Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral des routes OFROU
Division réseaux routiers (N)

Documentation

Evaluation de ponts routiers existants avec un modèle de charge de trafic actualisé

Edition 2006

Documentation

Evaluation de ponts routiers existants avec un modèle de charge de trafic actualisé

Mandat de recherche 2002/005 effectué à la demande du Groupe de travail Recherche en matière de ponts

Edition 2006

Impressum

Auteur(s)
Centre de recherche: ICOM EPF-Lausanne
Thierry Meystre, ing. civil dipl. EPFL
Manfred A. Hirt, Prof., dr sc. techn., ing. civil dipl. EPFZ/SIA

Editeur
Office fédéral des routes OFROU
Division réseaux routiers (N), 3003 Berne

Lieu, année
Berne, 2006

Diffusion
OFCL vente des publications fédérales, CH-3003 Berne, www.bbl.ch
Nº d'article : 806.328.f
La documentation peut être téléchargée gratuitement depuis www.astra.admin.ch.

Prix (version imprimée)
CHF 60.-

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'office fédéral des routes.

© OFROU 2006, reproduction – excepté pour des fins commerciales – soumise à une citation de la source.

AVANT PROPOS

Une importante révision de la norme SIA 160, y compris de la partie relative aux charges dues au trafic routier, a été entreprise durant les années 80. Les travaux effectués durant cette période ont permis de proposer, dans l'édition 1989, des modèles de charge du trafic routier fondamentalement nouveaux, dans la mesure où ils sont le résultat d'une approche probabiliste basée sur des mesures de trafic.

Le nouvel accord sur les transports terrestres permet à la Suisse d'accéder au marché des transports routiers européen. La limite légale du poids total des camions en Suisse a été progressivement relevée à 40 tonnes. Dans un même temps, les normes de structure suisses ont été adaptées aux Eurocodes.

On constate alors qu'il manque un concept cohérent adapté à ces changements de législation pour l'évaluation des ponts routiers existants. En effet, la norme SIA 261 (2003) ne s'applique en principe qu'au dimensionnement de nouvelles structures. L'Office fédéral des routes (OFROU) a donc décidé de combler cette lacune en soutenant la recherche, qui a pour principal objectif d'établir des modèles de charge actualisé pour l'évaluation de la sécurité structurale de ponts routiers existants.

Le présent rapport résume la recherche relative au développement d'un modèle de charge de trafic comprenant des camions avec un poids légal jusqu'à 40 tonnes. Une approche probabiliste, basée sur les mesures récentes du trafic effectuées en Suisse, a été utilisée pour cette étude. Le modèle développé se réfère à la norme SIA 261 actuellement en vigueur, seules les valeurs numériques des coefficients α sont changées. L'ingénieur a ainsi un outil direct, en introduisant ces facteurs actualisés en fonction des types de ponts pour l'évaluation d'un pont existant. Le chapitre 6, qui a été également traduit en allemand, présente le modèle actualisé et son domaine d'application.

De plus, les facteurs de charge pour le poids propre et les charges permanentes des ponts [OFROU, 1998] peuvent être actualisés pour l'évaluation pour autant que les conditions d'application soient respectées.

Nous tenons à remercier l'Office fédéral des routes pour sa confiance en nous attribuant cette recherche ainsi que pour le soutien financier qui nous a été apporté. Nous exprimons également notre reconnaissance à la commission d'accompagnement de l'OFROU, composée de MM. P. Matt (président), M. Donzel, H. Figi, Prof. Dr A. Muttoni, W. Schuler et Dr D. Somaini pour les excellents contacts et l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Nos remerciements vont également à tous les collaborateurs scientifiques ayant apporté leur contribution à cette étude, soit : Luis Borges, Danijel Močibob, Claire Scholtès et Thomas Vollmar.

EPFL-ICOM, mars 2006

Prof. Dr Manfred A. Hirt

Adresse du centre de recherche

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire de la construction métallique (ICOM)
GC B3 505, Station 18
CH-1015 Lausanne
E-mail : icom@epfl.ch
Site web : http://icom.epfl.ch

RESUME

L'objectif de ce mandat de recherche est d'établir un modèle de charge pour « le trafic suisse », limité par un poids légal de 40 tonnes*. Le modèle est établi pour évaluer des ponts routiers existants à deux voies (trafic bidirectionnel) et les ponts autoroutiers à deux voies également (trafic unidirectionnel).

Diverses études ont été réalisées par le passé dans ce domaine et des modèles de charge actualisés ont déjà été développés. Avec l'entrée en vigueur de la nouvelle norme SIA 261 en 2003, il était néanmoins nécessaire d'établir de nouveaux modèles compatibles avec celle-ci.

Le réseau routier suisse est équipé de plusieurs installations de pesage en marche qui fournissent des données toute l'année 24 heures sur 24. La première étape de cette recherche a consisté à analyser ces mesures pour définir une modélisation du trafic qui s'approche autant que possible du trafic réel. Un logiciel de traitement des mesures a été développé dans ce but. Les trafics de plusieurs stations en Suisse ont ainsi pu être modélisés puis comparés.

Dans une deuxième étape, un logiciel de simulation de trafic offrant une grande souplesse de configuration a été développé. Celui-ci a permis de faire passer virtuellement les différents trafics modélisés sur plusieurs types de ponts. Différentes sections transversales (caisson, bipoutre, multipoutre et dalle), différents systèmes statiques et différentes portées ont été étudiés pour des configurations et des trafics variables. Pour tous les cas traités, le logiciel a fourni la distribution des efforts maximaux enregistrés pendant une période de simulation définie en tenant compte d'un facteur d'amplification dynamique variable en fonction de la charge totale sur la ligne d'influence.

Les résultats des simulations ont été dans une troisième étape comparés aux valeurs de calcul des efforts selon la norme SIA 261. Il a été constaté que les efforts obtenus par simulation sur la base d'un trafic mesuré en 2003 sont globalement 50% inférieurs à ceux calculés avec le modèle de charge de la norme SIA 261. La nouvelle norme comprend donc une réserve importante par rapport au trafic actuel.

Des hypothèses ont été faites pour tenir compte de l'évolution future du trafic sur un horizon de 15 à 20 ans. Des études paramétriques ont été réalisées et ont permis de définir des marges à admettre sur les résultats des simulations pour considérer ces prévisions dans le modèle actualisé.

Le modèle actualisé proposé consiste à appliquer le modèle de charge de la norme SIA 261 avec des coefficients α actualisés. Ces coefficients ont été établis sur la base des comparaisons entre les efforts simulés et les efforts calculés selon la norme, en tenant compte des marges proposées. Les différents résultats obtenus étant relativement constants, il a été possible de fournir un modèle actualisé extrêmement simple. Les coefficients α proposés sont en effet indépendants de la portée, du type d'efforts, et du type de routes. Seul l'effet du type de pont a été différencié.

Cette étude a montré que l'utilisation de la norme SIA 261 pour l'évaluation des ponts routiers et autoroutiers existant à deux voies de circulation est conservatrice pour le trafic attendu dans les 15 à 20 prochaines années. Par conséquent, un nouveau modèle de charge a pu être établi pour l'évaluation de ces ouvrages. Les résultats de cette étude apportent ainsi un outil précieux aux responsables des ponts et aux ingénieurs chargés de les évaluer.

* Trafic 40 tonnes signifie un trafic routier comprenant des camions d'un poids légal de 40 tonnes. Ce trafic inclut néanmoins des camions plus lourds que 40 tonnes contenant une certaine surcharge ou circulant avec des permis ad-hoc.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 1

1.1 OBJECTIFS ... 1

1.2 PRINCIPES DE BASE D'EVALUATION ... 1

1.3 BUT ET LIMITES DU MANDAT DE RECHERCHE ... 2

1.4 DEMARCHE ... 3

1.4.1 Normes en vigueur ... 3

1.4.2 Principe des simulations ... 3

1.4.3 Trafic considéré ... 3

1.4.4 Principe du modèle actualisé ... 4

2. BASES ET HYPOTHESES 5

2.1 CHAUSSEE ET STRUCTURE PORTEUSE ... 5

2.1.1 Configuration de la chaussée ... 5

2.1.2 Section transversale ... 6

2.1.3 Système statique longitudinal ... 7

2.1.4 Efforts ... 8

2.2 MODELISATION DU TRAFIC ... 8

2.2.1 Mesures de trafic ... 9

2.2.2 Types de véhicules ... 10

2.2.3 Composition du trafic ... 10

2.2.4 Volume de trafic ... 11

2.3 MODELISATION DES VEHICULES ... 12

2.3.1 Poids totaux ... 12

2.3.2 Poids des essieux ... 13

2.3.3 Effet dynamique ... 14

2.3.4 Géométrie ... 14

2.3.5 Modèle déterministe ... 15

2.4 MODELISATION DE LA CIRCULATION ... 16

2.4.1 Conditions de circulation ... 16

2.4.2 Distance entre véhicules ... 16

2.4.3 Répartition sur les voies de circulation ... 17

3. SIMULATIONS DE TRAFIC 19

3.1 AMPLIFICATION DYNAMIQUE ... 19

3.2 NOMBRE DE VEHICULES SIMULES ... 20

3.3 NOMBRE DE SIMULATIONS ... 20

3.4 VALEUR DE CALCUL ... 20

3.5 TRAFICS SIMULES ... 21

3.6 CALCUL DETERMINISTE ... 22

4. COMPARAISON ENTRE LES SIMULATIONS ET LA NORME 23

4.1 PRINCIPE DE COMPARAISON ... 23

4.2 PONTS CAISSON ... 23

4.3 PONTS BIPOUTRES ... 25

4.4 PONTS MULTIPOUTRES ... 26

4.5 PONTS DALLE ... 28

4.6 SITUATION DE CHANTIER ... 29

4.7 FACTEUR D'AMPLIFICATION DYNAMIQUE ... 30

4.8 ÉVOLUTION DU TRAFIC ... 31

4.8.1 Pourcentage de poids lourds ... *31*
4.8.2 Composition et poids totaux ... *31*
4.8.3 Véhicules 44 tonnes ... *32*

5. ÉTABLISSEMENT DU MODELE DE CHARGE 35

5.1 MARGES ... 35
5.2 FACTEUR DE MODELE ... 35
5.3 CHOIX DU MODELE ACTUALISE ... 36
5.4 COEFFICIENTS α ... 36

6. ÉVALUATION DE PONTS ROUTIERS EXISTANTS 39

6.1 PRINCIPE ... 39
6.2 MODELE DE CHARGE ... 41
6.3 DOMAINE D'APPLICATION ... 42
6.4 COEFFICIENTS α ACTUALISES ... 43
6.5 RECAPITULATION DES HYPOTHESES ... 43

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 47

ANNEXES 49

A.1 METHODE DE TRI DES VEHICULES PAR CLASSE ... 49
A.2 METHODE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU TRAFIC ... 49
A.3 COMPOSITION DU TRAFIC ... 52
A.4 DISTRIBUTION DES POIDS TOTAUX ... 53
A.5 POIDS DES ESSIEUX ... 60
A.6 MARGES DU MODELE ACTUALISE ... 64
A.6.1 Pont caisson ... *64*
A.6.2 Pont bipoutre ... *66*
A.6.3 Pont multipoutre ... *68*
A.6.4 Pont dalle ... *68*
A.7 FACTEUR D'AMPLIFICATION DYNAMIQUE ... 71
A.8 COMPARAISON ENTRE LA NORME SIA 160 ET LE MODELE ACTUALISE ... 72
A.9 POIDS LEGAL ET VEHICULES SPECIAUX ... 73
A.10 CAMIONS-GRUES JUSQU'A 96 TONNES ... 77
A.10.1 Introduction ... *77*
A.10.2 Hypothèses ... *77*
A.10.3 Résultats ... *78*
A.10.4 Modèle de charge actualisé ... *79*
A.10.5 Comparaison avec le modèle 3 type III de la norme SIA 261/1 (2003) ... *79*
A.10.6 Marges du modèle de charge actualisé ... *80*

1. INTRODUCTION

1.1 OBJECTIFS

Les normes suisses de construction ayant évolué durant ces dernières décennies, certains ponts routiers ne satisfont plus les nouvelles exigences de sécurité prescrites dans les normes en vigueur. Dans un tel cas, l'ingénieur chargé de l'évaluation ne doit pas nécessairement conclure que le pont doit être renforcé, remplacé, ou faire l'objet de restrictions d'utilisation telles qu'une limite du poids des véhicules. En effet, grâce à une meilleure connaissance des charges réellement appliquées et de la résistance effective de la structure porteuse, il est souvent possible d'augmenter la durée d'utilisation de l'ouvrage sans frais particuliers.

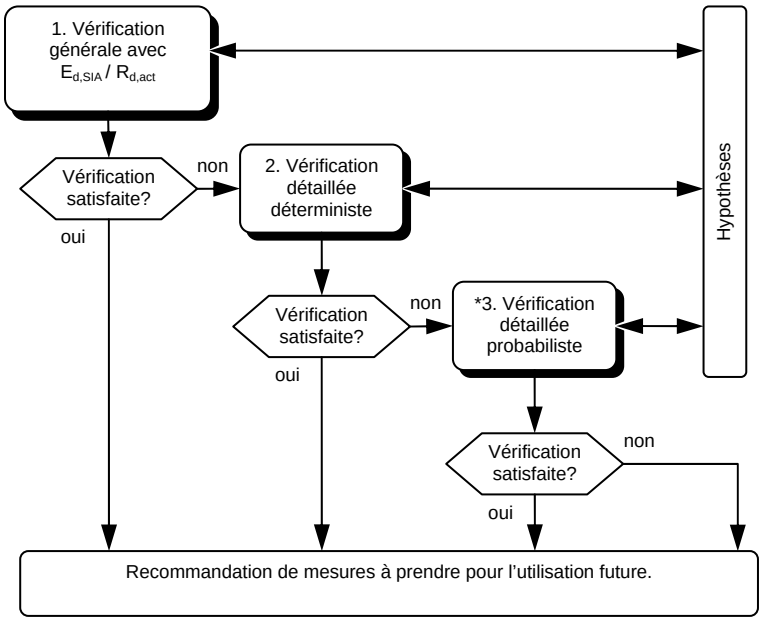
Les principales charges appliquées à un pont routier sont le poids propre, les charges permanentes et les charges de trafic. Ce sont ces dernières qui font l'objet de ce rapport. Pour le poids propre et les charges permanentes, le lecteur est renvoyé au rapport [OFROU, 1998].

Le réseau routier suisse est équipé de systèmes automatiques de comptage de véhicules, ainsi que de plusieurs installations de pesage en marche (WIM = Weigh In Motion). L'analyse de ces données de différentes sources apporte la connaissance du trafic, nécessaire à une modélisation du trafic pour l'évaluation de la structure.

L'objectif est donc de proposer un modèle de charge actualisé pour l'évaluation de la sécurité structurale d'ouvrages existants, basé sur l'analyse des données de pesage du trafic réel suisse.

1.2 PRINCIPES DE BASE D'EVALUATION

La vérification de la sécurité structurale d'un ouvrage peut être réalisée en plusieurs étapes. Lorsque la première vérification (avec les normes de structures en vigueur) n'apporte pas un résultat positif, il s'agit de passer à une deuxième étape qui utilise les valeurs actualisées des sollicitations ainsi que des résistances. Lorsque cette deuxième étape n'apporte pas non plus un résultat satisfaisant, une analyse probabiliste peut être réalisée, à condition de compléter les connaissances du cas étudié. La figure 1.1 montre schématiquement le processus par étapes pour l'évaluation de ponts existants.



* Cette étape ne sera pas effectuée si l'effort consenti est trop important par rapport au bénéfice escompté.

***Figure 1.1** – Processus par étapes pour l'évaluation de ponts existants*

1ère étape : Vérification générale

L'ingénieur peut facilement se faire une idée de la sécurité structurale du pont à évaluer en utilisant les normes de structures en vigueur. En ce qui concerne le calcul des sollicitations, la démarche correspond à celle utilisée pour le dimensionnement de nouvelles structures, elle devrait donc être familière à l'ingénieur. Les résistances sont établies au moyen des valeurs actualisées des propriétés des matériaux qui peuvent être déterminées par des auscultations visuelles ou éventuellement par des essais non destructifs. Cette première étape a l'avantage de permettre d'identifier relativement rapidement les parties déterminantes pour l'évaluation que ce soit les éléments de construction ou les sections.

2ème étape : Vérification détaillée déterministe

Dans cette deuxième étape de vérification, des valeurs actualisées sont déterminées aussi bien pour les résistances que pour les sollicitations. Ces valeurs, convenues avec le maître de l'ouvrage doivent être définies dans la convention d'utilisation. Les données actualisées pour vérifier un pont existant peuvent être tirées des rapports suivants :

- Pour les charges de trafic, le modèle de charge actualisé proposé par le présent rapport peut être considéré.
- Pour le poids propre et les charges permanentes, les facteurs de charge actualisés peuvent être déterminés selon le rapport [OFROU, 1998].

3ème étape : Vérification détaillée probabiliste

Une analyse probabiliste peut être utile, nécessaire ou économiquement intéressante pour effectuer la vérification structurale. Les données statistiques nécessaires à ce type d'analyse peuvent être déterminées par des mesures sur la structure.

L'avantage d'une telle démarche d'évaluation par étapes est de pouvoir commencer l'évaluation avec les hypothèses de calcul habituelles. Les hypothèses et calculs ne seront affinées seulement dans les cas où cela est nécessaire ou économiquement intéressant.

Il convient de remarquer que chaque évaluation doit être complétée par une recommandation de mesures à prendre pour l'utilisation future (figure 1.1). Dans le cas d'un renforcement comme dans le cas d'un remplacement, le dimensionnement doit être réalisé selon les normes en vigueur. Dans le cas d'un élargissement, celui-ci est dimensionné selon les normes en vigueur tandis que les anciennes parties sont évaluées grâce à des données actualisées.

1.3 BUT ET LIMITES DU MANDAT DE RECHERCHE

Le but de ce mandat de recherche est d'établir un modèle de charge pour « le trafic suisse », limité par un poids légal de 40 tonnes. Le modèle est établi en vue d'évaluer des ponts routiers existants à deux voies (trafic bidirectionnel) et les ponts autoroutiers à deux voies également (trafic unidirectionnel) d'une portée inférieure à 80 m. Il n'est pas destiné à évaluer les ponts ayant plus de deux voies. Pour l'évaluation de ces derniers, il est recommandé d'utiliser la norme SIA 261. Notons encore que pour les ponts autoroutiers, la question des situations de chantier (configuration 4-0) est traitée dans ce rapport.

Selon le concept d'entretien des routes nationales UPlaNS, la durée minimale entre deux interventions importantes sur un tronçon est d'environ 15 ans. Une des règles fixées consiste en effet à maintenir chaque tronçon libre de chantier pendant au moins 10 ans. Et si on ajoute à cette période le temps de contrôle, le temps de planification des travaux, le temps pour les procédures de soumission et finalement le temps pour l'exécution, il faut sans conteste prévoir au minimum 5 ans supplémentaires. Ainsi, il est décidé pour cette étude de considérer une période d'utilisation de 15 ans, et ce, aussi bien pour les routes bidirectionnelles que pour les autoroutes.

Par conséquent, les hypothèses d'évolution de trafic considérées dans cette étude se limitent à un horizon de 15 à 20 ans. Un suivi régulier du trafic doit être entrepris pour assurer que l'évolution réelle du trafic

correspond à nos hypothèses. Si cela ne devait pas être le cas, les résultats de cette recherche devraient être revus.

1.4 DEMARCHE

Le principe général de cette étude est de comparer, pour un certain nombre de ponts types, divers efforts déterminés d'une part avec un calcul des charges de trafic selon les normes en vigueur, et d'autre part avec des simulations probabilistes de trafic. Sur la base de ces comparaisons, un modèle de charge actualisé semblable à celui des normes en vigueur est établi. Les normes en vigueur, le trafic considéré ainsi que le principe de détermination du modèle de charge actualisé proposé sont décrits ci-après.

Notons qu'un logiciel de simulation de trafic basé sur celui réalisé par [Bailey, 1996] a été développé dans le cadre de cette étude. De plus, pour définir les trafics à simuler, une méthode et des outils d'analyse des données de pesage en marche ont été développés à l'ICOM.

1.4.1 Normes en vigueur

Les normes de structures actuellement en vigueur en Suisse sont les normes SIA 260 à 269. Cette étude est donc réalisée sur la base de ces normes, et en particulier sur la norme SIA 261 qui traite des charges de trafic routier. L'essentiel de cette étude concerne le modèle de charge 1, qui modélise le trafic de voitures et de camions.

Selon l'article 10.3.1 de la norme SIA 261, « les actions sur les structures porteuses des routes dépendent de la composition du trafic, de sa densité et de la fréquence de formation des bouchons ». Pour en tenir compte, la norme demande de multiplier les valeurs caractéristiques des charges du modèle 1 par des coefficients α_{Qi}, α_{qi} et α_{qr}. Pour les cas normaux de dimensionnement, ces coefficients sont admis égaux à 0.9 dans la norme SIA 261, mais ils peuvent être réduits, d'entente avec le maître de l'ouvrage et l'autorité de surveillance, jusqu'à une valeur minimale de 0.65.

1.4.2 Principe des simulations

Les simulations sont de type Monte Carlo et consistent à faire passer virtuellement des véhicules sur des ponts en relevant les efforts maximaux obtenus. Les ponts sont modélisés par les lignes d'influence de chaque effort considéré. Les véhicules sont modélisés par une suite d'essieux dont le poids et la position sont définis selon des lois statistiques. La distance entre les véhicules est également définie selon des lois statistiques en fonction des conditions de circulation (trafic saturé ou fluide par exemple). L'effort maximal est relevé après avoir simulé le passage d'un certain nombre de véhicules. Le nombre de véhicules à faire passer doit correspondre au trafic qui circule réellement sur le pont étudié pendant la période de temps considérée et dans une condition de circulation particulière. Cette opération est renouvelée plusieurs fois de manière à obtenir une distribution statistique des efforts maximaux. Un certain fractile de cette distribution est admise comme valeur de calcul de l'effort.

1.4.3 Trafic considéré

Dès le 1er janvier 2005, les véhicules 40 tonnes peuvent circuler librement en Suisse. Le modèle doit donc être établi sur la base d'un trafic 40 tonnes. Les données de pesages en marche (WIM) les plus récentes au début de cette étude (2003) comprennent déjà un pourcentage conséquent de véhicules 40 tonnes puisque, depuis quelques années, des quotas ont été progressivement admis sur les routes suisse.

Il convient d'établir des hypothèses sur l'évolution du trafic. Comme il est difficile de prévoir avec précision l'évolution à long terme, les prévisions se limitent à une vision à moyen terme, soit environ 15 à 20 ans.

En plus de l'évolution dans le temps, le trafic est variable dans l'espace. En effet, suivant l'axe routier considéré, la composition du trafic, sa densité et la fréquence de formation des bouchons sont différentes. L'objectif est néanmoins de proposer un modèle actualisé global, valable pour l'ensemble des routes suisses.

Compte tenu de ces réflexions, des simulations avec des trafics basés directement sur les pesages en marche de l'année 2003 de plusieurs axes routiers suisses sont effectuées dans un premier temps. La comparaison des résultats pour les différents trafics permet de considérer la variation dans l'espace. D'autres simulations sont ensuite effectuées en variant divers paramètres des trafics, et l'importance des ces modifications sur les résultats est analysée. Sur la base de ces études paramétriques, les réserves par rapport au trafic 2003 pour l'horizon admis peuvent être évaluées.

1.4.4 Principe du modèle actualisé

Le principe de vérification d'un pont à la sécurité structurale selon la norme SIA 260 est le suivant :

$E_d < R_d$ où E_d : valeur de calcul des effets d'action
$E\ \{\gamma_G G_k, \gamma_Q(\Sigma\alpha_{Qi}Q_i+\Sigma\alpha_{qi}q_i+\alpha_{qr}q_r)\}$

R_d : valeur de calcul de la résistance ultime

Dans le cas d'ouvrages existants qui ne satisfont pas les conditions des normes en vigueur, nous proposons d'appliquer la norme avec des coefficients α_{Qi}, α_{qi} et α_{qr} actualisés, déterminés dans le cadre de cette étude, en fonction d'un trafic type ainsi que de la structure (système statique, portée, …) et de l'effort considéré (M+, M-, V, …). Ces coefficients peuvent, dans certains cas, être inférieurs à la valeur minimale de 0.65 prévue pour le dimensionnement dans la norme SIA 261.

2. BASES ET HYPOTHESES

Ce chapitre définit les bases et hypothèses de toutes les simulations de trafic effectuées dans le cadre de cette étude. Elles sont regroupées en quatre sections :

2.1 Chaussée et structure porteuse : définition du nombre et de la position des voies de circulation sur différents ponts types, et définition du comportement et du système statique de ces derniers.

2.2 Modélisation du trafic : définition du trafic simulé, notamment du volume de trafic, du type de véhicules et de leur proportion.

2.3 Modélisation des véhicules : définition de la géométrie et des poids des véhicules simulés.

2.4 Modélisation de la circulation : définition des conditions de circulation, notamment des distances entre les véhicules et la répartition de chaque type de véhicules sur les différentes voies.

2.1 CHAUSSEE ET STRUCTURE PORTEUSE

Le trafic étant une série de charges mobiles, les efforts intérieurs dépendent de la position des véhicules. L'effet de chaque véhicule se calcule à l'aide des lignes d'influence transversale et longitudinale. Les lignes d'influence s'obtiennent après avoir défini la section transversale et le système statique longitudinal. Toute structure porteuse peut être traitée par l'introduction de ses lignes d'influence dans le programme de simulation de trafic.

De plus, il est nécessaire de définir la configuration de la chaussée sur le tablier du pont, car la position latérale des voies de circulation en dépend.

2.1.1 Configuration de la chaussée

Il existe diverses configurations de chaussée sur un tablier de pont. Selon la route considérée, le nombre, la largeur et la position latérale des voies de circulation, ainsi que la direction du trafic sont différents. Sur une route donnée, la configuration peut être modifiée au cours du temps, ou pendant une certaine période comme par exemple lors de chantiers. De plus, le cas de poids lourds momentanément stationnés sur la voie d'arrêt d'urgence d'une autoroute est devenu assez courant sur certains axes routiers.

A priori, on peut distinguer principalement les routes bidirectionnelles (cantonales et locales), et les autoroutes. Pour appréhender les différents cas de façon systématique, il a été décidé d'admettre des voies de circulation de 3 m de largeur correspondant à la largeur des voies fictives de la norme. Pour les situations normales, les cas de la Figure 2.1 sont étudiés. Pour les situations exceptionnelles, cette étude se limite à étudier la situation de chantier 4-0 présentée dans la Figure 2.2. Tous les autres cas ne pouvant pas être assimilés à l'une des configurations étudiées doivent faire l'objet d'études particulières.

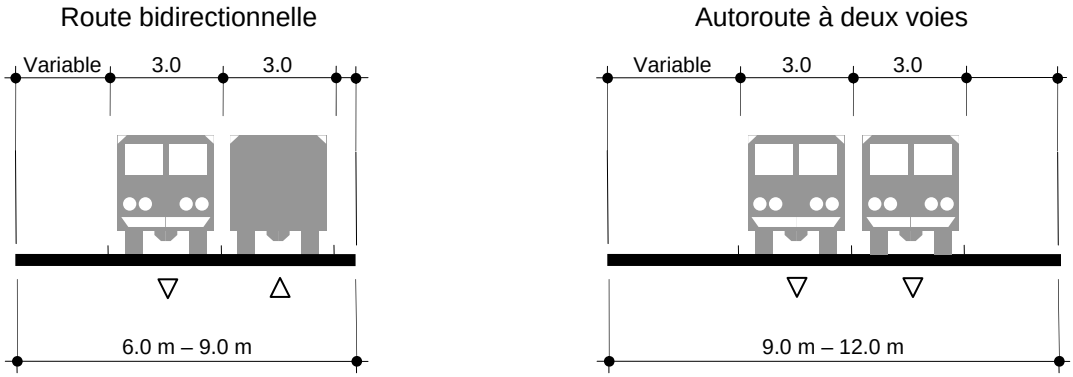
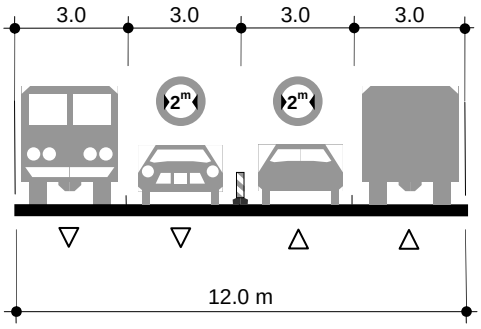


Figure 2.1 – *Configurations de chaussée normales étudiées*



Selon [OFROU – VSS, 1999], les largeurs minimales des voies sur les autoroutes sont de 2.5 m et 3.0 m pour les voies respectivement avec et sans restriction de largeur. En ajoutant 0.5 m au centre et une marge avec les glissières de 0.3 m de part et d'autre, on obtient une largeur minimale de 12.1 m. Cette largeur est arrondie à 12 m dans le cadre de cette étude.

***Figure 2.2** – Configuration de chantier 4-0 sur autoroute*

Il est admis pour les simulations de trafic que les véhicules circulent au milieu des voies ainsi définies.

2.1.2 Section transversale

En fonction du type de section transversale, l'effet du trafic pour un élément donné de la structure sur l'une ou l'autre des voies de circulation n'est pas le même. La section transversale doit être définie, afin d'en déduire la répartition latérale des efforts.

Quatre types de sections transversales sont étudiés : les ponts poutres caisson, les ponts bipoutres, les ponts multipoutres, et les ponts dalle.

Ponts poutres caisson

Pour les ponts poutres caisson (Figure 2.3), qu'ils soient en béton ou mixte (acier-béton), il est admis que chacune des voies de circulation a le même effet sur le moment de flexion ou l'effort tranchant de la section transversale, indépendamment de la position latérale sur la chaussée.

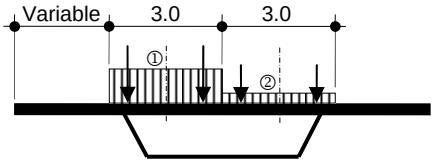


***Figure 2.3** – Pont poutre caisson*

Ponts bipoutres

Comme cas standard, un pont bipoutre mixte (acier-béton) est admis avec une répartition transversale simplifiée selon le schéma de la Figure 2.4.

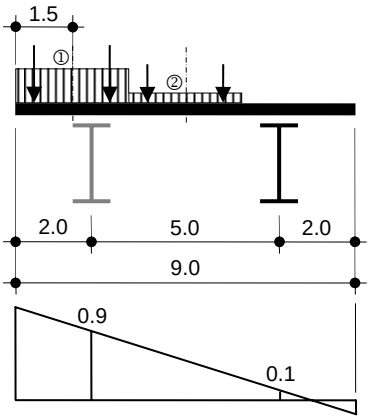


***Figure 2.4** – Pont bipoutre standard*

Afin de voir l'importance des hypothèses de répartition, mais aussi l'importance de la géométrie, notamment la distance entre les poutres ou la largeur du tablier, trois autres cas de bipoutres sont également considérés. Ces trois cas sont représentés à la Figure 2.5.

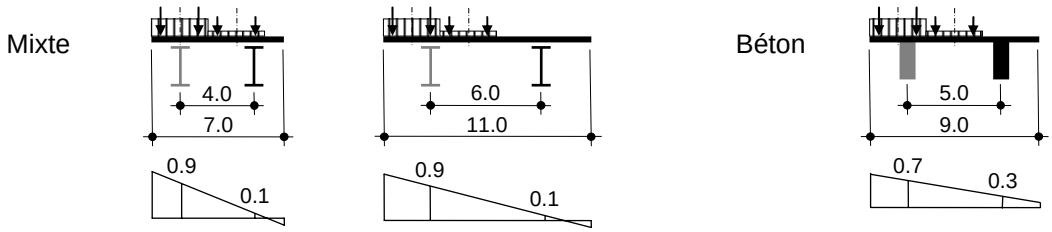


***Figure 2.5** – Autres types de ponts bipoutres étudiés*

Ponts multipoutres

Le comportement transversal des ponts multipoutres peut passablement différer d'un pont à l'autre. En effet, il dépend entre autres de l'écartement et de la hauteur des poutres, de la rigidité de la dalle, des éventuelles entretoises et de la portée. Après étude d'un certain nombre de ponts multipoutres en Suisse, il a été décidé de traiter trois poutres différentes sur deux ponts types particuliers représentés à la Figure 2.6. Les poutres sont admises à inertie constante et leur hauteur, dalle comprise, vaut L/20 où L est la portée maximale du pont. L'épaisseur de la dalle et la largeur des poutres dépendent de l'écartement de ces dernières et sont admises respectivement à e/10 et e/6. Les ponts sont calculés grâce à un modèle de barres et poutres.

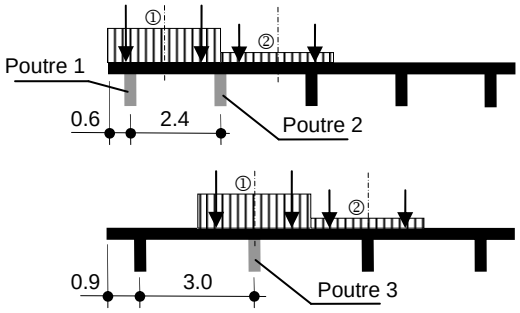


***Figure 2.6** – Ponts multipoutres*

Ponts dalle

Pour les ponts dalle en béton, il est admis que l'épaisseur des dalles est fonction de la portée selon la relation h = L/33. Un calcul par éléments finis des surfaces d'influence de chaque dalle étudiée permet de considérer le comportement bidimensionnel du pont. La dalle est définie avec une largeur de 9 m et étudiée aux trois endroits p1, p2, et p3 indiqué sur la Figure 2.7.

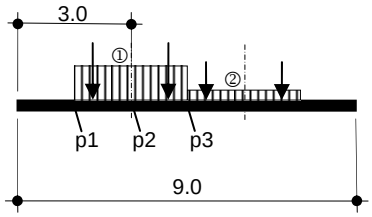


***Figure 2.7** – Pont dalle*

2.1.3 Système statique longitudinal

Il n'est pas possible de proposer un modèle unique valable pour tous les systèmes statiques. Le choix doit donc se porter sur les cas de ponts poutres les plus courants. Les résultats peuvent éventuellement être ensuite étendus à des ponts béquilles ou à des tabliers de ponts haubanés par exemple. Les cas qui ne correspondent pas aux systèmes statiques proposés doivent faire l'objet d'études particulières.

Ponts poutres

Deux systèmes statiques sont étudiés pour les ponts poutres, la poutre simple et une poutre continue sur quatre appuis comme présenté à la Figure 2.8.

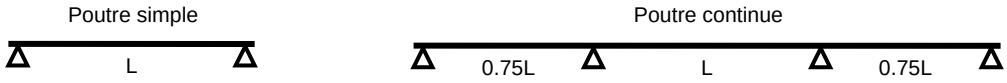


Figure 2.8 – *Systèmes statiques des ponts poutres*

Ponts dalle

Pour les ponts dalle, le choix s'est porté sur un système statique de type cadre avec différentes conditions d'appui de la dalle variant entre simplement appuyé et parfaitement encastré.

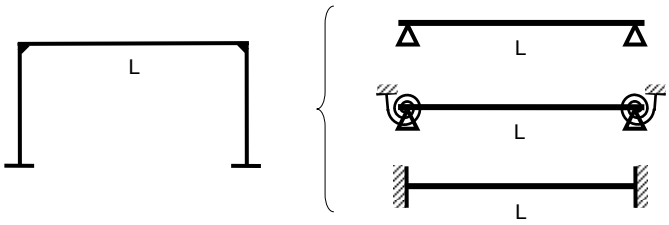


Figure 2.9 – *Systèmes statiques des ponts dalle*

Portées

Les portées analysées sont les portées courantes indiquées dans le Tableau 2.1 pour chaque type de ponts.

Tableau 2.1 – *Portées L étudiées*

Pont	Caisson	Bipoutre	Multipoutre	Dalle
Portées	20 – 80 m	20 – 80 m	15 – 35 m	10 – 30 m

2.1.4 Efforts

Avec le choix de la section transversale et du système statique, il devient possible de calculer les lignes d'influence des efforts intérieurs dus au trafic dans les éléments porteurs pour chacune des voies de circulation.

Les efforts suivants sont étudiés :

- moment de flexion M- au droit des appuis (poutre continue et dalle),
- moment de flexion M+ à mi-travée (poutre continue, poutre simple et dalle),
- effort tranchant V aux extrémités de la travée centrale (poutre continue et poutre simple).

Pour les ponts dalle, les calculs des moments sont faits aux endroits indiqués à la Figure 2.7.

2.2 MODELISATION DU TRAFIC

Pour les simulations de cette étude, l'objectif est d'utiliser un modèle de trafic virtuel basé sur les mesures du trafic réel effectuées en Suisse. Cette section du rapport présente les mesures à disposition, et leur utilisation dans la définition des modèles de trafic, en particulier la composition et le volume du trafic. Les possibilités de considérer des prévisions de l'évolution future du trafic, telles que la modification de la composition ou l'augmentation du volume, sont également évaluées et des propositions sont faites pour les simulations.

2.2.1 Mesures de trafic

Sous la direction de l'Office fédéral des routes (OFROU), des pesages en marche (WIM) et des comptages automatiques de la circulation routière sont effectués.

Sur les autoroutes suisses, il existe à ce jour sept stations de pesage en marche. Les différents emplacements de ces stations sont indiqués sur la Figure 2.10.

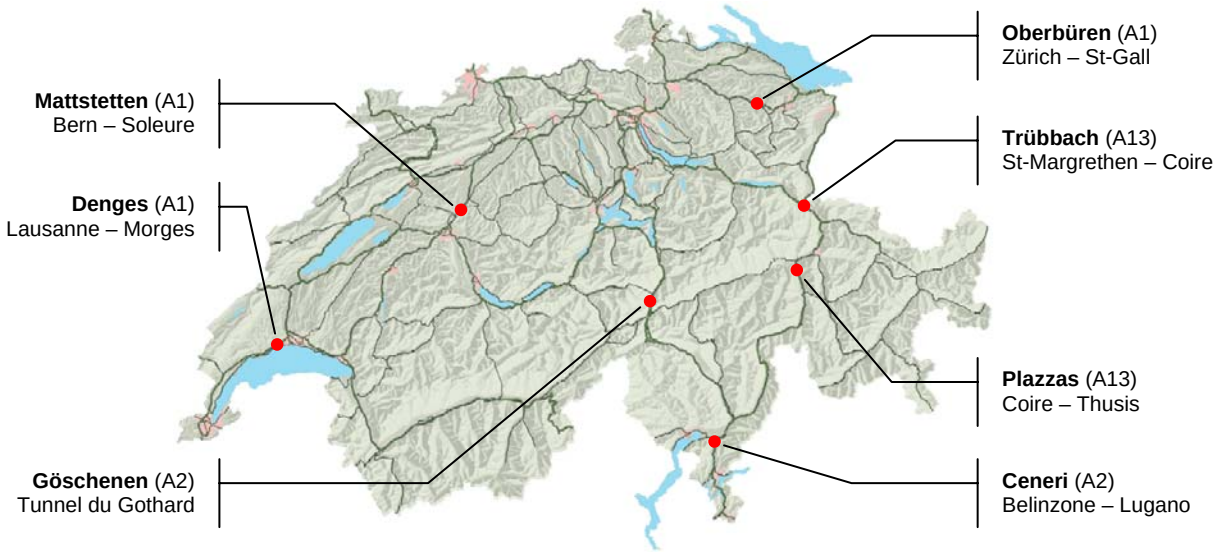


***Figure 2.10** – Stations de pesage en marche en Suisse [OFROU, 2005]*

L'analyse des pesages en marche (WIM) permet de caractériser le trafic à simuler. La composition du trafic (paragraphe 2.2.3) et les modélisations des véhicules (section 2.3) peuvent en effet être déduits des mesures.

Il a été décidé de prendre en compte les mesures les plus récentes à disposition au début de l'étude, soit celles de l'année 2003. Le dépouillement des données des sept stations de pesage a mis en évidence certaines différences entre les sites. Des variations significatives peuvent être constatées entre le trafic dit « nord-sud » (station de Göschenen par exemple), principalement international et de transit, et le reste du trafic qui est plutôt « local et national ». La principale différence concerne le taux de dépassement de la limite légale de 40 tonnes qui est nettement moins important pour le trafic « nord-sud » que pour le reste du trafic. Notons en revanche que le poids moyen des véhicules lourds est plus important sur les axes nord-sud que sur les autres axes. La Figure 2.11 illustre ces observations.

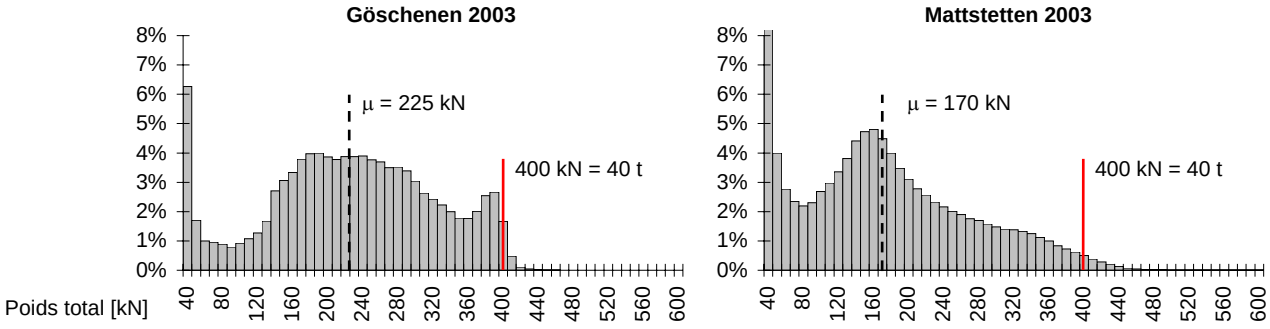


***Figure 2.11** – Poids totaux de tous les véhicules lourds à Göschenen et Mattstetten en 2003*

A notre connaissance aucune station fixe n'a été installée sur les routes cantonales. Les seules données de pesage en notre possession sont celles d'Aarwangen et ont été relevées sur une période de quelques semaines [ICOM, 1999]. De ce fait, il a été décidé de prendre en compte, pour le moment, les mêmes trafics pour les autoroutes et les routes cantonales.

En ce qui concerne les comptages automatiques, la Suisse dispose à ce jour d'un réseau de plus de 250 stations réparties sur tout le territoire. Ces données sont utilisées dans cette étude afin de définir les volumes de trafic à considérer (paragraphe 2.2.4).

2.2.2 Types de véhicules

Différents types de véhicules circulent sur les routes. Dans le but de simuler le trafic, ces véhicules peuvent être classés selon le nombre d'essieux et leur disposition.

Il a été décidé, après une pré-étude de la composition du trafic, de réaliser les simulations avec les 13 classes de véhicules du Tableau 2.2 groupées dans quatre catégories. La première classe représente les véhicules d'un poids inférieur à 3.5 tonnes. Certains types de véhicules ne présentant pas d'intérêt particulier à être différenciés ont été groupés en une seule classe (rectangles avec trait discontinu). La méthode de tri des données de pesage par classes de véhicules est décrite dans l'annexe A.1.

Tableau 2.2 – *Classes de véhicules considérées*

Catégories	Véh. légers	Véhicules seuls	Véhicules à remorque	Véhicules articulés
Classes	< 3.5t	11 12 22	111 1111r 112r 1211r 122 1112r	112a 113a 123a

Notons que, même avec un système de classes très évolué, un certain nombre de véhicules pesés restent non classés. Il existe effectivement des véhicules spéciaux qui n'entrent dans aucune des classes. Pour autant qu'ils soient faiblement représentés et faiblement « agressifs », ils peuvent être écartés de l'étude probabiliste.

De même, certaines classes de véhicules peuvent être exclues si leur probabilité de présence est faible et si les véhicules en question sont admis faiblement « agressifs ». En fait, la décision d'inclure ou non une classe de véhicules dans la simulation doit être prise en considérant les deux aspects que sont la quantité et « l'agressivité ».

L'influence exacte sur le résultat du nombre de classes admises dans les simulations n'est pas établie d'une façon précise, mais la représentation proposée se veut réaliste en comprenant un nombre raisonnable de classes.

2.2.3 Composition du trafic

Une fois les classes de véhicules définies, il faut déterminer le pourcentage de chacune d'elles dans le trafic. Ces valeurs diffèrent selon les axes routiers et évoluent avec les années.

L'analyse des données de pesage en marche fournit le pourcentage des différentes classes de véhicules lourds. Les véhicules dont le poids n'excède pas 3.5 tonnes n'étant pas inclus dans les pesages, il est en plus

nécessaire de connaître le nombre total de véhicules ayant franchi l'installation durant la période de pesage considérée. Ces valeurs sont fournies par les stations de comptage.

Comme le trafic poids lourds en Suisse est presque nul la nuit et les jours fériés, le pourcentage moyen de véhicules lourds sur une année n'est pas très représentatif pour cette étude. Pour ne pas sous-estimer la valeur de ce paramètre, il a été décidé de l'augmenter. De manière simplifiée, il a été admis qu'un tiers du trafic ne contient que des véhicules légers. Cette hypothèse conduit à considérer un facteur, nommé p_{pl} et étant égal à 2/3.

L'évolution de chaque classe de véhicules est difficile à évaluer. Pour les différentes catégories de véhicules lourds (seuls, à remorque ou articulés), elle pourrait dans une certaine mesure être déduite des observations faites dans les rapports de dépouillement effectués par l'ICOM pour les stations de Mattstetten et Göschenen entre 1995 et 2002 [ICOM, 2004]. Cela dit, l'évolution passée n'est pas un indicateur sûr de l'évolution future, notamment parce que ce paramètre dépend de la politique en matière de transports et d'aspects économiques.

Le rapport Ecoplan [Sommer, 1997] prévoit pour 2015 une augmentation de 35% du pourcentage de poids lourds part rapport à l'année 1999. L'incertitude sur ce genre de prévisions étant grande, nous proposons dans un premier temps de réaliser les simulations sans l'augmentation de trafic. Une étude paramétrique doit permettre ensuite d'évaluer l'importance d'un scénario d'évolution donné sur le résultat, afin de fournir des indications sur les éventuelles réserves à admettre sur le modèle actualisé.

La méthode proposée pour obtenir la composition du trafic est décrite dans l'annexe A.2. La Figure 2.12 présente la composition du trafic mesuré à Göschenen en 2003. Soulignons que le pourcentage de poids lourds tient compte du facteur p_{pl} = 2/3 proposé ci-dessus.

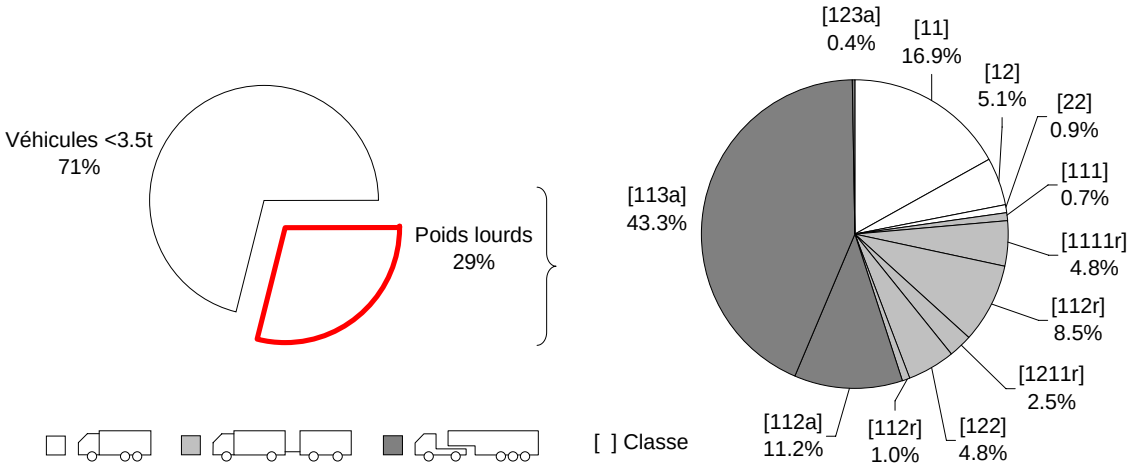


***Figure 2.12** – Composition du trafic à Göschenen en 2003*

Göschenen est la station qui enregistre le plus grand pourcentage de poids lourds (29%) par rapport au trafic total. Parmi les stations qui enregistrent du trafic plutôt « local et national », c'est à Mattstetten que le pourcentage est le plus important avec 14% de poids lourds, soit environ la moitié du pourcentage de l'axe du Gothard. Les compositions de tous les trafics analysés se trouvent à l'annexes A.3.

2.2.4 Volume de trafic

Le volume de trafic journalier moyen (TJM) est variable selon l'axe routier considéré. De plus, comme le nombre de véhicules évolue d'année en année, des prévisions de trafic doivent être admises.

Comme il a été indiqué précédemment, le réseau routier suisse est équipé d'un nombre important de stations de comptage, ce qui permet d'obtenir une bonne estimation du volume de trafic.

Pour cette étude, il a été décidé de proposer des valeurs fixes applicables à la grande majorité des ponts suisses. Le volume de trafic admis a une influence certaine sur les résultats puisque plus le nombre de véhicule à simuler est grand, plus la probabilité d'obtenir de grands efforts maximaux est élevée.

Pour les routes cantonales bidirectionnelles, un trafic actuel de 12'500 véhicules par jour est proposé pour les deux directions (TJM). On considère encore, selon [Rapp Trans AG, 2003], une augmentation probable de 2% par an jusqu'en 2015, ce qui conduit à un total d'environ 15'000 véhicules par jour ou environ 5 millions de véhicules par année.

Pour les autoroutes, selon la carte synoptique des résultats des comptages automatiques de 2003 [OFROU, 2004.2], une valeur de 50'000 véhicules par jour pour les deux directions (TJM) semble raisonnable. Avec une augmentation probable de 2% par an jusqu'en 2015, on atteint un total d'environ 60'000 véhicules par jour. Cela représente approximativement 10 millions de véhicules par an pour chaque direction.

Tableau 2.3 – *Volumes annuels de trafic admis*

Route bidirectionnelle	Autoroute à deux voies
5'000'000 véh. / an	10'000'000 véh. / an / direction

2.3 MODELISATION DES VEHICULES

Pour chaque classe de véhicules inclus dans les simulations (définis au paragraphe 2.2.2), le poids et la géométrie des véhicules peuvent être modélisés selon des distributions probabilistes. La modélisation se base sur les valeurs statistiques provenant des mesures de trafic. Cette section présente les modèles proposés et la manière d'obtenir les différents paramètres. La question de l'effet dynamique est également discutée. De plus, des modèles de camions types sont définis pour un calcul déterministe des efforts, en vue notamment de l'étude des ponts de petite portée.

2.3.1 Poids totaux

Les données triées du pesage en marche permettent d'établir les histogrammes des poids totaux pour chaque type de véhicule. Ces histogrammes sont modélisés par des distributions de type béta ou béta bimodale. La distribution béta bimodale permet de représenter les deux pics parfois observés, correspondant respectivement aux véhicules chargés et non chargés.

Un système d'optimisation des paramètres des courbes bimodales a été développé pour que le modèle s'approche le plus possible des histogrammes des mesures. Pour l'optimisation, une importance prépondérante est donnée à la modélisation des véhicules les plus lourds en imposant notamment le respect du fractile 95%, et en assurant la meilleure corrélation des courbes cumulatives du modèle et des mesures entre 90 et 100%.

La Figure 2.13 donne un exemple de la modélisation des véhicules à remorque de type 1111r à Göschenen en 2003. L'histogramme des mesures correspond au pesage d'environ 50'000 véhicules à remorque. Les modélisations des distributions des poids totaux pour chaque classe de véhicules et pour la majorité des trafics analysés se trouvent à l'annexe A.4.

Pour tenir compte de l'évolution future des poids, les courbes de chaque classe de véhicule devraient être majorées. Les dépouillements des mesures effectués par l'ICOM pour les stations de Mattstetten et Göschenen entre 1995 et 2002 [ICOM, 2004] donnent des indications sur l'évolution passée. Les résultats montrent que la moyenne annuelle du poids par essieux a augmenté d'environ 0.5 à 1% par an. Une estimation basée sur les données des rapports montre que l'augmentation du poids total se situe quant à elle entre 1 et 2% par an. Ces évolutions sont liées à deux facteurs principaux :

- l'évolution de la composition du trafic, et notamment l'arrivée des 40 tonnes,
- l'optimisation des transports en limitant les déplacements à vide.

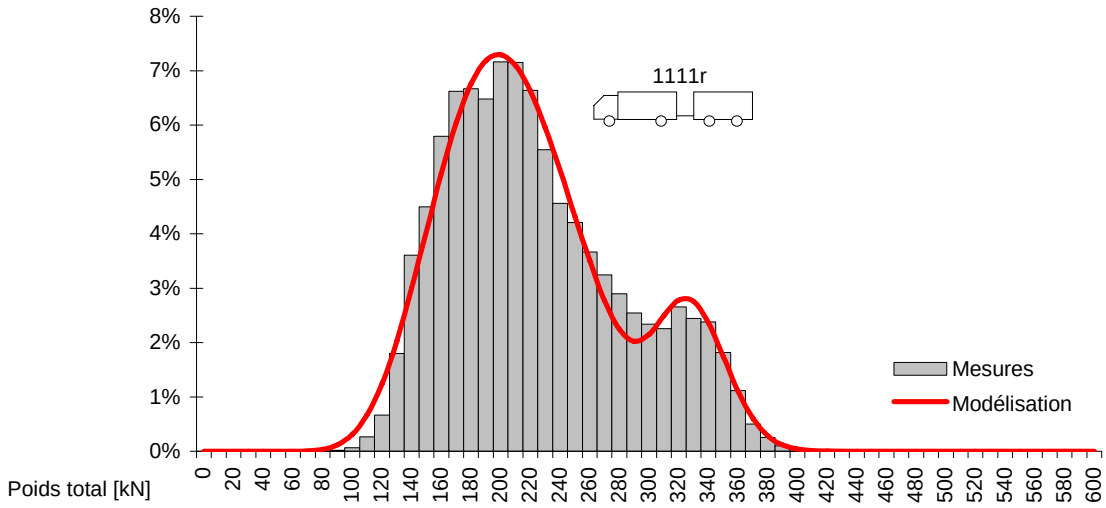


***Figure 2.13** – Exemple de la modélisation des poids totaux (Göschenen 2003)*

Il n'est pas évident de modéliser une telle évolution, car d'une part la composition du trafic (paragraphe 2.2.3) doit être adaptée et d'autre part les courbes de certains types de véhicules doivent être modifiée. Même s'il est possible d'imaginer de tels scénarios, l'évolution de ces paramètres est globalement difficile à prévoir de manière fiable. Dans les simulations, il a donc été décidé de ne pas prendre en compte d'augmentations pour les poids totaux. Une étude paramétrique doit ensuite permettre d'évaluer l'importance de telle ou telle évolution sur le résultat et fournir des indications sur les réserves à admettre sur le modèle actualisé.

Une majoration supplémentaire des poids pourrait également être envisagée pour considérer les incertitudes de mesures. Ces dernières, estimées entre 0 et 5%, sont toutefois négligées dans cette étude.

Notons encore que pour les simulations, le poids des véhicules légers (<3.5 tonnes) n'est pas considéré, car il est négligeable par rapport au poids des véhicules lourds.

2.3.2 Poids des essieux

Le poids des essieux est déterminé à partir de la corrélation entre le poids total du véhicule et le poids des différents essieux ou groupes d'essieux. La Figure 2.14 illustre une telle corrélation entre le poids total et le poids du groupe d'essieux tridem Q_3 d'un véhicule articulé de type 113a.

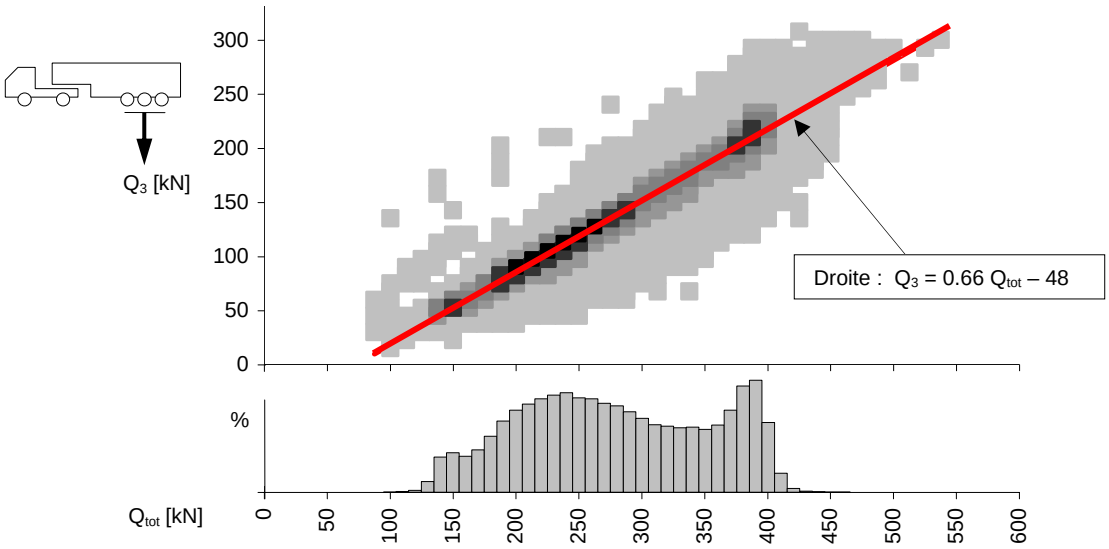


***Figure 2.14** – Exemple de relation entre le poids des essieux*

Les relations entre les différents essieux peuvent être exprimées grâce à des droites de régression. Si la corrélation entre les mesures et la droite n'est pas excellente, les paramètres a_i et b_i de la droite peuvent être considérés de manière probabiliste par une distribution normale. Ainsi, avec un écart-type correctement défini, la répartition du poids des différents essieux devient très fidèle aux mesures.

La détermination des poids des différents groupes d'essieux peut alors se faire de la façon suivante : dans le cas par exemple du véhicule articulé présenté ci-dessus, on calcule tout d'abord $Q_3 = a_3\, Q_{tot} + b_3$, Q_3 étant le groupe d'essieux le plus chargé, ensuite on calcule $Q_2 = a_2\, (Q_{tot} - Q_3) + b_2$ et finalement $Q_1 = Q_{tot} - Q_3 - Q_2$.

Pour les groupes d'essieux tandem et tridem, la relation entre les deux ou trois essieux qui composent le groupe est fixée d'après l'analyse des rapports moyens des poids mesurés.

Pour simplifier et limiter la durée des simulations, il a été décidé de considérer les paramètres a et b de chaque droite de régression avec un écart type nul. L'importance d'une représentation plus fidèle de la réalité en considérant les paramètres des droites de régression de façon probabiliste n'est pas connue, mais elle est certainement faible, en particulier pour les ouvrages de portée moyenne à grande.

2.3.3 Effet dynamique

Les installations de pesage donnent des valeurs qui représentent approximativement les poids statiques des essieux. Les facteurs d'amplification dynamique qui doivent être admis dépendent principalement du profil de la chaussée, de la rigidité (suspension) et du poids du véhicule, mais aussi du comportement dynamique du pont. Étant donné que cette interaction comprend plusieurs paramètres, il a été décidé de ne pas appliquer de facteur d'amplification dynamique sur les essieux, mais d'utiliser plutôt un facteur dynamique global selon les propositions faites dans [OFROU, 2004.1]. Les détails sur la façon de considérer l'effet dynamique dans les simulations sont donnés à la section 3.1.

2.3.4 Géométrie

Les données de pesage fournissent également les différents entraxes pour chaque véhicule. Une analyse statistique des mesures permet de modéliser la géométrie des véhicules de façon probabiliste.

Comme il n'y a pas de relation évidente entre les distances séparant les différents essieux d'un véhicule, chacune d'elles est déterminée indépendamment selon une loi probabiliste de répartition béta. Les paramètres de ces lois sont déterminés grâce aux données de pesage préalablement triées selon les classes de véhicules. La Figure 2.15 présente un exemple de modélisation de la distance entre les deux premiers essieux d'un véhicule à remorque.

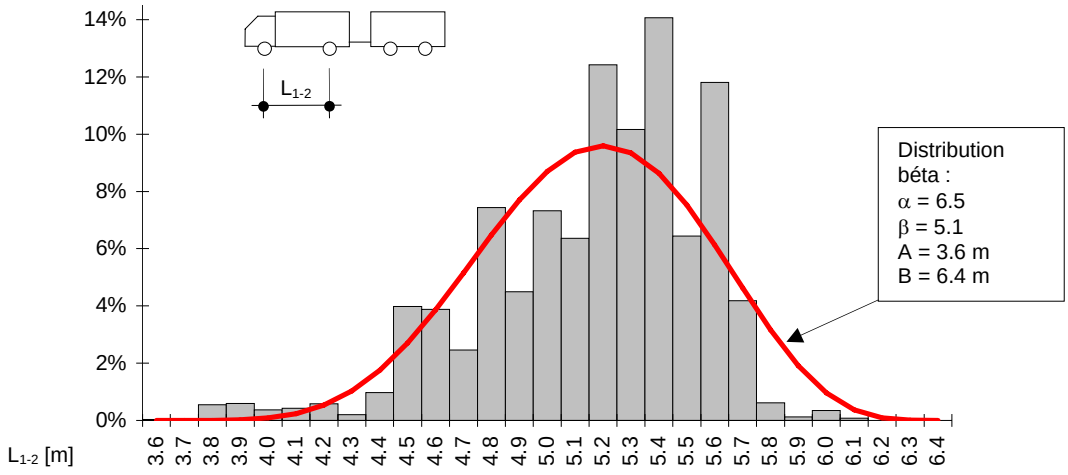


***Figure 2.15** – Exemple de modélisation de la distance entre essieux*

Pour limiter les paramètres probabilistes et par conséquent réduire la durée des simulations, les éléments suivants sont définis de manière fixe :

- Les distances entre les différents essieux qui composent un groupe d'essieux tandem et tridem ; les valeurs sont obtenues grâce aux données de pesage.
- Les porte-à-faux avant et arrière de chaque classe de véhicules ; les valeurs sont obtenues d'après des observations et mesures de véhicules.
- La longueur des véhicules légers ; on admet une valeur fixe égale à 4.5 m.

2.3.5 Modèle déterministe

Dans certains cas, en particulier pour des petits ouvrages, le passage d'un seul véhicule très chargé peut donner des efforts plus importants que les résultats de la simulation. Chaque cas de pont étudié est donc vérifié avec différents véhicules déterministes. Deux camions types ont été définis :

1. Les camions de chantier à 5 essieux (type 23) d'un poids légal de 40 tonnes sont des véhicules très agressifs puisque les 5 essieux sont disposés sur environ 6.8 m :

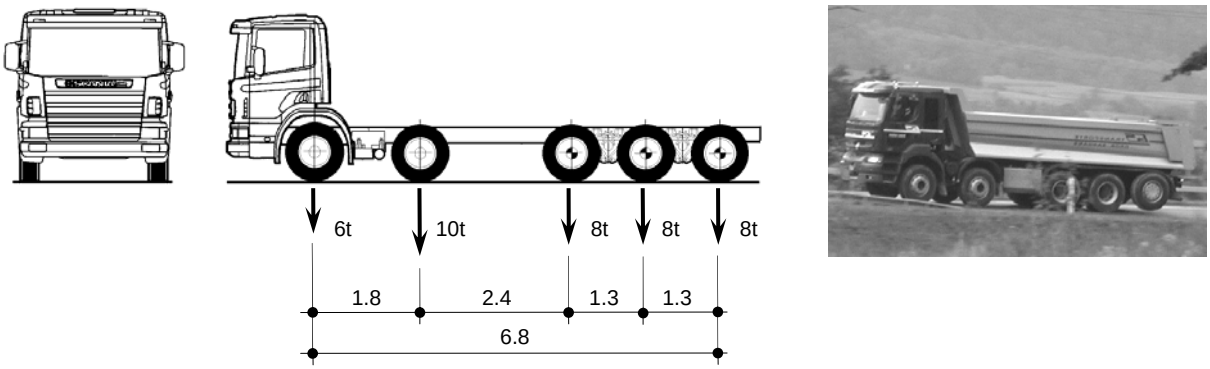


Figure 2.16 – *Camion de type 23 de 40 tonnes*

Ce type de véhicules pouvant être facilement surchargé, un facteur de charge $\gamma_Q = 1.5$ a été admis. Quant au facteur d'amplification dynamique, il est admis à 1.3 pour un véhicule d'un tel poids.

2. Les camions-grues d'un poids de 60 tonnes, qui sont soumis à une autorisation, sont également des véhicules très agressifs puisqu'ils comptent 5 essieux de 12 tonnes sur environ 7.2 m :

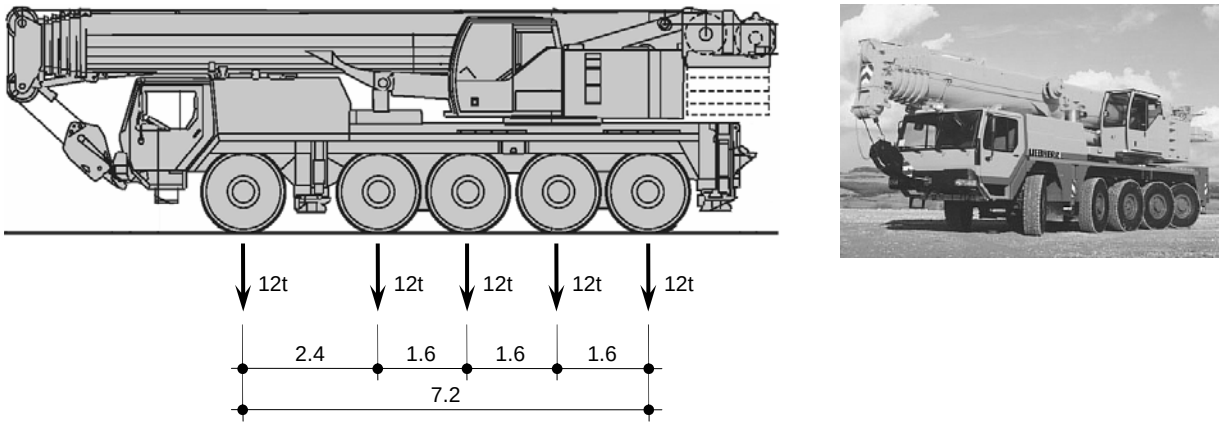


Figure 2.17 – *Camion-grue de 60 tonnes*

Pour ce type de véhicules, la variation du poids est très faible, car le chargement est quasi constant. De ce fait, un facteur de charge $\gamma_Q = 1.1$ a été admis. Quant au facteur d'amplification dynamique, il est admis à 1.3.

Le poids linéaire calculé par rapport à la distance entre le premier et le dernier essieu de ces deux véhicules (Figure 2.16 et Figure 2.17) est respectivement de 115 et 119 kN/m y compris le facteur γ_Q et de facteur d'amplification dynamique. Même si son poids linéaire est moins important, le camion de chantier a un chargement moins bien réparti que le camion-grue. Il est ainsi difficile de connaître a priori le véhicule déterminant.

2.4 MODELISATION DE LA CIRCULATION

Le type et les propriétés des véhicules étant définis, il reste à déterminer leur disposition les uns par rapport aux autres. Cette section présente les hypothèses concernant les conditions de circulation, les distances entre véhicules, ainsi que la répartition sur les différentes voies.

2.4.1 Conditions de circulation

Sur une route, les conditions de circulation varient. Il y a une évolution annuelle en fonction du mois ou la semaine de l'année, ou encore des variations en fonction du jour de la semaine ou de l'heure dans la journée. La densité et la vitesse des véhicules sont donc différentes à tout moment.

Simuler fidèlement un tel phénomène s'avère très complexe et pas forcément utile. Pour simplifier, on préfère définir différentes conditions de circulation types et admettre la part du trafic qui circule dans chacune de ces conditions. Par exemple, x% du trafic roule en condition « saturée à l'arrêt » avec une vitesse d'environ 2 km/h, y% circule en condition « saturé lent » à 30 km/h et le reste circule en condition « fluide » à une vitesse v selon le type de route. La distance entre les véhicules dépend de la vitesse de circulation.

Sur la base des simulations précédemment effectuées [Bez, 1989] [Bailey, 1996], il a été constaté que la condition « saturée à l'arrêt » est déterminante pour la sécurité structurale. Par conséquent, les simulations de cette étude vont considérer uniquement cette condition de circulation.

Pour les simulations, une valeur représentative de la part du trafic qui roule dans des conditions « saturées à l'arrêt » sur les routes et autoroutes de Suisse, ainsi que son évolution pour les 15 à 20 prochaines années, a dû être estimée. Cette valeur est nommée p_{sat} dans la suite de ce rapport. Peu d'information est disponible pour estimer une telle valeur, sauf peut-être les rapports annuels sur les embouteillages publiés par l'OFROU. Le rapport [OFROU, 2004.3] montre une forte augmentation des heures d'embouteillage sur les routes nationales depuis le milieu des années 90. Cette évolution est liée principalement à l'augmentation du trafic et aux surcharges qui en découlent. Les auteurs s'attendent à une poursuite de cette tendance dans les années à venir, sans pour autant pouvoir établir un pronostic précis.

Le rapport sur le trafic 40 tonnes [OFROU, 2001] proposait un pourcentage de trafic saturé à l'arrêt de 1%. Il a été décidé, compte tenu des augmentations attendues, de considérer pour les simulations de cette étude une part du trafic saturé à l'arrêt $p_{sat} = 2\%$ aussi bien pour les routes bidirectionnelles que pour les autoroutes. Pour la situation de chantier 4-0 présentée à la Figure 2.2, étant donné la plus grande fréquence d'embouteillage lors de travaux, une valeur $p_{sat} = 10\%$ est admise.

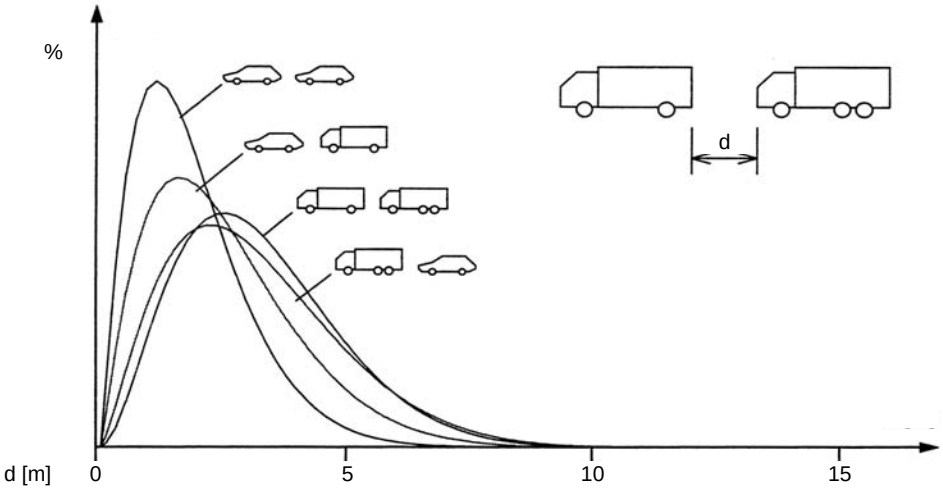
2.4.2 Distance entre véhicules

La distance entre véhicules est un paramètre aléatoire, dont la forme de la densité de probabilité varie en fonction des conditions de circulation. Le type de distribution décrivant la distance entre véhicules, ainsi que la variation des paramètres en fonction des vitesses ou du volume de trafic ont été étudiés à plusieurs reprises [Buckland, 1975] [Koshini, 1985] [Flint & Neill, 1986] [Bez, 1989]. Ces études permettent de caractériser les trafics « fluides » et « saturés » de la façon suivante :

- Trafic fluide : la succession des véhicules correspond à un processus de Poisson ; le temps entre les différents véhicules (donc indirectement la distance entre véhicules) peut être représenté par une distribution exponentielle qui varie en fonction du volume du trafic.

- Trafic saturé : la distance entre véhicules peut être représentée par une distribution béta qui varie en fonction de la vitesse du trafic.

Comme il a été proposé plus haut, pour cette étude c'est le trafic « saturé à l'arrêt » qui est simulé. La Figure 2.18 montre les distributions béta des distances d prises en compte en fonction des types de véhicules qui se succèdent. Toutes les distributions ont un minimum de 0.1 m, un maximum de 15 m et une moyenne comprise entre 1.9 et 3.3 m.



Suite de types de véhicules	Propriétés des distributions béta					
	A	B	Alpha	Béta	μ	σ
	0.1	15	2.93	10.8	3.28	1.59
	0.1	15	2.41	9.18	3.20	1.70
	0.1	15	2.15	10.9	2.55	1.47
	0.1	15	2.15	15.5	1.92	1.13

***Figure 2.18** – Distance entre véhicules à l'arrêt, selon [Bailey, 1996], pages 55-56*

2.4.3 Répartition sur les voies de circulation

Suivant la configuration de la route, les différents types de véhicules ont une certaine probabilité de se trouver sur l'une ou l'autre des voies de circulation. Sur une autoroute à deux voies par exemple, les véhicules lourds ont une probabilité nettement plus faible de circuler sur la voie de gauche (voie de dépassement) que sur la voie de droite.

Il s'agit de définir, pour chaque type de véhicules et selon le type de route étudié, la répartition sur chaque voie. Pour les routes bidirectionnelles, un trafic comprenant 50% de chaque classe de véhicules sur chaque voie est proposé. Pour les autoroutes, l'analyse des données de la station de pesage de Mattstetten a montré qu'en moyenne environ 4% du trafic lourd emprunte la voie de gauche. L'influence de la répartition par voies n'étant pas connue, il a été décidé, comme indiqué dans le Tableau 2.4, d'étudier en plus du cas moyen mesuré(2), deux autres cas extrêmes avec une moyenne de respectivement 15%(1) et 0%(3) de véhicules sur la voie de gauche. Notons qu'il est admis que plus le véhicule a d'essieux, plus il est lourd, et par conséquent, moins il a de probabilité de se trouver sur la voie de dépassement.

***Tableau 2.4** – Répartition des poids lourd sur chaque voie (gauche-droite)*

Route bidirectionnelle	Autoroute à deux voies			
Tous les véhicules : 50% - 50%	Moyenne :	15% - 85%(1)	4% - 96%(2)	0% - 100%(3)
	2 et 3 essieux :	*20% - 80%*	*6% - 94%*	*0% - 100%*
	4 essieux :	*15% - 85%*	*3% - 97%*	*0% - 100%*
	5 et 6 essieux :	*10% - 90%*	*3% - 97%*	*0% - 100%*

Dans le cas de l'autoroute, il faut remarquer que la répartition du trafic léger sur chaque voie n'a pas été définie. La raison est que si l'on veut que la simulation respecte les différentes hypothèses sur la composition et la répartition du trafic, ce paramètre doit être établi pour chaque trafic par itération avant les simulations.

Pour la situation de chantier 4-0, une répartition 50% - 0% - 0% - 50% est admise.

3. SIMULATIONS DE TRAFIC

Un nouveau logiciel de simulation permettant une grande flexibilité des paramètres d'entrée a été développé à l'ICOM dans le cadre de cette étude. Il permet d'inclure toutes les hypothèses définies au chapitre précédent. La Figure 3.1 montre une vue instantanée des véhicules et de leur position pendant une simulation. Notons qu'il s'agit d'une vue instantanée quelconque qui ne correspond pas à une situation extrême où les efforts sont maximaux.

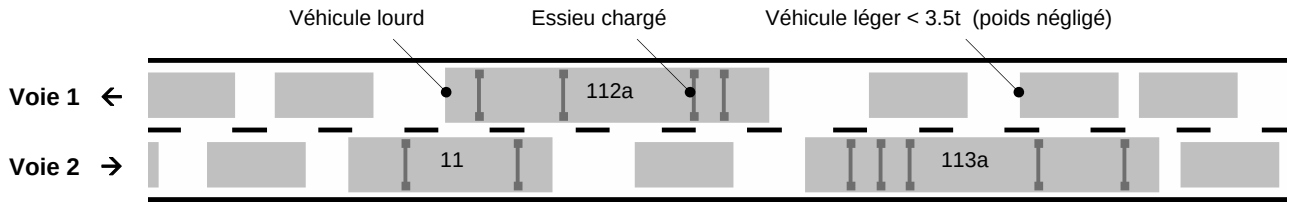


***Figure 3.1** – Vue instantanée d'une simulation de trafic en condition « saturé à l'arrêt »*

Les simulations consistent à faire passer x fois N véhicules sur le pont et à relever à chaque fois l'effort maximal. Une distribution statistique de ces valeurs maximales est ensuite établie. Un certain fractile de cette distribution est alors considéré pour définir la valeur de calcul obtenue par simulation.

Dans ce chapitre, après une description de la méthode permettant de considérer les effets dynamiques lors des simulations, les valeurs N et x ainsi que le fractile sont définies. Finalement, en comparant les trafics des stations de pesage analysées, un choix est fait sur les trafics à simuler dans cette étude.

3.1 AMPLIFICATION DYNAMIQUE

La norme SIA 261 ne prescrit pas de coefficient dynamique, à l'exception des zones des joints de dilatation de la chaussée (SIA 261 paragraphe 10.3.4). En comparant les grandeurs des charges du premier groupe d'essieux de cette norme avec les grandeurs de celles du groupe d'essieux de l'ancienne norme (SIA 160, Actions sur les structures porteuses, édition 1989) qui imposait un coefficient dynamique de 1.8, on constate que les valeurs caractéristiques sont identiques. De ce fait, il est raisonnable de conclure que la nouvelle norme prend implicitement en compte un coefficient dynamique sur le premier groupe d'essieux égal à 1.8.

Ceci dit, pour le modèle de charge actualisé, il a fallu trouver une solution permettant d'obtenir des efforts de simulation considérant directement les effets dynamiques. Ces derniers dépendent aussi bien de l'ouvrage (portée, rugosité de la chaussée, …) que des véhicules (nombre, type, suspension, …). Selon [OFROU, 2004.1], le facteur d'amplification dynamique peut être exprimé de façon simplifiée en fonction du poids total du trafic sur l'ouvrage à un instant donné, comme indiqué à la Figure 3.2.

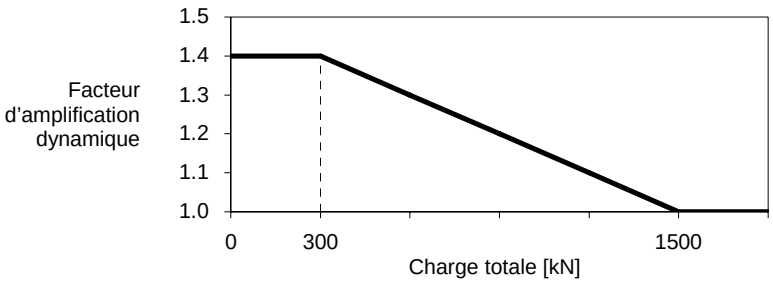


***Figure 3.2** – Facteur d'amplification dynamique en fonction de la charge totale [OFROU, 2004.1]*

Cette méthode de calcul a été implémentée dans le logiciel de simulation de trafic qui fournit ainsi les efforts dynamiques. L'annexe A.7 fournit une comparaison de cette méthode avec d'autres approches.

3.2 NOMBRE DE VEHICULES SIMULES

Le nombre N de véhicules à simuler est déduit de la durée d'utilisation prévue, de la part du trafic circulant dans la condition simulée et du trafic moyen admis. On le calcule avec la relation suivante :

$$N = n \cdot p_{sat} \cdot T \cdot p_{pl}$$

N	[-]	:	nombre de véhicules (véhicules légers y compris) à simuler
n	[véh. / an]	:	trafic annuel moyen qui traverse l'ouvrage étudié
p_{sat}	[%]	:	part du trafic circulant dans la condition de circulation « saturé à l'arrêt »
T	[an]	:	durée d'utilisation prévue
p_{pl}	[-]	:	part du trafic circulant avec des véhicules lourds

La simulation est effectuée pour une durée de T = 15 ans, selon les limites fixées pour cette recherche (section 0). D'après ce qui a été admis au paragraphe 2.2.3, seuls 2/3 du total de véhicules doivent être simulés, car le tiers restant circule dans un trafic composé uniquement de véhicules légers. Ainsi, p_{pl} = 2/3.

Avec ces dernières hypothèses et avec les trafics annuels moyens n admis au paragraphe section 2.2.4, on obtient, pour les configurations normales de chaussée, les nombres N de véhicules à simuler suivants :

***Tableau 3.1** – Nombre N de véhicules simulés dans les configurations normales*

Route bidirectionnelle	Autoroute à deux voies
N = 1'000'000 de véh.	N = 2'000'000 de véh. / direction

Dans la configuration chantier, il a été proposé d'admettre une durée d'utilisation T = 1.5 an, un p_{pl} = 2/3 et, comme indiqué au paragraphe 2.4.1, un p_{sat} = 10%. Selon ces hypothèses, et en considérant que les deux directions de trafic passent sur le même pont, un nombre N = 2'000'000 de véhicules est obtenu.

3.3 NOMBRE DE SIMULATIONS

Pour obtenir un résultat significatif, en général 1000 simulations du nombre de véhicule N admis à la section précédente sont réalisées. La Figure 3.3 montre un exemple de distribution des moments maximaux à mi-travée d'une poutre continue obtenue après x = 1000 simulations.

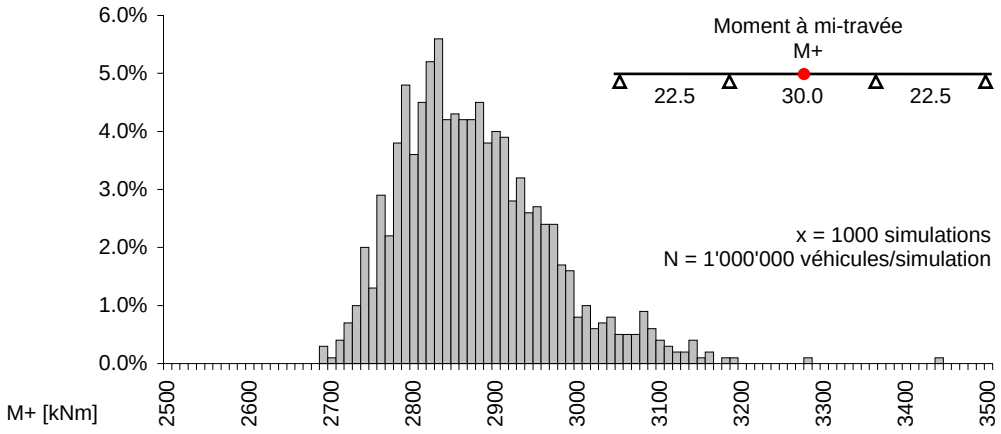


***Figure 3.3** – Exemple de distribution des efforts maximaux obtenus par simulation*

3.4 VALEUR DE CALCUL

Le logiciel de simulation fournit les efforts maximaux calculés d'une part avec des charges statiques, et calculés d'autre part en considérant le facteur d'amplification dynamique selon [OFROU, 2004.1]. La Figure 3.4 présente les deux types de résultats. Le fractile 99% de la distribution du calcul dynamique des x simulations est admis comme valeur de calcul. Dans la suite du rapport, cette valeur est nommée E_{sim}.

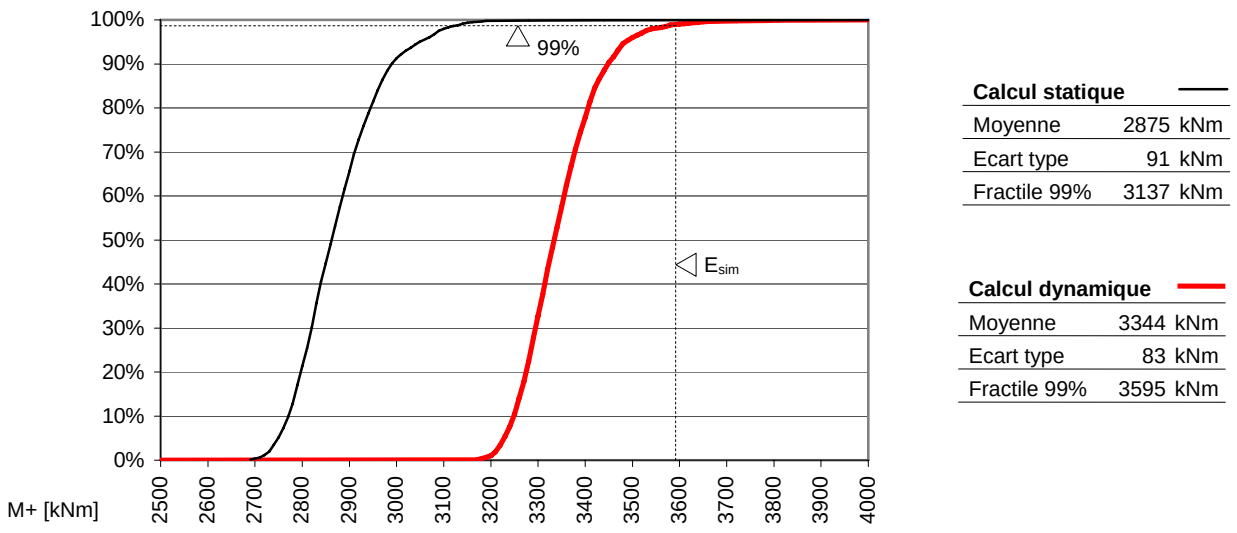


***Figure 3.4** – Exemple de résultats obtenus par le logiciel de simulation*

3.5 TRAFICS SIMULES

La Figure 3.5 compare les distributions statistiques des poids totaux obtenues d'après les données des sept stations de pesage. La huitième courbe représente la distribution du trafic prise en compte lors de la précédente étude sur le trafic 40 tonnes [OFROU, 2001].

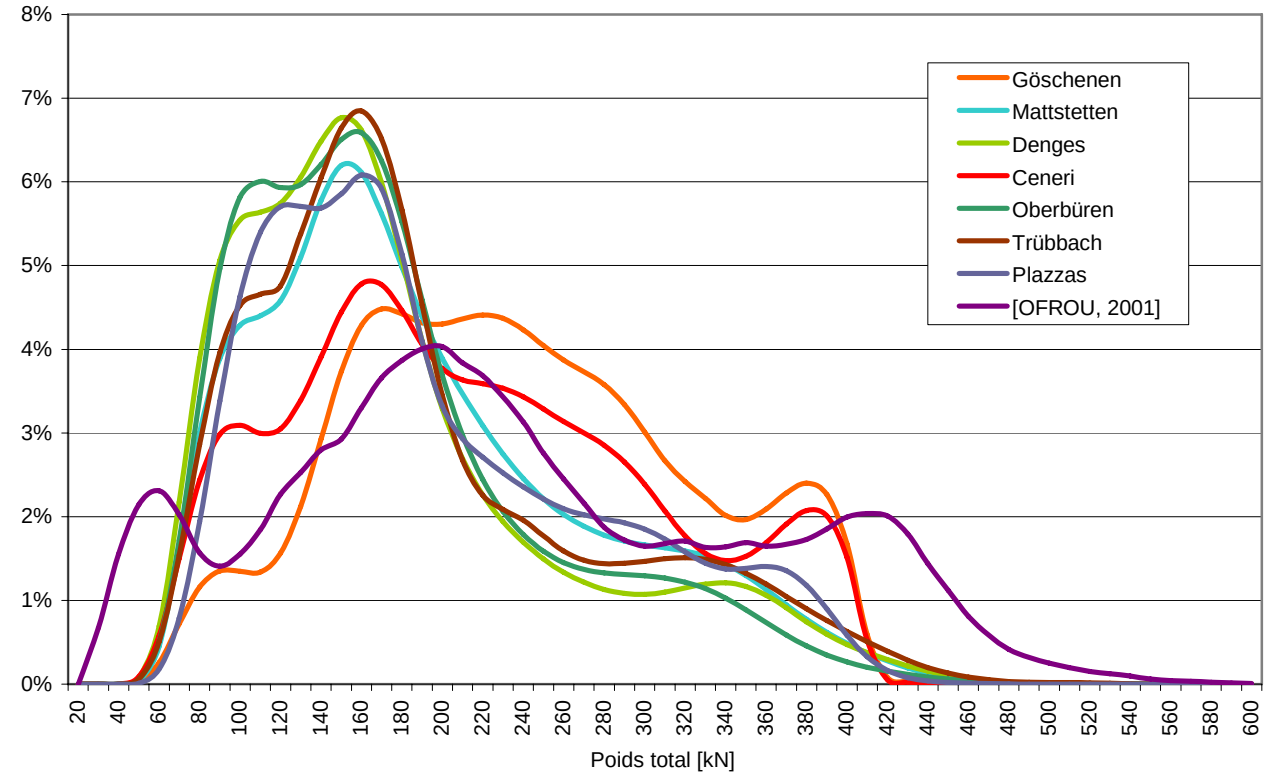


***Figure 3.5** – Distribution des poids totaux des véhicules pour les trafics analysés*

Notons que ces courbes sont légèrement différentes par rapport aux histogrammes des mesures de la Figure 2.11, essentiellement parce que les véhicules les plus légers de chaque classe ont été retirés et remplacés proportionnellement par des véhicules plus lourds. La répartition admise est donc légèrement conservatrice.

Ce graphique met en évidence la différence entre le trafic plutôt « local et national » et le trafic dit « nord-sud », principalement international et de transit. Les distributions des trafics de Mattstetten, Denges,

Oberbüren et Trübbach sont très similaires et comprennent une majorité de véhicules de poids faible à moyen. Elles se distinguent de la distribution du trafic de Göschenen qui comprend une part beaucoup plus importante de véhicules lourds. Quant aux distributions des trafics de Ceneri et de Plazzas, elles se situent entre les deux et contiennent une part de trafic « nord-sud » et une part de trafic « local et national ».

Ce graphique montre également que, par rapport aux trafics dit « nord-sud » comme Göschenen, les trafics plutôt « locaux et nationaux » comme Denges ou Mattstetten ont des pourcentages et des grandeurs de dépassement de la limite légale de 40 tonnes plus importants.

Sur la base de ces observations, il est admis qu'il n'est a priori pas nécessaire de simuler tous les trafics analysés. Avec respectivement 29%, 14% et 7% de véhicules lourds, c'est donc les trafics de Göschenen, Mattstetten et Denges qui ont été choisis pour les simulations.

Étant plus agressif que les autres, avec un nombre important de véhicules surchargés, le trafic [OFROU, 2001] est également étudié pour fournir des éléments de comparaison. Notons que pour ce trafic, le pourcentage de poids lourds est admis à 25%.

Les distributions des poids totaux détaillées pour chaque classe de véhicules et pour la majorité des trafics analysés se trouvent à l'annexe A.4.

3.6 CALCUL DETERMINISTE

Pour de petits ouvrages, il est possible que le passage d'un seul véhicule très chargé donne des efforts plus importants que les résultats obtenus par les simulations probabilistes. Ainsi, les véhicules déterministes définis au paragraphe 2.3.5 sont introduits dans le logiciel et passés individuellement sur les ponts virtuels. Il est admis qu'un seul véhicule circule sur le pont sur la voie la plus critique. Les efforts obtenus sont alors pris en compte dans l'élaboration du modèle de charge actualisé.

4. COMPARAISON ENTRE LES SIMULATIONS ET LA NORME

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus en comparant les efforts simulés E_{sim} pour les différents trafics avec les efforts E_{SIA} calculés avec les modèles de charge de la norme SIA 261.

4.1 PRINCIPE DE COMPARAISON

Le principe consiste à comparer les efforts E_{sim} obtenus par simulation pour les différents trafics admis avec les efforts calculés selon la norme SIA 261. Ces derniers sont nommés E_{SIA} dans la suite de ce rapport.

Les efforts E_{SIA} sont calculés en plaçant les charges de la norme transversalement selon la Figure 4.1 et plus précisément selon les schémas du paragraphe 2.1.2 pour les différents types de ponts. Longitudinalement les charges sont placées dans la position la plus défavorable.

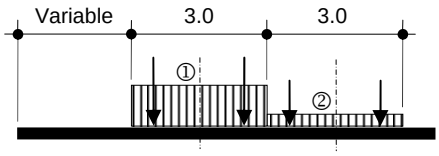


***Figure 4.1** – Charges de la norme SIA 261*

Les valeurs caractéristiques des charges sont les suivantes :

①	Voie de circulation fictive	$Q_{k1} = 300$ kN	$q_{k1} = 9.0$ kN/m^2	×	Coefficients
②	Voie de circulation fictive	$Q_{k2} = 200$ kN	$q_{k2} = 2.5$ kN/m^2		$\alpha_{Qr} = \alpha_{qr} = 0.9$

4.2 PONTS CAISSON

La Figure 4.2 montre les rapports entre les efforts simulés et les efforts obtenus avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour les trois efforts suivants :

- flexion sur appui M- pour la poutre continue
- flexion à mi-travée M+ pour la poutre simple
- effort tranchant V pour la poutre simple

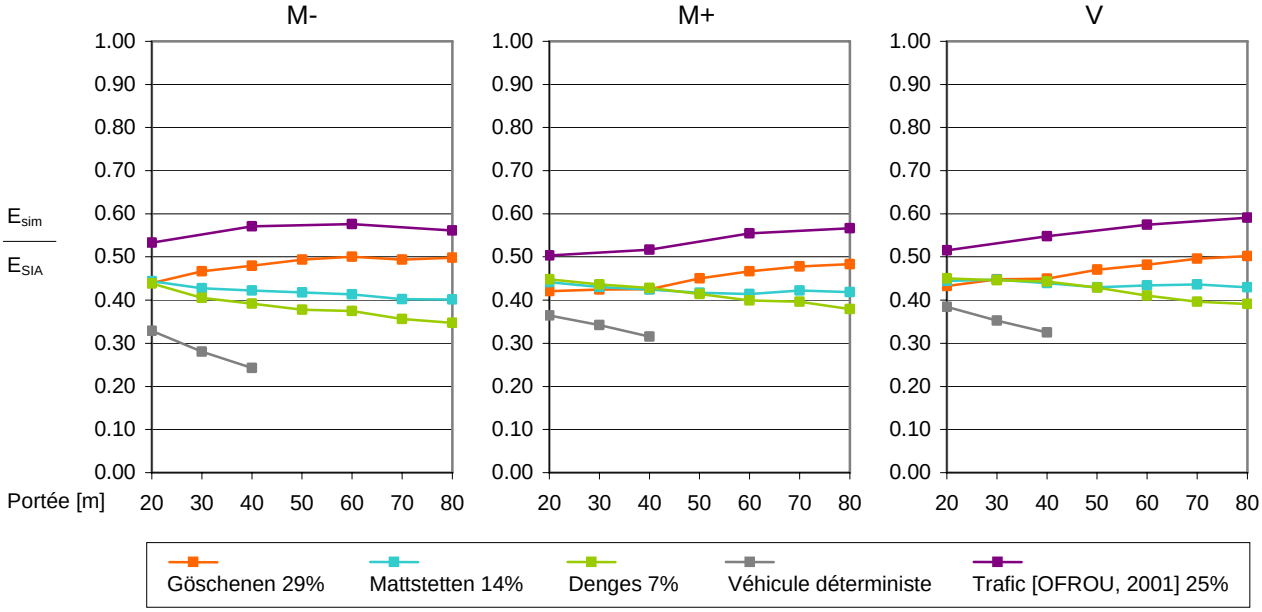


***Figure 4.2** – Comparaison des efforts : ponts caisson, route bidirectionnelle*

Ces résultats montrent que le véhicule déterministe ne constitue pas un cas décisif pour les ponts caisson et que, comme on pouvait s'y attendre, le trafic [OFROU, 2001] est le plus agressif. Notons, qu'en moyenne, les trois trafics basés sur les pesages en marche donnent des rapports E_{sim}/E_{SIA} relativement constants d'environ 0.44, quelle que soit la portée d'une part, et quel que soit l'effort d'autre part.

Il est intéressant de constater que les trafics de Denges et Mattstetten sont déterminants par rapport au trafic de Göschenen pour les petites portées et plus précisément pour des lignes d'influence inférieures à 40 m. Pour le moment M-, les courbes se croisent en effet à 20 m de portée, ce qui correspond à une ligne d'influence de 20 m (portée centrale) + 15 m (portée de rive) = 35 m. Pour le moment M+ et l'effort tranchant V, les courbe se croisent à environ 35 m de portée, ce qui pour ces efforts correspond à la longueur des lignes d'influence. Par rapport à Göschenen, les trafics de Denges et Mattstetten ont des pourcentages et des grandeurs de dépassement de la limite légale de 40 tonnes plus importants, mais une densité de poids lourds plus faible. Il est ainsi montré que le poids important de quelques véhicules influence plutôt les petites portées, alors que la plus grande densité de poids lourds dans le trafic influence plutôt les grandes portées.

Concernant les efforts M+ et V de la poutre continue, les résultats ont montré que le rapport E_{sim}/E_{SIA} est systématiquement plus petit que pour la poutre simple. Comme le modèle actualisé qui va être proposé considère indifféremment les deux systèmes statiques, il suffit d'étudier le cas le plus déterminant, soit le cas de la poutre simple. C'est pour cette raison que les résultats des efforts M+ et V de la poutre continue ne sont pas présentés.

La Figure 4.3 montre les rapports entre le moment à mi-travée simulé, et le moment à mi-travée obtenu avec la norme SIA 261 pour le trafic unidirectionnel d'un pont autoroutier. Les trois graphiques représentent les résultats pour différentes répartitions de poids lourds sur chacune des voies.

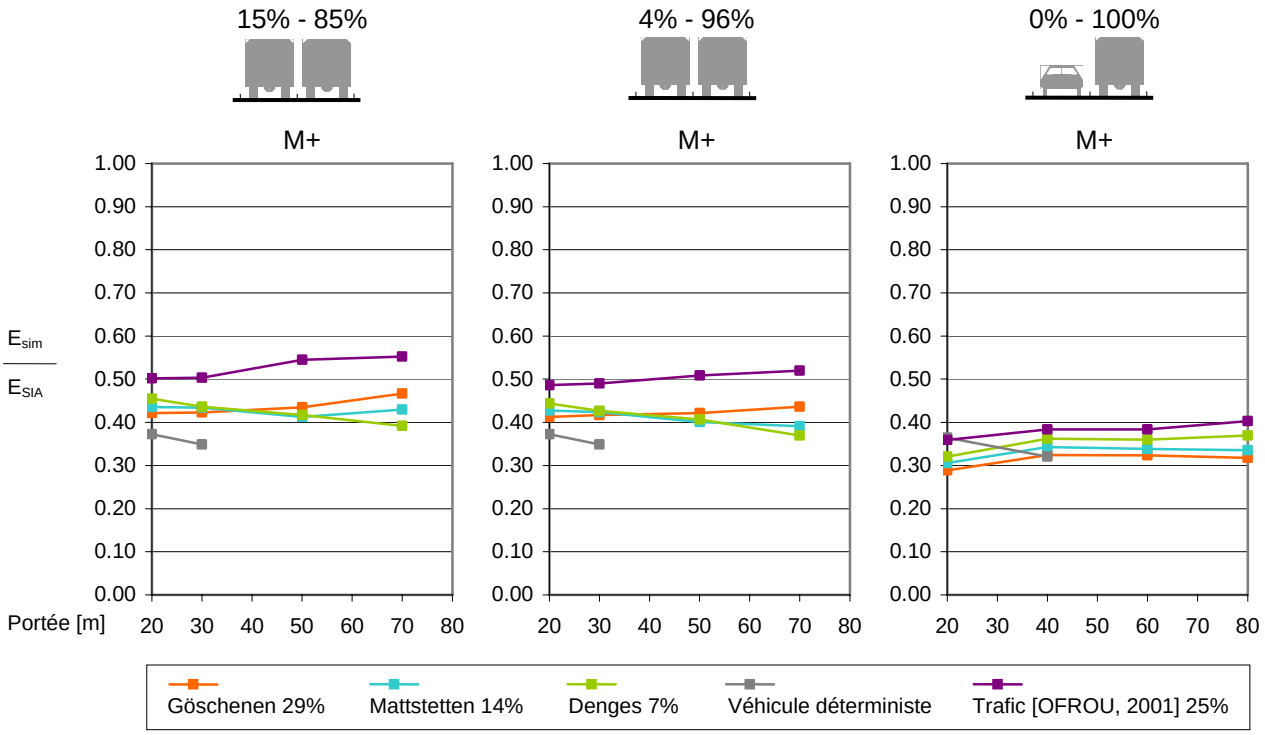


***Figure 4.3** – Comparaison des efforts : ponts caisson, autoroute à 2 voies, M+ à mi-travée*

Pour le cas autoroute, on remarque que la répartition sur les voies n'a que peu d'influence sur le rapport E_{sim}/E_{SIA}, sauf dans le cas où tout le trafic poids lourds se trouve sur une seule voie (0%-100%). Ce dernier cas n'est pas déterminant. Pour les autres répartitions, la valeur moyenne du rapport E_{sim}/E_{SIA} des trois trafics basés sur les pesages en marche est d'environ 0.42, soit légèrement inférieure à celle obtenue pour le trafic bidirectionnel. Notons encore pour ces trois trafics que, comme pour le cas bidirectionnel, les courbes se croisent pour des lignes d'influence d'environ 35 m.

4.3 PONTS BIPOUTRES

La Figure 4.4 montre les rapports entre les efforts simulés et les efforts obtenus avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour les trois efforts suivants :

- flexion sur appui M- pour la poutre continue
- flexion à mi-travée M+ pour la poutre simple
- effort tranchant V pour la poutre simple

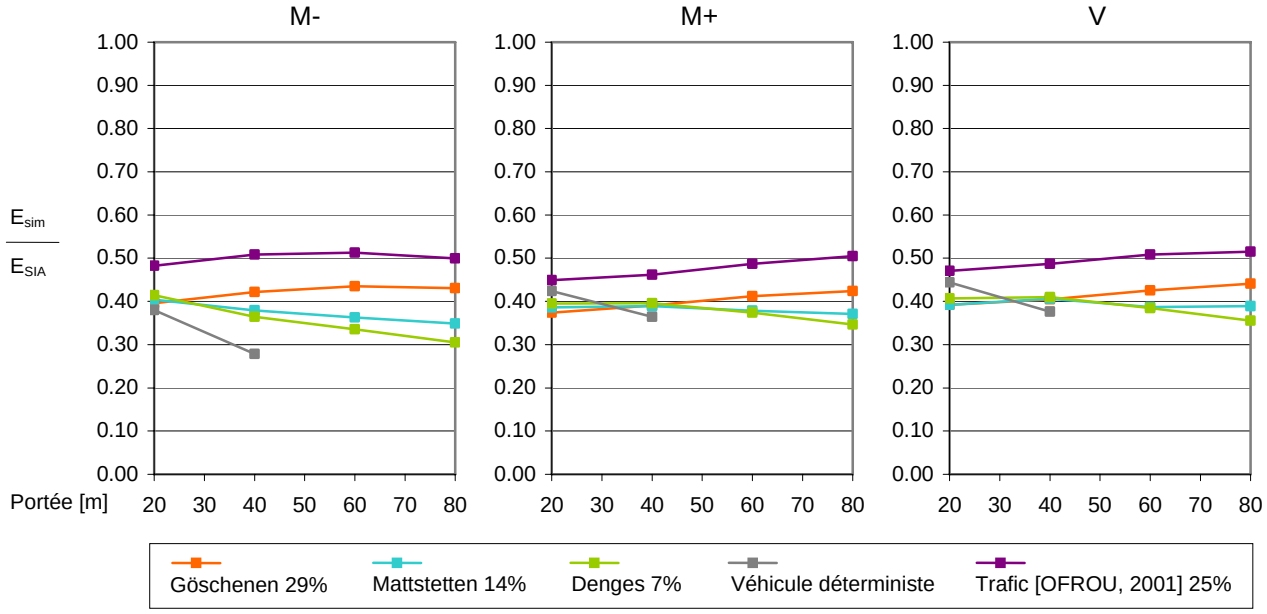


***Figure 4.4** – Comparaison des efforts : ponts bipoutres, route bidirectionnelle*

Contrairement aux ponts caisson, on remarque pour les ponts bipoutres que le véhicule déterministe est décisif pour certains cas. Jusqu'à une ligne d'influence de 30 m environ, le rapport E_{sim}/E_{SIA} est en effet plus grand que celui des trois trafics basés sur les pesages en marche. La plus forte influence d'une voie par rapport à l'autre (répartition transversale 0.9-0.1 selon Figure 2.4) dans le cas du bipoutre explique cette observation. Cela mis à part, notons que les résultats sont similaires à ceux du pont caisson avec néanmoins un rapport E_{sim}/E_{SIA} moyen plus faible situé à environ 0.39 au lieu de 0.44 (Figure 4.2).

La Figure 4.5 montre les rapports entre le moment à mi-travée simulé, et le moment à mi-travée obtenu avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour les trois variantes de ponts bipoutres présentés à la Figure 2.5.

Les résultats présentent des variations très faibles entre les différents cas de ponts bipoutres étudiés. Il est ainsi raisonnable de conclure que le cas standard proposé permet une généralisation des résultats à la plupart des ponts bipoutres.

La Figure 4.6 montre les rapports entre le moment à mi-travée simulé, et le moment à mi-travée obtenu avec la norme SIA 261 pour le trafic unidirectionnel d'un pont autoroutier. Les trois graphiques représentent les résultats pour différentes répartitions de poids lourds sur chacune des voies.

Contrairement aux ponts caisson, le cas où le trafic poids lourds est concentré sur une seule voie (0%-100%) est déterminant pour les ponts bipoutres. La plus forte influence d'une voie par rapport à l'autre explique encore une fois cette observation. Le rapport E_{sim}/E_{SIA} est pour toutes les portées de l'ordre de 0.44 pour le trafic de Denges, le cas de l'autoroute est donc a priori plus agressif que le cas de la route bidirectionnelle.

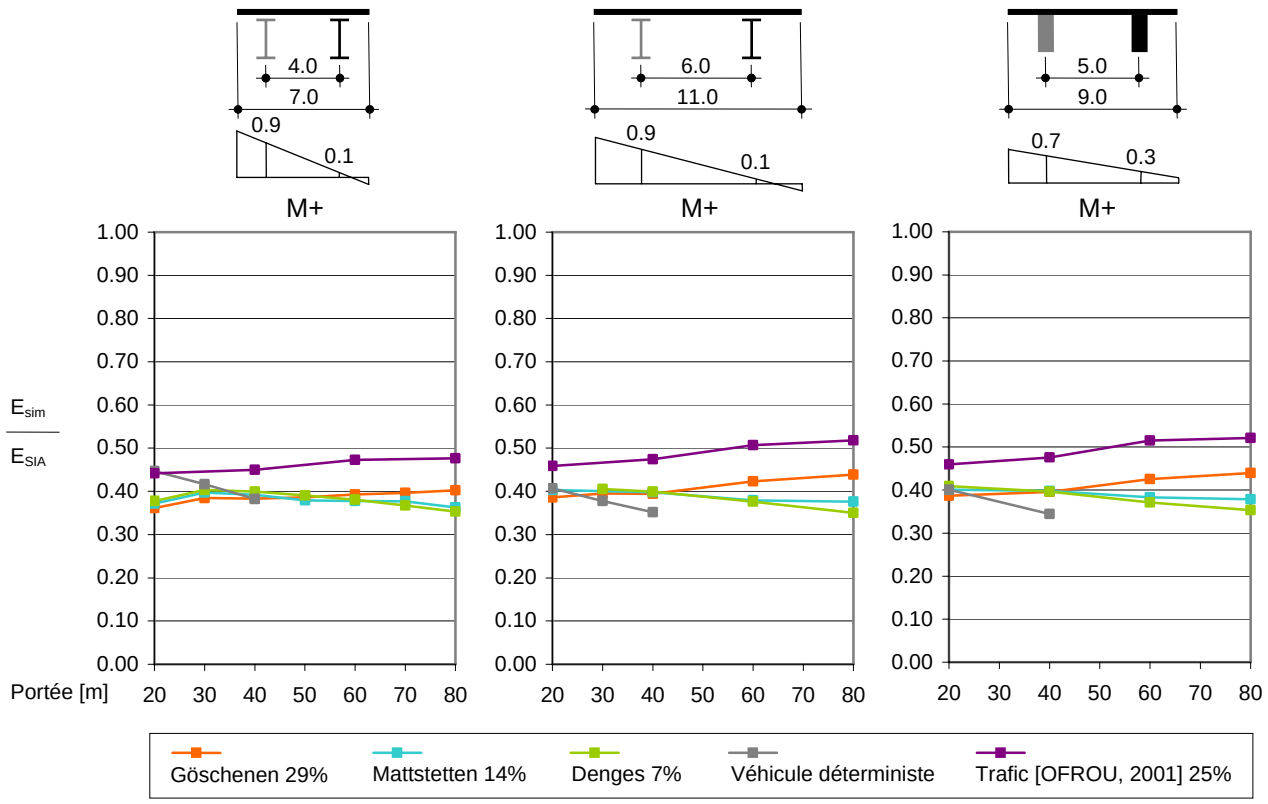


***Figure 4.5** – Comparaison des efforts : ponts bipoutres, route bidirectionnelle, M+ à mi-travée*

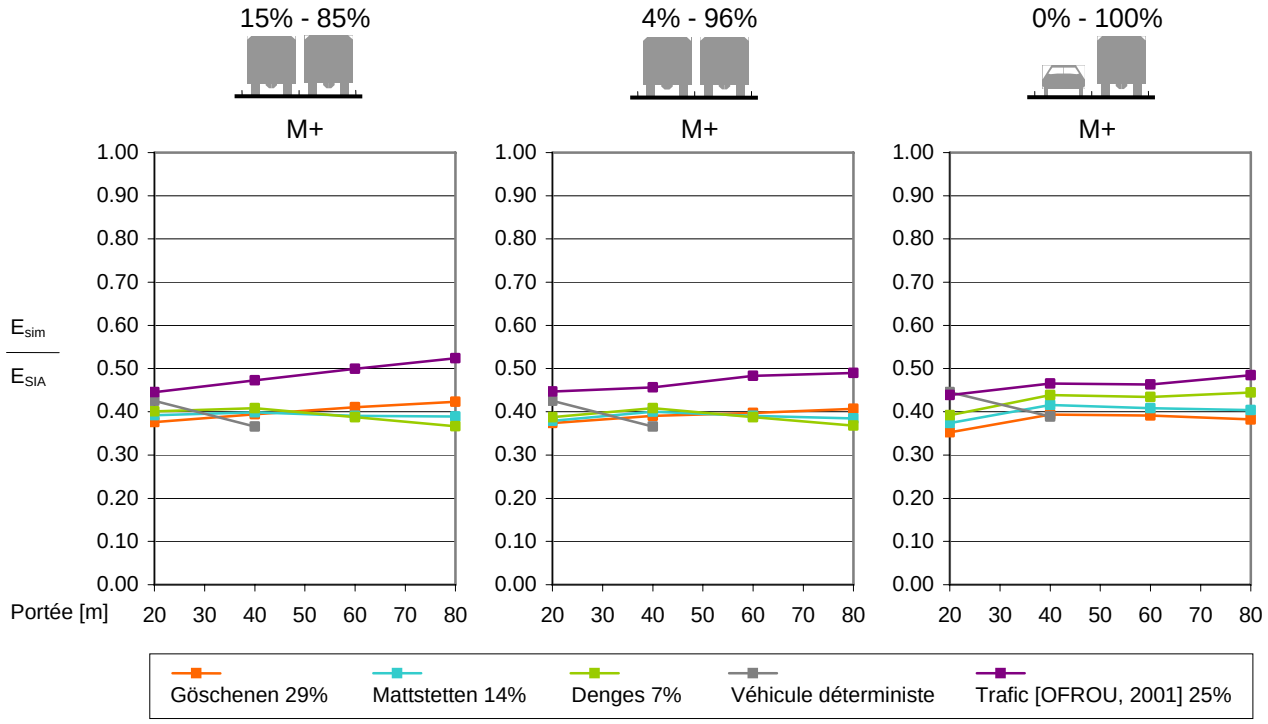


***Figure 4.6** – Comparaison des efforts : ponts bipoutres, autoroute à 2 voies, M+ à mi-travée*

4.4 PONTS MULTIPOUTRES

La Figure 4.7 montre les rapports entre le moment à mi-travée simulé, et le moment à mi-travée obtenu avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour les trois différentes poutres de ponts multipoutres étudiées (voir paragraphe 2.1.2).

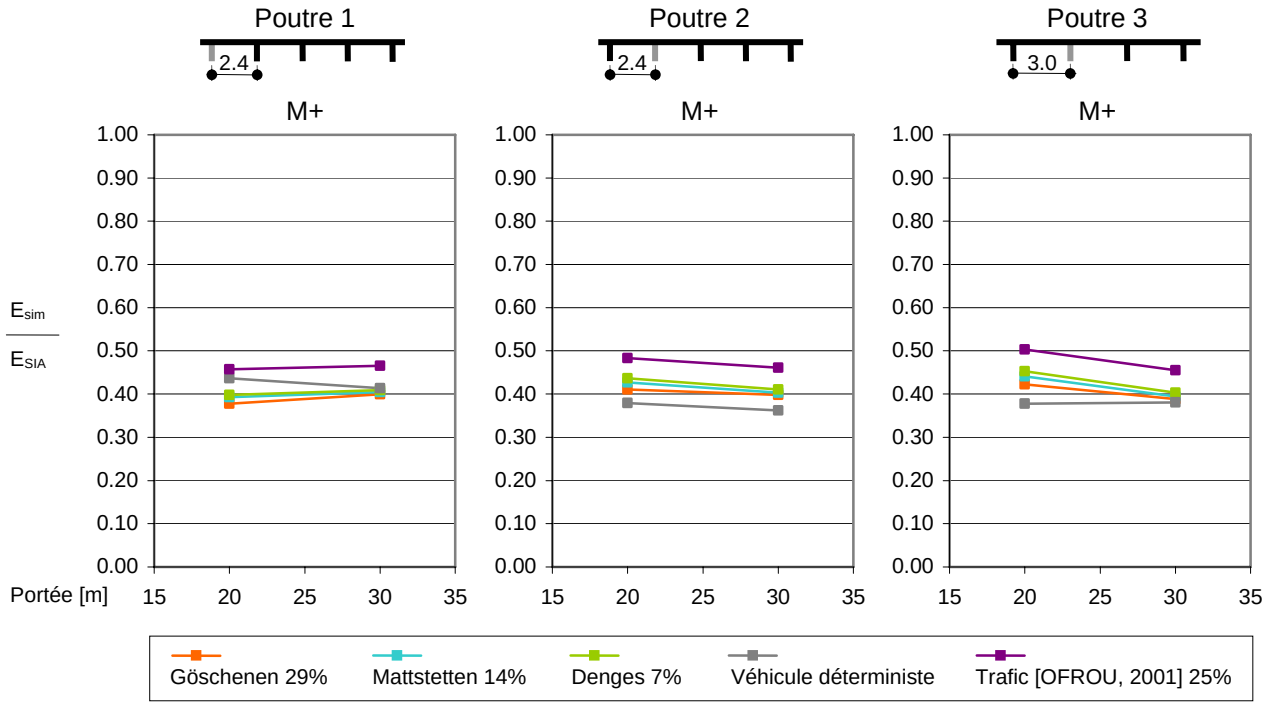


***Figure 4.7** – Comparaison des efforts : ponts multipoutres, route bidirectionnelle, M+ à mi-travée*

La Figure 4.8 montre les rapports entre le moment sur appui simulé, et le moment sur appui obtenu avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour les trois différentes poutres de ponts multipoutres étudiées.

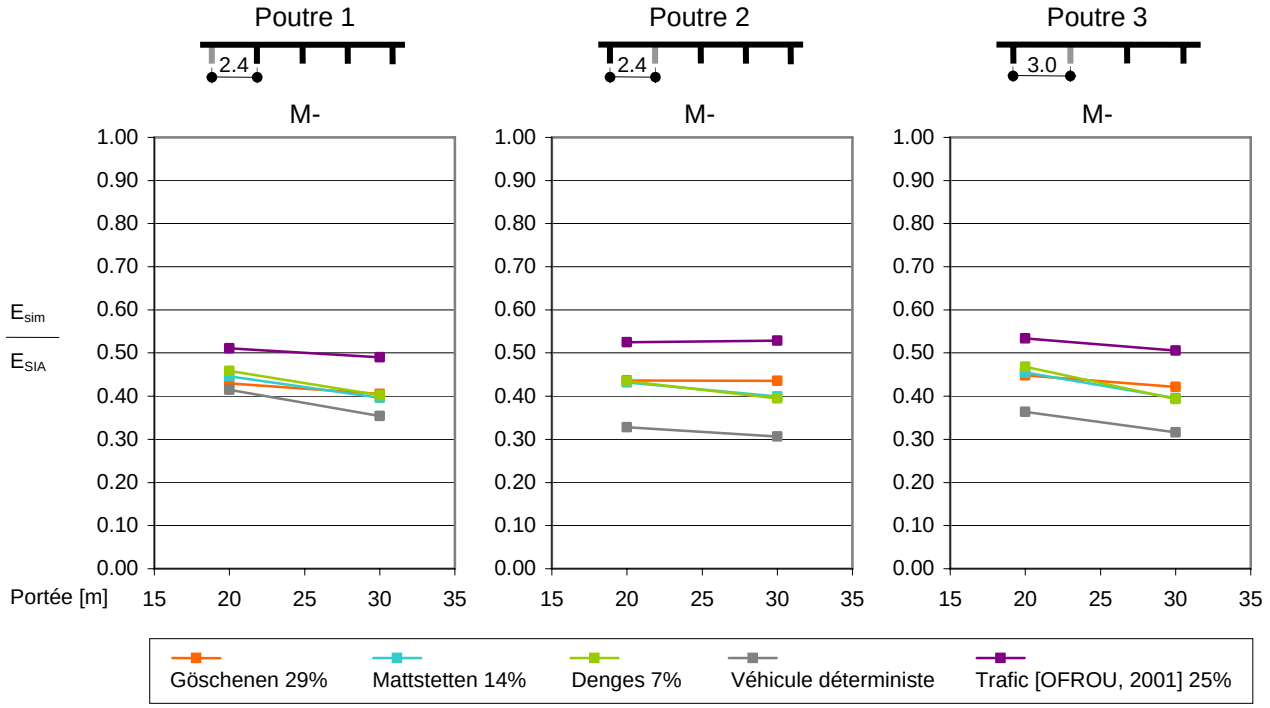


***Figure 4.8** – Comparaison des efforts : ponts multipoutres, route bidirectionnelle, M- sur appui*

Pour les différentes poutres, les différentes portées et les différents efforts, les rapports E_{sim}/E_{SIA} sont relativement constants. Pour les trois trafics basés sur les pesages en marche, ils sont en effet compris entre 0.40 et 0.45. On constate également que pour la poutre de bord (poutre 1), le cas du véhicule déterministe est le plus agressif.

4.5 PONTS DALLE

La Figure 4.9 montre les rapports entre le moment à mi-travée simulé, et le moment à mi-travée obtenu avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour les trois positions transversales étudiées.

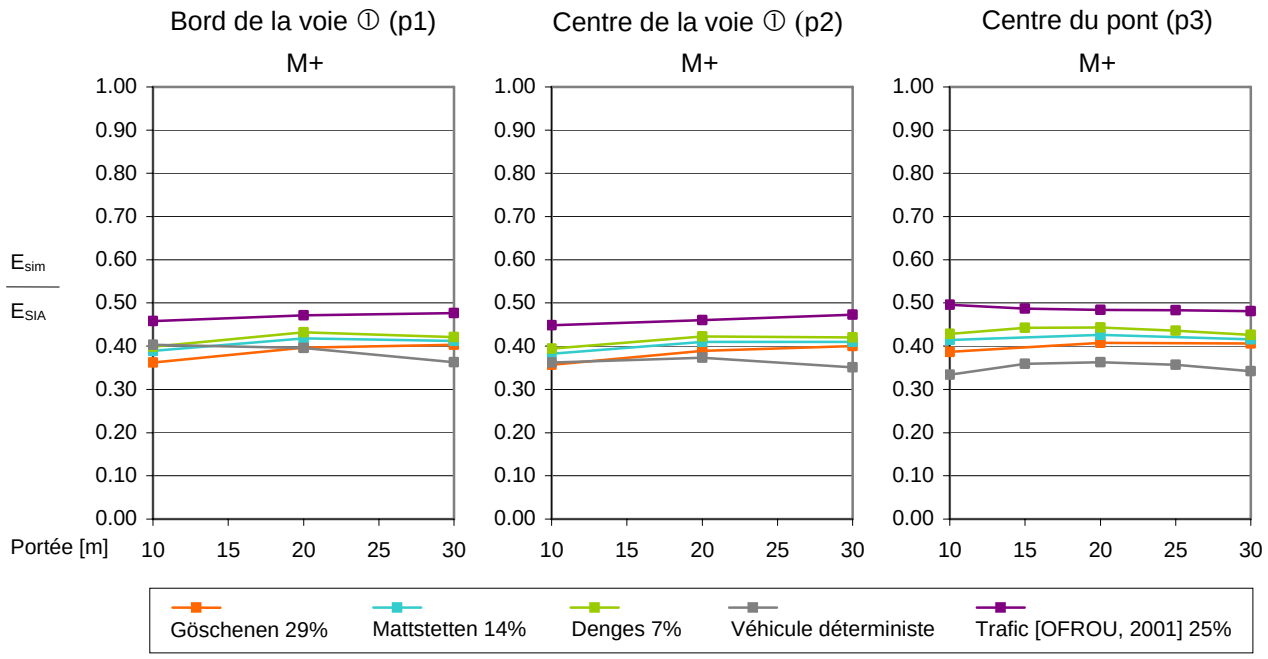


***Figure 4.9** – Comparaison des efforts : ponts dalle, route bidirectionnelle, M+*

La Figure 4.10 montre les rapports entre le moment à l'angle de cadre simulé, et le moment à l'angle de cadre obtenu avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour les trois positions transversales étudiées (selon Figure 2.7 du paragraphe 2.1.2).

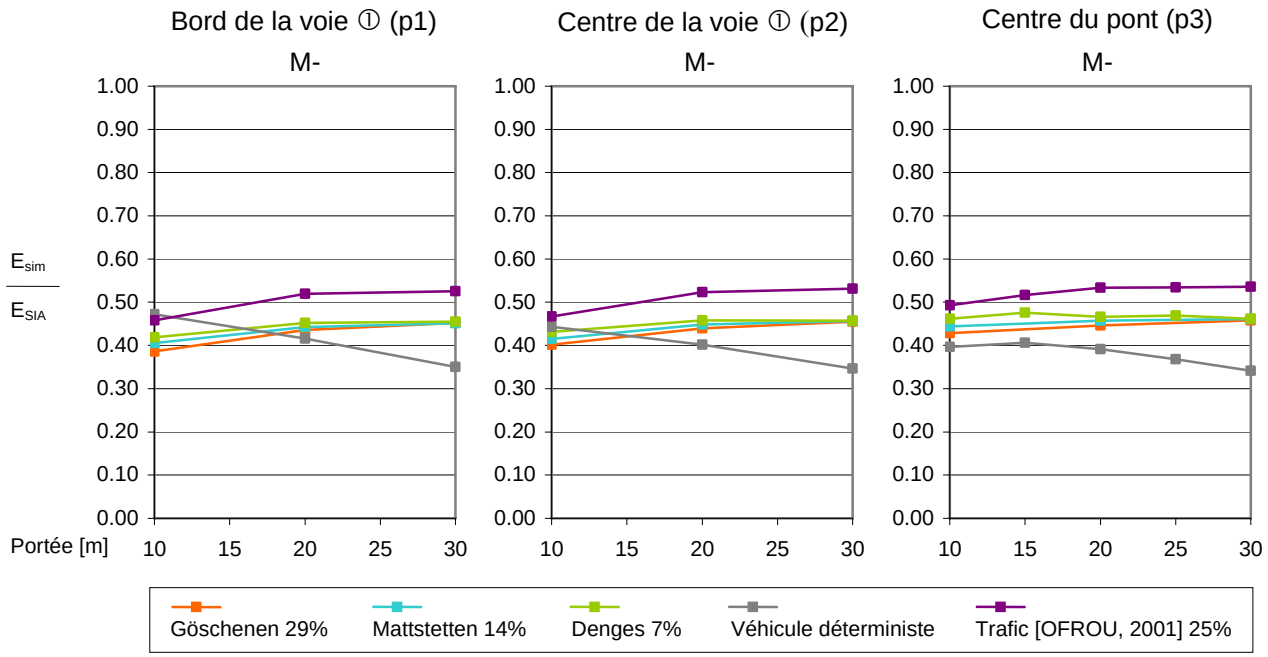


***Figure 4.10** – Comparaison des efforts : ponts dalle, route bidirectionnelle, M-*

Pour les différents efforts étudiés sur les ponts dalles, les rapports E_{sim}/E_{SIA} des trois trafics basés sur les pesages en marche sont compris entre 0.40 et 0.45, comme pour les ponts multipoutres. Le véhicule déterministe est décisif pour les petites portées de certains efforts, notamment au bord de dalle.

On constate que, comme pour les ponts caisson et les ponts bipoutres, pour des lignes d'influence d'une longueur inférieure à 35 m, c'est le trafic de Denges qui est déterminant.

La Figure 4.11 montre les rapports entre le moment à mi-travée au centre du pont (p3) simulé, et le moment à mi-travée au centre du pont obtenu avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour trois conditions d'appui de la dalle différentes.

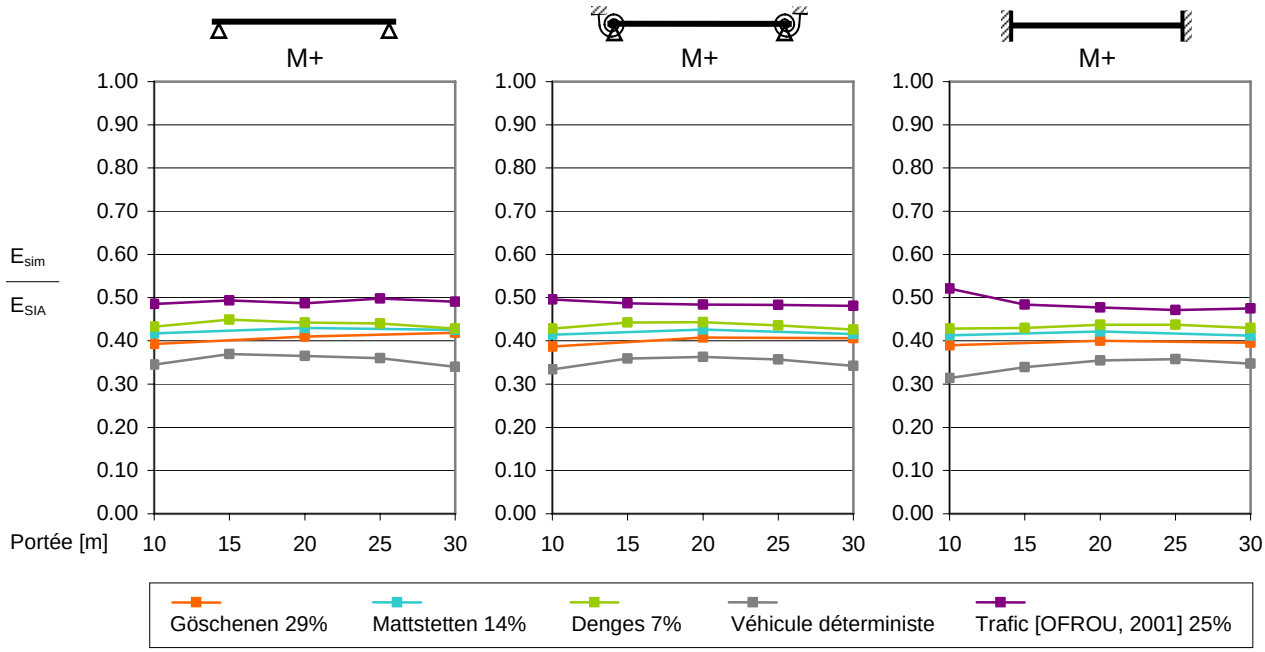


***Figure 4.11** – Comparaison des efforts : ponts dalle, route bidirectionnelle, M+ au centre du pont (p3)*

On constate que l'influence des conditions d'appui est très faible sur le rapport E_{sim}/E_{SIA}. Le modèle actualisé qui va être proposé sur la base de ces résultats est ainsi valable pour la plupart des ponts dalle.

4.6 SITUATION DE CHANTIER

Pour la situation de chantier, les efforts calculés selon la norme SIA 261 sont obtenus en plaçant transversalement les charges selon la Figure 4.12.

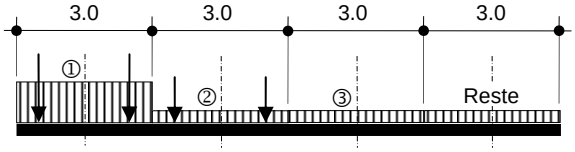


***Figure 4.12** – Charge de la norme SIA 261 considérée pour la situation chantier*

Les valeurs caractéristiques des charges sont les suivantes :

①	Voie de circulation fictive	$Q_{k1} = 300$ kN	$q_{k1} = 9.0$ kN/m^2	× Coefficients $\alpha_{Qr} = \alpha_{qr} = 0.9$
②	Voie de circulation fictive	$Q_{k2} = 200$ kN	$q_{k2} = 2.5$ kN/m^2	
③	Voie de circulation fictive		$q_{k2} = 2.5$ kN/m^2	
	Surface restante		$q_{k2} = 2.5$ kN/m^2	

La Figure 4.13 montre, pour les ponts caisson, les rapports entre les efforts simulés et les efforts obtenus avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour les trois efforts suivants :

- flexion sur appui M- pour la poutre continue
- flexion à mi-travée M+ pour la poutre simple
- effort tranchant V pour la poutre simple

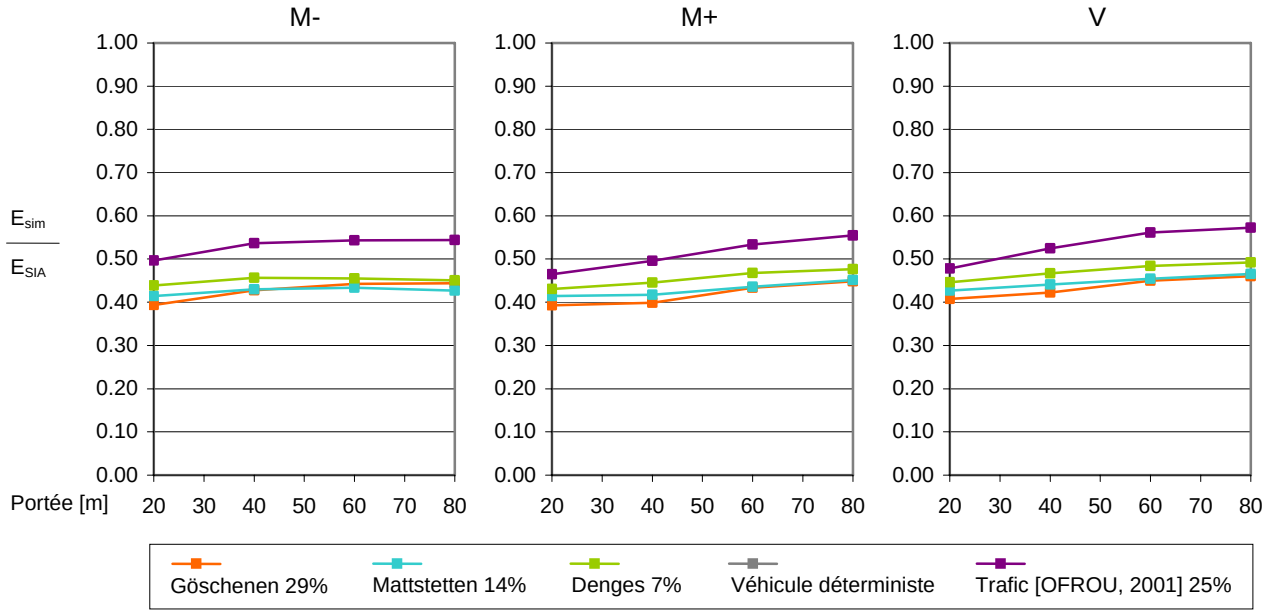


***Figure 4.13** – Comparaison des efforts : ponts caisson, autoroute, situation chantier 4-0*

Notons que la situation de chantier est plus agressive que la situation standard d'autoroute à 2 voies. En moyenne, comme pour le cas du trafic bidirectionnel, le rapport E_{sim}/E_{SIA} pour les trois trafics basés sur les pesages en marche est de l'ordre de 0.44 quel que soit le type d'effort.

Il n'a pas été jugé nécessaire de traiter les autres types de ponts, car l'effet des deux voies chargées de chaque côté d'une chaussée de 12 m de large ne se concentre pas sur un élément de la structure comme pour les ponts caisson, mais se répartit. Par exemple pour le pont bipoutre, la première voie sera reprise par une poutre et la seconde par l'autre poutre, la situation de chantier n'est alors pas déterminante par rapport aux situations standards.

4.7 FACTEUR D'AMPLIFICATION DYNAMIQUE

La Figure 4.14 montre, pour les ponts caisson et selon les hypothèses des sections 3.1 et 3.4, le rapport entre les résultats dynamiques et statiques des simulations du moment à mi-travée.

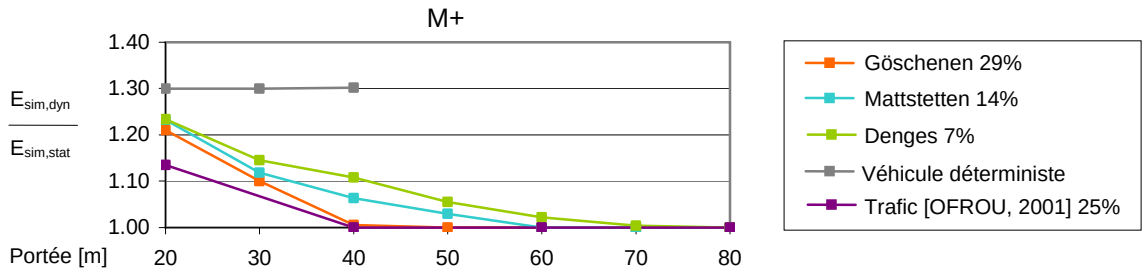


***Figure 4.14** – Rapport entre résultats dynamiques et statiques, ponts caisson, route bidirectionnelle*

On peut logiquement remarquer une diminution du rapport $E_{sim,dyn}/E_{sim,stat}$ avec l'augmentation de la portée. En effet, il a été admis selon la Figure 3.2 que plus la charge totale sur la ligne d'influence est importante, plus le facteur d'amplification dynamique est réduit. Les plus grands rapports $E_{sim,dyn}/E_{sim,stat}$ sont obtenus avec le trafic de Denges qui a une faible densité de camions, mais des véhicules individuellement plus agressifs.

4.8 ÉVOLUTION DU TRAFIC

Certains paramètres des trafics ont été modifiés et de nouvelles simulations ont été réalisées pour observer leurs influences sur les résultats. Cette section présente les résultats obtenus pour les scénarios suivants :

- augmentation du pourcentage de poids lourds dans le trafic
- modification de la composition impliquant une augmentation du poids total moyen des véhicules
- apparition d'un certain pourcentage de véhicules 44 tonnes, notamment utilisés et autorisés pour le transport combiné non accompagné (voir annexe A.9).

4.8.1 Pourcentage de poids lourds

La Figure 4.15 montre les rapports entre les efforts simulés, et les efforts obtenus avec la norme SIA 261 pour un pont caisson avec du trafic bidirectionnel. Les pourcentages de poids lourds des trafics de Mattstetten et de Denges ont été doublés (courbes discontinues).

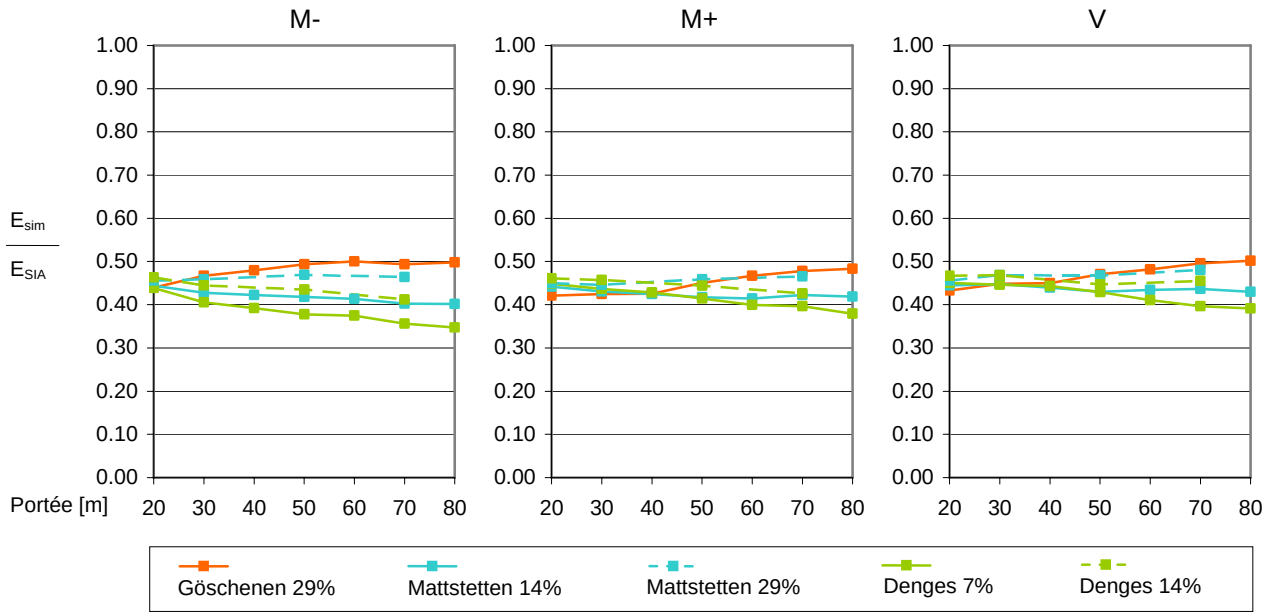


***Figure 4.15** – Comparaison des efforts : ponts caisson, route bidirectionnelle, % de poids lourds variable*

On constate qu'avec un doublement du pourcentage de poids lourds, les efforts simulés augmentent d'environ 5 à 12% selon les cas par rapport à la densité normale.

Notons également que jusqu'à des lignes d'influence d'une longueur 50 m environ, pour un même pourcentage de poids lourds (29%), le trafic de Mattstetten est déterminant par rapport à celui de Göschenen. Ceci s'explique par le fait qu'à Mattstetten certains véhicules sont individuellement plus agressifs, alors même qu'à Göschenen le poids total moyen des véhicules est plus grand.

4.8.2 Composition et poids totaux

La Figure 4.16 montre la distribution des poids totaux des véhicules basée sur le trafic mesuré à Göschenen d'une part, et après modification de la composition de ce trafic d'autre part.

Cette nouvelle distribution des poids a été obtenue essentiellement en diminuant le pourcentage de véhicules seuls et en le remplaçant par des véhicules à remorque ou articulés. Ces derniers types de véhicules sont en effets en moyenne plus lourds. Avec une telle modification de la composition, le poids total moyen a été augmenté de 7.5%.

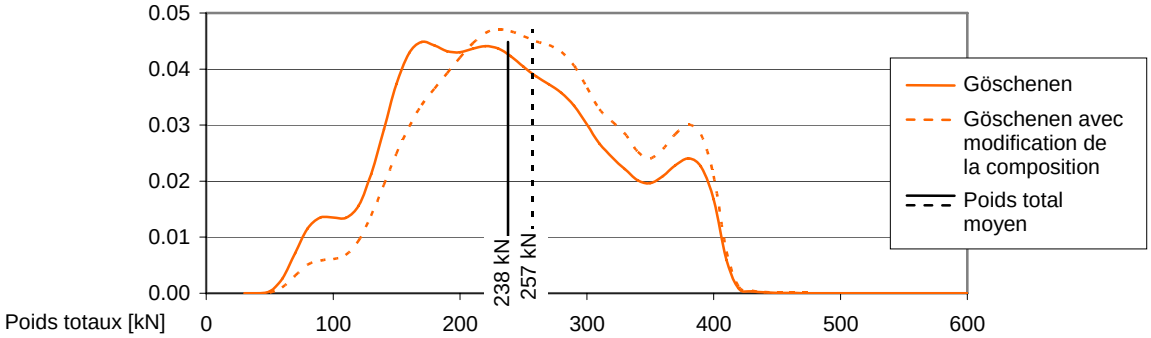


***Figure 4.16** – Distribution des poids totaux des véhicules avec modification de la composition*

La Figure 4.17 montre les rapports entre les efforts simulés et les efforts obtenus avec la norme SIA 261 pour un pont caisson avec du trafic bidirectionnel et pour le trafic de Göschenen modifié.

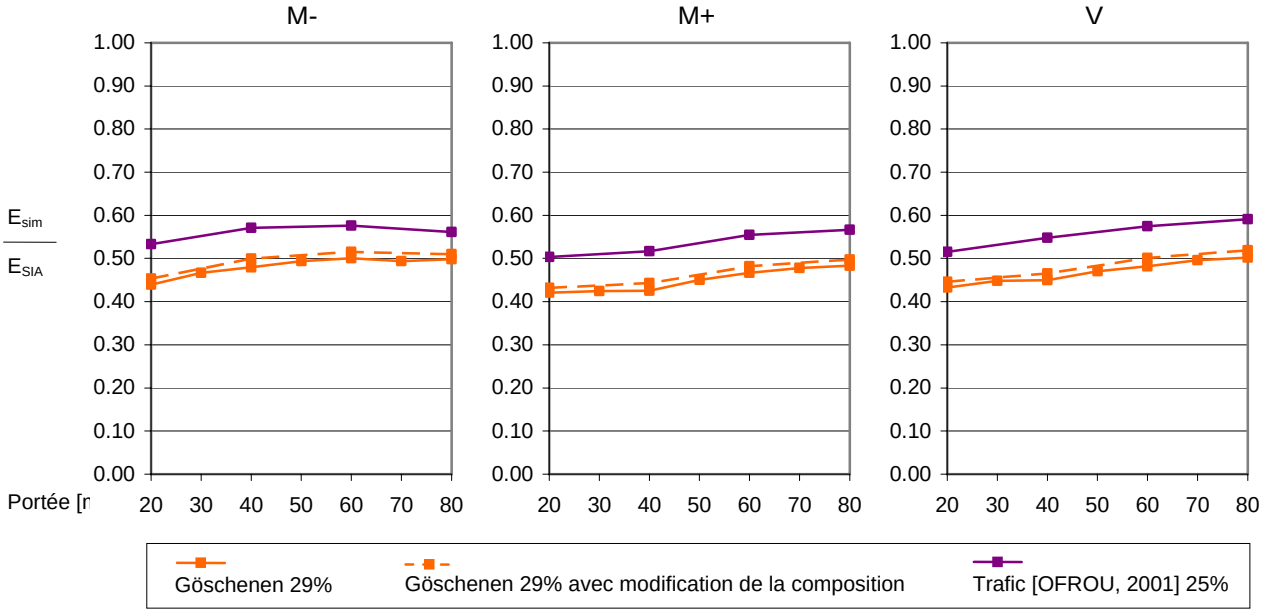


***Figure 4.17** – Comparaison des efforts : ponts caisson, route bidirectionnelle, composition variable*

On constate qu'avec cette modification du poids moyen, les résultats de la simulation ont augmenté de 3 à 4%, quels que soit les efforts et quelles que soit les portées.

4.8.3 Véhicules 44 tonnes

Une partie des véhicules de type 22 d'un poids légal de 32 tonnes ont été remplacés par des véhicules de type 23 qui peuvent peser jusqu'à 44 tonnes s'il s'agit de transport combiné non accompagné ou s'ils sont munis d'une autorisation. La géométrie de ces véhicules est admise selon le modèle déterministe 1 présenté à la Figure 2.16 du paragraphe 2.3.5. Quant à la distribution des poids de ces véhicules, elle est admise semblable à celle des véhicules de type 22, mais les deux maxima représentant les véhicules chargés et non chargés ont été translatés, de façon assez conservatrice, de respectivement 12 t (= 44 t – 32 t) et 6 t, comme le montre la Figure 4.18.

Le trafic de Denges, qui a un pourcentage et des valeurs de dépassement de la limite légale de 40 tonnes plus importants par rapport aux autres trafics, a été considéré pour cette analyse. Ce trafic contient 7% de trafic lourds parmi lequel 6.4% de véhicules de type 22. Les deux tiers de ces véhicules ont été remplacés par des véhicules de type 23 de 44 tonnes et 35% de ceux-ci sont surchargés (> 44 t).

La Figure 4.19 montre les rapports entre les efforts simulés et les efforts obtenus avec la norme SIA 261 pour un pont caisson avec du trafic bidirectionnel.

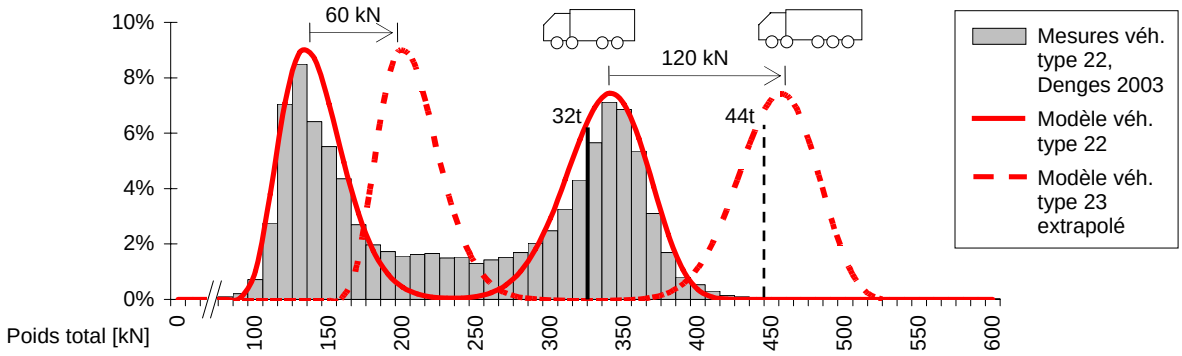


***Figure 4.18** – Distribution extrapolée des poids des véhicules de type 23*

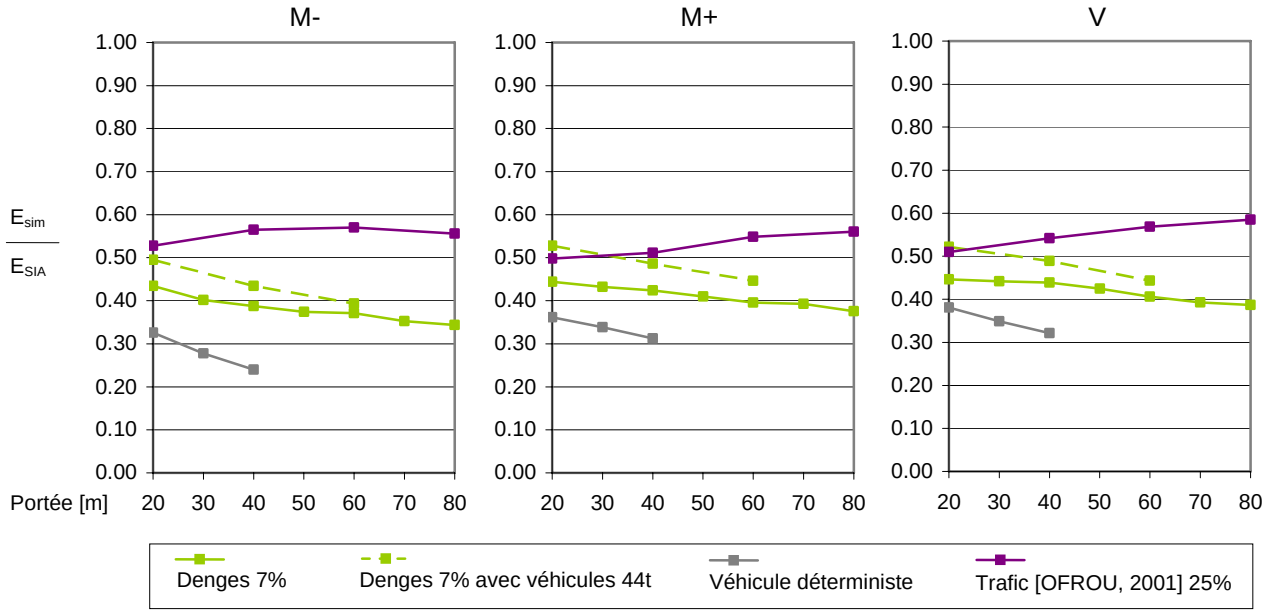


***Figure 4.19** – Comparaison des efforts : ponts caisson, route bidirectionnelle, véhicules 44 t*

La Figure 4.20 montre les rapports obtenus pour un pont bipoutre avec du trafic unidirectionnel.

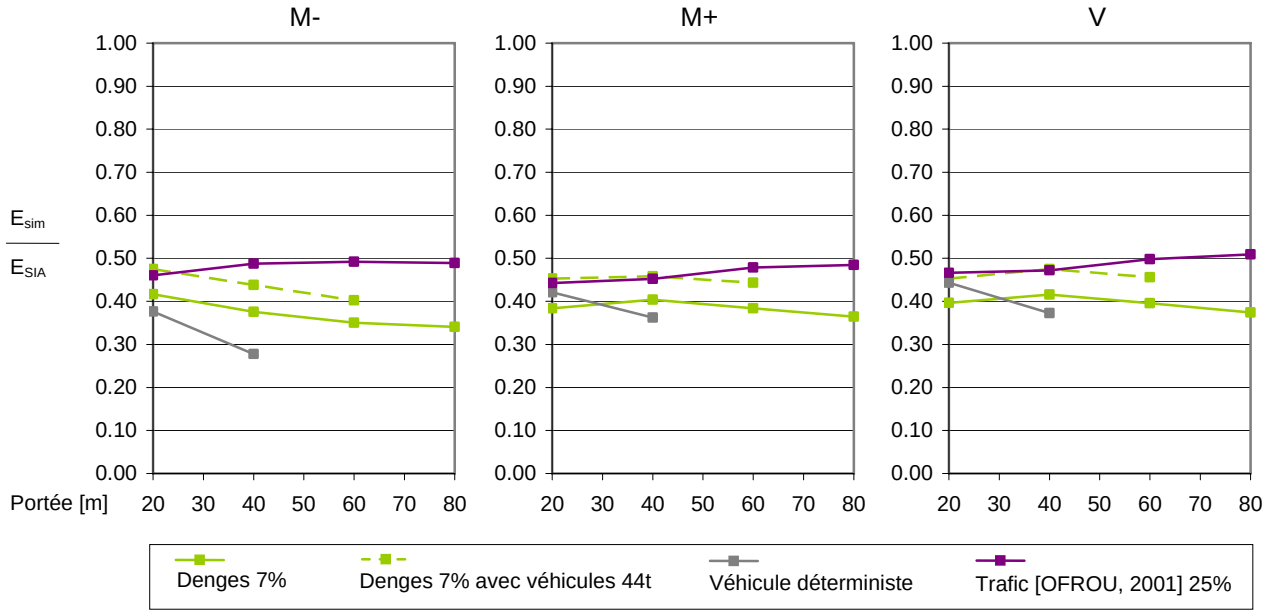


***Figure 4.20** – Comparaison des efforts : ponts bipoutres, autoroute à 2 voie, véhicules 44 t*

On constate qu'avec la prise en compte d'un millième de véhicules de type 23 pesant plus que 44 tonnes (7%×6.4%×⅔×35%=1‰), les résultats de la simulation ont augmenté de 12 à 16% pour des portées de 20 m et de 6 à 13% pour des portées de 60 m, selon le type de pont et le type d'efforts. L'effet des véhicules 44 tonnes est donc plus important pour les petites portées. Notons que les résultats sont très proches voire même plutôt inférieurs aux résultats obtenus avec le trafic [OFROU, 2001] comptant une forte proportion de véhicules surchargés. Les résultats des simulations effectuées avec le trafic [OFROU, 2001] fourniront donc une borne supérieure pour tenir compte de l'arrivée d'un nombre important de véhicules de 44 tonnes.

5. ÉTABLISSEMENT DU MODELE DE CHARGE

Au chapitre précédent, les comparaisons entre les efforts intérieurs obtenus par calcul avec les modèles de charge de la norme SIA 261 et par simulation avec des modèles de trafic ont été documentées. Ces comparaisons montrent que l'utilisation de la norme SIA 261 donne toujours des efforts supérieurs à ceux obtenus avec les trafics basés sur les pesages. Ceci permet de proposer, pour l'évaluation des ponts routiers existants, des coefficients α actualisés inférieures à 0.9. Des marges doivent être considérées dans les calculs de ces coefficients, entre autres pour tenir compte de l'évolution du trafic. Les hypothèses concernant ces marges sont décrites dans la première section de ce chapitre.

5.1 MARGES

La marge M est définie comme suit :

$$M = \frac{E_{act}}{E_{sim,max}} - 1$$

E_{act} : Effort calculé avec le modèle actualisé

$E_{sim,max}$: Effort maximum obtenus avec les simulations des différents trafics basés sur les pesages ainsi qu'avec le véhicule déterministe

Au paragraphe 4.8.1, il a été observé qu'un doublement du pourcentage de poids lourds augmentait les efforts simulés de 5 à 12%. En considérant qu'un doublement de la densité de poids lourds est extrême pour les 15 à 20 prochaines années, on admet une marge de 5% pour tenir compte de cette augmentation.

Au paragraphe 4.8.2, il a été observé qu'une augmentation de 7.5% du poids total moyen donnait des efforts simulés 3 à 4% plus importants. Sachant que l'augmentation des poids observée est de 1 à 2% par an (paragraphe 2.3.1), et en comptant sur un léger ralentissement de cette tendance, on admet une augmentation de 20% en 15 à 20 ans. Ceci conduit à admettre une marge d'environ 10% sur les efforts simulés pour tenir compte de l'augmentation des poids.

Compte tenu de ces réflexions, une marge totale de l'ordre de 15 % est admise. Ceci est approximatif, car les différents paramètres ne sont en réalité pas indépendants.

Notons que le trafic [OFROU, 2001] comprenait un taux de dépassements de la limite légale de 40 tonnes important par rapport à ce qui est observé dans les mesures récentes. Les résultats obtenus avec ce trafic fournissent une borne supérieure qui, même avec l'arrivée de véhicules 44 tonnes, ne sera assurément pas dépassée d'ici 15 à 20 ans.

La sécurité structurale d'un ouvrage dépend non seulement de la marge sur les charges de trafic, mais également de son poids propre. Ce dernier étant relativement plus important lorsque les portées augmentent, il est ainsi possible d'admettre des marges plus petites pour les grandes portées. D'après cette réflexion, il a été proposé de ne pas prendre une marge constante de 15%, mais de considérer une marge variable. Il parait ainsi raisonnable d'admettre une marge d'environ 20% pour les ouvrages d'une portée de 10 à 40 m et de 10% pour les ouvrages de plus grande portée.

5.2 FACTEUR DE MODELE

L'ancienne norme SIA 160 comprenait implicitement un coefficient de modèle γ_s, fixé par la commission de norme égal à 1.1. Il tenait compte du fait qu'on ne considère, dans la combinaison de charge $E_d = E(Q_d, G_d, Q_a)$ qu'une seule action concomitante Q_a agissant simultanément avec l'action prépondérante Q_d. Il a été proposé de continuer à considérer ce facteur pour l'établissement du modèle actualisé, même si ce dernier se base sur la nouvelle norme SIA 261.

5.3 CHOIX DU MODELE ACTUALISE

Les différents résultats obtenus et présentés au chapitre 4 sont relativement constants, quels que soient le type de structures, la portée, le type d'efforts ou encore le type de routes. Ce constat montre qu'il doit être possible de proposer un modèle de charge actualisé simple qui dépend d'un petit nombre de paramètres.

Sur la base de cette réflexion, il a été décidé de proposer des coefficients α qui ne dépendent ni de la portée, ni du type d'efforts, et ni du type de routes. Seul le type de pont a été différencié.

Le plus simple aurait été de déterminer, pour chaque type de pont, un seul coefficient α à appliquer globalement à tout le modèle de charge définit dans la norme SIA 261. Néanmoins, les charges concentrées du modèle ont notamment le rôle de couvrir les phénomènes locaux tels que le poinçonnement des dalles. Pour que le modèle actualisé soit également utilisable à ces fins, il a été décidé de différencier au moins les coefficients α_Q et des coefficients α_q.

La charge du groupe d'essieux le plus chargé (sur la voie fictive ①) doit correspondre aux charges des essieux les plus lourds mesurés. Quand à la charge du second groupe d'essieux (sur la voie fictive ②), elle peut être fixée de manière plus libre. Il a donc été proposé de distinguer également le coefficient α_{Q1} et α_{Q2}. Notons que ces deux coefficients peuvent en revanche être définis identiques pour les différents types de ponts.

En résumé, le modèle actualisé comprend des coefficients α_{Q1} et α_{Q2} indépendants du type de ponts ainsi qu'un coefficient α_q variable dépendant du type de ponts, à appliquer sur toutes les charges réparties ($\alpha_q = \alpha_{q1} = \alpha_{q2} = \alpha_{q3} = \alpha_{qr}$).

5.4 COEFFICIENTS α

Pour déterminer le facteur α_{Q1}, les statistiques des poids des essieux mesurés ont été analysées. L'analyse des essieux simples, tandem et tridem provenant des différentes stations de pesage a montré que la charge par essieu est plus grande pour les essieux simples. Les statistiques des essieux simples donnent un fractile 99.99% d'environ 160 kN, comme indiqué à la Figure 5.1. Cela signifie que le poids maximum est de l'ordre de 160 kN avec une probabilité de dépassement de 1/10'000. Notons que les statistiques complètes des essieux sont présentées à l'annexes A.5.

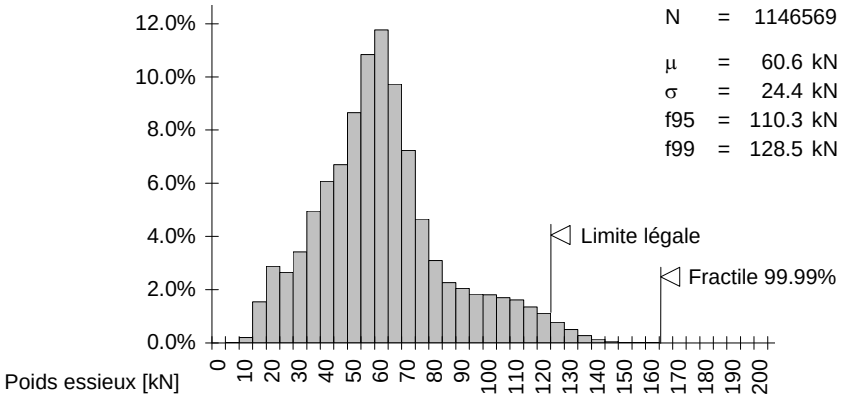


***Figure 5.1** – Statistique des poids des essieux simples des véhicules classés, Trübbach 2003*

Cette valeur de 160 kN peut être comparée à la valeur caractéristique Q_{k1} = 300 kN par essieu, définie dans la norme SIA 261. Cette comparaison doit tenir compte, d'une part, du facteur de charge γ_Q = 1.5 de la norme et, d'autre part, d'un coefficient dynamique Φ admis à 1.8. L'inéquation est la suivante :

$$\Phi \cdot Q_{99.99\%} \leq \frac{\gamma_Q}{\gamma_s} \cdot \alpha_{Q1} \cdot Q_{k1} \quad \rightarrow \quad \alpha_{Q1} \geq \frac{\gamma_s}{\gamma_Q} \cdot \frac{\Phi \cdot Q_{99.99\%}}{Q_{k1}} = \frac{1.1}{1.5} \cdot \frac{1.8 \cdot 160}{300} = 0.70$$

où Φ : coefficient dynamique sur les charges concentrées
$Q_{99.99\%}$: fractile 99.99% des poids des essieux obtenu selon les mesures

Avec ces hypothèses, comme le montre la résolution de l'inéquation, α_{Q1} doit être supérieur ou égal à 0.70. Une valeur de $\alpha_{Q1} = 0.70$ est ainsi proposée.

Les autres coefficients α doivent être établis de manière à satisfaire l'inéquation suivante :

$$E_{sim} \cdot (1+M) \leq \frac{\gamma_Q}{\gamma_s} \cdot \left[\alpha_{Q1} \cdot E_{Q1} + \alpha_{Q2} \cdot E_{Q2} + \alpha_q \cdot \left(E_{q1} + E_{q2} + E_{q3} + E_{qr}\right)\right]$$

L'ordre de grandeur des marges M requises ayant été fixé à la section 5.1, cette inéquation contient deux inconnues, α_{Q2} et α_q. Il a été remarqué qu'avec un coefficient α_{Q2} de 0.50, le rapport entre les charges concentrées (indépendantes de la portée) et des charges réparties (dépendantes de la portée) permettait d'obtenir la variation voulue de la marge entre les petites et les grandes portées. Il est ainsi proposé de prendre le coefficient $\alpha_{Q2} = 0.50$.

Quant au coefficient α_q, il est défini en fonction de chaque type de pont sur la base de la comparaison entre E_{sim} et E_{SIA}. Les courbes rouges des Figures 5.2 à 5.5 montrent, pour chaque type de pont, des exemples des marges obtenues entre les efforts simulés avec les trafics basés sur les pesages et les efforts calculés avec les coefficients α proposés. A la Figure 5.2, les courbes vertes en trait discontinu représentent, à titre indicatif, les marges avec le trafic extrapolé incluant des véhicules type 23 de 44 tonnes (paragraphe 4.8.3).

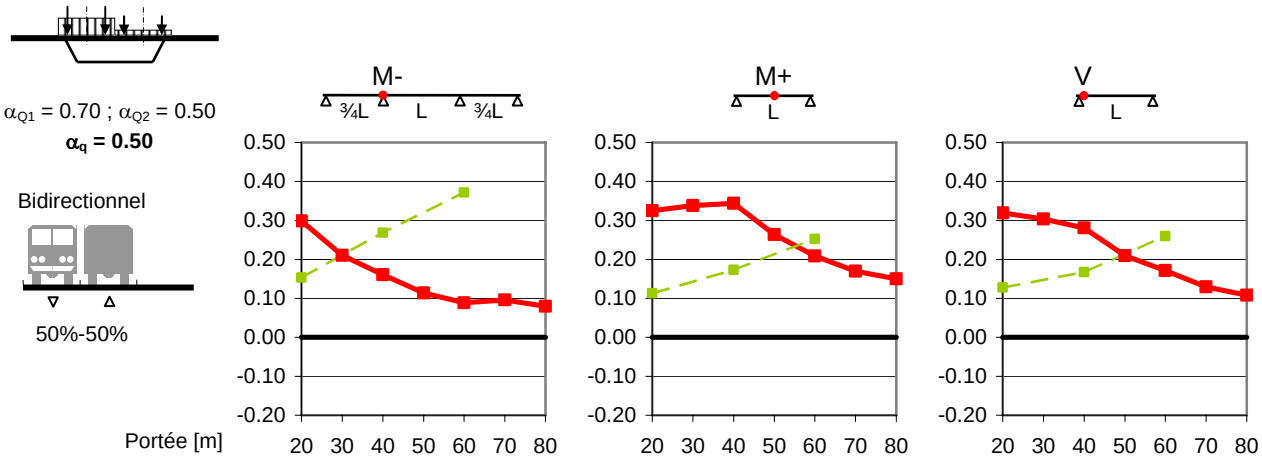


***Figure 5.2** – Marges : pont caisson, trafic bidirectionnel*

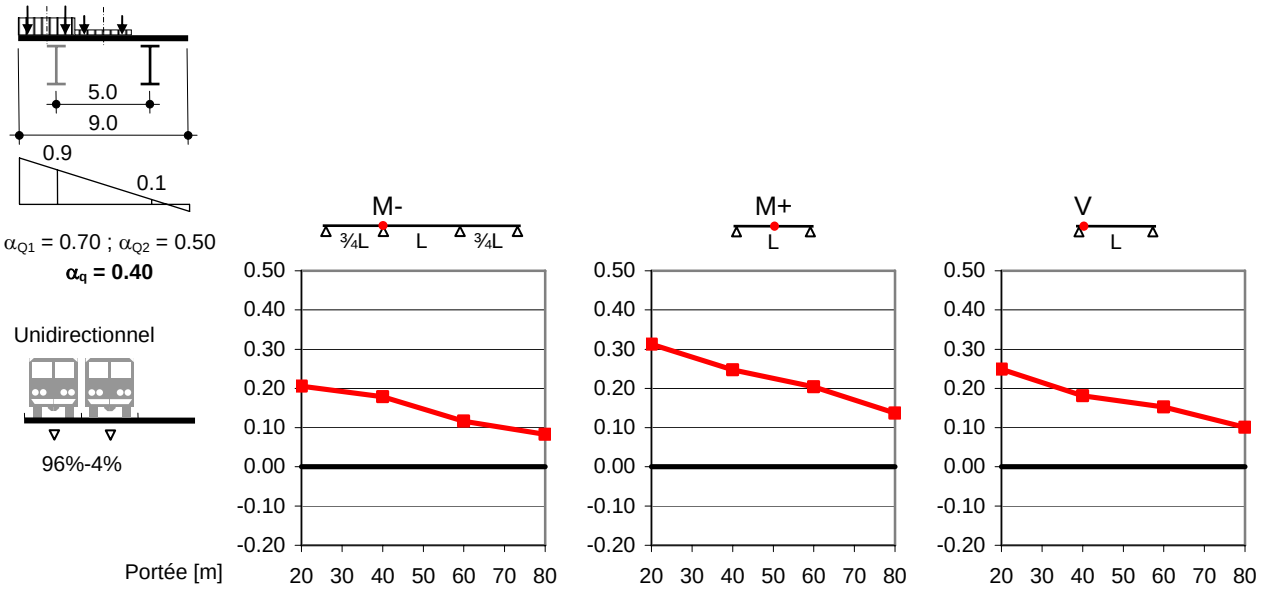


***Figure 5.3** – Marges : pont bipoutre, autoroute avec répartition sur les voies 4%-96%*

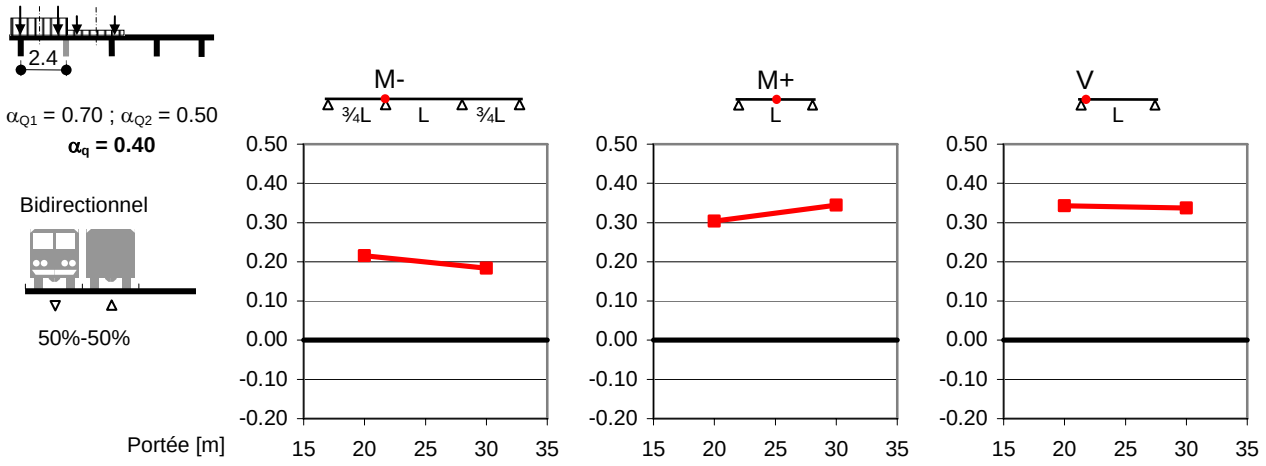


***Figure 5.4** – Marge : pont multipoutre, poutre 2, route bidirectionnelle*

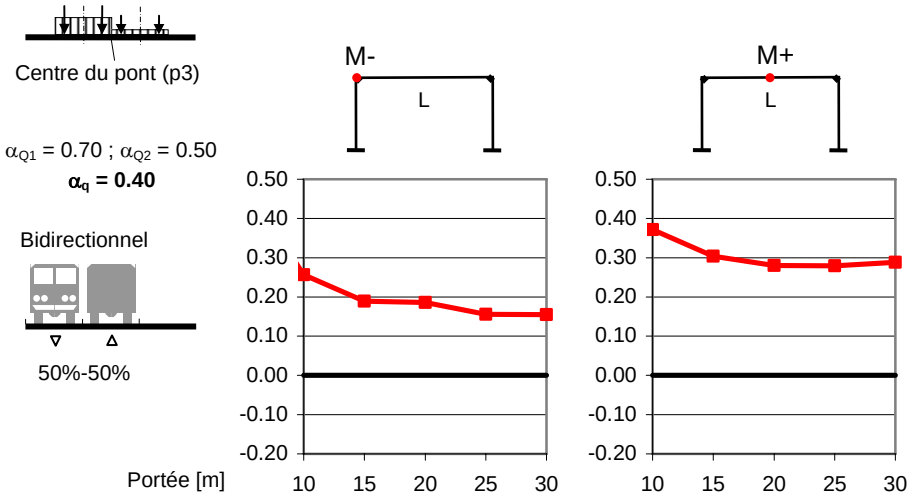


***Figure 5.5** – Marge : pont dalle, route bidirectionnelle, centre du pont (p3)*

On constate qu'avec les coefficients α proposés, les marges voulues sont très bien respectées. Les résultats complets pour tous les cas étudiés figurent à l'annexe A.6.

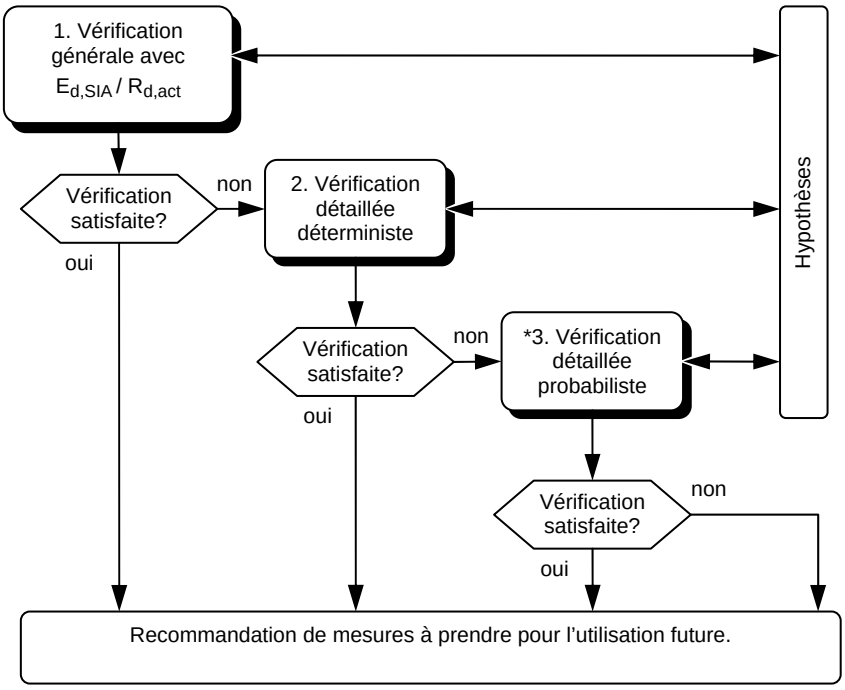
6. ÉVALUATION DE PONTS ROUTIERS EXISTANTS

6.1 PRINCIPE

Pour l'évaluation des ponts routiers existants, il s'agit de faire la distinction entre l'évaluation comparative d'un groupe de ponts (par exemple : ponts avec structure porteuse semblable, ponts d'un même canton, ponts d'un même tronçon de route, ponts d'une même génération de normes, …) et l'évaluation d'un pont en particulier.

Dans le premier cas, il s'agit tout d'abord de déterminer quels ponts doivent être soumis à une étude approfondie et selon quelle priorité. Pour ce faire, les normes SIA en vigueur sont utilisées, les valeurs du côté de la résistance peuvent cependant être actualisées. Une deuxième étape peut être effectuée conformément à la Figure 6.1 en considérant un modèle de charges de trafic actualisé.

Lorsqu'un pont nécessite une étude approfondie, la vérification devrait être effectuée en plusieurs étapes successives. Ces étapes sont représentées schématiquement dans la Figure 6.1.



* Cette étape ne sera pas effectuée si l'effort consenti est trop important par rapport au bénéfice escompté.

***Figure 6.1** – Processus par étapes pour l'évaluation de ponts existants*

1ère étape: Vérification générale

Lors de la première étape de vérification, il s'agit de déterminer la sollicitation E_d selon les normes actuelles des structures porteuses de la SIA. Afin de déterminer la résistance R_d, les valeurs suivantes peuvent être utilisées :

- Valeurs actualisées des propriétés des matériaux : celles-ci sont déterminées au moyen d'inspections visuelles approfondies et éventuellement d'essais non destructifs.

Attention : Les valeurs actualisées des propriétés des matériaux peuvent être inférieures à celles indiquées dans la norme.

Lors de la vérification, il est recommandé de présenter les résultats obtenus comme le rapport de la sollicitation E_d sur la résistance R_d ou inversement. Les rapports peuvent ensuite être introduits dans un tableau regroupant tous les endroits examinés (élément porteur, section transversale ou détail constructif).

Ainsi, ce tableau permet de mettre en évidence les éléments qui devront être examinés en priorité dans la deuxième étape.

2ème étape: Vérification détaillée déterministe

Lors de la deuxième étape de vérification, il s'agit de déterminer la sollicitation au moyen de valeurs actualisées. La résistance doit être actualisée une seconde fois au moyen d'une auscultation plus précise de l'ouvrage. Les valeurs actualisées qui se distinguent de celles émises par les normes doivent toujours être justifiées.

En principe, les valeurs suivantes peuvent être utilisées :

- Modèles de charges actualisés : définis ci-après, dans les sections 6.2 à 6.4 pour le trafic routier.
- Poids propre et charges permanentes actualisés : les facteurs de charges actualisés ainsi que les exigences liées à leur détermination sont spécifiées dans [OFROU, 1998].
- Valeurs actualisées des propriétés des matériaux : déterminées au moyen des données contenues dans les documents de construction, d'inspections non destructives ou d'essais effectués sur des échantillons prélevés ponctuellement sur l'ouvrage.
- Modèle de la résistance: résistance en section proche de la réalité.
- Modèle de la structure porteuse : modèle proche du comportement porteur réel de la structure.
- Détermination du comportement de la structure porteuse au moyen d'essais in-situ :

  - Elle peut être réalisée dans deux cas :

    Lorsque les connaissances et les informations au sujet de la structure porteuse (par exemple : lorsque les documents de construction manquent) et de son comportement (par exemple : présence de particularités techniques) sont insuffisantes.

    Pour calibrer le modèle de calcul de la structure porteuse en vue de son analyse.

  - Les essais de charge peuvent être de nature statique ou dynamique et ils doivent être interprétés à l'aide d'un modèle de la structure porteuse. Leurs effets peuvent être saisis au moyen d'une instrumentation adéquate de l'ouvrage. Les mesures réalisées par cette instrumentation peuvent ensuite être comparées aux valeurs calculées.

  Attention : une telle démarche pouvant permettre une économie importante en matière de renforcements de la structure, les mesures de ce genre ainsi que leur interprétation sont à réaliser, avec le plus grand soin, par des spécialistes formés en conséquence.

3ème étape: Vérification détaillée probabiliste

Ce genre de vérification ne peut être effectué que lorsqu'il existe suffisamment de données disponibles pour l'étude probabiliste. Pour ce faire, des mesures en conséquence sur la structure porteuse (charges de trafic) ainsi que des essais sur les matériaux sont généralement nécessaires.

Définition des nouveaux termes introduits dans cette section

Les termes suivants sont tirés du projet de norme SIA 269 (05/2006):

- Actualisation :

  Il s'agit d'affiner et de compléter les informations à disposition en rassemblant de nouvelles informations.

- Vérification générale :

  La vérification générale concerne la structure porteuse dans son ensemble et elle comprend généralement les activités suivantes :

  - Etude des documents de construction
  - Elaboration ou actualisation de la convention d'utilisation et de la base de projet

- Evaluation de la conception de la structure porteuse
- Relevé de l'état de la structure porteuse par des inspections visuelles et de simples essais généralement non destructifs.
- Vérifications approximatives de la sécurité structurale et de l'aptitude au service.
- Détermination de la présence de dommages ou défauts
- Détermination des parties de la structure porteuse qui se révèlent être déterminantes suite à une comparaison avec leurs exigences d'utilisation.

- Vérification détaillée

  Une vérification détaillée doit être réalisée lorsque les exigences d'utilisation n'ont pu être satisfaites par la vérification générale.

  - La vérification détaillée se limite généralement à certaines parties de la structure porteuse qui ont été déterminées au préalable. Elle peut être effectuée en plusieurs étapes, chacune correspondant à un approfondissement croissant.
  - Lors de la vérification détaillée, les causes des mécanismes de détérioration et des dommages en tout genre sont déterminées de manière approfondie. De même, tout défaut doit être examiné en détail.
  - Une vérification détaillée contient une analyse affinée de la structure porteuse et une détermination approfondie des actions et des effets d'actions, de la résistance et du comportement structural. Celle-ci peut être réalisée soit par un modèle affiné, soit par des méthodes spéciales telles des essais en laboratoire ou des mesures in-situ.

- Recommandation de mesures à prendre

  Les mesures à prendre recommandées forment le critère de base sur lequel s'appuie le maître de l'ouvrage pour décider de la suite. Cette recommandation peut comprendre les options suivantes :

  - Effectuer une vérification détaillée (complémentaire).
  - Confirmer les mesures de maintenance opérationnelle (surveillance, entretien courant) ainsi que les instructions d'utilisation.
  - Modifier les mesures de maintenance opérationnelle.
  - Corriger l'état actuel par d'urgentes mesures de sécurité.
  - Accepter l'état actuel en prenant des mesures de sécurité supplémentaires.
  - Planification des mesures à prendre.

  Les recommandations doivent être justifiées. Lors de la modification des mesures de maintenance opérationnelle, le plan de surveillance ainsi que le plan d'entretien sont à adapter en conséquence et à mettre en pratique. Les mesures à prendre recommandées, que ce soit des mesures de sécurité supplémentaires, une remise en l'état, une modification ou le remplacement de la structure porteuse, sont à réaliser sur la base d'une planification.

6.2 MODELE DE CHARGE

La section 10.2 de la norme SIA 261 définit le modèle charge ainsi que les valeurs caractéristiques associées (voir Figure 6.2).

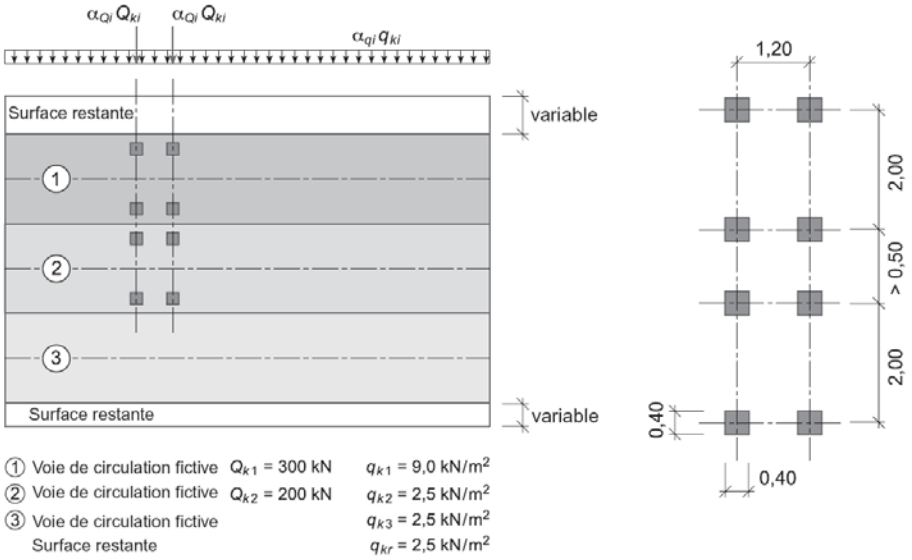


***Figure 6.2** – Disposition possible des charges du modèle de charge 1 (dimension en m) [SIA 261, 2003]*

Le modèle de charge actualisé consiste à remplacer les coefficients de la section 10.3 de la norme SIA 261 par les coefficients α actualisés spécifiés à la section 6.4. Ces coefficients α sont valables pour le calcul des moments de flexion et des efforts tranchants ainsi que pour le calcul du poinçonnement de la dalle. Le domaine d'application spécifié dans la section 6.3 doit impérativement être respecté.

6.3 DOMAINE D'APPLICATION

Les coefficients α actualisés de la section 6.4 sont applicables pour :

- les types de ponts et portées spécifiées à la section 2.1,
- le calcul des moments de flexion et des efforts tranchants longitudinaux (sollicitations globales),
- le calcul des moments de flexion, de l'effort tranchant et du poinçonnement de la dalle (sollicitations locales),
- les ponts à trafic bidirectionnel avec une chaussée de 6 à 9 m de largeur,
- les ponts autoroutiers à 2 voies par direction et par pont,
- les situations de chantier sur les ponts autoroutiers avec 4 voies dont 2 accessibles aux poids lourds au maximum.

En dehors de ce domaine d'application, ce sont les coefficients α spécifiés dans la norme SIA 261 qui doivent être appliqué.

Pour les ouvrages autorisés au trafic exceptionnel, une vérification complémentaire doit être effectuée avec le modèle de charge 3 de la norme SIA 261.

Des études spécifiques sont nécessaires :

- dans les secteurs où des embouteillages fréquents de camions chargés sont à attendre sur plus d'une voie, comme par exemple à l'approche des douanes, et
- dans les secteurs où les poids lourds sont stationnés sur la voie d'arrêt d'urgence d'une autoroute, comme par exemple sur l'A2 à l'approche du tunnel du Gothard.

Le modèle de charge actualisé n'est pas applicable pour la vérification de la sécurité à la fatigue.

Notons que l'ICOM peut calculer des modèles de charge spécifiques à une structure à partir de ses lignes d'influence. Ces modèles de charge peuvent même prendre en considération le trafic local particulier de l'ouvrage étudié.

6.4 COEFFICIENTS α ACTUALISES

Le Tableau 6.1 spécifie les coefficients α actualisés calculés selon les hypothèses résumées à la section 6.5. Ils se basent sur les mesures de trafic de l'année 2003 comprenant les camions de 40 tonnes légalisés en Suisse. L'apparition occasionnelle de camions 44 tonnes récemment légalisés (transport combiné non accompagné), ainsi que les passages isolés de camions-grues de 60 tonnes, sont également pris en considération.

***Tableau 6.1** – Coefficient α actualisés pour l'évaluation des ponts routiers existants*

Pont	Section transv.	Portées	α_{Q1}	α_{Q2}	α_{qi}, α_{qr}
Poutre	Caisson	20-80 m	**0.70**	**0.50**	**0.50**
	Bipoutre	20-80 m			**0.40**
	Multipoutre	15-35 m			**0.40**
Dalle		8-30 m			**0.40**

Si la vérification doit être faite pour les camions-grues de 96 tonnes, les coefficients α actualisés spécifiés à l'annexe A.10 peuvent être appliqués.

6.5 RECAPITULATION DES HYPOTHESES

Le Tableau 6.2 récapitule toutes les hypothèses. Le modèle de charges actualisé devrait en principe n'être utilisé que si le pont évalué respecte ces hypothèses.

***Tableau 6.2** – Récapitulation des hypothèses de l'étude*

Horizon de l'étude	
Validité dans le temps (chapitre 1)	- le modèle proposé a été établi avec une estimation du développement du trafic sur une durée de 15 à 20 ans - un suivi régulier de l'évolution du trafic est indispensable pour s'assurer qu'elle corresponde bien aux hypothèses admises
Chaussée et structure porteuse	
Configuration de chaussée (paragraphe 2.1.1)	- route bidirectionnelle à deux voies, chaussée de 6 à 9 m - autoroute à deux voies, chaussée de 9 à 12 m - autoroute en configuration de chantier avec 4 voies dont uniquement 2 accessibles aux poids lourds, chaussée de 12 m
Section transversale (paragraphe 2.1.2)	- pont caisson - pont bipoutre avec une répartition transversale 0.9-0.1 ou 0.7-0.3, ainsi qu'un écartement variable des poutres entre 4 et 6 m - pont multipoutre avec un écartement e variable des poutres de 2.4 à 3.0 m, une hauteur de L/20, une épaisseur de dalle de e/10 et une largeur de poutre de e/6 - pont dalle avec un épaisseur de dalle égal à L/33
Système statique longitudinal (paragraphe 2.1.3)	- ponts poutres : poutre simple et poutre continue sur quatre appuis avec les portées des travées de rive égales à ¾ de la travée centrale - ponts dalle : système cadre avec différentes conditions d'appui de la dalle variant de simplement appuyé à parfaitement encastré

Efforts (paragraphe 2.1.4)	- ponts poutres : M- au droit des appuis (poutre continue), M+ à mi-travée et V aux extrémités de la travée centrale - ponts dalle : M- à l'angle de cadre et M+ à mi-travée, 3 endroits étudiés transversalement
Modélisation du trafic	
Type de véhicules (paragraphe 2.2.2)	- 12 classes de poids lourds (véhicules seules, véhicules à remorque et véhicules articulés) et 1 classe de véhicules légers
Composition du trafic (paragraphe 2.2.3)	- composition basée sur les mesures de trafic en 2003 - pourcentage moyen de poids lourds augmenté de 50% pour tenir compte des périodes où ils ne circulent pas (dimanche et jours fériés) - voir annexe A.3
Volume de trafic (paragraphe 2.2.4)	- route bidirectionnelle : 5'000'000 véh./an - autoroute à deux voies : 10'000'000 véh./an/direction
Modélisation des véhicules	
Poids totaux (paragraphe 2.3.1)	- modélisation selon une distribution béta bimodale établie sur la base des statistiques des pesages en marche de 2003
Poids des essieux (paragraphe 2.3.2)	- modélisation des relations entre le poids total et le poids des différents essieux selon des droites de régression établies sur la base des statistiques des pesages en marche
Géométrie (paragraphe 2.3.4)	- modélisation des distances entre les différents essieux selon des distributions béta établies sur la base des statistiques des données de pesages en marche
Modèle déterministe (paragraphe 2.3.5)	- deux types de véhicules définis : un camion de chantier de type 23 de 40 tonnes avec $\gamma_Q = 1.5$ et $\phi = 1.3$, ainsi qu'un camion-grue de 60 tonnes avec $\gamma_Q = 1.1$ et $\phi = 1.3$
Modélisation de la circulation	
Conditions de circulation (paragraphe 2.4.1)	- trafic saturé à l'arrêt en considérant que 2% des véhicules annuels circulent dans ces conditions
Distance entre véhicules (paragraphe 2.4.2)	- modélisation des distances selon des distributions beta dont le minimum est 0.1 m, le maximum est 15 m et la moyenne varie entre 1.9 et 3.3 m selon les véhicules qui se suivent
Répartition sur les voies (paragraphe 2.4.3)	- pour les routes bidirectionnelles, les poids lourds sont répartis à parts égales sur chaque voie : 50%-50% - pour les autoroutes à deux voies, les poids lourds sont répartis respectivement sur les voies de gauche et de droite selon les trois répartitions moyennes suivantes : 15%-85%, 4%-96% et 0%-100% - pour la situation de chantier 4-0 sur autoroute, les poids lourds circulent uniquement sur les voies de droite de chaque direction : 50%-0%-0%-50%
Simulations de trafic	
Amplification dynamique (section 3.1)	- les efforts sont multipliés, selon la méthode proposée de [OFROU, 2004.1], par un facteur d'amplification dynamique qui varie entre 1.4 et 1.0 en fonction de la charge totale sur la ligne d'influence à l'instant considéré

Nombre de véhicules simulés N (section 3.2)	- route bidirectionnelle : 1'000'000 véh. (≈ 2% de trafic saturé à l'arrêt sur 15 ans) - autoroute à deux voies : 2'000'000 véh./direction (≈ 2% de trafic saturé à l'arrêt sur 15 ans) - situation de chantier 4-0 sur autoroute : 2'000'000 véh. (≈ 10% de trafic saturé à l'arrêt sur 1 an et demi)
Nombre de simulation (section 3.3)	- 1'000 simulations du nombre de véhicules N effectuées pour chaque cas étudié
Valeur de calcul (section 3.4)	- la valeur de calcul admise est le fractile 99% de la distribution des efforts maximaux, facteur d'amplification dynamique y compris
Trafics simulés (section 3.5)	- l'ensemble des simulations a été réalisé avec des trafics basés sur les données des stations de pesage de l'année 2003 - l'essentiel des simulations a été réalisé avec des trafics basés sur les données de Göschenen, Mattstetten et Denges - des pointages ont été faits avec des trafics basés sur les données du Ceneri, d'Oberbüren, de Trübbach, et de Plazzas - le trafic considéré dans le cadre du rapport [OFROU, 2001] a également été simulé pour fournir des éléments de comparaison
Calcul déterministe (section 3.6)	- les véhicules déterministes définis ont été passés individuellement sur chaque pont étudié et leurs effets ont été comparés aux résultats des simulations probabilistes
Modèle de charge actualisé	
Valeur de calcul de la norme (section 4.1 et 4.6)	- les valeurs de calcul de la norme qui sont comparée aux valeurs de calcul des simulations sont obtenues sur la base d'une chaussée fictive de 6 m de largeur placée au même endroit que les voies simulées - pour la situation de chantier sur autoroute, une largeur de 12 m est considérée
Marges pour tenir compte de l'évolution du trafic (section 5.1)	- 5% de marge a été admis pour tenir compte de l'augmentation du pourcentage de poids lourds dans le trafic sur 15 à 20 ans - 10% de marge a été admis pour tenir compte de l'augmentation du poids total moyen des véhicules sur 15 à 20 ans - les marges minimales ont été admises plus grandes sur les ouvrages courts que sur les longs - les marges admises permettent de tenir compte de l'arrivée d'un certain nombre de véhicules 44 tonnes
Facteur de modèle (section 5.2)	- un facteur de modèle $\gamma_s = 1.1$ a été pris en compte
Coefficient α (section 5.4)	- $\alpha_{Q1} = 0.7$ est établi sur la base du fractile 99.99% du poids d'essieux simples pesés, soit une valeur de 160 kN - $\alpha_{Q2} = 0.5$ est établi de manière à respecter un rapport optimal entre les charges concentrées et les charges réparties du modèle - α_q est établi d'après α_{Q1}, α_{Q2} et en fonction des marges souhaitées

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Bailey, 1996] BAILEY, S.F., *Basic Principles and Load Models for the Structural Safety Evaluation of Existing Road Bridges,* Thèse No.1467, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1996.

[Bez, 1985] BEZ, R., CANTIENI, R., JACQUEMOUD, J., *Modélisation du trafic routier suisse,* Ingénieurs et architectes suisses, n° 23, Ecublens, 1985.

[Bez, 1989] BEZ, R., *Modélisation des charges dues au trafic routier*, Thèse No. 793, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1989.

[Buckland, 1975] BUCKLAND, P.G., NAVIN, F.P.D., ZIDEK, J.V., *Bridge traffic loads - are we overdesigning ?* Roads and Transportation Association of Canada, Calgary, 1975.

[Cantieni, 1983] CANTIENI, R., *Dynamische Belastungsversuche an Strassenbrücken in der Schweiz / 60 Jahre Erfahrung der EMPA,* Bericht Nr. 199, EMPA, Dübendorf, 1983.

[Flint & Neill, 1986] FLINT and NEILL Partnership, *Interim Design Standard : Long span bridge loading,* Contractor Report 16, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1986.

[ICOM, 1999] *Mesures et analyse de trafic à Aarwangen,* Mandat du Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis IV, Rapport de mandat 685-2, ICOM, École polytechnique fédérale de Lausanne, 1999.

[ICOM, 2004] VOLLMAR Th., *Dépouillement et Analyse des Mesures du Trafic routier*, Année 2002, Rapport de mandat 446-5, ICOM, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2004.

[Koshini, 1985] KOSHINI, I., *Traffic load measurement and probabilistic modelling for structural design of urban expressways,* ICOSSAR'85, 1985.

[OFROU, 1995] BEZ, R., BAILEY, S.F., HAESLER, V., *Modèles de charge actualisés pour l'évaluation de la sécurité structurale de ponts-routes existants*, mandat de recherche OFROU 90/90 (rapport final), N°515, Union des professionnels suisses de la route (VSS), Zurich, 1995.

[OFROU, 1998] BASSETTI, A., BAILEY, S.F., BANZ, A., *Lastfaktoren für Eigenlast und Auflast zur Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken*, mandat de recherche OFROU 86/94 (rapport final), N°530, Union des professionnels suisses de la route (VSS), Zurich, 1998.

[OFROU, 2001] IMHOF, D., BAILEY, S.F., HIRT, M.A., *Modèle de charge (trafic 40 t) pour l'évaluation des ponts-routes à deux voies avec trafic bidirectionnel*, mandat de recherche OFROU 81/99, N°556, Union des professionnels suisses de la route (VSS), Zurich, 2001.

[OFROU, 2004.1] LUDESCHER, H., BRÜHWILER, E., *Vergrösserungsfaktoren für die Wirkung von Strassenverkehr auf bestehende Brücken*, mandat de recherche OFROU 89/98, N°571, Union des professionnels suisses de la route (VSS), Zurich, 2004.

[OFROU, 2004.2] OFROU, *Réseau suisse des routes nationales, Trafic journalier moyen (TJM) 2003 et évolution du trafic des véhicules à moteur entre 2002/2003*, Office fédéral des routes (OFROU), 2004.

[OFROU, 2004.3] SIEGRIST, R., RUBIN, M., *Rapport annuel sur les embouteillages en 2003 – Embouteillages sur les routes nationales*, Office fédéral des routes (OFROU), 2004.

[OFROU, 2005] OFROU, *Comptages automatiques de la circulation routière, Emplacement des postes de comptage, état au 1.1.2005*, Office fédéral des routes (OFROU), 2005.

[OFROU – VSS, 1999] Annexe SN 640 885c, *Chantiers sur autoroutes et semi-autoroutes*, Office fédéral des routes (OFROU) et Union des professionnels suisses de la route (VSS), 1999.

[SIA 260, 2003] SIA 260, *Base pour l'élaboration des projets de structures porteuses,* Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich, 2003.

[SIA 261, 2003] SIA 261, *Action sur les structures porteuses,* Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich, 2003.

[SIA 462, 1994] SIA 462, *Évaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants,* Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich, 1994.

[Rapp Trans AG, 2003] FLEBER SANCHEZ, D., RUESCH, M., *Entwicklungsindizes des schweizerischen Strassenverkehrs, Fortschreibung 1990-2002*, Rapp Trans SA, 2003.

[Sommer, 1997] SOMMER, H., NEUENSCHWANDER, R., *Auswirkungen der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) und der Ablösung der Gewichtslimite im Strassengüterverkehr,* Ecoplan Wirtschafts- und Umweltstudien, Berne, 1997.

Site Internet : http://www.verkehrsdaten.ch

ANNEXES

A.1 METHODE DE TRI DES VEHICULES PAR CLASSE

La méthode de tri des données de pesage en marche tient compte dans un premier temps du nombre d'essieux selon le Tableau A.1, puis de critères sur la distance entre les essieux afin de différencier les classes de véhicules ayant le même nombre d'essieux.

Tableau A.1 – *Classement des véhicules par nombre d'essieux*

Essieux	Classes de véhicules
2	
3	
4	
5	
6	

La Figure A.1 montre un exemple de critère permettant un premier tri des véhicules à 4 essieux. L'ajout d'autres critères sur les autres essieux assure ensuite une classification plus fine.

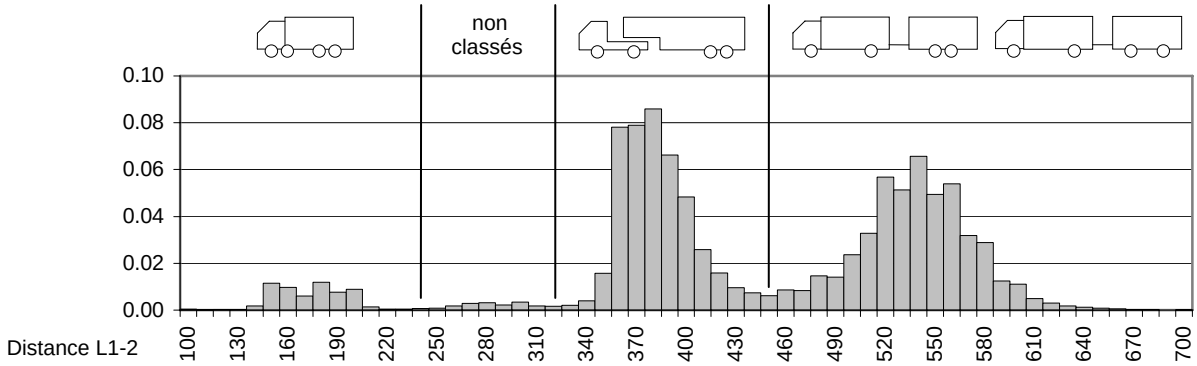


Figure A.1 – *Statistique de la distance entre les essieux 1 et 2 des véhicules à 4 essieux*

La liste complète des critères admis pour la classification des véhicules dans cette étude est présentée dans le Tableau A.2. Notons qu'un critère sur le poids a été ajouté de façon à éliminer les véhicules ayant un poids proche de la limite des 3.5t.

A.2 METHODE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU TRAFIC

La part du trafic léger est obtenue en comparant le nombre total de véhicules ayant franchi la station de pesage pendant la période de mesure considérée avec le nombre de poids lourds mesurés. Pour tenir compte des périodes où le trafic lourd est quasi inexistant (nuit et jour fériés), un facteur de réduction $p_{pl} = 2/3$ du nombre total de véhicules est considéré. Voici un exemple pour le trafic de Mattstetten 2003 :

$p(< 3.5t) = 1 - N_{lourd} / (N_{total} \cdot p_{pl}) = 1 - 2'289'927 / (25'043'200 \cdot 2/3) = 86\%$

N_{lourd} : nombre de véhicules >3.5t pesés pendant la période considérée
N_{total} : nombre total de véhicules passé pendant la période considérée, < 3.5t compris
p_{pl} : facteur de réduction tenant compte de la part du trafic circulant sans trafic lourd

Tableau A.2 – *Critères de tri des véhicules par classe*

11

Nombre d'essieux	N = 2	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60	< L1-2 < 7.20
Poids total [kN]	60	< Ptot < 300

12

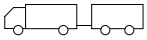
Nombre d'essieux	N = 3	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60	< L1-2 < 7.20
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	0.60	< L2-3 < 2.40
Poids total [kN]	70	< Ptot < 450

22

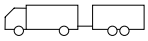
Nombre d'essieux	N = 4	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	0.60	< L1-2 < 2.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	2.00	< L2-3 < 6.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	0.60	< L3-4 < 2.40
Poids total [kN]	80	< Ptot < 600

111

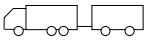
Nombre d'essieux	N = 3	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.20	< L1-2 < 4.50
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60	< L2-3 < 8.60
Poids total [kN]	70	< Ptot < 450

1111r 

Nombre d'essieux	N = 4	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60	< L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60	< L2-3 < 7.20
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60	< L3-4 < 6.40
Poids total [kN]	80	< Ptot < 600

112r 

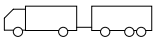
Nombre d'essieux	N = 4	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	4.50	< L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60	< L2-3 < 8.60
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	0.60	< L3-4 < 2.40
Poids total [kN]	80	< Ptot < 600

1211r 

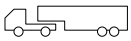
Nombre d'essieux	N = 5	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60	< L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	0.60	< L2-3 < 2.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60	< L3-4 < 6.40
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	3.60	< L4-5 < 6.40
Poids total [kN]	90	< Ptot < 750

122

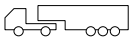
Nombre d'essieux	N = 5	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60	< L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	0.60	< L2-3 < 2.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60	< L3-4 < 8.60
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	0.60	< L4-5 < 2.40
Poids total [kN]	90	< Ptot < 750

1112r 

Nombre d'essieux	N = 5	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.60	< L1-2 < 6.40
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60	< L2-3 < 6.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60	< L3-4 < 6.40
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	0.60	< L4-5 < 2.40
Poids total [kN]	90	< Ptot < 750

112a 

Nombre d'essieux	N = 4	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.20	< L1-2 < 4.50
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60	< L2-3 < 8.60
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	0.60	< L3-4 < 2.40
Poids total [kN]	80	< Ptot < 600

113a 

Nombre d'essieux	N = 5	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	3.20	< L1-2 < 4.50
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	3.60	< L2-3 < 8.60
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	0.60	< L3-4 < 2.40
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	0.60	< L4-5 < 2.40
Poids total [kN]	90	< Ptot < 750

123a

Nombre d'essieux	N = 6	
Distance entre essieux 1 et 2 [m]	2.40	< L1-2 < 3.60
Distance entre essieux 2 et 3 [m]	0.60	< L2-3 < 2.40
Distance entre essieux 3 et 4 [m]	3.60	< L3-4 < 8.60
Distance entre essieux 4 et 5 [m]	0.60	< L4-5 < 2.40
Distance entre essieux 5 et 6 [m]	0.60	< L5-6 < 2.40
Poids total [kN]	100	< Ptot < 900

Les proportions des différents types de véhicules lourds sont obtenues grâce au tri des données de pesage en marche. Les véhicules pesés n'entrant dans aucune des classes définies sont remplacés proportionnellement

par des véhicules d'autres classes ayant le même nombre d'essieux. Les véhicules de 7 essieux et plus sont quand à eux remplacés proportionnellement par des véhicules de 2 à 6 essieux. La Figure A.2 montre le processus complet pour obtenir la composition du trafic de Mattstetten admise dans les simulations.

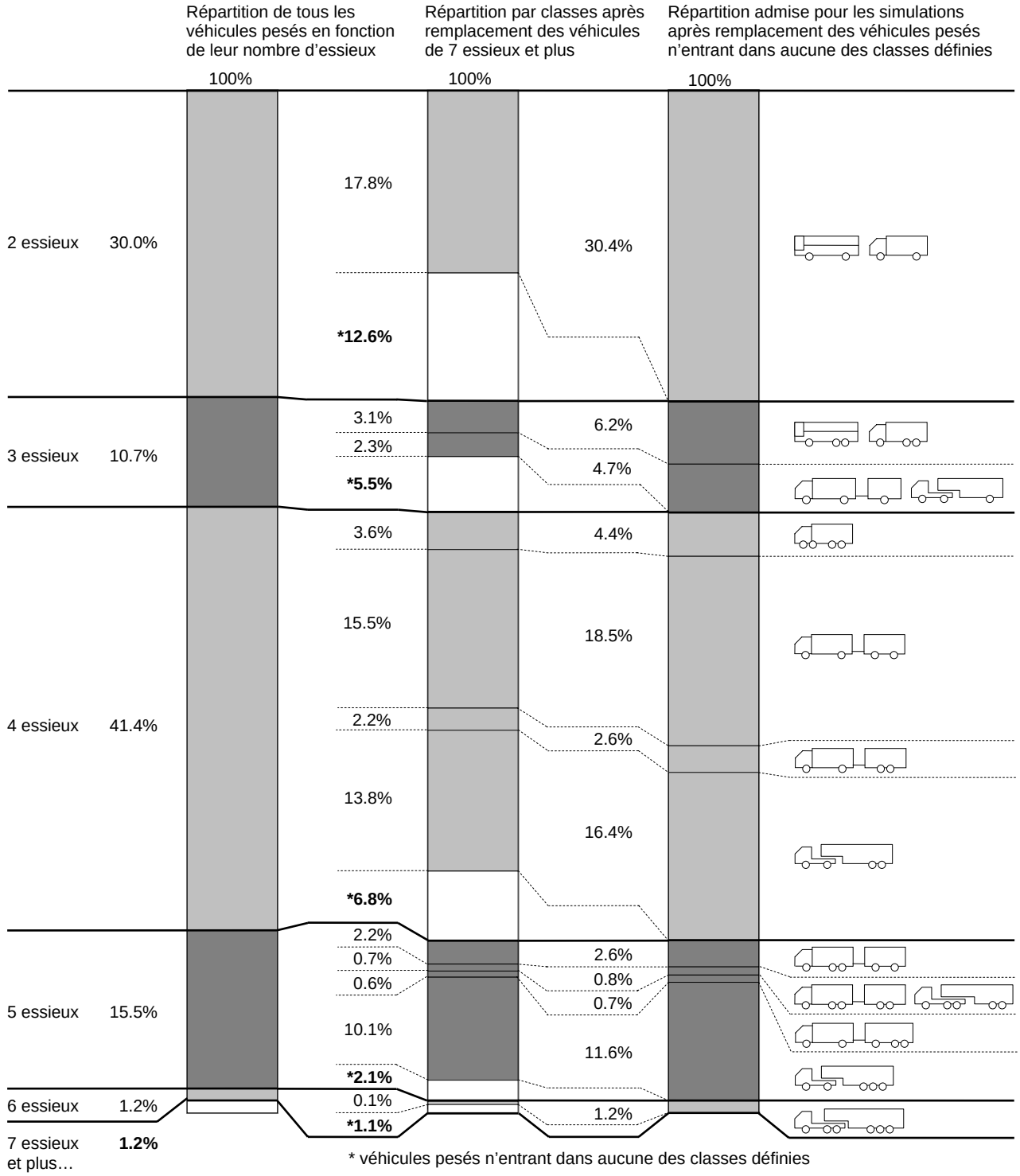


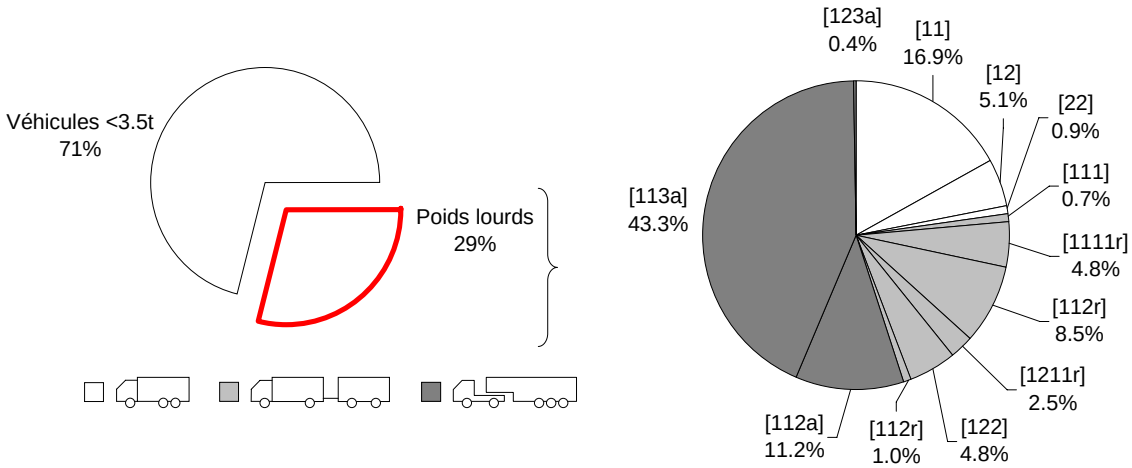
Figure A.2 – *Calcul de la composition du trafic à simuler, Mattstetten 2003*

Notons que le critère principal de refus est le critère sur le poids minimal des véhicules entrant dans les classes, ce qui explique la relativement grande part de véhicules non classés. La méthode de redistribution permet donc d'obtenir un trafic quelque peu conservateur.

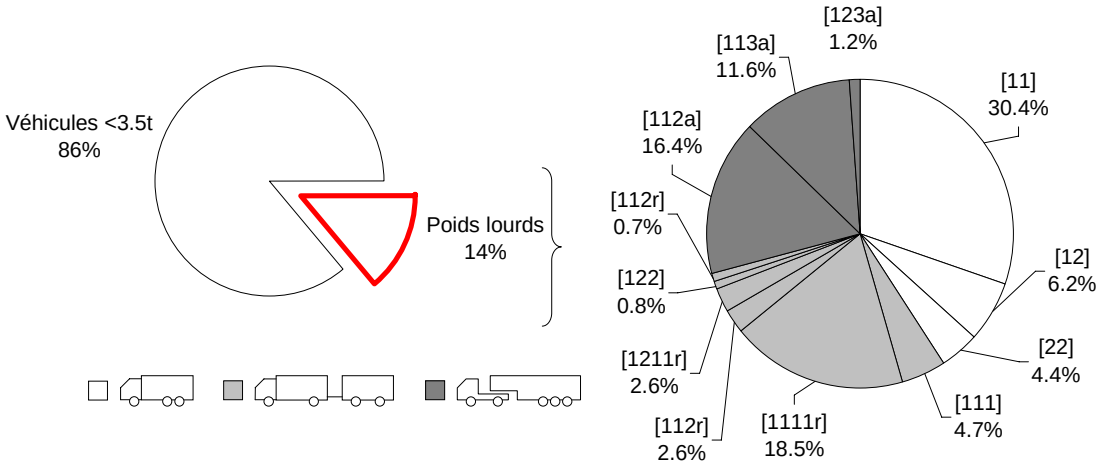
A.3 COMPOSITION DU TRAFIC

Les graphiques de cette section montrent les compositions des différents trafics telles qu'elles ont été admises pour les simulations. Ces compositions se basent sur l'analyse des données des stations de pesages en marche.

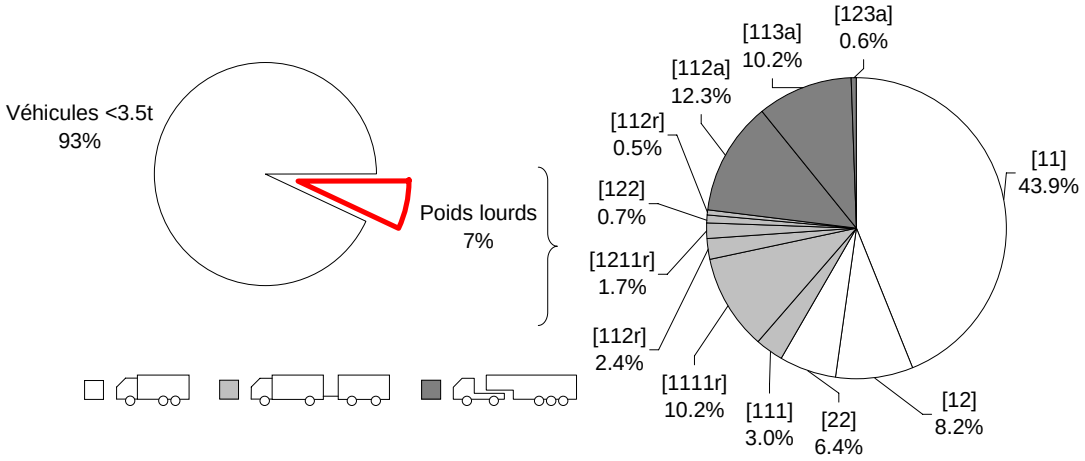
Göschenen 2003



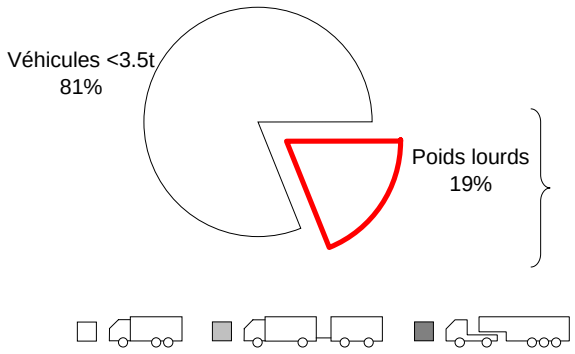
Mattstetten 2003

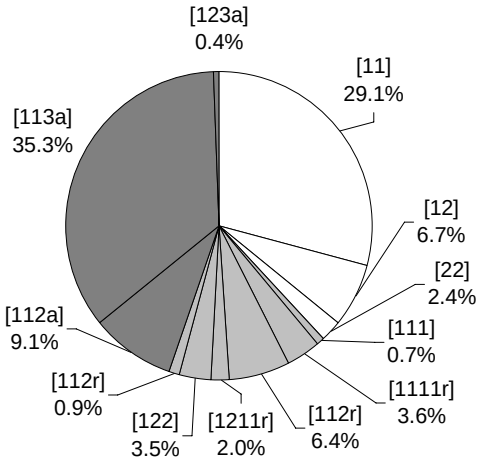


Denges 2003

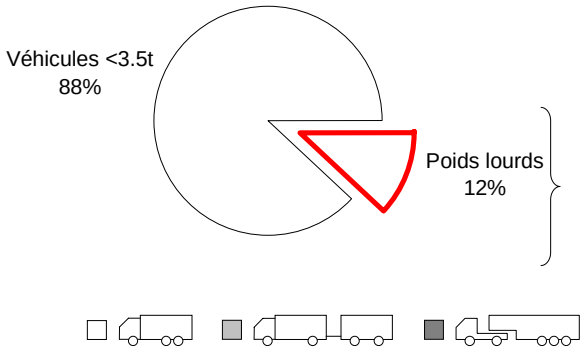


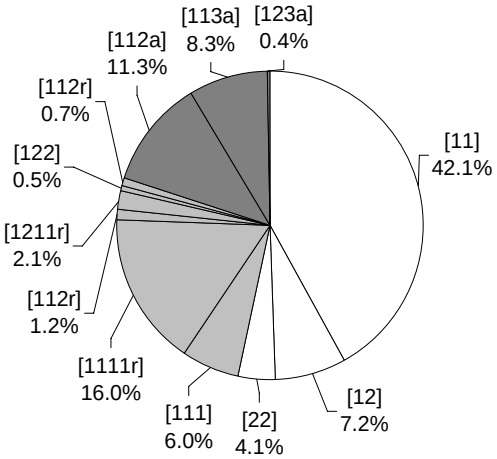
Ceneri 2003



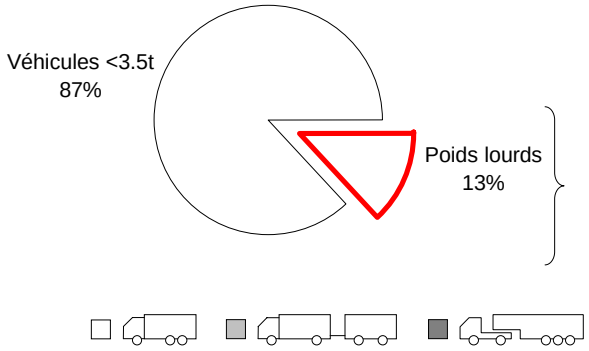


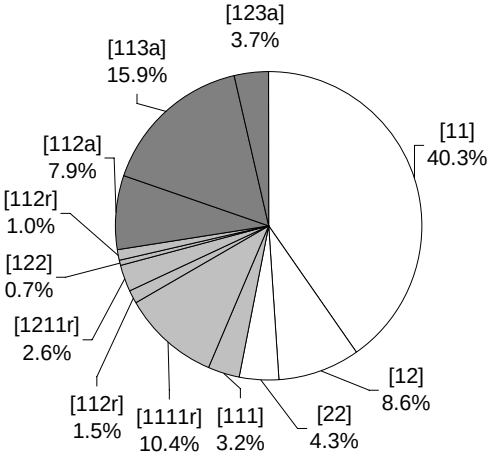
Oberbüren 2003





Trübbach 2003

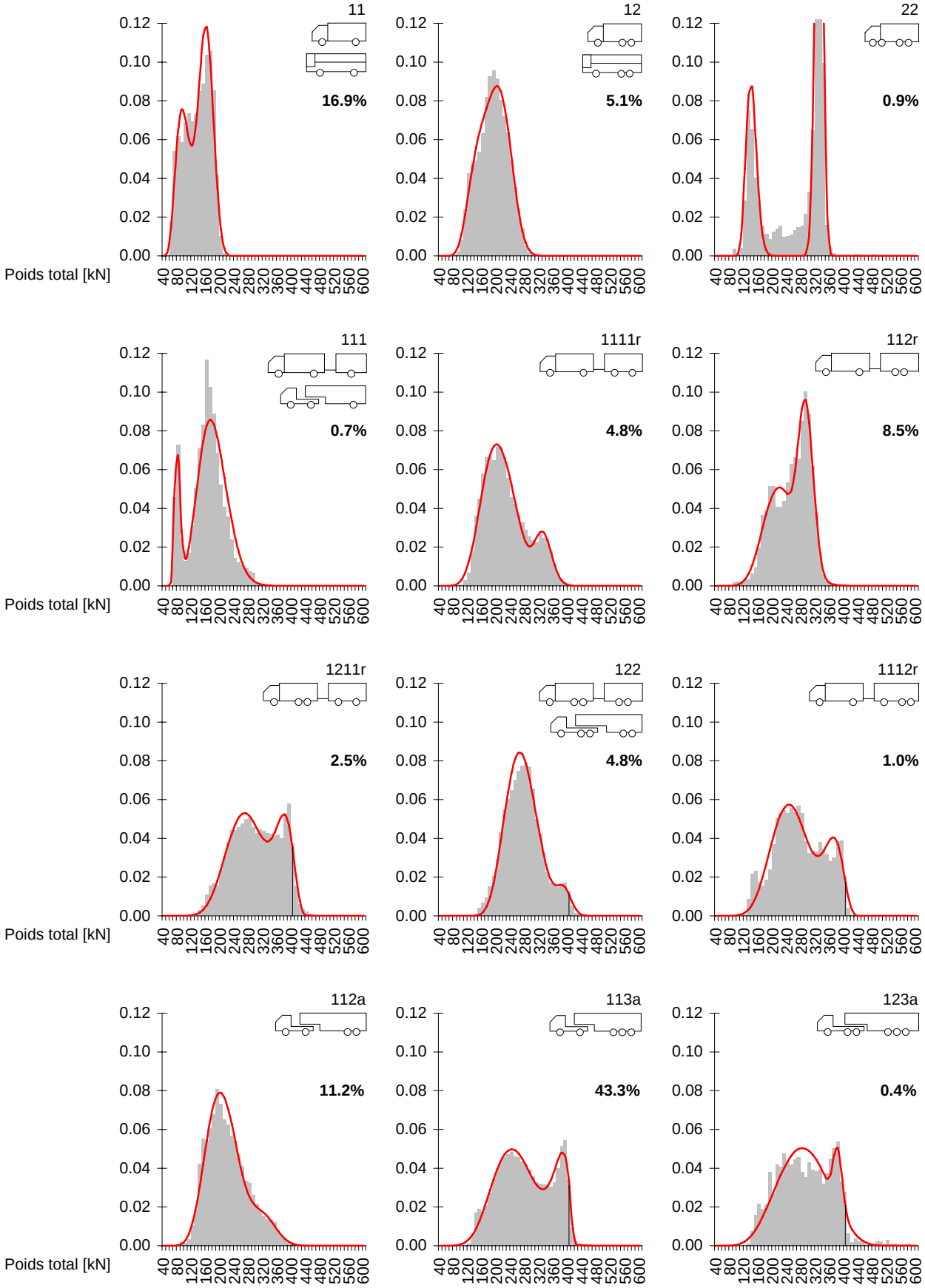




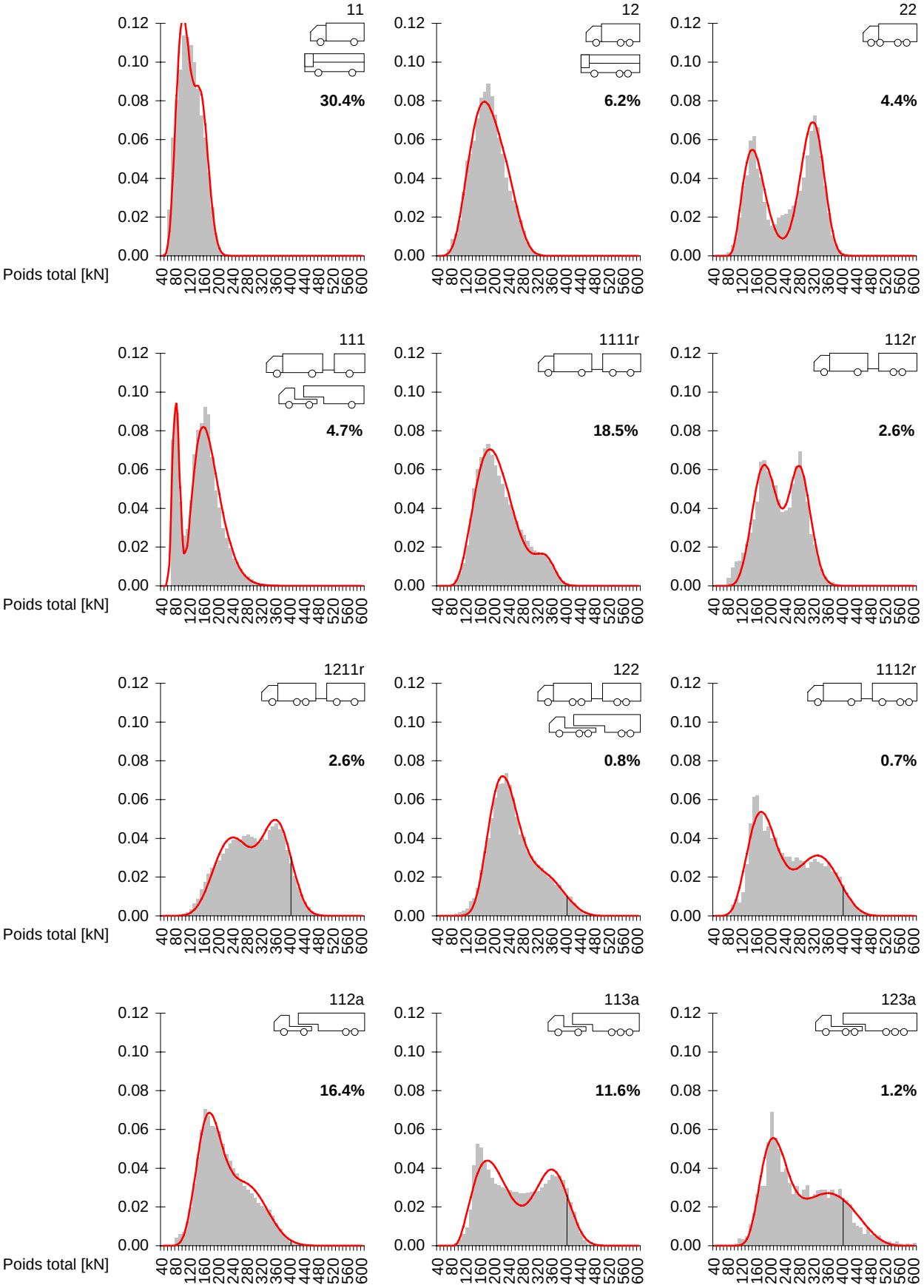
A.4 DISTRIBUTION DES POIDS TOTAUX

Cette section présente la distribution des poids totaux de tous les types de véhicule admis dans les simulations. Les histogrammes représentent les mesures, et les courbes représentent les distributions béta bimodales introduites dans le logiciel de simulation.

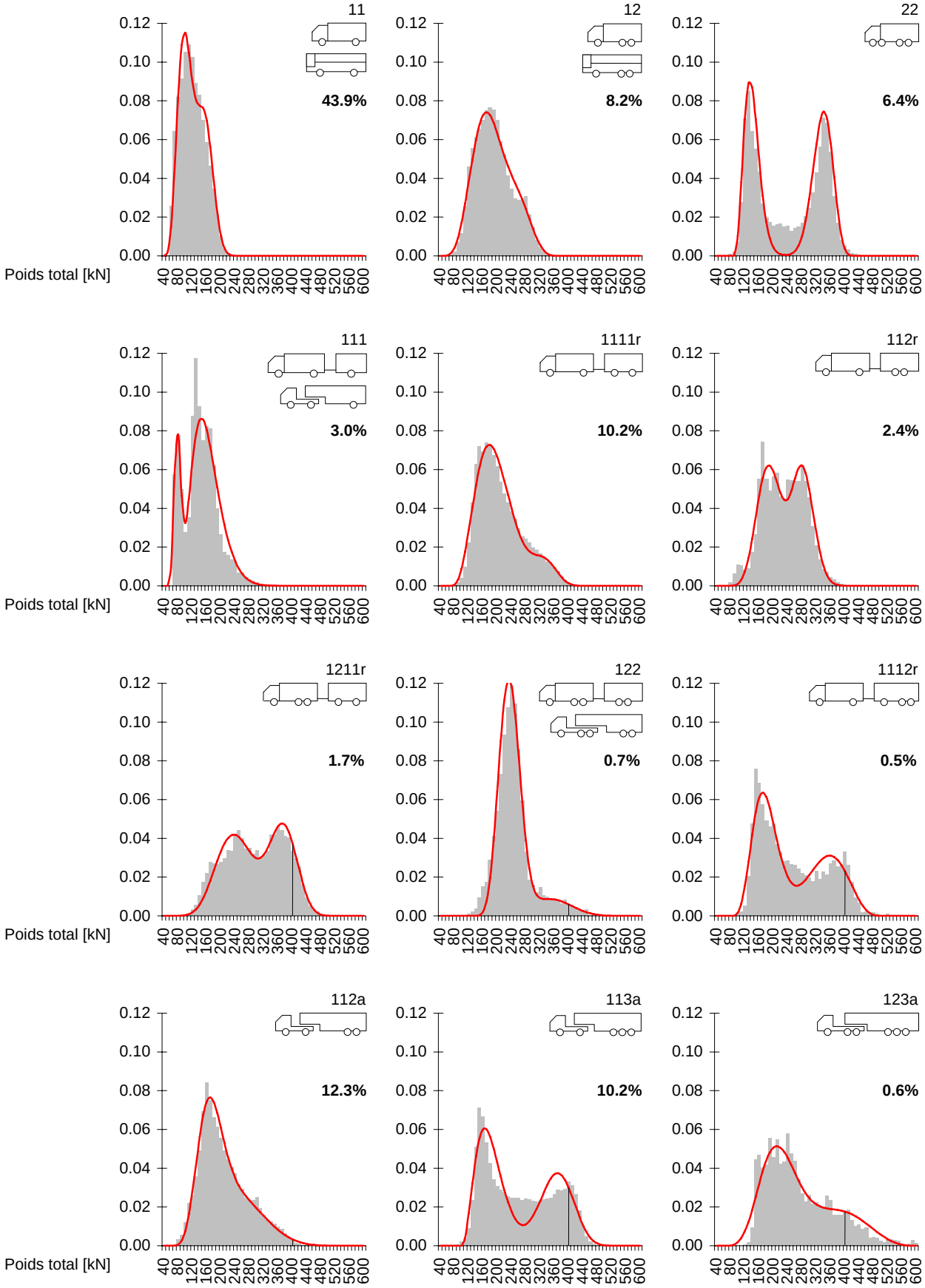
Göschenen 2003



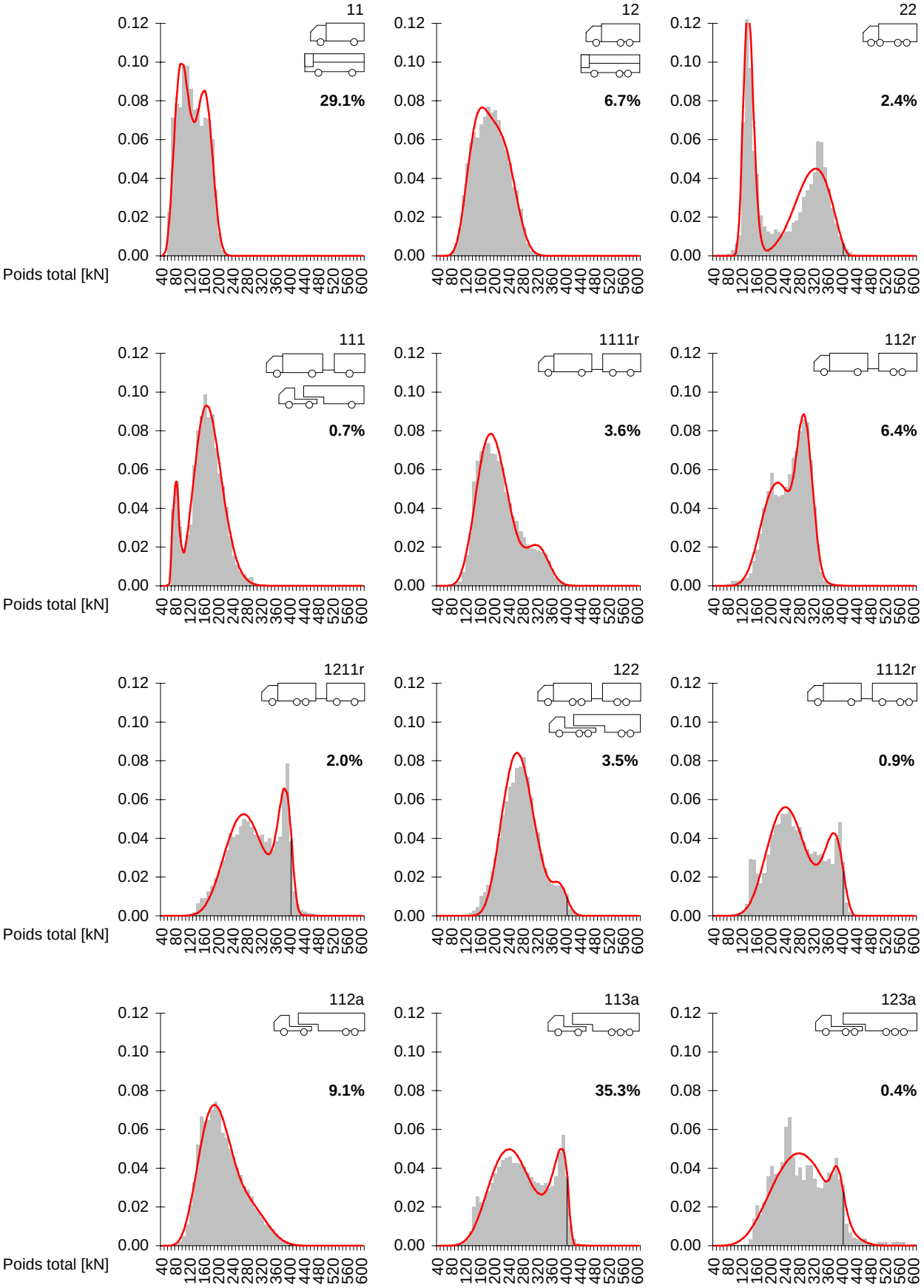
Mattstetten 2003



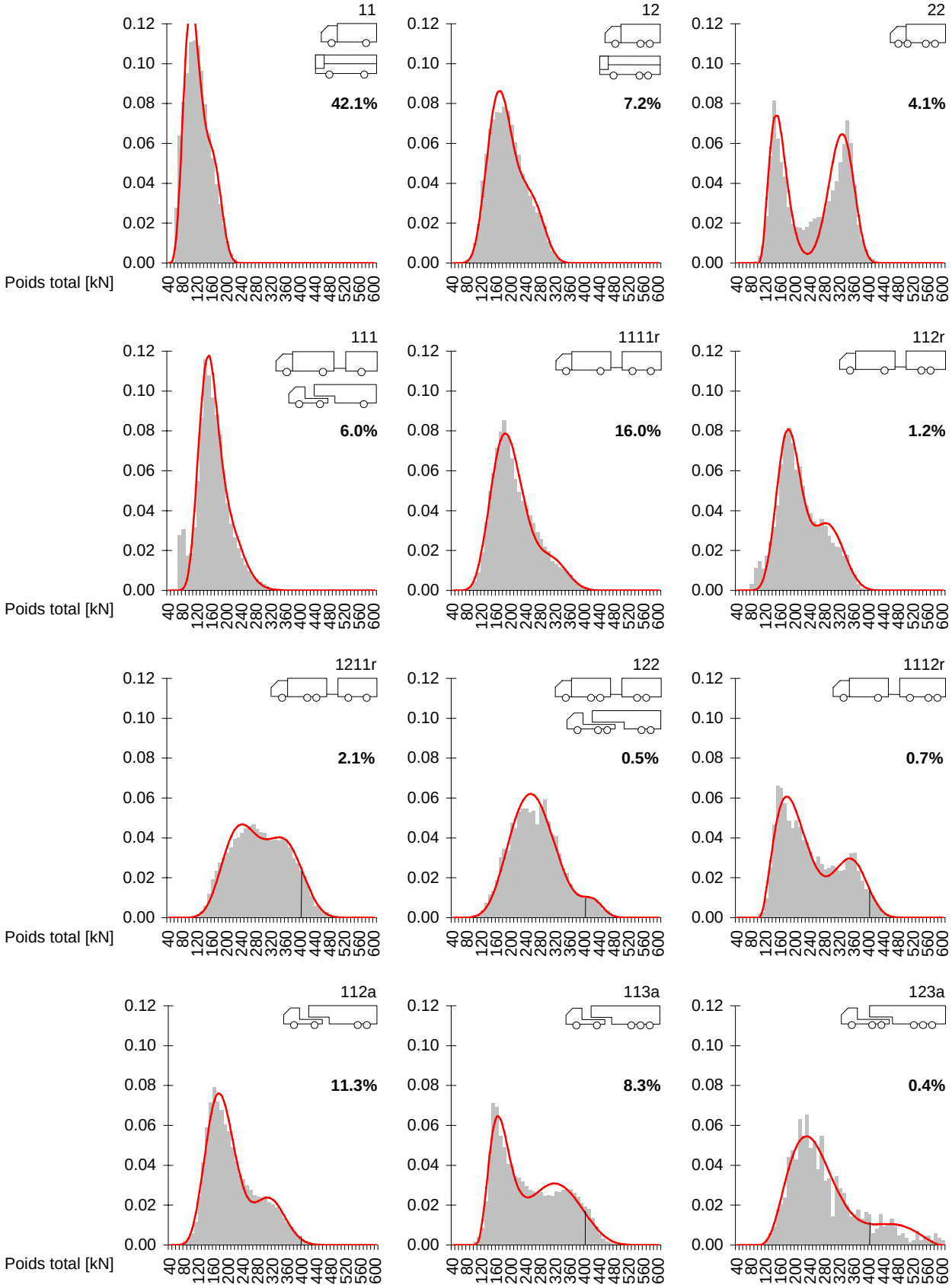
Denges 2003


11
43.9%
12
8.2%
22
6.4%
111
3.0%
1111r
10.2%
112r
2.4%
1211r
1.7%
122
0.7%
1112r
0.5%
112a
12.3%
113a
10.2%
123a
0.6%
Poids total [kN]

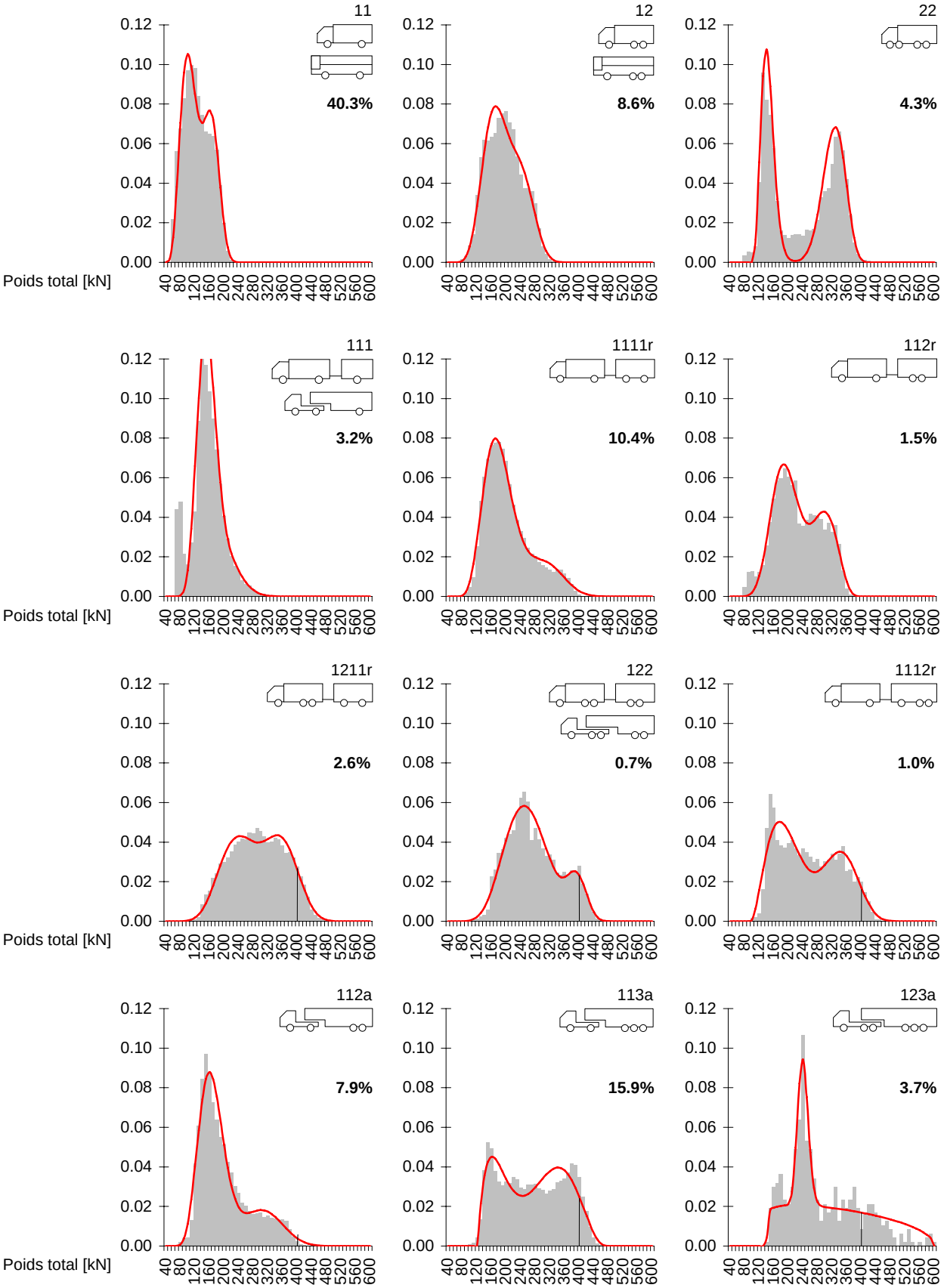
Ceneri 2003


11
29.1%
12
6.7%
22
2.4%
111
0.7%
1111r
3.6%
112r
6.4%
1211r
2.0%
122
3.5%
1112r
0.9%
112a
9.1%
113a
35.3%
123a
0.4%
Poids total [kN]

Oberbüren 2003



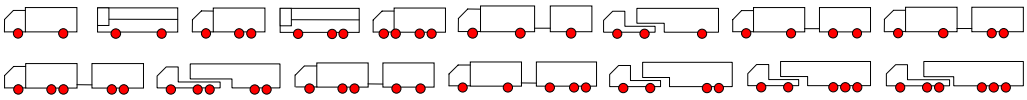
Trübbach 2003

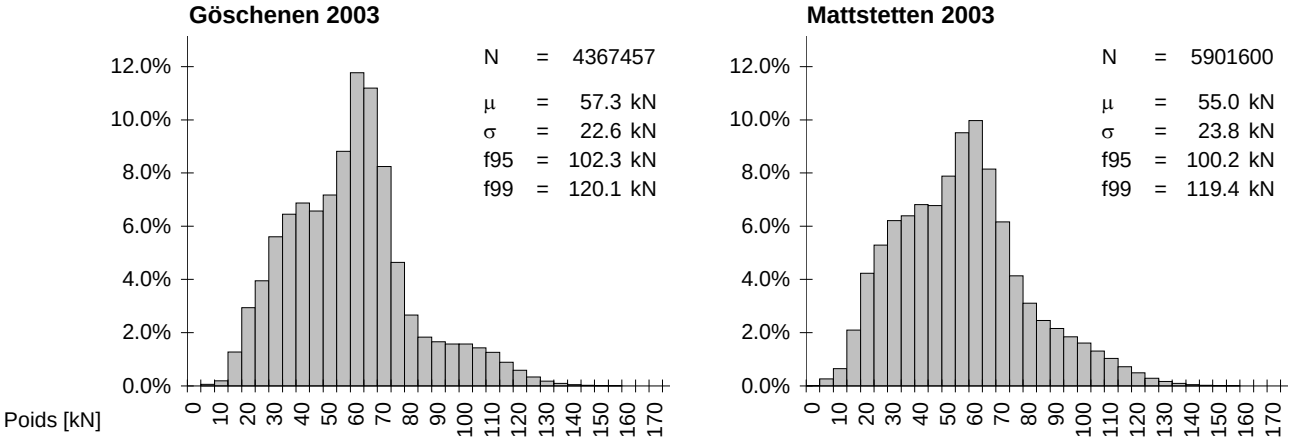


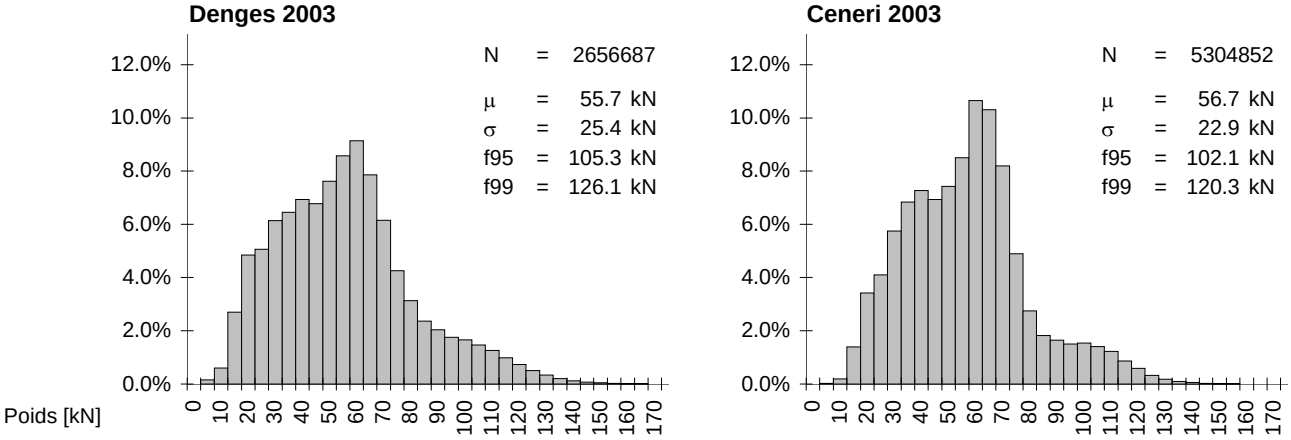
A.5 POIDS DES ESSIEUX

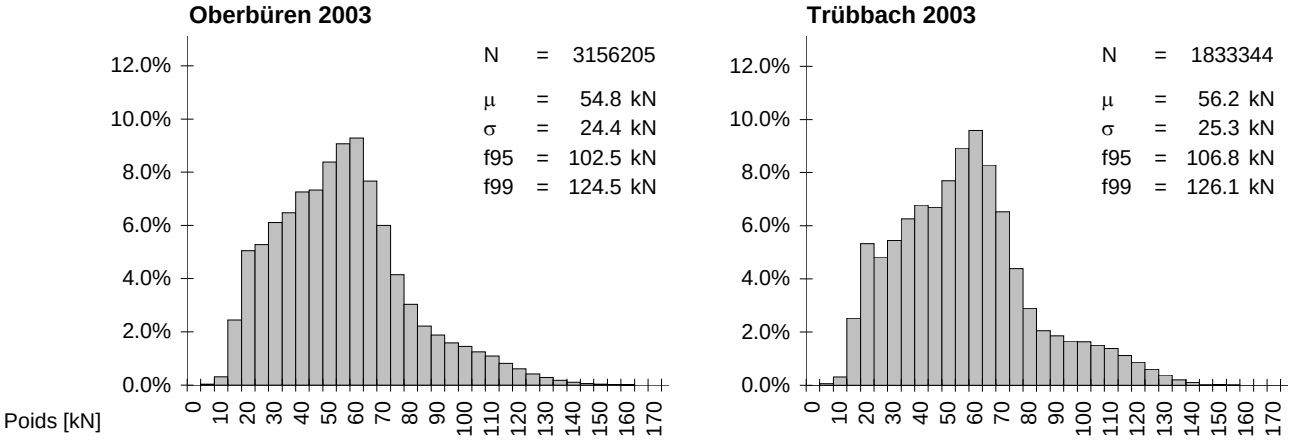
Cette section contient les statistiques des poids des essieux obtenues par l'analyse des données de pesage en marche. Notons que seuls les essieux des véhicules classés sont considérés. La première partie montre les statistiques de tous les essieux, et les trois parties suivantes montrent respectivement les statistiques des essieux simples, tandem et tridem.

Tous les essieux des véhicules classés

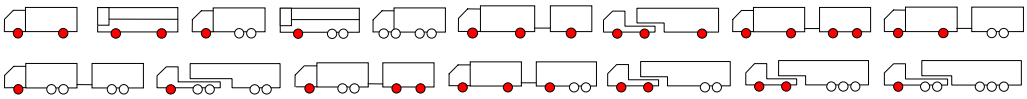


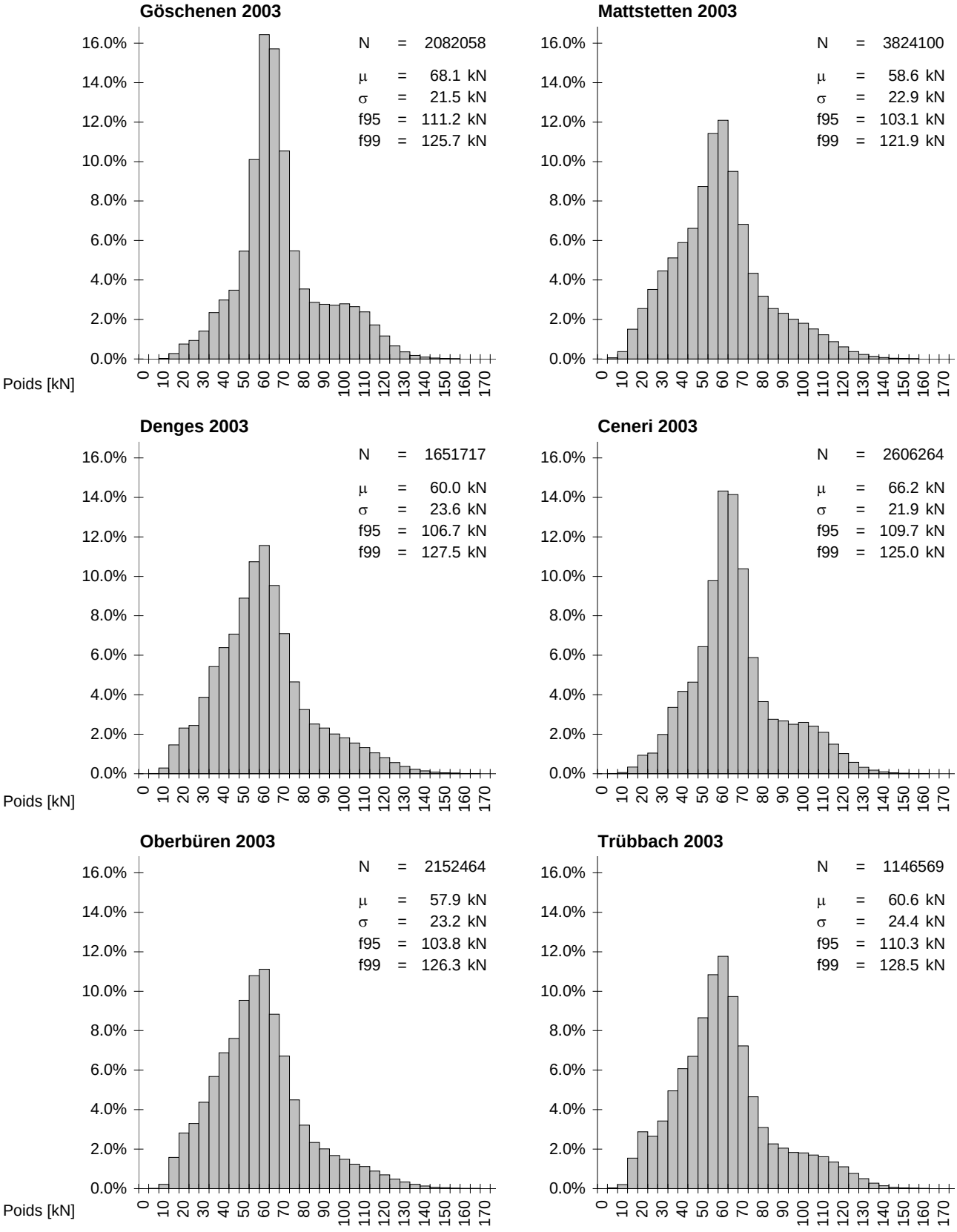




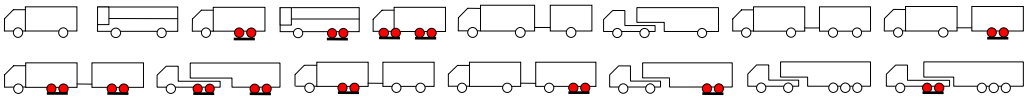


Essieux simples des véhicules classés

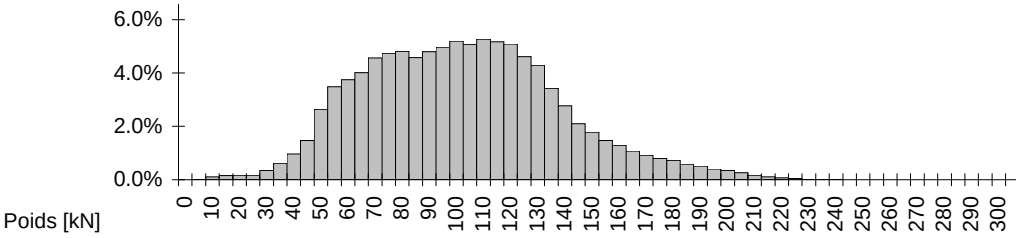




Essieux tandem des véhicules classés



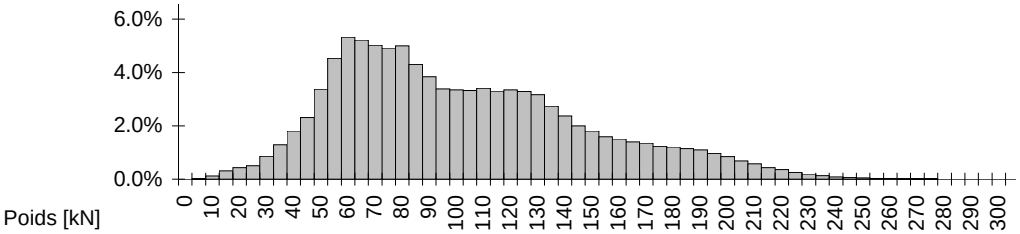
Göschenen 2003



N = 404617

μ = 102.5 kN
σ = 36.2 kN
f95 = 167.7 kN
f99 = 198.6 kN

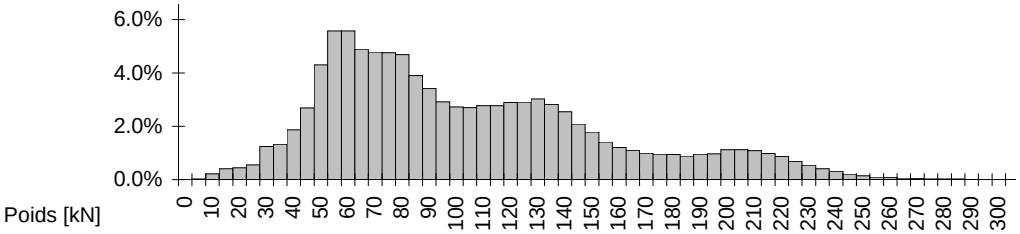
Mattstetten 2003



N = 692979

μ = 102.4 kN
σ = 46.1 kN
f95 = 191.4 kN
f99 = 221.1 kN

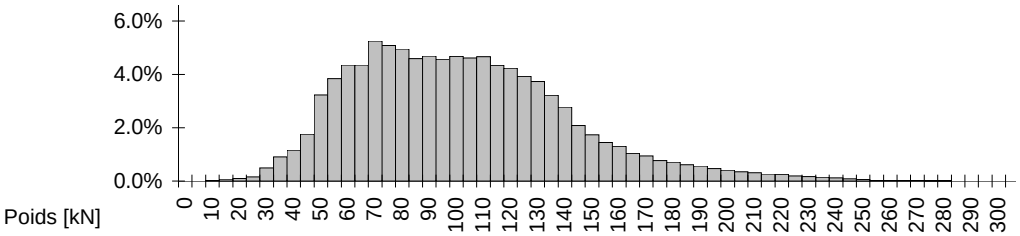
Denges 2003



N = 342633

μ = 104.4 kN
σ = 52.4 kN
f95 = 210.7 kN
f99 = 239.4 kN

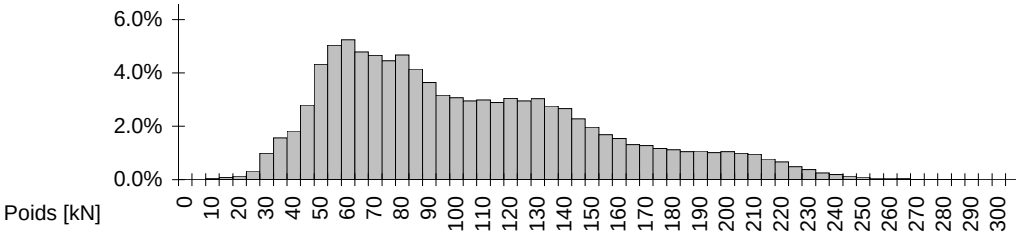
Ceneri 2003



N = 511034

μ = 102.2 kN
σ = 40.1 kN
f95 = 176.9 kN
f99 = 221.3 kN

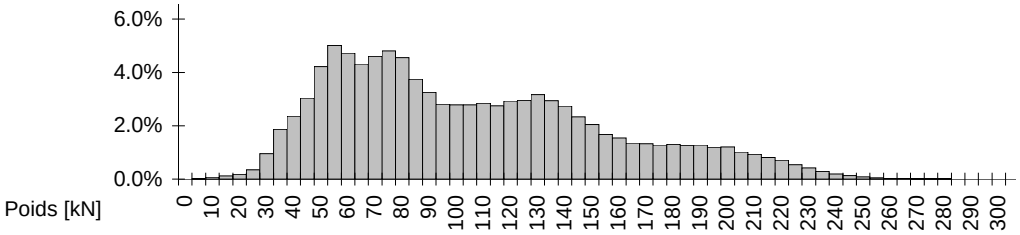
Oberbüren 2003



N = 347939

μ = 105.1 kN
σ = 49.6 kN
f95 = 203.3 kN
f99 = 231.9 kN

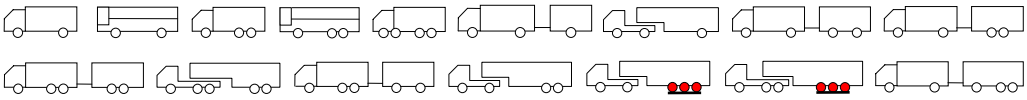
Trübbach 2003



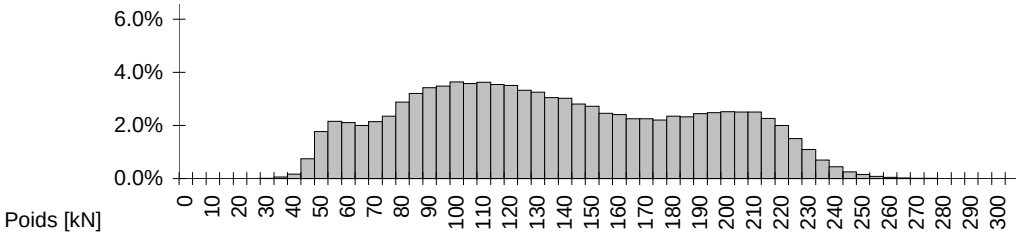
N = 199524

μ = 106.0 kN
σ = 50.7 kN
f95 = 203.9 kN
f99 = 230.9 kN

Essieux tridem des véhicules classés

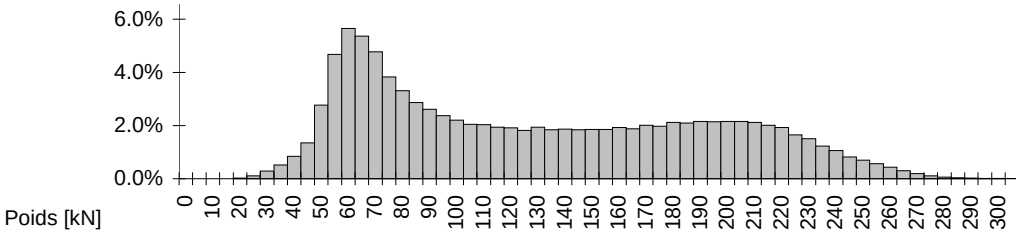


Göschenen 2003



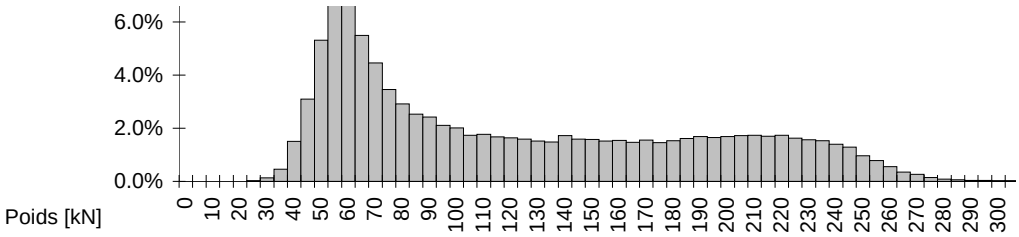
N = 492055
μ = 136.4 kN
σ = 51.3 kN
f95 = 221.0 kN
f99 = 238.5 kN

Mattstetten 2003



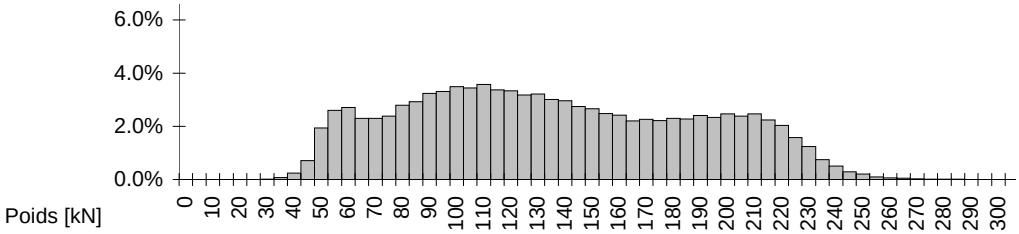
N = 230514
μ = 129.3 kN
σ = 62.7 kN
f95 = 234.9 kN
f99 = 260.0 kN

Denges 2003



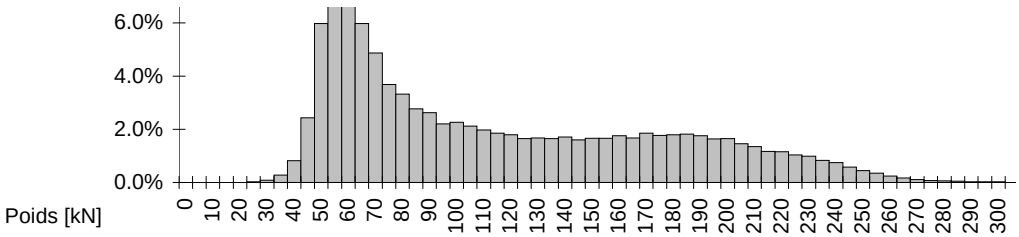
N = 106568
μ = 122.6 kN
σ = 66.7 kN
f95 = 241.3 kN
f99 = 263.8 kN

Ceneri 2003



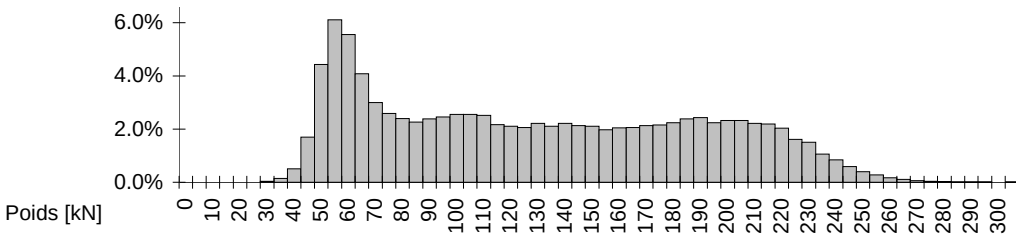
N = 558840
μ = 135.8 kN
σ = 52.5 kN
f95 = 222.4 kN
f99 = 240.4 kN

Oberbüren 2003



N = 102621
μ = 114.1 kN
σ = 60.1 kN
f95 = 226.4 kN
f99 = 255.2 kN

Trübbach 2003



N = 95909
μ = 129.6 kN
σ = 60.2 kN
f95 = 228.0 kN
f99 = 249.3 kN

A.6 MARGES DU MODELE ACTUALISE

Les graphiques de résultats de cette section représentent les marges restantes entre les efforts obtenus par simulation et les efforts calculés avec le modèle actualisé proposé. La Figure A.3 montre un exemple de résultats avec une légende explicative.

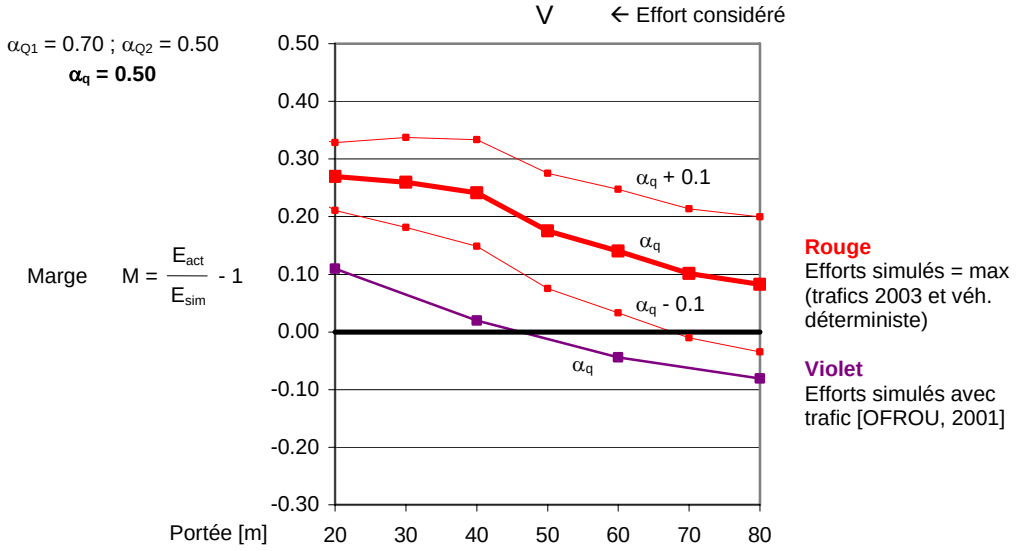
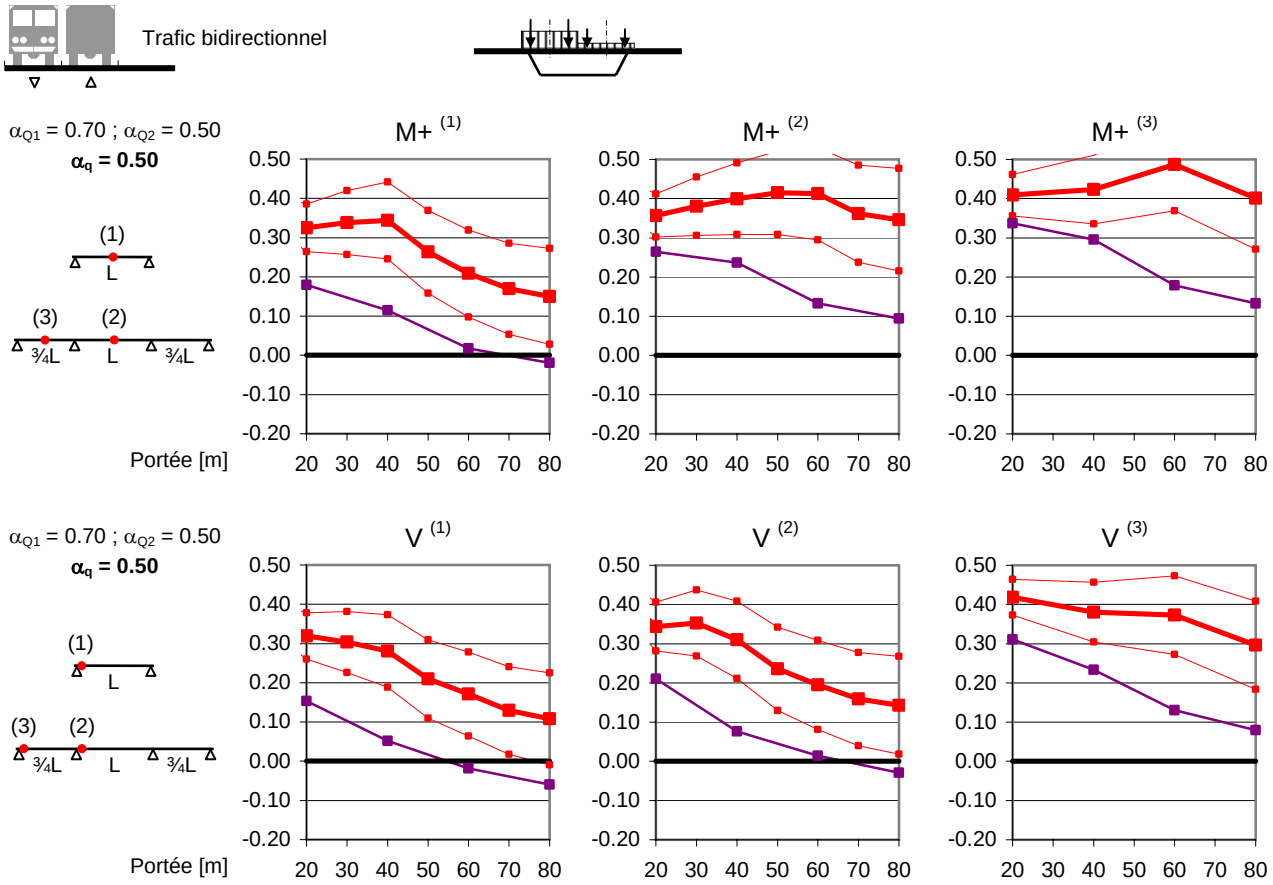


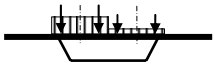
***Figure A.3** – Exemple de graphiques de résultats et légende explicative*

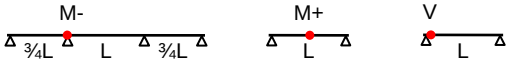
A.6.1 Pont caisson

Comparaison d'efforts



Variantes de trafic

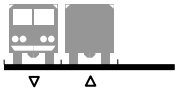




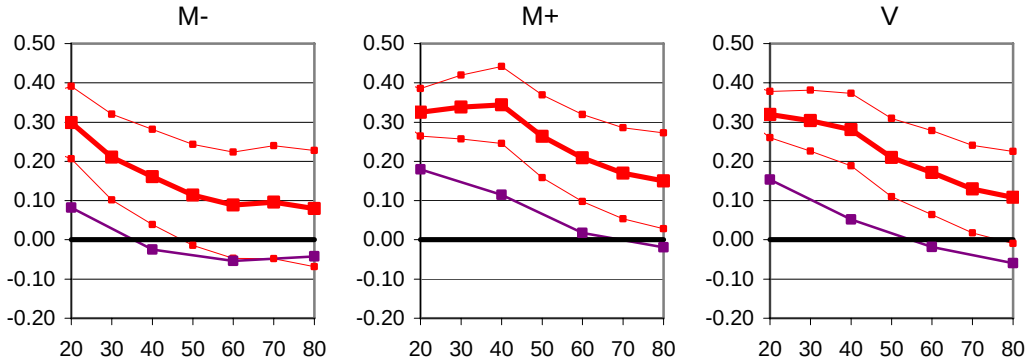
α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

α_q = 0.50

Bidirectionnel



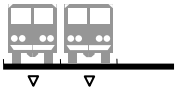
50%-50%



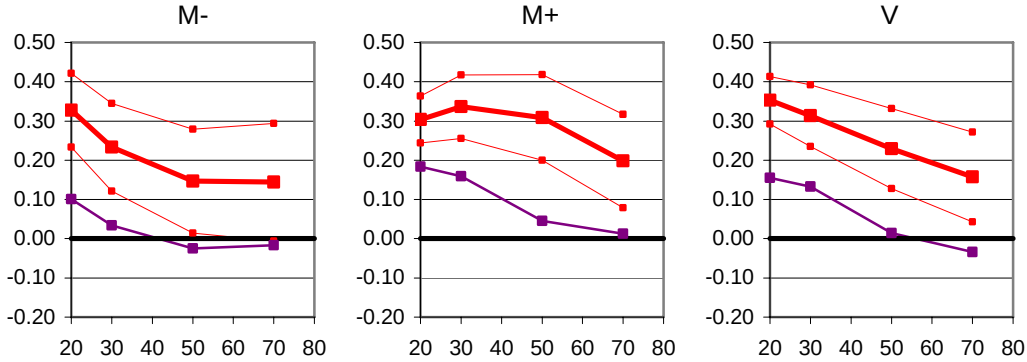
α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

α_q = 0.50

Unidirectionnel



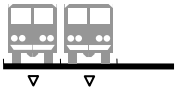
85%-15%



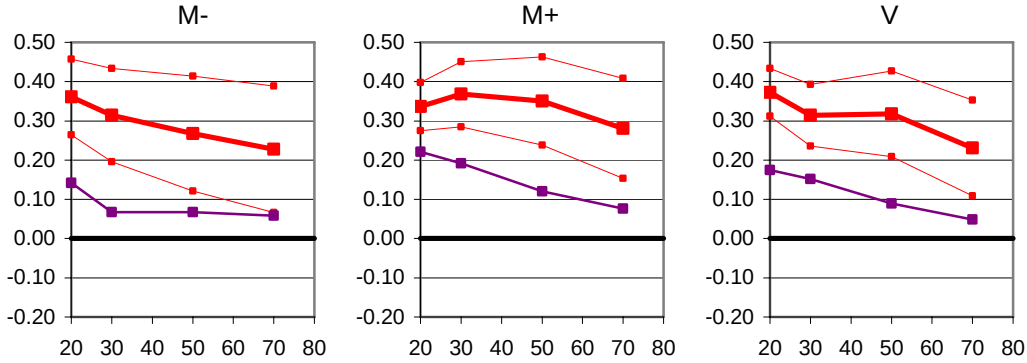
α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

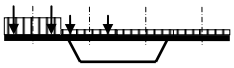
α_q = 0.50

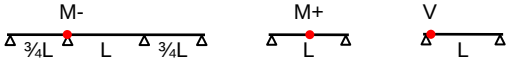
Unidirectionnel



96%-4%



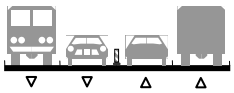




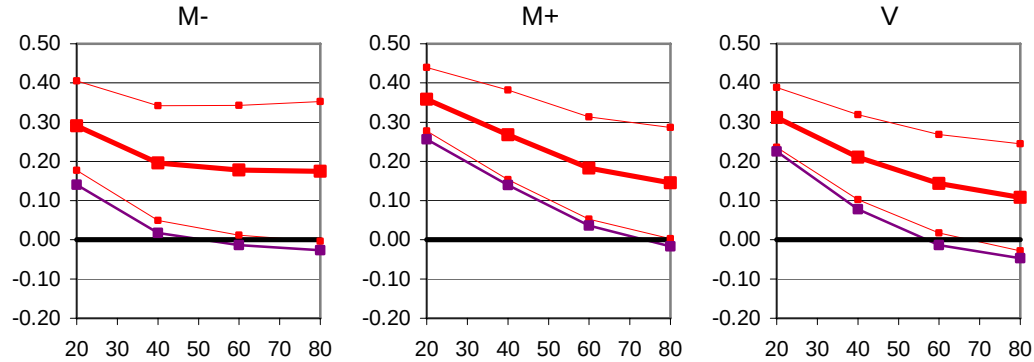
α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

α_q = 0.50

Situation de chantier

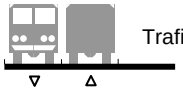


50%-0%-0%-50%

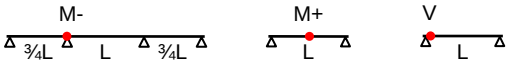


A.6.2 Pont bipoutre

Variantes de pont

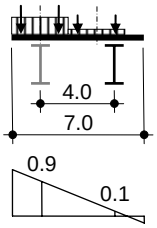


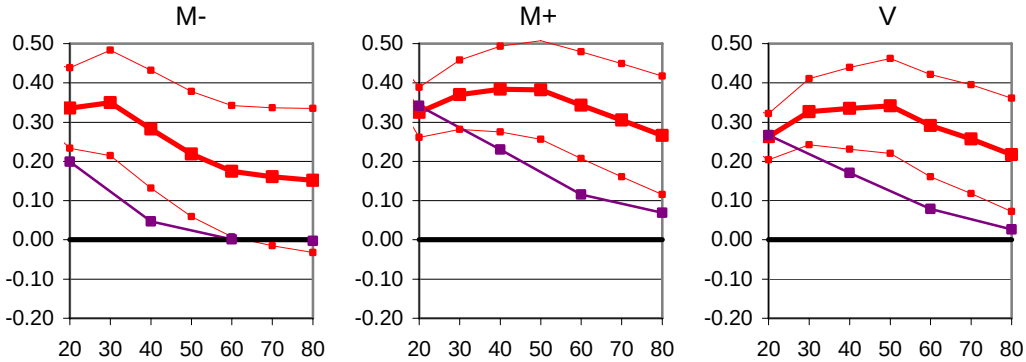
Trafic bidirectionnel



α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

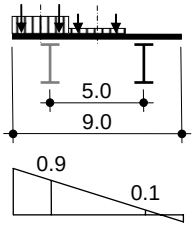
α_q = 0.40

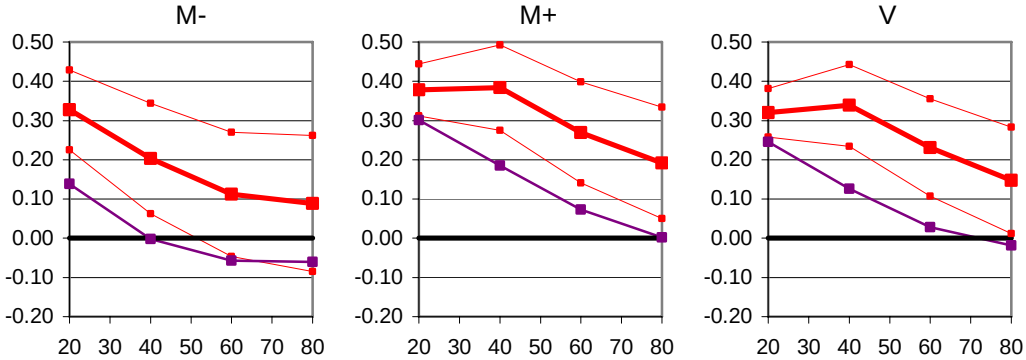




α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

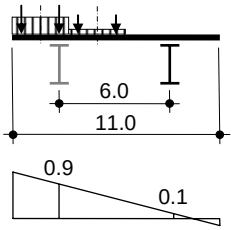
α_q = 0.40

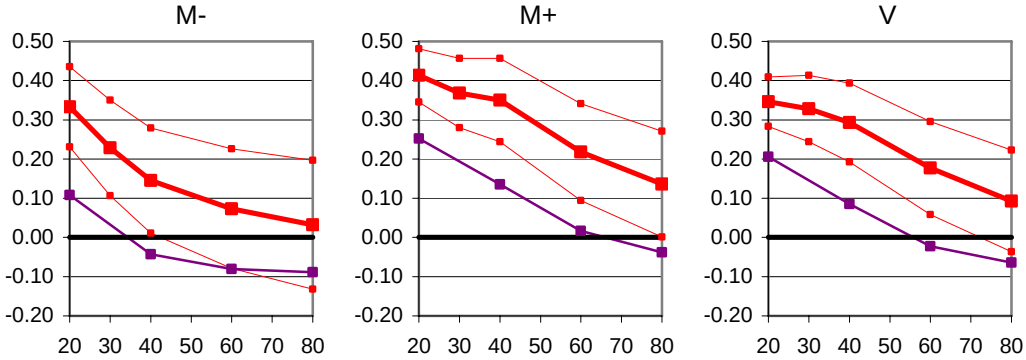




α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

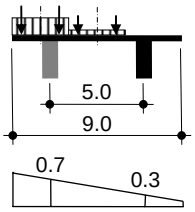
α_q = 0.40

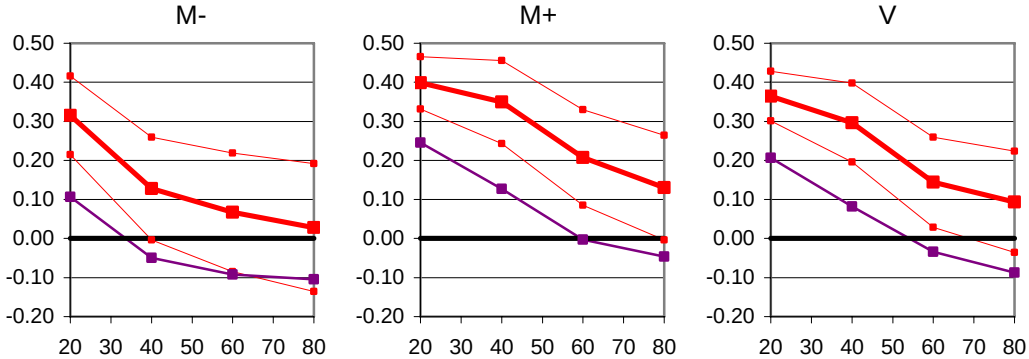




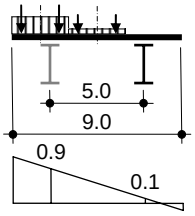
α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

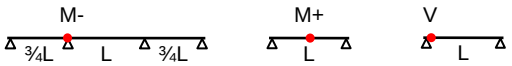
α_q = 0.40





Variantes de trafic

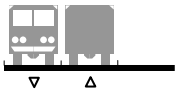




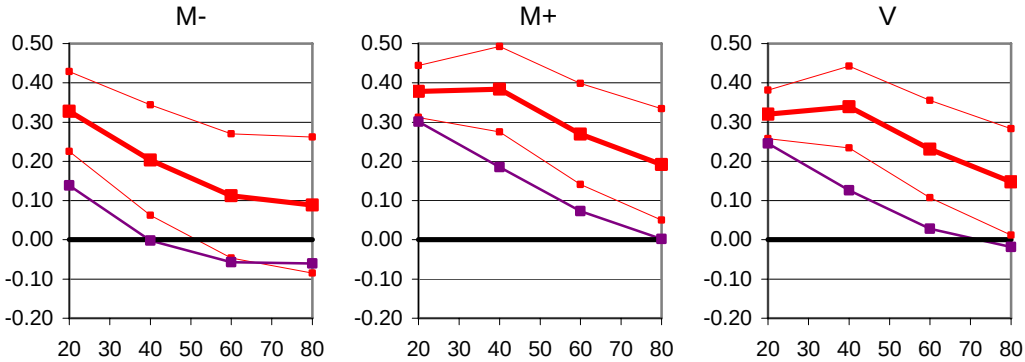
α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

α_q = 0.40

Bidirectionnel



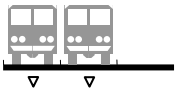
50%-50%



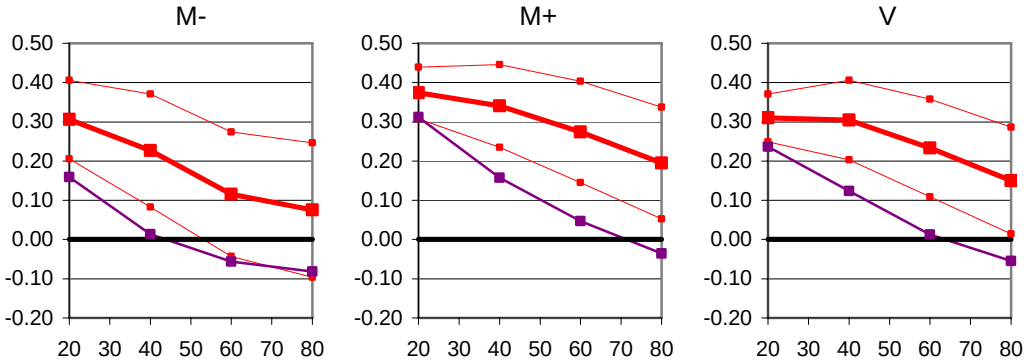
α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

α_q = 0.40

Unidirectionnel



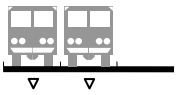
85%-15%



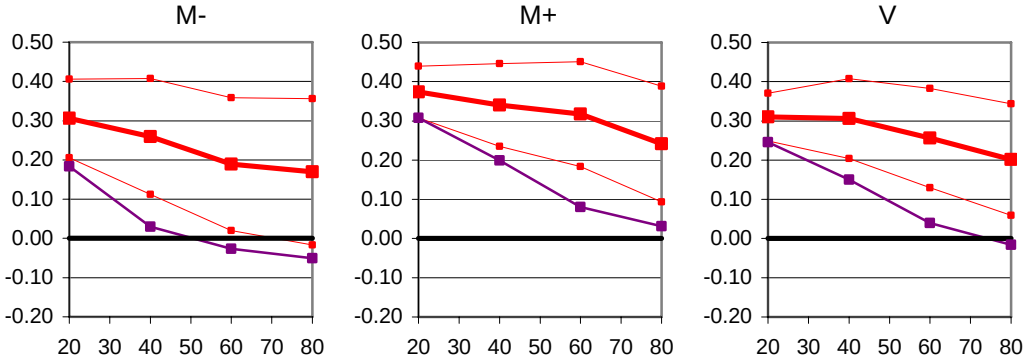
α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

α_q = 0.40

Unidirectionnel



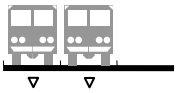
96%-4%



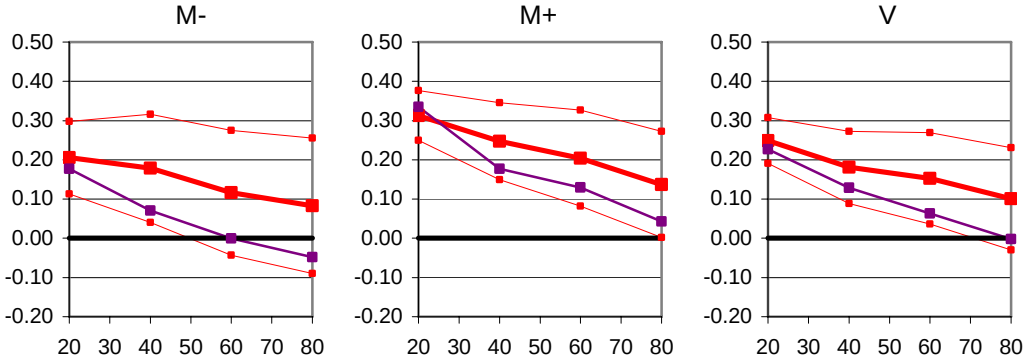
α_{Q1} = 0.70 ; α_{Q2} = 0.50

α_q = 0.40

Unidirectionnel

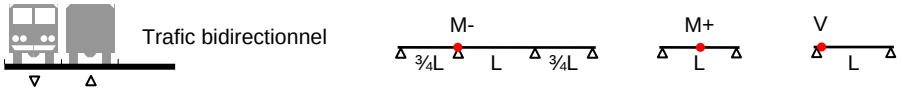


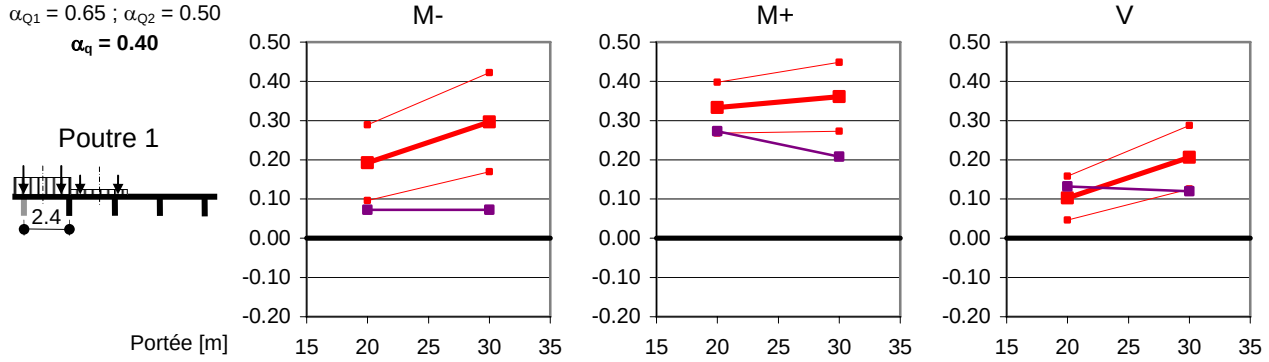
100%-0%

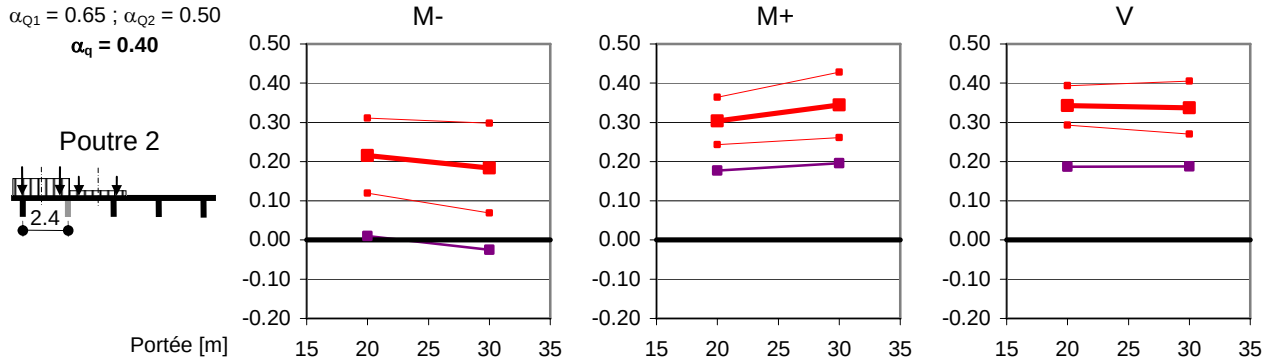


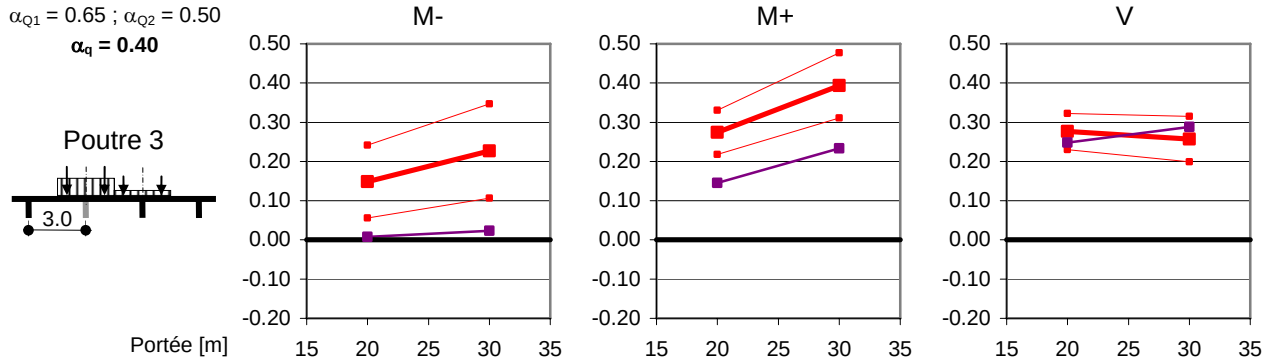
A.6.3 Pont multipoutre

Variantes de poutres



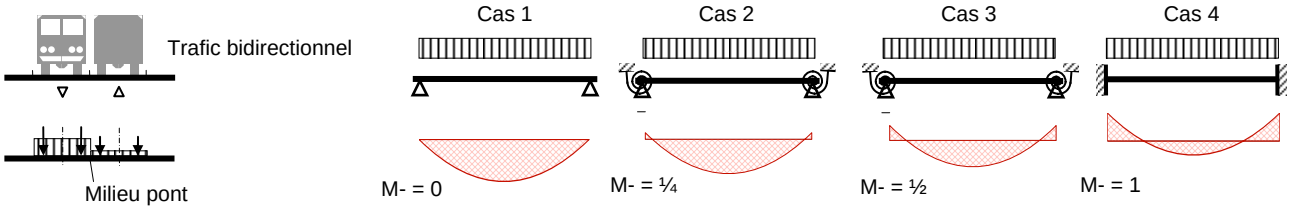


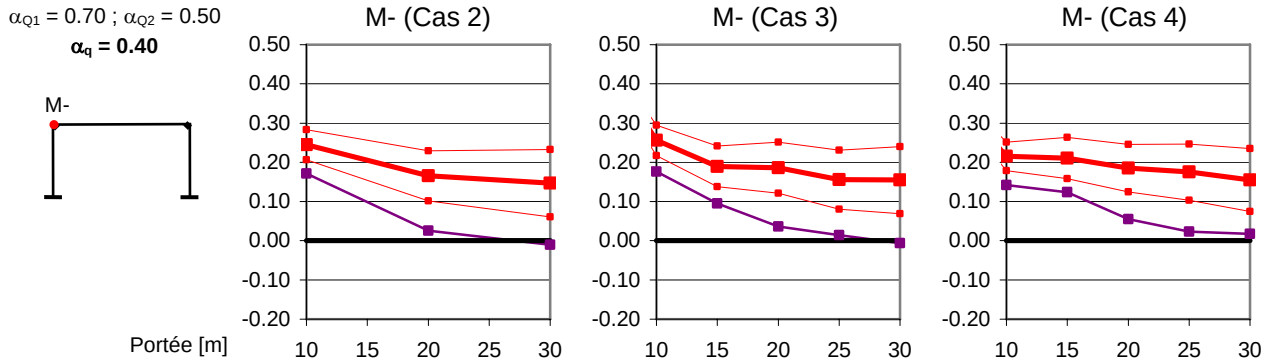


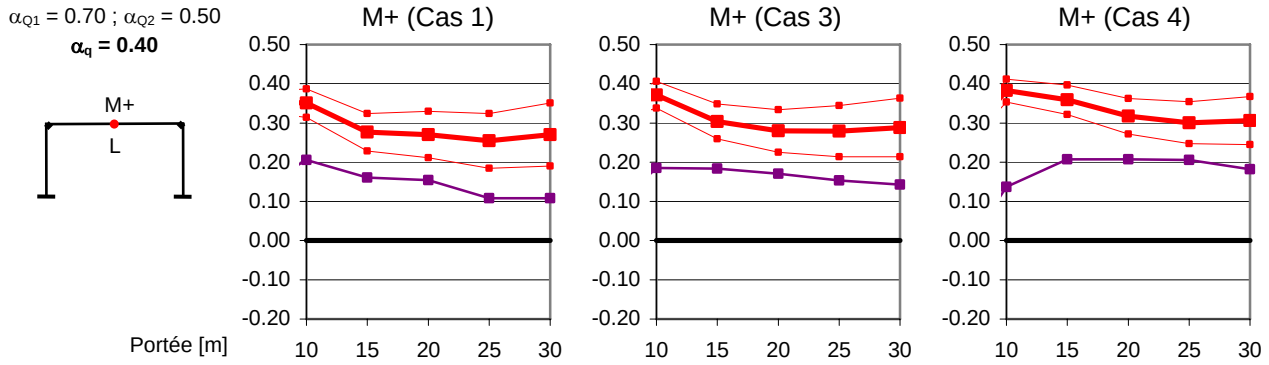


A.6.4 Pont dalle

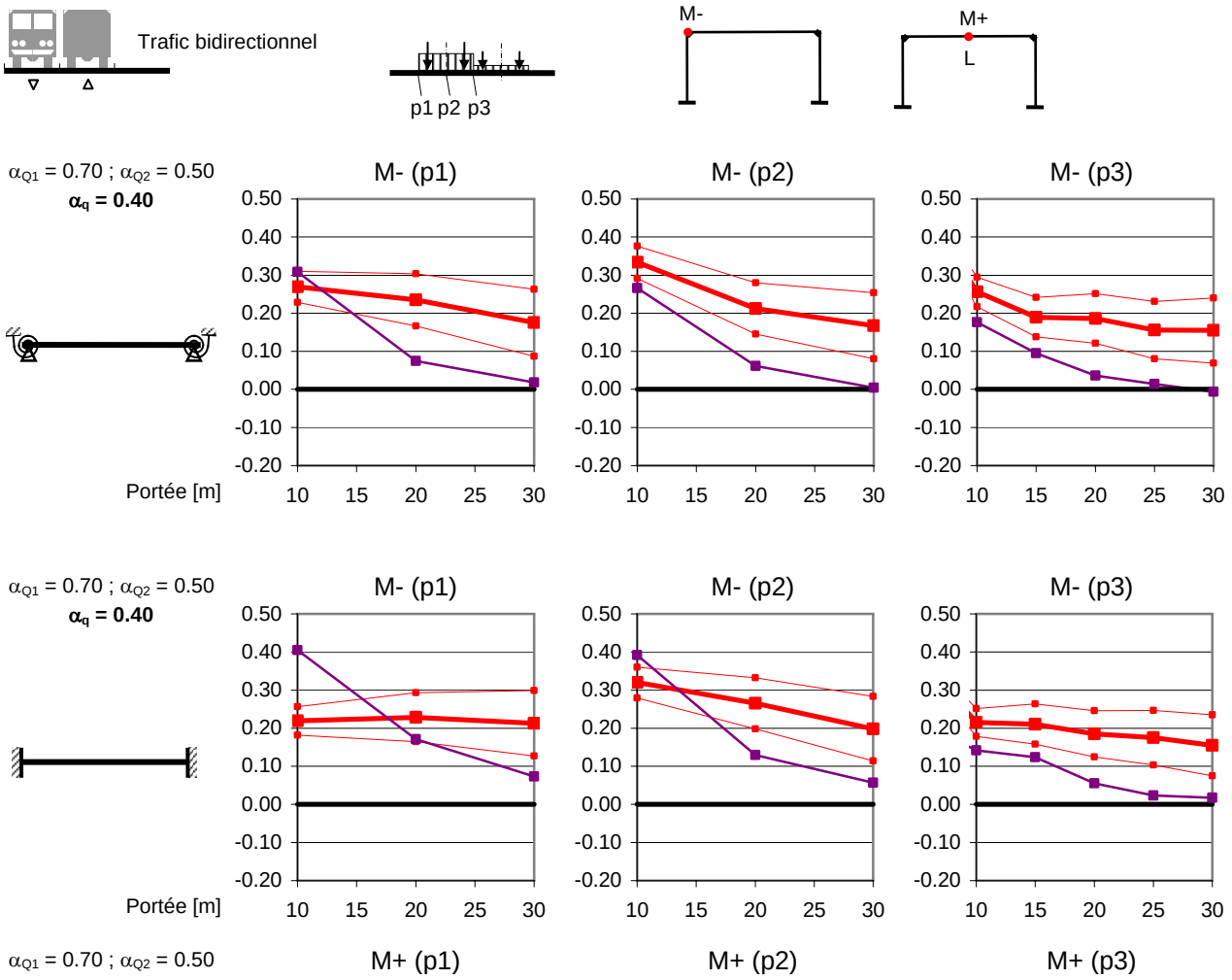
Variantes d'appui

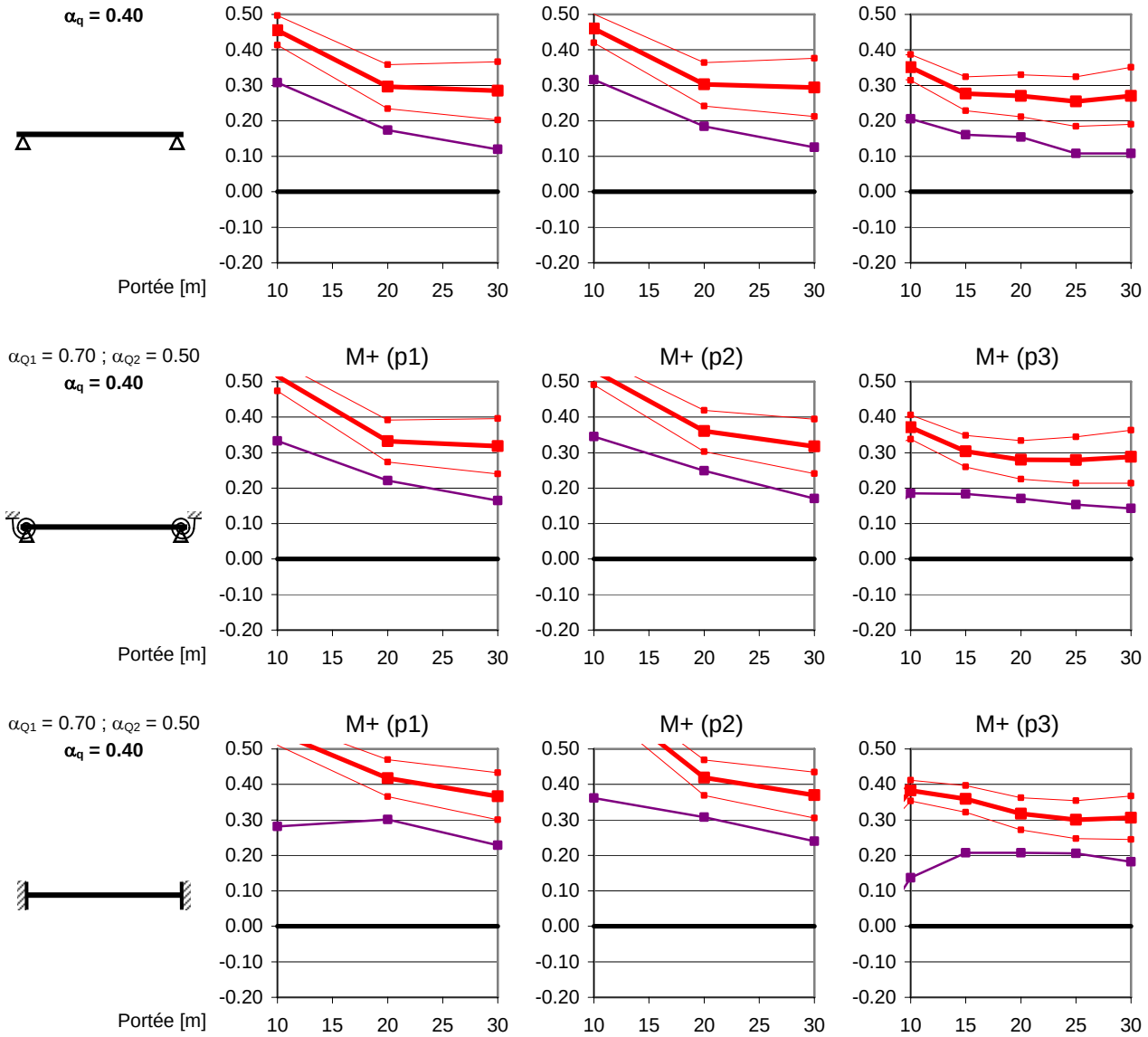




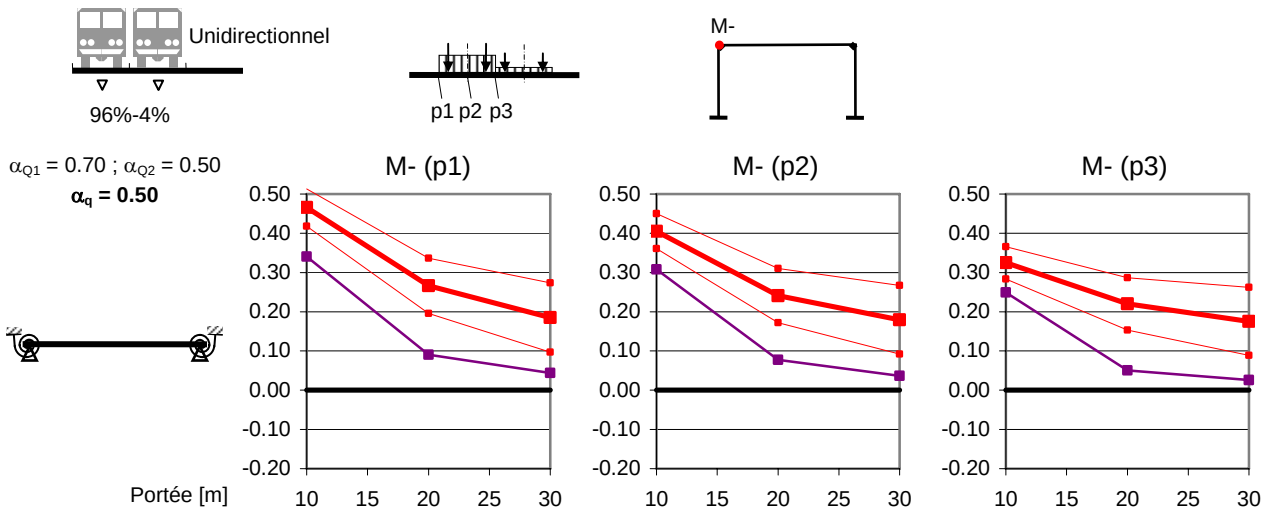


Diverses positions transversales des efforts





Autre trafic



A.7 FACTEUR D'AMPLIFICATION DYNAMIQUE

Pour contrôler l'utilisation d'un facteur d'amplification dynamique basé sur la méthode proposée dans [OFROU, 2004.1], l'effet de celui-ci est ici comparé avec l'effet du coefficient dynamique de 1.8 inclus dans l'ancienne norme SIA 160 (1989) et avec l'effet des coefficients dynamiques actualisés proposés par [Cantieni, 1983].

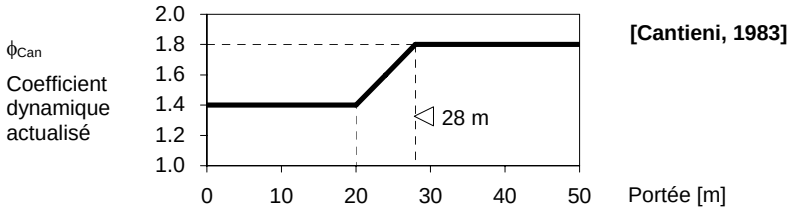
Les résultats des trois calculs suivants sont comparés :

1. Calcul des efforts selon la norme SIA 160 (1989) avec un coefficient dynamique de 1.8 sur les charges concentrée Q :

$$E_{SIA} = 1.8 \cdot E_Q + E_q$$

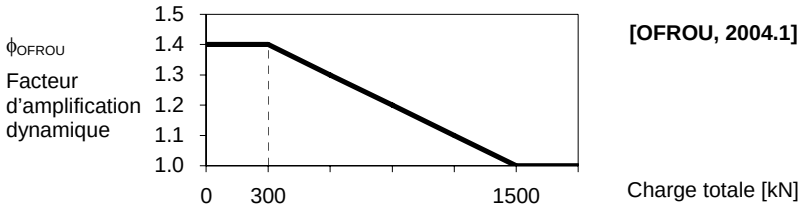
2. Calcul des efforts selon la norme SIA 160 (1989) avec un coefficient dynamique actualisé selon [Cantieni, 1983] sur les charges concentrée Q :

$$E_{Can} = \phi_{Can} \cdot E_Q + E_q$$



3. Calcul des efforts avec les charges de la norme SIA 160 (1989), mais avec un coefficient dynamique appliqué à toutes les charges (Q et q) et calculé selon [OFROU, 2004.1] en fonction de la charge totale sur la ligne d'influence :

$$E_{OFROU} = \phi_{OFROU} \cdot (E_Q + E_q)$$



Comme le montre la Figure A.4, le cas d'un pont caisson avec une chaussée de 6 m de largeur est considéré pour les comparaisons.

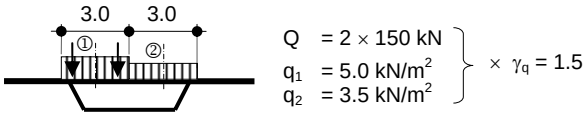


***Figure A.4** – Pont caisson étudié avec les charges de la norme SIA 160 (1989)*

Les résultats obtenus sont présentés à la Figure A.5 pour différents types d'effort en fonction de la portée principale du pont. Les observations générales suivantes peuvent être faites :

- La méthode [OFROU, 2004.1] donne des efforts inférieurs à ceux obtenus par un calcul selon la norme SIA 160.
- Le rapport E_{OFROU}/E_{SIA} est relativement constant, quelle que soit la portée de l'ouvrage.
- Pour des portées inférieures à 20 m, les efforts obtenus par la méthode [OFROU, 2004.1] sont proches de ceux obtenus avec le coefficient dynamique réduit de [Cantieni, 1983].

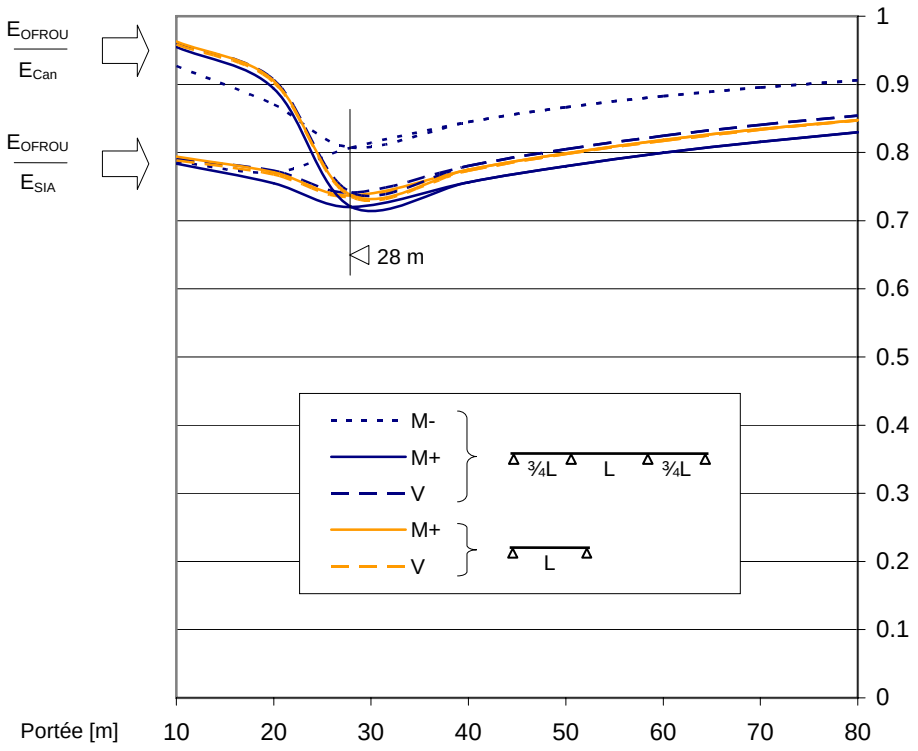


***Figure A.5** – Résultats de la comparaison des efforts*

La norme SIA 160 prend implicitement en compte un effet dynamique décroissant avec la portée, puisque le coefficient dynamique est appliqué uniquement sur la charge concentrée. Avec la méthode [OFROU, 2004.1], le facteur d'amplification dynamique décroît également avec la portée, puisque la charge totale augmente avec la portée. En conclusion, les philosophies des deux calculs sont proches l'une de l'autre, ce qui justifie l'applicabilité de la méthode [OFROU, 2004.1] dans cette étude.

Notons encore que, en plus du rapport [OFROU, 2004.1], d'autres études faites dans le monde ont montré que l'amplification dynamique diminue fortement avec l'augmentation du poids total des véhicules.

A.8 COMPARAISON ENTRE LA NORME SIA 160 ET LE MODELE ACTUALISE

Les efforts calculés avec le modèle actualisé proposé sont ici comparés avec les efforts calculés selon l'ancienne norme SIA 160. La comparaison est effectuée pour les ponts caisson et bipoutres avec les modèles indiqué à la Figure A.6.

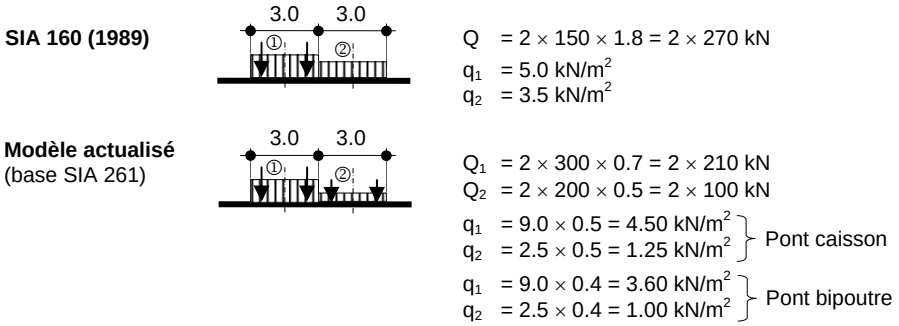


***Figure A.6** – Charges appliquées pour la comparaison*

Les résultats obtenus sont présentés à la Figure A.5 pour différents types d'effort en fonction de la portée principale du pont. L'observation générale suivante peut être faite :

- Pour le pont caisson, comme pour le pont bipoutre, le modèle actualisé proposé donne des efforts qui restent en dessous de ceux calculés selon la norme SIA 160.

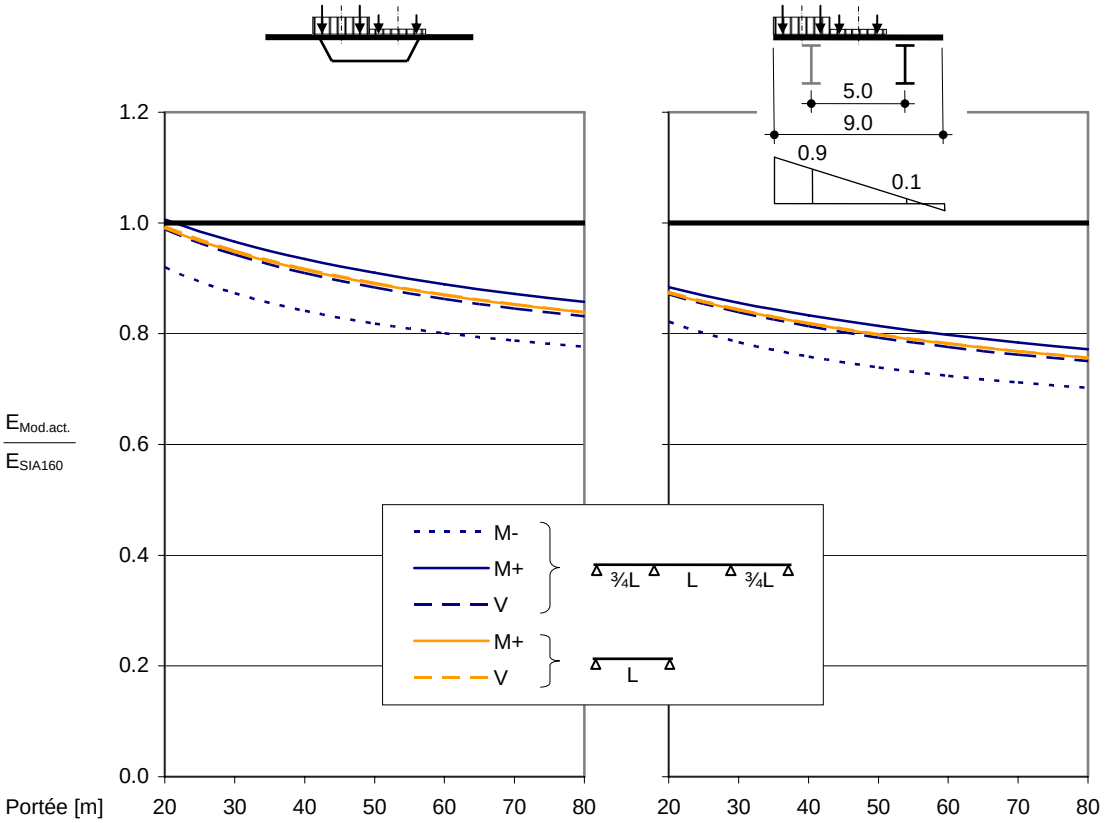


***Figure A.7** – Résultats de la comparaison des efforts*

Notons que cette comparaison montre que les ouvrages dimensionnés avec la norme SIA 160 offrent un niveau de sécurité suffisant par rapport au trafic actuel. Pour les petites portées, la réserve sur les efforts dus aux charges de trafic est faible avec un calcul selon la norme SIA 160, mais celle-ci croît sensiblement avec l'augmentation de la portée.

A.9 POIDS LEGAL ET VEHICULES SPECIAUX

Les prescriptions légales concernant les poids des véhicules se trouve dans l'ordonnance du 13 novembre 1962 sur les règles de la circulation routière (OCR) [http://www.admin.ch/ch/f/rs/c741_11.html] et en particulier à l'article 67 suivant :

Art. 67 [1] Poids

(art. 9, al. 1, 2 et 4, LCR) [2]

1 Le poids effectif des véhicules et des ensembles de véhicules ne doit pas excéder:[3]

a.[4] 40,00 t pour les véhicules automobiles ayant plus de quatre essieux, les trains routiers et les véhicules articulés, ou 44,00 t pour ces véhicules en transport combiné non accompagné;

b.[5] 32,00 t pour les véhicules automobiles à quatre essieux;

c. 28,00 t pour les bus à plate-forme pivotante à trois essieux;

d. 25,00 t pour les véhicules automobiles à trois essieux, dans le cas normal, 26,00 t pour les véhicules automobiles à trois essieux, si l'essieu moteur est équipé de pneus jumelés et d'une suspension pneumatique ou d'une suspension reconnue équivalente, ou encore

si les deux essieux moteurs sont équipés de pneus jumelés et que la charge maximale par essieu n'excède pas 9,50 t;

e. 18,00 t pour les véhicules automobiles à deux essieux;

f. 24,00 t pour les remorques à trois essieux ou plus;

g. 18,00 t pour les remorques à deux essieux et pour les remorques à essieu double;

h. 10,00 t pour les remorques à un essieu.

1bis Par transport combiné non accompagné, il faut entendre le transport d'unités de chargement (conteneur, caisse mobile) ou le transfert d'une semi-remorque à partir ou à destination de n'importe quelle gare ferroviaire suisse de transbordement ou à partir ou à destination d'un port suisse, sans que la marchandise transportée change de contenant lors du passage d'un mode de transport à l'autre. Le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication peut désigner les gares de transbordement étrangères proches de la frontière assimilées aux gares suisses de même nature. En transport combiné non accompagné, le conducteur doit être porteur d'une pièce justificative appropriée (p. ex. une lettre de voiture établie par l'entreprise ferroviaire).[6]

2 La charge par essieu ne doit pas excéder:

		en tonnes
a.	pour un essieu simple	10,00
b.	pour un essieu simple entraîné	11,50
c.	pour un essieu double, d'empattement inférieur à 1,00 m	
	1. de véhicule automobile	11,50
	2. de remorque	11,00
d.	pour un essieu double dont l'empattement est compris entre 1,00 m et moins de 1,30 m	16,00
e.	pour un essieu double dont l'empattement est compris entre 1,30 m et moins de 1,80 m	18,00
f.	pour un essieu double dont l'empattement est compris entre 1,30 m et moins de 1,80 m, si l'essieu moteur est équipé de pneus jumelés et d'une suspension pneumatique ou d'une suspension reconnue équivalente selon l'art. 57 OETV[7] ou si chacun des essieux moteurs est équipé de pneus jumelés et si la charge maximale autorisée par essieu n'excède pas 9,50 t.	19,00
g.	pour un essieu double de remorque dont l'empattement est de 1,80 m ou plus	20,00
h.[8]	pour un essieu triple dont les empattements sont inférieurs ou égaux à 1,30 m	21,00
i.[9]	pour un essieu triple dont les empattements sont supérieurs à 1,30 m, sans toutefois dépasser 1,40 m	24,00
k.[10]	pour un essieu triple dont un empattement est supérieur à 1,40 m	27,00

3 Si les valeurs inscrites dans le permis de circulation sont inférieures aux valeurs maximales indiquées au al. 1, 2, 6 et 7, lesdites valeurs ne doivent pas être dépassées.

4 Le poids reposant sur les essieux moteurs d'un véhicule ou d'un ensemble de véhicules dont la vitesse maximale peut dépasser 40 km/h ne doit pas être inférieur à 25% du poids effectif (poids minimal d'adhérence).[11]

5 Le poids effectif de la remorque ne doit pas dépasser la charge remorquable inscrite dans le permis de circulation du véhicule tracteur.

6 Pour les véhicules automobiles immatriculés pour la première fois avant le 1er octobre 1997, la charge maximale autorisée par essieu, selon le al. 2, let. b et c, ch. 1, est de 12,00 t.

7 Pour les véhicules automobiles immatriculés pour la première fois avant le 1er octobre 1997, la charge maximale autorisée par essieu, selon l'al. 2, let. f, est de 20,00 t, si la charge maximale autorisée de 10,00 t par essieu n'est pas dépassée.

8 … [12]

9 L'OFROU peut édicter des instructions concernant les charges maximales autorisées par essieu et le poids minimal d'adhérence pour les véhicules et transports spéciaux.[13]

[1] Nouvelle teneur selon le ch. II 4 de l'annexe 1 à l'O du 19 juin 1995 concernant les exigences techniques requises pour les véhicules routiers, en vigueur depuis le 1er oct. 1995 (RS **741.41**).
[2] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[3] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 1er nov. 2000, en vigueur depuis le 1er janv. 2001 (RO **2000** 2882).
[4] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[5] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[6] Introduit par le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[7] RS **741.41**
[8] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[9] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[10] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[11] Nouvelle teneur selon le ch. 1 de l'annexe 1 à l'O du 2 sept. 1998 (RO **1998** 2352).
[12] Abrogé par le ch. I de l'O du 30 juin 2004, avec effet au 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[13] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).

État au 13 septembre 2005

Les véhicules non conformes à ces prescriptions légales sont considérés comme des véhicules spéciaux. Des dispositions particulières régissant les véhicules spéciaux et les transports spéciaux sont énoncées dans les articles 78 à 85 de l'ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR). Ces véhicules ne peuvent circuler qu'en vertu d'une autorisation écrite, comme le précise l'article 78 suivant :

Art. 78 Autorisations

1 Les véhicules qui, en raison de leur chargement, ne répondent pas aux prescriptions concernant les dimensions et le poids, ainsi que les véhicules spéciaux (art. 25 OETV[1]), ne peuvent circuler sur la voie publique qu'en vertu d'une autorisation écrite.[2] Des autorisations uniques sont délivrées pour une ou plusieurs courses déterminées et des autorisations durables pour un nombre de courses illimité.[3] Des autorisations de dépassement de poids ne peuvent être délivrées que pour des véhicules ou des ensembles de véhicules autorisés – selon le permis de circulation – à transporter le poids maximum légal.[4]

2 Seules des autorisations uniques sont admises pour les dépassements de la largeur maximale, de la hauteur maximale ou du poids maximal. Des autorisations durables peuvent toutefois être octroyées:[5]

a. pour des transports en relation étroite les uns avec les autres effectués sur un même parcours;

b. pour le transfert, le transport ou l'utilisation de véhicules de travail à l'intérieur du territoire cantonal;

c.[6] pour l'utilisation de véhicules à chenilles sur des domaines skiables; lorsqu'un tel domaine touche plusieurs cantons, des autorisations durables pour véhicules à chenilles peuvent être délivrées moyennant l'accord des cantons concernés;

d. pour le transport de marchandises indivisibles à l'intérieur du territoire cantonal;

e.[7] pour le transport de wagons de chemin de fer chargés, au moyen de trucs routiers, à l'intérieur du territoire cantonal et, moyennant l'accord des cantons concernés, également sur des parcours situés à l'extérieur de celui-ci;

f.[8] pour le transport de marchandises indivisibles et l'utilisation de véhicules spéciaux dans les limites définies à l'art. 79, al. 2, let. a.[9]

2bis S'agissant des véhicules spéciaux dont les dimensions et les poids n'excèdent pas les limites énoncées à l'art. 79, al. 2, let. a, l'autorisation durable peut être inscrite dans le permis de circulation en tant que décision de l'autorité, à condition que soient respectées les dispositions de l'art. 65a régissant le mouvement giratoire.[10]

3 Une copie des autorisations uniques délivrées pour plusieurs courses et des autorisations durables sera envoyée à l'OFROU); une copie sera également adressée aux cantons concernés, chaque fois qu'à l'occasion d'une course empruntant le territoire de plusieurs cantons, les normes légales concernant le poids et les dimensions seront dépassés (art. 79, al. 2).[11]

4 L'autorisation peut être retirée en tout temps, notamment si des abus ont été commis, si le véhicule a causé des difficultés dans la circulation ou si les courses autorisées ne sont plus nécessaires.

---

[1] RS **741.41**
[2] Nouvelle teneur selon le ch. II 4 de l'annexe 1 à l'O du 19 juin 1995 concernant les exigences techniques requises pour les véhicules routiers, en vigueur depuis le 1er oct. 1995 (RS **741.41**).
[3] Phrase introduite par le ch. I de l'O du 15 nov. 2000, en vigueur depuis le 1er janv. 2001 (RO **2000** 2883).
[4] Phrase introduite par le ch. I de l'O du 3 juillet 2002, en vigueur depuis le 1er avril 2003 (RO **2002** 3212).
[5] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[6] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[7] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[8] Introduite par le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[9] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 15 nov. 2000, en vigueur depuis le 1er janv. 2001 (RO **2000** 2883).
[10] Introduit par le ch. I de l'O du 15 nov. 2000 (RO **2000** 2883). Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO 2004 3519).
[11] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 7 mars 1994 (RO 1994 816).

État au 13 septembre 2005

Les compétences pour l'octroi des autorisations sont régies par l'ordonnance sur les règles de la circulation routière (OCR) selon l'article 79 suivant :

Art. 79 Compétences

1 Le canton du lieu de stationnement ou le canton sur le territoire duquel commence la course soumise à autorisation délivre cette dernière pour toute la Suisse. Le canton du lieu de stationnement n'est toutefois pas compétent lorsque son territoire n'est pas emprunté.[1]

2 Lorsque le poids et les dimensions dépassent le maximum légal, l'autorisation pour un parcours situé hors du canton ne peut être délivrée qu'aux conditions suivantes:

a.[2] les véhicules et les ensembles de véhicules n'excéderont pas 30 m de longueur, 3 m de largeur, 4 m de hauteur, ainsi que 44 t de poids effectif; pour chaque essieu, la charge par essieu ne doit pas excéder 12 t;

b. ne seront empruntés que les routes de grand transit au sens des annexes 1 et 2, let. A et B, de l'ordonnance du 18 décembre 1991 concernant les routes de grand transit, ainsi que le réseau routier des localités touchées par lesdites routes[3].[4]

3 S'agissant des autorisations uniques, le poids effectif selon l'al. 2, let. a, peut atteindre 50 t au maximum lorsque le parcours de transit emprunte, hors du canton, exclusivement des autoroutes.[5]

[4] Pour les véhicules au service de la Confédération et les véhicules effectuant des courses d'importation et de transit en circulation internationale, les autorisations sont délivrées par l'OFROU, le cas échéant après consultation des cantons.[6]

[1] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 7 mars 1994 (RO **1994** 816).
[2] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[3] RS **741.272**
[4] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 7 mars 1994 (RO **1994** 816).
[5] Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).
[6] Introduit par le ch. I de l'O du 1er juillet 1992 (RO **1993** 1142). Abrogé par le ch. I de l'O du 15 juin 2001 (RO **2002** 1180). Nouvelle teneur selon le ch. I de l'O du 30 juin 2004, en vigueur depuis le 1er janv. 2005 (RO **2004** 3519).

État au 13 septembre 2005

A.10 CAMIONS-GRUES JUSQU'A 96 TONNES

A.10.1 Introduction

Le contenu de cette introduction se base sur une communication électronique transmise à l'ICOM le 28 novembre 2005 par Monsieur A. Blaser de l'office fédéral des routes (OFROU).

Les camions-grues qui ne sont pas conformes aux prescriptions légales sur les poids selon l'article 67 de l'OCR (voir annexe A.9) sont considérés comme des véhicules spéciaux et ne peuvent circuler sur des routes publiques que s'ils sont au bénéfice d'une autorisation écrite. Une autorisation durable peut être délivrée pour les déplacements effectués dans les limites du territoire cantonal et ceci indépendamment des dérogations sollicitées.

Pour les parcours situés hors du territoire cantonal, l'autorisation ne peut être délivrée qu'aux conditions de l'article 79 alinéa 2 lettres a et b de l'OCR (voir annexe A.9). Pour les camions-grues non conformes à ces conditions, il est nécessaire de demander une autorisation auprès de chaque canton dont le territoire est emprunté (ainsi, p. ex., pour un déplacement de Genève à Aarau, il y a lieu de prendre contact avec les cantons suivants: GE, VD, FR, BE, SO et AG). En fonction des dérogations requises, chaque canton indique alors l'itinéraire précis à emprunter ainsi que les conditions à respecter sur son territoire. Pour les poids totaux de 80 t et plus, notamment, le Service des automobiles chargé de délivrer les autorisations prescrit l'itinéraire à emprunter, d'entente avec le Service des ponts et chaussées.

Selon une enquête de l'Office fédéral des routes, il existe actuellement (fin 2005) 27 camions-grues de plus de 60 tonnes (jusqu'à 96 t), répartis dans 13 cantons, qui sont engagés sur l'ensemble du territoire suisse.

Pour l'évaluation des ponts situés sur les axes prévus pour le passage des camions-grues de plus de 60 tonnes, le modèle de charge actualisé proposé dans le présent rapport n'est pas valable. Afin de combler cette lacune, des simulations de trafic complémentaires ont été réalisées. Les hypothèses, les résultats ainsi que le modèle de charge actualisé sont présentés ci-après.

A.10.2 Hypothèses

De nouvelles simulations ont été faites en ajoutant un certain pourcentage de camions-grues de 96 tonnes dans la modélisation des trafics. Les hypothèses principales sont les suivantes :

- Le pourcentage de camions-grues dans le trafic a été admis à 0.005%, ce qui correspond au passage de 167 camions-grues par an (environ trois par semaine) pour les routes bidirectionnelles et de 333 camions-grues par an et par direction (environ un par jour) sur les autoroutes.
- Les camions-grues circulent sur une seule voie, le croisement ou le dépassement entre deux camions-grues n'est donc pas considéré.
- La géométrie des camions-grues est admise selon le schéma de la Figure A.8.

- Le poids total est admis à 96 tonnes avec un facteur de charge de $\gamma_Q = 1.1$, car le chargement est en principe assez constant.
- La charge est répartie uniformément sur les 8 essieux, ce qui correspond à une charge par essieu de 12 t.
- Le facteur d'amplification dynamique est calculé pendant la simulation en fonction du poids total du trafic sur l'ouvrage selon la méthode [OFROU, 2004.1] exposée à la section 3.1.

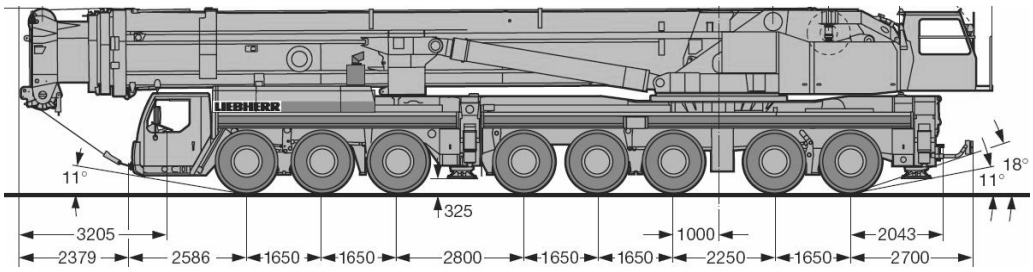


***Figure A.8** – Schéma d'un camion-grue de 96 tonnes*

A.10.3 Résultats

La Figure A.9 montre, pour les ponts caisson, les rapports entre les efforts simulés et les efforts obtenus avec la norme SIA 261 pour le trafic bidirectionnel et pour les trois efforts suivants :

- flexion sur appui M- pour la poutre continue
- flexion à mi-travée M+ pour la poutre simple
- effort tranchant V pour la poutre simple

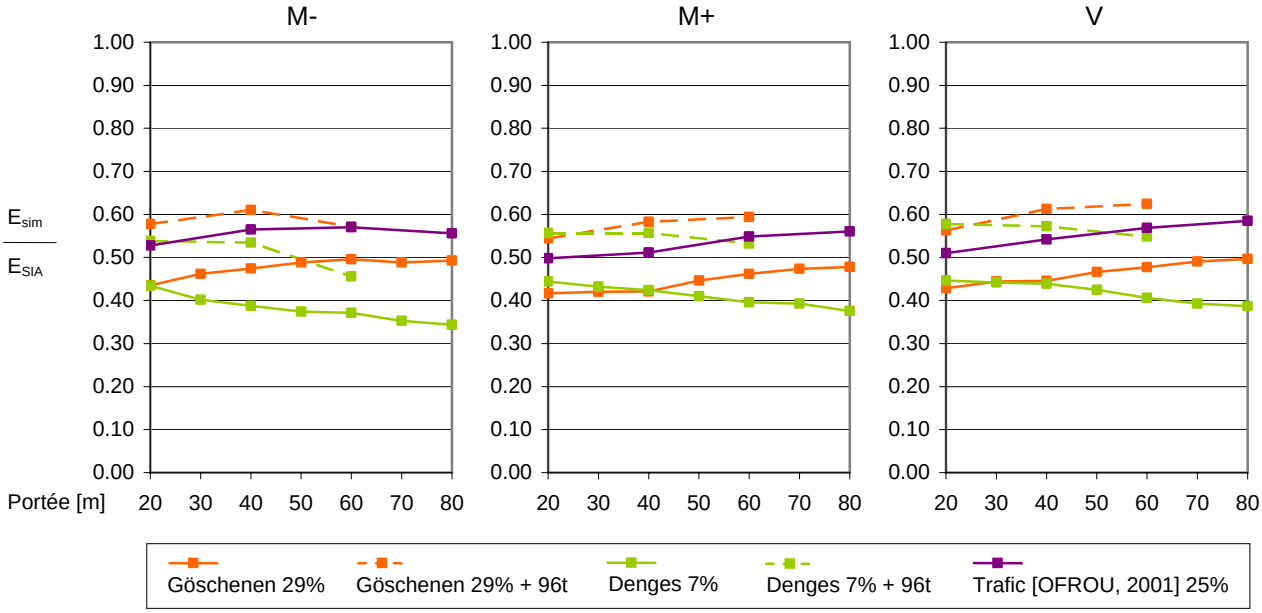


***Figure A.9** – Comparaison des efforts : ponts caisson, route bidirectionnelle, camions-grues de 96 t*

La Figure A.10 montre les mêmes résultats pour les ponts bipoutres et un trafic unidirectionnel.

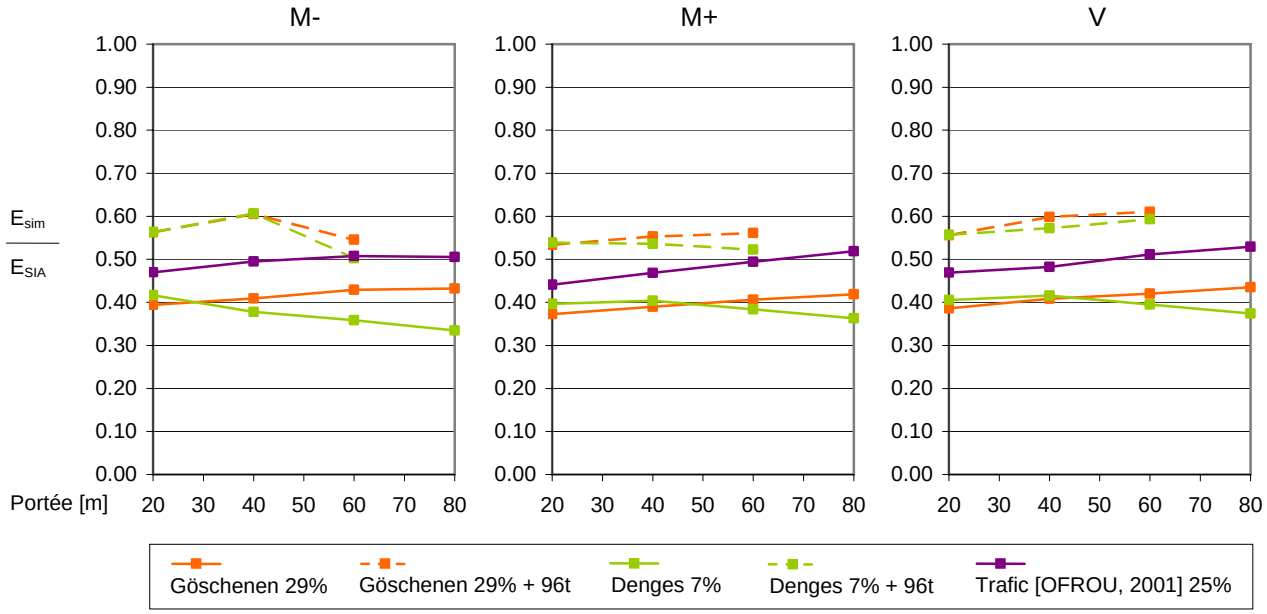


***Figure A.10** – Comparaison des efforts : ponts bipoutres, autoroute à 2 voie, camions-grues de 96 t*

On constate que les trafics contenant des camions-grues de 96 tonnes sont nettement plus agressifs que tous les trafics basés sur les mesures de pesage précédemment simulés. Les efforts restent néanmoins toujours inférieurs à ceux calculés avec le modèle 1 de la norme SIA 261 (2003).

A.10.4 Modèle de charge actualisé

Les coefficients α actualisés proposés au chapitre 6 ne sont pas valables pour un trafic contenant des camions-grues de 96 tonnes. Ainsi, pour l'évaluation des ponts routiers existants situés sur des axes autorisés aux camions-grues jusqu'à 96 tonnes, il est recommandé d'utiliser les coefficients α actualisés du Tableau A.3.

***Tableau A.3** – Coefficients α actualisés pour l'évaluation des ponts avec des camions-grues de 96 tonnes*

Pont	Section transv.	Portées	α_{Q1}	α_{Q2}	α_{qi}, α_{qr}
Poutre	Caisson	20-80 m	**0.70**	**0.50**	**0.70**
	Bipoutre	20-80 m			
	Multipoutre	15-35 m			
Dalle		8-30 m			

A.10.5 Comparaison avec le modèle 3 type III de la norme SIA 261/1 (2003)

Les spécifications complémentaires SIA 261/1 (2003) proposent à la section 10 un modèle de charge pour considérer les transports exceptionnels. Le modèle qui correspond le mieux à des camions-grues circulant simultanément avec un trafic normal est le modèle du transport exceptionnel type III. Ce modèle comprend une charge totale de 900 kN répartie sur deux trains de quatre essieux chacun combinés avec une charge de 2.5 kN/m^2 répartie sur toute la chaussée. Ces charges doivent être placées dans la position la plus défavorable.

Ce modèle de charge a été comparé au modèle de charge actualisé proposé pour les routes autorisées aux camions-grues jusqu'à 96 tonnes. Les résultats sont présentés à la Figure A.11.

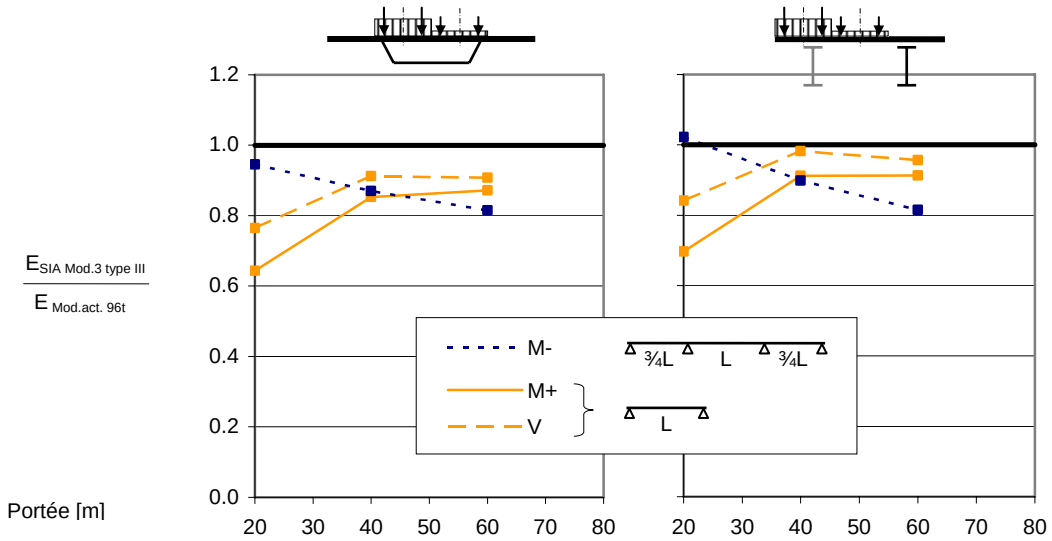


***Figure A.11** – Comparaison des efforts entre le modèle actualisé et le modèle 3 type III de la norme SIA*

On constate que le modèle 3 type III des spécifications complémentaires SIA 261/1 fournit des efforts légèrement inférieurs à ceux obtenus avec le modèle actualisé du Tableau A.3.

A.10.6 Marges du modèle de charge actualisé

Les marges restantes entre les efforts obtenus par simulation et les efforts calculés avec le modèle actualisé proposé pour des axes autorisés aux camions-grues jusqu'à 96 tonnes sont présentée à la Figure A.12 et à la Figure A.13 (voir annexe A.6 pour les légendes des courbes).

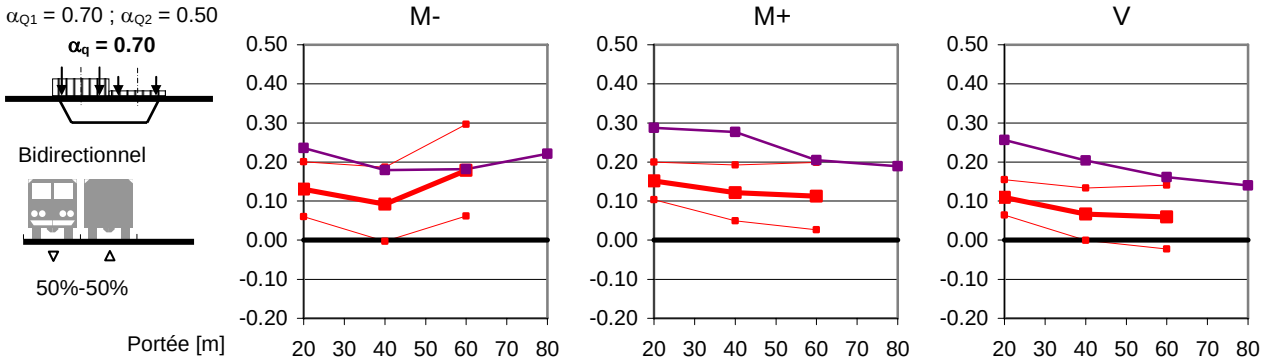


***Figure A.12** – Marges : pont caisson, trafic bidirectionnel*

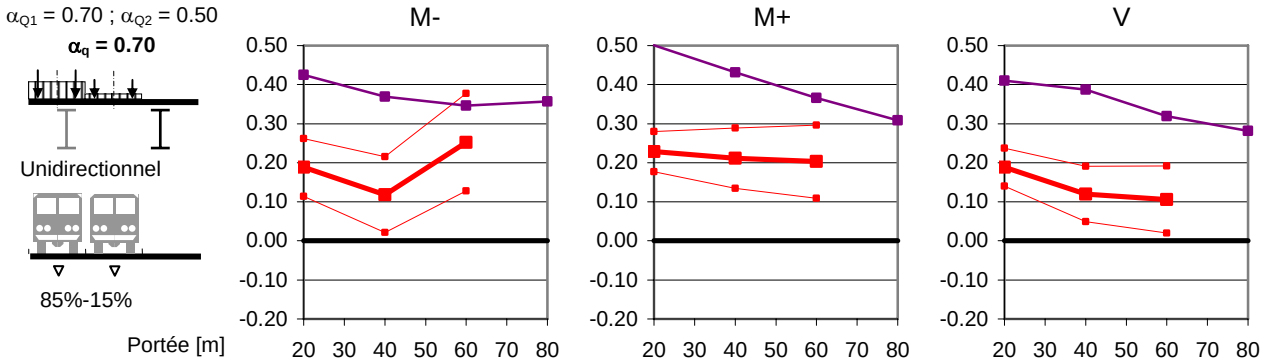


***Figure A.13** – Marges : pont bipoutre, autoroute*