

## Développement d'un outil de calcul pour l'étude des sections de béton renforcées par profilés en acier

T. Bogdan<sup>A,B</sup>, A. Plumier<sup>B</sup>, C. Campian<sup>A</sup>, H. Degée<sup>B</sup>

<sup>A</sup> Université Technique de Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Roumanie

<sup>B</sup> Secteur "Structural Engineering", département ArGEnCo - Université de Liège, Liège, Belgique

**RÉSUMÉ** : Les murs mixtes acier-béton incluant des profilés métalliques sont d'usage commun dans des immeubles requérant une résistance à des forces horizontales importantes, tels par exemple les bâtiments conçus pour résister à des accélérations sismiques horizontales élevées. Ce type d'élément de structure n'est cependant à l'heure actuelle pas explicitement couvert par les normes de vérifications courantes, comme par exemple les Eurocodes ou l'UBC. Cette contribution vise à présenter un outil de calcul simple, implémenté dans un tableur et destiné à établir les diagrammes d'interaction 'moment-effort normal' nécessaires pour caractériser la capacité résistante des sections transversales de béton armé, en l'occurrence ici armé de profilés laminés. La méthode de calcul se base sur des simplifications similaires à celles proposées par l'Eurocode 4 (norme européenne pour les structures mixtes acier-béton), le champ d'application de ce dernier étant normalement limité à la prise en compte d'un unique profilé métallique inclus dans un poteau en béton de classe ordinaire. En vue de l'évaluation de la résistance d'une section mixte incluant plus d'un profilé métallique, la méthode du pivot, classique pour les sections de béton armé, est adoptée. Afin de vérifier la précision de la méthode simplifiée, des résultats obtenus avec le tableur sont détaillés pour plusieurs exemples représentatifs, partant d'une simple section en béton armé et étendant le champ d'application à une section mixte incluant plusieurs profilés. En particulier, l'outil simplifié est validé par comparaison avec des résultats expérimentaux issus de la littérature scientifique et avec des résultats de simulations numériques obtenus à l'aide de logiciels de calcul avancé par la méthode des éléments finis. Ces comparaisons montrent la bonne précision de l'outil simplifié.

### 1. INTRODUCTION

Dans les bâtiments de grande hauteur, des noyaux de contreventement sont habituellement concentrés au centre de l'immeuble pour lui apporter une résistance et une raideur latérales substantielles, ainsi qu'une bonne capacité de déformation inélastique, requise pour faire face aux actions sismiques. Bien que les murs en béton armé (BA) soient traditionnellement utilisés dans de tels systèmes résistants, en raison de leur construction simple et de leur coût modéré, ils présentent cependant un certain nombre d'inconvénients. L'inconvénient principal des murs en béton armé est le développement de fissures de traction dans les zones tendues et d'écrasement dans les zones de compression localisée lors des larges cycles inélastiques. De telles fissures et écrasements peuvent résulter en la désagrégation du béton, conduisant à des pertes de raideur et de résistance significatives lors de cycles successifs. Pour éviter cette situation, les normes parasismiques recommandent que, lors de l'exécution des murs de contreventements en béton armé en zone sismique, des armatures longitudinales soient concentrées dans les zones latérales du mur et

confinées par des étriers suffisamment rapprochés. Ces zones latérales sont en pratiques assez malaisées à mettre en œuvre dans des murs d'épaisseur égale ou inférieure à 30 cm. Une solution alternative possible permettant d'éviter ce problème est de remplacer l'importante quantité d'armatures longitudinales par des profilés métalliques noyés dans le béton, conduisant à des éléments qualifiés de murs armés mixtes.

Aucune norme n'est cependant disponible à l'heure actuelle pour fournir des informations sur la manière de concevoir et calculer de telles sections de béton armé renforcées par plus d'un profilé. La présente contribution propose dès lors une extension d'une méthode existante, classiquement appliquée aux sections en béton armé traditionnelles, ainsi que son utilisation pour déterminer les diagrammes d'interaction 'moment de flexion – effort normal' pour des sections mixtes armées de plusieurs profilés. La méthode repose d'une part sur la méthode des pivots, classique dans le domaine du béton armé, et sur les hypothèses simplificatrices proposées par l'Eurocode 4 pour le calcul des poteaux mixtes incluant un unique profilé métallique. Afin d'en automatiser l'usage, elle est implémentée dans un outil de calcul sous forme de tableur.

## 2. PRINCIPES DE BASE DE LA METHODE DE CALCUL

La méthode des pivots est l'outil classique pour déterminer la charge de rupture d'une section en béton armée soumise à moment de flexion et effort normal. D'un point de vue graphique, les pivots A, B et C (voir Figure 1) représentent les points définis par l'atteinte de la déformation ultime dans le béton ou dans l'acier. On identifie trois domaines distincts selon la manière dont le pivot se développe. Le pivot A correspond à l'atteinte de la déformation maximale en traction des aciers, le pivot B correspond à l'atteinte de la déformation ultime en compression du béton, tandis que le pivot C concerne le comportement du béton en compression pure.

Afin de déterminer la résistance ultime d'une section en béton armée, les hypothèses suivantes sont faites:

- Les sections planes restent planes;
- La déformation dans les armatures longitudinales est égale à celle du béton adjacent (cette hypothèse sera étendue à la compatibilité béton-profilés dans le cas des sections mixtes);
- Les contraintes dans le béton sont obtenues à l'aide d'une loi contrainte-déformation parabole-rectangle, telle que proposée par exemple par l'Eurocode 2, et la résistance en traction du béton est négligée;
- Les contraintes dans l'acier sont obtenues à l'aide d'une loi élastique parfaitement plastique bilinéaire.

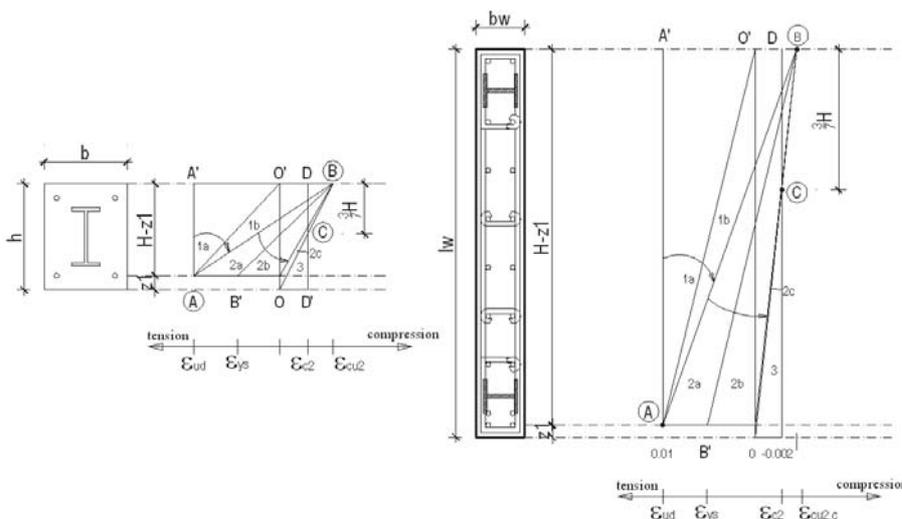


Figure 1. Distribution des déformations  $\epsilon$  à l'état limite ultime pour un poteau mixte (gauche) ou un mur armé mixte (droite).

Pour une section mixte symétrique par rapport à l'axe de flexion, Roik et Bergmann (1992) ont proposé une méthode simplifiée pour évaluer les diagrammes d'interaction M-N. Cette méthode a été adoptée dans l'Eurocode 4. La procédure est la suivante:

- Supposer que la déformation du béton atteint sa limite d'écrasement dans la fibre la plus comprimée;
- Supposer une position arbitraire de l'axe neutre et en déduire la distribution de déformation linéaire correspondante dans la section transversale;
- Evaluer la distribution de contraintes associée sur base des lois constitutives appropriées à chacun des matériaux constituant la section, en négligeant la résistance en traction du béton;
- Déterminer le moment et l'effort normal résultant par intégration des contraintes. Cette étape fournit un point du diagramme d'interaction;
- Modifier la valeur de l'effort normal et ajuster la position de l'axe neutre et la valeur de la courbure en conséquence. Calculer le moment résistant associé.

Ces deux approches (méthode du pivot pour les sections BA et méthode de Roik pour les sections mixtes) sont extrêmement similaires dans leur philosophie. On peut donc raisonnablement supposer qu'une approche similaire puisse fonctionner y compris pour des sections incluant plus d'un profilé métallique, comme par exemple présenté en Figure 2. Une telle approche est donc suivie ici pour développer un nouvel outil de calcul simple destiné aux praticiens.

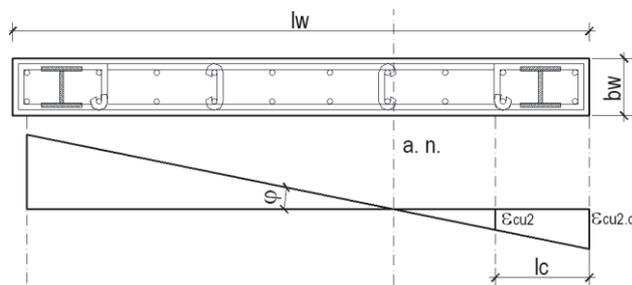


Figure 2. Distribution des déformations  $\epsilon$  lors de l'atteinte de la courbure maximale.

Le nouvel outil de calcul comprend deux parties. La première partie génère la géométrie de la section et définit les propriétés des matériaux. La section est divisée en couches a priori d'épaisseur paramétrable. En pratique des couches homogènes d'épaisseur unitaire sont proposées par défaut. Les lois matérielles sont bilinéaire élastique-parfaitement-plastique pour l'acier et parabole-rectangle pour le béton.

Compte tenu du taux d'armatures longitudinales et transversales requis par les codes parasismiques dans les zones latérales des murs ductiles, il est autorisé que le béton atteigne la limite en déformation en compression en conditions confinées ( $\epsilon_{cu2,c}$  selon les notations de l'Eurocode 8). Dans l'outil de calcul, l'effet favorable d'un confinement éventuel est évalué sur base de la méthode recommandée par l'Eurocode pour les murs en béton armé classiques.

Dans le cas d'une section de mur renforcée de multiples profilés, pour raisons de simplicité, les profilés noyés dans le béton sont traités comme des armatures classiques caractérisées par une section équivalente à l'aire des profilés, d'où un diamètre équivalent est déduit. L'inertie propre des barres d'armature et des profilés est supposée négligeable par rapport à l'inertie globale du mur. Cette hypothèse n'est évidemment pas faite dans le cas d'un simple poteau.

La seconde partie de l'outil de calcul résout les équations d'équilibre de la section transversale pour une valeur donnée de l'effort de compression. Conformément à l'approche des pivots, l'état limite est supposé atteint soit lorsque le niveau de déformation dans la fibre la plus comprimée du béton atteint la limite en compression, soit lorsque le niveau de déformation dans les armatures tendues atteint la limite en traction. Sur cette base, l'analyse en section consiste alors à déterminer la position de l'axe neutre et la valeur de la courbure telle que les contraintes résultantes soient en équilibre avec l'effort normal extérieur. Le moment résistant associé est alors déduit. En résumé, l'outil de calcul fournit les sorties suivantes:

- La position de l'axe neutre plastique pour une valeur donnée de l'effort normal;
- La courbure de la section à l'état limite ultime;
- Le moment résistant de la section pour un niveau donné d'effort normal;
- La longueur de la zone latérale confinée, calculée sur base de l'expression  $l_c = (\epsilon_{cu2,c} - \epsilon_{cu,c}) / \epsilon$ , où  $\epsilon_{cu2,c}$  et  $\epsilon_{cu,c}$  sont les déformations ultimes du béton en compression pour des conditions respectivement confinées et non confinées et où  $\epsilon$  est la courbure ultime de la section.

L'outil de calcul fonctionne pour les efforts normaux aussi bien en compression qu'en traction.

### 3. VALIDATION DE L'OUTIL DE CALCUL

L'outil de calcul est conçu pour traiter aussi bien de simples poteaux mixtes incluant un unique profilé que des murs mixtes avec plusieurs profilés. Afin de valider les résultats obtenus, trois séries d'essais issus de la littérature ont été prises en compte: tout d'abord deux séries relatives à des poteaux mixtes classiques utilisant respectivement un béton ordinaire et un béton à haute performance, ensuite un ensemble d'essais relatifs à des murs armés mixtes. Pour chacune de ces trois séries d'essais, le système de mise en charge est composé d'une paire de forces agissant dans les directions verticales et horizontales (voir Figure 6). La force verticale axiale est maintenue constante alors que la charge horizontale est incrémentée jusqu'à atteinte de la ruine de l'élément.

Un modèle numérique avancé est également calibré sur ces 3 séries d'essais afin d'améliorer la compréhension des modes de ruine expérimentaux, de permettre l'extension des résultats à d'autres valeurs de l'effort normal et donc d'élargir le champ de validation de l'outil simplifié. Le modèle est développé à l'aide du code de calcul aux éléments finis FinelG développé à l'Université de Liège. Le système est modélisé à l'aide d'éléments de poutre plane à 3 nœuds (voir Figure 3). Les nœuds 1 et 3 possèdent 3 degrés de liberté (2 translations et une rotation) alors que le nœud central ne possède qu'un degré de liberté de translation longitudinal permettant de représenter correctement le transfert d'effort normal depuis le béton vers les éléments métalliques (sachant que les parties métalliques et en béton de la structure sont modélisées par des éléments finis différents). Le modèle est globalement plan et ne permet donc pas de représenter les éventuelles instabilités hors du plan.

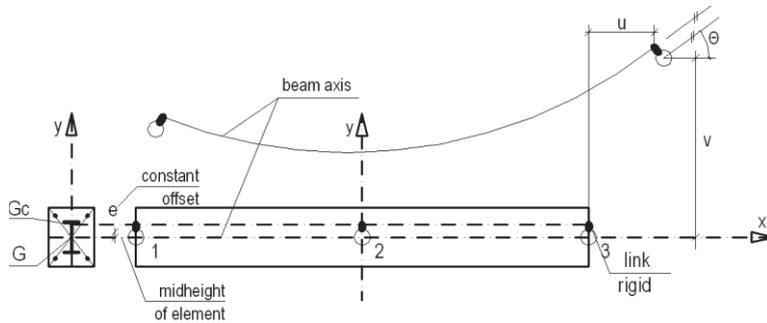


Figure 3. Élément fini de poutre plane à 3 nœuds.

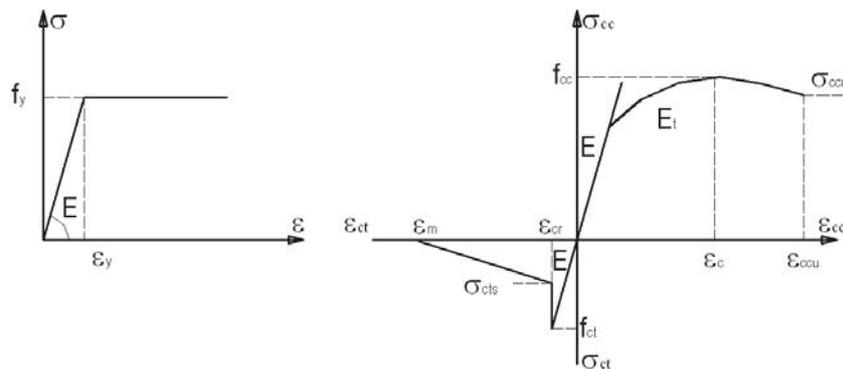


Figure 4. Lois constitutives utilisées par FinelG. Loi bilinéaire pour l'acier (gauche) et loi parabolique avec *tension stiffening* pour le béton (droite).

Les valeurs des paramètres définissant les lois constitutives des matériaux prises en compte pour le calcul sont les valeurs caractéristiques (i.e. les coefficients partiels des matériaux sont pris égaux à 1.0). Pour les éléments en acier (profilés et armatures), une loi bilinéaire élastique parfaitement plastique est utilisée (Figure 4.gauche). Pour le béton, une loi parabolique avec "tension stiffening" (Figure 4.droite) est utilisée.

Les résultats obtenus par la modélisation numérique sont systématiquement comparés aux résultats expérimentaux en termes de courbe 'charge horizontale – déplacement transversal'. Ces comparaisons sont illustrées dans les trois sections suivantes traitant chacune des 3 séries d'essai, respectivement aux figures 7, 10 et 13. La comparaison est très bonne pour les poteaux mixtes, quelle

que soit la classe de béton. Concernant les murs mixtes, la résistance est bien estimée, mais si la raideur initiale est comparable entre les modèles et les essais, la dégradation de cette raideur est plus rapide dans les essais que dans les simulations numériques. Cela peut s'expliquer par le fait que certains phénomènes tels que par exemple le mouvement relatif entre béton et profilés au niveau de la connexion longitudinale.

Après cette phase de calibration, le modèle numérique a donc été utilisé pour varier le niveau de compression axiale et développer l'ensemble de la courbe d'interaction M-N pour les spécimens d'essais, en vue de la comparaison avec l'outil de calcul simplifié. En particulier, 4 points spécifiques sont systématiquement identifiés (voir Figure 5):

- A – écrasement en compression centrée;
- B – résistance en flexion pure;
- D – point de résistance en flexion maximale;
- C – point caractérisé par une résistance en flexion égale à la résistance en flexion pure.

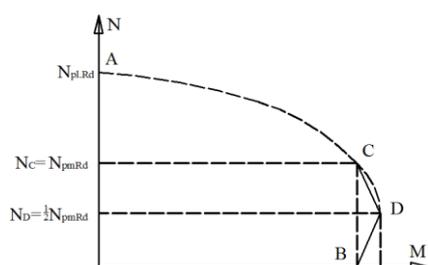


Figure 5. Diagramme d'interaction 'moment de flexion – effort normal' typique d'une section mixte.

### 3.1 Poteau mixte acier-béton avec une classe de béton ordinaire

Les poteaux mixtes avec béton ordinaire considérés pour cette comparaison ont été testés à l'Université Technique de Cluj-Napoca (Roumanie). Les données géométriques principales sont résumées à la Figure 6.

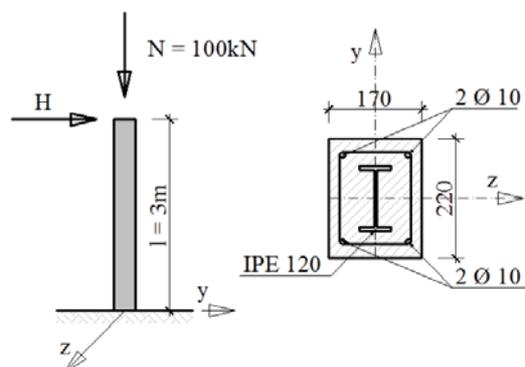


Figure 6. Poteau mixte avec béton ordinaire. Dimensions.

Les propriétés matérielles identifiées sont les suivantes:

- Profilé en acier: profil IPE 120, S235,  $f_{ay} = 302$  MPa et  $E_a = 207000$  MPa;
- Armatures: 4  $\square 10$ , S550,  $f_{sy} = 560$  MPa,  $E_a = 207000$  MPa;
- Béton: 170 x 200 mm, C20/25,  $f_c = 24.5$  MPa,  $E_c = 29000$  MPa.

Les résultats sont comparés à la figure 7 en termes de courbe force-déplacement et à la figure 8 en termes de diagramme d'interaction. Sur cette dernière figure, une comparaison est également proposée avec la méthode manuelle simplifiée proposée par l'Eurocode 4.

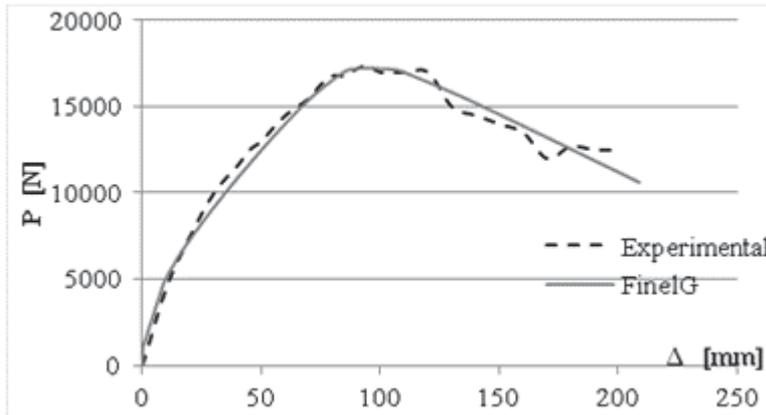


Figure 7. Courbe charge-déplacement d'un poteau mixte avec béton ordinaire. Comparaison des résultats expérimentaux avec le modèle numérique FinelG.

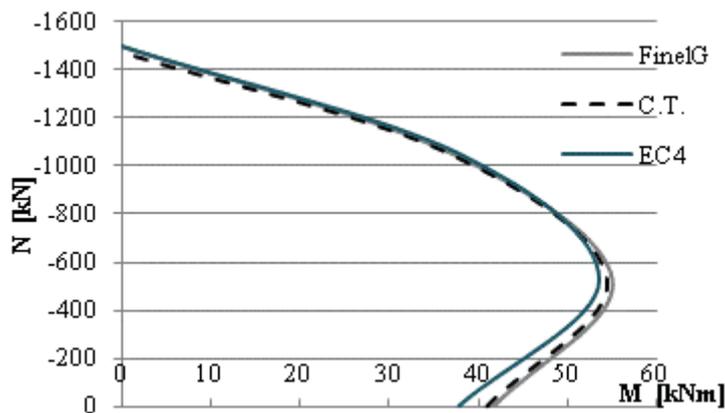


Figure 8. Diagramme d'interaction M-N pour une section mixte avec béton ordinaire. Comparaison FinelG – Eurocode 4 (EC4) – Outil simplifié (C.T.).

### 3.2 Poteau mixte acier-béton avec un béton à haute performance

Les poteaux mixtes avec béton à haute performance considérés pour cette comparaison ont également été testés à l'Université Technique de Cluj-Napoca (Roumanie). Les données géométriques principales sont résumées à la Figure 9.

Les propriétés matérielles identifiées sont les suivantes:

- Profilé en acier: profil IPE 120, S355,  $f_{ay} = 355$  MPa et  $E_a = 210000$  MPa;
- Armatures: 4  $\square$ 10, S550,  $f_{sy} = 560$  MPa,  $E_a = 207000$  MPa;
- Béton: 170 x 200 mm, C70/85,  $f_c = 90.8$  MPa,  $E_c = 43800$  MPa.

Les résultats sont comparés à la figure 10 en termes de courbe force-déplacement et à la figure 10 en termes de diagramme d'interaction. Sur cette dernière figure, une comparaison est également proposée avec la méthode manuelle simplifiée proposée par l'Eurocode 4. On constate que les résultats numériques et les résultats obtenus avec l'outil de calcul simplifié sont très concordants. La méthode de l'Eurocode 4 tend à sous-estimer la résistance en flexion pour les faibles niveaux de compression. On rappelle cependant que cette méthode n'est normalement pas prévue pour les bétons à haute performance.

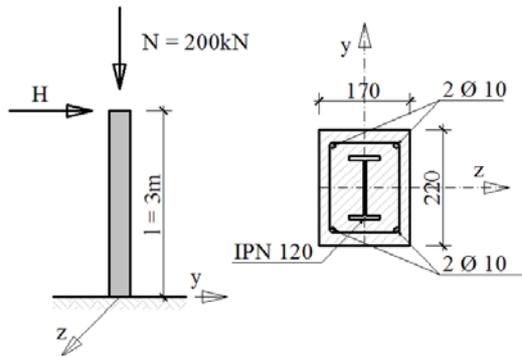


Figure 9. Poteau mixte avec béton à haute performance. Dimensions.

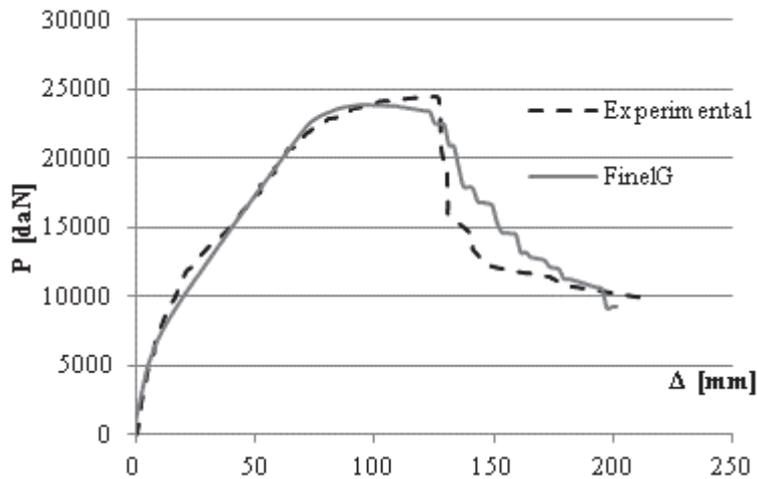


Figure 10. Courbe charge-déplacement d'un poteau mixte avec béton à haute performance. Comparaison des résultats expérimentaux avec le modèle numérique FinelG.

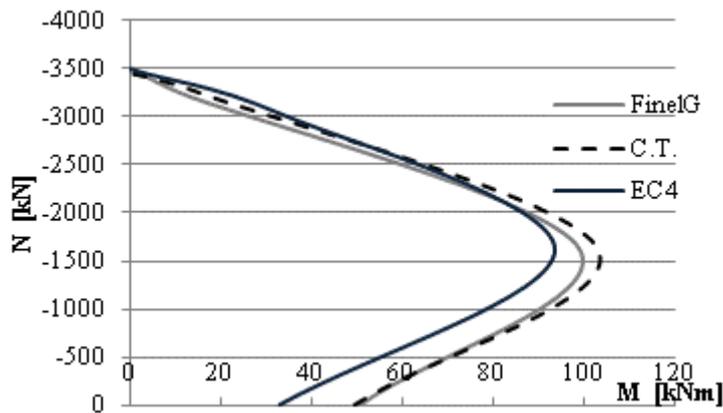


Figure 11. Diagramme d'interaction M-N pour une section mixte avec béton à haute performance. Comparaison FinelG – Eurocode 4 – Outil simplifié (C.T).

### 3.3 Murs armés mixtes

Le comportement des murs armés mixtes a été étudié de manière expérimentale par l'Université Technique de Timisoara (Roumanie). Le programme expérimental consiste en 6 essais à l'échelle 1/3 (spécimens numérotés CRSCW-1 à -6), dimensionnés selon les principes des normes de construction existantes.

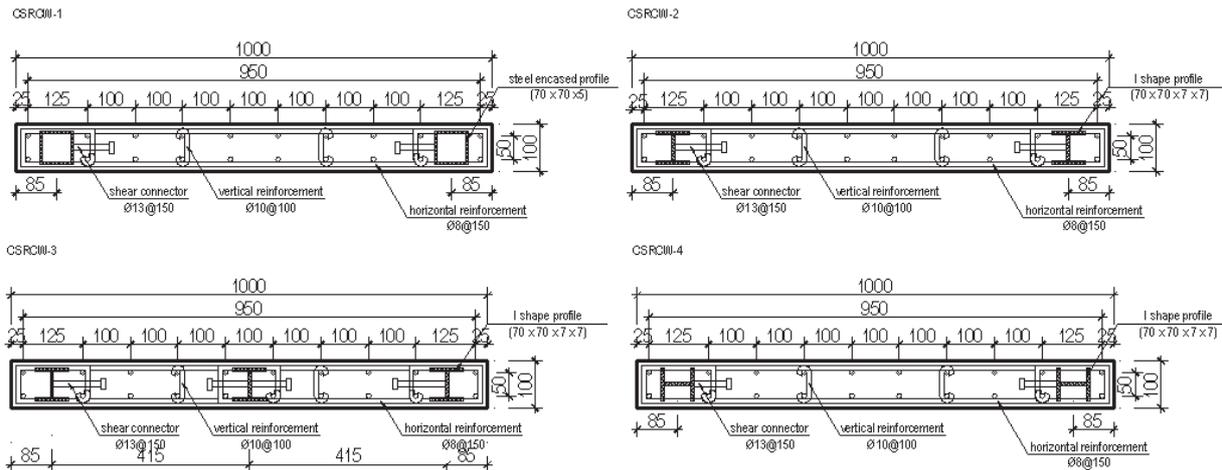


Figure 12. Configurations des murs armés mixtes (CSRCW 1 à 4).

La figure 12 montre les sections transversales des 4 spécimens qui ont été retenus dans le cadre de la présente étude de validation. Les profilés métalliques sont connectés au béton par des goujons soudés aux profils. Dans tous les spécimens, les armatures consistent en des barres F10/100 pour les armatures verticales de la zone d'âme du mur et F8/150 pour les armatures horizontales. Les armatures horizontales et verticales sont placées sur les deux faces du mur et connectées par des attaches de 10mm de diamètre. La hauteur des murs est de 3 m. La procédure d'essai consiste en l'application d'une pré-compression du mur, suivie de l'application de charges horizontales appliquées de manière cyclique et d'amplitude progressivement croissante.

La comparaison avec les résultats de simulation numérique est réalisée sur base de la courbe enveloppe des résultats cycliques. Les simulations étant réalisées avec une mise en charge monotone, elles ne peuvent pas prendre en compte la dégradation progressive des structures soumises aux cycles de charge. Ceci explique également en partie la différence de raideur observée entre essais et modèles numériques.

Les propriétés matérielles moyennes identifiées sont les suivantes:

- Profilé en acier: S235,  $f_{ay} = 335$  MPa et  $E_a = 205000$  MPa;
- Armatures: S550,  $f_{sy} = 548$  MPa,  $E_a = 211000$  MPa;
- Béton: C20/25,  $f_{cm} = 57$  MPa,  $E_{cm} = 37096$  MPa.

Les résultats sont comparés à la figure 13 en termes de courbe force-déplacement et à la figure 14 en termes de diagramme d'interaction. On constate que les résultats numériques et les résultats obtenus avec l'outil de calcul simplifié sont globalement concordants. On constate aussi que l'hypothèse consistant à négliger l'inertie propre des profilés, faite dans l'outil de calcul simplifié, ne semble pas porter à conséquence par rapport aux résultats des simulations numériques qui prennent en compte de manière explicite le comportement de ces profilés.

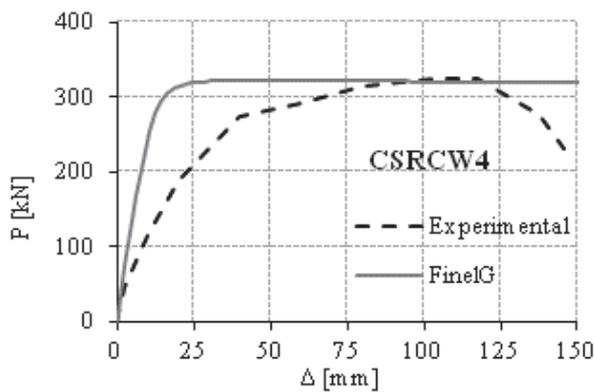
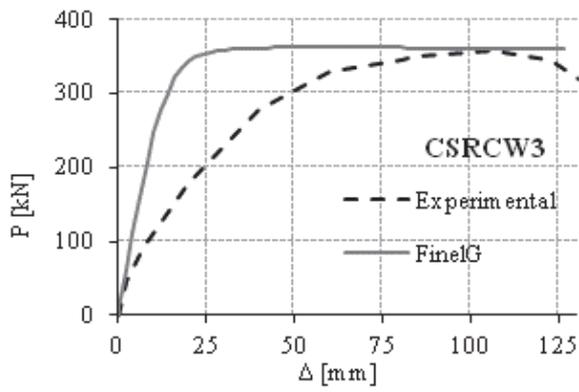
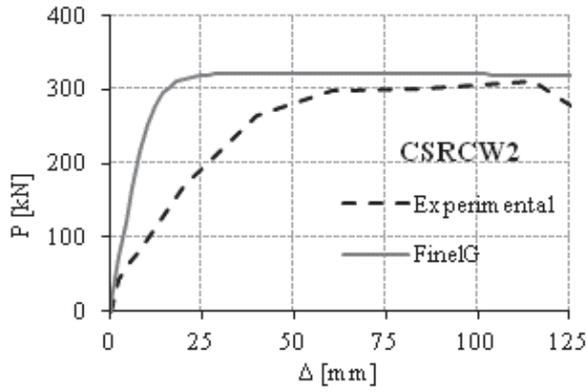
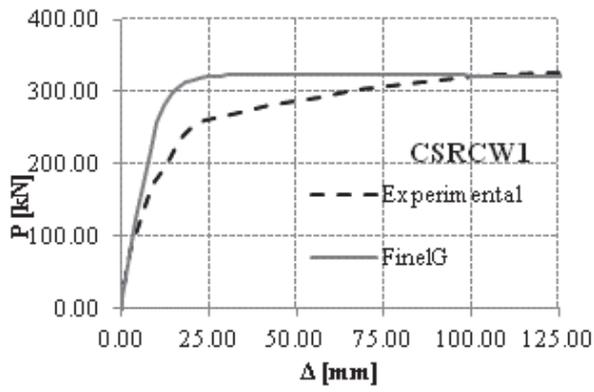


Figure 13. Comparaison des courbes charge-déplacement pour les 4 murs armés mixtes étudiés.

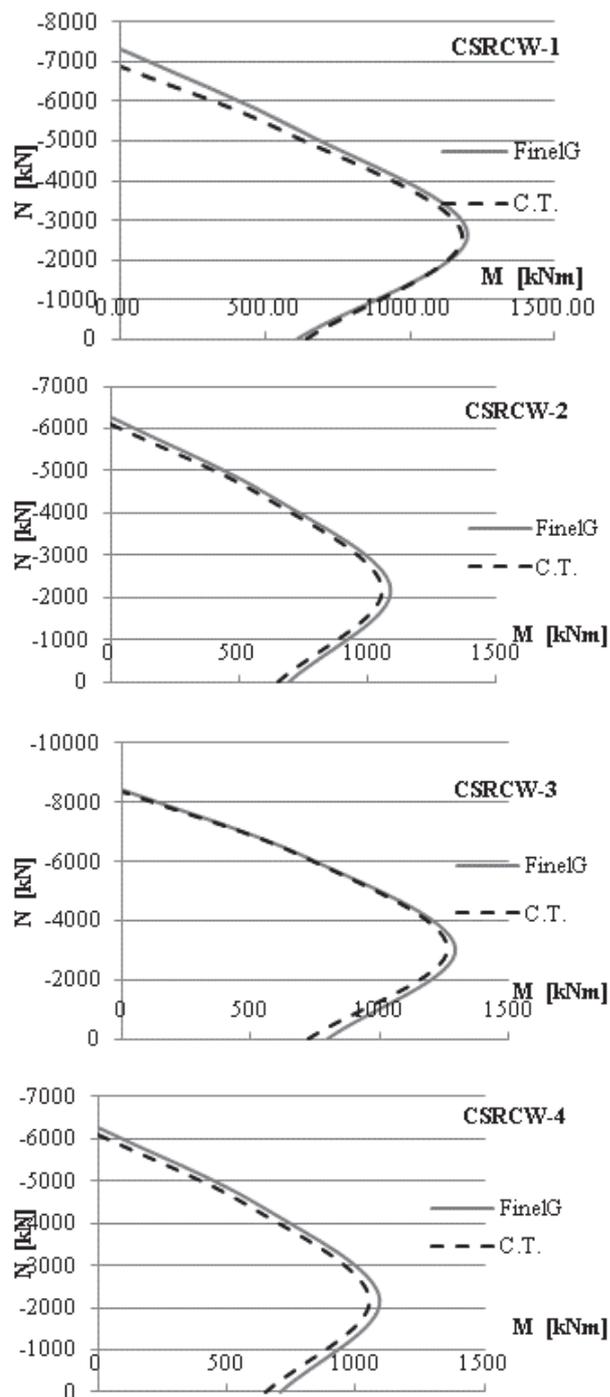


Figure 14. Comparaison des diagrammes d'interaction M-N pour les 4 murs armés mixtes étudiés.

#### 4. CONCLUSIONS

Les systèmes structuraux utilisant des murs de contreventements armés mixtes présentent d'excellentes performances en situation sismique. La littérature technique montre cependant que les connaissances nécessaires pour dimensionner de tels murs comprenant plusieurs profilés noyés dans le béton sont relativement limitées. Sur base d'une méthode préexistante dans certaines normes et initialement destinée au dimensionnement des poteaux mixtes incluant un unique profil noyé dans un béton de classe ordinaire, une extension est développée dans le but de permettre le calcul des diagrammes d'interaction M-N des murs armés. Cette approche a été implémentée dans un outil de calcul simple, intégré dans un tableur, afin de faciliter son utilisation pratique. Les résultats ont été

validés par comparaison avec des résultats expérimentaux et des résultats numériques obtenus à l'aide d'un logiciel de simulation par la méthode des éléments finis. Dans le cadre de son application au dimensionnement des murs, la méthode de calcul prend en compte la valeur maximale de la résistance du béton en conditions confinées au niveau des parties latérales de ces murs, ainsi que recommandé par l'Eurocode 8. En supposant une distribution linéaire des déformations axiales, à travers la section mixte, il est également possible de déterminer facilement la longueur de la zone confinée.

## 5. REMERCIEMENTS

Les résultats expérimentaux présentés dans cette contribution ont été soutenus par l'Université Technique de Cluj-Napoca pour les résultats relatifs aux poteaux mixtes et par l'Université Technique de Timisoara pour les résultats relatifs aux murs armés. H. Degée remercie également le soutien reçu de la part du Fonds de la Recherche Scientifique-FNRS.

## 6. REFERENCES

- Dan, D., Fabian, A. and Stoian, v. (2011). Nonlinear behaviour of composite shear walls with vertical steel encased profiles. *Engineering Structures* 33, 2794-2804.
- Campian, C. (2000). Contribution a l'étude du comportement et au calcul de poteaux mixtes acier-béton sous des charges transversales de variation monotone ou cyclique alternée). Doctoral thesis, Cluj-Napoca, Romania.
- Sav, V. (2011). Stalpi cu sectiune mixta otel beton folosind beton de inalta rezistenta. Doctoral thesis, Cluj-Napoca, Romania.
- FINELG User's Manual. Non linear finite element analysis software. Version 8.2., 1999.
- Bogdan, T., Degée, H., Plumier, A. and Campian, C. (2102). A simple computational tool for the verification of concrete walls reinforced by embedded steel profiles, proceedings of the 15 World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon.
- Bogdan, T., Plumier, A., Campian, C., Somja, H. and Degée, H. (20120). Development of a computational tool for concrete sections reinforced by steel profiles. Subm. for publication to J. of Steel and Composite Structures.