

INFLUENCE DE LA CONNEXION PARTIELLE SUR LE VOILEMENT LOCAL DES POUTRES MIXTES CONTINUES SELON L'EUROCODE 4

M.BENSOULA¹; M.TEHAMF²; B.ACHOUR³; T.KADRI⁴

¹ Chargé de cours; Département de Génie Civil; Université de Mostaganem; BP 465 Cité 05 juillet Mostaganem 27000 Algérie bensoulamoh@hotmail.com

² Maître de conférence; Département de Génie civil; U.S.T.d'Oran; USTO Oran M'Naouer BP 1505 Oran Algérie muhammedehami@yahoo.fr

³ Professeur; Département de Génie Civil; Université de Mostaganem; BP 991 RP Mostaganem 27000 waredadz@yahoo.fr

⁴ Maître de conférence; Département de Génie civil; Université de Mostaganem; BP 991 RP Mostaganem 27000 kadriurss@czryahoo.fr

RÉSUMÉ

Actuellement, la construction mixte est un secteur qui est en plein évolution dans le domaine du génie civil, et sa pratique actuelle montre qu'elle peut être compétitive, en terme de coût global, vis à vis des constructions en acier comme des constructions en béton.

Le calcul des sections mixtes avec l'hypothèse d'une connexion partielle s'impose, du point de vue conception, à chaque fois que la résistance complète d'une section mixte n'a pas lieu d'être totalement exploitée. Par conséquent, l'importance d'étudier l'influence de la connexion partielle sur le voilement local d'une poutre continue à section mixte acier-béton et la recherche d'un modèle analytique permettant d'évaluer, avec une précision suffisante, la capacité de rotation des sections transversales mixtes au droit de l'appui intermédiaire en fonction de l'évolution du moment sur cet appui dans le cas d'une connexion partielle s'imposent. Le modèle de calcul est basé sur le théorème de la limite plastique permettant l'évaluation de la capacité de rotation des sections transversales de classe 2 selon l'Eurocode 3 et 4.

Le mécanisme de ruine pour le voilement local est basé sur des modèles à charnières plastiques qui permet de prédire les courbes moment-rotation sur les appuis des poutres mixtes continues susceptibles de voiler localement.

Mots-Clés

Construction mixte, Voilement local, Connexion partielle, Capacité de rotation, Modélisation.

1. INTRODUCTION

La construction mixte est particulièrement utilisée dans le bâtiment, par le fait qu'elle présente des avantages par rapport à la construction métallique comme une meilleure résistance au feu, une meilleure optimisation de la matière, une limitation des phénomènes d'instabilité (voilement local et déversement) directement liée aux dispositions constructives et une résistance ductile appréciable dans le cas d'un séisme.

Le calcul des sections mixtes avec l'hypothèse d'une connexion partielle s'impose, du point de vue conception, à chaque fois que la résistance complète d'une section mixte n'a pas lieu d'être totalement exploitée.

D'autre part, certaines dispositions techniques avantageuses, utilisées dans la réalisation des structures mixtes, impliquent que l'on se situe, par la force des choses, en connexion partielle. C'est le cas quand la dalle en béton est coulée sur un bac d'acier en tôle mince nervurée, les connecteurs sont alors soudés à travers la tôle. Et vu que ces connecteurs ne peuvent pas être ancrés dans le béton jusqu'à sa base, cela peut se traduire par une perte d'efficacité allant jusqu'à 70%.

Une autre forme de connexion partielle est à considérer lorsqu'on utilise des dalles préfabriquées dont la collaboration avec la poutre métallique n'est assurée que par des ancrages en des points nécessairement espacés.

D'où vient l'importance d'étudier l'influence de la connexion partielle sur le voilement local d'une poutre continue à section mixte acier-béton et de rechercher un modèle analytique qui permet d'évaluer, avec une précision suffisante, la capacité de rotation des sections transversales mixtes au droit de l'appui intermédiaire en fonction de l'évolution du moment sur cet appui dans le cas d'une connexion partielle.

Le voilement local est un phénomène d'instabilité complexe et diversifié dans sa forme. Il se caractérise par une déplanation dont l'allure va dépendre de plusieurs facteurs et le problème du voilement local des plaques minces a été abordé depuis longtemps par de nombreux chercheurs comme R.P.JOHNSON et J.J.CLIMENHAGA [3 & 4], M.IVANYI [5], R.P.JOHNSON et S.CHEN [6], R.P.JOHNSON et C.K.R.FAN [7], K.ROIK et W.EHLERT [8], J.M.ARIBERT, E.RAGNEAU et H.XU [9]. Les codes européens Eurocodes 3 et 4 [1 & 2] ont défini une classification des sections transversales en fonction des élancements limites des éléments constituant celles-ci et les

différentes classes de sections transversales sont définies comme suit :

Classe 1 : Ce sont les sections transversales plastiques susceptibles de supporter la formation d'une rotule plastique et dont la capacité de rotation est suffisante pour permettre une entière redistribution des moments de flexion dans la structure.

Classe 2 : Ce sont les sections transversales compactes susceptibles de développer un moment résistant plastique bien que le voilement local et/ou l'éclatement par compression du béton limite la rotation sous moment de flexion constant.

Classe 3 : Ce sont les sections transversales semi-compactes dans lesquelles les contraintes dans les fibres extrêmes comprimées des éléments en acier de construction peuvent atteindre la limite d'élasticité mais dont le voilement local empêche le moment résistant d'atteindre le moment de résistance plastique.

Classe 4 : Ce sont les sections transversales élancées pour lesquelles la limite d'élasticité dans les fibres extrêmes des éléments en acier de construction n'est pas atteinte en raison de l'apparition prématurée du voilement local.

Cette classification permettra également d'identifier les conditions d'une analyse globale de la structure, en utilisant soit une analyse plastique, soit une analyse élastique avec des limites spécifiées de la redistribution des moments et l'Eurocode 4 [2] permet deux types d'analyse élastique qui sont l'analyse élastique "non fissurée" et l'analyse élastique "fissurée".

2. MODÉLISATION DE LA COURBE MOMENT-ROTATION SUR APPUI AVEC L'HYPOTHÈSE D'UNE CONNEXION COMPLÈTE

Le modèle de calcul proposé est basé sur le théorème de la limite plastique, et cela pour permettre d'évaluer avec précision suffisante la capacité de rotation des sections transversales de classe 2 au droit de l'appui intermédiaire d'une poutre mixte continue en fonction de l'évolution du moment sur cet appui.

La méthode est basée sur des modèles à charnières plastiques et elle consiste à analyser un mécanisme de ruine choisi pour le voilement local d'une poutre mixte, qui doit être compatible avec des observations expérimentales faites lors des essais réalisés au laboratoire de structure de l'INSA de Rennes en France [10].

Dans ce modèle, nous prenons le voilement local de l'âme dont la section est de classe 2, avec la participation d'un voilement

éventuel ou d'une déformation due à la plastification de la semelle comprimée, suivant que la section transversale de la semelle est de classe 1 ou 2 et la relation M- θ sera dérivée de l'équation du travail absorbé par le mécanisme de ruine

Le mécanisme proposé (Figure 1) se caractérise par la formation de plusieurs lignes d'articulation plastique et de deux surfaces géométriques en distorsion plastique, dans l'âme et dans la semelle comprimée.

Quand il y a rotation, la zone au-dessus du point A reste en plan et développe une déformation inélastique de traction simple, tandis qu'au-dessous de A, l'âme voile du fait de la formation des charnières AB, AC, AD, BD et CD, et d'une distorsion plastique du triangle BCD. D'autre part la déformation plastique, ou éventuellement le voilement, de la semelle inférieure se produit par une compression et une rotation simultanée, autour de la ligne centrale de la semelle, du carré EFGH, et des déplacements compatibles des surfaces trapézoïdales rigides EKLF, FMNG, GNPH et HJKE qui sont créés par la formation des charnières plastiques EF, FG, GH, HE, LF, FM, PH, HJ, KE et GN.

Sachant que l'énergie dissipée dans la déformation de la section transversale est égale au produit du moment appliqué par la rotation de l'axe neutre autour du point A et que l'énergie absorbée par le mécanisme est égale à la somme des énergies absorbées dans chaque partie déformée, alors et en égalisant l'énergie dissipée avec l'énergie absorbée nous aurons l'expression du moment.

L'énergie dissipée dans la déformation de la section transversale, soit W_D , est donnée par :

$$W_D = M \cdot \theta \quad (1)$$

Avec

M : le moment appliqué

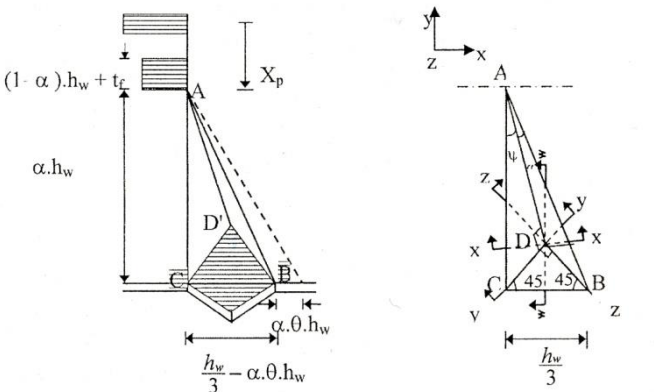
θ : la rotation de l'axe neutre autour du point A.

L'énergie absorbée par le mécanisme, soit W_A , est la somme des énergies absorbées dans chaque partie déformée :

$$W_A = \sum W_i \quad (2)$$

En égalisant l'énergie dissipée avec l'énergie absorbée dans l'élément $W_D = W_A$, et en divisant par θ (avec $\theta \neq 0$), nous aurons l'expression du moment :

$$M = \frac{\sum W_i}{\theta} \quad (3)$$



a): Le mécanisme de voilement local c): L'âme avant la déformation

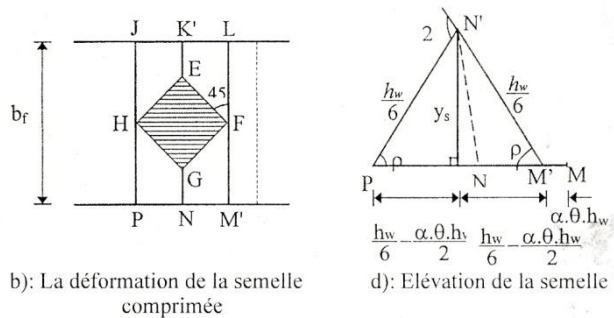


Figure 1 : Le mécanisme de ruine du modèle proposé

L'énergie absorbée totale (figure 1) sera calculée dans les parties suivantes du modèle :

- L'énergie absorbée dans la partie se trouvant au-dessus de A
- L'énergie absorbée par les charnières plastiques dans la semelle comprimée
- L'énergie absorbée par les charnières plastiques dans l'âme comprimée

3. MODÉLISATION DE LA COURBE MOMENT-ROTATION SUR APPUI AVEC L'HYPOTHÈSE D'UNE CONNEXION PARTIELLE

Le mécanisme de ruine qui a été proposé pour les poutres mixtes continues à connexion complète susceptibles de voiler localement restera valable une fois que l'effet de la connexion partielle sera introduit au modèle sus-cité.

L'énergie dissipée dans la déformation de la section transversale dans le cas d'une connexion partielle restera égale au produit du moment de calcul appliqué par la rotation de l'axe neutre autour du point A et l'énergie absorbée par le mécanisme dans le cas d'une connexion partielle sera égale à la somme des énergies absorbées dans chaque partie déformée.

En égalisant l'énergie dissipée avec l'énergie absorbée dans le cas d'une connexion partielle, nous trouverons le moment de calcul qui est inférieur ou égal au moment de résistance plastique réduit du fait de la connexion partielle $M_{pl,Rd}^{(Red)}$ et qui est donné par les Eurocodes 3 et 4 [1 & 2] et dont l'expression est la suivante :

$$M_{pl,Rd}^{(Red)} = M_{apl,Rd} + \frac{N}{N_f} \cdot (M_{pl,Rd} - M_{apl,Rd}) \quad (4)$$

Avec:

$M_{apl,Rd}$: Le moment de résistance plastique du profilé métallique seul.

$M_{pl,Rd}$: Le moment de résistance plastique dans le cas d'une connexion complète.

$M_{pl,Rd}^{(Red)}$: Le moment de résistance plastique réduit du fait de la connexion partielle.

$\frac{N}{N_f}$: Le degré de connexion.

On remarque dans cette formule que les valeurs du moment de résistance plastique du profilé métallique seul et le degré de connexion sont connues, tandis que le moment de résistance plastique $M_{pl,Rd}$ qui correspond au mécanisme de ruine dans le cas d'une connexion complète reste variable en fonction de la rotation θ de l'axe neutre autour du point A.

Ce qui nous ramènera à calculer la somme des énergies absorbées par chaque partie du mécanisme dans le cas d'une connexion complète, afin qu'on puisse tirer la valeur du moment de résistance

plastique $M_{pl,Rd}$ et on introduisant cette expression dans l'équation (4), la valeur du moment de résistance plastique réduit du faite de la connexion partielle devient égal à :

$$M_{pl,Rd}^{(Red)} = M_{apl,Rd} + \frac{N}{N_f} \cdot \left(\frac{\sum W_i}{\theta} - M_{apl,Rd} \right) \quad (5)$$

C'est cette dernière expression du moment plastique réduit du faite de la connexion partielle qui va nous permettre de déterminer la relation moment-rotation sur appui due au voilement local des poutres mixtes continues en connexion partielle et dont les résultats sont donnés sur le tableau (1).

θ (rd)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
$\sum W_i$ (KN.m/rd)	3,007	4,788	6,373	7,862	9,297	10,706
$M_{pl,Rd}$ (KN.m)	300,690	239,393	212,424	196,550	185,948	178,432
$M_{pl,Rd}^{(Red)}$ (KN.m)	244,940	211,226	196,393	187,663	181,831	177,698

Tableau 1 : Les valeurs de la variation du moment appliqué sur appui en fonction de la rotation θ , calculées à l'aide du modèle proposé

La courbe type moment-rotation sur appui des poutres mixte continue dans le cas d'une connexion partielle est représentée par le tronçon (3) de la courbe M- θ de la figure (2).

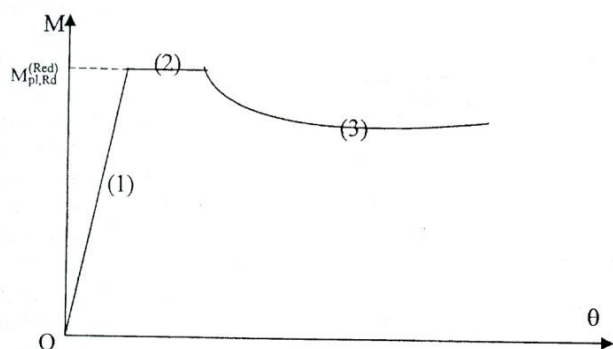


Figure 2 : La courbe type moment-rotation sur appui d'une poutre mixte continue

Une approximation plus pratique du comportement réel peut être donnée par l'interaction de la courbe M- θ due au voilement local avec la ligne horizontale $M = M_{pl,Rd}^{(Red)}$, et cela du faite que la connexion est partielle et elle sera représentée par le tronçon (2) de la figure (2) et le tronçon (1) de la courbe M- θ sera déterminé par la théorie simple d'élasticité.

4. JUSTIFICATION DU MODÈLE PROPOSÉ AVEC L'EXPÉRIMENTATION

Afin de pouvoir valider le modèle analytique proposé dans le cas d'une connexion partielle, nous étions amenés à comparer les résultats du modèle analytique avec ceux des résultats de l'expérimentation réalisée au laboratoire de l'INSA de Rennes par M.TEHAMI [10].

La poutre expérimentée était réalisée avec un profilé reconstitué soudé, dont le taux de connexion est de 55% sur la longueur critique entre la charge et l'appui intermédiaire (en moment négatif).

Cette poutre a été choisie de telle sorte que la section transversale

sur l'appui intermédiaire se trouve en classe 3 (l'âme est en classe 3), alors cette section transversale sera représentée par une âme de classe 2 équivalente conformément à l'article 4.3.3.1 de l'Eurocode 4 [2].

Le principe de l'essai est celui de la mise en flexion simple d'une poutre mixte continue, à deux travées égales, par deux charges ponctuelles égales appliquées à une distance de 2,5 mètres de l'appui intermédiaire.

La poutre fait 15 mètres de portée, et comporte une dalle de 10 cm d'épaisseur reposant directement sur un profilé métallique et dont les caractéristiques géométriques sont illustrées sur les Figure (3) et Figure (4) ci-dessous.

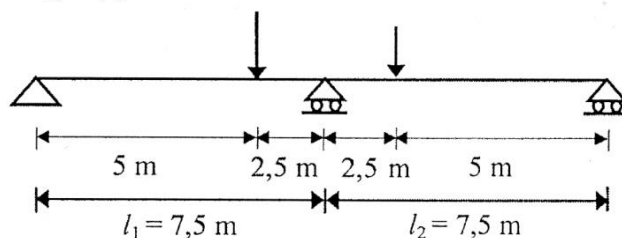


Figure 3 : Schéma statique de la poutre mixte expérimentée

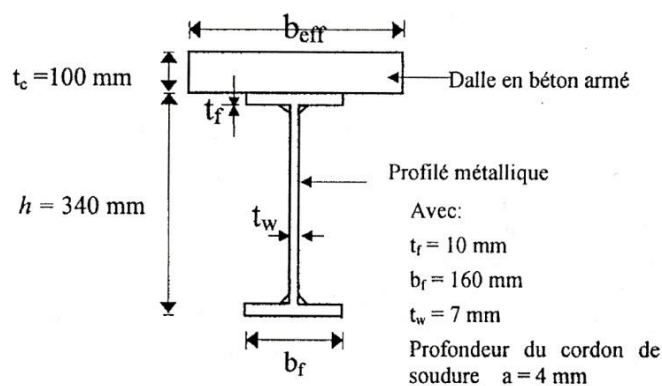


Figure 4 : Géométrie de la section transversale

Une connexion mécanique au cisaillement a été appliquée entre la dalle et le profilé. Les connecteurs utilisés sont des goujons à tête, de type NELSON, de 16 mm de diamètre et de 75 mm de hauteur.

Les essais dont les résultats sont donnés sur le tableau (2) ont été effectués sur une plate forme métallique du Laboratoire de Structure de l'INSA de Rennes sous deux portiques supportant chacun, par l'intermédiaire d'une rotule, un vérin hydraulique et les mesures effectuées par le biais des capteurs potentiométriques étaient la déformée longitudinale, le déplacement vertical et longitudinal des appuis, le déplacement transversal de l'âme au niveau de l'appui intermédiaire et les déformations linéiques de l'acier et du béton dans les différentes sections.

La courbe M- θ est une caractéristique expérimentale importante dans l'étude du voilement local des poutres mixtes continues, et elle représente l'évolution du moment sur appui intermédiaire en fonction de la rotation de celui-ci.

$\theta \times 10^{-2}$ (rd)	0,06	0,16	0,24	0,55	0,72	1,056	1,52	1,90	2,65	3,72	4,52	5,05
M (KN.m)	60	120	180	220	230	235	230	215	200	185	175	165

Tableau 2 : Valeurs du moment expérimental M en fonction de la rotation θ

La Figure (5) ci-dessous représente la courbe moment-rotation donnée par le modèle proposé, et qui est comparée sur cette même figure à la courbe expérimentale.

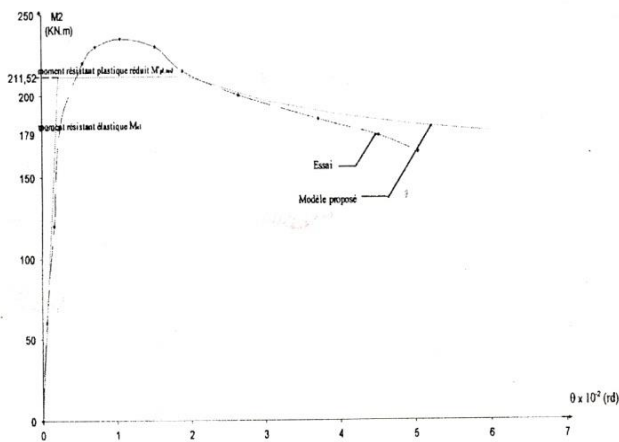


Figure 5 : Courbes moment-rotation, expérimentale et du modèle proposé

5. CONCLUSION

Le modèle proposé permet de prédire les courbes moments-rotations sur les appuis intermédiaires des poutres mixtes continues à connexion partielle, et dont les sections transversales sur les appuis se trouvent en classe 2, et qui sont susceptibles de voiler localement.

La courbe ainsi obtenue, montre clairement qu'il y a une compatibilité entre le modèle analytique proposé et les résultats de l'expérimentation sur une poutre mixte continue à connexion partielle.

La comparaison du modèle analytique proposé établie avec l'expérimentation prouve sa validité pour toutes les sections transversales sur les appuis intermédiaires de classe 2 des poutres mixtes continues susceptibles de voiler quelque soit le degré de la connexion de ces sections mixtes.

6. RÉFÉRENCES

- [1]. EUROCODE 3 (1990). "règles unifiées communes pour les structures en acier". commission des communautés Européennes.
- [2]. EUROCODE 4 (1992). "règles unifiées communes pour les constructions mixtes acier-béton". commission des communautés Européennes.
- [3]. JOHNSON R.P et CLIMENHAGA J.J. (1972). "Local buckling in continuous composite beams ". The Structural Engineer: vol 50, N° 09.
- [4]. JOHNSON R.P et CLIMENHAGA J.J. (1972). "Moment-rotation curves for locally buckling beams". Journal of the Structural Division, proc, A.S.C.E: vol 98, N° ST 6.
- [5]. IVANYI M. (1984). "The model of the interactive plastic hinge". Department Of Steel Structure: Technical University, H-1521 Budapest.
- [6]. JOHNSON R.P et CHEN S. (1991). "Local buckling and

moment redistribution in class 2 composite beams". The Structural Engineering International.

[7]. JOHNSON R.P. et FAN C. K. R(1997). "Strength of continuous class 3 composite beams designed to Eurocode 4". Research report C E 24.

[8]. ROIK K. et EHLERT W. (1983). "la capacité portante ultime des poutres mixtes continues - calculs élasto-plastiques - résultats d'essais". Bauingenieur : vol 58.

[9]. ARIBERT J.M., RAGNEAU E. et Xu H. (1993). "développement d'un élément fini de poutre mixte acier-béton intégrant les phénomènes de glissement et de semi continuité avec éventuellement le voilement local". Construction Métallique : N° 2. [10]. TEHAMI M. (1997). "Local buckling in class 2 continuous composite beams". J.Construct.Steel.Res: Vol.43, Nos. 1-3, pp.141-159.