COMPORTEMENT DES PONTS DE TYPE DALLES PLEINES EN BÉTON ARMÉ

David Conciatori Associé de recherche **Bruno Massicotte** Professeur titulaire **Patrick Théorêt** Étudiant à la maîtrise

Groupe de recherche de génie des structures École Polytechnique de Montréal C.P. 6079. Succursale Centre-ville Montréal (Québec), H3C 3A7

RÉSUMÉ : Un projet de recherche en cours à l'École Polytechnique de Montréal vise l'amélioration des connaissances sur le comportement des dalles épaisses de ponts avec ou sans biais dans le but d'en faire une évaluation et une conception plus juste. Des études par éléments finis linéaires et non-linéaires, ainsi qu'une étude paramétrique par la méthode de grillage ont été réalisées afin de bien cerner le comportement réel de ce type de pont.

Cet article identifie les effets d'augmentation des contraintes dans la dalle dus à la géométrie de la dalle (les effets de biais) et également dus aux déformations du béton par flexion anticlastique (déformation par l'effet de la loi de Poisson). L'article présente les principaux résultats du projet de recherche dont l'objectif principal est de montrer la provenance et les raisons physiques de l'apparition de ces contraintes supplémentaires. En deuxième partie, le développement de ces contraintes est mis en exergue en fonction du développement de la fissuration dans la dalle sous charges variables.

PROBLÉMATIQUE

Les ponts à dalles épaisses sont des ouvrages en béton armé de petites portées jusqu'à environ 20 mètres pour les portées simples. Si l'ouvrage reste modeste dans ses dimensions, il est intéressant de noter que son érection est omniprésente sur le territoire québécois. Ces ouvrages permettent de franchir des routes secondaires en passage inférieur, des chemins forestiers, des ruisseaux, des rivières, des canaux, des plans d'eau et d'autres obstacles de petites dimensions. La nature géométrique de ces obstacles impose une finition particulière à ces dalles épaisses et l'on différencie les dalles droites rectangulaires des dalles biaises. Le biais d'une dalle se définit par l'angle observé depuis une culée en direction du trafic réel jusqu'à une direction perpendiculaire à la culée. À première vue, le cheminement des forces d'une telle dalle, appuyée sur deux bords opposés, parait très simple. Il s'agit du comportement d'une dalle unidirectionnelle où la flexion est le principal vecteur de dimensionnement de la structure. Cependant, une concentration de contrainte apparaît sur les coins et sur les bords libres de ces dalles droites ou biaises. La modélisation de cette dalle avec les éléments finis sous forme de plaque ou en solide met en évidence ces concentrations de contrainte. Les normes canadiennes proposent des dispositions constructives, soit d'ajouter une armature additionnelle dans la zone supérieure de la dalle de ces zones de concentration de contrainte. Ceci semble bien régler la situation pour la flexion. Toutefois la récente catastrophe survenue à Laval le 30 septembre 2006 suscite de nouvelles

^{17&}lt;sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art Université Laval, mai 2010

questions. Ainsi, l'ingénieur civil est à même de se demander de la pertinence de l'existence d'une telle concentration de contrainte, de son effet sur l'état de service de l'ouvrage, de la procédure de dimensionnement et de son effet à la rupture.

INTRODUCTION

Lorsqu'une dalle rectangulaire, simplement appuyée sur ces 4 côtés, est analysée avec un modèle plaque en élément fini, des concentrations de contraintes (flexion, effort tranchant, réaction d'appui, torsion) apparaissent dans les coins. Dans cet exemple, la concentration de contrainte peut se visualiser sous forme de pic de contraintes localisé dans le coin de la dalle et est appelée dans ce document effet de coin.

EFFETS DE COIN

L'effet de coin, apparaissant sur les dalles sans biais, se compose de l'effet dû à la flexion anticlastique. Pour les dalles avec biais, l'effet de coin est augmenté par un effet géométrique du biais accentuant l'effet de coin du côté des bords de la dalle formant un angle obtus.

La quantification de l'effet de coin est obtenue par calcul en prenant en considération la réaction d'appui le long du bord de la dalle. Elle est définie par le rapport de la réaction d'appui unitaire sur l'appui par la réaction d'appui sur le bord étudié. Ce résultat adimensionnel de l'effet de coin met en évidence l'importance de l'effet de coin, représenté par la flexion anticlastique et la géométrie de la dalle. Ainsi, lorsque sa valeur est supérieure à 1, son effet est important et aucun effet s'il est égal à 1.

Pour les dalles sans biais, l'effet de coin se compose d'un effet dû à l'empêchement du développement de la déformation anticlastique au niveau des appuis alors que pour les dalles biaises, l'effet de coin se compose d'un effet dû à l'empêchement du développement de la déformation anticlastique au niveau des appuis auquel s'ajoute l'effet de la géométrie de la dalle épaisse.

L'effet de coin est analysé dans cette section avec des modèles linéaires pour mettre l'accent sur leur définition physique et mieux connaître son influence par rapport à la géométrie d'une dalle ou de ses appuis. Les résultats affichés ont été simulés pour une dalle épaisse sollicitée par une charge uniforme. Lorsque les dimensions ne figurent pas sur les graphiques, leurs valeurs s'élèvent à 0.50m pour l'épaisseur de la dalle, 12m pour la longueur transversale de la dalle et 10m pour la portée de la dalle. Les simulations ont été effectuées en analyse linéaire avec des éléments plaques et éléments solides en 3D.

Flexion anticlastique

L'effet de coin apparaît sur toutes les structures constituées d'un matériau obéissant à la Loi de Poisson, c'est-à-dire tous les matériaux existants. Avec la loi de Poisson, une déformation transversale s'observe lors d'une sollicitation en état plan de contrainte. Une dalle, appuyée sur deux bords opposés, se comporte de façon unidirectionnelle par rapport à une sollicitation

verticale. Une déformation flexionnelle provoque un allongement de la fibre inférieure et un raccourcissement de la fibre supérieure de la dalle. Si la fibre inférieure s'allonge et que le matériau retient la loi de Poisson, il apparaît un raccourcissement transversal de la dalle. Dans le même ordre d'idée, un raccourcissement flexionnel de la fibre supérieure provoque un allongement transversal de dalle. Ainsi lorsque la dalle est posée sur deux appuis très peu rigide (coefficient de ressort faible), il apparaît une déformation flexionnelle dans la direction transversale inverse à déformation flexionnelle principale (Figure 1). Cette déformation flexionnelle transversale s'appelle la flexion anticlastique.



Figure 1 – Effet anticlastique des dalles (Timoshenko and Woinowsky-Krieger 1959).

En réalité, cette flexion anticlastique n'apparaît pas sous forme de déformation de par les appuis rigides. Lorsque la dalle repose en continu sur un bord (appui rigide), la flexion anticlastique est empêchée et il se développe ainsi des concentrations de contrainte (appelé effet de coin) sur les coins de la dalle au niveau de l'appui rigide.

La question se pose de savoir si l'appui est suffisamment rigide pour ne développer aucune flexion anticlastique. Il est possible d'observer une déformation anticlastique d'une dalle lorsque nous posons une dalle épaisse sur des appuis ayant un coefficient de ressort s'élevant à 30×10^3 kN/m². L'effet de coin obtenu dans cet exercice vaut 1.2, ce qui signifie que le ressort est suffisamment flexible pour mettre en évidence la flexion anticlastique. Lorsque le coefficient de ressort est augmenté à 4.68×10^6 kN/m², l'effet de coin est augmenté à 2.2. Ce dernier coefficient de ressort correspond à une culée en béton de 1m x 1m (largeur x hauteur) et d'une longueur correspondant à la longueur transversale de la dalle. Finalement, lors du remplacement d'un appui à ressort par un appui infiniment rigide (appui simple), l'effet de coin demeure à 2.2 (Tableau 1). Ce dernier résultat indique que les appuis ou les culées sont très rigides et jamais souples au point de diminuer l'effet de coin.

Tableau 1 – Effet de coin en fonction de la rigidité des appuis.

Coefficient de	Effet de			
ressort (kN/m ²)	coin (-)			
30×10^{3}	1.2			
4.68×10^{6}	2.2			
∞ (appui rigide)	2.2			

^{17&}lt;sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art Université Laval, mai 2010

Poutre versus dalle

L'effet de coin est également négligeable pour les poutres. Son influence devient visible lorsque la largeur de la poutre atteint le quart de la portée (Figure 2). Lorsque ces dimensions sont présentes, une telle structure est appelée dalle. Ainsi, seules les dalles sont influencées par l'effet de coin. L'effet de coin augmente avec un accroissement de la largeur transversale de la dalle. Cet accroissement atteint un plafond lorsque la largeur transversale correspond à la portée de la dalle (Figure 2).



Figure 2 – Effet de coin des poutres et des dalles droites (3D solide).

Géométrie de la dalle

L'effet de coin est fortement influencé par le biais de la dalle. L'augmentation de contrainte atteint 12x la contrainte moyenne sur le coin de la dalle pour une dalle avec un biais de 60° alors qu'elle atteint 2x pour une dalle droite (dalle avec une largeur transversale de 12m). L'effet de coin maximal apparaît sur le coin à angle obtus de la dalle. Par contre, la portée n'influence pas l'effet de coin (Figure 3a).



Figure 3 - Effet de coin des dalles épaisses a) portée et biais (3D solide), b) rigidité (2D plaque).

La rigidité de la dalle est représentée par l'épaisseur de la dalle. Une faible rigidité augmente l'effet de coin tandis qu'une grande rigidité diminue cet effet (Figure 3b). La pertinence de cette affirmation démontre que les analyses suivent bien le comportement théorique de l'état plan de contrainte.

Le type d'appui influence également l'effet de coin. Le blocage de la rotation torsionnelle sur appui diminue sensiblement l'effet de coin (Figure 3b). L'encastrement des appuis diminue, voire annule pour des ponts dalle avec un biais inférieure à 10°, l'effet de coin. Cette diminution est conséquente puisque l'effet de coin diminue de moitié pour des dalles biaises supérieures à 45° (Figure 4a). Ainsi rendre solidaire les appuis de la dalle permet de réduire de façon importante les concentrations de contrainte.



Figure 4 – Effet de coin des dalles épaisses a) encastré et appui simple (3D solide), b) coefficient de Poisson (3D solide).

La géométrie de la dalle épaisse joue un rôle important sur l'effet de coin. Pour enlever toutes contraintes supplémentaires dues à la flexion anticlastique, il suffit d'utiliser un matériau n'obéissant pas à la Loi de Poisson (y=0). Pour une dalle sans biais, il n'y a pas d'effet de coin, puisque sa valeur vaut un. Lorsque l'on augmente la valeur du biais de la dalle l'effet de coin augmente, mettant ainsi en évidence l'influence géométrique sur l'effet de coin. Lorsque le coefficient de Poisson n'est plus négligé, l'effet de coin enregistré se développe proche d'une parallèle à cette dernière et de affiche un effet de coin plus important (Figure 4b).

Concentration de contrainte sur appui

Le pic apparaît dans la zone du coin de la dalle (Figure 5a). Cette concentration de contrainte s'étend localement sur une longueur d'influence correspondant à environ $\frac{1}{2}$ (ou β) fois l'épaisseur de la dalle pour tous les types dalles biaises ou non (Figure 5b). La longueur d'influence est la longueur se développant sur le bord de la dalle appuyée depuis le coin de dalle jusqu'au lieu géométrique où la valeur de l'effet de coin vaut 1.

^{17&}lt;sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art Université Laval, mai 2010



Figure 5 – Effet de coin des dalles épaisses a) zone d'influence, b) distance β adimensionnelle en fonction de l'épaisseur de la dalle.

Concentration de contrainte sur le bord libre

La concentration de la contrainte sur le bord libre est illustrée avec la valeur de l'effort tranchant évaluée sur le bord libre (d = 0mm), à une distance respective de 50mm, d'une demi-épaisseur de dalle (d=h/2) et d'une épaisseur de dalle (d=h). Il n'y a pas d'atténuation de l'effet de coin sur le bord libre (d = 0mm). Lorsque la distance depuis le bord libre croît, la valeur de l'effort tranchant se stabilise sur la valeur de l'effort tranchant moyen (en rouge sur la Figure 6). Ceci montre une similitude par rapport au paragraphe précédent (concentration de contrainte sur appui) que cette concentration de contrainte diminue très rapidement dans la direction transversale.





Zone d'influence pour un effet de coin maximale

La zone d'influence a été étudiée en plaçant un déplacement unitaire sur la dalle dans le coin où l'effet de coin se produit sous les charges uniforme (Figure 7). La partie grise claire et colorée représente un déplacement positif et la partie noire représente un déplacement dans l'autre direction. Aussi, la disposition des charges peuvent être placées sur les zones colorées pour produire les effets de coin les plus importants.

^{17&}lt;sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art Université Laval, mai 2010

Ainsi, par exemple, la charge des essieux peut être disposée dans la zone d'influence la plus défavorable pour un effet de coin maximal. A partir des résultats de la zone d'influence (Figure 7), le positionnement critique des essieux sur la dalle est évalué avec des essieux de camion type CL-625. La déformée de la dalle est reconstituée avec une méthode d'interpolation de type krigeage. Puis le passage d'un ou deux camions est simulé sur une ou deux voies dans les deux directions (de l'est vers l'ouest et de l'ouest vers l'est. Un facteur de 0.9 est appliqué sur les charges lorsque deux camions sont présents simultanément sur deux voies.



Figure 7 – Ligne d'influence sous un déplacement unitaire du coin en bas à droite de la dalle épaisse a) sans biais, b) biais de 15°, c) biais de 30°, d) biais de 45° et e) biais de 60°.

Par cette méthode, les coordonnées de la position des essieux du camion sont obtenues pour obtenir un effet de coin maximal. L'origine de l'axe se trouve au centre de la dalle et les coordonnées (Tableau 2) correspondent à la position du centre de chaque essieu du camion.

ANALYSE NON-LINÉAIRE

L'analyse non-linéaire est investie au travers un logiciel ABAQUS 6.8.3 permettant de résoudre des problèmes avec la méthode des éléments finis en 3D. Les matériaux utilisés dans ABAQUS constituent la non-linéarité du problème. L'acier d'armature est caractérisé par un comportement élastoplastique. Le béton est caractérisé par comportement hypo-élastique en compression (Bouzaine et Massicotte 1997) et linéaire en traction avec un comportement adoucissant (Field and Bischoff 2004).

Comportement de la dalle épaisse en flexion

Le comportement des dalles épaisses en flexion est mis en évidence avec l'application d'une charge uniforme sur tout le plan de la dalle (Figure 8a). Une première fissure transversale apparaît au centre de la portée et, par la suite, il se développe à intervalle régulier d'autres fissures en fonction de l'augmentation de la charge uniforme. La rupture apparaît par écrasement du béton sur la section à mi-travée (Figure 8b).

a)







Figure 8 – a) Représentation d'un cas de charge uniforme b) Rupture par écrasement du béton sur une dalle épaisse biais 30°.

^{17&}lt;sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art Université Laval, mai 2010

Biais	L	NoE	x (m)	z (m)	Biais	L	NoE	x (m)	z (m)
0 °	7	1	-2.57	4.05					
		2	1.03	4.05					
		3	2.23	4.05					
	10	1	-1.49	4.05					
		2	2.11	4.05					
		3	3.31	4.05	45 °	7	1	-1.45	4.05
	15	2	5.02	4.05			2	-5.05	4.05
		3	3.82	4.05			3	-6.25	4.05
		4	-2.78	4.05		10	1	-8.68	4.05
15°	7	1	-4.176	4.05			2	-5.08	4.05
		2	-0.563	4.05			3	-3.88	4.05
		3	0.624	4.05			1	0.51	0.35
	10	1	-3.836	4.05			2	-3.09	0.35
		2	-0.236	4.05			3	-4.29	0.35
		3	0.964	4.05		15	1	2.01	4.05
	15	2	3.444	4.05			2	-1.59	4.05
		3	2.244	4.05			3	-2.79	4.05
		4	-4.356	4.05			4	-9.39	4.05
		1	2.025	0.35			1	0.21	0.35
		2	-1.575	0.35			2	-3.39	0.35
		3	-2.775	0.35			3	-4.59	0.35
30 °	7	1	-6.358	4.05	60°	7	2	-12.074	4.05
		2	-2.758	4.05			3	-10.874	4.05
		3	-1.558	4.05			4	-4.274	4.05
	10	1	-5.718	4.05		10	2	-12.014	4.05
		2	-2.118	4.05			3	-10.814	4.05
		3	-0.918	4.05			4	-4.214	4.05
		1	1.488	0.35		15	1	-4.674	4.05
		2	-2.112	0.35			2	-8.274	4.05
		3	-3.312	0.35			3	-9.474	4.05
	15	1	4.972	4.05			4	-16.074	4.05
		2	1.372	4.05			1	-2.075	0.35
		3	0.172	4.05			2	-5.675	0.35
		4	-6.428	4.05			3	-6.875	0.35
			1.328	0.35					
		2	-2.272	0.35					
		3	-3.472	0.35					

Tableau 2 – Coordonnées de l'axe des essieux du camion, L : portée en mètre, noE : no d'essieu.

L'analyse flexionnelle des dalles montre une diminution de l'effet de coin en fonction de l'augmentation de la charge uniforme. L'effet de coin n'atteint jamais la valeur unitaire, impliquant la subsistance d'un léger effet de coin lorsque la dalle se rompt par flexion. Le développement d'un patron de fissuration en partie inférieure de la dalle se rapprochant des appuis avec l'augmentation de la charge provoque une diminution de l'effet de coin. L'absence de fissuration sur le coin, lieu géométrique de la concentration de contrainte, implique qu'il demeure ce léger effet de coin lors de la rupture de la dalle par flexion (Figure 9).

^{17&}lt;sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art Université Laval, mai 2010



Figure 9 – Effet de bord sous charge uniforme pour une dalle sans biais.

CONCLUSIONS

(1) Pour les dalles sans biais, l'effet de coin se compose d'un effet du à l'empêchement du développement de la déformation anticlastique au niveau des appuis. Pour les dalles avec un biais, l'effet de coin se compose d'un effet du à l'empêchement du développement de la déformation anticlastique au niveau des appuis et de la géométrie de la dalle épaisse.

(2) Le biais induit une augmentation conséquente de l'effet de coin. Par exemple, la réaction d'appui dans le coin augmente de 2 et de 11 fois la réaction d'appui moyenne pour respectivement des dalles sans biais et dalles avec un biais de 60°.

(3) La concentration de contrainte est un phénomène localisé. Sur l'appui et sur le bord libre, elle se concentre sur une distance correspondant à environ une demi-fois l'épaisseur de la dalle.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été réalisée grâce à l'appui financier du Ministère des Transport du Québec (MTQ) et du Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB).

RÉFÉRENCES

BOUZAIENE, A. AND MASSICOTTE B. 1997. *Nonlinear finite element analysis of R/C bridges*, Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering, v 7, p 301-310, 1997, Structures - Design, Concrete and Reinforced Concrete Structures, Bridges.

FIELDS, K. AND BISCHOFF, P.H., 2004. *Tension stiffning and cracking of high strength reinforced concrete tension members*, ACI Structural Journal, 101(4):447-456.

^{17&}lt;sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art Université Laval, mai 2010

KANI, M. W., HUGGINS, M. W., WITTKOPP R. R., 1979. Kani on Shear in reinforced concrete, Department of civil engineering, University of Toronto Press, ISBM 0-7727-7001-8.

TIMOSHENKO AND WOINOWSKY-KRIEGER, 1959. *Theory of plates and shells*, Second Edition, McGraw-Hill Book Compagny, Inc., New York, Toronto, London, Library Catalog Card Number 58-59675.

^{17&}lt;sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art Université Laval, mai 2010