

COMMENT CHOISIR UNE MÉTHODE D'ANALYSE JUSTE ET SUFFISANTE

Bruno Massicotte et Jean-Christophe Kombila

École Polytechnique de Montréal
Montréal (Québec)

Marie-Claude Michaud et Dominic Vachon

Cima+
Laval (Québec)

RÉSUMÉ : Le calcul des structures a subi de grands changements depuis le début des années 1990 dû en grande partie grâce à l'accès à des outils de calcul numériques permettant de faire l'analyse et la conception des structures. La disponibilité de logiciels de calcul puissants et "intelligents" se fait parfois au détriment du jugement. Cela peut conduire à la perte de vue de l'objectif premier qui est de concevoir des structures dont le comportement, sous les charges de service, respecte les limites établies sans endommager la structure et qui, sous des sollicitations extrêmes rarissimes, conserveraient leur intégrité structurale sans mettre en péril la sécurité des usagers et la pérennité de l'ouvrage. Il est rarement requis d'utiliser des modèles de calcul complexes. Il est ainsi préférable d'utiliser un modèle simple mais fidèle à la réalité qui permet de comprendre le comportement et d'user de son jugement d'ingénieur qu'un modèle complexe qui peut cacher des inexactitudes. Le choix juste n'est pas aisé. C'est à ce titre que le présent article tente d'établir le cadre d'une discussion qui ne fait que s'amorcer.

INTRODUCTION

Depuis le début des années 1990, le contexte du calcul des structures, dont en particulier celui des ponts, a subi des changements importants directement reliés aux outils informatiques dont disposent les ingénieurs. En effet, l'accès à des ordinateurs toujours plus puissants a amené plusieurs entreprises à concevoir des logiciels conviviaux avec lesquels il devient de plus en plus aisé de créer des modèles davantage plus raffinés qui ont permis, dans un premier temps, de réaliser des analyses poussées et, plus récemment, de faire directement la conception des éléments de charpentes.

Ces changements technologiques ne se font pas sans soulever des questions et susciter une certaine prudence. En effet, bien que l'utilisation des outils informatiques soit une réalité incontournable, celle-ci comporte certains risques. La complexité et le raffinement des modèles numériques ne doivent pas supplanter le jugement de l'ingénieur et la nécessité pour celui-ci de définir des modèles simples.

La majorité des règles et exigences des codes et normes que doivent appliquer les concepteurs ont été élaborées en assumant que des modèles simples seraient utilisés pour déterminer les efforts. La facilité avec laquelle des modèles complexes 3D peuvent être élaborés, à laquelle s'ajoute les outils de conception automatisée dont disposent les logiciels, sont des sources grandissantes d'erreurs qui, à tout le moins, peuvent conduire à des déviations par rapport avec l'esprit dans lequel les codes et normes de conception ont été élaborés.

Toutefois, les ingénieurs d'aujourd'hui font face à des défis grandissants et l'utilisation des outils numériques sophistiqués est requise dans bien des situations, que ce soit dans le but d'accroître la productivité ou bien qu'il s'agisse d'analyser des structures aux géométries complexes ou encore en vue d'optimiser la conception. Il est fort courant, pour des raisons d'efficacité et d'intérêt, que ce soit les ingénieurs en début de carrière qui aient la charge de faire les analyses. Or le manque d'expérience peut faire en sorte qu'ils n'aient pas le réflexe de procéder à des vérifications simples visant à valider les résultats obtenus des analyses.

Enfin, il existe peu de publications permettant de guider les concepteurs dans l'élaboration de leurs modèles d'analyse. Alors que pour un grand nombre de problèmes des modèles relativement simples sont suffisants, certaines situations justifient des modèles plus élaborés. Le choix de la méthode d'analyse n'est pas toujours évident: la méthode de la poutre équivalente, la méthode du grillage 2d (plan) ou 3D, la méthode des éléments finis ou toute autre méthode pertinente. Une règle de base importante qu'il importe de ne pas oublier veut qu'un modèle simple dont les résultats peuvent être interprétés directement par le concepteur sans passer par l'intermédiaire de divers traitements numériques est préférable à un modèle complexe qui nécessite un post-traitement élaboré.

OBJECTIFS DE MODÉLISATION

La modélisation des tabliers de ponts vise à reproduire numériquement des phénomènes physiques avec un degré de précision suffisant pour permettre leur conception ou encore l'évaluation de leur capacité portante. Dans le premier cas il est de bonne pratique d'adopter des hypothèses d'analyse qui sont du côté de la sécurité. D'abord parce que les conditions de réalisation d'un pont peuvent différer de celles anticipées. Puis parce que généralement les coûts associés à des hypothèses légèrement conservatrices sont, toutes proportions gardées, faibles en regard du coût total d'un ouvrage. De plus comme les charges et conditions d'exploitation des ouvrages évoluent et que l'espérance de vie des ponts est d'au moins 75 ans, il est recommandable de procurer aux ouvrages un surcroît de capacité afin qu'ils puissent disposer d'une réserve suffisante qui leur permettra de s'adapter à des conditions évolutives.

La résistance ultime doit demeurer la préoccupation première des ingénieurs lors de la conception d'un pont. Toutefois l'expérience acquise avec les ponts construits dans la deuxième moitié du XX^e siècle nous enseigne que ce sont les conditions en service qui affectent davantage le comportement structural des ponts. Ainsi les effondrements surviennent généralement lors d'événements extrêmes comme les séismes importants ou lorsqu'un pont est heurté par un bateau. Les ponts sont aussi vulnérables lorsque le système structural est incomplet comme durant les phases de construction, de réfection ou de démolition.

Pour les ponts neufs l'emphase lors de l'analyse des tabliers doit porter sur les conditions en services, qui seront celles qui prévaudront toute la vie durant d'un ouvrage. Les analyses visant à déterminer le comportement des éléments de supports tels les piles, diaphragmes et culées, doivent quant à elles être faites en regard de la sécurité visant à éviter des ruptures ou effondrements lors d'événements exceptionnels.

Dans le cas des ponts existants, il est souvent requis de faire des analyses qui s'approchent le plus possible des conditions réelles. Un degré de raffinement plus élevé que dans le cas des la conception des ponts neufs est habituellement nécessaire, voire recommandé. Dans le cas des ponts existants plus d'informations quant aux dimensions, à la qualité de réalisation et aux propriétés des matériaux sont connues. Comme l'objectif d'une évaluation étant très souvent de tirer le maximum d'un ouvrage aux états limites ultimes, il importe de faire de modèles réalistes. Une attention doit cependant être portée afin de bien modéliser les conditions reliées à la fatigue.

Le mieux étant souvent l'ennemi du bien, il est sage d'éviter des modèles trop complexes qui peuvent présenter des pièges et erreurs difficilement détectables, particulièrement aux ingénieurs moins expérimentés. C'est dans cet esprit que le code S6, comme tous les codes des ponts nord-américains, ont proposé et favorisé l'utilisation de la méthode de la poutre équivalente pour les tabliers les plus courants, soient de type dalle sur poutres, de type dalle (pleine ou évidée) ou de type caissons multiples. Avec cette méthode, le modèle d'analyse considère uniquement une poutre longitudinale du tablier avec la portion tributaire de dalle afin de reproduire la distribution longitudinale des efforts. La distribution transversale des efforts induits par les charges routières est prise en compte par l'entremise d'un facteur d'essieu F_e . Ce facteur est défini comme étant le rapport entre l'effort maximal induit dans la poutre réelle par la combinaison de charges routières la plus défavorable à celle causée par la charge routière d'une voie appliquée uniquement sur la poutre équivalente. Dans le cas des ponts de type dalle, la modélisation utilise une poutre correspondant à une dalle d'une unité de largeur. Une telle approche a été préconisée depuis de nombreuses décennies pour la détermination des efforts de flexion et de cisaillement dans les éléments porteurs longitudinaux. Le passé étant garant de l'avenir, il est sage, malgré les outils informatiques mis à la disponibilité des ingénieurs, de s'assurer, lorsque des analyses complexes sont réalisées, de se comparer aux méthodes simples qui, même d'apparence sécuritaire, ont néanmoins fait leur preuves. Une telle comparaison, même si elle n'est pas explicitement exigée par le Code, s'avère une règle de bonne pratique qu'il importe d'appliquer rigoureusement.

Enfin l'analyse ne représente qu'un côté de l'équation: les efforts et effets calculés doivent être comparés à des limites prescrites en service et à la résistance pondérée aux états limites ultimes. Or les recommandations des codes et normes sont basées sur des essais et considérations déterminées par la somme des expériences passées issues de l'observation de structures réelles, d'essais en laboratoire et d'hypothèses fondées sur le jugement de scientifiques et ingénieurs expérimentés. Tel que mentionné plus haut, les ponts ont depuis toujours été dimensionnés en adoptant la méthode de la poutre équivalente où les éléments secondaires tels les contreventements, les diaphragmes, les retenues aux appuis, etc. étaient ignorés à l'étape de détermination de la répartition des efforts dus aux charges routières entre les éléments porteurs. Il est sage d'adopter dans la mesure du possible des modèles simples et réalistes qui reflètent les hypothèses des codes. Il est donc recommandé d'éviter d'inclure dans les modèles d'analyse des éléments secondaires qui, en plus de rendre plus complexes les analyses et multiplier les sources d'erreurs, conduiront à des résultats dont l'interprétation suscitera davantage de questionnements qu'ils ne permettront de faire un meilleur calcul des ouvrages.

Ainsi la philosophie adoptée vise à utiliser des modèles dont le raffinement est juste nécessaire, compatible à celui des autres paramètres du problème à résoudre.

EFFETS MODÉLISÉS

La figure 1 illustre les principaux efforts internes devant être reproduits par les modèles afin de représenter correctement les comportements des tabliers lorsque soumis aux charges routières. Ces efforts sont principalement associés aux déformations en flexion et torsion du tablier par rapport aux axes longitudinal et transversal. Il est clair que plus les modèles sont raffinés, plus la gamme des types d'efforts pouvant être inclus s'élargie. L'information générée par des modèles d'analyse complexe doit être traitée : on ne peut d'un côté faire des modèles raffinés et ignorer les informations qu'ils créent.

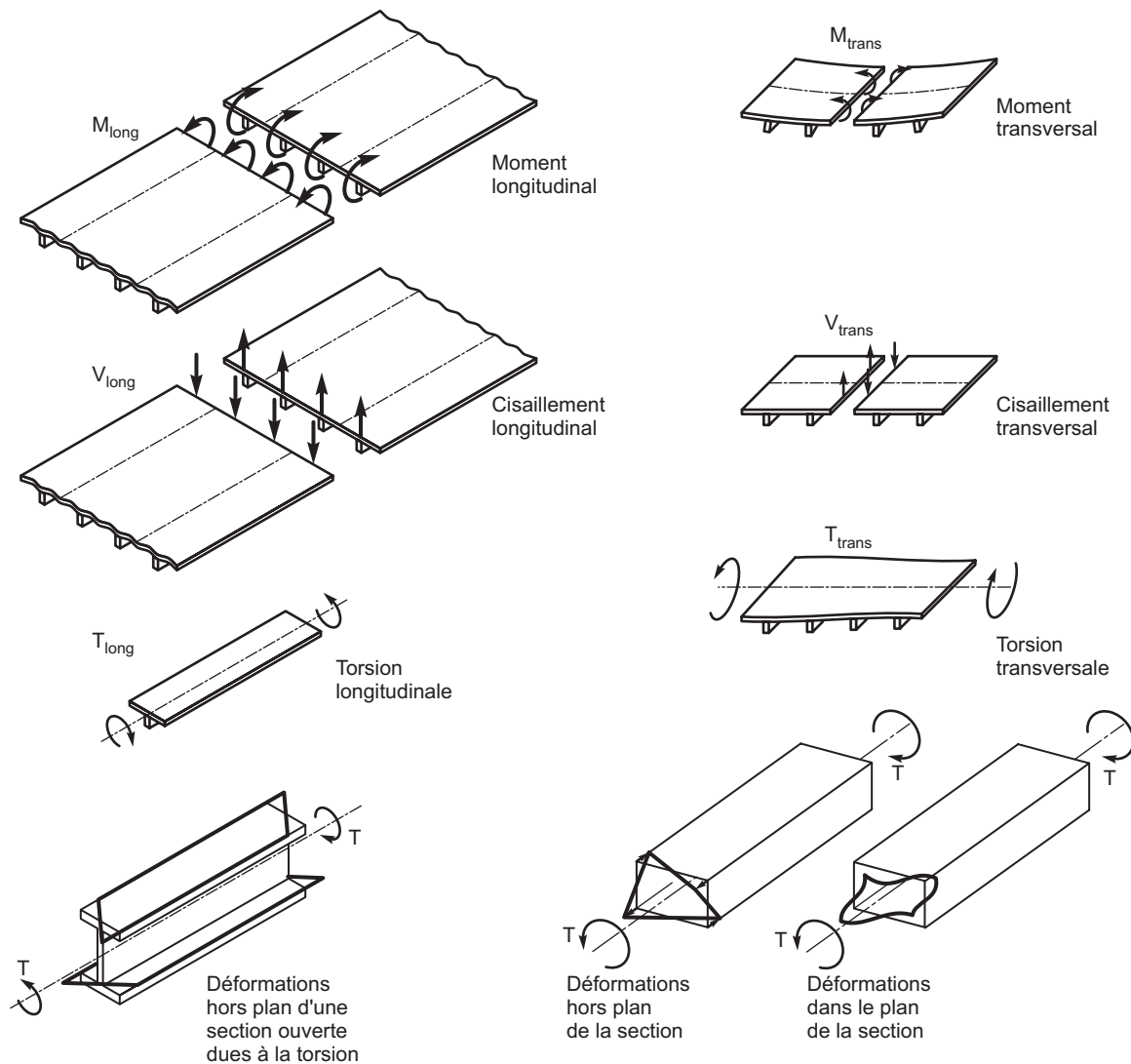


Figure 1 – Efforts globaux induits par les charges routières

La figure 2 présente les phénomènes devant être reproduits lorsqu'un tablier est soumis à des sollicitations de nature sismique. Dans ce cas, en plus des effets associés à la flexion et à la torsion selon les axes longitudinal et transversal, s'ajoute la flexion dans le plan du tablier.

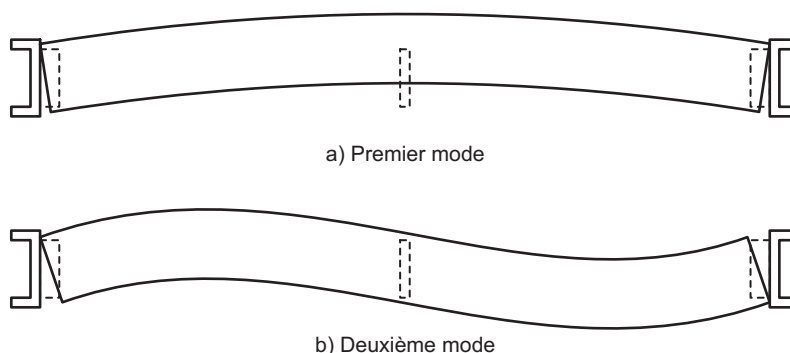


Figure 2 – *Déformations en plan du tablier induites par les sollicitations sismiques*

Le but de la modélisation est de reproduire les phénomènes régissant le comportement des tabliers afin de déterminer les efforts globaux dans les éléments en vue de leur dimensionnement ou de leur évaluation. Les modes de déformation illustrés aux figures 1 et 2 doivent pouvoir être reproduits le plus fidèlement possible par le modèle choisi.

Lorsqu'une modélisation par éléments finis est réalisée, la sélection du type d'éléments et la finesse du maillage nécessitent des choix judicieux. L'utilisation d'éléments de solide est recommandée pour représenter les éléments massifs alors que des éléments de plaque et coque ou de poutre sont recommandés pour la modélisation de pièces élancées. Le choix du type d'éléments est dicté par l'expérience sans nécessairement faire des études de sensibilité sur la finesse du maillage. Cependant, il est recommandé pour les personnes moins expérimentées de faire des études de sensibilité sur la taille et le type d'éléments avant de s'attaquer à des problèmes de grande envergure.

Bien que les éléments finis représentent plus justement les systèmes structuraux, l'interprétation des résultats est souvent problématique due au très grand nombre de résultats. De plus, l'application des codes et normes pour le calcul de la résistance demande la détermination d'efforts globaux alors que très souvent les éléments finis procurent des contraintes ou des efforts par unité de longueur. Une intégration numérique, souvent laborieuse, est alors nécessaire. Dans le cas de charges mobiles, il est habituellement impossible de réaliser des analyses par éléments finis, la quantité d'information étant trop grande. L'utilisation de grillage devient ainsi beaucoup plus attrayante, étant plus près des besoins des ingénieurs. C'est d'ailleurs cette approche qui est privilégiée.

NOTATION UTILISÉE POUR LES ANALYSES DE GRILLAGE

Les avantages indéniables associés à la modélisation par la méthode du grillage nécessitent cependant de porter une grande attention au calcul des propriétés des poutres formant le modèle. Les grillages sont constitués de poutres disposées selon les axes longitudinal et transversal pour représenter les propriétés des tabliers ainsi, lorsque requis, selon des plans verticaux. La figure 3 présente un modèle typique de grillage plan.

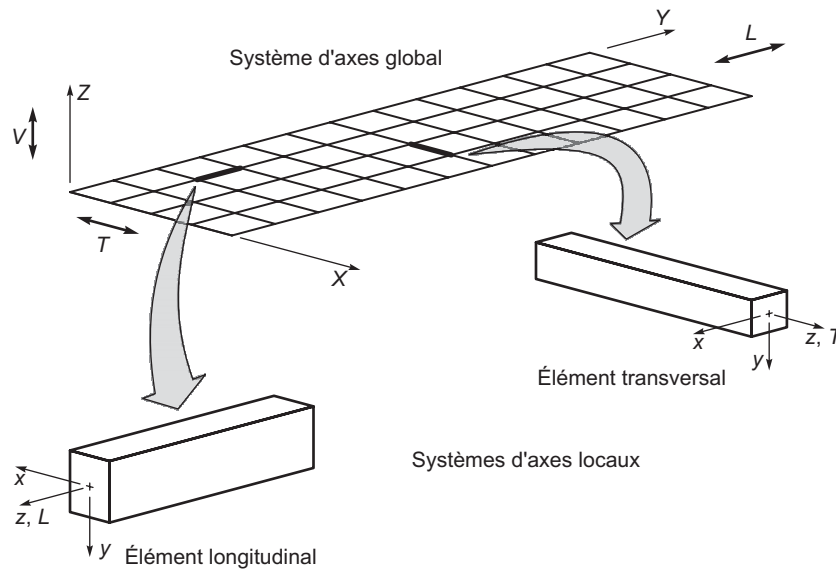


Figure 3 – Grillage typique et notation

Pour les grillages destinés essentiellement à l'analyse des tabliers de ponts de type poutre, il est naturel d'établir une notation et un système de référence propre à ce contexte précis. L'axe du tablier parallèle au sens de la circulation est identifié comme *axe longitudinal*, l'indice L étant utilisé dans la notation. De manière similaire, l'axe perpendiculaire à l'axe longitudinal est appelé *axe transversal*, l'indice T étant utilisé. Ces axes serviront à identifier et différencier les éléments orientés selon ces deux axes et à identifier les propriétés associées. La direction *verticale* sera identifiée par l'indice V . Dépendamment du logiciel choisi, les axes globaux du modèle, dénotés X , Y et Z ici, pourront être orientés selon les préférences des utilisateurs ou les exigences des logiciels, sans interférer avec la notation adoptée pour les axes longitudinaux et transversaux. Pour les ponts courbes ou les ponts à géométrie complexe, l'axe L épouse le tracé du tablier, alors que l'axe transversal lui est perpendiculaire.

La figure 4 montre les efforts agissant sur les éléments de grillage alors que le tableau 1 associe les propriétés à ces efforts.

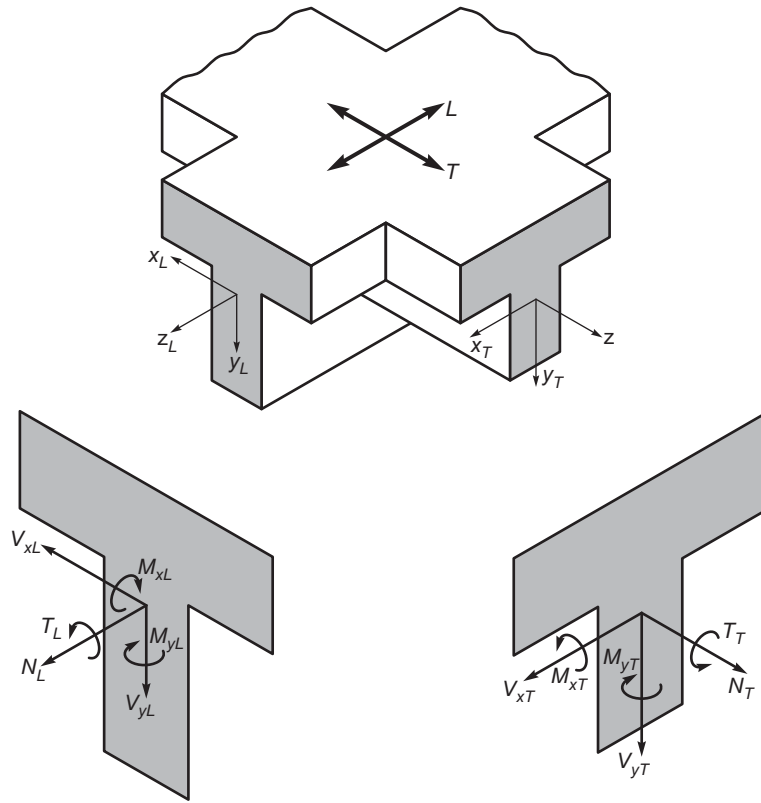


Figure 4 – Efforts agissant sur les éléments de grillage

Tableau 1 – Association des efforts et propriétés des grillages

Description	Éléments longitudinaux		Éléments transversaux	
	Effort	Propriété	Effort	Propriété
Aire	N_L	A_L	N_T	A_T
Inertie torsionnelle	T_L	J_L	T_T	J_T
Inertie autour de l'axe horizontal	M_{xL}	I_{xL}	M_{xT}	I_{xT}
Inertie autour de l'axe vertical	M_{yL}	I_{yL}	M_{yT}	I_{yT}
Aire en cisaillement vertical	V_{yL}	A_{yL}	V_{yT}	A_{yT}
Aire en cisaillement horizontal	V_{xL}	A_{xL}	V_{xT}	A_{xT}

VÉRIFICATION DE LA JUSTESSE DES MODÈLES

La vérification de la justesse des modèles est une étape cruciale qui doit systématiquement être réalisée pour tous les modèles. Les principales sources d'erreurs difficilement détectables sont la mauvaise connectivité des éléments et les erreurs d'attribution de propriétés. À ceci s'ajoute la difficulté de bien modéliser les conditions aux limites des modèles.

Plusieurs techniques peuvent être empruntées pour réaliser la validation des modèles. L'approche proposée ici constitue un minimum. La procédure consiste à appliquer différents cas de chargement dont les réponses peuvent être validées manuellement. À cet effet la figure 5 illustre quelques cas types : deux cas de chargement symétrique et un cas de chargement dissymétrique. Avec les deux premiers, des réactions d'appuis et les efforts internes symétriques doivent être retrouvés pour des structures symétriques. Le cas non symétrique sera utile surtout pour les modèles 3D car il induit des efforts de torsion qui produisent généralement des réactions d'appuis horizontales parasites issues de la distorsion du tablier.

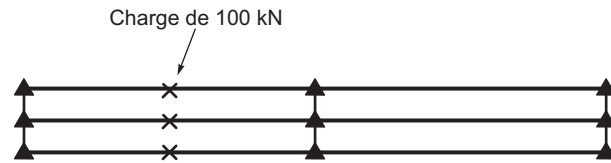
Le chargement S1 permet de vérifier la rigidité en torsion du modèle. Dans ce cas les appuis sont libérés sur toute la structure à l'exception de la section centrale. Pour les modèles 3D, il est requis de ne retenir le tablier qu'en un seul point car le gauchissement en torsion induit une rigidité torsionnelle additionnelle difficile à déterminer par un calcul manuel. Ce phénomène est absent des modèles 2D.

Enfin le dernier cas de chargement permet à la fois de vérifier la rigidité flexionnelle et la masse du pont par la vérification de la première fréquence naturelle de vibration. Pour les structures dont les longueurs des portées varient, il est souvent plus simple d'éliminer les appuis intermédiaires et de comparer la réponse du modèle à la valeur obtenue de calculs simples assumant une inertie moyenne constante, exprimée par l'équation suivante pour la première fréquence de vibration :

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (1)$$

CONCLUSION

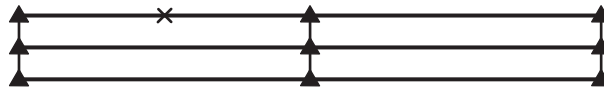
La justesse des analyses demande la sélection d'hypothèses de calcul rigoureuses et vérifiables. Il est ainsi préférable d'utiliser des modèles simples mais fidèles à la réalité, qui permettent à l'ingénieur de comprendre les comportements et d'user de son jugement, plutôt que des modèles complexes qui peuvent cacher des inexactitudes qui ne seront pas moins graves parce qu'elles sont en couleur. Le choix juste n'est pas aisé. C'est à ce titre que le présent article a tenté d'établir le cadre d'une discussion qui ne fait que s'amorcer.



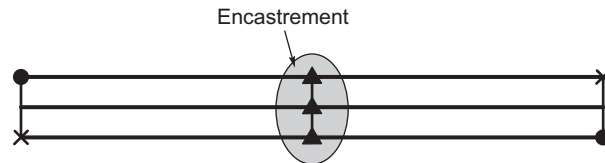
a) Cas #1: charges sur les 3 poutres à mi-portée de la travée 1



b) Cas #2: charges sur les 3 poutres à mi-portée de la travée 2



c) Cas #3: charge sur la poutre de rive à mi-portée de la travée 1



d) Cas S1: torsion de l'ensemble du tablier par rapport à l'axe central



e) CasS2: première fréquence naturelle

Figure 5 – Exemples de chargements pour la vérification des modèles