

---

# Etude de la résistance des poteaux mixtes de section circulaire remplis de béton chargés axialement.

**Belounis Radia\*1 , Mimoune Mustafa 2**

*1 Département de Génie Civil, Université Mentouri, Constantine 25000, Algérie*

*2 Département de Génie Civil, Université Mentouri, Constantine 25000, Algérie.*

*Professeur et Directeur du Laboratoire de Mécanique des Sols et Structures L.M.S.S*

\*E-mail : [malinerad@yahoo.fr](mailto:malinerad@yahoo.fr)

---

*RESUME . Dans le présent travail nous allons faire l'étude de la résistance des poteaux mixtes de section circulaire remplis de béton. Afin de réaliser ceci, des travaux expérimentaux et des analyses non linéaires par éléments finis ont été employés pour les comparer avec la résistance théorique du poteau mixte issue du calcul numérique basé sur la méthode simplifiée proposée par l'Eurocode 4. Ce travail traite un seul type de sections mixtes .Une description de la méthode de calcul utilisée y est aussi effectuée ainsi que les limitations, et les hypothèses de calcul, une étude paramétrique , et une étude comparative dans le but de mettre en valeur ce type innovant d'élément de structure .*

*SUMMARY. In this work we will study the resistance of composite columns of circular cross section filled with concrete. To achieve this, experimental work and finite element nonlinear analysis were used to compare with the theoretical strength of the composite column after the numerical calculation based on the simplified method proposed by Eurocode 4. This work deals with one type of composite sections. A description of the method of calculation is also conducted and the limitations and assumptions, a parametric study and a comparative study in order to develop this type innovative of structural element*

*MOTS CLES : Eurocode 4, poteau mixte, ductilité, rigidité, éléments finis, capacité portante.*

*KEY WORDS: Eurocode 4, composite column, ductility, stiffness, finite element, bearing capacity.*

---

### **1. Introduction :**

La technologie des structures mixtes avait été utilisée pour la première fois pour protéger les sections métalliques contre l'incendie. Au début, l'action mixte qui réside dans la structure et augmente sa performance n'était pas prise en considération, cette dernière n'avait été reconnue qu'au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle où on a commencé à l'étudier en raison de l'augmentation de la rigidité et la résistance des éléments structuraux. Il existe une variété de sections mixtes ; elles peuvent être composées de tubes en acier remplis de béton, ou de profilés en acier enrobés de béton (N . Jamaluddin et al )

Les tubes en acier remplis de béton sont de plus en plus utilisés dans la conception des structures modernes élancées. Leur utilisation contribue à afférer aux éléments *une haute résistance, une grande ductilité et une rigidité élevée*, avec une optimisation remarquable des matériaux mis en œuvre. En plus de ces avantages, les tubes en acier servent aussi de coffrage ce qui réduit le coût et la durée de réalisation. En effet, ils constituent les éléments principaux développant la capacité de résistance pour reprendre les charges verticales et servir de contreventement pour équilibrer les charges latérales.

L'objectif principal de ce travail est un début pour développer une formulation permettant de prédire la résistance des poteaux en section circulaire remplis de béton et mettre en évidence les facteurs les plus influents.

### **2. Travaux expérimentaux :**

La définition d'un poteau mixte est basée sur la contribution plus ou moins importante de l'acier à la résistance de l'élément; en raison de l'élancement souvent plus important et la flexibilité plus grande de ce dernier, son mode de fonctionnement s'apparente à celui des poteaux métalliques, affecté par des imperfections géométriques et structurelles (Z.H. Lu et al).

### **3. Paramètres caractérisant le comportement des poteaux mixtes :**

Le comportement des poteaux en section circulaire remplis de béton est intimement lié aux lois constitutives des matériaux utilisés, notamment la loi du béton confiné. Quoique l'effet du confinement n'existe pas au premier stade de chargement, celui-ci intervient dans une étape tardive lors de l'augmentation de l'expansion latérale et transfert de charge du tube d'acier au béton. Ce comportement dépend de plusieurs facteurs tels que : le diamètre du poteau, l'épaisseur du tube d'acier, la résistance du béton et la limite élastique de l'acier (Richard M, et A. Chair et al).

#### 4. Paramètres influant la résistance des poteaux mixtes :

##### 4.1. Effet de la résistance du béton, $f_{co}$ :

Les figure 1, et 2 expriment des résultats des travaux de (Ehab et al; Susantha et al.) . les figures 1 montrent l'effet de la résistance caractéristique du béton sur le comportement résistance plastique -raccourcissement du spécimen. On constate dans les figures 1a et 1b que la rigidité initiale est non affectée avec l'augmentation de la résistance du béton. La résistance de l'élément augmente avec cette variation, il en est de même pour l'énergie de déformation. Quant à la figure 1b, la capacité de déformation se trouve réduite

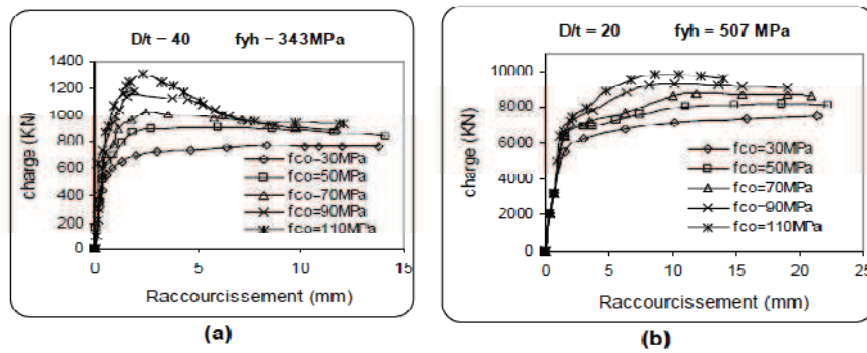


Figure 1. Effet de la résistance du béton,  $f_{co}$

##### 4.2. Effet du rapport $D/t$ :

La figures 2 exhibe l'influence du rapport  $D/t$  (Diamètre sur l'épaisseur du tube d'acier) sur la courbe charge raccourcissement longitudinal de l'élément. On constate que la rigidité initiale est toujours non affectée, car l'intervention du confinement à ce stade reste négligeable. La résistance de l'élément augmente avec la diminution du rapport  $D/t$ .

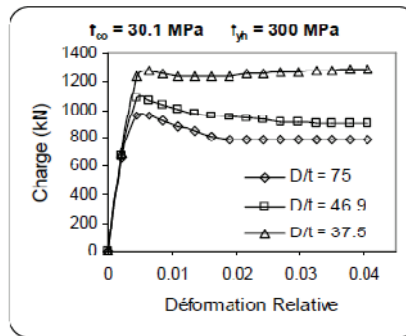
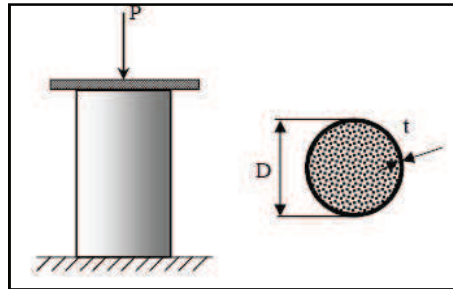


Figure 2. Effet du rapport  $D/t$ .

**5. Détermination de résistance des poteaux mixtes de section circulaire remplis de béton :**



**Figure 3.** Elément en tube d'acier soumis à une force de compression  $P$

L'équation de base permettant de déterminer la résistance est de la forme:

$$P = P_c + P_s = A_c f_c + A_s f_s \quad [1]$$

Dans cette équation les termes  $A_c$  et  $A_s$  sont supposés connus, ils représentent respectivement l'aire du béton et celui de l'acier enveloppant.  $f_c$  et  $f_s$  respectivement les contraintes limites dans le béton et l'acier, reste à affecter des facteurs de sécurité en se basant sur les phénomènes se produisant dans la section mixte tels le voilement local, et le confinement du béton par le tube en acier lors de chargement du poteaux.

**5.1. Voilement local des sections :**

Le voilement est un phénomène local qui survient lorsqu'une plaque est comprimée. Il est caractérisé par de grandes déformations hors du plan de cette dernière qui mènent à la rupture de la pièce. Dans le cas d'un poteau en compression, lorsqu'une des plaques voile ne peut plus supporter de charge, les autres plaques deviennent plus sollicitées.

Un tube en acier rempli de béton a une capacité de voilement local d'environ 50% davantage que celle pour un tube en métallique depuis le tube en acier est retenu contre le voilement à l'intérieur par le béton de remplissage [3]. L'effet du voilement local sur la résistance à la compression axiale des tubes métalliques circulaires est une fonction du rapport diamètre/épaisseur ( $D/t$ ) et est rendu compte dans un certain nombre de normes de conception comme indiqué sur le tableau 1.

**Tableau 1 .** Caractéristiques géométriques et mécaniques

Norme	BS5400/ACI318	AIJ	ANSI/AISC	Eurocode 4
Rapport $D/t$	$\frac{D}{t} \leq \sqrt{\frac{8Ea}{f_y}}$	$\frac{D}{t} \leq \left(\frac{23520}{f_y}\right) 1,5$	$\frac{D}{t} \leq 0,15 \left(\frac{Ea}{f_y}\right)$	$\frac{D}{t} \leq 90 \left(\frac{235}{f_y}\right)$

### 5.2. Confinement du béton :

Pour une section creuse circulaire remplie de béton, une augmentation de résistance à la compression provient du frettage du poteau de béton. Elle n'est effective que si le profil creux en acier est circulaire et suffisamment rigide pour s'opposer efficacement au gonflement du béton comprimé sous l'effet de la compression axiale. Cette augmentation de résistance ne peut donc être utilisée dans les calculs que lorsque l'élanement réduit du poteau mixte constitué d'un tube circulaire rempli de béton ne dépasse pas 0,5 et que le plus grand moment fléchissant de calcul admis,  $M_{\max.Sd}$ , calculé au premier ordre, ne dépasse pas 0,1 ( $N_{Sd}.d$ ) où  $d$  représente le diamètre extérieur de la poteau et  $N_{Sd}$  l'effort de compression sollicitant de calcul. La résistance plastique de calcul à la compression d'un poteau mixte fait d'une section creuse circulaire remplie de béton peut être calculée par la relation suivante:

$$N_{plRd} = A_a \eta_a \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \left[ 1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}} \right] \quad [2]$$

où  $t$  représente l'épaisseur de la paroi du tube en acier. Les coefficients  $\eta_a$  et  $\eta_c$  sont définis ci-après pour  $0 < e \leq d/10$ , où  $e$  désigne l'excentricité de l'effort axial de compression, défini par le rapport  $M_{\max.Sd}/N_{Sd}$  :

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) \left( 10 \frac{e}{d} \right) \quad [3]$$

$$\eta_c = \eta_{c0} + (1 - \eta_{c0}) \left( 10 \frac{e}{d} \right) \quad [4]$$

Pour  $e > d/10$ , on doit adopter  $\eta_a = 0$  et  $\eta_c = 1,0$ . Dans les relations [3] et [4] ci-dessus, les facteurs  $\eta_{a0}$  et  $\eta_{c0}$  sont les valeurs de  $\eta_a$  et  $\eta_c$  pour une excentricité  $e$  nulle. Ils sont donnés en fonction de l'élanement réduit  $\bar{\lambda}$  selon:

$$\eta_{a0} = 0,25(3 + 2\bar{\lambda}) \leq 1 \quad [5]$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2 \leq 0 \quad [6]$$

Lorsque les déformations transversales associées au coefficient de Poisson d'un béton chargé axialement ne sont pas libres de prendre place due à une retenue latérale, on remarque une augmentation de la résistance en compression du béton. Ce phénomène est communément appelé confinement du béton. En empêchant le béton de se déformer transversalement (Hsuan-Teh HU et al ) L'acier applique des efforts latéraux sur le béton qui créent la pression de confinement.

La figure 3 présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Cette figure (Richard Maranda) met en évidence les différences de comportement entre ces deux bétons.

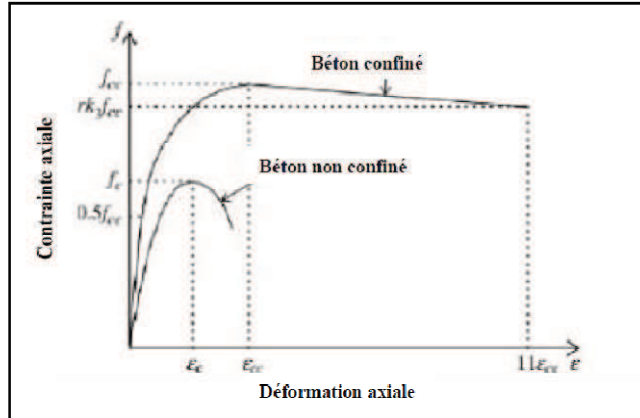


Figure 3. Phénomène de confinement.

### 5.3. L'effet de l'excentricité du chargement :

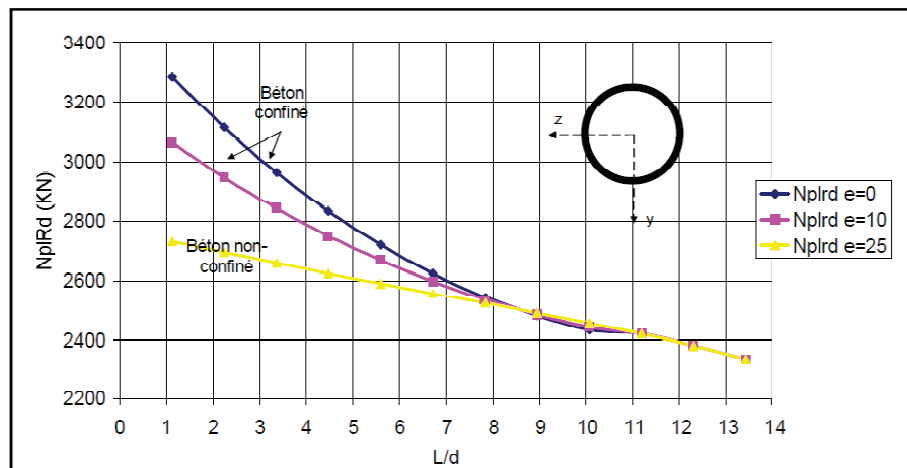


Figure 4. L'effet de l'excentricité.

On a voulu déterminer la résistance des poteaux mixtes circulaire en variant la valeur de l'excentricité de charge en fonction de l'élancement des poteaux  $L/d$ , on remarque sur la figure 5-22 que le poteau d'excentricité  $e=0$  donne la plus grande résistance, ensuite celui d'excentricité  $e=10$ mm, et la résistance la plus faible est celle d'excentricité  $e=25$ mm, cela est due à l'interaction entre la compression et la flexion exercée sur l'élément se qui a réduit sa résistance.

### 6. Codes de dimensionnement :

Pendant les deux dernières décennies, les chercheurs ont suggéré des méthodes analytiques et des procédures de conception pour les colonnes mixtes et des codes de conception ont été formulés. Chacun de ces codes est écrit au sujet de réfléchir les philosophies de conception et les pratiques en matière de conception dans les pays respectifs. Pendant les deux dernières décennies, différents codes du spécifique pour la conception des colonnes tubulaires en acier remplis de béton ont été employés.

### **6.1. La norme européenne EUROCODE 4 :**

Ce code emploie les concepts des états limites pour atteindre l'objectif de l'utilité et de la sécurité en appliquant les facteurs de sûreté partiels aux charges et aux propriétés des matériaux. Basé sur des résultats expérimentaux, on lui a recommandé que les règlements d'EC4 au sujet du facteur de 0,85 ne doivent pas être appliqués aux sections tubulaires remplies de béton de haute résistance. C'est le seul code qui traite les effets du chargement à long terme séparément.

L'Eurocode 4 présente deux méthodes de dimensionnement des poteaux mixtes.

- La première est une *Méthode Générale* qui impose de prendre explicitement en compte les effets de second ordre et les imperfections.

- La seconde est une *Méthode Simplifiée* utilisant les imperfections géométriques appropriées et calibrées pour un calcul élastique équivalent au 2ème ordre géométrique local (ou éventuellement global pour le cas des structures souples). Cette méthode est en pratique limitée au calcul des poteaux mixtes présentant une section doublement symétrique et uniforme sur la hauteur. Les deux méthodes sont fondées sur les hypothèses classiques suivantes:

- Il y a une interaction complète entre la section en acier et celle en béton, jusqu'à la ruine.

- Les imperfections géométriques et structurales sont prises en compte dans le calcul.

- Les sections droites restent planes lors de la déformation du poteau.

L'application de la seconde méthode comporte les limitations suivantes :

- La section du poteau est constante et présente une double symétrie sur toute la hauteur du poteau.

- La contribution relative de la section en acier à la résistance de calcul de la section complète, à savoir  $\delta = (A_a f_y / \gamma_a) / N_{pl,Rd}$ , est compris entre 0,2 et 0,9 où:  $\delta$  est le rapport de la contribution du profilé en acier à la capacité portante de la section;  $A_a$  – l'aire de la section droite d'acier;  $f_y$  – la résistance élastique de l'acier du profile;  $\gamma_a$  – la résistance élastique de l'acier du profile;  $N_{pl,Rd}$  – la résistance plastique des sections transversales en compression.

- L'élanement réduit,  $\lambda$ , du poteau mixte ne dépasse pas la valeur 2. Pour les sections totalement enrobées, l'aire des armatures doit être égale au moins à 0,3% de

XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

l'aire en béton et les armatures présentent des épaisseurs d'enrobage satisfaisant des limites données.

### **6.2. La norme japonaise AIJ<sub>LSD</sub>-90 :**

Au Japon, les constructions utilisant des éléments à section mixte acier-béton sont fréquentes pour des bâtiments avec une grande ou une moyenne hauteur. Pour les projets on utilise une méthode qui est basée sur la résistance du poteau à la charge sismique appropriée, résistance obtenue en additionnant les capacités portantes des composants de la section transversale, soit acier et béton.

### **6.3. La norme britannique BS 5400 Part. 5 :**

La méthode de calcul développée dans cette norme est plutôt empirique, déduite d'une méthode déjà appliquée aux poteaux en acier. On utilise des coefficients partiels de calcul pour les sollicitations ainsi que pour les matériaux.

On considère également une distribution plastique des contraintes dans la section mixte, conduisant à une courbe d'interaction M-N. Pour prendre en compte dans les calculs les effets de longue durée dans le béton, des caractéristiques géométriques réduites sont proposées pour la partie en béton de la section, considérée non-fissurée. Comme dans la norme européenne Eurocode 4, on tient compte, dans les poteaux remplis de béton, de l'augmentation de la résistance du béton en raison de son confinement.

### **6.4. La norme américaine de American Concrete Institute ACI 318 :**

Dans ce code on utilise la méthode des états limites ultimes et des facteurs de réduction des charges et des résistances. La capacité portante d'un élément mixte est calculée comme pour un élément en béton armé, en considérant que la ruine est atteinte pour une déformation limite de 0,3‰ dans les fibres du béton. Les effets de la souplesse sont analysés par l'augmentation de la valeur du moment en utilisant la charge critique d'Euler réduite (ramenée à l'effort normal plastique). Une rigidité réduite équivalente est considérée pour la partie en béton. En outre, on fixe des valeurs minimales des excentricités pour satisfaire les tolérances constructives.

### **6.5. La norme américaine AISC – LRFD de l'American Institute of Steel Construction :**



## Résistance des poteaux mixtes de section circulaire remplie de béton chargés axialement

La méthode utilisée dans ce code est celle du facteur de charge (LFRD), qui implique que les charges soient multipliées par un facteur de charge, L.F. (plus grand que 1,0) et les résistances nominales des éléments par un facteur de réduction,  $\Phi$  (moindres que 1,0). La méthode s'apparente à celle proposée par l'ACI, avec en fait peu de différences. La ruine est supposée atteinte dans le béton pour une déformation maximale de 0,03%.

### 7. Comparaison entre les codes de conception :

Les standards utilisent différents facteurs pour les charges ou pour les combinaisons des charges. Les standards américains (BS5400, AIJ, ACI et AISC) utilisent des facteurs de réduction,  $\Phi$  (ayant des valeurs de 0,6 et 0,95), par rapport à l'Europe où on utilise des coefficients partiels pour les matériaux. On utilise différentes valeurs pour les matériaux utilisées, d'habitude de 1,5 à 1 ou 1,1.

Le code japonais utilise la méthode de résistance admissible, avec la recommandation de vérifier toujours la capacité portante ultime pour la situation d'un séisme sévère possible. Le tableau donne la formule de calcul de la résistance plastique des sections mixtes en tube circulaire remplie de béton.

**Tableau 2 . Effort de Résistance plastique**

Norme	BS5400	AIJ /ACI318	ANSI/AISC	Eurocode 4
Résistance plastique $N_{pl.Rd}$	$A_s.f_y+0,675.A_c.f_{ck}$	$A_s.f_y+0,85.A_c.f_{ck}$	$A_s.f_y+0,95.A_c.f_{ck}$	$A_s.f_y/1,1+A_c.f_c/1,5$

Les tableaux illustrent des résultats des travaux menés par (Hsuan-Teh HU et al) comparés à ceux issu du calcul par la méthode des éléments finis, et les différents codes cités précédemment.

**Tableau 3 . Caractéristiques géométriques et mécaniques**

N° Spécimen	D (mm)	t (mm)	D/t	L (mm)	$f_y$	$f_c$ (MPa)	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )
CU-022	140	6,5	22	602	313	23,8	12661,265	2724,735
CU-040	200	5	40	840	265,8	27,15	28338,5	3061,5
CU-047	140	3	47	602	385	28,18	14095,46	1290,54
CU-070	280	4	70	840	272	31,15	58077,44	3466,56
CU-100	300	3	100	900	232	27,23	67852,26	2797,74
CU-150	300	2	150	840	341,7	27,23	68778,56	1871,44

**Tableau 4 . Résistance des spécimens.**

N° Spécimen	N(Exp) (KN)	N(MEF) (KN)	N(EC4) (KN)	N(AIJ,ACI, (KN)	N (BS5400) (KN)	N(ANSI/AISC 360-05) (KN)
CU-022	1666	1628	1154,18	1108,98	1056,24	1139,11
CU-040	2016	2024	1583,14	1467,73	1333,08	1544,66
CU-047	893	860	894,07	834,48	764,97	874,21
CU-070	3025,2	3029	2752,02	2480,62	2164,05	2661,56
CU-100	2810	2835	2496,69	2219,55	1896,21	2404,31
CU-150	2607,6	2618	2512,31	2231,38	1903,63	2418,67

## 8. Conclusion :

Une équation calculant la résistance des tubes d'acier circulaires remplis de béton est loin d'être exacte. Le modèle de confinement a été parfaitement introduit. La prédiction des résultats obtenus a montré une bonne concordance avec ceux préconisés par les différents codes ainsi que ceux donnés par la méthode des éléments finis. Une étude paramétrique mettant en évidence l'influence des principaux paramètres notamment, le rapport D/t, la résistance du béton,  $f_{co}$  et la limite élastique de l'acier transversal  $f_{yh}$  a été menée. Les résultats analytiques ont montré l'effet du confinement sur la résistance des éléments en tube circulaire remplie de béton

## 9. Références bibliographiques :

- Richard Maranda ; « Analyse par éléments finis de poteaux mixtes avec section d'acier en I de classe 4 ». *Mémoire présentée en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées (génie civil) décembre 1998. Département des génies civil, géologique, et des mines, Ecole polytechnique de MONTRÉAL.*
- Hsuan-Teh HU, Chiung-Shiann HUANG, Ming-Hsien WU and Yih-Min WU Numerical analysis of concrete-filled steel tubes subjected to axial force »
- Z.H. Lu; and Y.G. Zhao; « Mechanical behavior and ultimate strength of circular cft columns subjected to axial compression loads »
- Ehab E., Young B., 2006 « Behaviour of Normal Strength Concrete-Filled Compact Steel Tube Circular Stub Columns», *Journal of Constructional Steel Research*. 62, 706–715 .
- Susantha K.A.S., Hanbin G., Usami T., 2001, « Uniaxial Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Various Shaped Steel Tubes », *Engineering Structures*, 23, 1331–1347.
- ACI. Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI 318-99. Detroit (USA): American Concrete Institute; 1999.

Résistance des poteaux mixtes de section circulaire remplie de béton chargés axialement

Design of Composite Steel and Concrete Structures. Section 1. General Rules and Rules for Buildings. prEN 1994-1-1. EUROCODE 4: Part 1.1, Brussels: CEN, European Committee for Standardisation, Final Draft, August / September 2003.

A. Chair, B. Bousalem, A. Djebbar ; « Prédiction de la charge ultime des poteaux en tube d'acier remplis de béton étude théorique et constat réglementaire ».

Standard for Limit State Design of Steel Structures (Draft). AIJLSD-90, Architectural Institute of Japan, Tokio, 1990 AIJ 90.

Steel Concrete and Composite Bridges Code of Practice for Design. British Standards Institution, BS 5400 Part 5 B S, London, 1989.

Limit States Design of Concrete Structures. ACI 318, American Concrete Institute, 1999.

Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. AISC 97, American Institute of Steel Construction, Inc. Chicago, Illinois, USA, 1997.