Delhi, 1994
- [32] Clough R.W., Penzien J., Dynamics of structures, second edition, McGraw-Hill International Editions, Berkeley, 1993
- [33] Comité européen de normalisation, Eurocode 1 - Bases de calcul et actions sur les structures - Partie 3: Charges sur les ponts dues au trafic, Prénorme européenne ENV 1991-3, mars 1995

- [34] Coussy O., Said M., van Hoove J.-P., The influence of random surface irregularities on the dynamic response of bridges under suspended moving loads, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 130, No 2, pp 313-320, Noisy Le Grand, 1989
- [35] Desjardins R., Fafard M., Développement d'un logiciel pour l'analyse des structures par éléments finis utilisant l'approche de la programmation orientées objets, Rapport GCT-92-05, Département de génie civil, Université Laval, Québec, 1992
- [36] Dodds C.J., Robson J.D., The description of road surface roughness, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 31, No 2, pp 175-183, Glasgow, 1973
- [37] Fafard M., Laflamme M., Savard M., Bennur M., Dynamic analysis of existing continuous bridge, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 3, No 1, pp 28-37, February, 1998
- [38] Fancher P.S., Ervin R.D., MacAdam C.C., Winkler C.B., Measurement and representation of the mechanical properties of truck leaf springs, *Current Trends in Truck Suspensions* sp 475, Pennsylvania, 1980
- [39] Favre R., Burdet O., Charif H., Hassan M., Markey Y., Enseignements tirés d'essais de charge et d'observations à long terme pour l'évaluation des ponts en béton et le choix de la précontrainte, Rapport OFR 83/90, EPFL, Lausanne, 1995
- [40] Fryba L., *Vibration of solids and structures under moving loads*, Noordhoff, International Publishing, Groningen, The Netherlands, 1972
- [41] Green M.F., Cebon D., Dynamic response of highway bridges to heavy vehicle loads: theory and experimental validation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 170, No 1, pp 51-78, Kingston, 1994
- [42] Green M.F., Cebon D., Cole D.J., Effects of vehicle suspension design on dynamics of highway bridges, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No 2, pp 272-281, Kingston, 1995
- [43] Gupta R.K., Dynamic loading of highway bridges, *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 106, EM2, pp 377-394, Lae, 1980
- [44] Gupta R.K., Traill-Nash R.W., Bridge dynamic loading due to road surface irregularities and braking of vehicle, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, pp 83-96, Lae, 1980
- [45] Halchini C., Savard M., Essais extensométriques: Pont sur la rivière Portneuf, File P-06157, Ministère des Transports du Québec, Québec, Canada, 1993
- [46] Hayashikawa T., Watanabe N., Dynamic behavior of continuous beams with moving loads, *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 107, EM1, pp 229-246, Sapporo, 1981
- [47] Healey A.J., Nathman E., Smith C.C., An analytical and experimental study of automobile dynamics with random roadway inputs, *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol. 99, No 12, pp 284-292, Austin, 1977
- [48] Henchi K., Fafard M., Dhatt D., Talbot M., Dynamic behaviour of multi-span beams under moving loads, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 199, No 1, pp 33-50, Québec, 1996

- [49] Henchi K., Fafard M., Talbot M., Dhatt G., An efficient algorithm for dynamic analysis of bridges under moving vehicles using a coupled modal and physical components approach, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 212, No 4, pp 663-683, Québec, 1998
- [50] Honda H., Kajikawa Y., Kobori T., Spectra of road roughness on bridges, *Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE*, Vol. 108, ST9, pp 1956-1966, Kanazawa, 1982
- [51] Huang D., Wang T.-L., Impact analysis of cable-stayed bridges, *Computers & Structures*, Vol. 43, No 5, pp 897-908, Miami, 1992
- [52] Huang D., Wang T.-L., Shahawy M., Impact analysis of continuous multigirder bridges due to moving vehicles, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No 8, pp 3427-3443, Miami, 1992
- [53] Huang D., Wang T.-L., Shahawy M., Impact studies of multigirder concrete bridge, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No 8, pp 2387-2402, Miami, 1993
- [54] Huang D., Wang T.-L., Shahawy M., Vibration of thin-walled box-girder bridges excited by vehicles, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No 9, pp 1330-1337, Miami, 1995
- [55] Hwang E.-S., Nowak A.S., Simulation of dynamic loads for girder bridges, *Canadian Society for Civil Engineering, Developments in short and medium span bridge engineering '90*, Toronto, pp 557-567, Ann Arbor, 1990
- [56] Hwang E.-S., Nowak A.S., Simulation of dynamic load for bridges, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No 5, pp 1413-1434, Ann Arbor, 1991
- [57] Inbanathan M.J., Wieland M., Bridge vibrations due to vehicle moving over rough surface, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 113, No 9, pp 1994-2008, Bangkok, 1987
- [58] International Organisation for Standardization, International Standard ISO 8608:1995(E), Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data, 1995
- [59] Japan Road Association, Specification for Highway Bridges - Division 2 Loads
- [60] Jirousek J., Calcul des structures par ordinateur, Cours d'éléments finis destiné aux étudiants du département de génie civil, EPFL, 1990
- [61] Kunjambo K.K., O'Connor C., Truck suspension models, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 109, No 5, pp 706-720, Brisbane, 1983
- [62] Laflamme M., Fafard M., Mallikarjuna, Boudjelal M.T., Détermination du facteur d'amplification dynamique des ponts par une approche numérique et expérimentale, Rapport GCS-95-04, Département de génie civil, Université Laval, Québec, 1995
- [63] Leonard D.R., Grainger J.W., Eyre R., Loads and vibrations caused by eight commercial vehicles with cross weights exceeding 32 tons, *Transport and Road Research Laboratory, TRRL Report, LR 582*, Crowthorne, 1974
- [64] Marcondes J., Burgess G.J., Harichandran R., Snyder M.B., Spectral analysis of highway pavement roughness, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 117, No 5, pp 540-549, Palmerston North, 1991
- [65] Merzenich G., Sedlacek G., The new european traffic load models for the design of road bridges and their basement on probability studies, *Canadian Society for Civil*

- Engineering, Developments in short and medium span bridge engineering '94, Halifax, pp 1331-1342, Aachen, 1994
- [66] Ministry of Transportation and Communication, Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC), Downsview, Ontario, 1979
- [67] Ministry of Transportation and Communication, Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC), Downsview, Ontario, 1983
- [68] Ministry of Transportation and Communication, Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC), Downsview, Ontario, 1992
- [69] Mulcahy N.L., Bridge response with tractor-trailer vehicle loading, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11, pp 649-665, 1983
- [70] Newland D.E., An introduction to random vibrations and spectral analysis, Cambridge, 1984
- [71] O'Connor C., Pritchard R.W., Impact studies on small composite girder bridge, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No 3, pp 641-653, St. Lucia, 1985
- [72] Page J., Dynamic behaviour of a single axle vehicle suspension system: A theoretical study, Transport and Road Research Laboratory, TRRL Report, LR 580, Crowthorne, 1973
- [73] Page J., Dynamic behaviour of two linked twin axle lorry suspension systems: A theoretical study, Transport and Road Research Laboratory, TRRL Report, LR 581, Crowthorne, 1973
- [74] Page J., Dynamic wheel load measurements on motorway bridges, Transport and Road Research Laboratory, TRRL Report, LR 722, Crowthorne, 1976
- [75] Palamas J., Coussy O., Bamberger Y., Effects of surface irregularities upon the dynamic response of bridges under suspended moving loads, Journal of Sound and Vibration, Vol. 99, No 2, pp 235-245, Paris, 1985
- [76] Paultre P., Chaallal O., Proulx J., Bridge dynamics and dynamic amplification factors - A review of analytical and experimental findings, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 19, pp 260-278, Sherbrooke, 1992
- [77] Paultre P., Proulx J., Bégin T., Carbonneau C., Étude expérimentale et analytique du comportement dynamique du pont suspendu de Beauharnois, Proceedings de la conférence internationale à Deauville, Vol. 2, pp 295-302, Sherbrooke, 1994
- [78] Paultre P., Proulx J., Talbot M., Dynamic testing procedures for highway bridges using traffic loads, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No 2, pp 362-376, Sherbrooke, 1995
- [79] Savard M., Fafard M., Beaulieu D., Étude par éléments finis du facteur d'amplification dynamique des charges dans les ponts sollicités par des véhicules routiers, Rapport GCT-93-07, GIREF, Université Laval, Québec, 1993
- [80] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten- Verein, Normen für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Überwachung der Bauten, Norm SIA 160, 1956
- [81] Sniady P., Vibration of a beam due to a random stream of moving forces with random velocity, Journal of Sound and Vibration, Vol. 97, No 1, pp 23-33, Wroclaw, 1984

- [82] Société suisse des ingénieurs et des architectes, Norme concernant les charges, la mise en service et la surveillance des constructions, Partie "Charges prescrites pour les calculs", Norme SIA 160, 1970
- [83] Société suisse des ingénieurs et des architectes, Actions sur les structures porteuses, Norme SIA 160, 1989
- [84] Sweatman P.F., A study of dynamic wheel forces in axle group suspensions of heavy vehicles, Australian road research board, Special report No. 27, 1983
- [85] Talbot M., Halchini C., Savard M., Load testing and numerical modelling of Quebec bridges, Report IABSE Colloquium Copenhagen, Vol. 67, pp 283-290, Québec, 1993
- [86] Timoshenko S., Théorie des vibrations à l'usage des ingénieurs, Librairie Polytechnique Ch. Béranger, Paris, 1954 (Traduit de l'anglais d'après la deuxième édition)
- [87] Timoshenko S., Young D.H., Weaver W., Vibration problems in engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons, 1974
- [88] Union des professionnels suisses de la route, Planéité, SN 640 521b, VSS, Zurich, 1995
- [89] Veletsos A.S., Huang T., Analysis of dynamic response of highway bridges, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 96, EM5, pp 593-620, Houston, 1970
- [90] Wang T.-L., Huang D., Shahawy M., Dynamic response of multigirder bridges, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No 8, pp 2222-2238, Miami, 1992
- [91] Wang T.-L., Huang D., Cable-stayed bridge vibration due to road surface roughness, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No 8, pp 1354-1375, Miami, 1992
- [92] Wang T.-L., Huang D., Shahawy M., Dynamic behavior of continuous and cantilever thin-walled box girder bridges, Journal of Bridge Engineering, Vol. 1, No 2, pp 67-75, Miami, 1996



## Annexe A

### Plans des ponts

#### A.1 Pont-cadre

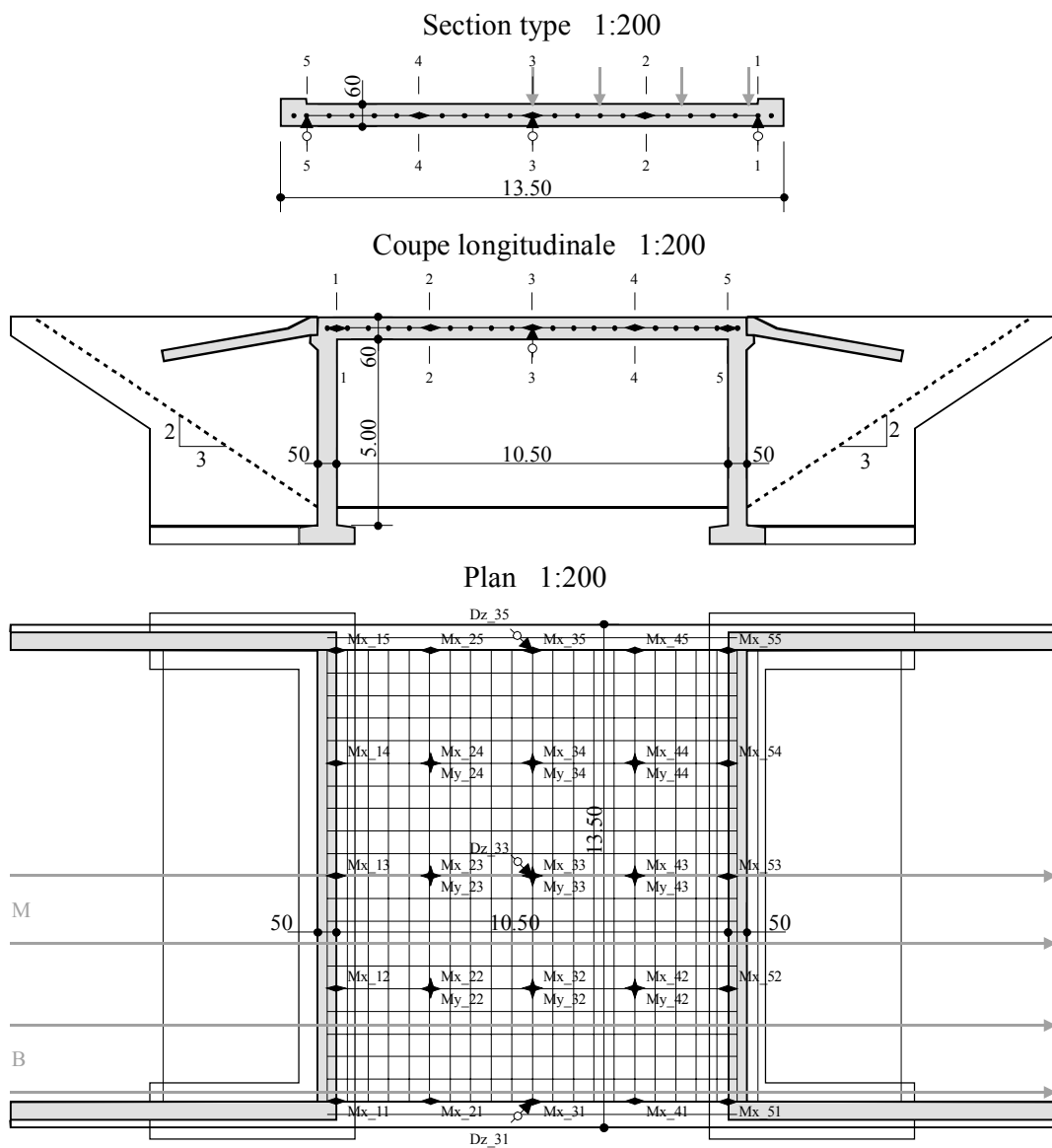


Figure A.1 Plan du pont-cadre

### A.2 Pont C1

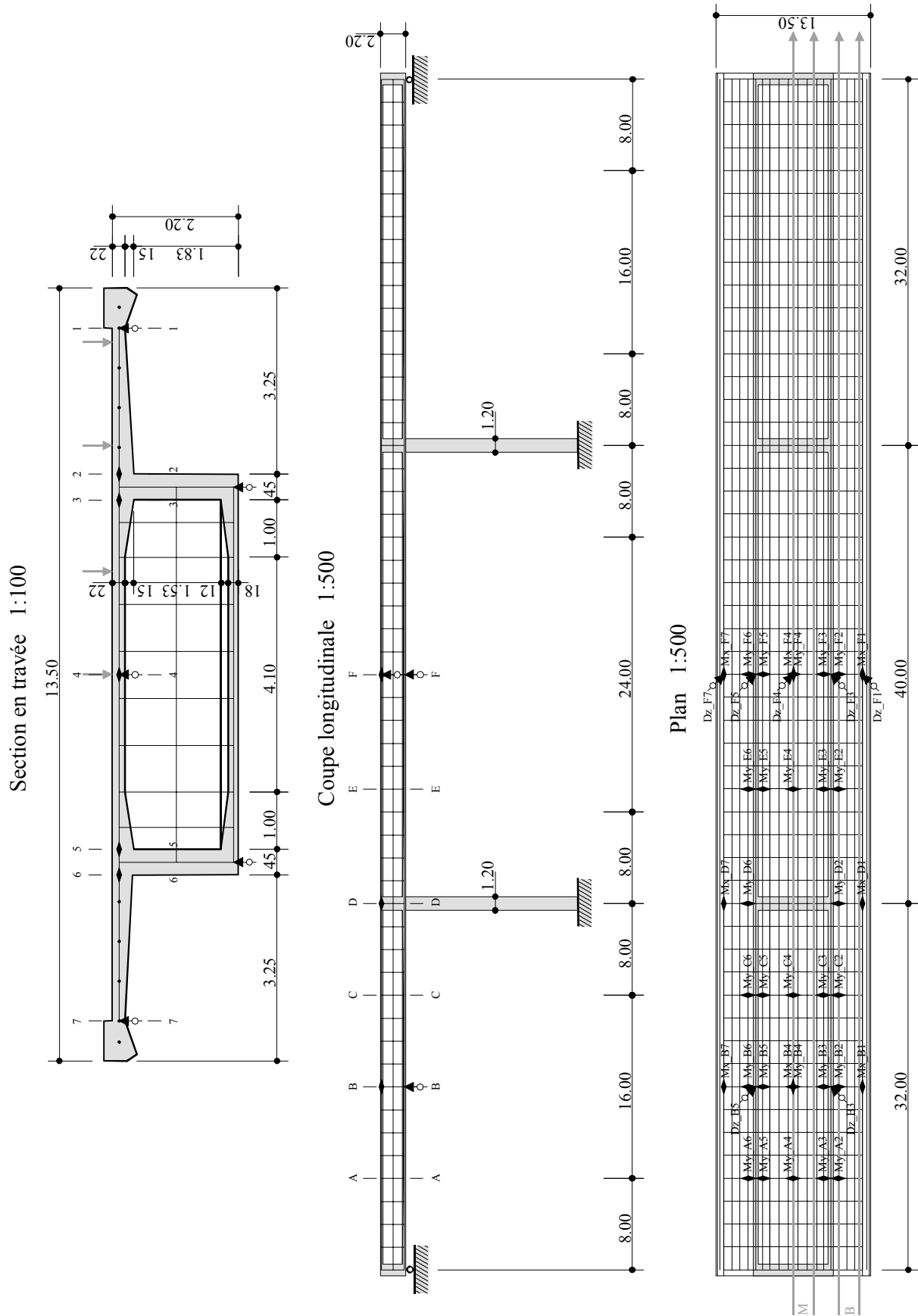


Figure A.2 Plan du pont C1

### A.3 Pont C1P

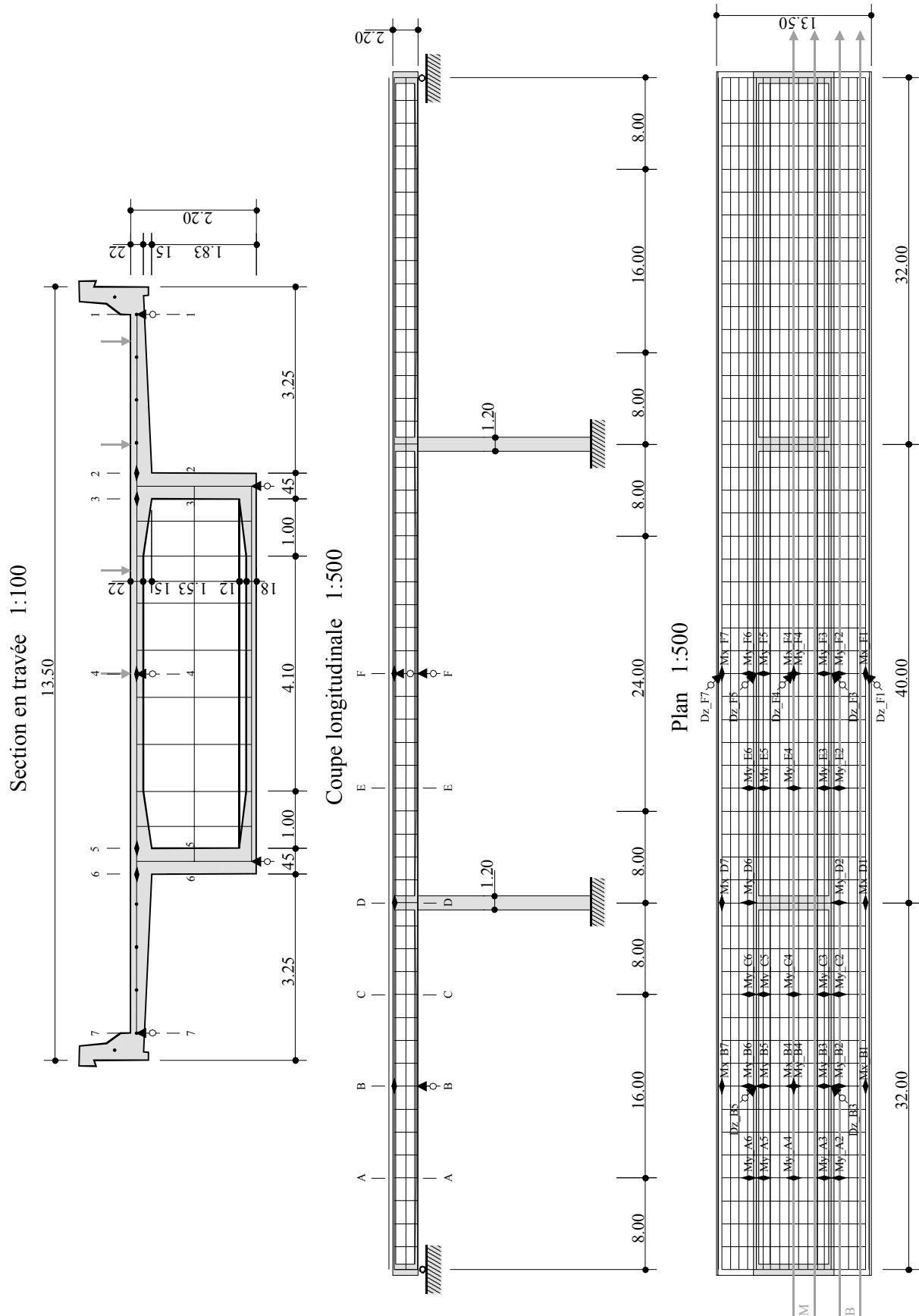


Figure A.3 Plan du pont C1P

### A.4 Pont C2

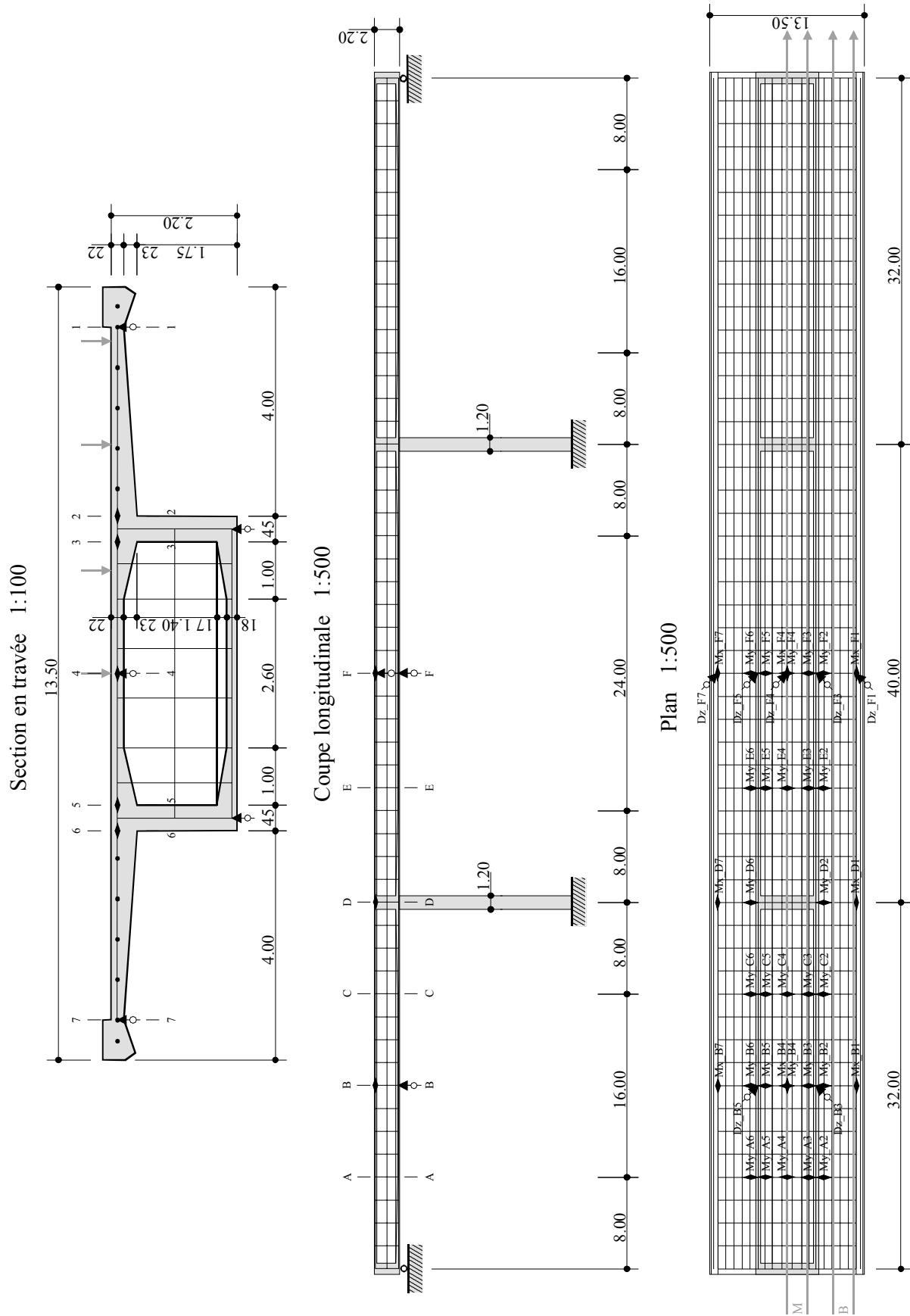


Figure A.4 Plan du pont C2

### A.5 Pont P1

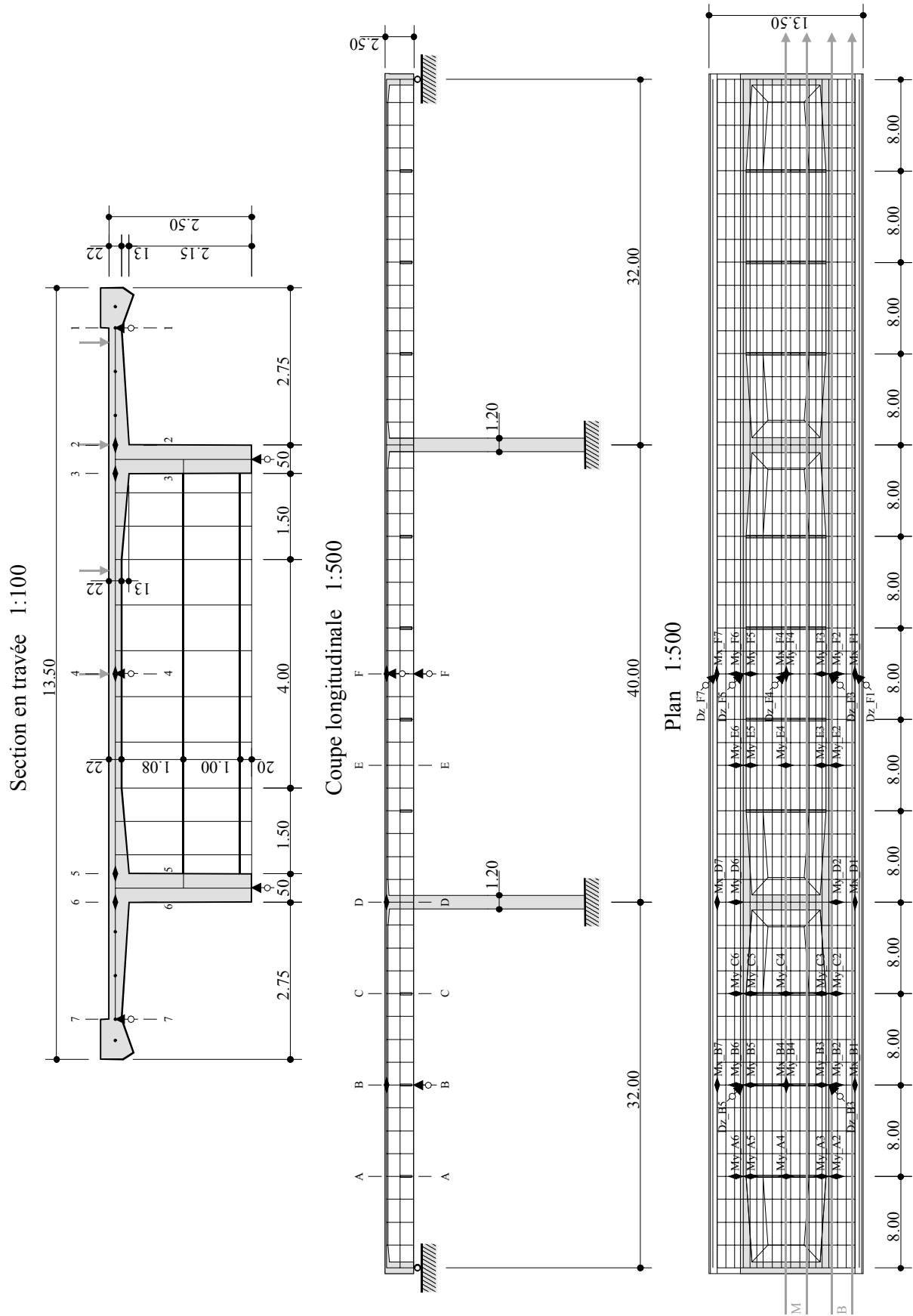


Figure A.5 Plan du pont P1

### A.6 Pont P2

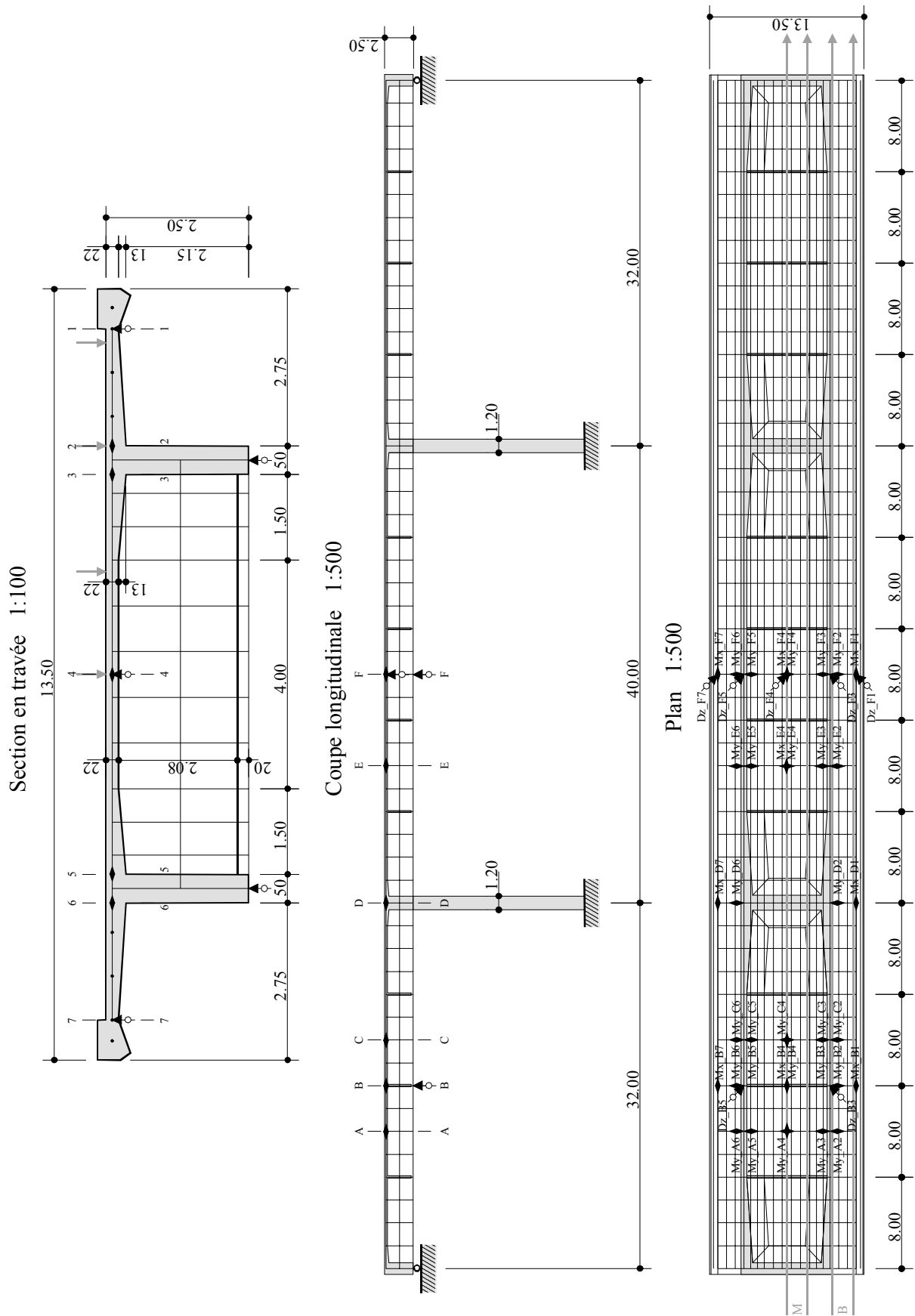


Figure A.6 Plan du pont P2

## Annexe B

# Caractéristiques dynamiques des ponts

### B.1 Ponts-poutre

Modes	Fréquences [Hz]				
	Pont C1	Pont C1P	Pont C2	Pont P1	Pont P2
Flexion	3.38	3.51	3.25	2.90	2.87
Flexion antimétrique	4.95	5.07	4.77	4.45	4.40
Flexion des trois travées	5.86	5.91	5.67	5.69	5.64
Torsion 2 <sup>ème</sup> travée	7.69	6.99	7.33	4.58 <sup>1</sup>	4.59 <sup>1</sup>
Torsion 1 <sup>ère</sup> travée	8.79	7.87	8.35	6.06	6.07
Torsion 3 <sup>ème</sup> travée	8.94	7.97	8.37	6.36	6.36
Modes de la dalle de roulement	9.88	9.60	9.28	8.80	8.77
	11.26	10.11	10.54	11.01	11.16
	12.08	10.29	10.60	11.10	11.20
	12.54	10.50	10.83	12.48	12.53
	12.65	10.58	11.21	13.20	13.69
	12.77	10.94	11.22	13.37	14.02
	12.99	11.00	11.38	13.56	14.25
	13.22	11.09	11.73	13.58	14.36
	13.42	11.52	12.16	13.59	15.30
	13.49	11.62	12.39	13.59	15.52
	13.55	11.68	12.53	13.61	15.52
	13.57	11.73	12.64	13.62	15.68
	13.69	12.17	13.12	13.63	15.96
14.03	13.16	13.14	13.66	16.42	

Tableau B.1 Fréquences propres des ponts-poutre

<sup>1</sup> Pour les ponts à section ouverte, le premier mode de torsion apparaît à une fréquence plus basse que celle du mode de flexion dans les trois travées.

## B.2 Pont-cadre

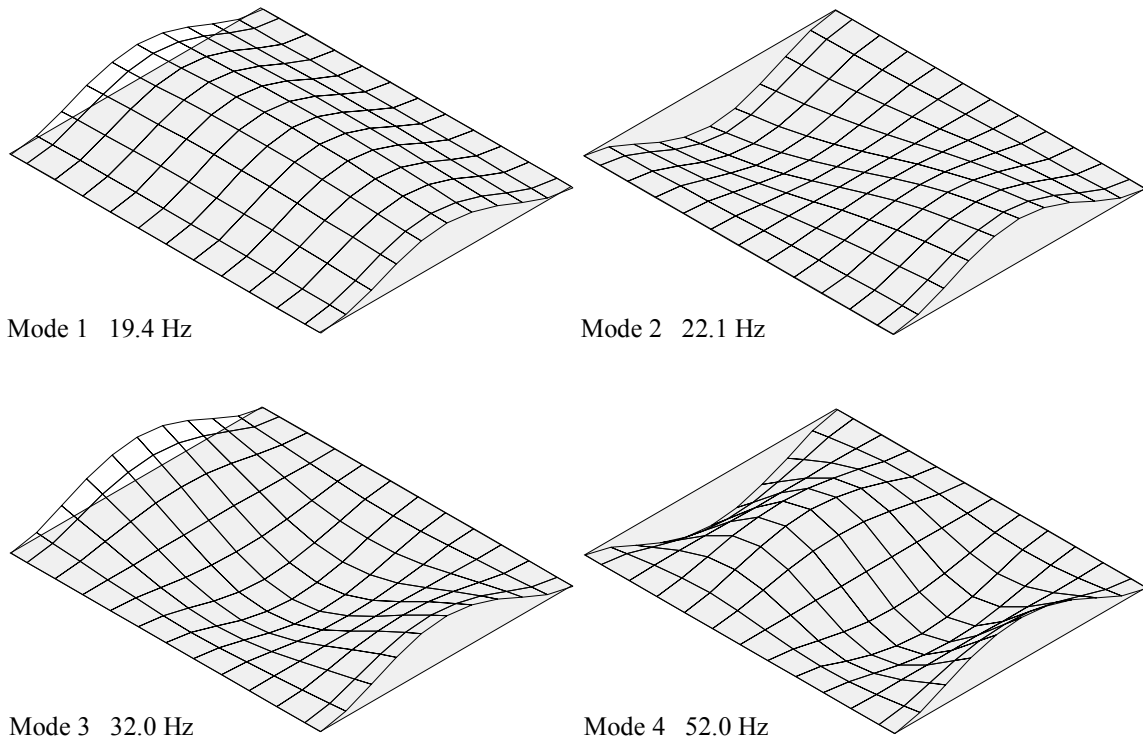


Figure B.1 Modes et fréquences propres du pont-cadre



## Annexe C

### Modèles de véhicule

#### C.1 Camion 12\_A en 2 dimensions (5 degrés de liberté)

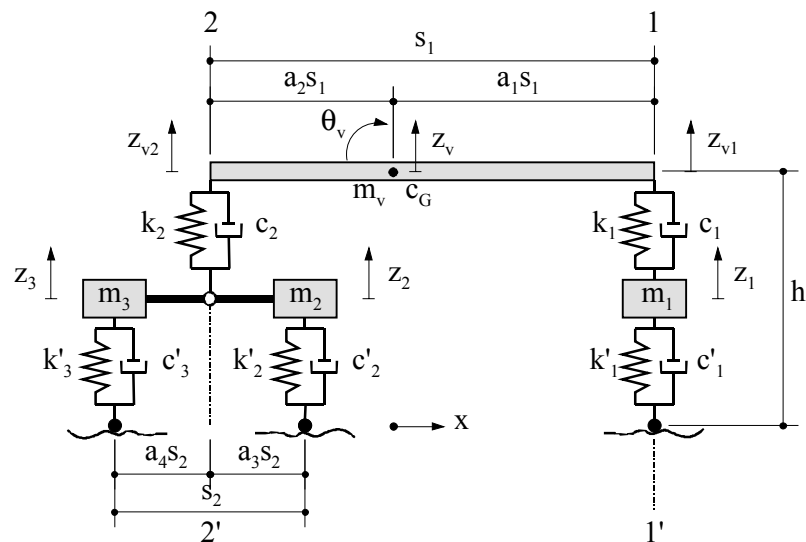


Figure C.1 Modèle en 2D du véhicule 12\_A

Équation générale du mouvement:  $M \ddot{Z} + C \dot{Z} + K Z = F$

Matrice de masse

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & m_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & & m_3 & 0 & \dots & 0 \\ & & & m_v \left( a_2^2 + \frac{h^2}{s_1^2} \right) + \frac{I_{Gv}}{s_1^2} & m_v \left( a_1 a_2 - \frac{h^2}{s_1^2} \right) - \frac{I_{Gv}}{s_1^2} & \\ \text{sym.} & & & m_v \left( a_1^2 + \frac{h^2}{s_1^2} \right) + \frac{I_{Gv}}{s_1^2} & & \end{bmatrix}$$

## Matrice d'amortissement

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c'_1 & 0 & 0 & -c_1 & 0 \\ & c_2 a_4^2 + c'_2 & c_2 a_3 a_4 & 0 & -c_2 a_4 \\ & & c_2 a_3^2 + c'_3 & 0 & -c_2 a_3 \\ & & & c_1 & 0 \\ \text{sym.} & & & & c_2 \end{bmatrix}$$

## Matrice de rigidité

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k'_1 & 0 & 0 & -k_1 & 0 \\ & k_2 a_4^2 + k'_2 & k_2 a_3 a_4 & 0 & -k_2 a_4 \\ & & k_2 a_3^2 + k'_3 & 0 & -k_2 a_3 \\ & & & k_1 & 0 \\ \text{sym.} & & & & k_2 \end{bmatrix}$$

## Vecteur force

$$F = \begin{bmatrix} -m_1 g + k'_1 [w(x_1, y_1, t) + r(x_1, y_1)] + c'_1 [\dot{w}(x_1, y_1, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x}\right)_{x=x_1} \dot{x}_1] \\ -m_2 g + k'_2 [w(x_2, y_2, t) + r(x_2, y_2)] + c'_2 [\dot{w}(x_2, y_2, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x}\right)_{x=x_2} \dot{x}_1] \\ -m_3 g + k'_3 [w(x_3, y_3, t) + r(x_3, y_3)] + c'_3 [\dot{w}(x_3, y_3, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x}\right)_{x=x_3} \dot{x}_1] \\ -a_2 m_v g + m_v \frac{h}{s_1} \ddot{x}_1 \\ -a_1 m_v g - m_v \frac{h}{s_1} \ddot{x}_1 \end{bmatrix}$$

## C.2 Camion 12\_B en 2 dimensions (6 degrés de liberté)

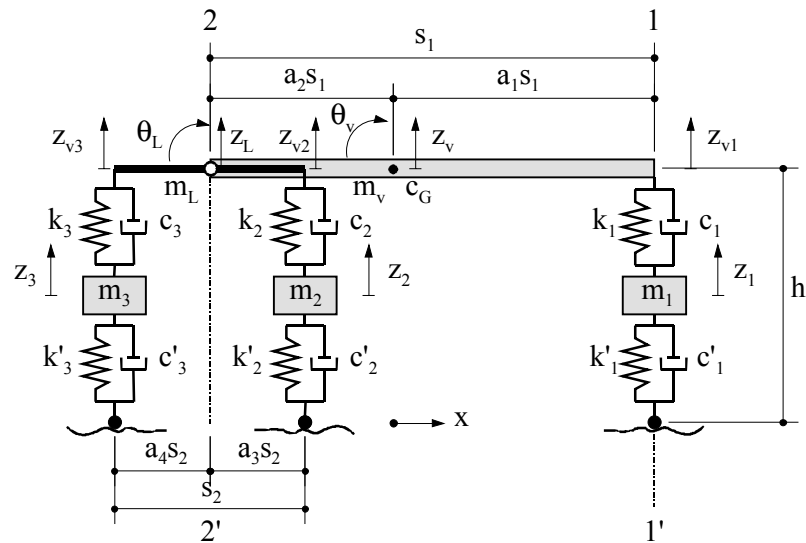


Figure C.2 Modèle en 2D du véhicule 12\_B

Équation générale du mouvement:  $M \ddot{Z} + C \dot{Z} + K Z = F$

Matrice de masse

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_v a_2^2 + \frac{I_{\theta v}}{s_1^2} & m_v a_1 a_2 a_4 - \frac{a_4}{s_1^2} I_{\theta v} & m_v a_1 a_2 a_3 - \frac{a_4}{s_1^2} I_{\theta v} \\ + (m_v + m_L) \frac{h^2}{s_1^2} & - (m_v + m_L) \frac{a_4 h^2}{s_1^2} & - (m_v + m_L) \frac{a_3 h^2}{s_1^2} \\ m_v a_1^2 a_4^2 + m_L a_4^2 + \frac{a_4^2}{s_1^2} I_{\theta v} & m_v a_1^2 a_3 a_4 + m_L a_3 a_4 - \frac{I_{\theta L}}{s_2^2} \\ + (m_v + m_L) \frac{a_4^2 h^2}{s_1^2} + \frac{I_{\theta L}}{s_2^2} & + (m_v + m_L) \frac{a_3 a_4 h^2}{s_1^2} + \frac{a_3 a_4}{s_1^2} I_{\theta v} \\ \text{sym.} & m_v a_1^2 a_3^2 + m_L a_3^2 + \frac{a_3^2}{s_1^2} I_{\theta v} \\ + (m_v + m_L) \frac{a_3^2 h^2}{s_1^2} + \frac{I_{\theta L}}{s_2^2} \end{bmatrix}$$

## Matrice d'amortissement

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c'_1 & 0 & 0 & -c_1 & 0 & 0 \\ & c_2 + c'_2 & 0 & 0 & -c_2 & 0 \\ & & c_3 + c'_3 & 0 & 0 & -c_3 \\ & & & c_1 & 0 & 0 \\ & & & & c_2 & 0 \\ \text{sym.} & & & & & c_3 \end{bmatrix}$$

## Matrice de rigidité

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k'_1 & 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 \\ & k_2 + k'_2 & 0 & 0 & -k_2 & 0 \\ & & k_3 + k'_3 & 0 & 0 & -k_3 \\ & & & k_1 & 0 & 0 \\ & & & & k_2 & 0 \\ \text{sym.} & & & & & k_3 \end{bmatrix}$$

## Vecteur force

$$F = \begin{bmatrix} -m_1 g + k'_1 [w(x_1, y_1, t) + r(x_1, y_1)] + c'_1 \left[ \dot{w}(x_1, y_1, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_1} \dot{x}_1 \right] \\ -m_2 g + k'_2 [w(x_2, y_2, t) + r(x_2, y_2)] + c'_2 \left[ \dot{w}(x_2, y_2, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_2} \dot{x}_1 \right] \\ -m_3 g + k'_3 [w(x_3, y_3, t) + r(x_3, y_3)] + c'_3 \left[ \dot{w}(x_3, y_3, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_3} \dot{x}_1 \right] \\ -a_2 m_v g + (m_v + m_L) \frac{h}{s_1} \ddot{x}_1 \\ -a_1 a_4 m_v g - a_4 m_L g - (m_v + m_L) \frac{a_4 h}{s_1} \ddot{x}_1 \\ -a_1 a_3 m_v g - a_3 m_L g - (m_v + m_L) \frac{a_3 h}{s_1} \ddot{x}_1 \end{bmatrix}$$

### C.3 Camion 12\_A en 3 dimensions (9 degrés de liberté)

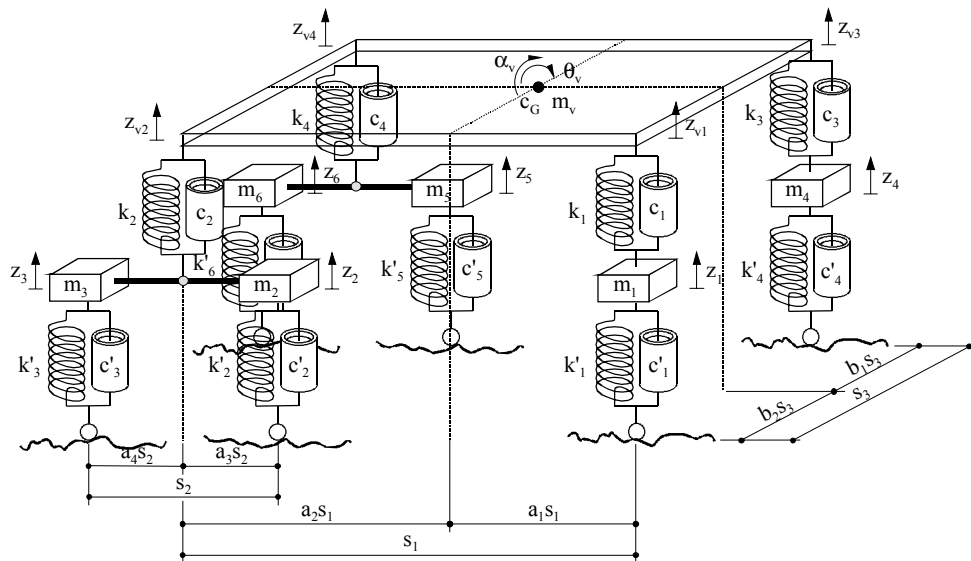


Figure C.3 Modèle en 3D du véhicule 12\_A

Équation générale du mouvement:  $M \ddot{Z} + C \dot{Z} + K Z = F$

Matrice de masse

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_v \left( a_2^2 + \frac{h^2}{s_1^2} \right) + \frac{I_{bv}}{s_1^2} & m_v \left( a_1 a_2 - a_2 b_2 - \frac{h^2}{s_1^2} \right) - \frac{I_{bv'}}{s_1^2} & m_v a_2 b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_v \left[ (a_1 - b_2)^2 + \frac{h^2}{s_1^2} \right] + \frac{I_{bv}}{s_1^2} + \frac{I_{gv}}{s_3^2} & m_v [a_1 b_2 - b_2^2] - \frac{I_{gv'}}{s_3^2} \\ \text{sym.} & & & & & & & & m_v b_2^2 + \frac{I_{gv'}}{s_3^2} \end{bmatrix}$$

## Matrice d'amortissement

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c'_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & 0 & 0 \\ & c_2 a_4^2 + c'_2 & c_2 a_3 a_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_2 a_4 & 0 \\ & & c_2 a_3^2 + c'_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_2 a_3 & 0 \\ & & & c_3 + c'_4 & 0 & 0 & -c_3 & c_3 & -c_3 \\ & & & & c_4 a_4^2 + c'_5 & c_4 a_3 a_4 & 0 & 0 & -c_4 a_4 \\ & & & & & c_4 a_3^2 + c'_6 & 0 & 0 & -c_4 a_3 \\ & & & & & & c_1 + c_3 & -c_3 & c_3 \\ & & & & & & & c_2 + c_3 & -c_3 \\ \text{sym.} & & & & & & & & c_3 + c_4 \end{bmatrix}$$

## Matrice de rigidité

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k'_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 \\ & k_2 a_4^2 + k'_2 & k_2 a_3 a_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 a_4 & 0 \\ & & k_2 a_3^2 + k'_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 a_3 & 0 \\ & & & k_3 + k'_4 & 0 & 0 & -k_3 & k_3 & -k_3 \\ & & & & k_4 a_4^2 + k'_5 & k_4 a_3 a_4 & 0 & 0 & -k_4 a_4 \\ & & & & & k_4 a_3^2 + k'_6 & 0 & 0 & -k_4 a_3 \\ & & & & & & k_1 + k_3 & -k_3 & k_3 \\ & & & & & & & k_2 + k_3 & -k_3 \\ \text{sym.} & & & & & & & & c_3 + c_4 \end{bmatrix}$$

## Vecteur force

$$F = \begin{bmatrix} -m_1 g + k'_1 [w(x_1, y_1, t) + r(x_1, y_1)] + c'_1 [\dot{w}(x_1, y_1, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x}\right)_{x=x_1} \dot{x}_1] \\ -m_2 g + k'_2 [w(x_2, y_2, t) + r(x_2, y_2)] + c'_2 [\dot{w}(x_2, y_2, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x}\right)_{x=x_2} \dot{x}_1] \\ -m_3 g + k'_3 [w(x_3, y_3, t) + r(x_3, y_3)] + c'_3 [\dot{w}(x_3, y_3, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x}\right)_{x=x_3} \dot{x}_1] \\ -m_4 g + k'_4 [w(x_4, y_4, t) + r(x_4, y_4)] + c'_4 [\dot{w}(x_4, y_4, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x}\right)_{x=x_4} \dot{x}_1] \\ -m_5 g + k'_5 [w(x_5, y_5, t) + r(x_5, y_5)] + c'_5 [\dot{w}(x_5, y_5, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x}\right)_{x=x_5} \dot{x}_1] \\ -m_6 g + k'_6 [w(x_6, y_6, t) + r(x_6, y_6)] + c'_6 [\dot{w}(x_6, y_6, t) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x}\right)_{x=x_6} \dot{x}_1] \\ -a_2 m_v g + m_v \frac{h}{s_1} \ddot{x}_1 \\ -a_1 m_v g + b_2 m_v g - m_v \frac{h}{s_1} \ddot{x}_1 \\ -b_2 m_v g \end{bmatrix}$$

### C.4 Camion 12\_B en 3 dimensions (11 degrés de liberté)

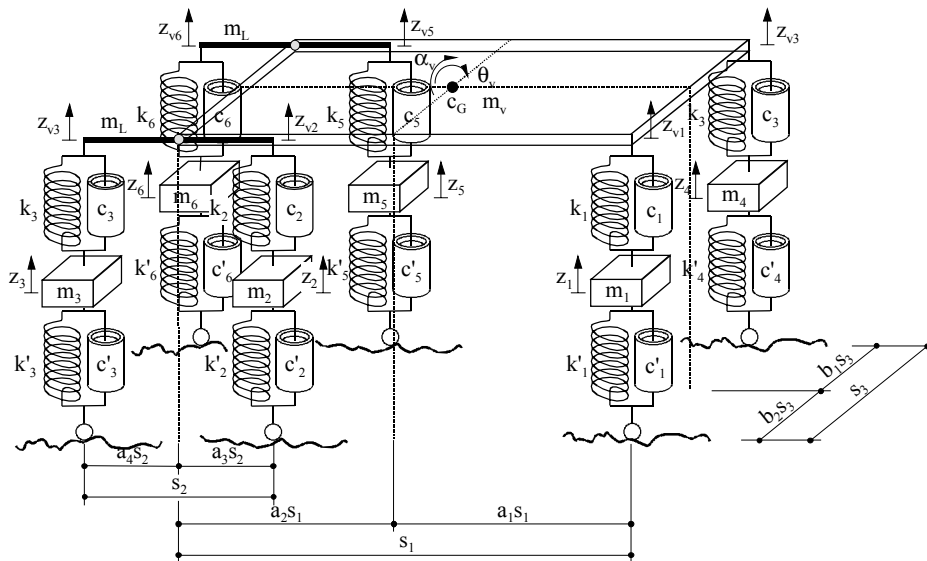


Figure C.4 Modèle en 3D du véhicule 12\_B

Équation générale du mouvement:  $M \ddot{Z} + C \dot{Z} + K Z = F$

Matrice d'amortissement

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c'_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 + c'_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 + c'_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 + c'_4 & 0 & 0 & -c_4 & c_4 a_4 & c_4 a_3 & -c_4 a_4 & -c_4 a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_5 + c'_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_6 + c'_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 + c_4 & -c_4 a_4 & -c_4 a_3 & c_4 a_4 & c_4 a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_2 + c_4 a_4^2 & c_4 a_3 a_4 & -c_4 a_4^2 & -c_4 a_3 a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 + c_4 a_3^2 & -c_4 a_3 a_4 & -c_4 a_3^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_5 + c_4 a_4^2 & c_4 a_3 a_4 \\ \text{sym.} & & & & & & & & & & c_6 + c_4 a_3^2 \end{bmatrix}$$





## Matrice de rigidité

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix}
 k_1 + k'_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & k_2 + k'_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\
 & & k_3 + k'_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_3 & 0 & 0 \\
 & & & k_4 + k'_4 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 a_4 & k_4 a_3 & -k_4 a_4 & -k_4 a_3 \\
 & & & & k_5 + k'_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_5 & 0 \\
 & & & & & k_6 + k'_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_6 \\
 & & & & & & k_1 + k_4 & -k_4 a_4 & -k_4 a_3 & k_4 a_4 & k_4 a_3 \\
 & & & & & & & k_2 + k_4 a_4^2 & k_4 a_3 a_4 & -k_4 a_4^2 & -k_4 a_3 a_4 \\
 & & & & & & & & k_3 + k_4 a_3^2 & -k_4 a_3 a_4 & -k_4 a_3^2 \\
 & & & & & & & & & k_5 + k_4 a_4^2 & k_4 a_3 a_4 \\
 \text{sym.} & & & & & & & & & & k_6 + k_4 a_3^2
 \end{bmatrix}$$

## Vecteur force

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix}
 -m_1 g + k'_1 [w(x_1, y_1, t) + r(x_1, y_1)] + c'_1 \left[ \dot{w}(x_1, y_1, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_1} \dot{x}_1 \right] \\
 -m_2 g + k'_2 [w(x_2, y_2, t) + r(x_2, y_2)] + c'_2 \left[ \dot{w}(x_2, y_2, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_2} \dot{x}_1 \right] \\
 -m_3 g + k'_3 [w(x_3, y_3, t) + r(x_3, y_3)] + c'_3 \left[ \dot{w}(x_3, y_3, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_3} \dot{x}_1 \right] \\
 -m_4 g + k'_4 [w(x_4, y_4, t) + r(x_4, y_4)] + c'_4 \left[ \dot{w}(x_4, y_4, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_4} \dot{x}_1 \right] \\
 -m_5 g + k'_5 [w(x_5, y_5, t) + r(x_5, y_5)] + c'_5 \left[ \dot{w}(x_5, y_5, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_5} \dot{x}_1 \right] \\
 -m_6 g + k'_6 [w(x_6, y_6, t) + r(x_6, y_6)] + c'_6 \left[ \dot{w}(x_6, y_6, t) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial x} \right)_{x=x_6} \dot{x}_1 \right] \\
 -a_2 m_v g + (m_v + m_{L1} + m_{L2}) \frac{h}{s_1} \ddot{x}_1 \\
 -a_4 (a_1 - b_2) m_v g - a_4 m_{L1} g - (m_v + m_{L1} + m_{L2}) \frac{a_4 h}{s_1} \ddot{x}_1 \\
 -a_3 (a_1 - b_2) m_v g - a_3 m_{L1} g - (m_v + m_{L1} + m_{L2}) \frac{a_3 h}{s_1} \ddot{x}_1 \\
 -a_4 b_2 m_v g - a_4 m_{L2} g \\
 -a_3 b_2 m_v g - a_3 m_{L2} g
 \end{bmatrix}$$



# Curriculum vitae

Nom: Claude BROQUET  
Date et lieu de naissance: 8 mai 1970 à Delémont  
Origine: Movelier, Jura (CH)

## Formation:

1988 Maturité fédérale, type C  
Lycée cantonal, Porrentruy  
1993 Diplôme d'ingénieur civil  
École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)

## Expériences professionnelles:

1993 - 1995; IBAP-EPFL, Lausanne  
Assistant sous la direction du professeur R. Walther

Réalisation d'essais statiques et dynamiques sur un modèle réduit de pont haubané courbe (Pont de Schaffhouse)  
Collaboration à des travaux d'expertise dans le domaine des ponts haubanés  
Collaboration à des tâches d'enseignement dans le domaine des structures en béton armé et précontraint

Dès 1995, MCS-EPFL, Lausanne  
Assistant sous la direction du professeur E. Brühwiler

Recherche sur le comportement dynamique des dalles de roulement des ponts en béton sollicités par le trafic routier  
Recherche sur le comportement dynamique des ponts haubanés  
Collaboration à des travaux d'expertise liés à la remise en état de ponts  
Réalisation d'essais en laboratoire sur des éléments de structures  
Collaboration à des tâches d'enseignement dans le domaine de l'évaluation des ouvrages  
Responsable informatique de l'unité

Hiver 1997-98, GIREF, Département de génie civil, Université Laval, Québec  
Stage sous la direction du professeur M. Fafard

Analyse numérique du comportement dynamique des ponts

## Distinction:

Prix "William Grenier EPFL" en 1993 récompensant le travail de diplôme