MODELE DALLE + POUTRES POUR LE CALCUL DES PONTS

A. BOUBERGUIG
Ingénieur Civil EPFL (*) (Suisse) Docteur es Sciences
S. ROSSIER
Ingénieur Civil EPFL (*) (Suisse) Docteur es Sciences

L'ingénieur est très souvent confronté au calcul des ponts constitués d'une dalle et de poutres excentrées. Ces poutres peuvent être préfabriquées, coulées sur place ou en métal (pont mixte). Le modèle décrit dans cet article, offre un compromis entre le calcul trop simplifié en poutre continue ou grillage de poutres et celui trop complexe des éléments finis "coques". Par ailleurs, il offre l'avantage de fournir des résultats directement exploitables par l'ingénieur. Parmi ces résultats, on citera essentiellement la flexion longitudinale et transversale, la torsion et les efforts tranchants. Pour cela, le modèle doit assurer la compatibilité complète entre les déformations de la dalle et celles des poutres. Cette condition est essentielle, parce qu'elle assure l'obtention de résultats suffisamment précis pour être représentés automatiquement sous une forme graphique directement exploitable par l'ingénieur.

Mots clés : Ponts • grillage de poutres • dalle • flexion • modèle dalle • éléments finis.

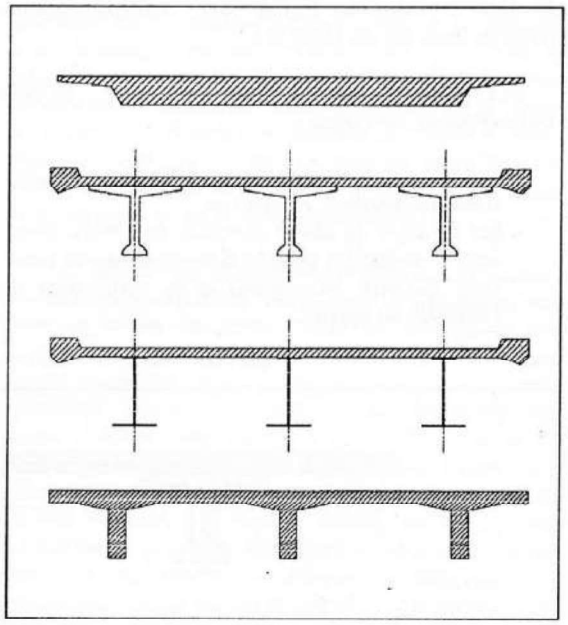


Figure 1 : Exemple de ponts pouvant être calculés en dalle + poutres.

1 INTRODUCTION

Une grande partie des ponts courants sont basés sur un système statique constitué d'une dalle posée sur des poutres maîtresses. Cela concerne essentiellement les ponts-dalle sur poutres préfabriquées ou métalliques (ponts mixtes) (Figure 1), mais également les ponts coulés sur place.

Les modèles de calcul généralement utilisés ne donnent pas entière satisfaction et les résultats souvent difficiles à interpréter. La "grille de poutres", modèle le plus connu, nécessite un travail préliminaire de calibrage. Cela concerne essentiellement l'inertie des barres transversales et la conversion des charges réparties en charges linéaires. Au niveau des résultats, la flexion transversale, les moments de torsion et les efforts tranchants sont très difficiles à interpréter. Ces problèmes se font particulièrement aigus dans le cas de pont biais ou courbes ([1] chap. 9).

A l'opposé, un calcul en poutre continue est plus simple d'utilisation, mais ne permet aucune analyse transversale de l'ouvrage.

(*) EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausane.

Le modèle **Dalle+Poutres** proposé ici permet, de façon simple et directe, de tenir compte en même temps des effets longitudinaux et transversaux. Il est composé d'éléments Dalle et de Nervures.

Les résultats des déplacements et des efforts sont donc directement utilisables par l'ingénieur. Par ailleurs, la formulation des données est particulièrement simple puisqu'on évite la "conversion" de la dalle en poutre équivalente. Les charges sont introduites directement sur la dalle, sans qu'il soit nécessaire de les convertir en charges linéaires équivalentes.

Les éléments finis utilisés par le logiciel MAPS, que ce soit dans le modèle Coque Nervurée ou le modèle Dalle+Poutres, sont des éléments superparamétriques basés sur la théorie de Mindlin (prise en compte des déformations dûes à l'effort tranchant).

La comptabilité des déformations est assurée en tout point de la surface de contact coque-nervure (resp. dalle-poutre) et non pas seulement aux nœuds, ce qui explique la qualité des résultats obtenus (efforts) dans les nervures [2].

Les deux grands avantages du modèle Dalle+Poutres sont donc :

- une grande simplicité de modélisation de structures relativement complexes.
- des résultats de calcul complets et fiables, directement utilisables pour le dimensionnement structural (sécurité structurale) et la vérification de l'aptitude au service.

Afin de démontrer la validité et le bon comportement de ce modèle, une comparaison détaillée par rapport à un calcul en Coque avec Nervures Excentrées est effectuée ci-après.

2 DESCRIPTION DU MODELE DE CALCUL

Les figures 2 et 3 montrent les deux modèles de calcul utilisés dans cette étude.

Le modèle Coque (à gauche) traduit d'une façon rigoureuse le comportement de la structure. Le tablier du pont subit des efforts de dalle (flexion). Les poutres maîtresses sont excentrées et modélisées telles quelles, induisant dans le tablier (efforts normaux, et de cisaillement).

Certaines simplifications sont faites dans le modèle Dalle+Poutres (à droite). Le tablier et les poutres travaillent uniquement en flexion (aucun effet membranaire). D'autre part les poutres sont modélisées en tenant compte de la largeur de participation de la dalle supérieure. Ainsi, les efforts membranaires dans le tablier signalés dans le modèle coque sont repris par la zone participante de dalle introduite ici dans la poutre. Il est important de se rappeler que le concept de largeur de participation est basé sur l'hypothèse que l'effort normal est constant sur la largeur de la table de compression.

3 HYPOTHESES DU MODELE DALLE+POUTRE

La poutre n'est pas excentrée.

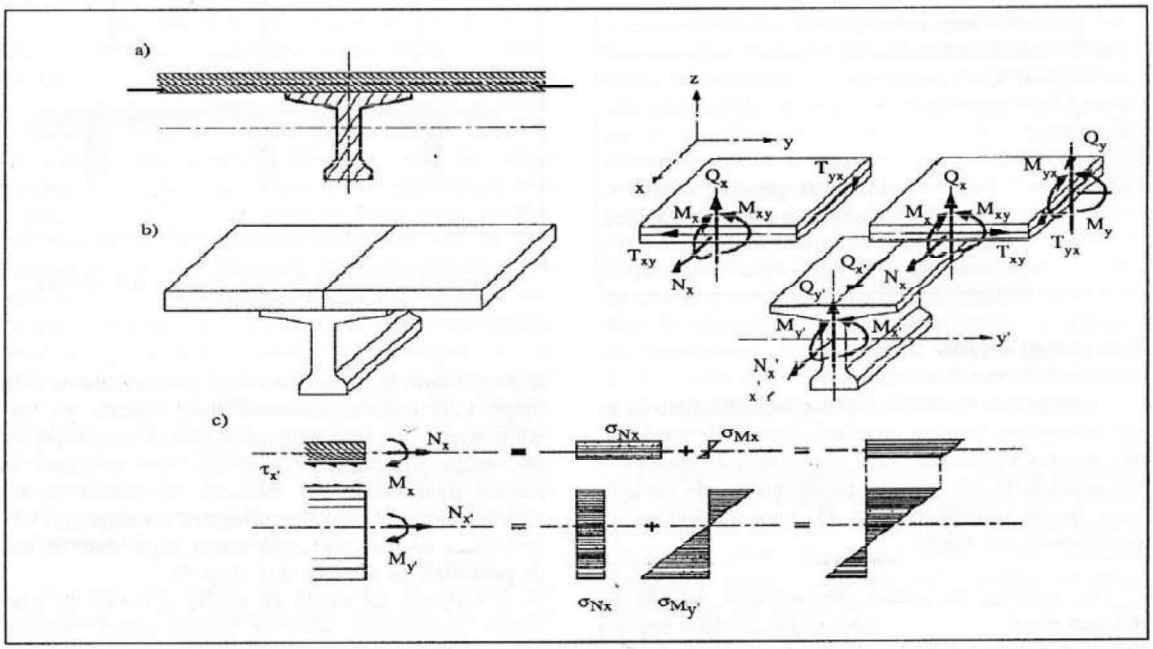


Figure 2 : Principe du modèle Coque Nervure : modèle (a), effort dans la coque et dans la nervure (b) et contraintes dans une coque transversale.

Son centre de gravité coïncide avec le feuillet de la dalle. La présence de nervures excentrées dans un modèle de calcul en dalle n'est pas envisageable puisqu'elle engendrerait des efforts membranaires dans la dalle, laquelle par définition ne travaille qu'en flexion. En fait l'excentricité des poutres maîtresses est prise en compte par l'introduction de la largeur de participation, comme décrit dans la figure 3.

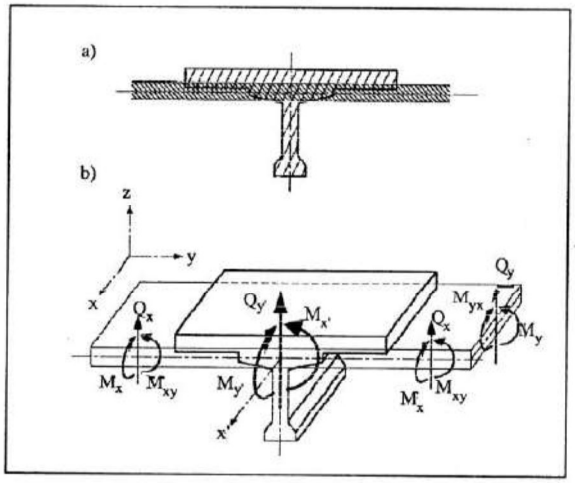


Figure 3 : Principes du modèle Dalle+Poutres : modèle statique (a) ainsi que les efforts dans la dalle (b).

Certaines zones de la dalles sont prises en compte deux fois.

Comme on peut le voir dans la figure 3a (en haut) la largeur de participation de la dalle apparaît deux fois : une fois dans la dalle elle-même et une fois dans la poutre.

Le programme effectue automatiquement les corrections nécessaires pour que le poids propre de la largeur de participation ne soit pris en compte qu'une fois.

En ce qui concerne la rigidité flexionnelle du système, un rapide calcul permet de se rendre compte que le surplus de rigidité introduit par le dédoublemet de la dalle est négligeable. En effet, si on prend la section correspondante à l'exemple 1 (Figure 4) avec une largeur de participation de 4m, on constate que l'inertie propre de la dalle comptée en trop, ne représente que 2% de l'inertie de la poutre maîtresse.

4 EXEMPLES NUMERIQUES

Deux exemples sont traités ci-après. Le premier est un pont-dalle biais avec trois poutres maîtresses sur trois travées pour lequel on compare les résultats d'un calcul en Coque et ceux d'un calcul par le modèle Dalle+Poutre. Le deuxième exemple est un pont existant pour lequel on compare les résultats des deux mêmes modèles de calcul avec des mesures effectuées lors d'essais de charge.

4.1 Pont-dalle biais

Les figures 4 et 5 décrivent la géométrie, le réseau et les charges appliquées. Le matériau pour tous les éléments (dalle et poutres) est un béton avec E_c = 34 kN/mm^2 et ν = 0.167.

Les bordures longitudinales du tablier sont négligées.

La section des poutres longitudinales est donnée dans la figure 4. Les deux entretoises sont rectangulaires, de même hauteur que les poutres maîtresses et de 0.6m d'épaisseur. L'emplacement des différentes nervures est indiqué en gras à la figure 4.

Les deux cas de charges traités sont :

1/ poids propre avec γ = 25 kN/m^3 pour tous les éléments de la structure.

2/ surcharge q = 10 kN/m^2 sur la zone hachurée de la figure 5.

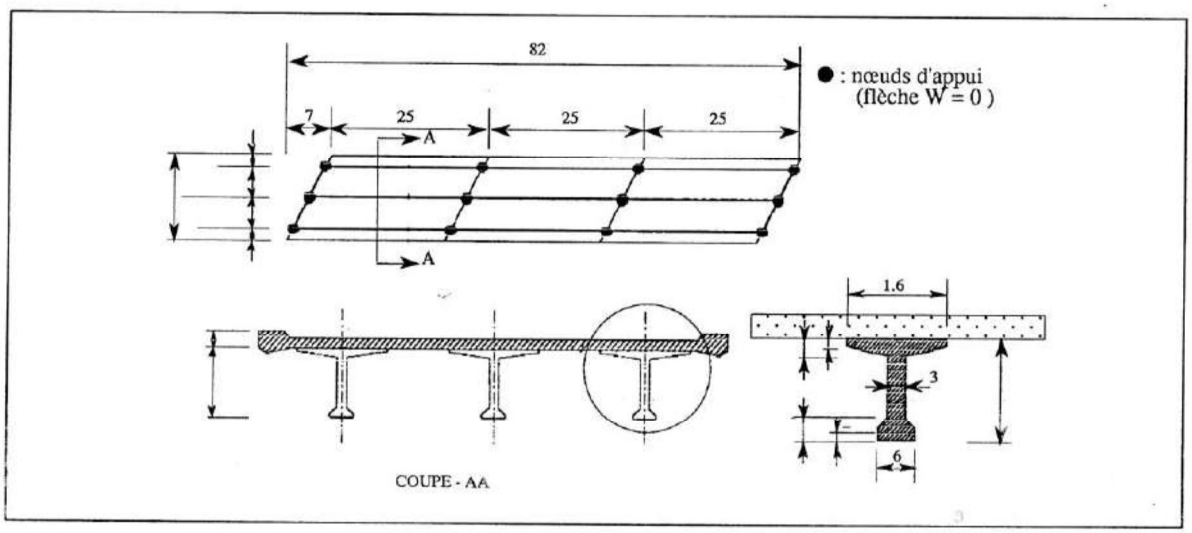


Figure 4 : Géométrie du pont dalle biais.

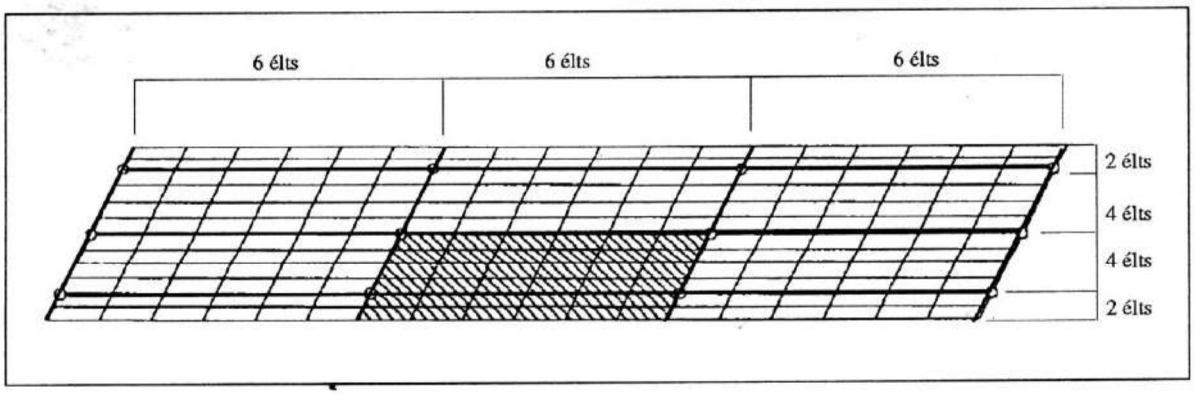


Figure 5 : Réseau d'éléments finis utilisé pour les deux modèles de calcul. Les deux cas de charge considérés sont : 1) poids propre $\gamma = 25$ KN/m^3
2) surcharge sur zone hachurée q = 10kN/m^2.

4.1.1 Comparaison des flèches

Les figures 6 et 7 montrent l'allure des déformées des deux modèles de calcul sous forme de courbes de niveau. Les modèles coque et dalle+poutres donnent des flèches maximales de 8.005mm (resp. 7.920mm) pour le cas de charge 1 (poids propre). L'écart est donc d'environ 1%. Toutes les valeurs sont récapitulées dans le tableau 1.

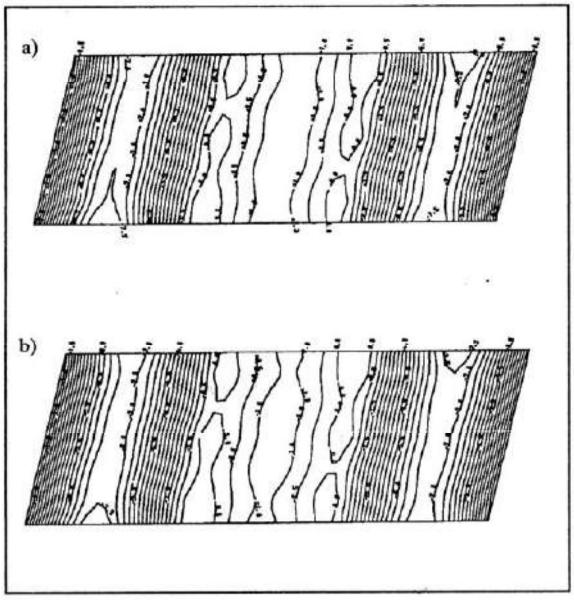


Figure 6 : Flèches des modèles coque (a) et dalle+poutres avec une largeur de participation uniforme de 4m (b) sous poids propre.

La figure 8 montre les efforts dans les poutres maîtresses sous l'effet de la surcharge excentrée.

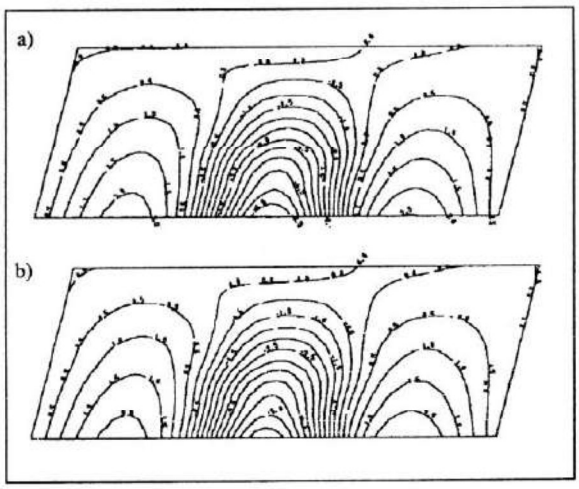


Figure 7 : Flèches des modèles coque (a) et dalle+poutres avec une largeur de participation uniforme de 4m (b) sous charge répartie excentrée.

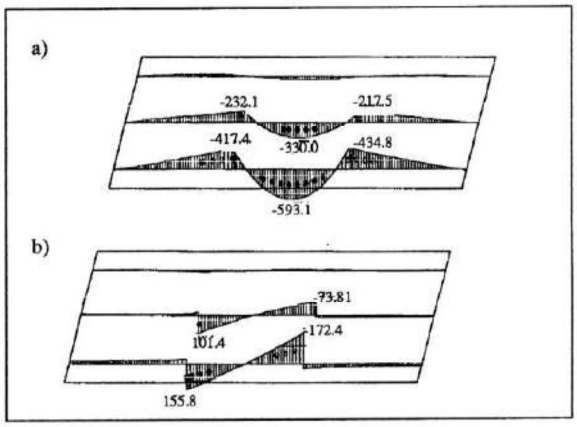


Figure 8 : Effet de la surcharge excentrée :
a) Moments de flexion dans les poutres maîtresses
b) Efforts tranchants dans les poutres maîtresses.

4.1.2 Influence de la largeur de participation

Les calculs avec le modèle **Dalle+Poutres** ont été effectués pour différentes largeurs de participation.

Il est clair que le modèle coque ne nécessite pas la définition de cette largeur de participation puisque les effets membranaires dans la dalle dûs à l'excentricité des nervures sont calculés tels quels.

Dans un premier temps, la largeur de participation a été admise constante pour toutes les poutres longitudinales (3 valeurs : 3.5m, 4.0m et 4.5m). Ensuite elle a été ajustée séparément pour chaque poutre. La comparaison des différents résultats est détaillée dans le tableau 1.

	Cas de charge 1 (poids propre)		Cas de charge 2 (surcharge q)	
Référence : modèle Coque	flèche [mm] -8.005		flèche [mm] -6.014	
modèle Dalle+Poutre				
Largeur de participation	flèche [mm]	écart [%]	flèche [mm]	écart [%]
3.5m	-8.158	+1.91%	-6.025	+0.18%
4.0m	-7.920	-1.06%	-5.868	-2.43%
4.5m	-7.725	-3.50%	-5.738	-4.59%
ajustée	-7.928	-0.96%	-5.967	-0.78%

Tableau 1 : Comparaison des flèches maximales obtenues par les deux modèles de calcul et pour différentes largeurs de participation.

Les résultats de ce tableau montrent bien que la largeur de participation n'a que peu d'influence sur les résultats. Pour les valeurs testées, les résultats ne sortent pas d'une fourchette de +/- 5% par rapport au calcul de référence en coque. Il n'est donc pas nécessaire d'ajuster les largeurs de participation de façon très précise.

Pour la suite des calculs présentés ici, une largeur de participation uniforme de 4.0m a été admise.

4.1.3 Comparaison des efforts

En premier lieu, on compare les moments de flexion et les efforts tranchants obtenus par les deux modèles dans les poutres maîtresses. Les résultats sont représentés sur les figures 9 et 10.

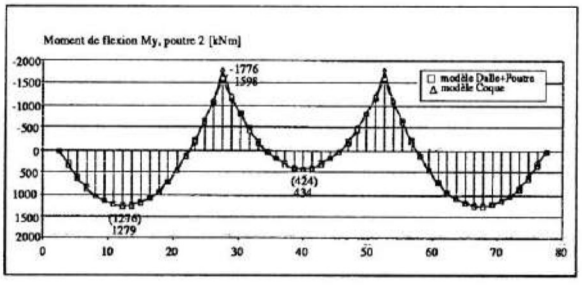


Figure 9 : Moment de flexion dans la poutre maîtresse centrale. Résultats du modèle Coque et résultats du modèle Dalle+Poutres avec coefficient pour comparaison.

La concordance entre les deux modèles est nette. Les seules différences significatives sont très localisées et se situent au droit des appuis. Ces écarts sont dûs aux appuis ponctuels. Le modèle poutre ne peut traduire les concentrations d'efforts qui en découlent, conformément au principe de Saint-Venant. Le modèle coque n'est pas soumis à ces limitations.

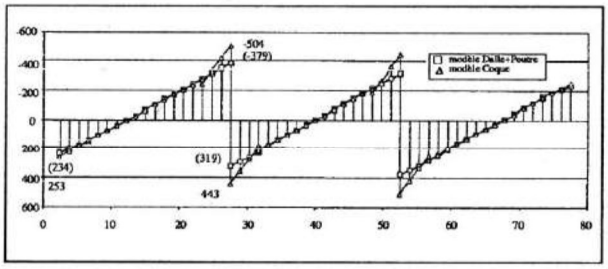


Figure 10 : Effort tranchant dans la poutre maîtresse centrale. Résultats du modèle Coque et résultats du modèle Dalle+Poutres avec coefficient pour comparaison.

La figure 11 montre le moment de flexion transversale dans la dalle le long d'une coupe pour le cas de charge 2 (surcharge répartie excentrée). Les moments obtenus sont de - 15.94 kNm/m et 18.25 kNm/m pour le modèle coque et de - 16.18 kNm/m et 18.48 kNm/m pour le modèle **Dalle+Poutres**. A nouveau on observe un écart de moins de 2% entre le calcul en coque et le calcul simplifié en dalle et poutres.

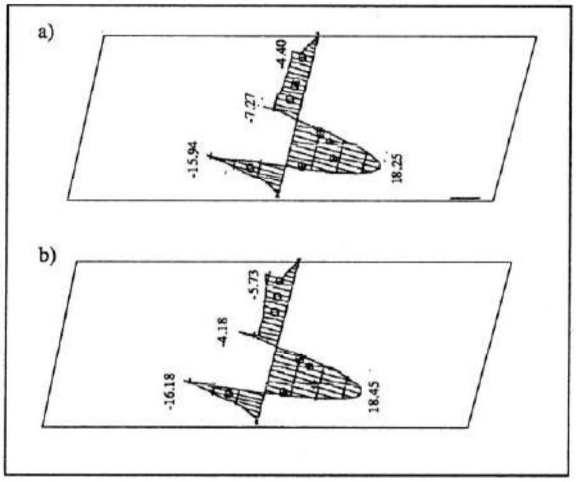


Figure 11 : Moment de flexion transversale dans le tablier. Modèle coque (a) et modèle dalle+poutres (b) avec une largeur de participation uniforme de 4m.

4.1.4 Utilisation pratique du modèle dalle+poutres

Ce modèle de calcul fournit directement les résultats utiles à l'ingénieur tels que les moments de torsion dans les poutres, enveloppes des efforts, etc. (Figure 12). Tous les résultats nécessaires au dimensionnement complet de l'ouvrage sont donc mis à disposition par le modèle, comme mentionné au point 1.

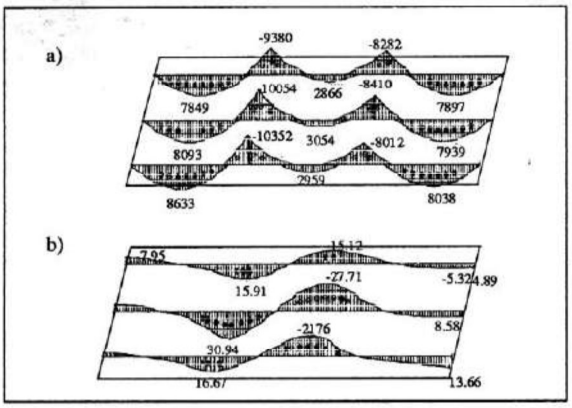


Figure 12 : Exemples d'autres résultats fournis par le modèle dalle+poutres : enveloppe des moments de flexion (a) et moments de torsion (b) dans les poutres sous l'effet du poids propre.

Dans ce modèle on peut également placer les convois roulants en n'importe quelle position (Figure 13) et obtenir les surfaces d'influence ou les efforts et les déformations dans les poutres maîtresses (Figure 14).

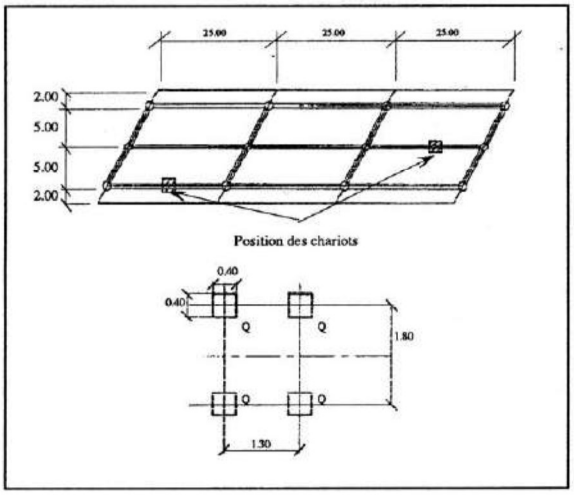


Figure 13 : Cas de charges correspondant aux chariots.

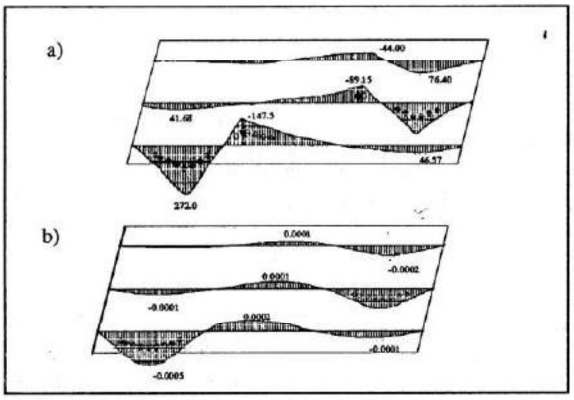


Figure 14 : Effet des convois placés selon la figure 13 :
a) Moment de flexion dans les trois poutres
b) Déformation des trois poutres.

4.2 Exemple d'un ouvrage réel, pont-dalle nervuré

Ce pont, situé sur l'autoroute N12 Vevey - Berne à Châtel, comporte neuf travées d'une longueur de 29.50m chacune, soit 265.50m au total (Figure 15). Il est composé d'une dalle liée à des poutres excentrées longitudinales et à des entretoises transversales situées au droit des appuis (Figure 16). L'ensemble de la construction est en béton armé, mais la dalle a des caractéristiques élastiques (E_c = 45 kN/mm^2, ν = 0.15) différentes de celles des poutres et entretoises (E_c = 50 kN/mm^2, ν = 0.15). Ces valeurs prennent en compte le vieillissement du béton.

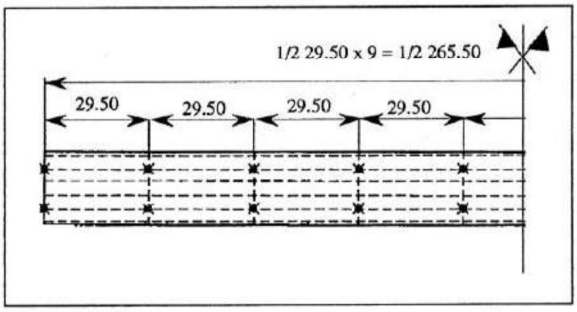


Figure 15 : Demi vue en plan de l'ouvrage.

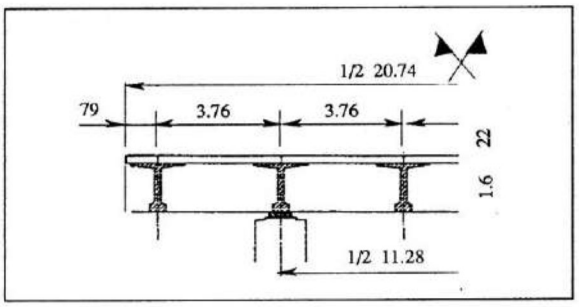


Figure 16 : Section type. Demi coupe transversale type du pont sur appui et géométrie des poutres longitudinales et des entretoises. Ces dernières sont disposées régulièrement sur chaque appui.

L'étude porte sur deux cas de charge correspondant à des essais de mesures faits sur l'ouvrage réel. Les cinquième et sixième travées sont chargées selon les schémas de la figure 17.

A nouveau, la structure a été calculée à l'aide des deux modèles coque nervurée et **dalle+poutres**. Nous nous contentons ici de comparer les flèches des deux calculs et des essais de charge.

Comme pour le premier exemple, le même réseau d'éléments finis a été utilisé pour les deux calculs (coque nervurée et dalle+poutres). Le tablier complet est formé d'un maillage de 7 x 54 = 378 éléments. Pour le calcul en dalle, les largeurs de participation du tablier admises pour chaque poutre sont les suivantes :

- poutres longitudinales de bord : 2.00m (2 x distance du bord de dalle à l'axe de la poutre).
- autres poutres longitudinales : 3.76m (entraxe des

poutres longitudinales)
entretoises : 1.15m (largeur des entretoises ; à cause de leur section massive, les efforts dans le tablier dûs à leurs présenses sont très localisés).

Les charges d'essai (Figure 17) ont été modélisées par des charges réparties sur les éléments les plus proches.

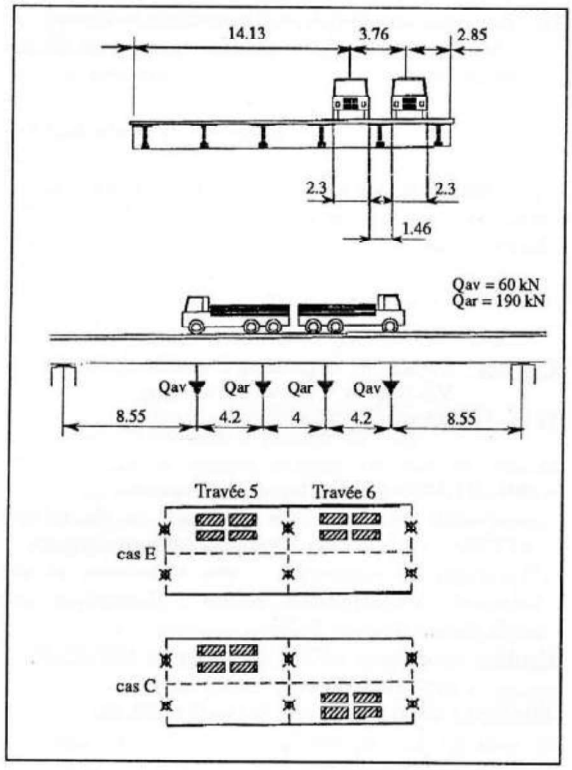


Figure 17 : Position des convois de charge sur une travée et définition des deux cas de charge.

4.2.1 Comparaison des flèches

Afin de comparer les deux modèles de calcul aux mesures effectuées lors des essais on a pris trois coupes dans la cinquième travée (Figure 18). Les déformées transversales dans ces coupes sont représentées pour les deux cas de charge (Figure 19 et 20).

Pour l'ensemble des valeurs, on observe une bonne concordance des calculs et des mesures.

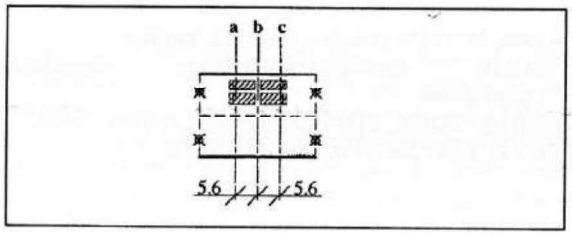


Figure 18 : Position des coupes transversales sur la travée 5.

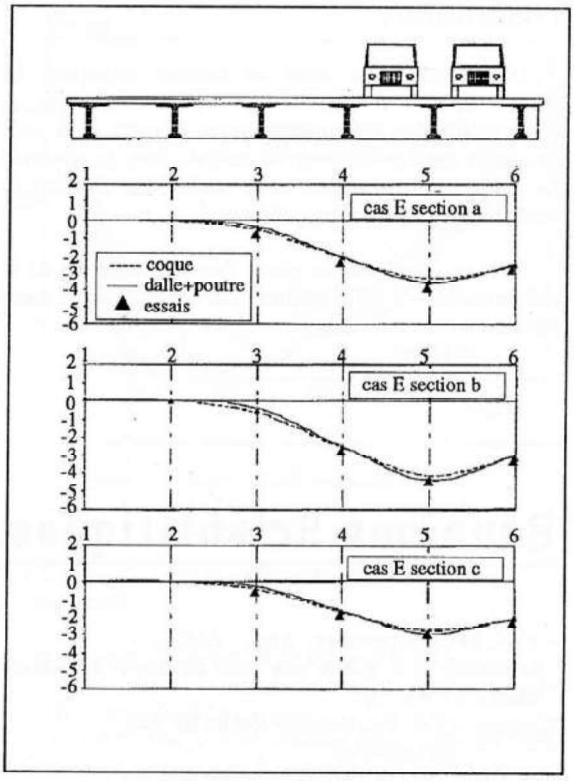


Figure 19 : Déformées transversales de la travée 5 pour le cas de charge E.

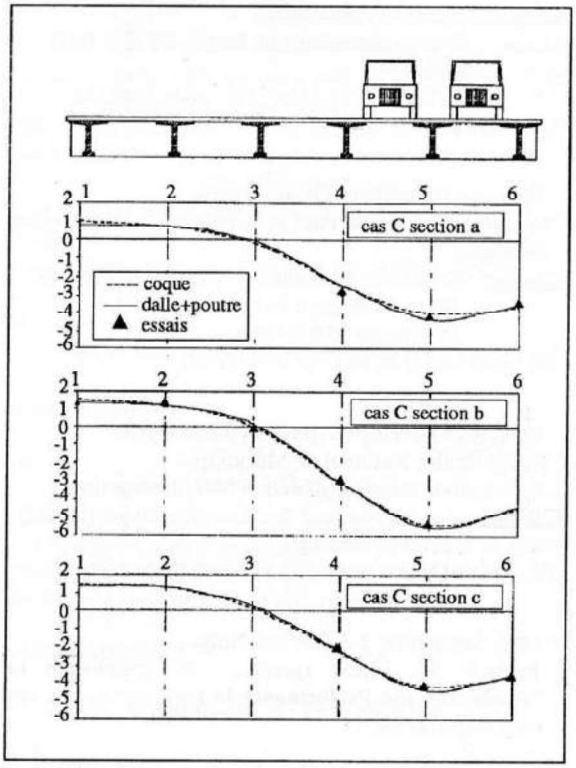


Figure 20 : Déformées transversales de la travée 5 pour le cas de charge C.

CONCLUSION

On constate que dans un nombre important de ponts courants, le modèle dalle+poutre basé sur la comptabilité des déformations entre la dalle et la poutre, suffit amplement pour les calculs dans la pratique. La simplicité d'utilisation et la qualité des résultats le rendent particulièrement intéressant.

Pour une question de place, l'aspect important de la précontrainte et de l'aptitude au service sera traité dans un prochain article.

BIBLIOGRAPHIE

[1] M. Prat : "*La modélisation des ouvrages*" AFPC - Emploi des éléments finis en génie civil, éditions Hermes, 1995.

[2] A. Bouberguig "*Calcul statique des coques nervurées et précontraintes*". Thèse n°473, Ecole Polytechnique Fédérale de lausanne, 1983

[3] "*Epreuves de charges sur le pont de la Veveyse de Châtel*", IBAP, EPF Lausanne, rapport d'essai 80.05.14.

Réunions Scientifiques

• **1996, 15-18 Septembre, Alger, Algérie.**
Séminaire N°4. Béton aux états limites et règlement Algérien CBA 93,
Contact : CGS, Rue Kaddour Rahim BP 252, Hussein-Dey
Tél : (02) 77/66/73, Fax : (02) 77/66/56.

• **1996, 26-28 Novembre, Biskra, Algérie.**
Séminaire Nationale de génie civil,
Contact : Institut de génie civil, Centre universitaire de Biskra, BP 145 7000 Biskra,
Tél : (04) 71/28/70 & 71/83/68, Fax : (04) 74/07/30,
Télex : 88 094.

• **1996, 2-4 Décembre, Oran, Algérie.**
Séminaire - Etat de l'art et perspectives en prévision sismique,
Contact : Secrétariat du séminaire, CRAAG/USTO-IGC BP 63 Bouzareah 16340 ou BP 1505 El M'nouar 31000 Oran,
Tél : (02) 94/11/18, Fax : (02) 94/11/57.

• **1996, 9-13 Décembre, Boumerdès, Algérie.**
5è Séminaire National de Mécanique Fabrication Méc/Construction Méc/ Energétique,
Contact : Institut National de Génie Mécanique (INGM) 35000 Boumerdès
Tél : (02) 81/93/90 Fax : (02) 81/63/90 Télex : 68 464

• **1996, September 2-5, Torino, Italy.**
Eurock' 96, ISRM International Symposium on "Prediction and Performance in rock mechanics and rock engineering".
Contact : Eurock' 96. Organizing Committee, c/o AGI Via Baglivi 5, 00198 Roma, Italy.
Tél : +39/6/44249274. First circular available.

• **1996, 21-24 Octobre, Chambéry, France.**
Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) : Journées d'études internationales : "Ouvrages en souterrain : des techniques et des hommes". Underground Works : Technique and men). Lang : English, Franch.
Contact : Secrétariat AFTES/EDF, Bureau 4/71, 22-30, avenue de Wagram, 75008 Paris.
Tél : (33) 1 47 64 84 77 ; Fax 33 (1) 47 64 75 88.

• **1997, September 2-6, Istanbul, Turkey.**
International Symposium on Geology and Environment.
Contact : Secretary GEOENV' 97. P.K. Kizilai, 06424 Ankara. Turkey.
Tél. : 90-3124343601 ; Fax : 90-3124342388.

• **1996, 4-7 Septembre, Lisbon, Portugal.**
International Conference on Implementation of Safety and Health on Construction Sites,
Contact : Instituto of civil engineering, Technial University of Lisbon
Tél. : 41-1633 2647, Fax : 41-1 371 2131.

• **1996, 25-27 , Septembre, Istanbul, Turkey.**
IABSE Colloquium-SemiRigid Structural Connections,
Contact : IABSE, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zurich,
Tél : 41-1 633 2647, Fax : 41-1 371 2131.