

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et hydraulique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية و الري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en : Génie civil

Spécialité (Option) : Modélisation numérique des géomatériaux.

**Comportement expérimental des poteaux courts en
acier laminée à froid remplis par différents types de
bétons**

Présentée par :
Meriem Senani.

Soutenue publiquement le : 04/06/2017.

Devant le jury composé de :

Pr.Mellas Mekki	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr.Guettala Abedelhamid	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. Ferhoune Noureddine	Maitre de Conférences 'A'	Co-rapporteur	Université de Oum El Bouaghi
Dr. MEZGHICHE Bouzidi	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra
Pr. Bouhicha Mouhamed	Professeur	Examineur	Direction générale de recherche scientifique- MSRS.

Remerciements

La réalisation de cette thèse a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude au directeur de ma thèse, Pr. Guettala Abdelhamid d'avoir accepté de diriger ce travail, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, mais aussi pour la confiance, l'autonomie qu'il m'a accordé tout au long de mon parcours.

Je voudrais aussi que mon co-directeur Dr. Ferhoune Noureddine trouve ici tous mes meilleurs salutations et ma reconnaissance pour son aide, les heures et les sacrifices pour corriger et donner ces remarques et commentaires importants m'ont permis de mieux aborder la rédaction de la thèse.

Un grand merci à monsieur José Barroso de Aguiar pour avoir me guider et me diriger toutes la période de mon stage à l'université de Minho Guimarães Portugal et aussi à sa gentillesse et surtout sa disponibilité, je n'oublierais jamais le premier jour de mon arrivé à Guimarães et la prise en charge que vous nous avez réservée.

Je souhaite remercier aussi le personnel technique des trois laboratoires : départements de GC et LMDC de l'université de Biskra et l'université d'Annaba, et au LMDC laboratoire de physique de l'université de Minho Guimarães.

Mes plus vifs remerciements s'adressent :

à Monsieur le Professeur Mellas mekki, doyen du faculté des sciences et techniques de l'Université de Biskra d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance ;

à Monsieur Professeur Bouhicha Mohamed directeur général de la direction générale de la recherche scientifique MSRS

à Monsieur Docteur Mezghich Bouzidi d'avoir accepté d'examiner cette thèse,

à Professeur Edith et doctorante Sandra Cunha pour leurs aide et collaboration tous le long de ma durée de stage à l'université de Minho Guimarães Portugal.

A mes proches et mes amies pour leur soutien moral et leur aide et encouragement, au cours de la réalisation de ma thèse

Enfin j'adresse mes plus sincères remerciements dans ces derniers lignes aux plus chers personnes à mon cœur mes parents et mon mari Nadjib ceux en qui je puise avancer et ma volonté pour travailler sans eux je n'aurais jamais pu réaliser ce que j'ai réalisé jusqu'à présent, je leur dois toute ma réussite que dieu me les gardes et à mon frère Salah Eddine et ma sœur Khaoula et mes belles sœurs Amel et Asma et Nour et Fatma zahra et mon petit neveu Outhman et à mes tantes et mes oncles et à toute la famille Senani et la famille Tioura .

Merci à tous et à toutes.

PUBLICATIONS ISSUES DE CETTE THESE

❖ Publications dans des journaux internationaux

1. **M.Senani** , N.Ferhoune, A.Guettala , « Substitution of the natural sand by crystallized slag of blast furnace in the composition of concrete », Alexandria Engineering Journal, (2016).
2. **N.Ferhoune**, M.Senani, A.Guettala , « Behavior of Hollow Thin Welded Tubes Filled with Sand Slag Concrete », Advances in Materials Science and Engineering, 10.1155/2016/5218738 (2016).

❖ Communications internationales et nationales

1. **M.Senani, N.Ferhoune, A.Guettala, J.Aguiar** ,« Characterization of Concrete with Incorporation of Slag From Blast Furnace », international conference Materiais les 9 et 12 avril 2017, Aveiro, Portugal.
2. **M.Senani, N.Ferhoune, A.Guettala**, « use of the waste blast furnace of ElHadjar in the core concrete of composte columns », 3^{ème} congrés internationale sur la technologie et la durabilité du béton « CITEDUB3 », Alger les 26 et 27 septembre 2016.
3. **M.Senani, N.Ferhoune** , « substitution of the natural sand by crystallized slag of blast furnace in the preparation of sand concrete » 3^{ème} worrkshop, caractérisation et modélisation des géomatériaux , Biskra les 09 et 10 novembre 2015.
4. **M.Senani, N.Handel** , « comportement des tubes creux remplis par un béton de sable de laitier »,workshop, caractérisation et modélisation des géomatériaux ,Biskra les 25 et 26 février 2014.
5. **M.Senani, N.Handel, S.Feddaoui**, « comportement des tubes creux en acier laminé à froid remplis de béton de sable », 1er séminaire national de génie civil SNGC12, souk ahras 22 et 23 octobre 2012.

Résumé

Dans ce travail on présente des résultats expérimentaux, de la capacité portante des poteaux creux en acier laminé à froid à parois mince remplis par des bétons de sable. Une série d'essais a été effectuée pour étudier le comportement des poteaux mixtes courts sous charge de compression axiale. Au total de 45 poteaux de section carrée ont été testées. Les principaux paramètres étudiés sont : la hauteur du spécimen (50mm-100mm-150mm-200mm-300mm-400mm-500mm), type et taux des connecteurs de cisaillement, forme géométrique de la section transversale(carré , rectangulaire) , type de la charge appliquée (uni-axiale, excentrique) et type de béton de remplissage (béton conventionnelle ordinaire ou béton de sable de laitier à différent fraction de sable de laitier). Toutes les charges d'écrasement ont été prédites analytiquement en utilisant le règlement Euro code 3 dans le cas des poteaux en acier, et Euro code 4 pour les poteaux mixtes.

À partir des résultats d'essais obtenus, il est confirmé que la longueur des tubes, et l'utilisation des connecteurs ont un effet considérable sur la capacité portante et le mode de rupture. Dans tous les tubes testés on a observé que le remplissage des tubes vides par de béton de sable améliore la capacité portante et retarde le problème d'instabilité des tubes composés. L'ensemble des résultats obtenus analytiquement par EC3 et EC4 n'ont pas été conservative.

Mots clés : béton de sable, laitier cristallisé, voilement, mode de rupture, capacité portante.

Abstract

In this work experimental results are presented of the carrying capacity of hollow columns of thin-walled cold-rolled steel filled with sand concrete. A series of tests has been carried out to study the behavior of short stubs under axial compression load. A total of 45 square stubs were tested. The main objectives of these tests were to clarify the performance of steel specimens filled with sand concrete compared to those filled with ordinary concrete. The main parameters studied are: the height of the specimen (50mm-100mm-150mm-200mm-300mm-400mm-500mm), type and rate of shear connectors, geometric shape of the cross-section (square, rectangular) type of load Applied (axial, eccentric) and type of filling concrete. All crush loads were analytically predicted using Euro code 3 in the case of steel stubs and Euro code 4 for mixed stubs.

From the test results obtained, it is confirmed that the length of the tubes and the use of the connectors has a considerable effect on the bearing capacity and the failure mode. In all short tubes tested , it was observed that the filling of the empty tubes by Sand concrete improves bearing capacity and delays the instability problem of compound tubes. All the results obtained analytically by EC3 and EC4 were not conservative.

Keywords: sand concrete;crystallized slag;buckling ;failure mode;bearing capacity.

ملخص

في هذا العمل نقدم النتائج التجريبية لقدرة تحمل أعمدة الصلب الجوفاء المدرفلة على البارد ذات جدران رقيقة مليئة بالخرسانة الرملية. وقد أجريت سلسلة من التجارب لدراسة سلوك هذه الأعمدة المركبة والقصيرة تحت عبء الضغط المحوري. تم اختبار مجموعه تتكون من 45 عمودا ذا مقطع مربع الشكل . المعالم الرئيسية التي تم دراستها هي: ارتفاع العينة (50مم-100مم-150مم-200مم-300مم-400مم-500مم) نوع ومعدل الموصلات القص- والشكل الهندسي للمقطع العرضي (مربع، مستطيل) -نوع القوة المطبقة (محورية او غير محورية) -نوع خرسانة المليء (خرسانة عادية أو خرسانة رملية ذات نسب مختلفة من الخبث الرملي) .

جميع القوى تم تحليلها باستخدام رمز النظام اليورو 3 في حالة أعمدة الصلب الفارغة ورمز النظام اليورو 4 للأعمدة المركبة.

من خلال نتائج التجارب، يتم التأكيد على أن طول الأنابيب، واستخدام الموصلات له تأثير كبير على قدرة التحمل ووضع التعب. وقد لوحظ في جميع أنابيب اختبار أن ملء الأنابيب الفارغة بالخرسانة الرملية يحسن قدرة التحمل ويؤخر مشكلة عدم استقرار الأنابيب المركبة. وكانت جميع النتائج التي تم الحصول عليها من الناحية التحليلية بواسطة النظام اليورو 3 و رمز النظام اليورو 4 ليست محافظة .

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرملية، الخبث المحبب، التواء، وضع التعب ، القدرة على تحمل.

Table des matières

Remerciements	ii
Publications issues de cette thèse	iv
Résumé	v
Abstract	vi
ملخص	vii
Sommaire	viii
Tables des figures	xii
Liste des tableaux	xiv
Liste des photos	xv
Liste des symboles	xvi
Introduction générale	1
Chapitre I : étude bibliographique	4
Chapitre II : Matériaux et caractérisation du béton de remplissage	19
1. Introduction	19
2- Matériaux utilisés	20
2- 1 Ciment	20
2- 2 Filler	21
2- 3 Les granulats utilisés.	22
2- 3 – 1-Sables	22
2- 3– 2- Gravier	24
2-4- Superplastifiant	27
2-5. Eau de gâchage	27
2-6. Caractéristique de l'acier utilisé	27
3- Formulation des bétons	28
4- Tests de caractérisation des bétons frais et durcis	29
4-1 Choix et confection des éprouvettes	29

4-2 Cure et conservation des éprouvettes	29
4-3- Caractérisation à l'état frais	30
4-3-1- Essais de consistance	30
4-3-2- Masse volumique du béton frais	30
4-4 Essais mécaniques	31
4-4-1 Dispositif d'essai de compression	31
4-4-2 Essai de compression simple	31
4-4-3 Essai de traction par fendage	31
4-5 Essais hydriques	32
4-5-1 Essai de capillarité	32
4-5-2 Essai d'absorption d'eau massique par immersion	33
4-5-3 Variations dimensionnelles (retrait)	34
4-5-4 Variations pondérales	34
4-6- Analyse au microscope à balayage des bétons	35
5- résultats expérimentaux et analyses	36
5-1- Béton frais	36
5-1-1 Consistance du béton	36
5-1-2 Masse volumique	37
5-2 Béton durci	38
5-2-1 Résistance à la compression	38
5-2-2 Résistance à la traction par fendage	39
5-2-3 Capillarité	39
5-2-4 Absorption d'eau par immersion	40
5-2-5 Analyse des résultats des pertes en poids	40
5-2-6. Analyse de la cinétique de retrait	41
5-2-7. Observation au microscope à balayage des différents bétons	41
6- Conclusion	44
Chapitre III : Comportement des poteaux en acier	46
1. Introduction	46
2. Calcul des poteaux selon le règlement EC3	47
2.1 Comportement mécanique des poteaux moyennement ou fortement élancés	47
2.2. Différence de comportement en fonction de l'élancement	50
2.3. Éléments de connexion acier-béton	50
2.4 classification des connecteurs	51
2.5. Un gain supplémentaire de résistance	54
3. Programme expérimental	56
3.1. Étude expérimental des poteaux en acier laminé à froid et soudé vides	56

3-1-1- Caractéristique de l'acier utilisé	56
3.2 Descriptions des spécimens d'essais	56
3.2.1. Descriptions des spécimens renforcés par des connecteurs de cisaillement	57
4. Matériel d'essai	59
5. Résultats des essais	60
5.1. Les poteaux vides sans et avec connecteurs	60
5.2. Calcul de la charge limite selon l'EC 03	60
5-2-1-Vérification de la condition du non voilement local	60
5-2-2-Vérification si les éprouvettes sont considérées comme courtes	61
5-2-3-Calcul de la charge limite des spécimens vides selon l'EC 3	61
6. Calcul des poteaux selon le règlement EC4	62
6.1 Voilement local des éléments structuraux en acier	62
6.2. Conditions d'utilisation de la méthode simplifiée de calcul	63
6.3. Poteaux mixtes soumis à compression axiale	64
7. Étude expérimental des poteaux en acier laminé à froid et soudé remplis par différents types de béton	68
7.1. Programme expérimental	68
7.1.1 Coffrage	68
7.1.2. Coulage	69
8. Matériel d'essai et procédure	70
9. Résultats des essais	70
9.1. Calcul de la charge limite des spécimens remplis de béton selon l'Euro code	70
4	
10. Analyse et interprétation des résultats	71
10.1. Profils en acier vides	71
11. Mécanisme de rupture des profils vides	73
11.1.-mode de rupture des poteaux vides sans et avec connecteurs:	74
11.2. Comparaison des résultats d'essais des profils composés vides avec et sans connecteurs	75
11.3. Tubes en acier remplis par les deux types des bétons	76
11.4. Comparaison des résultats d'essais des profils composés remplis avec et sans connecteurs	78
11.5. Comparaison des résultats d'essais des profils composés vides et remplis	80

avec et sans connecteurs

12. Mécanisme de rupture des profils remplis de béton	87
13. Etude comparative entre les poteaux de section transversale carrée et section transversale rectangulaire	90
14. Conclusion	96
Conclusion générale	99
Références bibliographique	102
Annexes	108

Table des figures

II.1	Courbe granulométrique du ciment.	21
II.2	Diffractogramme de laitier granulé.	22
II.3	Diffractogramme de sable de dune.	23
II.4	Diffractogramme de sable de laitier cristallisé.	23
II.5	Courbe granulométrique des granulats.	25
II.6	Variation du rapport E/C des différents bétons.	37
II.7	Variation de masse volumique des mélanges de sable.	38
II.8	Résistance à la compression des bétons.	38
II.9	Résistance traction par fendage des bétons.	39
II.10	Capillarité des différents types de bétons.	39
II.11	Absorption par immersion des différents types de bétons.	40
II.12	Perte de poids avec l'âge de durcissement des bétons.	40
II.13	Variation du retrait de dessiccation avec l'âge du béton de sable.	41
II.14	Micrographie MEB pour la structure du béton ordinaire - BO (1000x).	42
II.15	Micrographie MEB pour la structure du béton ordinaire - BO (5000x).	42
II.16	Micrographie MEB pour la structure du béton de sable - BS (1000x).	43
II.17	Micrographie MEB pour la structure du béton de sable - BS (5000x).	43
II.18	Composition chimique générale de béton ordinaire.	44
II.19	Composition chimique générale de béton de sable.	44
III.1	Les courbes européennes de flambement.	48
III.2	Types de connexion.	51
III.3	Degré de connexion au cisaillement.	51
III.4	Types de connecteurs de cisaillement.	53
III.5	CLOU HILTI X_DSH32 P10.	54
III.6	Utilisation de goujons pour augmenter le transfert d'efforts dans les poteaux mixtes.	55
III.7	Section reconstituée transversale en U.	57
III.8	Exemples types de section transversale de poteaux.	64
III.9	Charge de rupture expérimentale des tubes vides après 28 jours.	72

III.10	Charge ultime des tubes vide selon EC3.	73
III.11	Charge ultime expérimentale des tubes sans et avec connecteurs.	75
III.12	Charge de rupture expérimentale des tubes remplis par béton ordinaire.	76
III.13	Charge de rupture expérimentale des tubes remplis par béton de sable.	77
III.14	Charge de rupture expérimentale et selon EC4 des tubes sans connecteurs remplis par béton ordinaire et béton de sable.	77
III.15	Charge de rupture expérimentale et selon EC4 des tubes avec connecteurs en U remplis par béton ordinaire et béton de sable.	78
III.16	Charge de rupture expérimentale et selon EC4 des tubes avec connecteurs en goujons remplis par béton ordinaire et béton de sable.	78
III.17	Gain de résistance des tubes sans connecteur et avec connecteurs remplis avec le béton ordinaire à l'âge de 28 jours.	79
III.18	Gain de résistance des tubes sans connecteur et avec connecteurs remplis avec le béton de sable à l'âge de 28 jours.	80
III.19	Charge de rupture expérimentale des tubes vides et remplis avec les deux types de béton sans connecteurs à l'âge de 28 jours.	81
III.20	Charge de rupture expérimentale des tubes vides et remplis avec les deux types de béton avec connecteurs cornières à l'âge de 28 jours.	81
III.21	Charge de rupture expérimentale des tubes vides et remplis avec les deux types de béton avec connecteurs goujons à l'âge de 28 jours.	82
III.22	Courbe charge –déplacement PBO200 PBS200 sans connecteurs .	83
III.23	Courbe charge –déplacement PBO300 et PBS300 sans connecteurs .	83
III.24	Courbe charge-déplacement PBO40et PBS400 sans connecteurs .	84
III.25	Courbe charge –déplacement PBO500 et PBS500 sans connecteurs .	84
III.26	Courbe charge-déplacement PBO200etPBSC200et PBSG200.	85
III.27	Courbe charge-déplacement PBO300, PBSC300et PBSG300.	85
III.28	Courbe charge –déplacement PBO400,PBSC400et PBSG400.	86
III.29	Courbe force déplacement PBO500, PBSC500 et PBSG500.	86
III.30	Influence de l'excentricité de charge ($e=0$, $e=20\text{mm}$)	94
III.31	Influence de type de section transversale (rectangulaire et carré).	95
III.32	Charge expérimentale Nue et la charge Nuc pour les tubes (carrés et rectangulaires) hauteur 300 mm et 500mm ($e=0$).	96

Liste des tableaux

II-1	Compositions chimiques et minéralogiques du ciment.	20
II.2	Propriétés physiques du ciment.	20
II.3	Propriétés physiques de filler de laitier.	22
II.4	Analyse granulométrique du sable de laitier cristallisé.	24
II .5	Analyse granulométrique du sable de dune.	24
II. 6	Analyse granulométrique du Gravier 5/15.	25
II.7	Caractéristiques physiques du gravier utilisé.	26
II.8	Caractéristiques physiques des sables utilisé.	26
II.9	Compositions chimiques (%) des différents sables et filler.	27
II.10	Caractéristiques techniques du superplastifiant.	27
II.11	Différentes combinaisons des constituants des bétons utilisés	28
II.12	Variation du rapport E/C du béton	36
II.13	Variation de masse volumique des mélanges des différents types de béton.	37
III.1	Les résultats expérimentaux et calculés selon l'EC3 des tubes vides.	60
III.2	Vérification de la condition de non voilement des tubes vides sans et avec connecteurs.	61
III.3	Les valeurs de l'élançement réduit pour les structures souples et rigides.	68
III.4	Les résultats expérimentaux et calculés des tubes remplis avec les différents types de bétons.	71
III.5	Les résultats expérimentaux pour les tubes carrés et rectangulaires vides.	90
III.6	Les résultats expérimentaux et calculés des tubes carrés et rectangulaires remplis avec les différents types de bétons.	91-92

Table des photos

II.1	Sables et fillers utilisés pour la formulation des bétons.	26
II.2	Les éprouvettes en béton.	30
II.3	Essai de consistance.	30
II.4	Masse volumique du béton frais.	31
II.5	Machine de compression.	31
II.6	Essai de traction par fendage.	32
II.7	Séchage des prismes dans une étuve à 105°.	33
II.8	Essai de capillarité.	33
II.9	Essai d'absorption d'eau massique par immersion.	34
II.10	Essai de retrait.	34
II.11	L'évolution de la perte de poids.	35
II.12	Echantillons bétons pour l'analyse avec microscope à balayage.	35
II.13	Microscope électronique à balayage MEB (laboratoire SEMAT université de Minho –Portugal).	36
III.1	Tubes creux avec les deux types de connecteurs goujons et cornières.	58
III.2	Les profils vides et remplis de bétons avec et sans connecteurs avec différents élancements.	58
III.3	Machine de compression pour les tubes .	59
III.4	Les comparateurs utilisés pour la mesure de déplacement vertical et horizontal (essai déformabilité).	59
III.5	Coffrage de côté inférieure du poteau en bois.	68
III.6	Les profils (carré et rectangulaire) remplis de bétons avec et sans connecteurs avec différents élancements.	69
III.7	Mode de rupture des tubes vides sans connecteurs	74

III.8	Mode de rupture des tubes vides avec connecteurs en U.	74
III.9	Mode de rupture des tubes vides avec connecteurs goujons .	75
III.10	Mode de rupture des poteaux remplis avec BO sans connecteurs .	87
III.11	Mode de rupture des poteaux remplis avec BS sans connecteurs .	88
III.12	Mode de rupture des poteaux remplis avec BO avec connecteurs cornière en U .	88
III.13	Mode de rupture des poteaux remplis avec BS avec connecteurs cornière en U.	89
III.14	Mode de rupture des poteaux remplis avec BO avec connecteurs goujons .	89
III.15	Mode de rupture des poteaux remplis avec BS avec connecteurs goujons .	90

Liste des principaux symboles

<i>Symbole</i>	<i>signification</i>
ρ	la masse volumique
σ_t	Contrainte de traction
σ_e	Contrainte d'écoulement
Δ	Masse volumique pratique de béton frais
Δ_0	Masse volumique théorique de béton
ξ	Facteur de confinement
λ	Elancement d'un élément
$\bar{\lambda}$	Elancement réduit d'un élément
χ	coefficient de réduction relatif
η	degré de connexion
μ	coefficient de frottement
γ_v	facteur partiel de sécurité
δ	Rapport de contribution de l'acier
φ_t	coefficient de fluage défini dans l'Euro code 2
a^2	Section de l'éprouvette
A_a	aire de la section transversale de l'acier
A_b	coefficient d'absorption
A_c	aire de la section transversale du béton
A_{eff}	Section effective
A_s	aire de la section transversale de l'armature
b	Largeur d'une section
C	dosage en ciment
C	coefficient de capillarité
d	correspond à la dimension du tamis retenant 10% du granulat.
d	diamètre du fût du goujon
d	diamètre extérieur d'un profil creux rond en acier
D	correspond à la dimension du tamis retenant 90% du granulat
d/D	l'étendue granulaire y compris les fines

E	le dosage en eau
(<i>e</i>)	l'excentricité de l'effort axial de compression
E_a	Module de Young
E_{cm}	valeur moyenne du module sécant du béton
EI	la rigidité flexionnelle du poteau mixte relative au plan de flambement considéré
E/C	Rapport eau sur ciment
E_s	Equivalent de sable par piston
F	Dosage en filler
f_u	résistance ultime en traction spécifiée du matériau du goujon, sans dépasser 500 N/mm ²
f_{ck}	résistance caractéristique sur cylindre du béton à l'âge considéré
F	Charge de rupture
f_y	la contrainte d'écoulement de l'acier
h	la hauteur hors-tout du goujon
h	Hauteur d'une section
H_2	hauteur totale y compris le flocculat
i	Rayon de giration d'une section
I_a	inertie flexionnelle du profil en armature
I_c	inertie flexionnelle du profil en béton
I_s	inertie flexionnelle du profil en acier
K_e	facteur de correction prenant en compte la fissuration du béton
ℓ	longueur critique de flambement
l	longueur de la cornière
N_{pl}	Force de plastification
N_{sd}	l'effort de compression sollicitant de calcul
Ma	désigne masse de l'échantillon après saturation (imbibé dans l'eau pendant 24h à 20°C).
M.F	Module de finesse
M_s	désigne masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C
M	la masse de l'eau
$N_{pl.Rd}$	Résistance d'une section transversale sous une charge axiale de compression

Ncr	Charge critique d'Euler
Npl	Force de plastification
<i>N_{Sd}</i>	l'effort de compression sollicitant de calcul
<i>N_{b,Rd}</i>	Résistance d'un élément susceptible de flamber par flexion
<i>N_{G.Sd}</i>	la fraction de la charge axiale
Nue	Charge ultime expérimentale
Nuc	Charge ultime prévue selon l'Eurocode
<i>P_R</i>	Résistance de connecteur
S	pourcentages en volume absolue de sable
S	la section de la base de l'éprouvette
<i>S_u</i>	Capacité de glissement
T	temps d'absorption
<i>t</i>	épaisseur de la paroi d'un profil creux rempli de béton
W	Teneur en eau

Introduction générale

1. Généralité

On appelle poteaux mixtes, des éléments composés de profils métalliques de béton (armé ou non). Les avantages d'utiliser des poteaux composites sont : la résistance plus élevée, une grande résistance au feu; une résistance au voilement local. Comparativement aux poteaux de béton armé, les poteaux composites offrent également d'autres avantages : construction plus rapide car la section d'acier peut soutenir les charges de construction et servir plus tard de coffrage pour le béton, sections requises plus petites pour soutenir une même charge axiale à cause du confinement du béton par la section d'acier.

Ces dernier temps les poteaux en profils creux remplis du béton sont de plus en plus utilisés pour les structures des différents ouvrages en génie civil, étant donné qu'ils sont d'une très grande efficacité mécanique et économique. C'est pourquoi le problème du comportement de ces poteaux a fait l'objet de plusieurs études dans différents pays, et a attiré l'attention de nombreux chercheurs.

D'après toutes les recherches effectuées, on a constaté que le type de béton de remplissage influence directement sur le comportement des tubes composites.

Le béton de sable est composé essentiellement de sable(s), de ciment, de fillers et d'eau. La différence entre un béton classique et un béton de sable réside principalement dans la différence de granulométrie. Le béton de sable a un intérêt certain du fait de ses propriétés spécifiques à savoir une bonne maniabilité[63]. L'utilisation du béton de sable de laitier comme matériaux de bourrage dans des tubes en aciers peut améliorer son comportement, et l'utilisation du déchet de haut fourneau comme matériau de substitution contribuera à sauvegarder une part importante des ressources naturelles et protéger l'environnement.

2. Objectifs de la recherche

Dans cette étude nous avons cherché à utiliser le laitier de hauts fourneaux dans la confection du béton de sable, qui a été utilisé comme élément de bourrage dans des tubes en acier laminés à froid

et soudés à parois mince. Pour atteindre les objectifs décrit au-dessous .Un programme expérimental a été réalisé comportant un total de 45 tubes carrés à parois mince de section transversale carrée 100 mm x 100 mm x 2 mm, et 16 de section transversale rectangulaire 100×70×2mm qui ont été testés sous charge de compression centrique et excentrique , 15 vides ,7 remplis avec un béton ordinaire désigné B.O et 8 remplis avec béton ordinaire et renforcés par des connecteurs de cisaillement de types cornière en U et goujon qui sont soudé tout le long de la ligne centrale de l'âme avec un espacement de 100mm ,7 remplis avec un béton de sable de laitier cristallisé désigné BSII et 8 remplis avec béton de sable de laitier cristallisé et renforcés par des connecteurs de cisaillement de types cornière et goujon avec un espacement de 100mm .la dernière série testé est composés de 16 poteaux rectangulaires répartis comme suit :

- Quatre tubes creux remplis par un béton ordinaire (BO), 2 sont testés sous charge uni-axiale et 2 sont testés sous charge excentrique.
- Six tubes creux remplis par un béton de sable de laitier (BSI), 2 sont testés sous charge uni-axiale et 4 sont testés sous charge excentrique.
- Six tubes creux remplis par le béton de sable de laitier (BSIII), 2 sont testés sous charge uni-axiale et 4 tubes sont testés sous charge excentrique.

Les principaux points traités sont :

- L'étude des caractéristiques mécaniques et hydriques des bétons utilisés dans le remplissage des tubes en acier
- Evaluer les charges ultimes des tubes vides et remplis par quatre types de béton à l'âge de 28 jours, sous charge uni-axiale.
- L'étude de l'effet de l'élancement sur la capacité portante des tubes remplis par les deux types de bétons.
- Evaluer les capacités portante des tubes vides et remplis par les deux types de bétons, selon L'Euro code 3 et 4 respectivement.
- Déterminer le mode de rupture des tubes en acier vides et remplis par deux types des bétons.
 - Proposer une nouvelle conception pour les tubes en acier remplis par deux types de bétons, en utilisant des connecteurs de renforcement.
 - Examiner si la présence des connecteurs de renforcement dans les tubes améliore la capacité portante et le mode de rupture de ces tubes creux.



- L'étude de l'effet de type de la section transversale des tubes (carré et rectangulaire) sur la capacité portante des tubes sous un chargement uni-axiale.

3. Présentation de thèse

La thèse est organisée en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, une étude bibliographique sur les travaux réalisés sur les poteaux mixtes et en particulier les poteaux creux avec des sections en acier standard et en acier à parois mince, l'étude bibliographique synthétise les recherches expérimentales du comportement des tubes creux remplis de béton dans ces récentes années.
- le deuxième chapitre est consacré à une étude expérimentale pour la caractérisation des matériaux et la formulation des différents types des bétons utilisés dans le remplissage des tubes en acier laminés à froid et soudés.
- Le troisième chapitre présente une exposition des poteaux en acier et leur calcul selon l'Eurocode3 et l'Eurocode4 et un programme d'essais a été effectués sur les tubes vides et remplis sans et avec connecteurs de renforcement (cornières et goujons) à l'âge de 28 jours, sous chargement uni-axiale, avec une description détaillée sur la fabrication de la section transversale des colonnes utilisées. Des essais sont effectués sur des tubes en acier laminés à froid et soudés de section en U, remplis par quatre types de bétons : béton ordinaire désigné par BO, bétons de sable de laitier désigné par BSI ; BSII et BSII. Des résultats expérimentaux sont présentés à l'âge de 28 jours avec des observations sur le comportement d'une section composée considérant les paramètres d'élançement, et le de type du béton utilisé, et du type de chargement appliqué (centré), et la possibilité d'employer des tubes à parois minces remplis d'un béton de sable de laitier cristallisé ,Les résultats des tubes inclus la déformation des profils vides et remplis à mi-hauteur de l'âme et de la semelle ,les résultats des colonnes totalement enrobées sans et avec connecteurs sont comparés avec l'Eurocode3 et l'Eurocode4. Et finalement une comparaison des résultats obtenus sur des tubes carrés et des tubes rectangulaires sous chargement uni-axiale et excentrique et l'effet de la forme de la section transversale sur la capacité portante de ces derniers .aussi tous les résultats expérimentaux sont comparés avec l'Eurocode3 et L'Eurocode4.

Chapitre I

Etude bibliographique

- **Introduction**

Dans le domaine des constructions de Génie Civil, les avantages d'un matériau relèvent de divers facteurs comme sa disponibilité, sa résistance structurale et sa mise en œuvre. Le choix du matériau dépend des critères esthétiques, ainsi que des coûts liés au type de construction. Il est très surprenant de constater qu'aucun matériau connu à l'état naturel ne possède pas toutes ces propriétés au niveau souhaitable. Le problème consiste donc à trouver une solution optimale dans l'utilisation de différents matériaux et méthodes de construction, avec l'objectif de réaliser une structure de coût. L'association de l'acier et du béton est la combinaison de matériaux de construction la plus fréquemment rencontrée tant dans les bâtiments que dans les ponts. Bien que de nature franchement différente, ces deux matériaux sont complémentaires.

Ces dernier temps les poteaux en profils creux remplis du béton sont de plus en plus utilisés pour les structures des différents ouvrages en génie civil, étant donné qu'ils sont d'une très grande efficacité mécanique et économique. C'est pourquoi le problème du comportement de ces poteaux a fait l'objet de plusieurs études et recherches expérimentales sur ces colonnes mixtes est en cours à travers le monde depuis de nombreuses décennies.

Le comportement mécanique des poteaux mixtes remplis de béton dépend de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques géométriques (longueur, diamètre et section), la résistance de béton, les propriétés de tube d'acier, nuance et épaisseur de tube, l'adhérence entre le tube d'acier et le béton, l'effet de confinement de béton par l'acier, tous ces facteurs influent sur la résistance à la

charge axial des poteaux mixte , pour avoir un bon estimation de la capacité portante axial par le calcul ,ce dernier doit pris en compte tous les facteur citer précédemment

On va présenter quelques recherches ont été effectués sur des poteaux mixtes dans ces derniers années et montré l'effet des facteurs précédents sur le comportement de ces derniers

En 2000 J F Hajjar dans cette étude il a montré l'effet de la forme géométrique de la section transversale des poteaux sur le comportement des poteaux mixtes en acier (circulaire et rectangulaire) remplis du béton soumis à différents sollicitations comme la compression axiale , de flexion ; de torsion et de séismes.la comparaison des résultats obtenus sur le comportement des deux types de poteaux montrent que les poteaux de section circulaire ont une meilleure résistance aux sollicitations que celle des poteaux de section rectangulaire et surtout dans le cas de torsion. Les tubes remplis de béton montrent leurs gains de résistance et leurs meilleures ductilités par rapport aux sections en béton armé. [1]

En 2002 L-H-Han: A étudié expérimentalement le comportement des colonnes remplis en béton de section rectangulaire creuses RHS sous une charge de compression axiale. Un total de 24 spécimens a été étudié, les principaux paramètres qui varient dans cette étude sont :le facteur ξ de 0.5 à 1.3,le rapport de largeur du tube B de 1 à 1.75..D'après les résultats expérimentaux qu'indiquent que le facteur ξ et le rapport B ont une influence sur la capacité de la charge de compression et la ductilité des tubes.la résistance axiale de compression des tubes remplis du béton de section rectangulaire doit être conservée par l'utilisation des recommandations LRFD, AII, EC4, GJB412-2000, GJB4142-2000 méthodes donne des résultats proches que LRFD et EC4.Tous sont acceptables pour le calcul de la capacité des colonnes RHS. [2]

En 2002 M. Hilmi ACAR : A étudié le comportement viscoélastique des piles circulaire en acier rempli de béton soumis à des charges de long terme. Une étude expérimentale est effectuée par ce dernier sur un nombre de pile de taille réelle après la détermination des déformations qui dépendent du temps qui sont très importante pour ces types de pile. Les déformations expérimentales observées depuis plus de sept mois ont été comparées aux déformations calculées conformément à la méthode de calcul proposée. Les résultats expérimentaux et les résultats calculés ont montrés une bonne concordance. Un coefficient de fluage a été déterminé pour le comportement à long terme de ce type de poteau. [3]

En 2002 Hsuan-Teh HU, Chiung-Shiann HUANG, Ming-Hsien Wuand Yih-Min WU : Une étude faite sur trois type de poteaux : poteaux de sections carré, circulaire et carré renforcé par des étais métallique, l'analyse numérique non linéaire de ces poteaux remplis de béton avec le code de calcul ABAQUS montre que les poteaux circulaires fournis un bon confinement de béton et

spécialement quand le rapport diamètre sur l'épaisseur est faible. Par contre les poteaux de section carrée, ces derniers fournissent un confinement faible par rapport à celui des sections circulaires en particulier lorsque le rapport diamètre sur épaisseur est élevé. L'augmentation du taux des étais métalliques et l'espacement est petit ont donné une augmentation de l'effet de confinement de béton des poteaux de section carré renforcé par ces derniers. [4]

En 2003 Lin-Hai Han et al: Ont investigué une étude expérimentale sur le comportement des colonnes SHS et RHS avec et sans protection au feu sous une charge axiale et excentrique Ils ont fait des essais sur 11 spécimens remplis avec deux types de béton avec des résistances différentes, les principaux paramètres étudiés sont : le temps de durée de feu, dimension de la section, le rapport d'élançement et le rapport de l'excentricité de la charge .L'utilisation du béton comme élément de bourrage dans ces tubes SHS et RHS a un effet remarquable dans la protection au feu par rapport à ces derniers vides. D'après la comparaison entre les résultats calculés et les formules et les modèles mathématiques ils ont observés que les résultats calculés sont de précession raisonnable comparés avec les résultats expérimentaux. [5]

En 2003 Lin-Hai Han,Gue-Huang Yao: Ont étudiés l'influence de béton compacté sur la résistance des colonnes rectangulaires remplis du béton (RHS). 35 spécimens a été investigué pour les méthodes de compactage du béton sur les capacités des colonnes composites .les principaux paramètres sont :la section des colonnes, le rapport profondeur/largeur de 1à 2,le rapport profondeur/épaisseur de 34 à 136,l'excentricité de la charge (e) de 0 à 31 mm, le rapport d'élançement (λ) de 21 à 62.Les spécimens sont testés sous une charge axiale et excentrique pour déterminer la capacité portante des spécimens et leurs comportements. Les résultats montrent que : un meilleur compactage du béton donne une capacité portante plus élevés. [6]

En 2003 Kefeng Tan, John M. Nichols et Xincheng Pu :Vingt poteaux en acier remplis de béton de haute résistance sont testés expérimentalement sous compression axiale pour déterminer les propriétés mécaniques de ce type de poteaux.. Les résultats ont montré que les poteaux en acier remplis de béton offre un meilleur confinement de béton et une capacité portante en compression élevée par rapport aux poteaux en béton. L'augmentation de la charge de compression et directement proportionnel à l'indice de confinement. Dans cette étude les auteurs ont examiné la théorie conceptuelle de l'utilisation de ce type de poteaux et présentent la formule utilisée pour calculer la capacité portante de ce type de poteaux. [7]

En 2004 Julia Marson et Michel Bruneau, M.ASCE : Ont conduit des essais sur quatre piliers circulaires en acier remplis de béton jointés à une fondation sous chargement cyclique. Le diamètre des colonnes testées est de 324mm et 406 mm, avec un rapport de diamètre sur épaisseur allant de 34 à 64. Les chargements cycliques ont été exécutés pour déterminer la capacité portante maximale et vérifier la ductilité de ces derniers. La ductilité de l'ensemble des colonnes testées a été jugée de bonne qualité, toutes les colonnes testées ont subies un déplacement de 7% avant la perte de leurs stabilité causée par le flambement local, ce qui suggère que les piles en acier rempli de béton peuvent être efficaces et utilisées comme piles de pont dans les régions sismiques. [8]

En 2004 Lin –Hai Han ET Guo-Huang Yao: Ils ont examinés la possibilité d'utiliser le BAP dans le remplissage des HSS à parois mince, 38 colonnes remplis du BAP ont été investiguées pour étudier l'influence de la méthode de compactage du béton sur la capacité des colonnes composites rapportées. Les principaux paramètres changés dans ces tests sont : le type de la section des colonnes (circulaire, carré), le rapport diamètre de tube/épaisseur de 33 à 67, rapport de l'excentricité e/r de 0 à 0.3mm. une comparaison des résultats avec plusieurs codes comme :AISC-LRFD 1999,AIJ1997,BS5400-1979,EC4-1994 ,DL5085/T-1999et GJB4142-2000 à été fait , Ils ont conclus que les spécimens remplis du BAP sans vibration et BAP compacté avec une tige de vibration et BAP compacté à main sont similaires, le type de vibration a une influence sur la capacité de ces derniers ,la comparaison avec les différents codes sont généralement acceptable pour la charge ultime des HSS colonnes remplis du BAP. [9]

En 2004 CHENG Xiao-dong, LI Guang-yu et YE Gui-ru : Un modèle basé sur la théorie viscoélastique non - linéaire tridimensionnel en vue d'étudier le comportement au fluage des poteaux en acier rempli de béton été proposé dans cet article. Après l'évaluation des paramètres dans le modèle de fluage proposé, les mesures expérimentales de deux poutres en acier rempli de béton soumis à une force de précontrainte ont été employées pour étudier le phénomène de fluage dans trois poteaux en acier remplis du béton sous chargement axial et excentrique à long terme en utilisant la théorie viscoélastique non - linéaire tridimensionnel. Beaucoup de facteurs (tels que le rapport charge à long terme à la force, l'élancement, le type d'acier et le rapport d'excentricité) ont été considérés pour obtenir la régularité de l'influence du fluage sur les structures en aciers rempli de béton. [10]

En 2005 Bassam Z. Mahasneh et Emhaidy S. Gharaibeh :Ont étudiés l'influence des caractéristiques géométriques de la section d'acier ainsi que la qualité de béton de remplissage des poteaux mixtes sur le comportement, le confinement et la capacité portante de ces derniers. Les résultats des essais effectués au laboratoire de plusieurs échantillons testés à la compression axial

(poteaux mixtes a différents section d'acier et différents type de béton) sont étudiés. Les essais de compression axiale ont montré que le rapport diamètre – épaisseur des poteaux mixte circulaires et la qualité de béton utilisé pour le remplissage joue un rôle important dans le comportement et la capacité portante de ce type de poteau. [11]

En 2005 Lin-Hain Han et al : Un total de 50 spécimens circulaires et carrées creuses remplis du BAP ont été investigué expérimentalement, les principaux paramètres étudiés sont : type de section circulaire et carrée, la variation de la contrainte élastique d'acier : de 282 à 404MPa, le rapport largeur /épaisseur (D/t, B/t) de 30 à 134, le facteur de confinement ξ . Le but de cette investigation est d'étudiée le comportement des HSS remplis du BAP. Une relation proportionnelle inverse entre l'indice de force SI et les rapports D/t et B/t avec un voilement remarquable pour les SHS par rapport les CHS une comparaison des résultats avec plusieurs codes : ACI-1999, AIJ 1997, AISC-LRFD 1999, BS 5400-1979 et l'EC4-1994, qui a donné des résultats raisonnable avec un bon accord et aussi applicable pour le nouveau type de béton BAP qui remplis ces colonnes. [12]

En 2005 Lin-Hai Han et al: Ont basé dans cette étude sur le champ de la température pendant l'hydratation du ciment et le retrait du béton dans les tubes HSS remplis du BAP. Le paramètre principale est les dimensions de la section et le type de la section, les résultats illustrent que les caractéristiques de la température des HSS remplis du BAP sont similaire par rapport le béton ordinaire. D'autre part la valeur de retrait du noyau du béton dans ces tubes est petite que le béton ordinaire. À base des résultats mesurés le model du retrait proposé par ACI209(1992) est modifié pour prévoir le retrait du noyau du béton dans les colonnes HSS remplis du BAP. [13]

En 2005 Lin-Hai Han et al: 18 spécimens remplis du BAP inclus 10 spécimens avec une section circulaire et 8 de forme carré ont été testés sous une charge axiale pour étudier le comportement cyclique du BAP qui remplis les HSS, l'analyse de l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement de la relation entre la charge latérale et le déplacement latérale des colonnes composites.et le type de la section, la résistance du béton et l'acier et le niveau de la charge axiale (n) sont les principaux objectifs dans cette recherche ,ils ont conclus que : les caractéristiques des colonnes HSS remplis du BAP sous une charge axiale et cycliquement augmenté sont similaires du béton ordinaire remplis les HSS colonnes, les HSS remplis du BAP montrent un niveau haut de l'énergie de dissipation et de ductilité, généralement la capacité de la dissipation de l'énergie des colonnes de section circulaire est supérieure que les colonnes d'une section carré. En général, le model mécanique développer pour le béton ordinaire qui remplis les HSS peut utiliser pour analyser le comportement des HSS remplis du BAP soumis aux charge cyclique. [14]

En 2005 CHEN Heng-zhi, LI Hui : Ont développés une méthode de calcul en vue de détermination de la capacité portante ultime des poutres tubulaires en aciers remplis de béton.

L'évaluation de la précision de cette méthode développée et son applicabilité a été validé en la comparons a différentes relations existantes de béton confiné soumis à un chargement uni axial et à des résultats expérimentaux. La comparaison des résultats indique que cette méthode proposée qui utilise la relation contrainte - déformation de béton confiné sous chargement axial peut être utilisée pour le calcul de la résistance ultime et offre une précision satisfaisante dans le cas de ces poutres. Les résultats du calcul sont stables et rarement affectés par des relations constitutives. La méthode est donc utile dans la pratique. Enfin, la résistance ultime d'un arc de pont de 330 m de portée a été examinée par la méthode proposée et le comportement non linéaire a été discuté. [15]

En 2005 J.ZEGHICHE et K.CHAOUI : Ont testé vingt-sept spécimens en acier tubulaire rempli de béton, les paramètres étudiés dans cette recherche sont : l'élancement, l'excentricité de la charge et la charge excentrique pour le cas d'une courbure simple ou double et la résistance à la compression de béton. Les résultats des essais ont montrés l'influence de ces paramètres sur la résistance et le comportement des poteaux en acier rempli de béton. Une comparaison est amené entre la charge de rupture donnée expérimentalement et les prédictions de EC4 (partier1.1) a montré une bonne approche des résultats dans le cas de flexion à courbure simple soit sous charge axiale ou excentrique, d'autre part dans le cas des poteaux à double courbure le EC4 donne une charge plus grande ce qui veut dire qu'il y a une sur estimation de la capacité portante et ceci implique que l'EC4 n'est pas du côté de sécurité pour le cas d'une double courbure. [16]

En 2006 Muhammad Nasseem Baig et al : Ont fait une étude expérimentale sur le comportement des tubes (FST) sous une charge de compression axiale, un total de 28 spécimens (16 remplis du béton et 12 sont vides) ,les rapports longueur/diamètre des colonnes étaient entre 4et9 dans cette recherche . Les résultats obtenues ont été comparés avec d'autres études théoriques et des résultats précédentes qui montrent que l'effet de confinement sur le béton joue un rôle dans l'augmentation de la résistance de compression de près de 60% dans certains cas. Ils ont proposés une équation d'après les résultats pour estimer les capacités portantes des charges axiales pour les CFT carrés. [17]

En 2006 S.Ramana Gopal,P-Devdas Manoharan : Ont fait une étude expérimental de 12 colonnes élancées de section circulaire remplis du béton ordinaire et du béton renforcé du fibres, les spécimens sont testés sous une charge de compression excentrique pour investiguer l'effet du béton fibré sur la résistance et le comportement des colonnes élancés ,le rapport d'élancement est

considéré comme le principal paramètre, des sections vides similaires de spécimens sont testés comme des colonnes de référence, Les résultats obtenus par les tests des colonnes composites donnent : l'utilisation du béton renforcé des fibres améliore le comportement des colonnes composites élancés soumis à des charges excentriques, le rapport d'élancement a des effets remarquables sur la résistance et le comportement des colonnes remplis du béton sous une charge excentrique, le béton avec les fibres donne des valeurs de raideurs relativement supérieures que le béton ordinaire, la ductilité est considérée égale pour le B.O et BRF remplis les colonnes, le BRF améliore la capacité de l'énergie d'absorption des colonnes composites, l'utilisation du BRF comme élément de bourrage augmente la capacité portante beaucoup plus grande par rapport à des colonnes vides et réduire le déplacement latérale. [18]

En 2006 D.J. Chaudhary et Vishal C. Shelare : Ont conduits une étude qui concerne l'évaluation des caractéristiques dynamiques des poteaux en acier remplis de béton utilisés comme arc (nommé CFST) dans la fabrication des ponts de type Bow - String à étais. Le logiciel d'analyse par éléments finis SAP 2000 est utilisé pour mettre en place un environnement en trois dimensions du modèle d'éléments finis des arcs de pont de type Bow - String. La période physique et les modes, sont calculés en utilisant la méthode coefficient quadratique complète (CQC). Sur le tablier de pont analysé, la charge appliquée est une charge ferroviaire. La méthode d'analyse du spectre de réponse est utilisé selon les dispositions figurant dans le code IS 1893 (partie 3). Les résultats du calcul montre que la rigidité verticale du l'arc de pont est plus forte que la rigidité latérale sous chargement sismique. La solution de ce problème est d'augmenter la rigidité latérale de l'arc de pont en mettant un fuseau de câbles. [19]

En 2007 Zhi-wu Yua et al : Une série des tests a été effectué pour étudier le comportement des tubes circulaires d'acier à parois minces remplis du béton ayant un rapport D/t compris entre 55 et 200. Les charges obtenues ont été comparées avec les forces calculées en utilisant les normes de conception. Les résultats ont montré que le remplissage de béton pour tubes circulaires d'acier à parois minces a peu d'effet sur la force voilement local de tubes d'acier. [20]

En 2007 P.K. Gupta : Une étude expérimentale sur des tubes circulaire en acier remplis de béton sous charges axial. A été effectuer sur 81 tubes, dont 9 tubes creux a été testés après 28 jours les spécimens ayant (50 mm, 75 mm et 100 mm) de diamètre et 340 mm de longueur, avec un dosage de cendres volantes varie de 15%, 20% et 25%, Les résultats ont montré que : pour les petits rapports D/t , le tube en acier offre un bon effet de confinement de béton. la capacité de charge du tube d'acier a une relation inversement proportionnelle avec le rapport D/t augmente. C'est pourquoi il est proposé de fixer le bon rapport D/t pour faire une utilisation optimale du matériau.

Il a été observé que la déformation lors de chargement diminue avec l'augmentation de dosage cendres volantes jusqu' à 20% mais à 25% de cendres volantes il augmente à nouveau. [21]

En 2007 N. FERHOUNE et J. ZEGHICHE : Des essais expérimentaux sur 12 éprouvettes en acier laminé à froid de section rectangulaire (100x70x2.5mm) ont été fait avec différents élancement 200, 300, 400 et 500 mm. Tous les échantillons ont subi une charge de compression axial .Quatre échantillons sont vides, les huit autres éprouvettes sont remplies de béton à base de granulats de laitier cristallisé. Dans cette étude ont divisé les spécimens en deux pour avoir l'effet de l'âge de coulage du béton : une moitié est testée à l'âge de 28 jours et l'autre moitié à l'âge trois ans de conservation à l'air libre. Les résultats expérimentaux enregistrés sont ensuite comparés avec ceux calculés par les prédictions de règlement Euro code 3 pour les tubes vides et Euro code 4 pour les tubes pleins. La prédiction donner par l'EC3 surestime la capacité portante des tubes vides de 71% à 79%, par contre l'EC4 donne une bonne concordance des résultats dans le cas des poteaux mixtes. La comparaison des résultats expérimentaux obtenue ont montré l'influence positive de l'âge de coulage du béton sur la résistance des poteaux courts en acier rempli de béton a base de granulats de laitier. Un programme en fortran est développé en supposant que l'allure de la déformation de l'acier est sinusoïdale afin de valider les résultats expérimentaux a montré sa sur estimation de capacité portante. [22]

En 2007 M.Mouli, H.Khelafi : Une série des tests été faite pour considérer le comportement des colonnes mixtes courts remplis de béton sous charge axiale de compression, deux colonnes rectangulaires creuses (RHS) ont été utilisées :(120×80×5) mm et (150×100×5) mm remplies du béton ordinaire avec des agrégats légers ou la pouzzolane été utiliser comme agrégat léger. Les principaux objectifs sont : expliquer la performance des agrégats légers qui remplissent les spécimens en acier comparé par les spécimens avec le béton ordinaire ,.Ils ont conclus que :la résistance n'est pas influencer par la section du tube en acier mais elle est influencée par le type du béton, le béton léger avec de la pouzzolane donne des résultats mieux mais il ne change pas du comportement (reste le même pour tous les types du béton) ,la contribution des agrégats légers dans le béton doit être considérable pour la charge d'écrasement, le béton léger avec pouzzolane est acceptable dans les colonnes composites à cause des bons résultats dans la résistance et une densité adéquate. [23]

En 2008 Qing Yu et al : 28 colonnes remplis du BAP ont été testés pour d'étudier la possibilité d'utilisation des tubes en acier creux minces remplis du BAP les principaux paramètres qui sont variés sont :le type de section(circulaire et carré),rapport d'élancement de 12 à 120,rapport de

l'excentricité de la charge de 0 à 0.6, les résultats obtenus ont été comparés avec les différents codes comme : AISC, EC4, DBJ13-51-2003. [24]

En 2008 George D. Hatzigeorgiou : A proposé une méthode pour prévoir le comportement et la capacité portante des colonnes circulaires courts en acier rempli de béton sous chargement axial et moment de flexion. Le comportement de nombreuses colonnes, obtenu expérimentalement par d'autres chercheurs, comparés au modèle numérique proposé par l'auteur a montré la bonne concordance des résultats. Deux nouvelles méthodes simples ont été présentées pour calculer la capacité portante des colonnes circulaires TFC sous chargement axial. La première méthode examine l'action composée pour ces colonnes, qui est essentielle pour l'évaluation de la capacité portante, alors que le second représente une modification des recommandations d'un code existant de dimensionnement de bâtiment. Plus tard, il a proposé une expression polynomiale simple qui présente la courbe d'interaction force axiale – moment de flexion. [25]

En 2009 Walter Luiz Andrade de Oliveira et al : Une étude de comportement de 16 tubes circulaires de diamètre $D=114,2$ mm avec un rapport L/D de 3,5, 7 et 10, et avec une classe de béton varie entre 32, 58,88 et 105 MPA, Les résultats ont montré que La capacité ultime des poteaux courts à augmenter considérablement avec l'augmentation de la résistance en compression du béton et que la variation est moins importante lorsque le rapport L/D augmente, la différence plus faibles entre les valeurs prédites et les résultats mesurés charge ultime est respectivement de 2,4% et 2,3% en moyenne ce qui montre que les résultats de l'EC4 et CAN / CSA n'ont pas été conservatrice. [26]

En 2010 Manojkumar V. Chitawadagi & al : Des résultats expérimentaux effectués sur des poteaux circulaire remplis de béton dont le rapport diamètre / épaisseur est entre 9.4 à 25 et un rapport d'élanement / diamètre qui varie entre 6.25 à 20 sont présentés dans cet article. Les résultats ont affirmé que la section de tube circulaire en acier a un effet significatif sur la capacité portante que ce soit pour les colonnes courtes ou élancés. La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux prédite par la méthode proposée par Taguchi, a montré une concordance raisonnable des résultats dans le cas des poteaux élancés. Par contre, dans le cas des poteaux courts, une large différence entre les deux résultats est remarquée ce qui veut dire que la méthode proposée par Taguchi nécessite une amélioration. [27]

En 2010 Meichun Zhu et al : Dans cette étude 18 colonnes sont testés sous une charge axiale pour un nouveau modèle des colonnes composites (acier-béton), l'effet de la résistance du béton, le rapport largeur/épaisseur, rapport hauteur/largeur, et le rapport de la section d'acier sur les

caractéristiques de la résistance et la déformation des colonnes composites sont discutés. Les résultats expérimentaux indiquent que la section en acier enrobé peut limiter la génération de fissures diagonales de cisaillement dans le béton de base changeant ainsi le mode de rupture et le comportement post-élastique de colonnes composites courtes. Formules pour le calcul de la résistance ultime des colonnes composites chargés au centre sont proposées. Les valeurs calculées sont en bon accord avec les résultats des tests. [28]

En 2012 Ehab Ellobody , Mariam F. Ghazy : Une étude expérimentale des colonnes circulaires (FR) en acier inoxydable remplis de béton ordinaire et béton renforcé de fibres. Les colonnes composites étaient soumises à des charges axiales et excentriques. Les tubes en acier inoxydable étaient relativement minces ayant un rapport d'épaisseur /diamètre de 50. L'étude a montré que les colonnes tubulaires en acier inoxydable FR remplis de béton renforcé offrir une augmentation considérable de la ductilité par rapport à les colonnes tubulaires remplis de béton ordinaire. Les charges ultimes ont été comparées avec les charges ultimes de conception calculée en utilisant l'Eurocode 4 pour les colonnes composites. Il a été montré que la EC4 prédit avec précision les charges extrêmes axialement de colonnes tubulaires circulaires chargé en acier inoxydable remplis de béton, mais étaient assez conservatrice pour prédire les charges ultimes des colonnes de façon excentrée. Et aussi a été montré que la marge de sécurité des prévisions EC4 est augmentée lorsque l'excentricité est augmentée. Les résultats des tests fournissent des informations utiles concernant le comportement des colonnes d'acier inoxydable remplis de béton (FR) . [29]

En 2012 Bo Wu et al : Cette étude fait d'une partie d'un projet global concerné avec recherche et de plaider des éléments structuraux contenant des morceaux de béton démolies (SLCD) ou des segments de béton démolies (DCS) avec une taille nettement plus grande que les granulats recyclés. Cette recherche vise à étudier le comportement cyclique et d'évaluer la résistance et la ductilité des colonnes en acier carré rempli de SLCD et FC. Quinze spécimens, dont 10 colonnes remplies de SLCD et FC et 5 colonnes de référence remplies avec le FC seul, ont été testés sous compression axiale constante et chargement latéral cyclique. Les résultats indiquent que le comportement cyclique des poteaux tubulaires en acier carré à parois minces remplis de SLCD et FC est semblable à celle des colonnes de référence remplies avec le FC seul; la force latérale des colonnes remplies de DCL est légèrement FC inférieurs à ceux remplis avec le FC seul; et les colonnes à parois minces remplis de SLCD et FC présentent une déformation acceptable. [30]

En 2012 Mohamed Mahmoud El-Heweity : Une étude numérique a été présentée pour étudier la performance des tubes circulaires en acier remplis avec des bétons à haute résistance (CFT) sous une charge axiale monotone. Un modèle a été développé pour mettre en œuvre le matériau avec des

relations constitutives et non-linéarité. Des données expérimentales précédentes montrent un bon accord. Une étude paramétrique est ensuite effectuée à l'aide du modèle et par rapport aux dispositions des codes. Résistance et la ductilité du béton confiné sont une préoccupation majeure. La limite d'élasticité du tube d'acier et le diamètre de la colonne sont des variables prises en compte, le facteur (K_f) et la ductilité de l'indice d'amélioration de la résistance (I) sont clairement définis et mis en place pour l'évaluation. Les résultats indiquent que la force et la ductilité des colonnes remplies de béton CFT sont renforcée, mais à des degrés différents. Les comportements ductiles sont nettement évidents. L'augmentation de la limite d'élasticité du tube en acier a un effet minime sur la résistance du béton, mais effet prononcé sur la ductilité du béton. Cependant, la réduction de la ductilité est associée à l'utilisation d'acier à haute résistance de grade 70. Les résultats globaux montrent que l'utilisation des tubes à haute résistance CFT n'est pas prometteuse. Cette constatation peut être sérieusement prise en compte dans la conception parasismique. [31]

En 2013 You-Fu Yang et Guo-LiangMa : Une étude expérimentale des tubes remplis de béton recyclé sous une charge axiale, un totale de 28 spécimens compris 14 colonnes et 14 poutres de forme carrées et circulaires remplis avec des agrégats recyclés avec un rapport de remplacement de 0,25%,50%,75% de granulats recyclé gros (RCA) et fin (RFA), Les principaux objectifs de ces essais étaient de trois ordres: d'abord, pour décrire une série de tests sur les nouvelles colonnes et les poutres composites; en second lieu, pour étudier l'effet croix type de section et le ratio de remplacement granulats recyclés sur le comportement à la compression et à la flexion de spécimens racistes; et enfin, d'évaluer l'exactitude de la capacité portante calculée, les résultats expérimentaux ont montré que les colonnes RACFSST tronquées et des poutres sous chargements à court terme avaient la charge stable et la performance du RAC de base a été généralement améliorée en raison de l'enfermement de tube extérieur en acier inoxydable. [32]

En 2013 J.M. Portolés et al : Ils ont décrit 24 essais menés sur des poteaux tubulaires circulaires minces remplis de béton de résistance normale, haute et ultra-haute pour lisses, colonnes armé et en acier renforcé de fibre. Ceux-ci ont été renforcés et soumis à une charge axiale deux concentriques et excentriques. Les paramètres d'essai sont : résistance nominale de béton (30, 90 et 130 MPa), l'excentricité e (0, 20 et 50 mm) et le type de renfort. Une comparaison avec les colonnes tubulaires vides correspondant est effectuée, comme le but de l'étude est d'analyser l'influence de chaque type de remplissage et d'établir la meilleure option pour la pratique application. Pour les cas limités ont analysé les résultats montrent que l'ajout de remplissage haute ou ultra-haute résistance est plus utile pour les cas chargés concentriques que pour ceux chargés excentriques, où il semble que la meilleure option de conception est l'utilisation de la barre renforcée remplissage de béton plutôt que

fibres d'acier pour renforcer CFST colonnes. La charge ultime expérimentale de chaque test a été comparée avec les charges de conception d'Eurocode4, précises pour les tests de façon excentrée. [33]

En 2014 Wei-Hua Wang et al : Le béton en utilisant le sable des dunes comme agrégat fin est généralement considéré comme ayant une faible maniabilité et une faible ductilité, même si elle présente certains avantages économiques. Cette recherche est une tentative d'enquêter sur le comportement des tubulaires en acier remplis de béton (CFST) colonnes tronquées et des poutres en utilisant de sable de dune dans le cadre de l'agrégat fin . Une série de colonnes CFST stub et CFST poutres avec un taux de 10% de remplacement global de sable de dune sont testés. Pour les échantillons de colonne tronquée, les principaux paramètres sont le rapport de l'acier, la résistance du béton. Pour les échantillons de faisceau, le paramètre de contrôle est la profondeur en section transversale. Les modes de rupture, la relation de déformation de charge, et la force et la ductilité des éprouvettes sont examinées en utilisant divers indices. Les formules pour la résistance à la compression et à la flexion des membres de la CFST normales sont provisoirement utilisées pour prédire la force des éléments composites en utilisant du sable de dune. [34]

En 2014 Noureddine Ferhouné : Il a présenté des résultats expérimentaux effectués sur des tubes rectangulaires soudés avec parois minces remplis de béton que le gravier a été remplacé par laitier cristallisé. les tubes a été faite en acier laminé à froid avec une section transversale : $100 \times 70 \times 2 \text{ mm}^3$. les principaux paramètres étudiés étaient la hauteur de tube (200, 300,400,500mm), et le type de béton de remplissage , la soudure continue et les charges excentriques appliqués .les essais sont faites après 28 jours de coulage .Un total de 20 tubes ont été testés, 4 tubes soumis à la compression de charge axiale et 16 tubes soumises à une compression de charge excentrique ,l'objectif de l'étude est de fournir quelques évidences de l'utilisation de laitier broyé pourrait être intégrée dans la fabrication de béton, les charges de rupture ont été prédite en utilisant le Eurocode4 et le procédé de conception proposée par B. Uy.et Z.Vrcelj, il a été confirmé que le longueur de tube et la charge excentrique ont eu un effet sur la capacité portante .La mode de rupture des composites était un mode de voilement local, l' Eurocode4 charges prédictions étaient généralement en bon accord avec les résultats expérimentaux , Les résultats de la méthode de conception proposés par Vrcelj et B.Uy étaient généralement sur le côté sécuritaire comparativement à charge expérimentale à l'exception des colonnes pour la charge excentrique avec 400 mm et 500 mm de hauteur. [35]

En 2014 Huu-Tai Thai et al : Dans ce travail, un modèle d'éléments finis précis qui représente les effets des imperfections locales initiales et les contraintes résiduelles est développé pour l'analyse non linéaire des colonnes en acier avec du béton à haute résistance. Le comportement élastique de la colonne en acier et le noyau de béton est modélisé à l'aide d'un élastique-plastique modèle à écrouissage linéaire et un modèle de plasticité de béton endommagé, respectivement. En outre, une analyse numérique étendue basée sur une large gamme de rapports largeur-épaisseur, contraintes de rendement des tubes d'acier et la résistance à la compression du noyau de béton a également été menée pour proposer une nouvelle équation empirique pour estimer la pression de confinement sur le béton. Les prédictions des modes forces, le comportement et l'échec final sont comparées avec les résultats expérimentaux pour vérifier l'exactitude du modèle actuel. Études de paramètres indiquent que tant l'Eurocode EC4 et la norme australienne AS 5100 approches peuvent être en toute sécurité étendu pour prédire la résistance ultime des colonnes en acier remplis avec du béton à haute résistance. [36]

En 2014 YuanlongYang et al : Huit raidies tubulaires carrés en acier remplis de béton (CFST) avec des sections d'acier minces et deux contreparties non raidies ont été testés soumis à des charges axiales. quatre types de raidisseurs de renforcement et de l'acier de tractions ont été introduits pour poster le voilement local de tubes d'acier. Le mécanisme de raidissement, des modes de rupture de béton et des tubes en acier, la résistance et la ductilité de CFSTs carrés raidies ont également été étudiées au cours du programme de modélisation numérique de la recherche expérimentale. Un programme de modélisation numérique a été développé et vérifié contre le programme de données. Le système expérimental intègre l'effet des raidisseurs sur le voilement local des tubes et le confinement du tube sur une analyse paramétrique. [37]

En 2015, Peng Feng et al : Ont fait une étude expérimentale pour évaluer le comportement d'une nouvelle colonne composée d'acier carrée CFST remplis d'un béton confiné avec les fibres (PRF), 18 colonnes SCFC sont testés sous une compression axiale avec différentes résistances de béton, l'épaisseur de tube de PRF et l'épaisseur du tube d'acier par rapport à quatre colonnes composites traditionnelles. Ils ont conclu que : les résistances du béton, du PRF et de l'acier sont utilisées efficacement à différentes étapes, y compris l'étape linéaire initiale, l'étape linéaire secondaire (étape de durcissement) et l'étape post-pic, l'augmentation de la charge augmente avec le rapport de confinement, les sections SCFC amélioreraient la capacité portante résiduelle par rapport aux sections CFST, grâce à l'introduction du PRF dans la section. Les sections SCFC ont montré une excellente ductilité et finalement ont trouvé un bon accord général de rigidité initiale entre les résultats expérimentaux et les valeurs calculées. [38]

En 2015, A. Espinos et al : Dans cet article ont présenté des résultats d'un programme expérimental sur des colonnes de CFST minces de différentes formes de section transversale soumises à de grandes excentricités. Au total, six colonnes circulaires et six colonnes carrées ont été testées. Les paramètres d'essai étudiés dans ce programme expérimental étaient la forme de la section transversale, les dimensions de la section, l'élanement du membre, l'excentricité de charge et le rapport d'armature. D'après les résultats des essais au feu, on a constaté que, pour la même utilisation d'acier, les colonnes circulaires présentaient une meilleure performance au feu que les colonnes carrées. En outre, pour les mêmes dimensions de colonne et le pourcentage d'armature, le temps de résistance au feu a été considérablement réduit lors de l'introduction de l'excentricité. Les règles de conception actuelles de l'Eurocode 4 sont évaluées et une méthode de calcul préalable développée par les auteurs est également évaluée, la méthode proposée devrait être étendue à d'autres formes de section transversale telles que des sections rectangulaires ou elliptiques, ce qui sera l'une des tâches futures à réaliser dans le projet précité. Il convient aussi de noter que les conclusions tirées dans cet article sont valables pour les colonnes à sections modérées. [39]

En 2015, Yuyin Wanget al : Un total de 39 spécimens ont été testés pour avoir étudié le comportement en compression des colonnes tubulaires en acier remplies de béton recyclé de résistance normale (RACFST) soumises à un chargement axial. Les paramètres de l'étude comprenaient le niveau de substitution de l'agrégat grossier recyclé (RCA), la source de RCA, la résistance à la compression du noyau de béton recyclé (RAC) et le rapport de la surface de l'acier sur la surface du béton. Les résultats expérimentaux ont montré que la dispersion dans les propriétés mécaniques des colonnes RACFST est plus petite que celle des RAC en raison de la contribution des tubes en acier. La source de RCA a eu peu d'effet sur le comportement en compression des colonnes RACFST chargées axialement dans la plage de paramètres adoptée dans les échantillons testés aussi que l'incorporation de RCA augmente la contrainte à la compression maximale des RACFST ce qui rend ce type de béton applicable pour l'utilisation structurelle comme élément de bourrage dans des tubes en acier. Cet article propose des équations modèles pour prédire les réponses contrainte-déformation du tube d'acier et du noyau RAC respectivement sur la base des mesures de la jauge de contrainte. Les résultats analytiques montrent que les modèles proposés donnent des résultats acceptables dans les réponses statiques des colonnes RACFST chargées axialement. Ils sont conclus que les codes de conception de la CFST peuvent être appliqués en toute sécurité aux colonnes RACFST. [40]

En 2016, Y.L. Li et al : Cet article présente une étude expérimentale sur des 38 colonnes tubulaires SS dont 12 vides, 12 tubes entièrement remplis de SWSSC et 14 tubes à double peau

remplies de SWSSC, avec quatre combinaisons de tubes intérieurs et de tubes ont testé sous compression axiale .ils sont conclus ces principaux conclusions : La résistance et la ductilité des tubes remplis de SWSSC sont nettement améliorées en comparaison avec les tubes à profil creux et le béton ordinaire et aussi le comportement de déformabilité est amélioré aussi que L'effet de confinement fourni par les tubes SS est inférieur à celui des tubes CFRP et BFRP, mais le confinement peut être maintenu pour une déformation axiale plus importante pour les tubes SS. L'amélioration de la résistance et la ductilité des tubes CFRP remplis de SWSSC sont plus élevés que ceux des tubes BFRP principalement en raison de sa plus haute résistance. Le confinement fourni par les tubes BFRP et GFRP est assez similaire, En général, la prédiction est en accord raisonnable avec les données d'essai Bien que la capacité. [41]

4. Conclusion

En général la méthode des constructions mixtes présente des solutions aux problèmes posés par les autres méthodes et répond aux exigences des structures modernes par de éléments ayant des caractéristiques élevés, soit des poutres avec des portées plus importantes ou des dalles plus minces, soit des poteaux plus élancés. Cette méthode offre une grande flexibilité et de nombreuses possibilités lors de la conception et offre de nombreux avantages économiques et techniques, le besoin de profiter de tous les avantages de ce type de constructions nous conduit à améliorer notre état de connaissance sur le comportement des éléments mixtes.

Après tous les recherches présentés dans ce chapitre sur les poteaux mixtes, on constate que les principaux paramètres étudiées et qui influent sur le comportement de ces derniers sont :

- Dimensions de la section transversale (longueur, largeur, diamètre, épaisseur) et l'élancement du poteau.
- Caractéristiques mécanique du profil en acier (limite d'élasticité, module de Young, ...).
- Caractéristiques mécanique et physique du béton de remplissage, béton ordinaire, béton de sable ...etc.
- Type de chargement, concentrique, excentrique ou chargement à long terme et le risque de voilement.
- Type de connecteurs de cisaillement pour le renforcement des poteaux composés.
- Qualité d'adhérence entre l'acier et le béton.

Chapitre II

Matériaux et caractérisation du béton de remplissage

1. Introduction

Les bétons de sable constituent une nouvelle famille de matériaux de construction dont les domaines d'applications respectifs dépendent des performances, des coûts et de la disponibilité des constituants. Pour définir les performances des bétons de sable à base des laitiers de hauts fourneaux d'El-Hadjar, une caractérisation générale sera indispensable. Le passage du béton de l'état frais à l'état de maturité complète est un processus plutôt lent durant lequel un nombre important de phénomènes se produit, soit durant la phase plastique, que lors de son durcissement. [63]

En premier, on décrit en détail les différentes méthodes d'analyse disponible pour une caractérisation chimique et physique des matériaux utilisées dans la confection des quatre types de béton. Une analyse des résultats expérimentaux obtenus, qui permet la classification des matériaux en fonctions, des effets principaux et /ou secondaire de ces constituants.

Ensuite, on présente la formulation, la fabrication et la mise en œuvre des bétons. L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation aux exigences appropriées aux dimensions et au type des profilés à remplir.

2- Matériaux utilisés

2-1-ciment

Le ciment utilisé dans cette étude a été un ciment Portland commercial (CEMII) classe 42.5 de cimenterie de Hadjar Elsoud Skida, Algérie. Il est conforme à la norme algérienne NA422 [42]. Il contient une addition de laitier granulé de haut fourneau de l'ordre de 20% et 5% de gypse. Les compositions chimiques et minéralogiques et la caractérisation physique du ciment sont présentées dans les tableaux II.1 et II. 2. La courbe granulométrique du ciment est donnée dans la Fig. II.1.

Tableau II.1- Compositions chimiques et minéralogiques du ciment.

Composition chimique		Composition minéralogique	
Substances	Pourcentage	Minéraux	Pourcentage
CaO	58.59	C ₃ S	58.2
Al ₂ O ₃	6.58	C ₂ S	18.5
SiO ₂	24.92	C ₃ A	9.3
Fe ₂ O ₃	3.65	C ₄ AF	8.2
MgO	1.21		
Na ₂ O	0.08		
K ₂ O	0.85		
Cl-	0.00		
SO ₃	2.17		
P.E.F	1.70		

Tableau II.2- Propriétés physiques du ciment.

Type de ciment	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Consistance normal (%)	Debut de prise (min)	Surface spécifique du Blaine (cm ² /g)
CEMII/A-42.5	1057	3100	29	154	3480

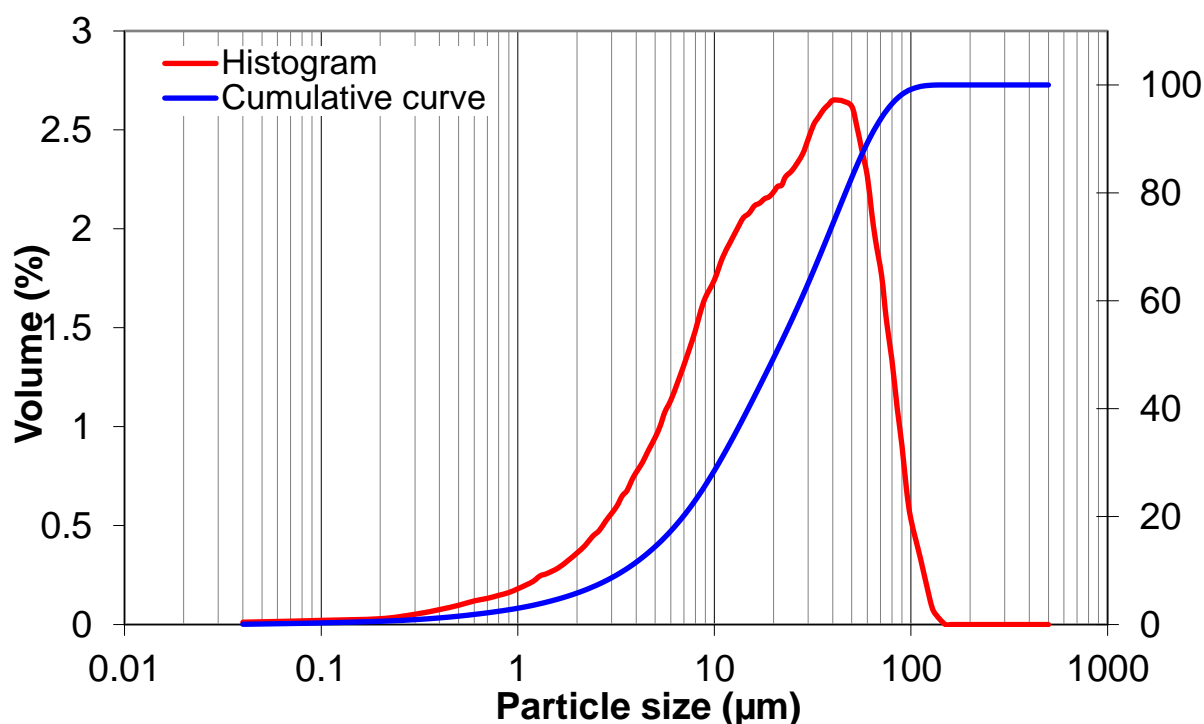


Figure II.1. Courbe granulométrique du ciment.

2-2-Filler

Dans cette étude, fillers de laitier granulé a été essentiellement obtenus par broyage des sous-produits de l'industrie sidérurgique de haut fourneau d'El-Hadjar (Photo II.1).de structure vitreuse avec un taux de vérification de 97% il présente un faible pouvoir hydraulique [43] .son hydraulicité est le résultat d'un traitement par tempe à l'eau, il se présente sous forme des grains sphériques, de couleur gris clair. Après séchage, le laitier est broyé finement à une finesse supérieure à celle de ciment. La composition chimique et les propriétés physiques de l'addition sont indiquées dans les tableaux II.3et II.9.

L'analyse aux rayons X de la poudre de filler de laitier granulé est présentée dans la figure II.2 (l'essai est fait au niveau de laboratoire de physique de l'université Guimarães Minho – Portugal).

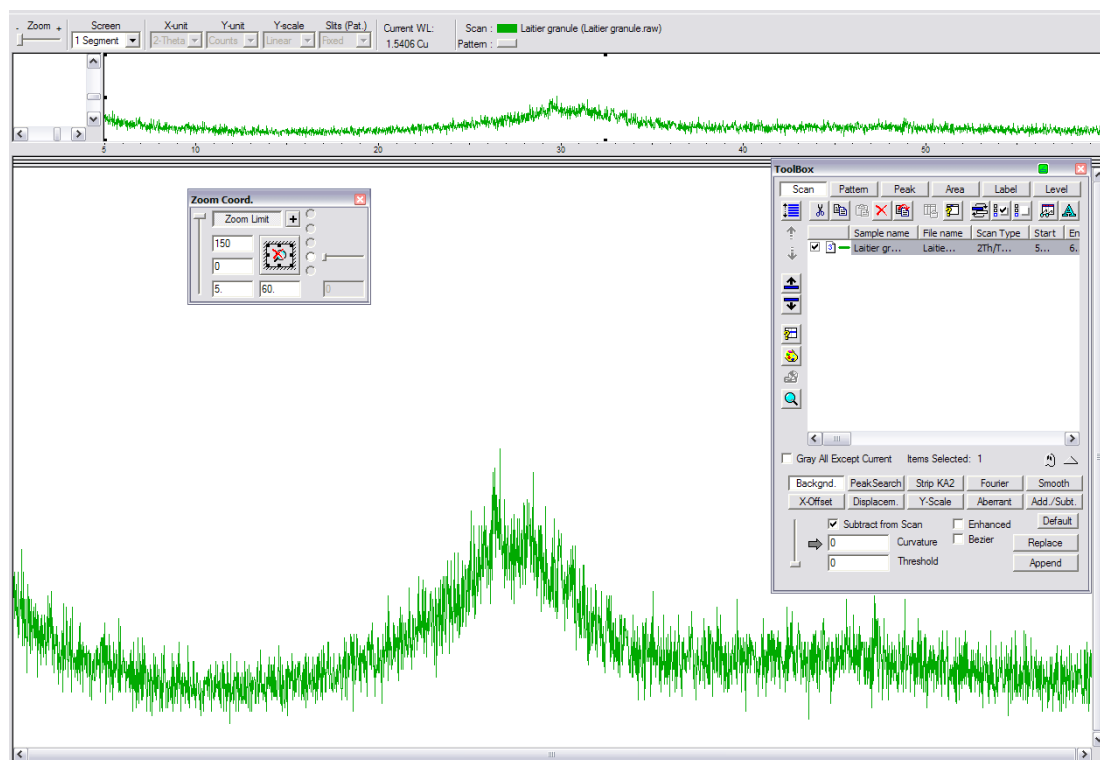


Figure II.2. Diffractogramme de laitier granulé (Annexe B).

Tableau II.3. Propriétés physiques de filler de laitier.

Type d'addition	Filler de laitier granulé
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1275
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2955.3
Finesse (cm ² /g)	5501.9

2-3 Les granulats utilisés

2-3-1--Sables

- *sable de dune 0/2.5*

Le sable de dune de gisement se situe à la wilaya de Tébessa. (Photo II.1), L'analyse aux rayons X de la poudre de sable de dune est présentée dans la figure II.3.

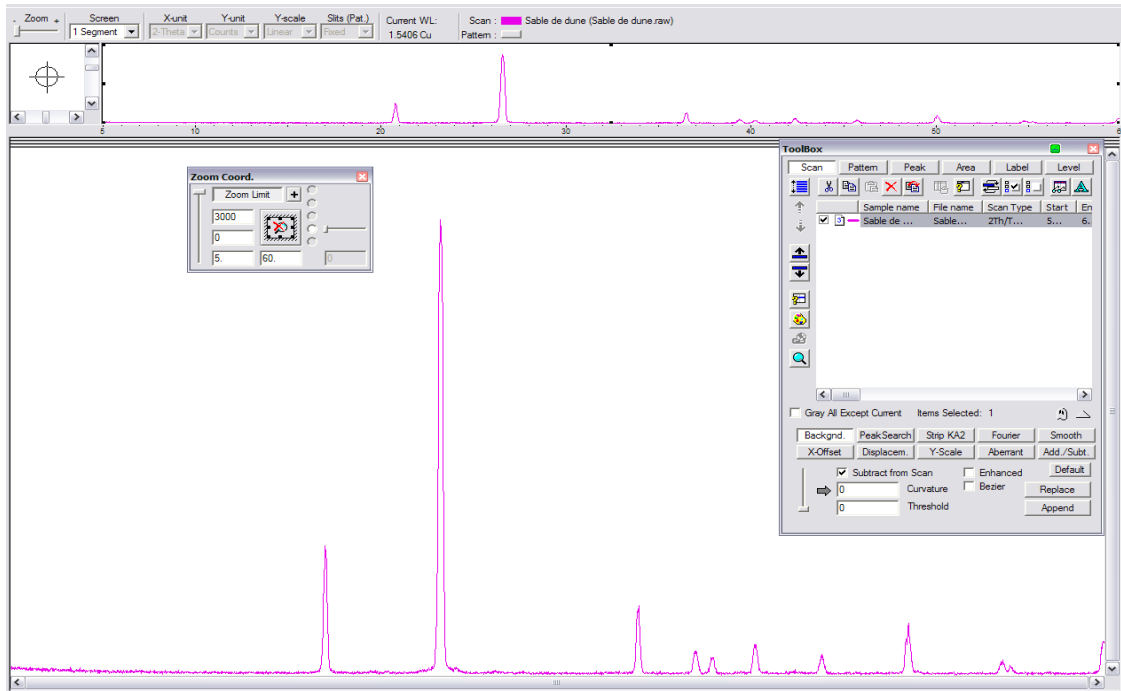


Figure II.3. Diffractogramme de sable de dune (Annexe B).

Sable de laitier cristallisé 0/3.15

Le sable de laitier cristallisé est de la wilaya d'ANNABA d'achat de haut fourneau d'EL HADJAR(PhotoII.1), L'analyse aux rayons X de la poudre de sable de laitier cristallisé est présentée dans la figure II.4.

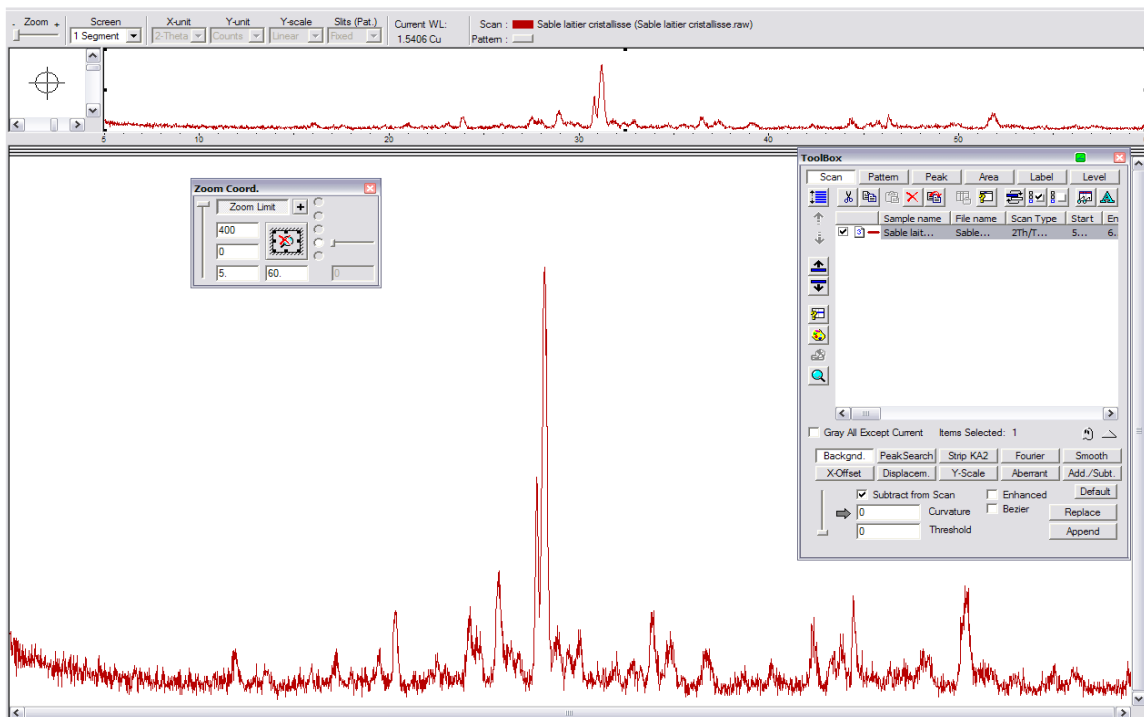


Figure II.4. Diffractogramme de sable de laitier cristallisé (Annexe B).

2-3-2-Graviers

Gravier 5/15

Le gravier 5/15 est de la carrière de la wilaya de SOUK-AHRAS. Ces propriétés ont été mesurées par NF P18-560 [44], NF P18-554 [45] et NF P18-573 [46]. Les courbes granulométriques des granulats sont données à la Figure II.5. Les propriétés physiques des granulats sont indiquées dans les tableaux II.7 et II.8 et leurs composition chimique indiqué dans le tableau II.9.

Tableau II.4- Analyse granulométrique du sable de laitier cristallisé.

Tamis en mm	Refus cumulés en		Tamisas cumulés en
	G	%	%
4	0	0	100
2	198.17	9.90	90.1
1	567.88	28.39	71.61
0.5	976.83	48.84	51.16
0.2	1480.86	74.04	25.96
0.1	1701.41	85.07	14.93
0.08	1764.95	88.2	11.76
0.053	1845.01	92.25	7.76
Fillers	1995.88	99.79	0.21

La perte = $[(2000-1995.88)/2000] \times 100 = 0.2 < 2 \%$ vérifier

- Sable de dune 0/2.5 :

Tableau II.5- Analyse granulométrique du sable de dune.

Tamis en mm	Refus cumulés en		Tamisas cumulés en
	g	%	%
4	0	0	100
2	21.1	2.11	97.89
1	113.39	11.33	88.67
0.5	429.3	42.93	57.07
0.2	892.03	89.20	10.8
0.1	793.38	97.33	2.67
0.08	980.96	98.09	1.91
0.053	989.17	98.91	1.09
fillers	997.2	99.72	0.28

La perte = $[(1000-997.2) / 1000] \times 100 = 0.28 \% < 2 \%$ vérifier

- Gravillons 5/15

Tableau II.6-Analyse granulométrique du Gravier 5/15.

Tamis en Mm	Refus cumulés en g	Refus cumulés en %	Tamises cumulés en %
20	0	0	100
14	810.19	27	73
8	2647.39	88.24	11.76
4	2950.16	98.33	1.67
2	2952.79	98.42	1.58
1	2955.36	98.51	1.49
filler	2998.45	99.94	0.06

La perte = $[(3000 - 2998.45)/3000] \times 100 = 0.05 \% < 2 \%$ vérifier

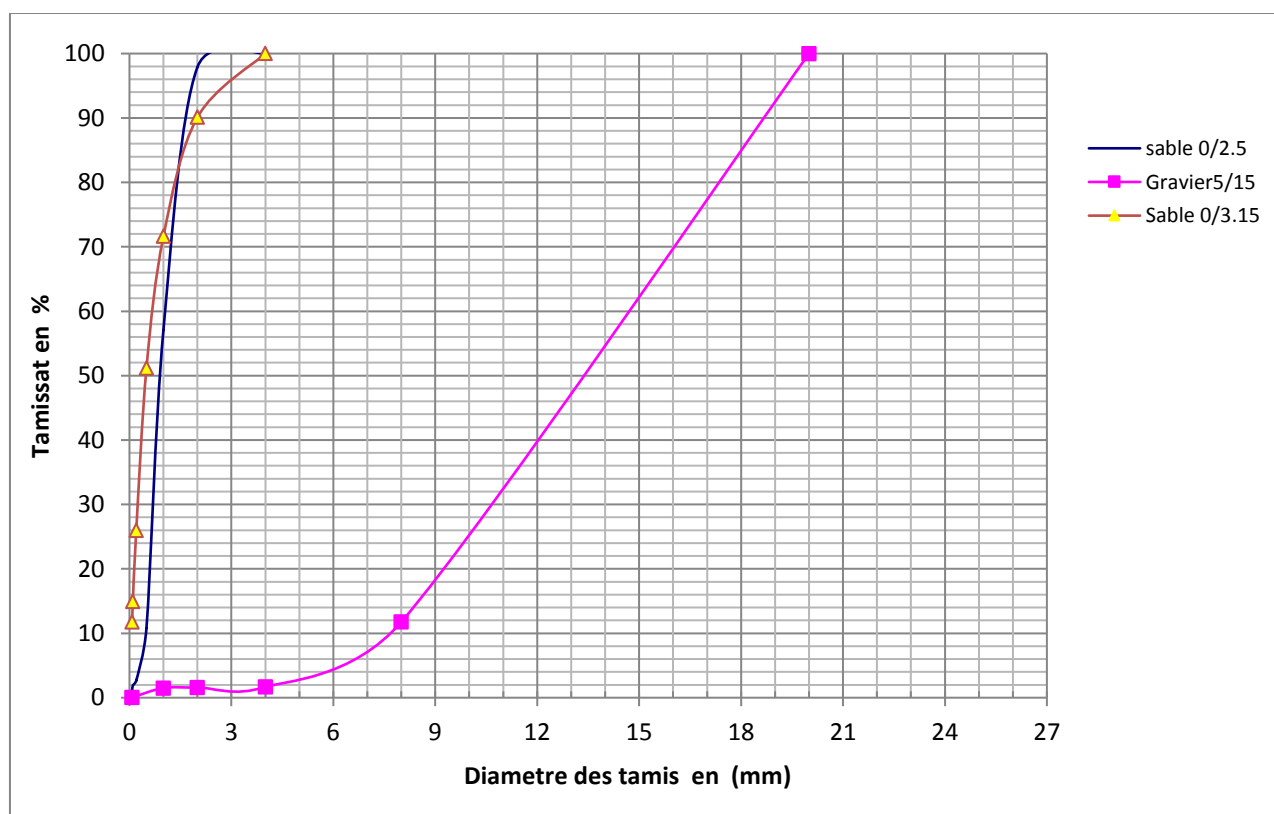


Figure II.5. Courbe granulométrique des granulats.



Sable de laitier cristallisé 0/3.15mm

Sable de dune 0/2.5mm

Laitier granulé



Filler de laitier

Photo II.1: Sables et fillers utilisés pour la formulation des bétons.

Tableau II.7- Caractéristiques physiques du gravier utilisé.

Matériau (gravillon)	Masse volumique apparente (Kg/cm ³)	Masse volumique absolue (Kg/cm ³)	La porosité (%)	La teneur en eau (%)	propreté	Coefficient d'absorption (%)
Gravillon (5/15)	1300	2500	48	0.79	2	2.55

Tableau II.8- Caractéristiques physiques des sables utilisé.

Matériau (sable)	Masse volumique apparente (Kg/cm ³)	Masse volumique absolue (Kg/cm ³)	La porosité (%)	Module de Finesse (M.F)	La teneur en eau (%)	ES %
Sable de dune (0/2.5)	1610	2680	40	2.5		80.52
Laitier Cristallisé (0/3.15)	1570	2630	41	2.46	0.35	83.95

Tableau II.9: Compositions chimiques (%) des différents sables et filler.

Composants (oxides)	Sable de dune	Sable de laitier cristallisé	Filler de laitier
Al ₂ O ₃	1.70	9.02	9.25
BaO	0.0177	0.572	0.459
CaO	0.507	39.8	40.5
Cr ₂ O ₃	0.0940	0.0253	0.0312
CuO	0.0119	0.00634	0.00617
Fe ₂ O ₃	0.655	1.63	0.482
K ₂ O	0.449	0.378	0.457
MnO	0.00530	1.32	1.47
MgO	-	3.13	4.08
NiO	0.0105	-	0.0107
SiO ₂	96.5	42.2	41.5
SrO	0.00387	0.224	0.232
TiO ₂	0.0442	0.104	0.0892
SO ₃	-	1.54	1.44
ZrO ₂	0.00758	-	-

2.4. Superplastifiant

Dans cette étude, on a utilisé un superplastifiant à haut réducteur d'eau basé dans un copolymère acrylique et de la dénomination commerciale SIKA VISCOCRETETEMPO 12. Le superplastifiant respecte les exigences de la norme NFEN934-2 [47]. Les caractéristiques techniques du mélange sont présentées dans le tableau II.10.

Tableau II.10: Caractéristiques techniques du superplastifiant.

Adjuvant	Densité	pH	Extrait sec	Teneur en Ion Cl-	Teneur en Na ₂ O eq	Plage d'utilisation *
TEMPO12	1.06±0.01	6±1	30.2±13%	≤0.1%	≤1.0%	0.2 to 3%

*se rapporter aux fiche technique du produit (Annexe A).

2-5. Eau de gâchage

L'eau utilisée est du robinet de la ville de Biskra, L'eau était à une température de 20 ± 2 ° C. Sa qualité est conforme aux exigences de la norme NF P 18-404 [48].

2-6. Caractéristique de l'acier utilisé

L'acier utilisé pour la confection de la section en I est une tôle laminée à froid d'épaisseur 2 mm et pliée à froid pour former des U dont les caractéristiques mécaniques sont :

- Module de Young $E_a = 205000$ MPa
- Contrainte d'écoulement $\sigma_e = 235$ MPa

3- Formulation des bétons :

- *Composition du béton ordinaire :*

On a utilisé la méthode Dreux Gorisse de Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testés sur chantiers et ayant donné satisfaction. Elle est d'autre part très simple d'utilisation puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés. Dans l'application de la méthode de Dreux-Gorisse[49] .

- *Composition du béton de sable :*

La méthode utilisée pour la formulation du béton de sable est la méthode SABLOCRETE [50], et les indications de la norme NF 18-305 béton prêt à l'emploi [51,52]. Dans son ouvrage SABLOCRETE propose deux types d'approche : une qui constitue une base de formulation de béton de sable et une approche expérimentale basée sur la réalisation de plusieurs gâchées Successives [50,53] .

Le tableau ci-dessous présente les différentes compositions des bétons confectionné dans cette étude.

Tableau II.11- Différentes combinaisons des constituants des bétons utilisés

Matériaux	Unité	BO	BSI	BSII	BSIII
Ciment CPJ	kg/m ³	350	300	300	300
42.5					
E/C calculé	-	0.5	0.81	0.6	0.61
E/C réel	-	0.58	0.88	0.7	0.88
Sable de dune	kg/m ³	737	-	-	500
0/2.5					
Sable de laitier cristallisé	kg/m ³	-	1540	1530	1275
0/3.15					
Gravier 5/15	kg/m ³	1075.3	-	-	-
Filler de laitier	kg/m ³	-	200	78	200
Superplastifiant	kg/m ³	-	-	6	-
Slump	cm	6	6	6	6

Quatre types de mélange de béton ont été préparés, un béton ordinaire désigné par B.O, et autre béton de substitution désignés par BS avec :

BSI où le sable de dune a été substitué totalement par le laitier cristallisé avec un dosage en filler de laitier élevé (200Kg/m³).

BSII où le sable de dune a été substitué totalement par le laitier cristallisé avec un dosage en filler plus faible (78Kg/m^3) et utilisation de superplastifiant.

BSIII où le sable de dune a été substitué partiellement par le laitier cristallisé.

4- Tests de caractérisation des bétons frais et durcis

La caractérisation du béton durci a été faite à partir de leurs propriétés physico-mécaniques : la résistance à la compression, la résistance à la traction, capillarité, absorption d'eau massique et retrait hydraulique.

4-1 Choix et confection des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées pour caractérisés le béton de remplissage des profilés en acier laminées à froid et soudés sont cubiques, de dimensions $100\times 100\times 100$ mm et $150\times 150\times 150$ mm et des prismes de $70\times 70\times 280$ mm et de $40\times 40\times 160$ mm et des cylindres de 160×320 mm. Le malaxage du béton est réalisé dans une bétonnière à axe inclinée, de capacité 115 litres. La mise en place du béton est réalisée à l'aide d'une table vibrante selon la norme NF P 18-421 [54]

4-2 Cure et conservation des éprouvettes

Les éprouvettes en béton sont démoulées après 24 heures de cure en conditions ambiantes du laboratoire. Les éprouvettes destinées pour les essais mécaniques et les autres éprouvettes qui sont destinées pour le test de retrait sont conservées à l'air libre.

- 12 cubes de chaque type de béton sont testés en compressions simples pour les échéanciers de 7, 14, 28,180 jours à raison de trois éprouvettes par âge de durcissement.
- 03 cylindres de chaque type de béton en traction par fendage à l'âge de 28 jours.
- 03 éprouvettes prismatiques de chaque type de béton pour le test de capillarité.
- 03 éprouvettes prismatiques de chaque type de béton pour le test d'absorption par immersion.
- 03 éprouvettes prismatiques $70\times 70\times 280$ mm pour béton ordinaire et 03 éprouvettes prismatiques $40\times 40\times 160$ mm pour béton de sable pour les tests de retrait.



Photo II.2-Les éprouvettes en béton testés.

4-3- Caractérisation à l'état frais :

4-3-1- Essais de consistance

L'essai le plus couramment utilisé est le cône d'Abrams (Slump test) conformément à la norme NF P 18-451 [55]. (photo II.3)



Photo II.3- Essai de consistance.

4-3-2- Masse volumique du béton frais

Lors du gâchage du béton, il est intéressant de mesurer la masse volumique du béton frais ; cette valeur donne une première indication concernant la compacité du mélange.

La masse volumique du béton frais suivant la norme NF EN 12350-6 [56]. Pour caractériser l'influence de la teneur en fines d'ajout sur la compacité des mélanges, il a été fait recourt à la détermination de la masse volumique des mélanges selon la procédure suivante :

Masse volumique (Δ pratique) = (Masse moule rempli – Masse moule vide)/volume du moule.

Δ_0 théorique = (C + S + F + E) /1000. C, S, F et E représentent respectivement le dosage en ciment, sable, filler et eau en kg pour 1m³ de béton. (Photo II.4).



Photo II.4 : Masse volumique du béton frais.

4-4 Essais mécaniques

4-4-1 Dispositif d'essai de compression

Les essais effectués sur le béton préparés ont été réalisés au moyen d'une presse (hydraulique), ayant une capacité maximale de 50 tonnes, sous une vitesse de chargement constante de 2 kgf/cm² par seconde jusqu'à l'endommagement. Toutes les éprouvettes ont été placées au centre des plateaux pour assurer la position verticale et la répartition uniforme de la charge appliquée. (Photo II.5).

4-4-2 Essai de compression simple

L'essai de compression simple est réalisé selon la méthodologie prescrite par la norme BS 1881, partie 166 [57] à l'âge de 7, 14, 28, 180 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité 50 Tonnes. (Photo II.5).



Photo II.5 : Machine de compression.

4-4-3 Essai de traction par fendage

L'essai de traction par fendage est réalisé sur le même type d'éprouvette que l'essai de compression, défini dans la norme BS 1881, partie 117 [58]. Et sous la même presse utilisée pour la compression. Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$\sigma_t = 2.F/\pi.a^2 \quad (II.1)$$



Photo II.6 : Essai de traction par fendage.

4-5 Essais hydriques

4-5-1 Essai de capillarité

L'essai de capillarité est réalisé selon la méthodologie prescrite par la norme NF P 18-502 [59]. L'essai s'effectue sur des prismes de 70x70x280 mm séchées dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante (Photo II.7). L'essai dure 90 minutes selon cette norme. Le principe de l'essai consiste à mettre la base des éprouvettes de béton (70 mm x 70 mm) en contact permanent avec de l'eau et à peser les éprouvettes à des temps réguliers. Il est exigé pendant tout l'essai de maintenir le niveau d'eau constant à 20mm(PhotoII.8). Le coefficient de capillarité (C en %) est alors déterminé par la formule suivante:

$$C\% = \frac{M}{S.\sqrt{t}} \times 100 \quad (II.2)$$



Photo II.7-Séchage des prismes dans une étuve à 105°.

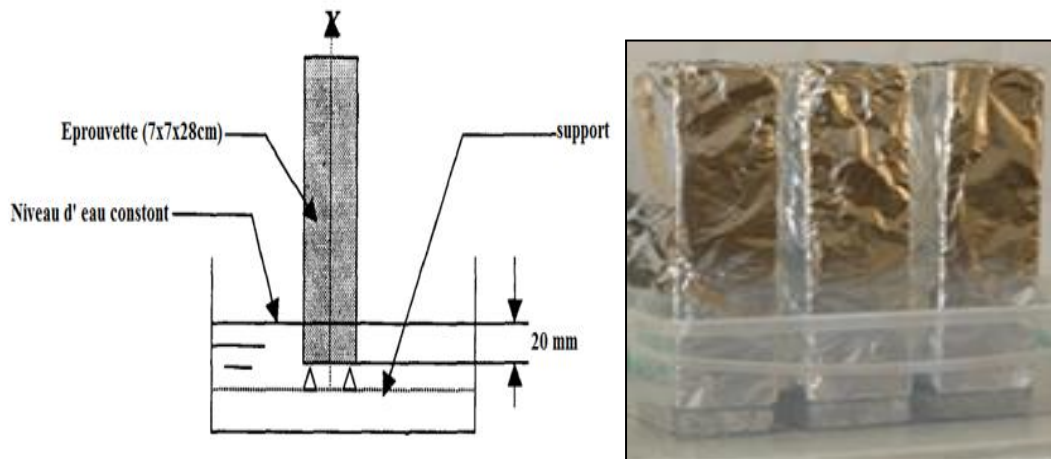


Photo II.8 - Essai de capillarité.

4-5-2 Essai d'absorption d'eau massive par immersion

Le principe de cet essai consiste à mettre les éprouvettes prismatiques 70x70x280 mm, dans l'étuve et de les peser jusqu'au poids constant, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C jusqu'à leur saturation complète(PhotoII.9), dans le but d'évaluer approximativement le volume des vides du béton. Le coefficient d'absorption d'eau par immersion est déduit de la formule suivante:

$$A_b \% = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (II.3)$$

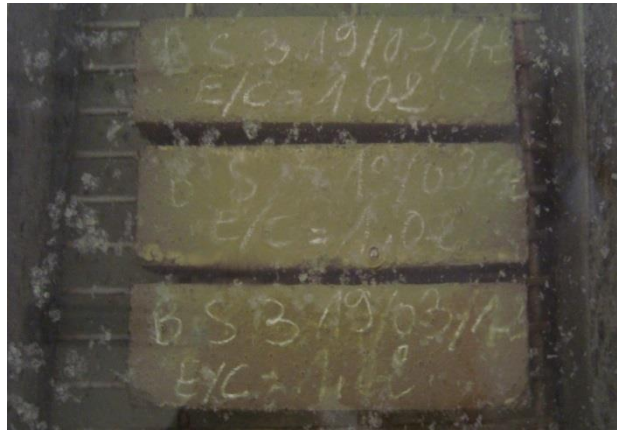


Photo II.9- Essai d'absorption d'eau massique par immersion.

4-5-3 Variations dimensionnelles (retrait)

Il est réalisé conformément à la norme NF P 15-433 [60] , à l'aide d'un rétractomètre, on mesure la déformation dans l'axe des éprouvettes confectionnée de dimension 70x 70x 280 mm et 40x40x160mm, entre deux plots en laiton noyés dans le béton.

Les éprouvettes sont conservées à l'air libre dans le laboratoire d'essais, à une température de 20°C à 30°C, et une humidité relative variant entre 50 et 65 %.



Photo II.10- Essai de retrait.

4-5-4 Variations pondérales

L'évolution de la perte de poids est réalisée sur les mêmes éprouvettes utilisées pour le suivi du retrait. La perte de poids est mesurée par simple pesée à l'aide d'une balance électronique. Les pertes en poids peuvent être liées aussi à l'excès d'eau, qu'il faut prendre en considération pour mieux formuler les bétons de sable.



Photo II.11- L'évolution de la perte de poids.

4-6- Analyse au microscope à balayage des bétons :

Cette analyse est mise au niveau de laboratoire de physique SEMAT de l'université de Minho Portugal à l'aide d'un microscope à balayage (Photo II.13) qui nous a aidé de faire une analyse complète de la microstructure des bétons avec une analyse chimique des différents composants entrant dans la composition des bétons utilisés dans cette étude pour le remplissage des tubes en acier laminé à froid (figure II.15, II.16). L'observation au MEB des structures des bétons permet d'analyser l'état de la surface et de décrire les microstructures. L'objectif de cette analyse est de mieux expliquer certains phénomènes mécaniques dans les bétons durcis. Des agrandissements différents, nous ont permis de voir l'interaction entre les agrégats et la pâte de ciment.



Photo II.12 : Echantillons bétons pour l'analyse avec microscope à balayage.



Photo II.13 : Microscope électronique à balayage MEB (laboratoire SEMAT université de Minho –Portugal).

5- résultats expérimentaux et analyses

5-1 Béton frais

5-1-1 Consistance du béton

Le béton de laitier est formulé avec une consistance plastique, qui a un affaissement de l'ordre de 6 ± 1 cm. Ce facteur qui est étroitement lié à la résistance, facilite la mise en œuvre du béton. Cette consistance désirée est obtenue avec une quantité d'eau suivant la nature du constituant du béton et par conséquent du rapport E/C.

Tableau II.12- Variation du rapport E/C du béton

Type de béton	B.O	BSI	BSII	BSIII
Slump test en cm	6 ,00	6,00	6,00	6,00
Rapport E/C	0.58	0.88	0.7	0.88

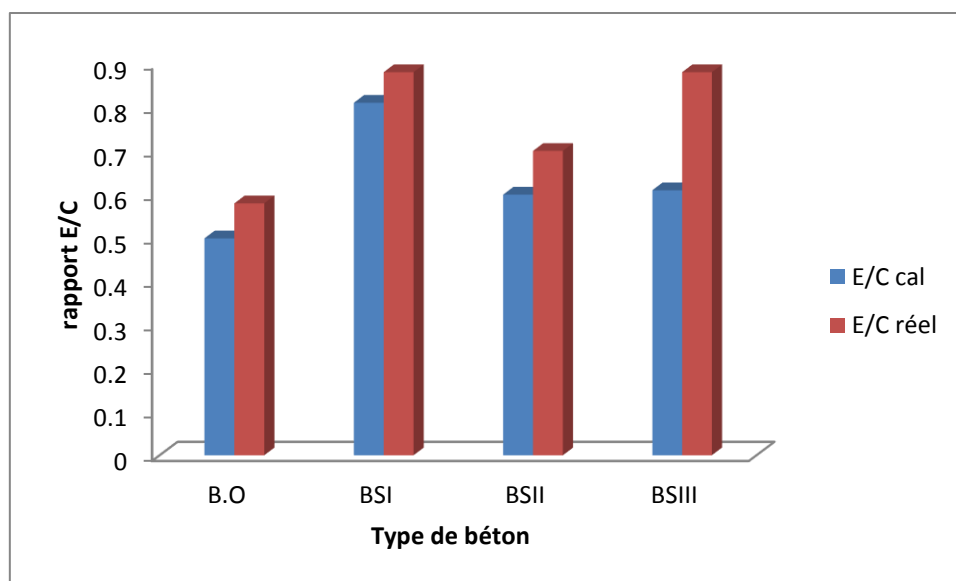


Figure II.6 : Variation du rapport E/C des différents bétons.

Le rapport E/C, est de l'ordre 0,7, s'expliquer par la considération suivante: les cavités qui se trouvent au niveau du laitier cristallisé absorbent de l'eau.

5.1.2 Masse volumique

Comme pour un béton courant, la densité d'un béton de laitier dépend de sa formulation, ainsi que de sa mise en place. La recherche d'une compacité, élevée se justifie pour avoir de bonnes caractéristiques mécaniques.

Tableau II.13-Variation de masse volumique des mélanges des différents types de béton.

Béton	Masse volumique g/cm^3	
	Δ pratique	Δ_0 théorique
BO	2.385	2.36
BSI	2.529	2.285
BSII	2.455	2.118
BSIII	2.455	2.455

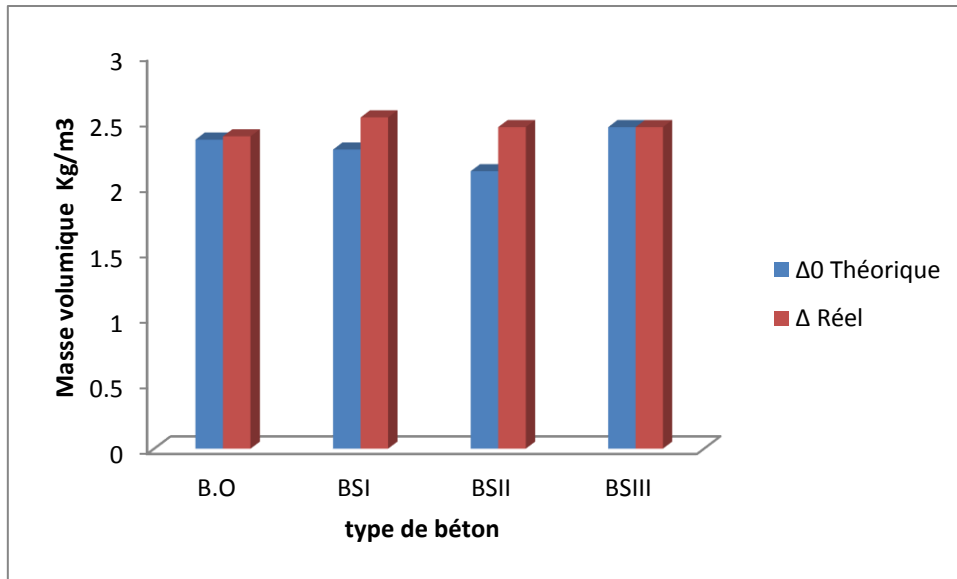


Fig. II. 7-Variation de masse volumique des mélanges de sable.

5-2 Béton durci

5-2-1 Résistance à la compression

Les résistances en compression des bétons sont illustrées dans la figure II.8. Ces résistances sont obtenues par la moyenne d'écrasement de 12 éprouvettes cubiques de 150x150x150 mm, à 7, 14, 28, 180 jours pour chaque type de bétons on remarque que la résistance de béton de sable de laitier est supérieure à celle de béton ordinaire

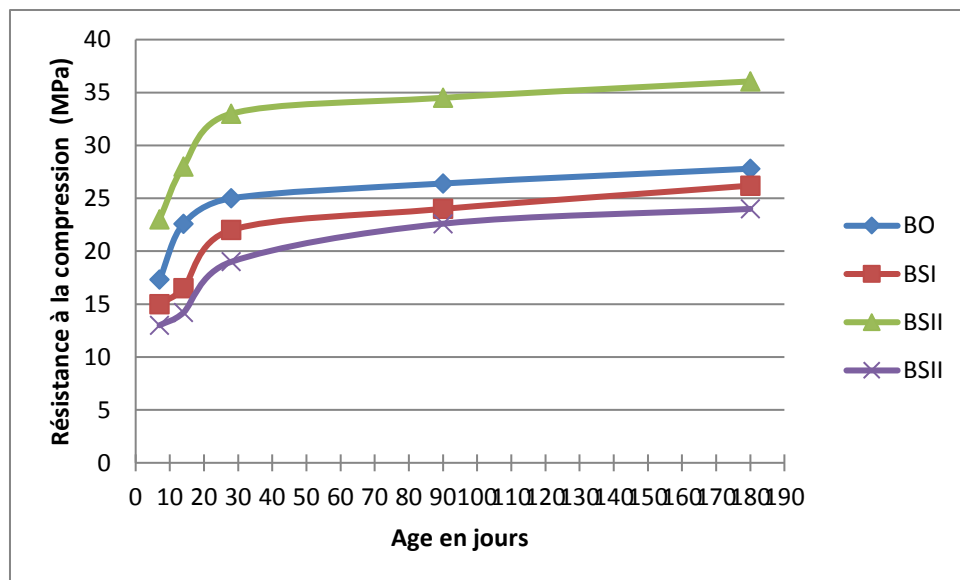


Figure II.8. Résistance à la compression des bétons.

5-2-2 Résistance à la traction par fendage

Les résistances en traction par fendage sont obtenues par la moyenne d'écrasement de 03 éprouvettes cylindriques de 160x320 mm. Les résultats sont présentés à 7 et 28 jours dans la figure II.9.

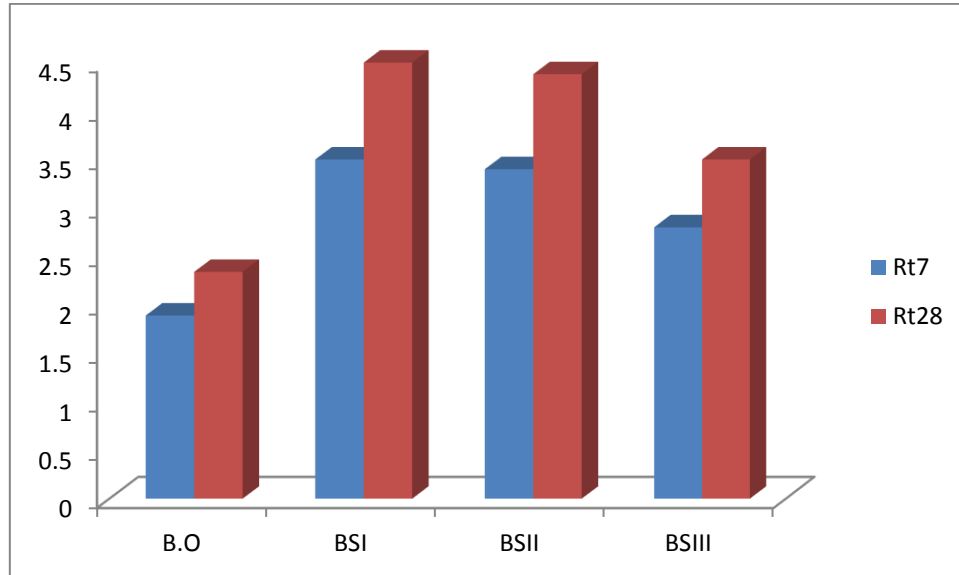
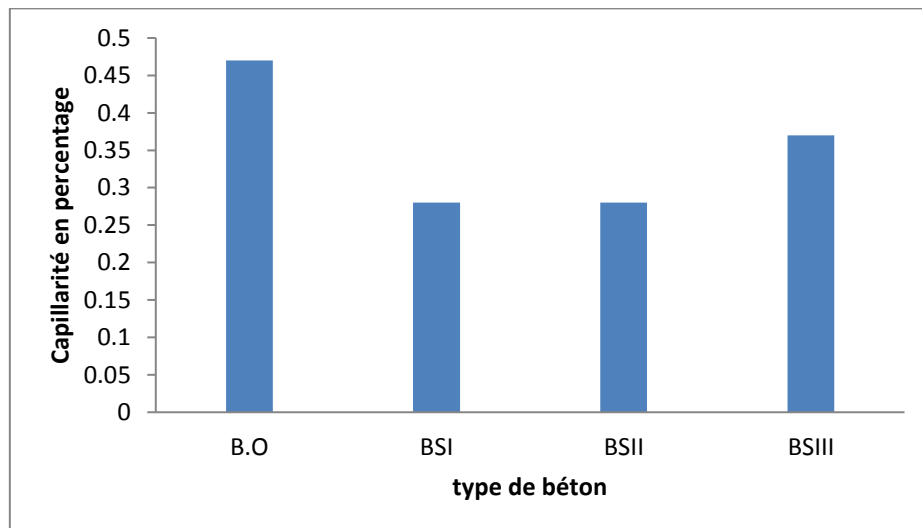


Figure II.9 : Résistance traction par fendage des bétons.

5-2-3 Capillarité

La capillarité correspond à la moyenne de trois éprouvettes prismatiques 70x70x280 mm, les résultats obtenus sont montrés dans la figure II.10.



FigureII.10 : Capillarité des différents types de bétons.

Ces résultats montrent que la remontée capillaire est faible pour les bétons de sable (BSI, BSII, BSIII) par rapport au béton ordinaire, l'emploi de laitier cristallisé comme sable dans

le béton n'augmente pas la perméabilité de celui-ci, la porosité du laitier étant fermée c'est-à-dire que les cavités ne communiquent pas entre elles.

5-2-4 Absorption d'eau par immersion

Le résultat correspond à la moyenne de trois éprouvettes prismatiques 70x70x280 mm, la figure ci-dessous montre les différents résultats pour les quatre types de bétons.

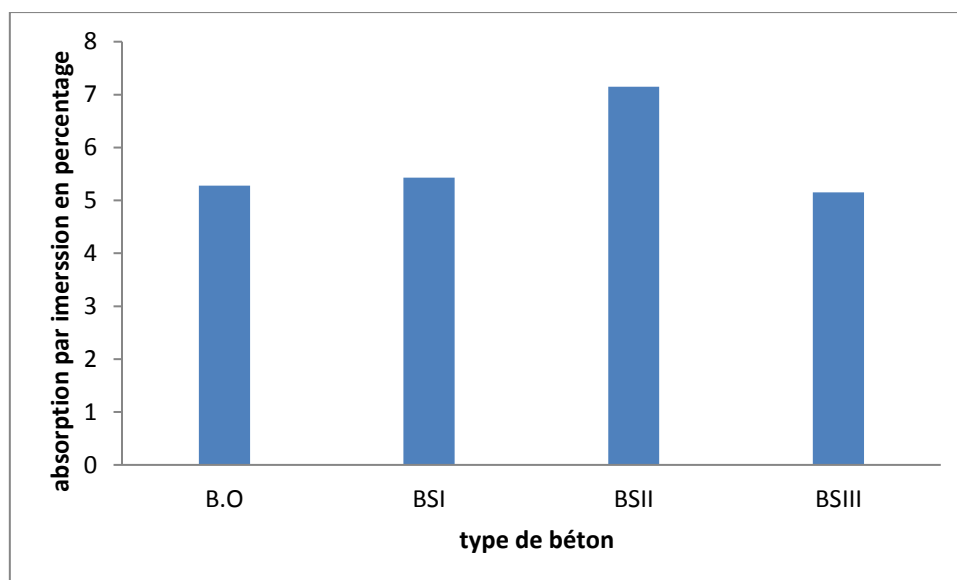


Figure II.11 : Absorption par immersion des différents types de bétons.

On remarque que l'absorption d'eau par immersion des bétons de sable est proche de celle du béton ordinaire qui a pour valeur 6.82.

5-2-5 Analyse des résultats des pertes en poids

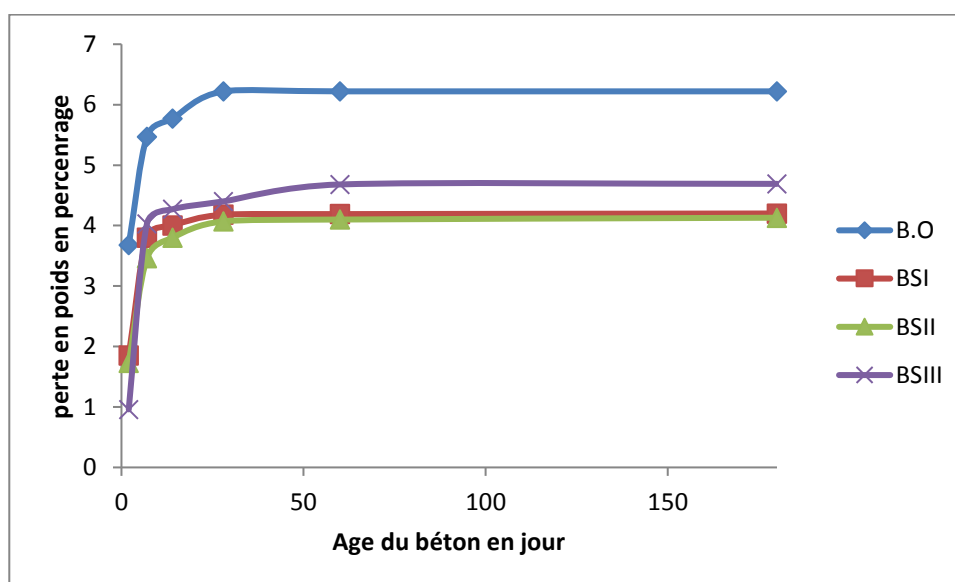


Figure. II.12- Perte de poids avec l'âge de durcissement des bétons.

Les pertes de poids pour les bétons de sables à base du filler de laitier vitrifié de haut fourneau comme le montre la figure II.12 sont les plus faibles. Ceci s'explique par le fait qu'une partie de l'eau de gâchage est combinée chimiquement avec les fines de laitier et participe aux réactions d'hydratation. Par contre le béton ordinaire, présente de taux de perte en poids plus élevés.

5-2-6. Analyse de la cinétique de retrait

Les résultats de l'analyse expérimentale du développement du retrait de dessiccation des bétons testés sont regroupés dans la figure II.13.

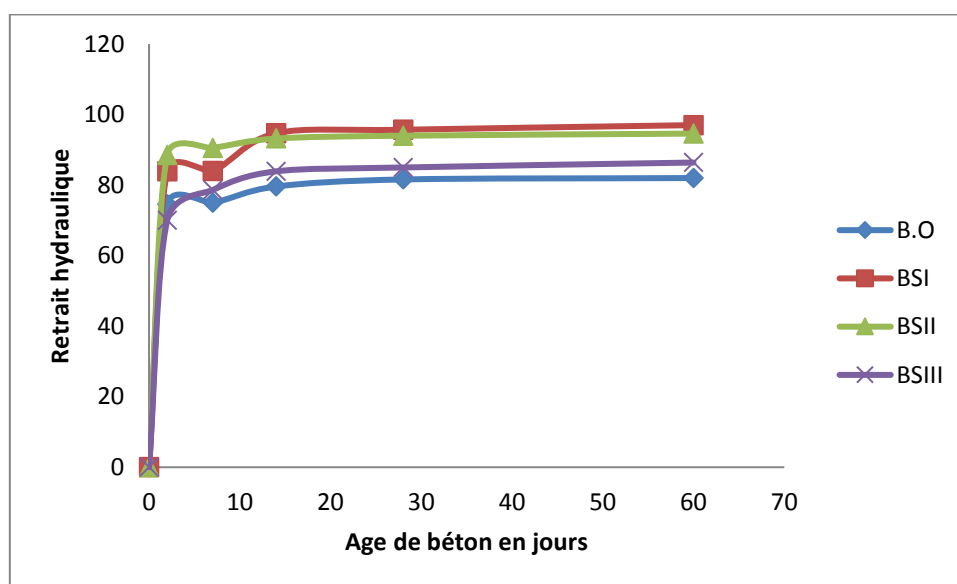


Fig. II.13- Variation du retrait de dessiccation avec l'âge du béton de sable.

On peut conclure que globalement les valeurs du retrait des bétons de sable avec fort dosage en filler de laitier granulé ($200\text{kg}/\text{m}^3$) sont légèrement supérieures et restent proches aux limites des valeurs courantes du béton ordinaire. Ceci peut être expliqué par la forte compacité obtenue pour ces bétons de sable.[64].

5-2-7. Observation au microscope à balayage des différents bétons :

La microstructure et l'interface entre les particules d'agrégats et la matrice cimentaire du béton ordinaire et du béton de sable contenant 100% de sable de laitier cristallisé ont été examinées sur les surfaces d'échantillon concassées.

Les photos des figures II.14, II.15, II.16 et II.17 montrent la présence des micropores visibles au niveau de la matrice de ciment et qui diffère d'un béton à l'autre. Ceci s'explique par la

différence dans la distribution granulaire. Les figures illustrent également la bonne compacité des deux bétons utilisés dans cette étude, avec la présence d'une très faible microporosité. Sur les figures II.14 et II.15, on peut observer une certaine hétérogénéité de la matrice qui s'explique par la présence d'un nombre élevé de micropores et d'une liaison matrice –agrégats inférieure. Ceci peut être mieux vu à un grossissement plus élevé.

La microstructure du BS avec filler de laitier granulés semble être relativement compacte (figures II.16 et II.17), avec la présence de certains éléments riches en fer (couleur blanche) et la texture des hydrates devenant plus compacte et homogène. Ceci est principalement dû à l'implication du laitier granulé dans le processus de formation de SCH secondaire.

La liaison entre le sable et la pâte de ciment à l'interface (pas de déchirement) est très forte, ainsi que la finesse du composant à proximité immédiate du sable (figures II.16 et II.17). Cet état de la microstructure approuve le caractère pozzolanique ou réactif de filler de laitier granulé.

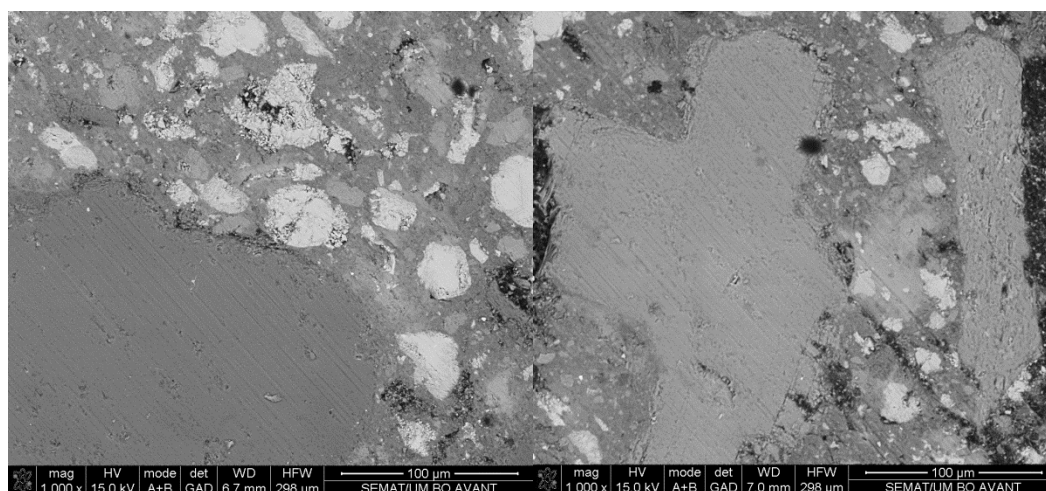


Figure II.14 : Micrographie MEB pour la structure du béton ordinaire - BO (1000x).

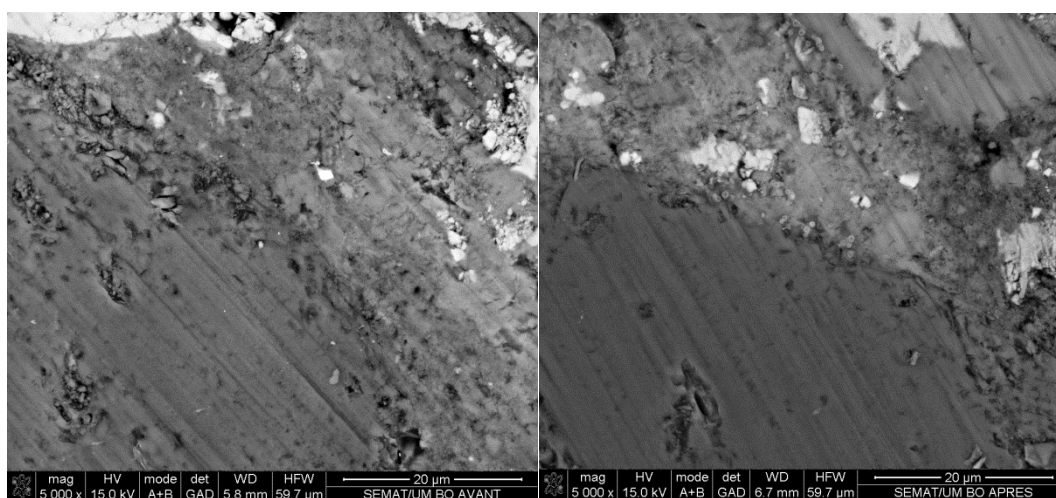


Figure II.15 : Micrographie MEB pour la structure du béton ordinaire - BO (5000x).

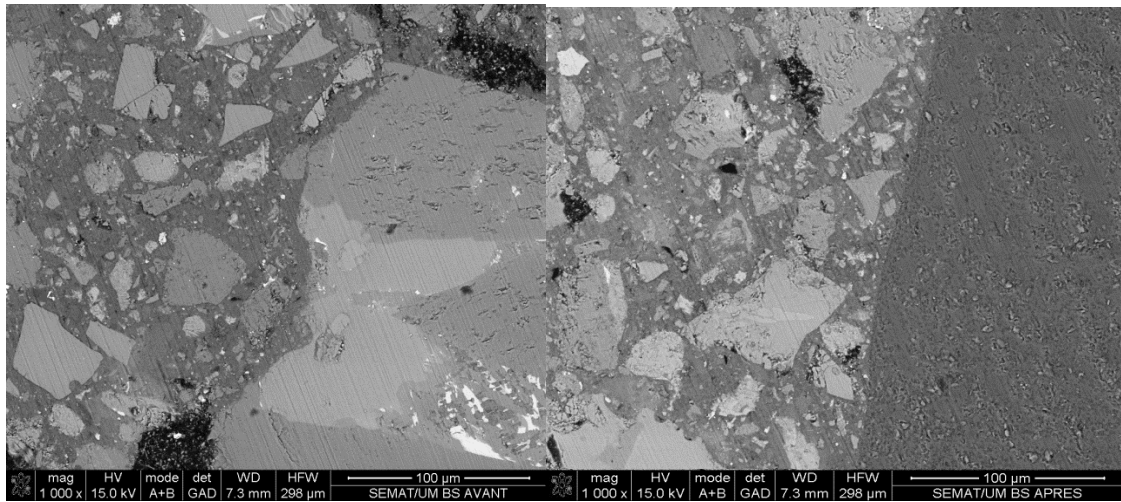


Figure II.16 : Micrographie MEB pour la structure du béton de sable - BS (1000x).

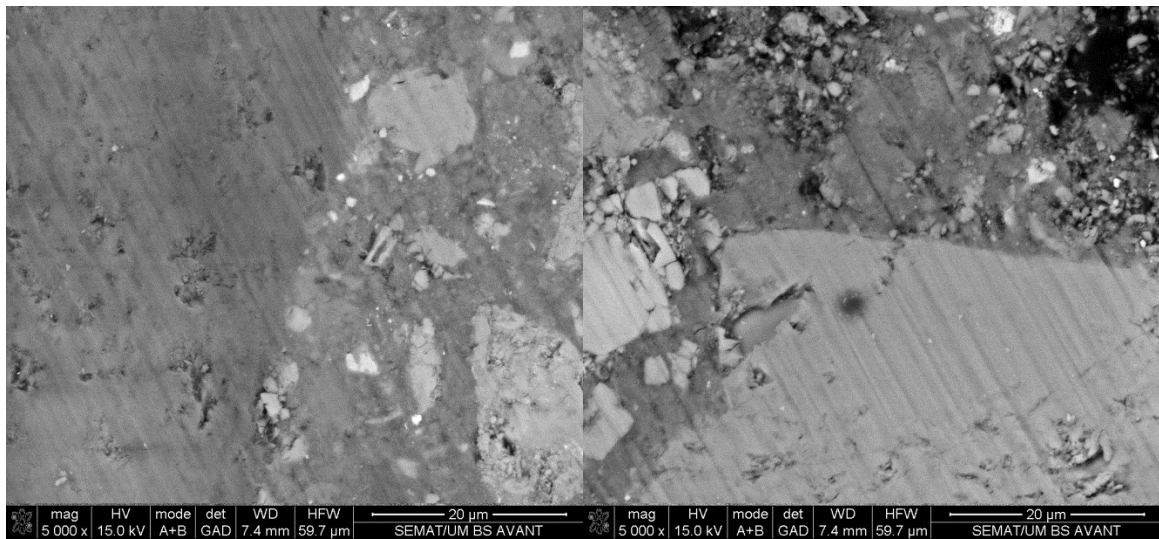
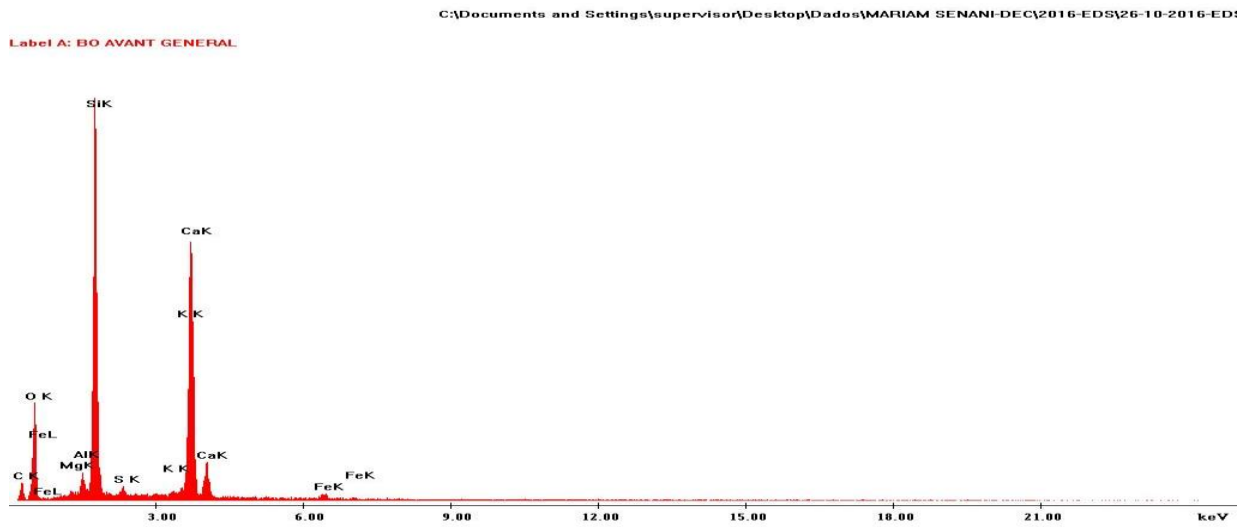
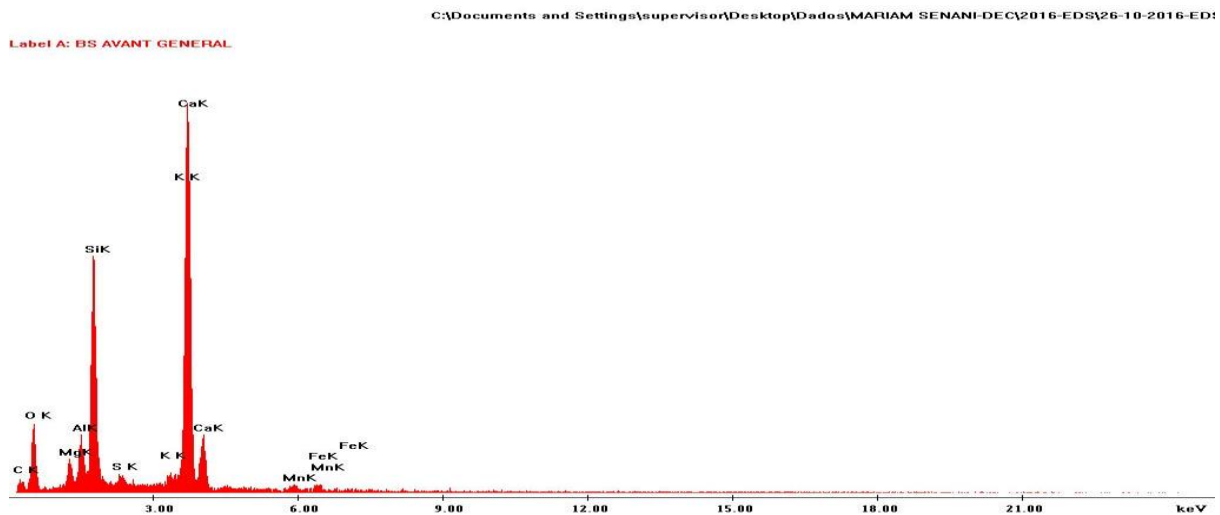


Figure II.17: Micrographie MEB pour la structure du béton de sable - BS (5000x).



FigureII.18 : Composition chimique générale de béton ordinaire.



FigureII.19: Composition chimique générale de béton de sable.

6- Conclusion

Les bétons de sable représentent une nouvelle famille de bétons dont les performances évoluent en fonction de plusieurs paramètres indépendants ce qui rend extrêmement délicat la comparaison entre les bétons de sable à ajout différents.

Cette étude a mis en évidence le rôle et l'influence de certains paramètres à savoir: le dosage, la nature et la granulométrie des sables et filler sur les caractéristiques du béton de sable frais et durcis. Par l'analyse des résultats obtenus nous pouvons énoncer :

Dans tous les cas, la compacité est un facteur primordial dans l'amélioration des résistances mécaniques. Cette compacité est directement liée à la granulométrie de l'étendue granulaire et ce dernier est en relation directe avec la granulométrie et le dosage en fillers et en sable.

La caractérisation des bétons de sable de laitier ont été faite à partir de leurs propriétés mécaniques : la résistance à la compression et la résistance à la traction, ainsi que sur leur durabilité: la capillarité, l'absorption d'eau massique et le retrait hydraulique.

- La compacité élevée obtenue grâce à l'ajout de filler en proportion convenable permet d'obtenir des gains de résistances en compression et traction par fendage.
- L'utilisation du laitier granulé broyé en tant que fillers peut répondre à deux objectifs :
 - a-** soit à résistance égale, réaliser des économies de ciment
 - b-** soit à dosage en ciment constant, augmenter les résistances mécaniques, les fines de laitier venant de constituer un surdosage en liant.
- La quantité d'eau de gâchage utilisée dans le béton au laitier est plus importante à cause de l'absorption d'eau importante par le sable de laitier cristallisé.
- Le retrait de dessiccation, qui est très proche pour l'ensemble des bétons de sable, est relativement par rapport à celui du béton classique. Ceci est lié à la granulométrie de l'étendue granulaire, la nature des fillers et surtout la quantité d'eau élevée ($E/C > 0.7$), qui justifie la nécessité de faire usage aux super plastifiants.
- On a observé des modifications de la microstructure au niveau des matrices de ciment et des zones d'interface. On a observé la pouzzolaniété du filler de laitier granulé utilisé.
- La résistance du béton de laitier provient de la liaison sable-pâte. Dans le béton ordinaire a été observée une certaine hétérogénéité de la matrice. Ceci est expliqué par la présence d'un grand nombre de micropores et de la liaison entre matrice agrégats inférieure dans le béton classique. On peut déduire que la résistance à la compression dépend de la nature et de la résistance des hydrates formés, de leur mode d'association et de la porosité.

Chapitre III

Comportement des poteaux en acier

1. Introduction

Les poteaux mixtes sont généralement utilisés en présence d'efforts normaux élevés et d'un souhait de sections de faibles dimensions. Comme les poteaux mixtes peuvent être préfabriqués ou préparés en atelier, le temps de construction peut être fortement réduit par rapport à la construction sur place en béton armé.

Le présent chapitre est pour déterminer les comportements d'une section composée par quelques essais, et la possibilité d'employer dans la construction des poteaux à parois minces remplis par un béton de sable de laitier cristallisé. Ces essais sont effectués sur des tubes creux laminé à froid sans et renforcés avec deux types de connecteurs cornières et goujons, remplis par quatre types de bétons :

- Béton ordinaire à base de granulats calcaire, désigné par BO.
- Béton de sable de laitier contenant 100 % de sable de laitier cristallisé avec un dosage en filler plus élevé (200kg/m^3), désigné par BSI.
- Béton de sable de laitier contenant 100% de sable de laitier cristallisé avec un dosage en filler plus faible (78kg/m^3) et en utilisant de super plastifiant , désigné par BSII.
- Béton de sable de laitier ou la substitution du sable naturel a été partiel par le laitier cristallisé, désigné par BSIII.

Une série d'essais à la compression centrique et excentrique a été effectuée sur 45 tubes creux de section carrés $100\times 100\times 2$ mm remplis par les deux types de bétons (BO et BSII), et 16 tubes creux rectangulaires $100\times 70\times 2$ mm remplis par trois types de bétons (BO, BSI et BSIII), répartis comme suit :

-15 tubes vides de section carrée laminé à froid répartis comme suit : 7 vides sans connecteurs et 4 vides avec connecteurs type cornières et 4 vides avec connecteurs type goujons.

-15 tubes de section carrée laminé à froid remplis par le béton ordinaire répartis comme suit : 7 remplis avec béton ordinaire sans connecteurs, 4 remplis avec le BO avec connecteurs type cornières, 4 remplis avec le BO avec connecteurs types goujons.

-15 tubes de section carrée laminé à froid remplis par le béton de sable répartis comme suit : 7 remplis avec le BSII sans connecteurs, 4 remplis avec le BSII avec connecteurs type cornières, 4 remplis avec le BSII avec connecteurs type goujons.

Pour la dernière partie de ce chapitre qui concerne à une étude comparative avec les tubes de section carré on a une série de 16 tubes de section rectangulaire remplis de trois types de béton sont répartis comme suit :

- Quatre tubes creux remplis par un béton ordinaire (BO), 2 sont testés sous charge uni-axiale et 2 sont testés sous charge excentrique ;
- Six tubes creux remplis par un béton de sable de laitier (BSI), 2 sont testés sous charge uni-axiale et 4 sont testés sous charge excentrique;
- Six tubes creux remplis par le béton de sable de laitier (BSIII), 2 sont testés sous charge uni-axiale et 4 tubes sont testés sous charge excentrique.

Les paramètres étudiés dans cette étude sont :

- l'influence de la hauteur du tube (50 -100-150-200-300-400-500) mm
- Type de béton de remplissage
- Effet du connecteur de renforcement et leurs types (cornières et goujons)
- l'excentricité de la charge appliquée.

Les résultats expérimentaux enregistrés ont été comparés avec ceux données par la prescription du règlement EC3 pour les tubes vides et EC4 pour les tubes remplis par les différents mélanges de béton utilisés.

2. Calcul des poteaux selon le règlement EC3 : [61]

2.1 Comportement mécanique des poteaux moyennement ou fortement élancés

a) Comportement d'un poteau idéal sous compression seule

Pour une pièce idéale à axe rectiligne et section uniforme, parfaitement homogène, soumise à une action de compression parfaitement centrée, le flambage par flexion se développe dans un plan donnée lorsque la force de compression atteint la force critique d'Euler, N_{cr} , qui s'écrit :

$N_{cr} = \pi^2 EI / \ell^2$. Où ℓ est la longueur critique de flambement dans le plan considéré et I l'inertie de la section autour de l'axe de flambement par flexion considéré. En divisant cette expression par l'effort axial de plastification de la section transversale $N_{pl} = A f_Y$, on obtient :

$$N_{cr} / N_{pl} = (\pi^2 EI) / (\ell^2 A f_Y) \dots (III.01)$$

Enfin, en introduisant le rayon de giration de la section, $i^2 = I / A$, et l'élanement de l'élément, $\lambda = \ell / i$, cette expression devient :

$$N_{cr} / N_{pl} = (\pi^2 E i^2) / (\ell^2 f_Y) = (\pi^2 E) / (\lambda^2 f_Y) \dots (III.02)$$

On peut donc remarquer que pour une nuance d'acier donnée (f_Y fixé), le terme le plus déterminant d'une étude de flambement c'est bien l'élanement de la barre.

Si l'on pose $\lambda_1 = \pi \sqrt{E} / f_Y$, constante dépendant du matériau, et λ , élanement réduit sera :

$$\lambda = \lambda / \lambda_1 \dots (III.03)$$

Il vient :

$$N_{cr} / N_{pl} = (1 / \lambda^2) \dots (III.04)$$

L'élanement de référence λ_1 est donc celui d'une pièce idéale dont la charge critique de flambement par flexion serait égale à l'effort normal de plastification ($N_{cr} = N_{pl}$, soit : $\pi^2 E / \lambda_1^2 = f_Y$).

Le poteau mixte présente une résistance au flambement suffisante si, pour chacun des plans de flambement, l'effort axial de calcul N_{Sd} est tel que :

$$N_{Sd} \leq \chi N_{pl,R} \dots (III.05)$$

Où : la valeur de χ , coefficient de réduction relatif au plan de flambement considéré est donnée en fonction de l'élanement λ et de la courbe européenne de flambement appropriée.

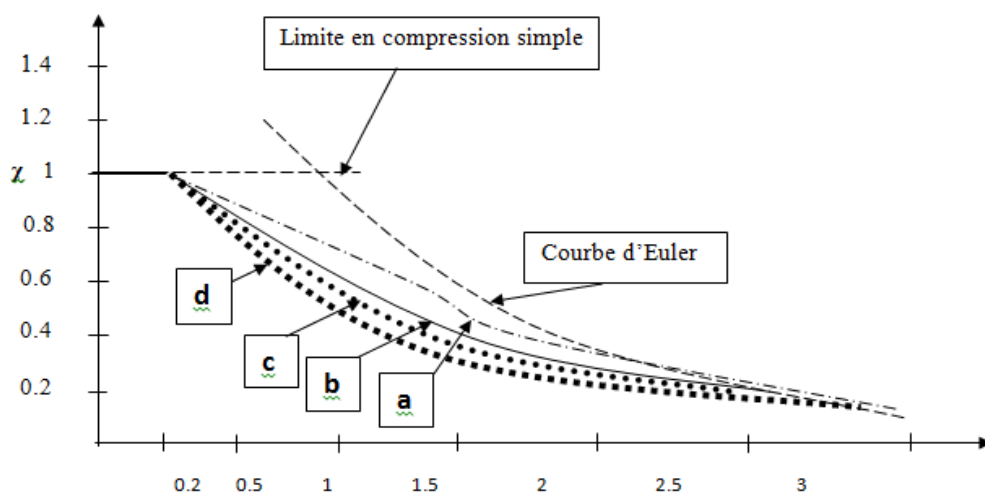


Figure III.1: Les courbes européennes de flambement.

L'Eurocode 3 [61] fournit les particularités de ces courbes décrites comme suit :

- Courbe a : pour les profils creux remplis de béton, $\alpha = 0.21$
- Courbe b : pour les profilés en I totalement ou partiellement enrobés de béton avec flexion selon l'axe fort du profilé en acier, $\alpha = 0.34$
- Courbe c : pour les profilés en I totalement ou partiellement enrobés de béton avec flexion selon l'axe faible du profilé de l'acier, $\alpha = 0.49$

Où α est le paramètre d'imperfection généralisée, qui couvre les effets défavorables du défaut de rectitudes initiales et des contraintes résiduelles.

- Le coefficient de réduction au flambement est calculé suivant:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{1/2}} \leq 1 \quad (\text{III.06})$$

Avec :

$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (\text{III.07})$$

b) Comportement d'un poteau réel sous compression seule

La différence entre le comportement d'un poteau idéal et celui d'un poteau réel est due à la présence de divers phénomènes ou imperfections : défaut de rectitude, contraintes résiduelles, excentricités des charges appliquées et écrouissage. Ceux-ci affectent tous plus ou moins le flambement et, par conséquent, ils influent sur la capacité portante du poteau.

c) Résistance au flambement par flexion selon l'Euro code 3 :[61]

Au sens de l'Euro code 3, la résistance d'un élément susceptible de flamber par flexion s'écrit :

$$N_{b,Rd} = \chi \beta_A A f_Y / \gamma_{M1} \quad (\text{III.08})$$

Avec $\beta_A = 1$ pour les sections transversales de classe 1, 2 ou 3 et $\beta_A = A_{eff} / A$ pour les sections transversales de classe 4.

Le coefficient χ utilisé précédemment ($\chi = N / N_{pl}$), est destiné à réduire la capacité portante de l'élément afin de prendre en compte le phénomène de flambement.

Les courbes représentatives de l'évolution de χ en fonction de λ sont appelées « courbes de flambement ».

2.2. Différence de comportement en fonction de l'élancement

A la lecture des courbes de flambement, les poteaux peuvent être respectivement qualifiés de massifs (courtes), de moyennement ou de fortement élancés.

a) Poteaux courts (massifs)

Il s'agit des poteaux possédant un élancement réduit tel que $\lambda \leq 0.2$. Pour ces éléments, le risque de flambement n'est pas à craindre. Ils sont associés à une valeur du coefficient de réduction $\chi = 1$ et seule la résistance de la section transversale doit être vérifiée. Cette gamme d'élancement correspond au plateau des quatre courbes (a, b, c et d). [61,62]

b) Poteaux élancés

Un poteau est considéré comme élancé si son élancement est supérieur à celui correspondant sensiblement au point d'inflexion de la courbe de flambement. L'effort axial ultime de ruine de ces éléments est proche de l'effort axial critique eulérien N_{cr} . Celui-ci est indépendant de la limite d'élasticité et ces poteaux sont fréquemment dimensionnés sur la base de l'élancement $\lambda = \sqrt{A \ell^2 / I}$, caractéristique géométrique indépendante de la résistance de la section transversale.

Etant très sensibles au flambement, les barres très élancées possèdent une faible capacité de résistance à la compression. C'est pourquoi, dans les systèmes de contreventement en croix qui comportent une diagonale comprimée associée à une diagonale tendue, on considère en générale que seule cette dernière résiste, la participation de l'élément comprimée étant négligée. [61,62]

c) Poteaux d'élancement intermédiaire

Les poteaux d'élancement intermédiaire (moyen) sont ceux qui s'écartent le plus de la théorie d'Euler car ils présentent un comportement élastoplastique. Lorsque le flambement survient, la limite d'élasticité est déjà atteinte dans certaines fibres et la charge ultime ne dépend plus exclusivement de l'élancement. Plus il y a d'imperfections, plus la différence entre les comportements réel et théorie est importante. C'est donc pour ce type d'élément que les défauts de rectitude et les contraintes résiduelles présentent l'effet le plus significatif.

Il est à noter que la réduction la plus importante par rapport à la courbe d'Euler apparaît aux alentours de l'élancement $\lambda = 1$. C'est en effet la zone où l'interaction entre la résistance plastique et l'influence du flambement est la plus forte. [61,62]

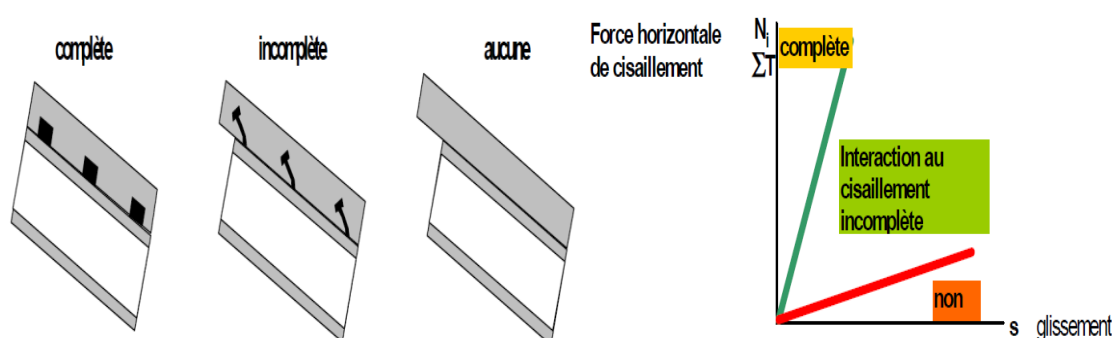
2.3.Éléments de connexion acier-béton :

La théorie de la construction mixte est fondée sur l'hypothèse de l'existence d'une liaison entre l'acier et le béton ; étant donné que l'adhérence du béton sur l'acier est trop peu durable.

Le degré de connexion est défini comme la connexion entre le béton et les composantes métalliques d'un élément mixte qui présente suffisamment de résistance et de rigidité pour permettre de calculer ces parties comme un élément structural unique.

-Le glissement est défini comme le déplacement relatif entre les deux matériaux assemblés dans la couche d'interface. Ce type de déplacement ou de soulèvement entre l'acier et le béton doit être empêché par des éléments (connecteurs) capables de transférer les efforts de cisaillement ou de traction.

-La connexion est définie par un coefficient appelé le degré de connexion (η) qui détermine le rapport entre la capacité portante de la connexion au cisaillement et celle de la section mixte.



FigurIII.2 : Types de connexion [62]

FigureIII.3: Degré de connexion au cisaillement. [62]

$\eta = 0 \rightarrow$ les deux sections agissent de manière complètement séparée.

$0 \leq \eta \leq 100\% \rightarrow$ connexion partielle, c'est l'optimum d'utilisation des matériaux et de coût.

$\eta \geq 100\%$ connexion complète.

- L'EUROCODE 4[62] autorise la connexion partielle que si les connecteurs de cisaillement sont ductiles, chargement statique, moments positifs et portée limitée.

On note qu'au niveau de la zone d'assemblage la connexion est considérée comme complète.

- Un glissement nul ne peut être obtenu que par un degré de connexion très élevé qui dépend des connecteurs eux-mêmes (solution non économique)

2.4 Classification des connecteurs :

Il existe plusieurs types de connecteurs de cisaillement. L'Euro code 4 les classifie comme ductiles et non ductiles :

- ❖ les connecteurs ductiles sont définis comme ceux qui offrent une capacité de déformation suffisante en glissement pour justifier l'hypothèse d'un comportement plastique idéal de la connexion. Par comparaison à la courbe réelle « effort de cisaillement – glissement » d'un connecteur donné, cette définition conduit à préciser les valeurs de deux caractéristiques déterminantes : la résistance (P_R) du connecteur qui correspond au plateau de plasticité d'une courbe « cisaillement – glissement » équivalente et qui est choisie souvent comme la résistance caractéristique du connecteur ; et la capacité de glissement (S_u) qui peut être prise comme le glissement maximal mesuré au niveau de la résistance caractéristique. Il convient de noter que pour les projets réels, la résistance (P_R) doit être remplacée par la résistance de calcul (P_{Rd}) obtenue par division de (P_R) par un facteur partiel de sécurité (γ_v) de valeur appropriée. Ce facteur intègre les différentes incertitudes qui affectent les caractéristiques des matériaux et la formule de dimensionnement utilisée pour calculer la résistance au cisaillement. En ce qui concerne la capacité de glissement (S_u), l'Eurocode 4 considère qu'au-delà d'une valeur de 6 mm, les connecteurs peuvent être supposés ductiles. Les essais en laboratoire montrent que cette exigence est généralement satisfaite par les goujons à tête soudés sur une poutre en acier, sous réserve que ceux-ci présentent une longueur hors-tout après soudage d'au moins 4 fois le diamètre et que leur diamètre de fût soit d'au moins 16 mm sans dépasser 22 mm. En outre, lorsque les goujons sont soudés à travers une tôle profilée et débordent suffisamment la crête des nervures, l'expérience montre que la capacité de glissement est plus élevée que pour les dalles solides, par exemple de l'ordre de 10 à 15 mm. Cet accroissement favorable de capacité de glissement est souvent accompagné d'un comportement plus complexe du connecteur avec la présence d'une branche décroissante de la courbe « cisaillement – glissement », qu'il est difficile de prendre en compte en dimensionnement classique. d'autres types de connecteurs peuvent être traités comme des connecteurs ductiles ; les boulons à haute résistance (certes à serrage contrôlé mais fonctionnant en cisaillement et/ou pression diamétrale à l'ELU), les cornières soudées avec une aile élancée et les cornières formées à froid et clouées au pistolet.
- ❖ les connecteurs parfaitement rigides et par conséquent non ductiles, peuvent être définis comme ceux qui se rompent sans glissement significatif lorsque la résistance ultime (P_R) des connecteurs est atteinte ; dans ce cas, la résistance au cisaillement

consécutive à l'atteinte de P_R chute brutalement à zéro. En pratique, il convient de classer les connecteurs en butée dans cette catégorie parce que leur seule capacité en glissement résulte de la compression du béton à proximité de la face de contact du connecteur. En revanche, d'autres connecteurs comme les cornières ou les arceaux devraient pouvoir être considérés comme ductiles en raison de la souplesse et de la ductilité partielle de leurs composants. Néanmoins, en l'absence d'une relation explicite de la courbe « cisaillement – glissement » et d'une méthode correcte de calcul du flux de cisaillement le long de l'interface acier-béton, il est recommandé de traiter ces connecteurs comme des connecteurs non ductiles et parfaitement rigides. Cette hypothèse est évidemment conservatrice pour le dimensionnement de la connexion.

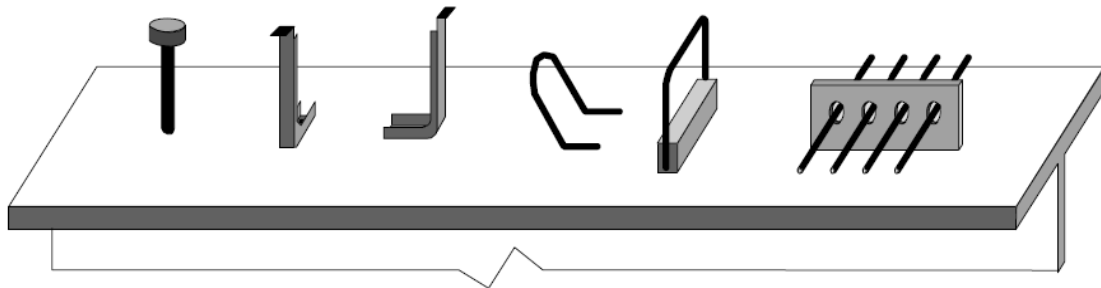


Figure III.4: Types de connecteurs de cisaillement [62]

Dans le cas d'un poteau mixte, des connecteurs mécaniques de type goujons et cornières ; soudés sur l'âme, ou des liens horizontaux soudés sur les bouts des ailes, peuvent être utilisés pour des sections laminées.

. Pour des poteaux à section creuse, des boulons sans tête introduits au travers de trous et soudés à la surface de la section satisfont aux tests et assurent en plus l'espacement entre les barres afin de ne pas gêner le bétonnage. Cependant, la soudure de ces connecteurs de cisaillement nécessite du temps. Une alternative économique est la technique du clouage de connecteurs de cisaillement dans les sections de poteaux creux développée par Hilti figure (III.5)

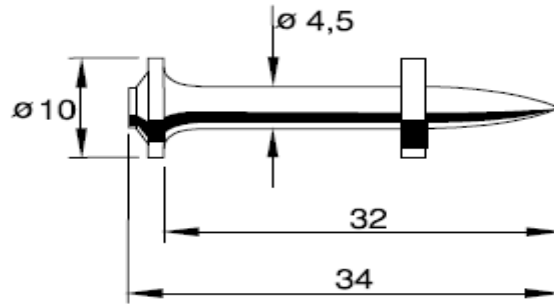


Figure III. 5 CLOU HILTI X_DSH32 P10.

Dans le cas particulier d'un poteau mixte avec profil en H ou I enrobé de béton, Lorsque la résistance naturelle n'est pas suffisante pour reprendre la sollicitation de cisaillement, on utilise des moyens de connexion mécanique tels que les goujons.

Chaque goujon peut reprendre un effort (P_{Rd}).

Cette résistance dépend du nombre de connecteurs et peut être importante.

La formule de résistance des goujons est la suivante :

$$P_{Rd}=0,8f_u(\pi d^2/4)(1/\gamma_v) \quad (\text{III.09})$$

Ou :

$$P_{Rd}=0.29 \alpha d^2 (\sqrt{f_{ck} E_{cm}})(1/\gamma_v) \quad (\text{III.10})$$

En retenant la plus faible des deux valeurs, où l'on désigne par :

d : le diamètre du fût du goujon;

f_u : la résistance ultime en traction spécifiée du matériau du goujon, sans dépasser 500 N/mm²

f_{ck} : la résistance caractéristique sur cylindre du béton à l'âge considéré ;

E_{cm} : la valeur moyenne du module sécant du béton selon la clause 3.1.4.1;

Pour :

$$3 \leq h/d \leq 4 \quad ; \quad \alpha = 0,2[(h/d) + 1] \quad (\text{III.11})$$

$$h/d > 4 \quad ; \quad \alpha = 1 \quad (\text{III.12})$$

Avec : h la hauteur hors-tout du goujon.

2.5. Un gain supplémentaire de résistance : [62]

En plus, on peut obtenir et utiliser un complément de résistance provenant du frottement sur les semelles du profilé en milieu confiné ; cette résistance complémentaire est obtenue lors

de la sollicitation des connecteurs. Sous l'effort créé au niveau du connecteur s'opposant à la sollicitation, le béton tend à gonfler. Or le béton est confiné et le gonflement est empêché par les semelles de la section en acier. Il se crée des efforts normaux aux semelles et un effort supplémentaire par frottement résistant au glissement. Cela est présenté sur la figure (III.6) :

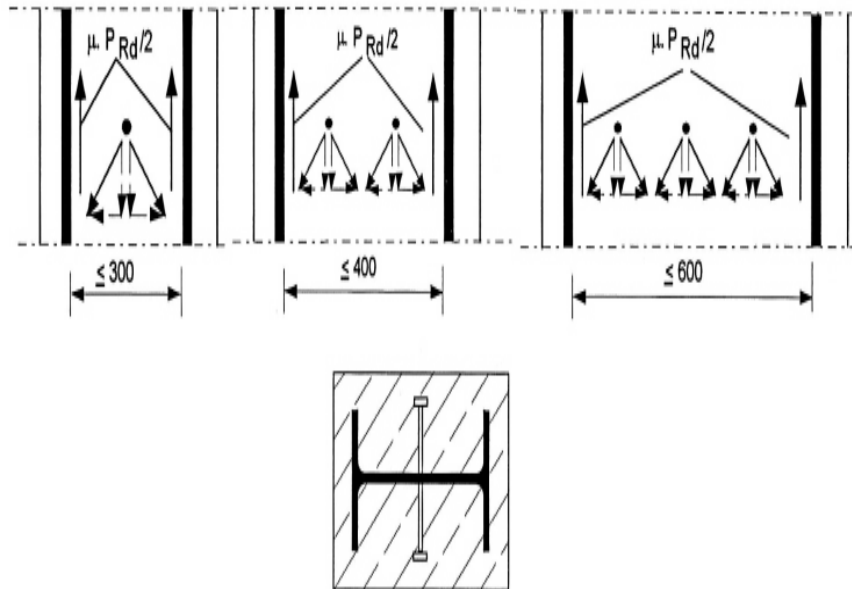


Figure III.6 : Utilisation de goujons pour augmenter le transfert d'efforts dans les poteaux mixtes.

La résistance supplémentaire sur chaque semelle peut être supposée égale à :

$$\mu \cdot P_{Rd} / 2, \text{ soit au total : } \mu \cdot P_{Rd} . \quad (\text{III.11})$$

À noter que l'effort $\mu \cdot P_{Rd}$ correspond à P_{Rd} , la résistance d'un seul connecteur dans la rangée et cela quel que soit le nombre de connecteurs sur la même rangée.

Il n'y a pas d'effort de résistance sur les âmes car le confinement n'est pas réalisé sur l'axe perpendiculaire à l'âme.

La valeur du coefficient de frottement μ est prise égale à 0,5 pour les semelles en acier d'au moins 10 mm d'épaisseur, et à 0,55 pour les semelles en acier d'au moins 15 mm d'épaisseur, grenillées ou sablées, dépourvues de rouille non adhérente et sans piqure de corrosion.

L'Eurocode 4 impose des distances maximales pour tenir compte de l'effet favorable du confinement sur le frottement et pour le positionnement des goujons. À défaut de meilleures informations obtenues par essais, ces valeurs ne seront autorisées que lorsque l'espace libre entre les semelles, tel qu'indiqué sur la figure, ne dépasse pas les valeurs suivantes :

- 300 mm ; en utilisant un seul goujon par rangée,
- 400 mm ; en utilisant deux goujons par rangée,
- 600 mm ; en utilisant trois goujons ou plus.

La résistance de calcul d'une cornière soudée est donnée par la formule empirique suivante, dimensionnellement non homogène:

$$P_{Rd} = \frac{10.l.h^{3/4}.f_{ck}^{2/3}}{\gamma_v} \quad (\text{III.13})$$

Avec:

l : longueur de la cornière (en mm);

h : hauteur de l'aile verticale de la cornière (en mm);

f_{ck} : résistance caractéristique du béton (en N/mm²).

$\gamma_v = 1,25$: est un facteur partiel de sécurité

3. Programme expérimental

3.1. Étude expérimental des poteaux en acier laminé à froid et soudé vides :

3.1.1. Caractéristique de l'acier utilisé

L'acier utilisé pour la confection de la section en I est une tôle laminée à froid d'épaisseur 2mm et pliée à froid pour former des U dont les caractéristiques mécaniques sont :

- Module de Young $E_a = 205000$ MPa
- Contrainte d'écoulement $\sigma_e = 235$ MPa

3.2 Descriptions des spécimens d'essais

Les principaux avantages des éléments à parois minces résident dans la possibilité de leur donner des formes très variées, en utilisant au mieux la matière, ainsi que dans leur facilité de fabrication et de montage. L'acier utilisé pour la confection de la section transversal en U est une tôle mince galvanisé laminée à froid d'épaisseur de 2 mm et obtenue par façonnage et pliage à froid pour former des U. La section étudiée est fabriquée par deux aciers laminés à

froid initialement en forme de U et soudés avec une soudure continue sur toute la hauteur de tube pour former une section d'acier reconstituée creux (figure III.8). Un total de 45 tubes de section transversale carrée ($100 \times 100 \times 2$) mm et 16 tubes en acier creux de section transversale rectangulaire ($100 \times 70 \times 2$) mm. L'élanement des éprouvettes sont : 50-100-150-200-300-400-500mm.

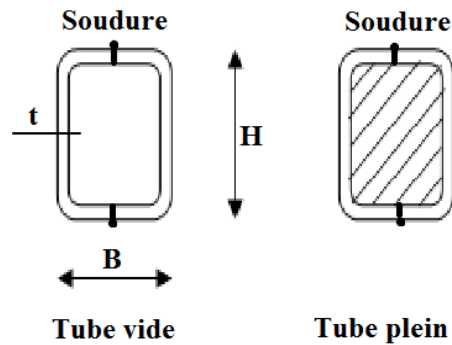


Fig. III.7 - Section reconstituée transversale en U.

3.2.1. Descriptions des spécimens renforcés par des connecteurs de cisaillement :

Les tubes creux en acier remplis par différents type de béton, ont été renforcés par deux types de connecteurs de cisaillement :

-le premier connecteur est de goujon de diamètre $\varnothing 10$ mm et de longueur 32mm, soudé sur l'âme .suivant l'EC4 pour une semelle de 100mm, on doit placer un seul goujon horizontalement sur l'âme et verticalement sur la hauteur du tube on place à chaque 100mm un connecteur, comme le montre la photo (III.1).

- le deuxième connecteur est de cornières en acier de forme U, de section 25x 25mm et d'épaisseur de 2mm,, soudé au centre des deux parois des tubes horizontalement. Et verticalement espacé de 100 mm le long de la hauteur, comme le montre la photo (III.1)

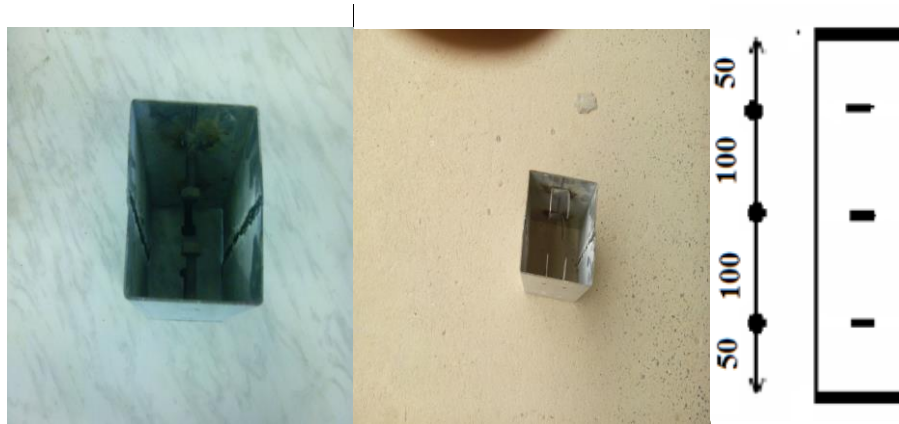


Photo III.1 : Tubes creux avec les deux types de connecteurs goujons et cornières.



Photo III.2: Les profils vides et remplis de bétons avec et sans connecteurs avec différents élancements.

4. Matériel d'essai

Tous les spécimens ont été testés sur une machine de compression de capacité 500KN, à l'âge de 28 jours, sous compression uni-axiale et compression excentrique à une vitesse de chargement d'ordre de 0.6 Tf/s. Une attention particulière a été observée pour vérifier la position correcte des spécimens avant n'importe quel chargement.

Deux comparateurs ont été employés pour mesurer les déplacements longitudinaux ; et deux comparateurs ont été également placés en contact avec les spécimens pour mesurer les déplacements transversaux (voir photo III.4)



Photo III.3. Machine de compression pour les tubes .



Photo III.4 : Les comparateurs utilisés pour la mesure de déplacement vertical et horizontal (essai déformabilité).

5 .Résultats des essais

5.1. Les poteaux vides sans et avec connecteurs :

Un total de 15 poteaux en acier vides sans et renforcés avec des connecteurs (goujons et cornières) sont testé sous compression avec une charge uni-axiale.

Toutes les données et les résultats d'essais ainsi que les dimensionnements des profils utilisés ont été récapitulés dans le tableau III.1 ci-dessous

TableauIII.1.Les résultats expérimentaux et calculés selon l'EC3 des tubes vides.

Profils N	H×B×t(mm)	Acier As (mm ²)	Béton Ac (mm ²)	Hauteur L (mm)	Charge Nue (kN)	Charge EC3 Nuc (kN)	Nuc/ Nue
TV50	99.87×99.86×1.93	756.05	-	49.30	147.3	161.5	1.09
TV100	99.22×99.08×1.92	746.72	-	100.49	146	159.5	1.09
TV150	98.40×99.51×1.94	752.83	-	148.08	140.8	160.8	1.14
TV200	99.40×99.17×1.93	751.58	-	199.66	135.3	160.5	1.18
TV300	99.20×98.97×2.07	803.28	-	299.76	134.5	171.6	1.27
TV400	99.8×100.1×1.96	768.24	-	399.69	130.9	164.1	1.25
TV500	99.95×99.73×2.01	786.55	-	499.80	127.5	168.0	1.31
TVC200	99.57×99.46×1.98	772.47	-	199.05	166	165.0	0.99
TVC300	98.64×97.48×1.92	738.35	-	301.06	164.3	157.7	0.96
TVC400	99.44×99.11×1.96	762.94	-	398.2	151.5	162.9	1.07
TVC500	99.48×99.18×2.00	778.63	-	501.03	137.7	166.3	1.20
TVG200	99.26×99.16×2.03	789.1	-	199.2	170.9	168.5	0.98
TVG300	100.08×99.57×1.98	774.93	-	300.51	167.9	165.5	0.98
TVG400	98.61×97.51×1.97	757.18	-	399.36	153.4	161.7	1.05
TVG500	99.91×99.74×1.96	767.26	-	50.14	147.4	163.9	1.11

5.2. Calcul de la charge limite selon l'EC 03 :

5.2.1. Vérification de la condition du non voilement local :

Selon l'Eurocode 03 la condition de non voilement local des tubes creux vides est donnée par la relation (III.15).Les résultats sont présentés au tableau ci-dessous.

Tableau III.2: Vérification de la condition de non voilement des tubes vides sans et avec connecteurs.

Tubes	H (mm)	t (mm)	H /t	52ε	b_f/t ≤52ε
TV50	99,87	1.93	51.74	52	vérifiée
TV100	99.22	1.92	51.67	52	Vérifiée
TV150	98.4	1.94	50.72	52	Vérifiée
TV200	99.40	1.93	51.50	52	Vérifiée
TV300	99.20	2.07	47.92	52	Vérifiée
TV400	99.8	1.96	50.91	52	Vérifiée
TV500	99.95	2.01	49.72	52	Vérifiée
TVC200	99.57	1.98	50.28	52	Vérifiée
TVC300	98.64	1.92	51.37	52	Vérifiée
TVC400	99.44	1.96	50.73	52	Vérifiée
TVC500	99.48	2.00	49.74	52	Vérifiée
TVG200	99.26	2.03	48.89	52	Vérifiée
TVG300	100.08	1.98	50.54	52	Vérifiée
TVG400	98.61	1.97	50.05	52	Vérifiée
TVG500	99.91	1.96	50.97	52	Vérifiée

5.2.2. Vérification si les éprouvettes sont considérées comme courtes :

D'après l'Eurocode une éprouvette est considérée comme courte si : $\bar{\lambda} \leq 0.2$, $\bar{\lambda}$ est donné dans la relation (III.29)

Courbe de flambement a; celle qui concerne les profils creux remplis de béton, $\alpha=0, 21$.

5.2.3. Calcul de la charge limite des spécimens vides selon l'EC 3 :

La charge critique donnée par l'EC 03 pour les poteaux courts est donné dans la relation (III.08) .Les résultats donnés par l'EC 3 et les tests sont présentés dans le tableau ci-dessus (Tableau III.1).

6. Calcul des poteaux selon le règlement EC4 : [62]

6.1 Voilement local des éléments structuraux en acier

La présence de béton correctement tenu en place dans les sections totalement enrobées prévient le voilement local des parois du profil en acier si l'épaisseur d'enrobage de béton est suffisante. Celle-ci ne peut dès lors être inférieure au maximum des deux valeurs suivantes:

- 40 mm;
- 1/6 de la largeur b de la semelle du profil en acier.

Cet enrobage destiné à empêcher tout éclatement prématuré du béton doit être armé transversalement.

Pour les autres types de poteaux mixtes, à savoir les sections partiellement enrobées et les sections creuses remplies de béton, l'élancement des parois du profil en acier doit satisfaire les conditions suivantes:

- Pour les profils creux circulaires :

$$\frac{d}{t} \leq 90\varepsilon^2 \quad (\text{III.14})$$

- Pour les profils creux rectangulaires :

$$\frac{h}{t} \leq 52\varepsilon \quad (\text{III.15})$$

- Pour les profils I partiellement enrobés :

$$\frac{b}{t_f} \leq 44\varepsilon \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (\text{III.17})$$

- f_y : limite d'élasticité de l'acier en N/mm² ;

- d : est le diamètre extérieur d'un profil creux rond en acier ;
- h : la plus grande dimension hors tout de la section parallèle à un axe principal ;
- t : l'épaisseur de la paroi d'un profil creux rempli de béton,
- t_f et b épaisseurs et largeur hors tout de la semelle d'un profil en acier en I ou similaire

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

- ❖ Une **Méthode Générale** qui impose de prendre explicitement en compte les effets du second ordre et les imperfections. Cette méthode peut notamment s'appliquer à des sections de poteaux qui ne sont pas symétriques ainsi qu'à des poteaux de section variable sur leur hauteur. Elle nécessite l'emploi d'outils de calcul numérique et ne peut être envisagée que si l'on dispose des logiciels appropriés.
- ❖ une **Méthode Simplifiée** utilisant les courbes de flambement européennes des poteaux en acier qui tiennent implicitement compte des imperfections affectant ces poteaux. Cette méthode est en pratique limitée au calcul des poteaux mixtes présentant une section doublement symétrique sur leur hauteur.

Les deux méthodes sont fondées sur les hypothèses classiques suivantes :

- Il y a une interaction complète entre la section en acier et la section de béton et ce, 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.

Seule la **Méthode Simplifiée** est développée ci-après, celle-ci étant en effet applicable à la majorité des cas de figure.

6.2. Conditions d'utilisation de la méthode simplifiée de calcul :

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

- La section transversale du poteau est constante et présente une double symétrie sur toute la hauteur du poteau et est telle que le rapport de sa hauteur à sa largeur soit compris entre 0,2 et 5,0.
- 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 ;

- L'élanement réduit λ du poteau mixte, ne dépasse pas la valeur de 2,0 ;
- Pour les sections totalement enrobées, l'aire des armatures doit au moins être égale à 0,3% de l'aire de béton et les armatures présentent des épaisseurs d'enrobage de béton satisfaisant les conditions suivantes :
 - Dans le sens y : $40 \text{ mm} < c_y < 0,4 bc$;
 - Dans le sens z : $40 \text{ mm} < c_z < 0,3 hc$ avec bc et hc définis à la figure (III.8)

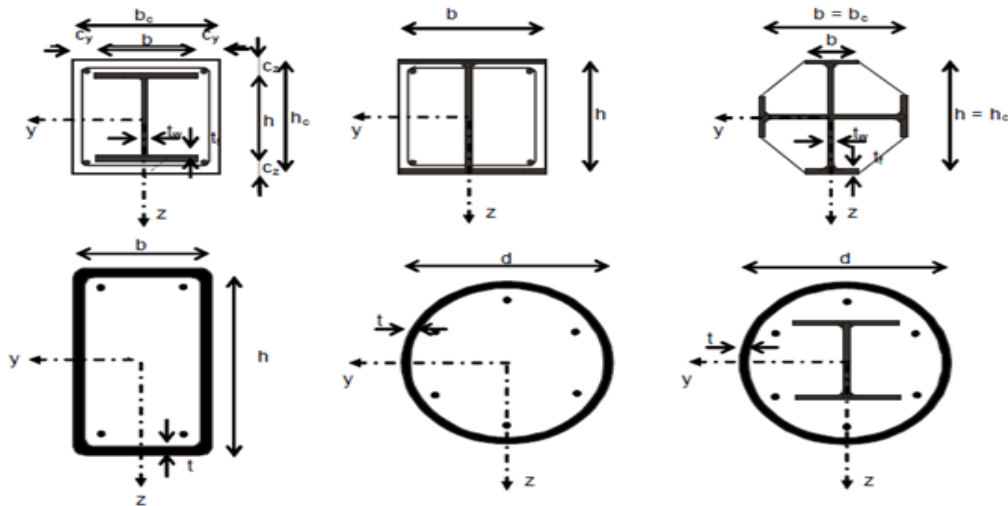


Figure III.8 : Exemples types de section transversale de poteaux. [62]

Il est souvent nécessaire d'utiliser des épaisseurs d'enrobage plus importantes (par exemple pour assurer une résistance suffisante à l'incendie) mais il convient dans ces cas, aux fins de calcul, d'ignorer le supplément d'épaisseur d'enrobage par rapport aux valeurs maximales ci-dessus.

L'aire de l'armature longitudinale ne peut être utilisée dans les calculs que si elle est limitée à 6% de l'aire du béton. Pour des raisons de résistance à l'incendie, il est quelquefois nécessaire de mettre en œuvre des sections d'armature plus importantes; il n'est toutefois tenu compte au maximum que de 6 % de l'aire de béton pour le calcul de la résistance de la section mixte.

6.3. Poteaux mixtes soumis à compression axiale : [62]

A/Résistance de la section :

La résistance en section vis-à-vis d'une charge axiale de compression est obtenue en additionnant les résistances plastiques des éléments constitutifs de cette section, suivant les formules suivantes:

Pour les sections enrobées de béton:

$$N_{pl.Rd} = A_a \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c 0,85 \frac{f_{cK}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sK}}{\gamma_s} \quad (\text{III.18})$$

Pour les sections creuses remplies de béton:

$$N_{pl.Rd} = A_a \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \frac{f_{cK}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sK}}{\gamma_s} \quad (\text{III.19})$$

Où :

A_a , A_c et A_s sont les aires respectives de la section transversale de la section en acier, du béton et de l'armature.

Le confinement du béton remplissant un profil creux, quelle que soit la forme de celui-ci, est source d'une augmentation de la résistance du béton; celle-ci est prise en compte en remplaçant la valeur $0,85 f_{cK}$ par f_{cK} .

Pour une section creuse circulaire remplie de béton, une autre 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 $0,1 N_{Sd}$

✓ où : d représente le diamètre extérieur du 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:

$$N_{pl.Rd} = A_a \eta_a \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \frac{f_{cK}}{\gamma_c} \left[1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{cK}} \right] + A_s \frac{f_{sK}}{\gamma_s} \quad (\text{III.20})$$

Où : t représente l'épaisseur de la paroi du tube en acier.

Les coefficients η_a et η_c sont définis ci-après pour $0 < e < d/10$, avec (e) l'excentricité de l'effort axial de compression, défini par le rapport $M_{max.Sd}/N_{Sd}$

$$\eta_c = \eta_{c0} \left(1 - 10 \frac{e}{d}\right) \quad (\text{III.21})$$

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) 10 \frac{e}{d} \quad (\text{III.22})$$

Pour $e > d/10$, on doit adopter $\eta_a = 0$ et $\eta_c = 1$, dans les relations ci-dessus, les facteurs η_{a0} et η_{c0} sont les valeurs de η_a et η_c pour une excentricité (e) nulle. Ils sont donnés en fonction de l'élançement réduit $\bar{\lambda}$ selon:

$$\eta_{a0} = 0,25 \cdot (3 + 2\bar{\lambda}) \quad (\text{III.23})$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2 \quad (\text{III.24})$$

La présence de moments sollicitant de calcul M_{Sd} a pour effet de réduire la contrainte de compression moyenne à la ruine dans le poteau et donc l'effet favorable du frettage sur la résistance du poteau. Les bornes imposées à η_a et η_c , d'une part, et sur η_{a0} et η_{c0} , d'autre part, traduisent les influences respectives de l'excentricité et de l'élançement sur la capacité portante.

Cette augmentation de résistance due au frettage n'est pas permise pour un tube rectangulaire parce que ses faces planes se déforment sous l'effet du gonflement du béton.[62]

B/Elancement réduit :

La charge élastique critique N_{cr} d'un poteau mixte est calculée en utilisant la formule d'Euler:

$$N_{cr} = \pi^2 EI / \ell^2 \quad (\text{III.25})$$

Où :

- (EI) est la rigidité flexionnelle du poteau mixte relative au plan de flambement considéré ;
- (ℓ), la longueur de flambement correspondante de ce poteau. Si ce poteau appartient à une ossature rigide, cette longueur de flambement peut, de manière sécuritaire, être prise égale à la longueur d'épure L .

Pour les charges de courte durée, la rigidité élastique de flexion effective (EI)_e de la section transversale d'un poteau mixte vaut :

$$(EI)_e = E_a \cdot I_a + K_e \cdot E_{cd} \cdot I_c + E_s \cdot I_s \quad (\text{III.26})$$

Avec :

- I_a , I_c et I_s inerties flexionnelles respectives, pour le plan de flexion considéré, du profil en acier, du béton (supposé non fissurer) et de l'armature;

- E_a et E_s modules d'élasticité respectifs du matériau constituant le profil en acier et de l'acier d'armature ;

- E_{cm} module sécant du béton ;

- K_e un facteur de correction prenant en compte la fissuration du béton et qui peut être pris égal à 0,8.

Dans le cas d'application de charges de longue durée, la rigidité flexionnelle du béton est déterminée en remplaçant le module d'élasticité du béton E_{cd} par une valeur minorée E_c Calculée comme suit :

$$E_c = E_{cm} / (1 + N_{G,SD} / N_{SD} \varphi_t) \quad (\text{III.27})$$

Où : $N_{G,SD}$ est la fraction de la charge axiale N_{SD} qui agit de manière permanente, tandis que φ_t est un coefficient de fluage défini dans l'Euro code 2 qui dépend de l'âge du béton lors du chargement et du temps considéré. Dans le cas d'un poteau de bâtiment, il est généralement suffisant de considérer seulement le poteau en un temps "infini". Cette modification du module d'élasticité du béton n'est nécessaire que si:

- L'élanement réduit λ , pour le plan de flexion considéré, dépasse 0,8 pour les sections enrobées de béton, et $0,8 / (1 - \delta)$ pour les sections creuses remplies de béton avec :

$$\delta = A_a \cdot f_y / \gamma_{ma} \cdot N_{Pl,Rd} \quad (\text{III.28})$$

Ce qui représente la contribution de la section métallique à la résistance axiale totale du poteau. On notera que le calcul de λ exige que l'on connaisse une première valeur de la rigidité E_c du béton. Pour la comparaison avec les limites indiquées ci-dessus, il est autorisé de calculer λ sans se préoccuper de l'influence éventuelle des charges de longue durée.

- L'excentricité relative e/d (d étant la dimension de la section associée à la hauteur dans le plan de flambement considéré) est inférieure à 2.

Ces valeurs limites sont d'application dans le cas d'ossatures contreventées rigides; elles sont à remplacer respectivement par 0,5 et $0,5 / (1 - \delta)$ dans le cas d'ossatures souples et/ou non contreventées.

L'élanement réduit $\bar{\lambda}$ du poteau mixte pour le plan de flexion considéré est donné par :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl.R}}{N_{cr}}} = \lambda / \lambda_1 \quad (\text{III.29})$$

Où $N_{pl.Rk}$ est la valeur de l'effort normal résistant plastique $N_{pl.Rd}$ calculé en posant tous les facteurs partiels de sécurité γ_a , γ_c et γ_y égaux à 1,0 (c'est à dire en utilisant les résistances caractéristiques des matériaux), et $\lambda_1 = \pi \sqrt{E / F_Y}$.

Tableau III.3 : Les valeurs de l'élançement réduit pour les structures souples et rigides.

Type de structure	Structure rigide	Structure souple
Profilé enrobé de béton	$\lambda = 0.8$	$\lambda = 0.5$
Profilé creux remplis de béton	$\lambda = 0.8 / (1 - \delta)$	$\lambda = 0.5 / (1 - \delta)$

7. Étude expérimental des poteaux en acier laminé à froid et soudé remplis par différents types de béton :

7.1. Programme expérimental :

7.1.1 Coffrage :

Les tubes en acier remplis de béton exigent seulement le coffrage du côté inférieur, le coffrage utilisé est en bois. (Photo III.5)



Photo.III.5 : Coffrage de côté inférieure du poteau en bois.

7.1.2. Coulage

Les 45 poteaux en acier avec une section carrée et les 16 poteaux en acier avec la section rectangulaire remplis par les quatre types de béton ont été coulés en position verticale et par 3 couches, chacune compactée sur une table vibrante pendant 2 à 3 minutes pour réaliser une meilleure uniformité du béton le long de la longueur du spécimen. Les tubes composés sont remplis à partir de la même gâché.

Les spécimens préparés sont posés à l'environnement de laboratoire à une température ambiante ($T = 20-25^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 60$ à 70%) jusqu'à le jour de l'essai.

Tous les spécimens remplis par les bétons après sont représentés dans la photo III.6



Photo III.6 : Les profils (carré et rectangulaire) remplis de bétons avec et sans connecteurs avec différents élancements.

8. Matériel d'essai et procédure :

Tous les spécimens ont été testés sur la même machine de compression de capacité 500KN (photo III.3) utilisé pour les tubes vides, à l'âge de 28 jours, sous compression uni-axiale et compression excentrique à une vitesse de chargement d'ordre de 0.6 Tf/s. Une attention particulière a été observée pour vérifier la position correcte des spécimens avant n'importe quel chargement.

Le programme d'essai a inclus quatre séries des spécimens :

-la première série est des profils en acier de section carré remplis avec BO , BSII sans connecteurs de hauteurs 50-100-150-200-300-400-500mm.

-la deuxième série est des profils en acier de section rectangulaire remplis avec BO, BSI et BSIII sans connecteurs de hauteur 300-500mm.

-la troisième série est des profils en acier remplis de béton ordinaire avec connecteurs (goujons et cornières) de hauteurs 200-300-400-500mm

- la quatrième série est des profils en acier remplis de béton de sable avec des connecteurs (goujons et cornières) de hauteurs 200-300-400-500mm

9. Résultats des essais

Un total de 30 poteaux en acier de section transversale carrée $100 \times 100 \times 2$ mm et 16 poteaux en acier de section transversale rectangulaire $100 \times 70 \times 2$ mm remplis par les quatre types de bétons (BO, BSI, BSII et BSIII) sont testés sous compression avec une charge uni-axiale et charge excentrique.

Toutes les données et les résultats d'essais ainsi que les dimensionnements des profils utilisés ont été récapitulés dans le tableau ci-dessous (tableau III.4).

9.1. Calcul de la charge limite des spécimens remplis de béton selon l'Euro code 4 :

Le poteau mixte présente une résistance suffisante au flambement si, pour les deux axes la relation (III.05) est vérifiée. La formule adoptée par l'EC4 pour le calcul de charge critique des poteaux composés est donné dans la relation (III.25). La méthode simplifiée est applicable dans ce type des tubes composés parce que les 3 conditions ont été vérifiées. Les résultats sont présentés dans le tableau (III.4).

Tableau III.4. Les résultats expérimentaux et calculés des tubes remplis avec les différents types de bétons.

Profils N	H×B×t(mm)	Acier As (mm ²)	Béton Ac (mm ²)	Hauteur L (mm)	Nue (kN)	Nuc EC4 (kN)	Nuc/ Nue
PBO50	98.58×99.41×1.96	760.75	9039.08	50.42	609.7	359.8	0.59
PBO100	99.07×99.49×1.99	774.42	9082.04	101.17	577.6	362.5	0.62
PBO150	97.49×99.34×1.98	763.76	8920.89	149.55	536.7	356.9	0.66
PBO200	99.49×99.33×1.98	771.64	9110.69	200.46	526.3	362.2	0.68
PBO300	98.99×99.52×1.88	732.25	9119.22	299.88	510	351.6	0.69
PBO400	97.79×99.74×1.91	739.97	9013.6	399.47	475	352.0	0.74
PBO500	100.27×99.59×1.97	771.92	9213.96	499.28	471.1	364.1	0.77
PBS50	98.50×99.68×1.92	754.93	9090.33	50.15	629.96	405.8	0.64
PBS100	98.64×99.45×1.90	738.3	9071.44	101.34	572.4	400.9	0.70
PBS150	97.40×99.34×1.90	733.17	8942.54	150.1	562.2	396.6	0.70
PBS200	99.35×99.31×2.00	778.63	9087.8	199.84	530.7	412.2	0.77
PBS300	99.16×99.32×1.95	758.86	9089.71	298.98	527	406.9	0.77
PBS400	99.50×99.75×1.96	765.69	9159.43	399.59	495.5	410.3	0.82
PBS500	96.97×99.24×1.93	742.47	8880.83	499.02	480	397.8	0.83
PBOC200	99.05×99.43×1.97	766.48	9082.05	199.58	549.5	360.4	0.65
PBOC300	97.53×99.74×1.94	750.35	8977.28	299.51	546.7	354.2	0.65
PBOC400	98.17×99.99×1.95	757.61	9058.4	398.04	489.9	357.5	0.72
PBOC500	99.29×100.02×2.01	705.06	9145.92	499.59	480.6	366.5	0.76
PBSC200	99.20×99.48×1.97	767.27	9101.14	199.77	559.4	409.4	0.73
PBSC300	98.7×99.66×2.00	777.44	9059.00	299.53	550	411.3	0.74
PBSC400	98.88×99.78×1.97	767.19	9099.04	398.87	500	409.4	0.81
PBSC500	98.48×99.88×1.90	739.32	9096.85	498.9	490.7	401.7	0.82
PBOG200	99.1×99.41×1.99	774.22	9077.30	200.34	550.4	362.4	0.65
PBOG300	99.66×99.65×1.93	754.43	9176.68	298.74	540.6	358.7	0.66
PBOG400	99.58×99.46×1.95	761.04	9143.18	398.23	498.4	359.9	0.72
PBOG500	98.70×99.72×1.98	770.06	9072.3	500.61	490.3	361.2	0.73
PBSG200	98.88×99.56×2.04	792.98	9051.5	199.81	560	415.4	0.74
PBSG300	99.80×99.50×1.99	777.37	9152.72	299.48	546	413.3	0.75
PBSG400	99.24×99.51×1.96	763.73	9111.63	395.89	510	408.7	0.80
PBSG500	99.37×99.58×1.93	753.04	9142.21	500.51	496.4	406.5	0.81

10. Analyse et interprétation des résultats

10.1. Profils en acier vides :

D'après les résultats présentés sur le tableau précédent (tableau III.4), on remarque bien que la capacité portante calculée numériquement des poteaux vides (V1, V2, V3, V4) avec prise en compte d'effet des contraintes résiduelles et de la soudure partielle donne une bonne concordance par rapport à celle donnée expérimentalement. L'erreur de sous-estimation de la charge axiale maximale de compression varie de 0.6% à 1.6%. Par contre la capacité portante

prédite par le règlement EC3 est largement supérieure à celle donnée expérimentalement (sur estimation varie de 37.1% à 68.5%) ce qui veut dire que l'EC3 n'est pas conservative. Cette surestimation de capacité portante donnée par le règlement EC3 est due essentiellement aux effets des contraintes résiduelles et à la soudure partielle qui n'est pas prise en compte par le règlement dans l'estimation de la capacité portante (Fig. IV.9 et Fig. IV.10).

Les résultats présentés sur le tableau précédent (Tableau III.1) montrent que la capacité portante prédite par le règlement EC3 est largement supérieure à celle donnée expérimentalement (sur estimation), La variation de la capacité portante avec des tubes en acier vides est montrée dans la figure III.9 qui montre clairement une augmentation de 17.28% et 21.09% pour les tubes avec connecteurs cornières et goujons par rapport au tubes vides sans connecteurs ,ceci illustre bien la contribution de l'utilisation des connecteurs dans l'amélioration de la capacité portante des colonnes composés.

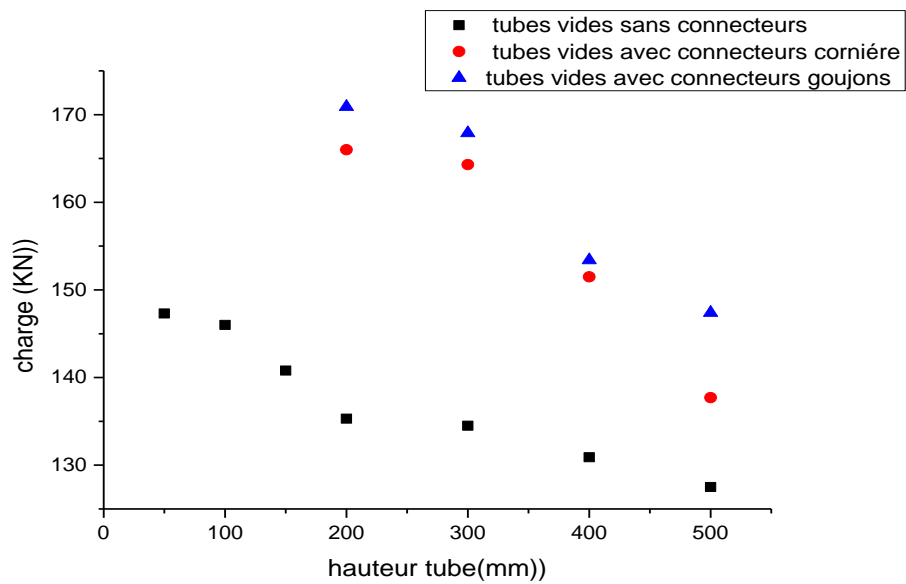


Figure III.9. Charge de rupture expérimentale des tubes vides après 28 jours.

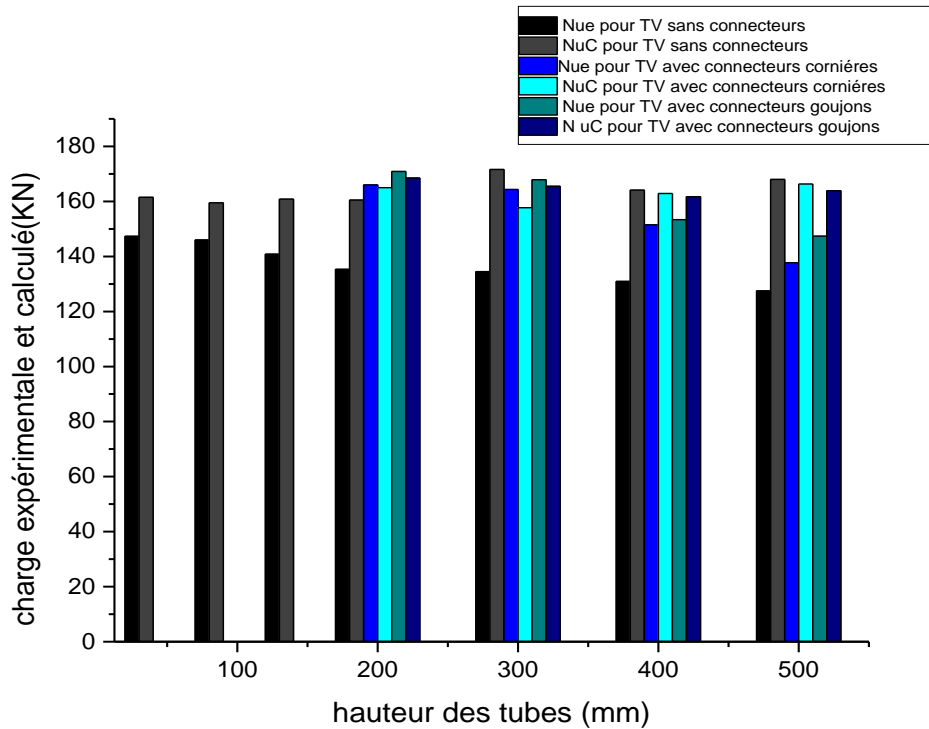


Figure III.10. Charge ultime des tubes vides selon EC3.

Les résultats sur la figure III.10 prouvent clairement que l'EC3 prévoit une capacité portante supérieure (sur estimation de 19.08% pour les tubes vides sans connecteurs et de 5.23%, 3.12% pour les tubes vides avec des connecteurs cornières et goujons respectivement à celle trouvée expérimentalement pour les tubes en acier vides). Ce qui veut dire que l'EC3 n'est pas conservatrice. Cette surestimation de capacité portante donnée par le règlement EC3 est due essentiellement aux effets des contraintes résiduelles et à la soudure qui n'est pas prise en compte par le règlement dans l'estimation de la capacité portante, les charges expérimentales des profilés vides étant inférieures car les spécimens en acier vides ont subi un mode de voilement prématuré.

11. Mécanisme de rupture des profils vides:

Le mode de rupture des tubes en aciers à parois mince vides est un mode de voilement locale avec déformation de l'acier à mi-hauteur vers l'extérieur ou vers l'intérieur aussi on remarque une amélioration pour le mode de rupture des poteaux vides avec connecteurs par rapport aux poteaux vides sans connecteurs. Comme le montre les photos (III.7, III.8 et III.9) ci-dessous.

11.1.-mode de rupture des poteaux vides sans et avec connecteurs:



Photo III.7: Mode de rupture des tubes vides sans connecteurs.



Photo III.8: Mode de rupture des tubes vides avec connecteurs en U.



Avant

Après

Photo III.9: Mode de rupture des tubes vides avec connecteurs type goujons .

11.2. Comparaison des résultats d’essais des profils composés vides avec et sans connecteurs :

La comparaison des résultats de charge de rupture enregistrée pour les poteaux courts vides sans et avec renforcement avec des connecteurs de cisaillement (cornières et goujons) réalisé dans cette étude, ont montrée l’influence des connecteurs de cisaillement de type goujons et cornières sur la résistance de ces dernier (figure III.11). La capacité portante des tubes vides et renforcés par des connecteurs de cisaillement de type cornières et goujons d’espacement 100 mm, a augmenté respectivement de 17.28% et 21.09% par rapport aux tubes en acier vides sans connecteurs.

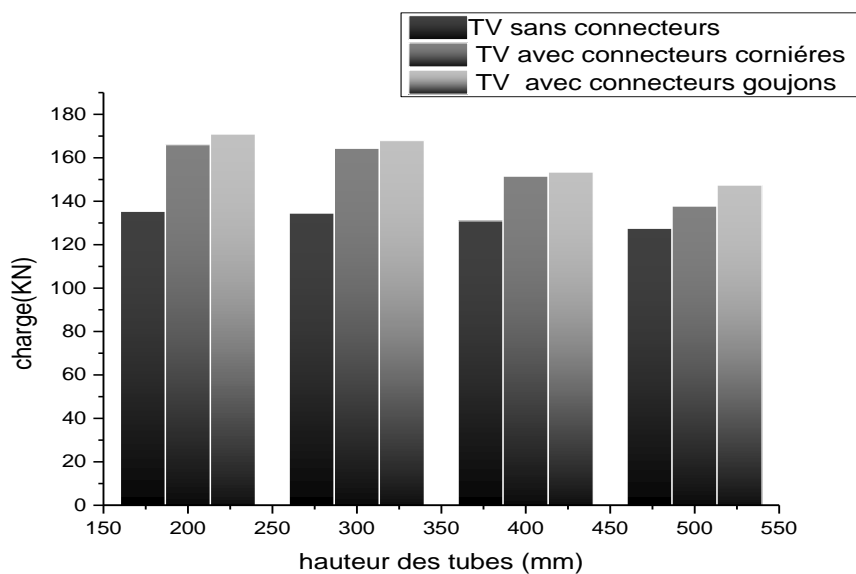


Figure III.11. Charge ultime expérimentale des tubes sans et avec connecteurs.

11.3. Tubes en acier remplis par les deux types des bétons :

Les résultats d'essais des 1^{ère}, 3^{ème} et 4^{ème} séries réalisés à 28 jours après la date du coulage du béton sont présentés sur les figures III.12 et III.13, qui montrent l'avantage des tubes composés acier-béton par rapport à celle vides et ce à travers l'amélioration de la capacité portante, les tubes composés avec des connecteurs cornières et goujons ont montré l'avantage des connecteurs qui ont pour but d'éviter toute désolidarisation du béton ; la capacité portante comparé à celle des tubes remplis sans connecteurs a augmenté, on constate aussi que la capacité portante se diminue avec l'augmentation de la hauteur et que les tubes remplis par le béton de sable ont donné des capacités portante proche à celle des tubes en acier remplis par le béton ordinaire. Ces résultats d'essais sur les tubes en acier laminé à froid et soudé et à parois mince sous charge uni-axiale, ont montré l'avantage de l'utilisation du béton de sable comme élément de bourrage.

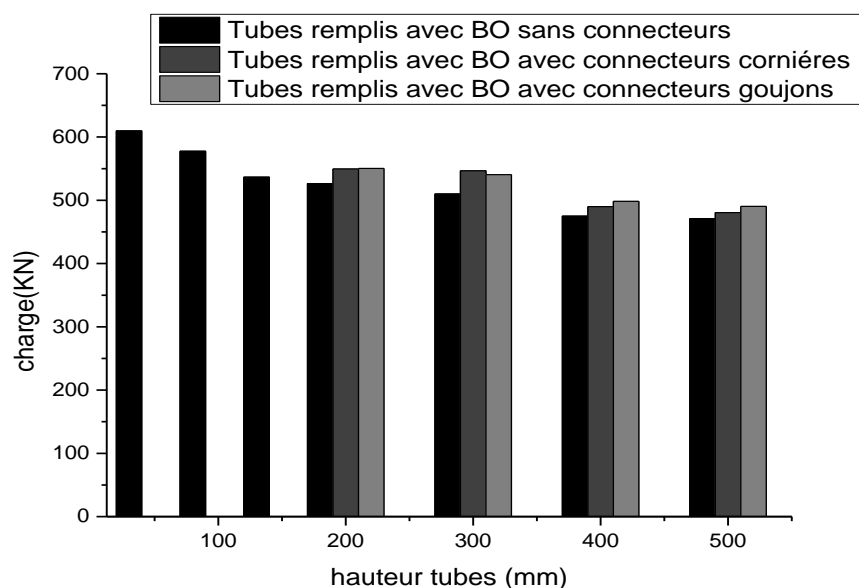


Figure III.12. Charge de rupture expérimentale des tubes remplis par béton ordinaire.

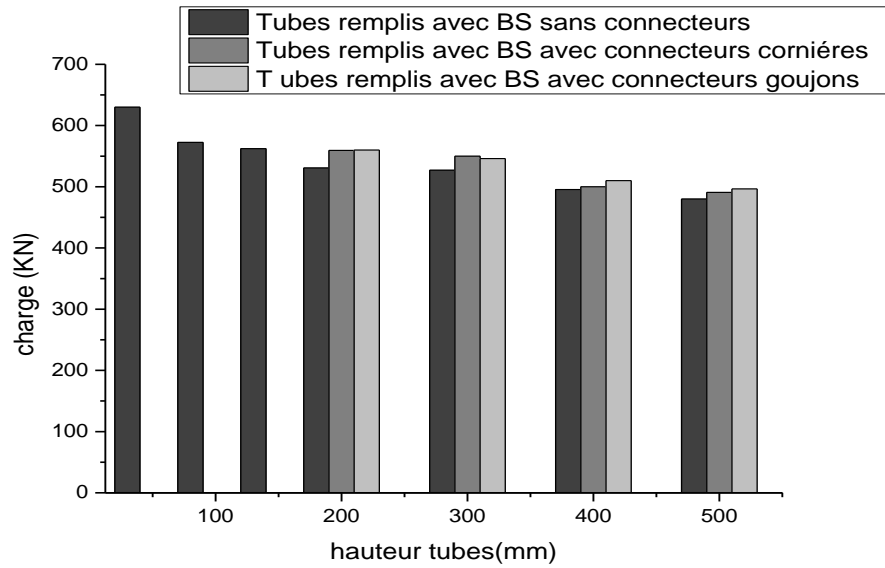


Figure III.13. Charge de rupture expérimentale des tubes remplis par béton de sable.

Les résultats dans les figures III.14, III.15 et III.16 prouvent clairement que la prédiction EC4 prévoit une capacité inférieure (une sous-estimation) et proche à celle trouvée expérimentalement pour les tubes remplis avec le béton ordinaire et le béton de sable sans connecteurs et renforcés avec des connecteurs cornières et goujons, l'erreur de sous-estimation de la charge axiale pour la charge prédite par le EC4 ce qui nous donne une marge sécuritaire de la capacité portante prédite par le EC4, mais il n'assure pas l'économie.

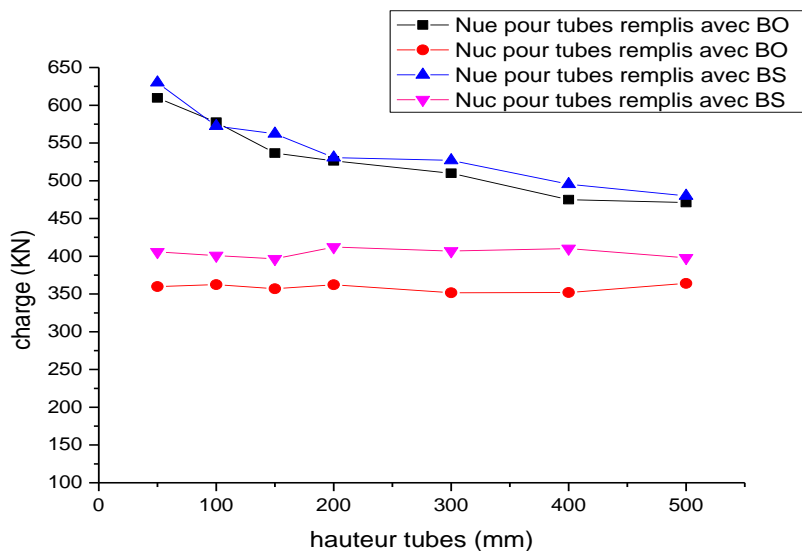


Figure III.14. Charge de rupture expérimentale et selon EC4 des tubes sans connecteurs remplis par béton ordinaire et béton de sable.

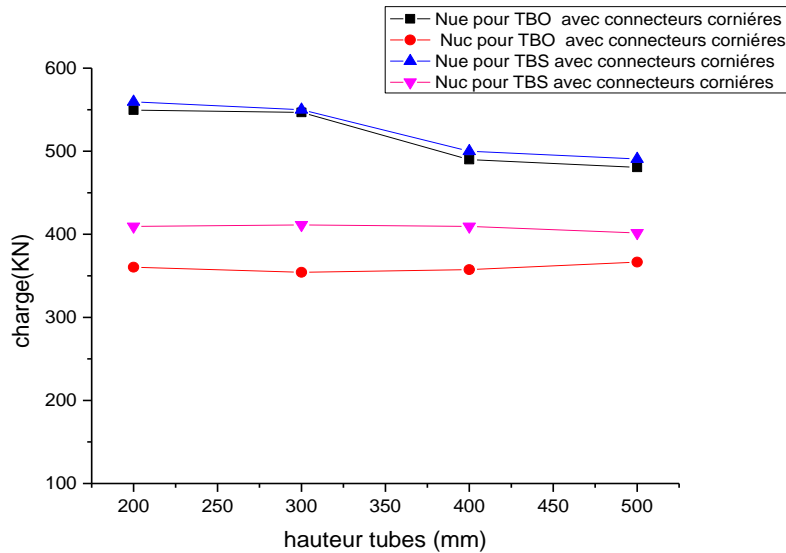


Figure III.15. Charge de rupture expérimentale et selon EC4 des tubes avec connecteurs en U remplis par béton ordinaire et béton de sable.

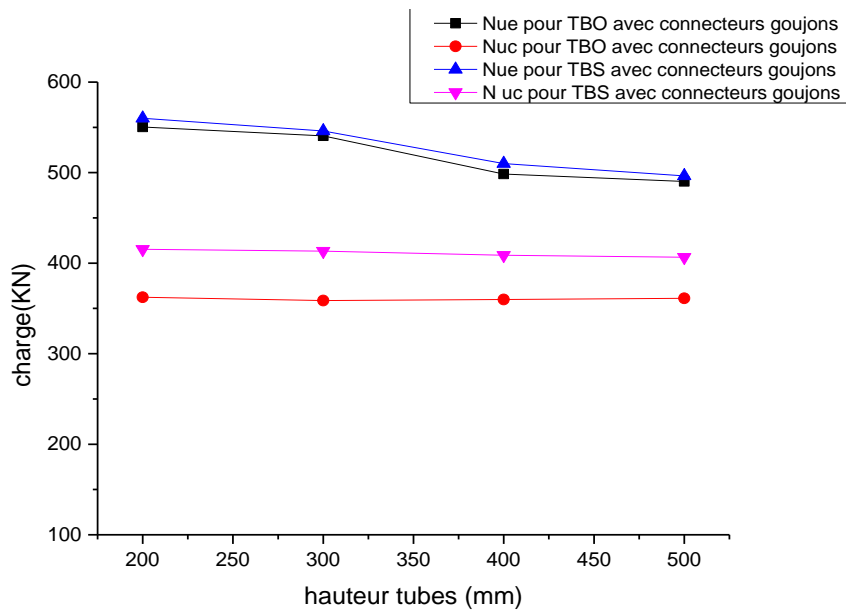


Figure III.16. Charge de rupture expérimentale et selon EC4 des tubes avec connecteurs en goujons remplis par béton ordinaire et béton de sable.

11.4. Comparaison des résultats d'essais des profils composites remplis avec et sans connecteurs :

Les figures ci-dessous montrent le gain de résistance observé pour les colonnes avec connecteurs cornières et goujons par rapport aux colonnes remplis sans connecteurs aussi une comparaison des résultats de charge de rupture enregistrée pour les poteaux courts sans renforcement avec des connecteurs de cisaillement et remplis avec un béton ordinaire et un

béton de sable avec ceux réalisé dans cette étude, ont montrée l'influence des connecteurs de cisaillement de type cornières et goujons sur la résistance de ces dernier (figures III.17,III.18). La capacité portante des tubes remplis par le béton ordinaire BO et béton de sable BS et renforcés par des connecteurs de cisaillement de type cornières et goujons d'espacement 100 mm, a augmenté respectivement de 4.25%et 5%, et de 3.31% et 3.89% par rapport aux tubes en acier sans connecteurs remplis par le BO et BS.

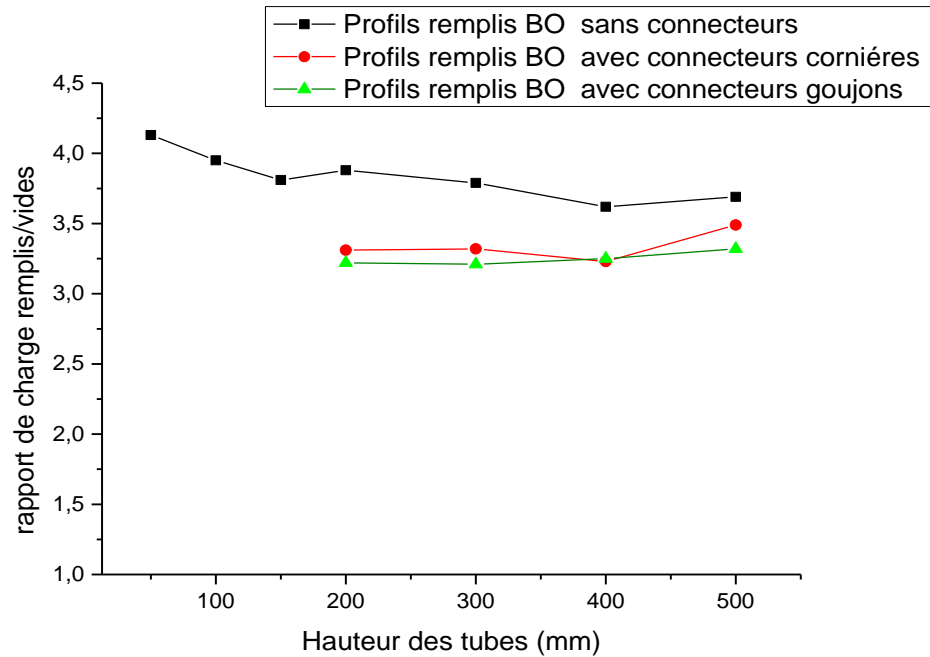


Figure III.17. Gain de résistance des tubes sans connecteur et avec connecteurs remplis avec le béton ordinaire à l'âge de 28 jours.

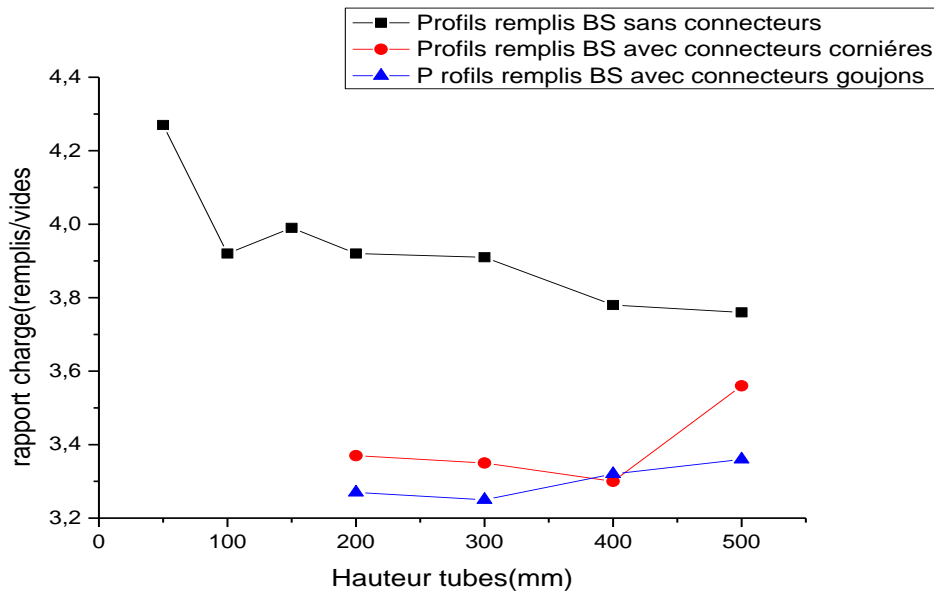


Figure III.18. Gain de résistance des tubes sans connecteur et avec connecteurs remplis avec le béton de sable à l'âge de 28 jours.

11.5. Comparaison des résultats d'essais des profils composés vides et remplis avec et sans connecteurs :

Les figures ci-dessous montrent le gain de résistance observé pour les colonnes remplis sans et avec connecteurs cornières et goujons par rapport aux colonnes vides avec et sans connecteurs aussi une comparaison des résultats de charge de rupture enregistrée pour les poteaux courts sans renforcement et avec des connecteurs de cisaillement vides et remplis avec un béton ordinaire et un béton de sable avec ceux réalisé dans cette étude, ont montrée l'influence de la résistance du béton logé ainsi que la rigidité de la section d'acier jouent un rôle important dans la capacité portante des poteaux mixtes, nous montre l'effet bénéfique d'augmentation de la résistance du béton logé ainsi que la rigidité de la section d'acier sur la charge axiale maximale de compression.

Le remplissage par les différents types de béton (BO et BS) a amélioré le comportement et a augmenté la capacité portante à 28 jours de 2.46% et 1.61% et 1.57% respectivement.

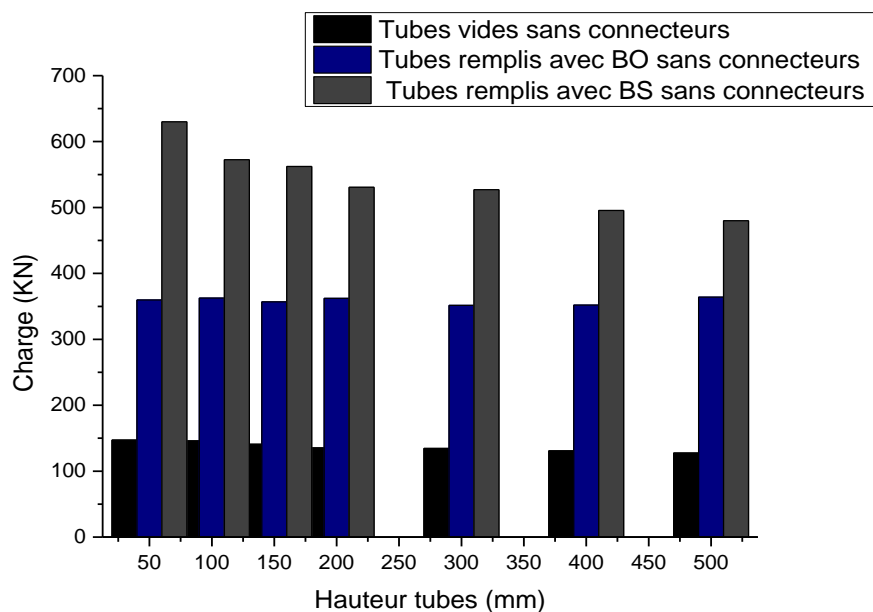


Figure III.19. Charge de rupture expérimentale des tubes vides et remplis avec les deux types de béton sans connecteurs à l'âge de 28 jours.

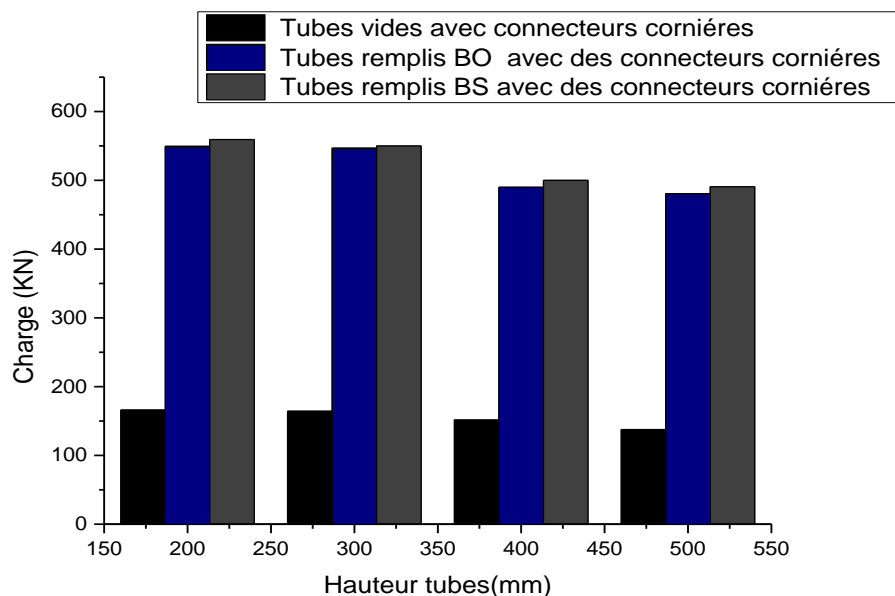


Figure III.20. Charge de rupture expérimentale des tubes vides et remplis avec les deux types de béton avec connecteurs cornières à l'âge de 28 jours.

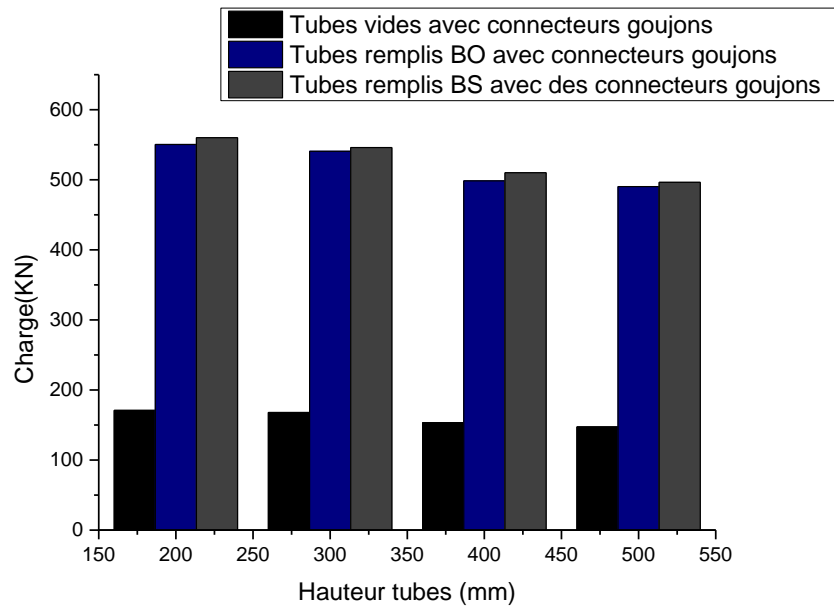


Figure III.21. Charge de rupture expérimentale des tubes vides et remplis avec les deux types de béton avec connecteurs goujons à l'âge de 28 jours.

Les figures ci-dessous illustrent les courbes charge-déplacement pour le tube en acier rempli par les deux types des bétons BO et BSII sans et avec les deux types de connecteurs (cornières U et goujons).

On constate que le déplacement longitudinal des tubes remplis par le béton de sable est proche de celle remplis par le béton ordinaire. Le remplissage des tubes par les différents types des bétons (BO, BS) et leurs résistances a amélioré le comportement et a augmenté la capacité portante.

Les résultats des essais effectués à 28 jours sur les tubes avec des connecteurs cornières et goujons ont montré l'avantage des connecteurs qui sont destinés à empêcher tous désolidarisons du béton par rapport à celui des tubes remplis par les deux types de béton sans connecteurs avec une augmentation de la capacité portante remarqué. Le comportement remarqué de cette série des poteaux est ductile.

La capacité portante des tubes remplis de béton ordinaire et de béton de sable de laitier cristallisé avec des connecteurs de type cornières et goujons à l'âge de 28 jours reste entre 490 KN à 550 KN et 480 KN à 549 KN, 496 KN à 560 KN et 490 KN à 559 KN respectivement comme la montré dans les figures ci-dessous.

Donc le béton ordinaire et le béton de sable qui sont utilisés comme des éléments de bourrage dans les tubes vides, ont minimisé le voilement des parois minces des tubes.

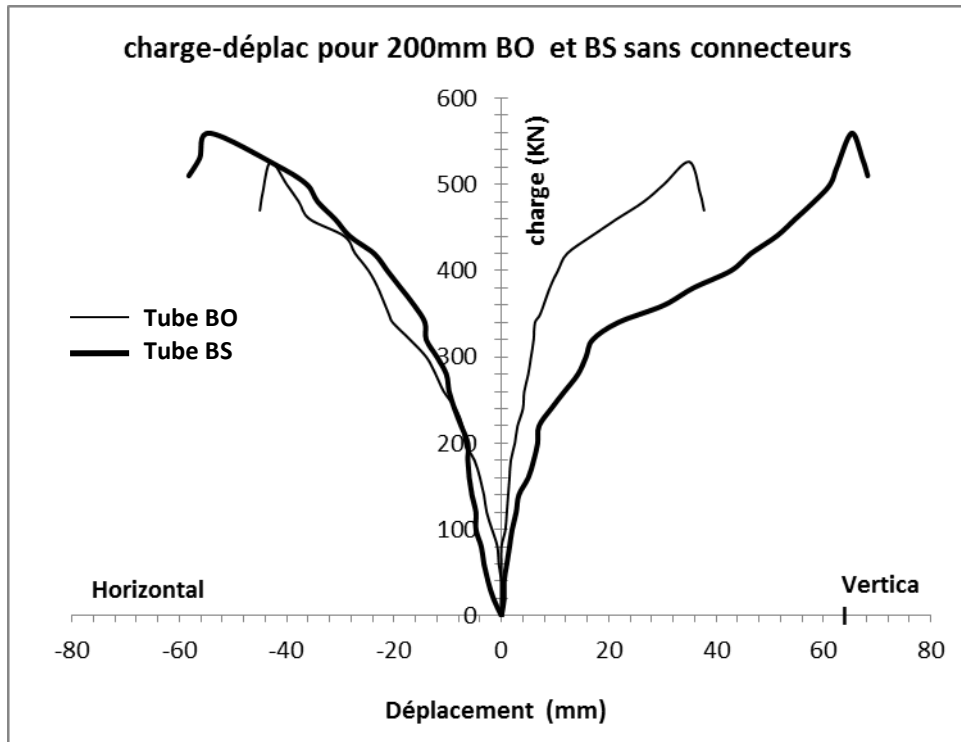


Figure III.22: Courbe charge –déplacement PBO200 PBS200 sans connecteurs .

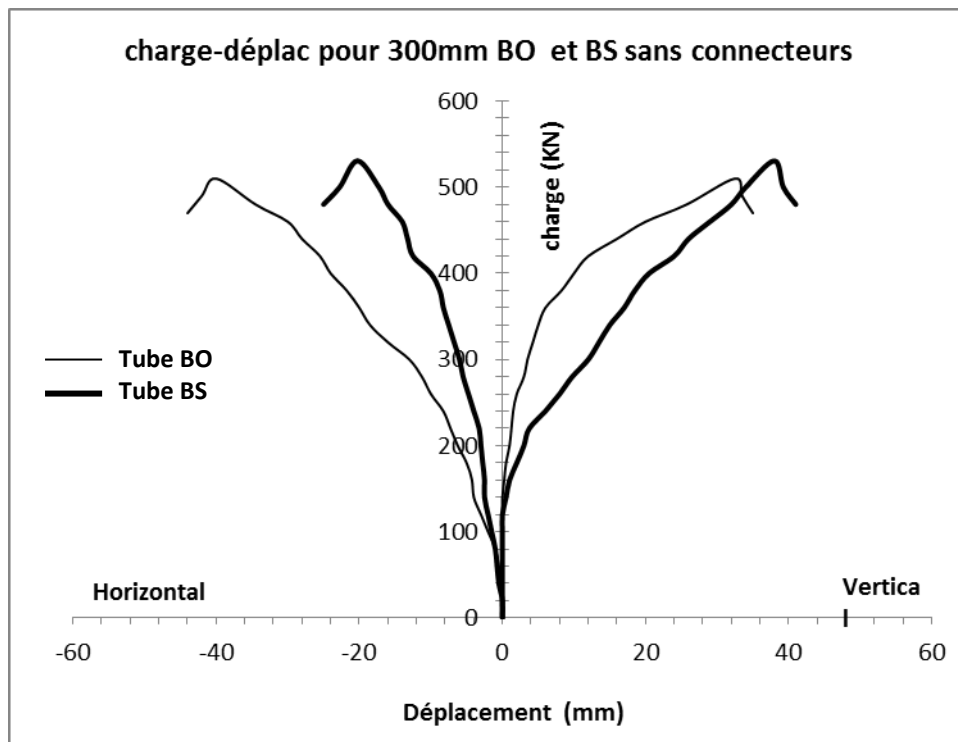


Figure III.23: Courbe charge –déplacement PBO300 et PBS300 sans connecteurs .

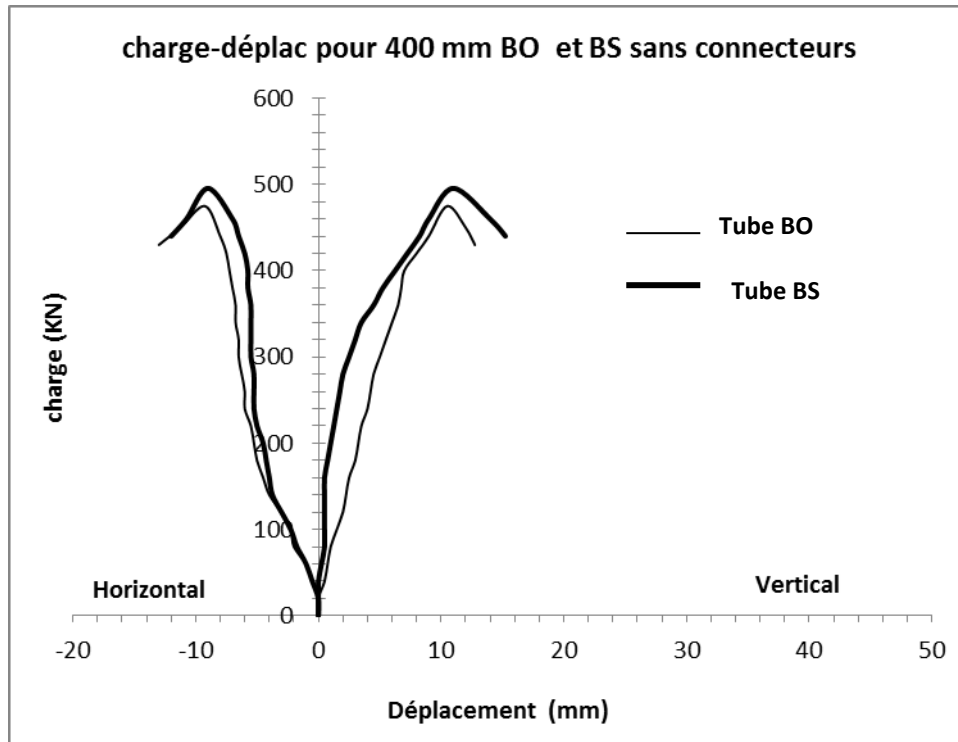


Figure III.24: Courbe charge-déplacement PBO400et PBS400 sans connecteurs .

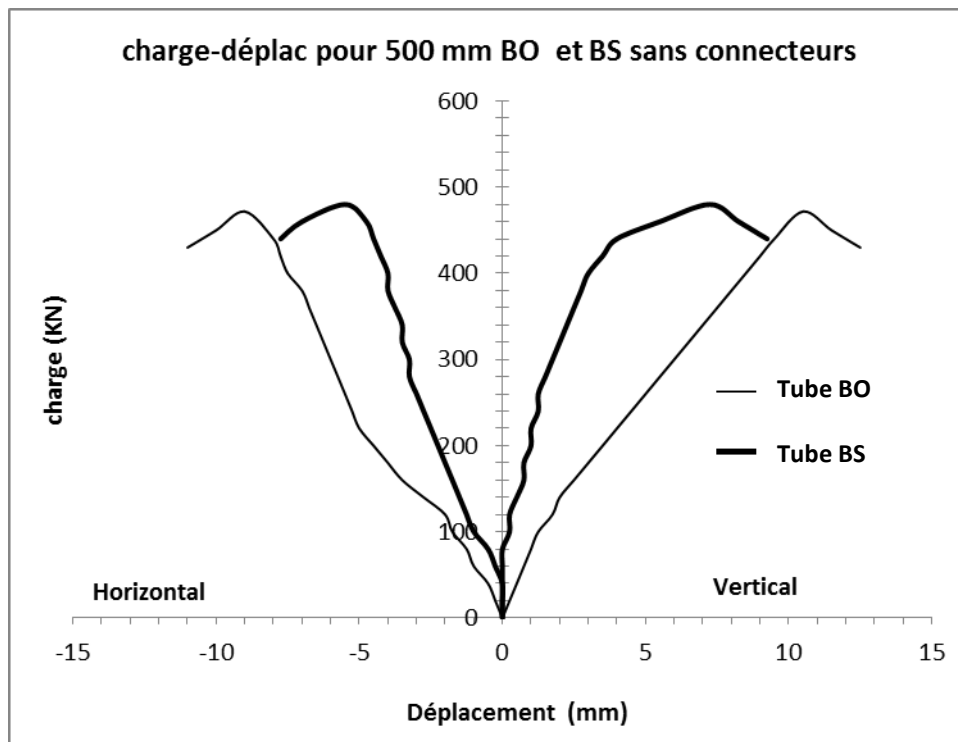


Figure III.25: Courbe charge -déplacement PBO500 et PBS500 sans connecteurs .

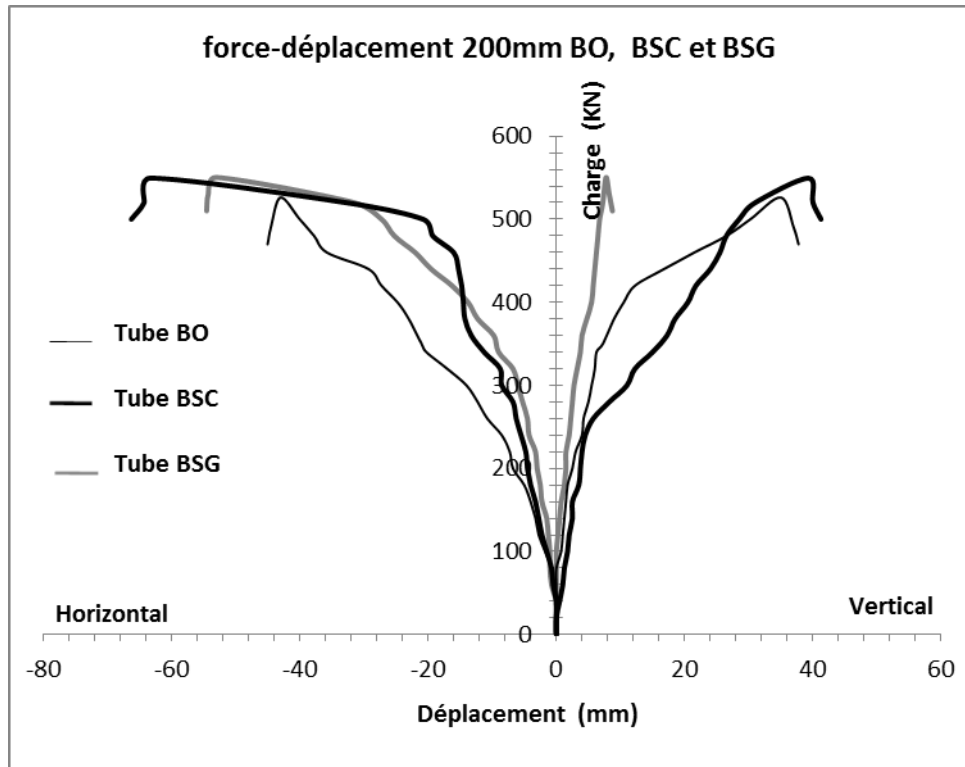


Figure III.26: Courbe charge-déplacement PBO200 et PBSC200et PBSG200.

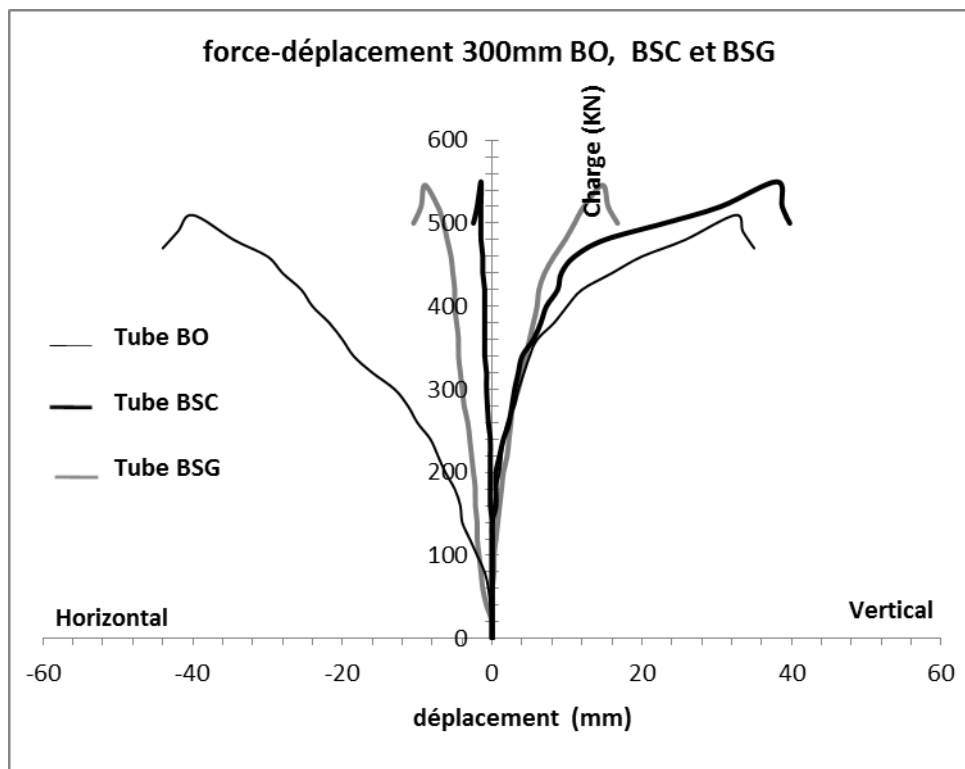


Figure III.27: Courbe charge-déplacement PBO300, PBSC300et PBSG300.

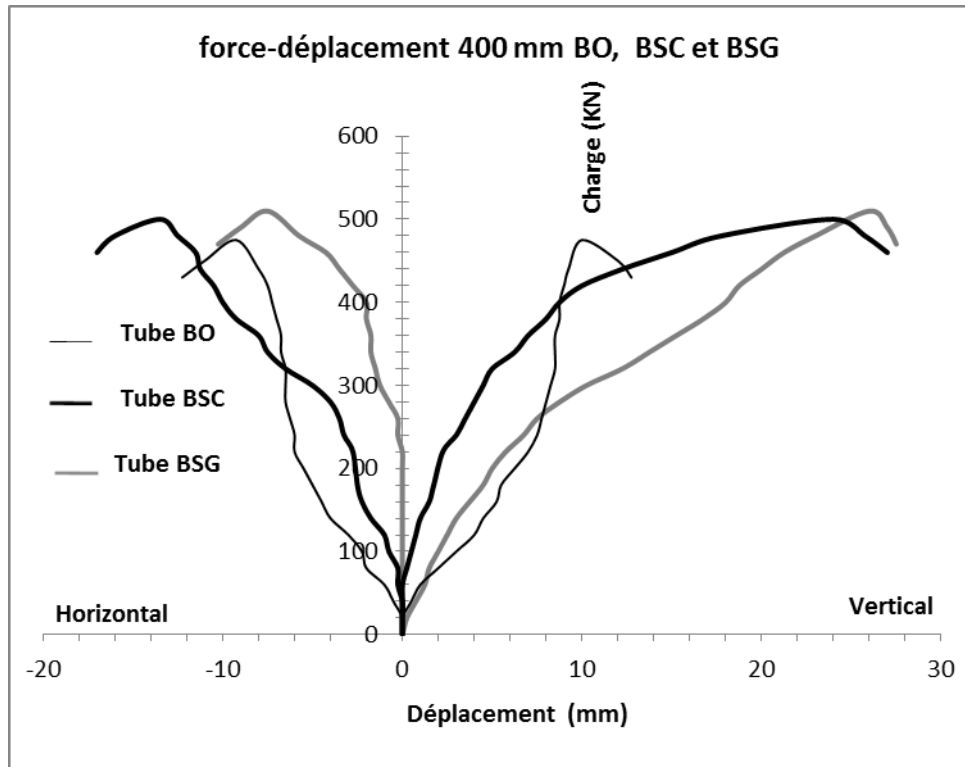


Figure III.28: Courbe charge –déplacement PBO400,PBSC400et PBSG400.

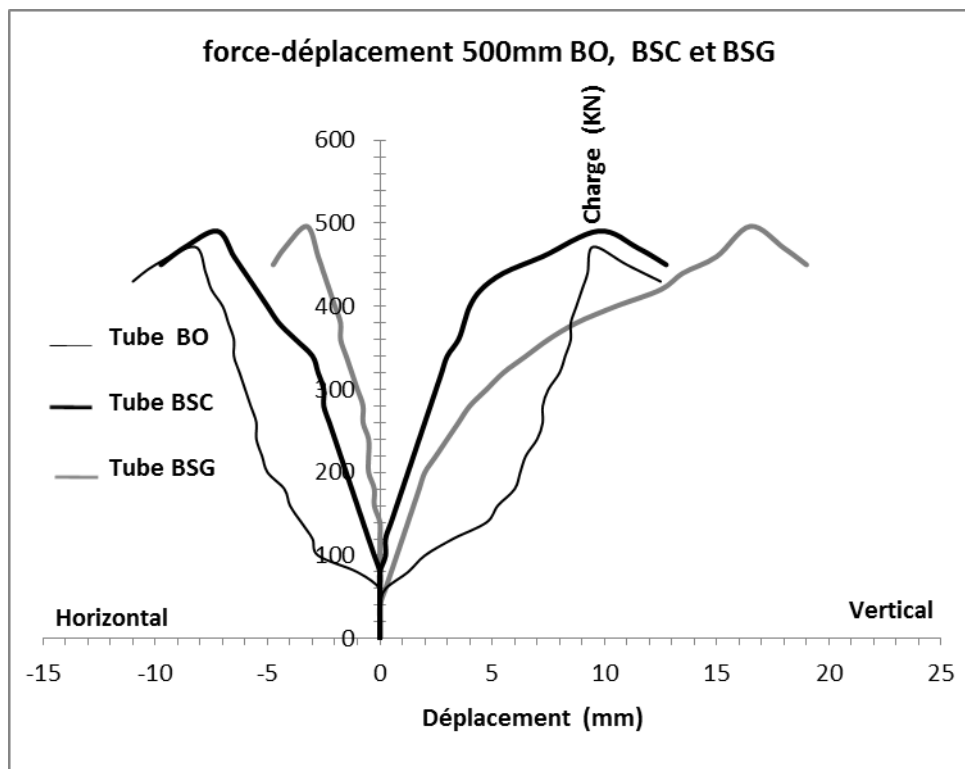


Figure III.29: Courbe force déplacement PBO500, PBSC500 et PBSG500.

12. Mécanisme de rupture des profils remplis de béton :

Le mode de rupture des tubes en aciers à parois mince est un mode par voilement locale. On constate une formation d'une cloque concave et une autre convexe sur les parois et l'écrasement partiel du béton.

Le mode de rupture remarqué dans ce cas n'est pas fragile c'est à dire que le comportement est ductile. Cette ductilité de comportement est due à l'augmentation de l'épaisseur de la section d'acier qui constitue ces poteaux, ainsi que la résistance du béton logé ce qui a augmenté la rigidité et aussi l'utilisation des connecteurs de cisaillement par conséquence amélioré le comportement de ces derniers.

. Les photos (III.10, III.11, III.12, III.13, III.14 et III.15) présentent le mode de rupture des tubes sans connecteurs et avec connecteurs remplis par le béton ordinaire et le béton de sable.

a)-Mode de rupture des poteaux remplis de béton ordinaire sans et avec connecteurs:

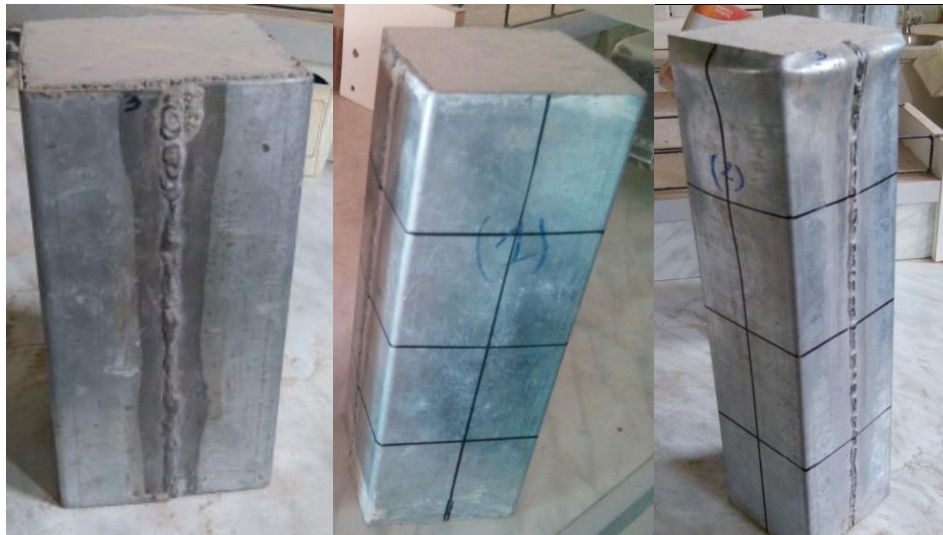


Photo III.10: Mode de rupture des poteaux remplis avec BO sans connecteurs .



Photo III.11: Mode de rupture des poteaux remplis avec BS sans connecteurs .



Photo III.12: Mode de rupture des poteaux remplis avec BO avec connecteurs cornière en U



Photo III.13: Mode de rupture des poteaux remplis avec BS avec connecteurs cornière en U.



Photo III.14: Mode de rupture des poteaux remplis avec BO avec connecteurs goujons .



Photo III.15: Mode de rupture des poteaux remplis avec BS avec connecteurs goujons .

13. Etude comparative entre les poteaux de section transversale carrée et section transversale rectangulaire :

Dans cette partie on va faire une comparaison de la capacité portante pour les tubes de section géométrique carré avec les tubes de section géométrique rectangulaire sous une charge uniaxiale et aussi une comparaison avec les tubes de section rectangulaire soumis à une charge excentrique.

Les tableaux ci-dessous montrent les résultats pour les tubes vides de section transversale rectangulaire 100×70×2 mm sous charge uniaxiale et excentrique comparé par les tubes en acier laminé à froid vides de section transversale carrée 100×100×2mm sous un chargement uni axiale (tableau III.5) , et aussi des résultats des tubes de deux types de section rectangulaire et carrée remplis avec les différents types de bétons BO , BSI, BSII et BSIII sous chargement uni-axiale et excentrique(tableau III.6) .

Tableau III.5. Les résultats expérimentaux pour les tubes carrés et rectangulaires vides.

Forme de section	Spécimen	Hauteur (mm)	H×B×t(mm)	Excentricité (mm)	Nue(KN)
Rectangulaire	V1	300	101.30 × 69.80 × 2.30	0	146
	V2	500	100.10 × 69.70 × 2.20	0	138
	V3	300	99.80 × 70.10 × 2.30	20	132
	V4	500	100.10 × 69.40 × 2.20	20	124
Carrée	TV 300	300	99.20×98.97×2.07	0	134.5
	TV 500	500	99.95×99.73×2.01	0	127.5

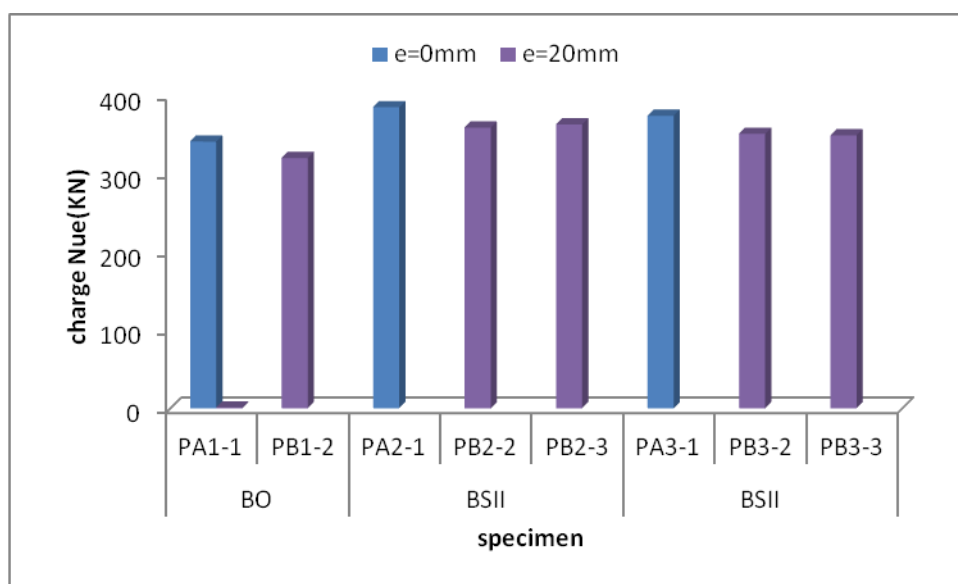
Tableau III.6. Les résultats expérimentaux et calculés des tubes carrés et rectangulaires remplis avec les différents types de bétons.

Forme de section	Type de béton	Spécimen	Hauteur (mm)	H×B×t(mm)	Excentricité (mm)	Nue (KN)	Nuc (KN)	Nuc/Nue
Rectangulaire		PA1-1	300	100.20 × 70.10 × 2.30	0	341	338.23	0.99
	BO	PB1-2	300	99.90 × 68.75 × 2.20	20	320	310.1	0.96
		PA1-3	500	99.50 × 69.10 × 2.20	0	330	323.79	0.98
		PB1-4	500	99.55 × 68.75 × 2.20	20	315	312.30	0.99
Carrée		PBO300	300	98.99×99.52×1.88	0	510	351.6	0.69
		PBO500	500	100.27×99.59×1.97	0	471.1	364.1	0.77
Rectangulaire		PA2-1	300	99.75 × 69.50 × 2.20	0	385	360.05	0.93
	BSI	PB2-2	300	99.62 × 68.06 × 2.20	20	359	353.50	0.98
		PB2-3	300	99.62 × 69.55 × 2.25	20	363	360.30	0.99

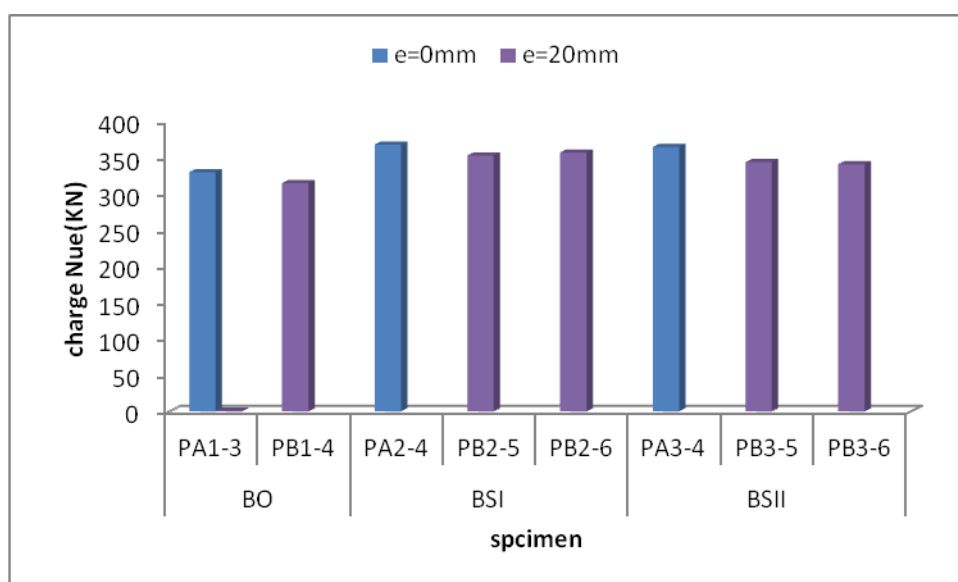
		PA2-4	500	$99.91 \times 69.13 \times 2.30$	0	368	367.07	0.99
		PB2-5	500	$98.58 \times 69.75 \times 2.15$	20	353	342.80	0.97
		PB2-6	500	$99.37 \times 69.10 \times 2.20$	20	357	351.66	0.98
Carrée	BSII	PBS300	300	$99.16 \times 99.32 \times 1.95$	0	527	406.9	0.77
		PBS500	500	$96.97 \times 99.24 \times 1.93$	0	480	397.8	0.83
Rectangulaire		PA3-1	300	$99.72 \times 68.50 \times 2.30$	0	374	343.10	0.91
		BSIII						
		PB3-2	300	$99.82 \times 69.55 \times 2.20$	20	351	353.40	1.01
		PB3-3	300	$98.37 \times 69.10 \times 2.20$	20	349	351.73	1.01
		PA3-4	500	$100.50 \times 68.55 \times 2.30$	0	365	345.30	1.00
		PB3-5	500	$100.63 \times 68.75 \times 2.30$	20	344	333.85	0.97
		PB3-6	500	$100.63 \times 68.75 \times 2.30$	20	341	314.80	0.92

Les résultats d'essais sur les tubes remplis avec les bétons de sable de laitier (BSI et BSII et BSIII), réalisés à 28 jours après la date du coulage du béton ont montré l'avantage de ces types des bétons comme des éléments de bourrage par rapport au béton ordinaire (BO) pour les deux types des tubes avec des sections transversales différentes (rectangulaires et carrés). en procédant à la comparaison des essais sous type de chargement, on constate que Les charges de rupture sous charge uni-axiale des tubes composés sont supérieures aux charges composées correspondants a une charge excentrique ($e=0$), pour les 3 types des bétons de remplissage, comme le montre la figure III.30. et aussi on constate que les tubes soumis à une charge uni-axiale et de hauteur 300mm, remplis par les bétons de sable de laitier BSI et BSIII, donne une charge ultime respectivement supérieure de 11.43% et 08.82% par rapport à un béton ordinaire(BO). Et pour les tubes de 500 mm remplis de béton de sable de laitier BSI et BSIII à une augmentation de la charge ultime respectivement de 10.33% et 9.59% par rapport au tube rempli par un béton ordinaire(BO). Ces résultats d'essais sur les tubes en acier laminé à froid et soudé et à parois mince sous charge uni-axiale, ont montré l'avantage de l'utilisation des bétons de sable de laitier comme élément de bourrage. Aussi La hauteur du tube composé a un effet considérable sur la capacité portante, on remarque la capacité portante diminue avec l'augmentation de la hauteur du tube soumis à une charge uni-axiale quel que soit le type de béton de remplissage.

La figure III.30 présente la charge ultime expérimentale des tubes composés sous chargement excentrique ($e=20\text{mm}$). La charge ultime pour les tubes de hauteur 300 mm rempli par les bétons de sable BSI et BSII a eu une augmentation respectivement de l'ordre de 11.36% et 8.57% par rapport au tube rempli par BO, et pour tube hauteur 500 est de l'ordre de 11.36% et 08.03%.



a) hauteur 300 mm



b) hauteur 500 mm

Figure. III.30 : Influence de l'excentricité de charge (e=0, e=20mm)

Dans la figure III.31 ci-dessous on remarque qu'il y a un effet de type de la section transversale pour les tubes de section carrée qui nous a donné une capacité portante plus élevée que les tubes avec une section rectangulaire.

Une augmentation de 49.56% et 42.75% pour les tubes de section carrée remplis avec le BO par rapport aux tubes de section rectangulaire pour les deux hauteurs 300mm et 500 mm respectivement ; et de 36.88% et 40.90% pour les tubes carrés remplis avec BSII par rapport aux tubes rectangulaires remplis par BSI et BSIII d'hauteur 300mm et de 30.43% et 23.95% pour les tubes carrés remplis avec BSII par rapport aux tubes rectangulaires remplis avec BSI et BSIII d'hauteur 500mm.

Les résultats ont montré l'avantage de ces types des bétons comme des éléments de bourrage par rapport au béton ordinaire (BO) pour les deux types des tubes avec des sections transversales différentes (rectangulaires et carrés).

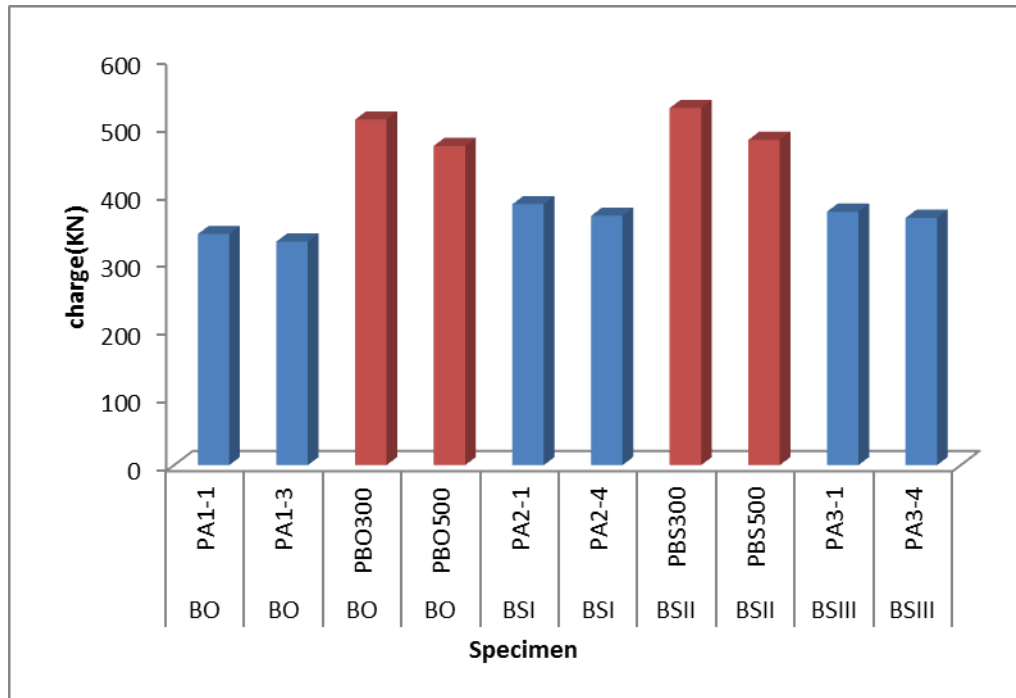


Figure. III.31 : Influence de type de section transversale (rectangulaire et carré).

la figure III.32 prouve clairement que l'EC4 prévoit une sous-estimation de la capacité portante de 0.7% et 5% pour les tubes rectangulaires remplis de béton ordinaire sous charge uni-axiale d'hauteurs 300mm et 500mm, et de 31.05% et 22.71% pour les tubes carrés remplis avec BO et de 22.78% et 17.12% pour les tubes carrés remplis avec BSII de la hauteur 300mm et 500mm respectivement, et aussi de 7% et de 9% respectivement pour les tubes rectangulaires de la hauteur 300mm et de 0.2% et 5.39% respectivement pour les tubes rectangulaires de la hauteur 500mm remplis par le béton de sable de laitier BSI et BSIII. L'Euro code 4 donne une bonne concordance des résultats pour les tubes creux rectangulaires remplis avec BO et BSI pour les hauteurs 300mm et 500mm (des valeurs on les peut même négliger 0.7% et 0.2%) et nous donne une sous-estimation pour les autres tubes remplis par les quatre types de béton, et soumis à une charge centrique. La capacité portante des poteaux mixte prédite par le règlement euro code 4 est à côté de sécurité

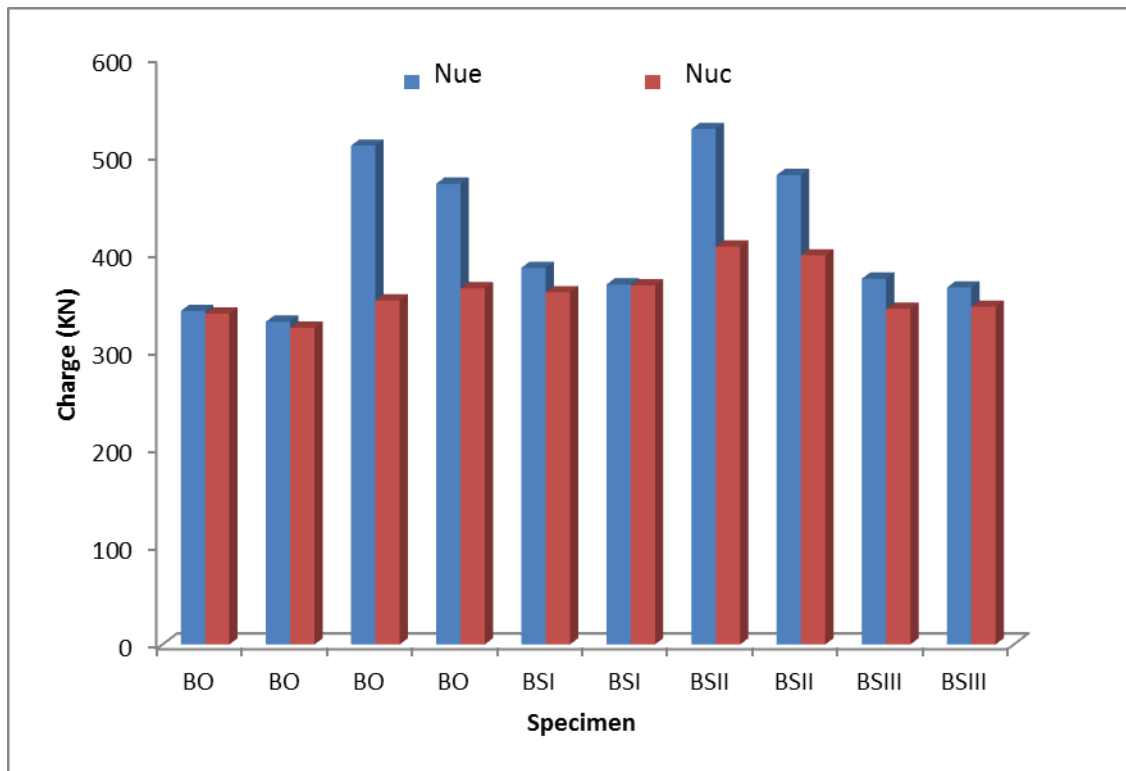


Figure. III.32 : Charge expérimentale Nue et la charge Nuc pour les tubes (carrés et rectangulaires) hauteur 300 mm et 500mm (e=0).

14. Conclusion

Cette étude a mis en évidence le comportement uni axial des tubes carrés et rectangulaires en acier laminé à froid et soudé à parois mince remplis de quatre types de bétons : béton ordinaire désigné par BO, béton de sable de laitier contenant 100 % de sable de laitier cristallisé avec un dosage en filler plus élevé (200kg/m^3), désigné par BSI. Béton de sable de laitier contenant 100% de sable de laitier cristallisé avec un dosage en filler plus faible (78Kg/m^3) et en utilisant de super plastifiant, désigné par BSII et béton de sable de laitier ou la substitution du sable naturel a été partiel par le laitier cristallisé, désigné par BSIII. Par l'analyse des résultats obtenus, on peut souligner les points suivants:

- Les profilés vides en acier laminé à froid soumis à la compression axial sont très sensible à l'imperfection initiale et influe sévèrement sur le comportement et la capacité portante des échantillons en acier. Bien que les charges ont été appliquées axialement, théoriquement, les tube devraient rester tout droit jusqu'à la rupture ce n'était pas le cas au début de l'essai, une certaine courbure a eu lieu pendant que les plats de chargement fonctionnaient. Ceci est suivi

par une combinaison du cisaillement à partir du contacte tube plateau de la machine et pliage locale dans la zone de voilement. Les résultats d'un tel état complexe d'équilibre ont produit une rupture prématurée, menant à une charge d'essai inférieure à la charge théorique plastique pour les tubes vides.

- Le mode de rupture pour les profilés vides est un mode de voilement local avec déformation de l'acier des parois minces vers l'extérieur et vers l'intérieur.

- Les charges données par l'EC3 pour les profilés vides donnent une capacité portante supérieure de 19.08% pour les tubes vides sans connecteurs et de 5.23% ,3.12% pour les tubes vides avec des connecteurs cornières et goujons respectivement par rapport aux résultats obtenus en essais.

- Le remplissage des tubes en aciers laminé à froid, par les différents types des bétons BO (béton ordinaire), et BSI, BSII, BSIII (béton de sable) cela est présenté dans les valeurs du rapport de la charge de rupture expérimentale (remplis/vide) à 28 jours pour le béton ordinaire se varie entre 3.70 et 4.14 et de 3.77et 4.27 pour les tubes remplis de béton de sable et aussi a amélioré le comportement et a augmenté la capacité portante par rapport aux tubes en acier vide.

- Le remplissage par les différents types de béton (BO et BS) a amélioré le comportement et a augmenté la capacité portante à 28 jours de 2.46% et 1.61% et 1.57% respectivement pour les tubes sans et avec les deux types de connecteurs de cisaillement.

-La capacité portante des tubes remplis par le béton ordinaire BO et béton de sable BS et renforcés par des connecteurs de cisaillement de type cornières et goujons d'espacement 100 mm, a augmenté respectivement de 4.25%et 5%, et de 3.31% et 3.89% par rapport aux tubes en acier sans connecteurs remplis par le BO et BS.

- La capacité portante est inversement proportionnelle à l'élancement des poteaux comme trouvé précédemment dans d'autres recherches[65,66,67] .

- l'EC4 prévoie une capacité inférieure et dans certains cas proche à celle trouvé expérimentalement pour les tubes remplis avec le béton ordinaire et le béton de sable sans

connecteurs et renforcés avec des connecteurs cornières et goujons, L'EC 4 dans ce cas la donne une marge sécuritaire de résistance importante.

Pour l'étude comparative on a conclu les conclusions suivantes :

- La capacité portante des tubes carrés est supérieure à celle des tubes rectangulaires alors la forme géométrique de la section transversale a un effet sur la capacité portante.
- l'excentrement de la charge a un effet important sur la diminution de la capacité portante des tubes remplis par les trois types des bétons BO, BSI, BSII.
- Le mode de rupture pour les tubes composés dans le cas des quatre types de béton est un mode de voilement local avec déformation des parois de l'acier vers l'extérieur ou vers l'intérieur, et l'éclatement de la soudure au niveau de formation de voilement local.
- L'EC4 prévoit une sous-estimation de la charge axiale ce qui nous donne une marge sécuritaire de la capacité portante prédite par ce règlement, ce qui nous permet de dire que le critère de l'économie n'est pas respecté dans ce cas.

Concluions générales

Cette étude a rapporté une série d'essais sur des tubes creux en acier laminé à froid et soudé, à parois mince de section reconstitué forme carré et rectangulaire , remplis par quatre types de bétons, un béton ordinaire désigné par BO , un béton de sable de laitier ou le sable naturel a été substituer totalement par le sable de laitier cristallisé et désigné par BSI et BSII , et un béton de sable de laitier ou le sable naturel a été substitué partiellement par un sable de laitier cristallisé désigné par BSIII.

L'objectif de cette série d'essais est d'évaluer le comportement des tubes remplis par un béton de sable de laitier.

Des essais physiques et mécaniques ont été effectués sur les bétons de sable de laitier de remplissage. Basé sur les résultats de l'étude, les observations peuvent être tirées :

- La substitution totale ou partielle du sable naturel par le sable de laitier cristallisé, permet l'amélioration de la résistance en traction par fendage, le béton de sable de laitier avec l'ajout des fillers nous donne une compacité élevée. Cela est identique aux résultats trouvé par d'autres chercheurs [63] et aussi l'utilisation de l'adjuvant à améliorer la résistance.
- La substitution totale ou partielle du sable naturel par le sable de laitier cristallisé BSI et BSIII donne des résistants légèrement inférieur à celle-là de béton ordinaire, par contre la résistance de compression de béton de sable de laitier trouvé par d'autre chercheur [63] a donné de bonne résistance. Mais ce n'est pas le cas pour le béton de sable BSII.

- Les valeurs de l'absorption d'eau par capillarité et par immersion totale de béton de sable de laitier à une valeur proche à celle du béton ordinaire.
- Les pertes de poids pour les bétons de sables à base du filler de laitier vitrifié sont plus faibles que le béton ordinaire, Ceci s'explique par le fait qu'une partie de l'eau de gâchage est combinée chimiquement avec les fines de laitier et participe aux réactions d'hydratation. Ces résultats ont été confirmés par d'autre chercheur.
- Le retrait hydraulique des bétons de sable avec fort dosage en filler de laitier cristallisé ($200\text{kg}/\text{m}^3$) sont légèrement supérieure qu'au retrait du béton ordinaire et on peut conclure il est proche aux limites des valeurs courantes du béton ordinaire. Ce qui été le cas des résultats trouvé par d'autre chercheur, ceci peut être expliqué par la forte compacité obtenue pour ces bétons de sable.

L'examen des résultats obtenus à partir des essais effectués sur des tubes creux remplis par quatre types des bétons, permet de conclure :

- l'utilisation de béton de sable de laitier comme élément de bourrage dans des tubes en acier laminé à froid, à parois mince a amélioré leurs comportements et leurs capacités portantes pour les différents élancements utilisés.
- Le remplissage par les différents types de béton (BO et BS) a amélioré le comportement et a augmenté la capacité portante à 28 jours de 2.46% et 1.61% et 1.57% respectivement pour les tubes sans et avec les deux types de connecteurs de cisaillement.
- Le remplissage des tubes en aciers laminé à froid, par les différents types des bétons BO (béton ordinaire), et BSI, BSII, BSIII (béton de sable) améliore la capacité portante des tubes vides avec un moyen de gain de charge de 40%.
- La charge est inversement proportionnelle à l'excentrement de charge.
- Le problème des tubes composés à parois mince c'est le voilement des parois, ce qui est constaté dans cette étude, mais l'utilisation de béton de sable de laitier comme moyenne de remplissage des tubes retarde et minimise ce voilement (c'est-à-dire diminution de déplacement due au cloquage), donc on peut dire qu'il est très intéressant d'utilisé ce type de béton comme noyau de remplissage des tubes vides.
- Les charges données par l'EC3 pour les profilés vides donnent une capacité portante supérieure de 19.08% pour les tubes vides sans connecteurs et de 5.23% ,3.12% pour les tubes vides avec des connecteurs cornières et goujons respectivement par rapport

aux résultats obtenus en essais. Cette surestimation de capacité portante donnée par le règlement EC3 est due essentiellement aux effets des contraintes résiduelles et à la soudure qui n'est pas prise en compte par le règlement dans l'estimation de la capacité portante.

- l'EC4 prévoit une capacité inférieure et dans certains cas proche à celle trouvée expérimentalement pour les tubes remplis avec le béton ordinaire et le béton de sable sans connecteurs et renforcés avec des connecteurs cornières et goujons, L'EC 4 dans ce cas la donne une marge sécuritaire de résistance importante. Cette sous-estimation de la capacité portante est due au règlement européen EC4 utilise des coefficients de sécurité dans l'estimation de la capacité portante pour prendre en compte l'effet des défauts géométriques est éviter toute surprise d'erreurs de fabrication. Ce qui ne pas la cas dans le cas réel des poteaux .

Références Bibliographiques

- [1] **J F Hajjar**, Concrete-filled steel tube columns under earthquake loads, *Prog. Struct. Engng Mater*, 2: 72–81, (2000)
- [2] **L-H-Han**, tests on stub of concrete filled RHS sections, *Journal of Constructional Steel Research* 58 (2002) 353–372.
- [3] **M. Hilmi Acar**, Viscoelastic Behaviour of Composite Piles Used in the Construction of Quays, *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 26, pp 419 – 427, (2002).
- [4] **Hsuan-Teh Hu**, Numerical Analysis of Concrete-Filled STEEL Tubes Subjected to Axial Force, (Review 2002)
- [5] **Lin-Hai Han et al**, « An experimental study and calculation on fire resistance of concrete filled SHS and RHS columns », *Journal of Constructional Steel Research* 59 (2003) 427–452
- [6] **Lin-Hai Han, Gue-Huang Yao**, “influence of concrete compaction on the strength of concrete filled steel RHS columns”, *Journal of Constructional Steel Research* 59 (2003) 751–767
- [7] **Kefeng Tan**, Mechanical Properties of High Strength Concrete Filled Steel Tubular Columns: Part 1 - Concentrically Loaded, *ACI Journal*, (2002)
- [8] **Julia Marson**, Cyclic Testing of Concrete-Filled Circular Steel Bridge Piers having Encased Fixed-Based Detail, *Journal of Bridge Engineering* © ASCE / (2004)
- [9] **Lin –Hai Han ET Guo-Huang Yao**, « Experimental behavior of thin walled hollow structural steel (HSS) columns filled with self-consolidating concrete (SCC), *Thin-Walled Structures* 42 (2004) 1357–1377
- [10] **Cheng Xiao-dong**, Three-dimensional nonlinear analysis of creep in concrete filled steel tube columns, *Journal of Zhejiang University Science*, pp 826-835, (2005)
- [11] **Z. Bassam**, Enhancing Filled-tube Properties by Using Fiber Polymers in Filling Matrix, *Journal of Applied Sciences* 5 (2): 232-235, (2005)

- [12] **Lin-Hai Han et al** , « Tests and calculations for hollow structural steel(HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC) », Journal of Constructional Steel Research 61 (2005) 1241–1269
- [13] **Lin-Hai Han et al** , « hydration and shrinkage of HSS columns filled with self consolidating concrete »,2005.
- [14] **Lin-Hai Han et al** , « cyclic behavior of self consolidating concrete (SCC) filled HSS columns”,2005.
- [15] **Chen Heng-zhi**, Numerical analysis of ultimate strength of concrete filled steel tubular arch bridges, Journal of Zhejiang University Science, pp 859-868, (2005)
- [16] **J.Zeghiche and K.Chaoui** , Experimental behaviour of concrete-filled steel tubular columns, Journal of constructional steel research, N°61, 2005, pp53-66
- [17] **Muhammad Nasseem Baig et al**, “strength of concrete filled steel tubular columns”, décembre2006, volume11, number 6
- [18] **S.Ramana Gopal,P-Devdas Manoharan**, « Experimental behaviour of eccentrically loaded slender circular hollow steel columns in filled with fibre reinforced concrete », Journal of constructional steel research 62(2006)513-520
- [19] **D.J. Chaudhary, Vishal C. Shelare** , Seismic Analysis of Concrete Filled Steel Tube Composite Bow- String Arch Bridge Advances in Bridge Engineering, March 24 - 25, (2006)
- [20] **Zhi-wu Yua et al**. Experimental behaviour of circular concrete-filled steel tube stub columns. Journal of Constructional Steel Research 63 (2007) 165–174
- [21] **P.K. Gupta**. « Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads ». Journal of Constructional Steel Research 63 (2007) 182–193
- [22] **J. Zeghiche et N. Ferhoune**, Experimental behaviour of concrete-filled thin welded steel stubs axially loaded cases, 6th International conference steel and aluminium structures ICSAS’07,

- Oxford Brookes University, (2006)
- [23] **M.Mouli,H.Khelafi** , “strength of short composite rectangular hollow section filled lightweight aggregate concrete”, *Engineering Structures* 29 (2007) 1791–1797
- [24] **Qing Yu et al** « Experimental behavior of high performance concrete filled steel tubular columns », *Thin walled structures* 46(2008)362-370
- [25] **George D. Hatzigeorgiou**, 'Numerical model for the behaviour and capacity of circular CFT columns, Part II: Verification and extension', *Engineering Structures*, Volume 30, Issue 6, Pages 1579-1589, (2008)
- [26] **Walter Luiz Andrade de Oliveira et al.** « Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns ». *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009) 2103_2110
- [27] **Manojkumar V. Chitawadagi**, ' Axial strength of circular concrete-filled steel tube columns, DOE approach', *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 66, Issue 10, p 1248-1260, (2010).
- [28] **Meichun Zhu et al**, « Experimental research on square steel tubular columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete under axial load », *Engineering Structures* 32 (2010) 2278-2286
- [29] **Ehab Ellobody , Mariam F. Ghazy**, « Experimental investigation of eccentrically loaded fibre reinforced concrete-filled stainless steel tubular columns », *Journal of Constructional Steel Research* 76 (2012) 167–176.
- [30] **Bo Wu et al**, « Cyclic behavior of thin-walled square steel tubular columns filled with demolished concrete lumps and fresh concrete », *Journal of Constructional Steel Research* 77 (2012) 69–81
- [31] **Mohamed Mahmoud El-Hewity** , « On the performance of circular concrete-filled high strength steel columns under axial loading », *Alexandria Engineering Journal* (2012) 51, 109–119.

- [32] **You-Fu Yang et Guo-LiangMa**, « Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube stub columns and beams », *Thin-Walled Structures* 66 (2013) 62–75
- [33] **J.M. Portolés a, E. Serra b, M.L. Romero**, « Influence of ultra-high strength infill in slender concrete-filled steel tubular columns », *Journal of Constructional Steel Research* 86 (2013) 107–114.
- [34] **Wei-Hua Wang et al**, « Behavior of concrete-filled steel tubular stub columns and beams using dune sand as part of fine aggregate » *Construction and Building Materials* 51 (2014) 352–363.
- [35] **Noureddine Ferhoune**, « Experimental behaviour of cold-formed steel welded tube filled with concrete made of crushed crystallized slag subjected to eccentric load » *Thin WalledStructures*80(2014)159–166.
- [36] **Huu-Tai Thai et al**, « Numerical modelling of concrete-filled steel box columns incorporating high strength materials » *Journal of Constructional Steel Research* 102 (2014) 256–265.
- [37] **YuanlongYang et al**, « Effect of reinforcement stiffeners on square concrete-filled steel tubular columns subjected to axial compressive load » *Thin-WalledStructures*82(2014)132–144.
- [38] **Peng Feng et al**, « Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete core subjected to axial compression » *Composite Structures* 123 (2015) 312–324.
- [39] **A. Espinos et al**, « Circular and square slender concrete-filled tubular columns under large eccentricities and fire » *Journal of Constructional Steel Research* 110 (2015) 90–100.
- [40] **Yuyin Wanget al** , « Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns » *Engineering Structures* 86 (2015) 192–212
- [41] **Y.L. Li et al** , « Tests on seawater and sea sand concrete-filled CFRP,BFRP and stainless steel tubular stub columns » *Thin-WalledStructures*108(2016)163–184
- [42] **NA422**, ciment, composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- [43] **Behim.M**, « sous-produits industriels et développement durable ; réactivité, rôle et durabilité des laitiers d’EL HADJAR dans les matériaux à matrice cimentaire », thèse de doctorat d’état en cotutelle Université d’Annaba –INSA de Toulouse, France, 2005.
- [44] **NF P18-560**, Granulats, analyse granulométrique par tamisage, AFNOR, Paris, 1990.
- [45] **NF P18-554**, Granulats - Mesure de la densité, de la porosité, du coefficient d’absorption et de la teneur en eau des gravillons et des cailloux, AFNOR, Paris, 1990.

- [46] **NF P18-573**, Agrégats – Essai de Los Angeles, AFNOR, Paris, 1990.
- [47] **NFEN934-2**, Adjuvants pour le béton, le mortier et le coulis, Partie 2: Additions, définitions, exigences, confirmation, marquage et étiquetage du béton. AFNOR, Paris, 2012.
- [48] **NF P 18-404**, Bétons, essais d’aptitude et de contrôle, fabrication et conservation de spécimens, AFNOR, Paris, 1981.
- [49] **Georges Dreux et Jean Festa**, « Nouveau guide du béton et de ses constituants ». Huitième édition, Eyrolles, France, 1999
- [50] **SABLOCRETE**, Projet national de recherche / développement. BETON DE SABLE. édition presses de l’école nationale des ponts et chaussées, 1998
- [51] **AFNOR**. béton et constituants du béton. tome 1 et 2 AFNOR 4^{ème} édition, 1995
- [52] **AFNOR**. béton et constituants de béton (méthodes d’essai du béton). Tome 2 AFNOR 5^{ème} édition, 2002
- [53] **B. ILHAM AGUIDA**. Béton de sable, composition optimale et effet hygrothermique sur sa résistance à la compression. Mémoire de magister université de Bechar Algérie, 2007
- [54] **NF P 18-421**, Bétons, Mise en place par microtable vibrante (Indice de classement : P18- 421), AFNOR, Paris, décembre 1981.
- [55] **NF P 18-451**, Bétons - Essai d’affaissement, AFNOR, Paris, 1981.
- [56] **NF EN 12350-6**, Essai pour béton frais, partie 6 : masse volumique, AFNOR, Paris ,2012
- [57] **BS 1881**, Testing concrete, part166 : Compressive strenght test, London, 1983.
- [58] **BS 1881**, Testing of concrete, Part 117: Method for determination of tensile splitting strength,London, 1983.
- [59] **NF P 18-502**, Additions pour béton hydraulique - Fumées de silice - .
- [60] **NF P 15-433**, Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement, AFNOR, Paris, Février 1994
- [61] **Eurocode 3 (EC3)**. Calcul des structures métalliques, Partie-1.1, Règles générales et règles pour les bâtiments.”.
- [62] **Eurocode 4 (1994)**, Design of Composite Steel Concrete Structures: Part 1.1. General Rules and Rules for Buildings, DD ENV -1-1, BSI, London, (1994)
- [63] **Achoura .D**, « contribution a l’étude de la formulation et de la caractérisation des bétons de sable

à base de laitier de hauts fourneaux d'EL HADJAR » thèse doctorat université d'Annaba .2005.

- [64] **BENAISSA A.** « Déformation différée du béton de sable », thèse de doctorat de Génie Civil, Université de Bordeaux, 104 p, 22 octobre 1992.
- [65] **Noureddine Ferhouné**, « Etude de comportement mécanique des poteaux rectangulaire en acier rempli de béton », thèse de doctorat de génie civil, université d'Annaba ,2013.
- [66] **BELOUNIS Radia**, « Etude de la performance des poteaux mixtes acier-béton sous différentes sollicitations », Mémoire de magister, université de Constantine, 2008.
- [67] **Noureddine Ferhouné**, « Etude expérimentale des poteaux creux rectangulaires courts en acier remplis de béton à base de laitier cristallisé (cas de la compression) », Mémoire de magister, Université d'Annaba, 2006.

Notice technique
Edition janvier 2013
Numéro 2.11
Version n°136.2006 R 001
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

Présentation SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut r éducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application ■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
■ Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Caractères généraux SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :
■ longue rhéologie (>2h),
■ robustesse à la ségrégation,
■ qualité de parement.



Agréments, essais de laboratoire ■ PV CNERIB : DTEM : 33/2010.

Caractéristiques

Aspect	Liquide brun clair
Conditionnement	■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac
Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	1 an en emballage intact
Données techniques	
densité	1,06 ± 0,01
pH	6 ± 1
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	30,2 ± 1,3 %

Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité.
Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»

Construction



Sika El Djazair
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE
Web : dza.sika.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08





Annexe B

La figure II.2 représente le diffractogramme de l'échantillon de "granulé laitier". La phase cristalline identifiée était: silicate de manganèse de calcium, $\text{Ca}_2.32\text{Mn}_{0.68}\text{Si}_2\text{O}_7$, orthorhombique centrée sur le corps, Patron: 00-040-0055.

La figure II.3 montre le diffractogramme de l'échantillon "sable du dune". La phase cristalline identifiée était Quartz, SiO_2 , Hexagonal, Patron: 01-079-1910.

La figure II.4 montre le diffractogramme de l'échantillon "sable de laitier cristallisé". Les phases cristallines identifiées étaient:

- Akermanite, $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$, Tetragonal, Patron: 01-087-0046;
- Stishovite, SiO_2 , tétragonale, Patron: 01-082-0513;
- Silicate de calcium, Ca_2SiO_4 , Hexagonal, Patron: 00-023-1042;
- Silicate de calcium, $\text{Ca}(\text{SiO}_3)$, Base monoclinique, Patron: 01-089-6463.

Annexes

Quartz, SiO₂, Hexagonal, Pattern: 01-079-1910

Pattern : 01-079-1910		Radiation = 1.540600		Quality : High		
SiO ₂		2θ	I	h	k	l
Silicon Oxide		20.857	210	1	0	0
Also called: α -Si O ₂ , Quartz, syn		26.637	999	1	0	1
		36.542	67	1	1	0
		39.462	66	0	1	2
		40.287	29	1	1	1
		42.448	49	2	0	0
		45.790	27	0	2	1
		50.134	110	1	1	2
		50.614	4	0	0	3
		54.868	33	2	0	2
		55.319	14	1	0	3
		57.227	2	2	1	0
		59.953	77	2	1	1
		64.026	14	1	1	3
		65.779	4	3	0	0
		67.735	46	2	1	2
		68.134	57	0	2	3
		68.906	60	3	0	1
		73.455	17	0	1	4
		75.651	22	0	3	2
		77.662	12	2	2	0
		79.871	23	1	2	3
		80.033	13	2	2	1
		81.157	19	1	1	4
		81.480	23	3	1	0
		83.826	14	3	1	1
		84.941	2	0	2	4
		87.062	1	2	2	2
		87.433	2	0	3	3
		90.817	20	3	1	2
		92.776	4	4	0	0
		94.628	11	1	0	5
		95.108	9	0	4	1
		96.223	11	1	2	4
		98.730	9	2	2	3
		102.225	8	1	1	5
		*102.225	8	0	4	2
		102.551	8	3	1	3
		103.854	2	3	0	4
		104.182	6	3	2	0
		106.098	1	2	0	5
		106.596	11	3	2	1
		112.090	1	4	1	0
		114.044	4	2	3	2
		114.449	11	0	4	3
		114.624	11	1	4	1
		115.851	4	2	2	4
		117.506	1	0	0	6
		118.285	7	2	1	5
		120.103	6	1	3	4
		121.828	2	0	1	6
		122.581	5	4	1	2
		127.222	2	0	3	5
		131.180	2	1	1	6
		132.748	1	5	0	1
		134.277	1	4	0	4
		136.381	9	2	0	6
		137.861	10	4	1	3
		140.284	3	3	3	0
		143.187	12	2	2	5
		*143.187	12	0	5	2
		144.079	10	3	3	1
		146.590	7	4	2	0
Lat/ce : Hexagonal S.G : P3121 (152) a = 4.91400 c = 5.40600 Z = 3		Mol. weight = 60.08 Volume [CD] = 113.05 Dx = 2.648 Mcor = 3.07				
ANX: AX2. Analysis: O2 Si1. Formula from original source: Si O2. ICSD Collection Code: 67121. Calculated Pattern Original Remarks: Isotropic temperature factors obtained from room pressure refinement. Refinement was constrained to have a twin fraction of .035+3. Wyckoff Sequence: c a (P3121). Data collection flag: Ambient.						
Calculated from ICSD using POWD-12++ (2004) Hazen, R.M., Finger, L.W., Hemley, R.J., Mao, H.K., Solid State Commun., volume 72, page 507 (1989)						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30-1000(0.0005,30)		Filter : d-sp : Calculated spacings				

Annexes
Akermanite, Ca₂Mg(Si₂O₇), Tetragonal, Pattern: 01-087-0046

Pattern : 01-087-0046		Radiation = 1.540600	Quality : High																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
<p>Ca₂Mg(Si₂O₇)</p> <p>Calcium Magnesium Silicate <i>Also called:</i> dicalcium magnesium disilicate, Akermanite, syn</p>		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">2θ</th> <th style="text-align: left;">I</th> <th style="text-align: left;">h</th> <th style="text-align: left;">k</th> <th style="text-align: left;">l</th> <th style="text-align: left;">2θ</th> <th style="text-align: left;">I</th> <th style="text-align: left;">h</th> <th style="text-align: left;">k</th> <th style="text-align: left;">l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15.987</td><td>107</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>89.233</td><td>10</td><td>5</td><td>2</td><td>3</td> </tr> <tr><td>17.695</td><td>20</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>21.037</td><td>78</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>22.683</td><td>33</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>23.934</td><td>108</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>25.403</td><td>37</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>28.915</td><td>230</td><td>2</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>31.130</td><td>999</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>32.296</td><td>30</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>35.831</td><td>18</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>36.233</td><td>159</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>37.062</td><td>51</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>37.683</td><td>58</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>38.863</td><td>66</td><td>3</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>39.460</td><td>23</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>40.597</td><td>12</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>41.530</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>42.828</td><td>9</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>44.434</td><td>113</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>45.469</td><td>20</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>46.323</td><td>49</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>47.836</td><td>52</td><td>4</td><td>1</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>49.001</td><td>35</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>49.313</td><td>86</td><td>3</td><td>3</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>49.963</td><td>9</td><td>4</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>50.454</td><td>5</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>51.395</td><td>78</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>51.876</td><td>167</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>52.175</td><td>62</td><td>4</td><td>2</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>52.799</td><td>28</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>54.958</td><td>10</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>55.533</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>55.989</td><td>22</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>56.300</td><td>7</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>57.622</td><td>14</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>58.898</td><td>1</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>59.911</td><td>3</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>60.210</td><td>13</td><td>5</td><td>1</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>*60.210</td><td>13</td><td>2</td><td>0</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>61.184</td><td>9</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>61.478</td><td>40</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>62.015</td><td>5</td><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>62.441</td><td>11</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>63.262</td><td>24</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>63.947</td><td>8</td><td>5</td><td>2</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>64.913</td><td>11</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>65.199</td><td>36</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>66.413</td><td>21</td><td>3</td><td>0</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>66.928</td><td>69</td><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>67.593</td><td>24</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>*67.593</td><td>24</td><td>3</td><td>1</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>69.969</td><td>5</td><td>5</td><td>3</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>70.495</td><td>16</td><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>70.895</td><td>11</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>72.063</td><td>4</td><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>72.312</td><td>26</td><td>6</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>72.830</td><td>5</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>73.471</td><td>8</td><td>6</td><td>1</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>74.646</td><td>2</td><td>4</td><td>0</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>75.136</td><td>1</td><td>6</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>75.526</td><td>9</td><td>5</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>75.793</td><td>33</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>76.279</td><td>9</td><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>76.932</td><td>16</td><td>6</td><td>2</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>*76.932</td><td>16</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>78.045</td><td>1</td><td>5</td><td>4</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>78.211</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>78.934</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>79.197</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>79.678</td><td>14</td><td>6</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>80.466</td><td>1</td><td>2</td><td>0</td><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>80.802</td><td>17</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>81.184</td><td>10</td><td>5</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>81.588</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>82.542</td><td>5</td><td>6</td><td>3</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>83.420</td><td>12</td><td>6</td><td>0</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>84.534</td><td>4</td><td>6</td><td>1</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>84.794</td><td>12</td><td>4</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>84.935</td><td>8</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>85.268</td><td>4</td><td>6</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>85.906</td><td>17</td><td>5</td><td>1</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>86.047</td><td>11</td><td>3</td><td>0</td><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>87.156</td><td>9</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>87.866</td><td>7</td><td>6</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>88.102</td><td>7</td><td>7</td><td>1</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>88.974</td><td>6</td><td>5</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	2θ	I	h	k	l	2θ	I	h	k	l	15.987	107	1	1	0	89.233	10	5	2	3	17.695	20	0	0	1						21.037	78	1	0	1						22.683	33	2	0	0						23.934	108	1	1	1						25.403	37	2	1	0						28.915	230	2	0	1						31.130	999	2	1	1						32.296	30	2	2	0						35.831	18	0	0	2						36.233	159	3	1	0						37.062	51	2	2	1						37.683	58	1	0	2						38.863	66	3	0	1						39.460	23	1	1	2						40.597	12	3	1	1						41.530	4	3	2	0						42.828	9	2	0	2						44.434	113	2	1	2						45.469	20	3	2	1						46.323	49	4	0	0						47.836	52	4	1	0						49.001	35	2	2	2						49.313	86	3	3	0						49.963	9	4	0	1						50.454	5	3	0	2						51.395	78	4	1	1						51.876	167	3	1	2						52.175	62	4	2	0						52.799	28	3	3	1						54.958	10	0	0	3						55.533	6	4	2	1						55.989	22	3	2	2						56.300	7	1	0	3						57.622	14	1	1	3						58.898	1	4	3	0						59.911	3	4	0	2						60.210	13	5	1	0						*60.210	13	2	0	3						61.184	9	4	1	2						61.478	40	2	1	3						62.015	5	5	0	1						62.441	11	3	3	2						63.262	24	5	1	1						63.947	8	5	2	0						64.913	11	4	2	2						65.199	36	2	2	3						66.413	21	3	0	3						66.928	69	5	2	1						67.593	24	4	4	0						*67.593	24	3	1	3						69.969	5	5	3	0						70.495	16	4	4	1						70.895	11	4	3	2						72.063	4	5	1	2						72.312	26	6	0	0						72.830	5	5	3	1						73.471	8	6	1	0						74.646	2	4	0	3						75.136	1	6	0	1						75.526	9	5	2	2						75.793	33	4	1	3						76.279	9	6	1	1						76.932	16	6	2	0						*76.932	16	3	3	3						78.045	1	5	4	0						78.211	1	1	1	4						78.934	4	4	4	2						79.197	6	4	2	3						79.678	14	6	2	1						80.466	1	2	0	4						80.802	17	5	4	1						81.184	10	5	3	2						81.588	4	2	1	4						82.542	5	6	3	0						83.420	12	6	0	2						84.534	4	6	1	2						84.794	12	4	3	3						84.935	8	2	2	4						85.268	4	6	3	1						85.906	17	5	1	3						86.047	11	3	0	4						87.156	9	3	1	4						87.866	7	6	2	2						88.102	7	7	1	0						88.974	6	5	4	2						<p>Latice : Tetragonal</p> <p>S.G. : P-421m (113)</p> <p>a = 7.83380</p> <p>c = 5.00820</p> <p style="text-align: center;">Z = 2</p> <p>Mol. weight = 272.63</p> <p>Volume [CD] = 307.35</p> <p>Dx = 2.946</p> <p>Mcor = 2.49</p>
2θ	I	h	k	l	2θ	I	h	k	l																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
15.987	107	1	1	0	89.233	10	5	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
17.695	20	0	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
21.037	78	1	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
22.683	33	2	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
23.934	108	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
25.403	37	2	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
28.915	230	2	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
31.130	999	2	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
32.296	30	2	2	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
35.831	18	0	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
36.233	159	3	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
37.062	51	2	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
37.683	58	1	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
38.863	66	3	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
39.460	23	1	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
40.597	12	3	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
41.530	4	3	2	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
42.828	9	2	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
44.434	113	2	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
45.469	20	3	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
46.323	49	4	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
47.836	52	4	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
49.001	35	2	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
49.313	86	3	3	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
49.963	9	4	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
50.454	5	3	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
51.395	78	4	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
51.876	167	3	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
52.175	62	4	2	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
52.799	28	3	3	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
54.958	10	0	0	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
55.533	6	4	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
55.989	22	3	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
56.300	7	1	0	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
57.622	14	1	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
58.898	1	4	3	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
59.911	3	4	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
60.210	13	5	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
*60.210	13	2	0	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
61.184	9	4	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
61.478	40	2	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
62.015	5	5	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
62.441	11	3	3	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
63.262	24	5	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
63.947	8	5	2	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
64.913	11	4	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
65.199	36	2	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
66.413	21	3	0	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
66.928	69	5	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
67.593	24	4	4	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
*67.593	24	3	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
69.969	5	5	3	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
70.495	16	4	4	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
70.895	11	4	3	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
72.063	4	5	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
72.312	26	6	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
72.830	5	5	3	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
73.471	8	6	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
74.646	2	4	0	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
75.136	1	6	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
75.526	9	5	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
75.793	33	4	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
76.279	9	6	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
76.932	16	6	2	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
*76.932	16	3	3	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
78.045	1	5	4	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
78.211	1	1	1	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
78.934	4	4	4	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
79.197	6	4	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
79.678	14	6	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
80.466	1	2	0	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
80.802	17	5	4	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
81.184	10	5	3	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
81.588	4	2	1	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
82.542	5	6	3	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
83.420	12	6	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
84.534	4	6	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
84.794	12	4	3	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
84.935	8	2	2	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
85.268	4	6	3	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
85.906	17	5	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
86.047	11	3	0	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
87.156	9	3	1	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
87.866	7	6	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
88.102	7	7	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
88.974	6	5	4	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
<p>Additional Patterns: See PDF 01-077-1149, PDF 01-079-2425, PDF 01-083-1815 and PDF 01-088-778. ANX: AB2C2X7. ICSD Collection Code: 60065. Calculated Pattern Original Remarks: REM PRE Mentioned. Temperature Factor: ATF. Wyckoff Sequence: 1 e3 c a (P4-21M). Data collection flag: Ambient.</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
<p>Calculated from ICSD using POWD-12++ Yang, H., Hazen, R.M., Downs, R.T., Finger, L.W., Phys. Chem. Miner., volume 24, page 510 (1997)</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
<p>Radiation : CuKα1</p> <p>Lambda : 1.54060</p> <p>SSPOM : F30-1000(0.0005,30)</p>	<p>Filter :</p> <p>d-sp : Calculated spacings</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

Annexes
Stishovite, SiO₂, tetragonal, Pattern: 01-082-0513

Pattern : 01-082-0513		Radiation = 1.540600	Quality : Calculated			
<p>SiO₂</p> <p>Silicon Oxide Stishovite, syn</p>		<p>2θ</p> <p>30.856 39.879 44.199 45.842 49.748 61.031 64.288 69.348 73.004 74.215 77.810 78.989 82.503 85.411 86.008 90.066 94.694 97.603 101.717 102.325 105.893 110.793 111.401 114.543 115.828 121.818 124.563 125.254 126.726 140.284 141.225 144.124 147.139 148.253</p>	<p>l</p> <p>999 253 8 360 120 456 140 79 42 9 73 170 13 3 7 16 15 18 12 51 28 26 39 16 1 10 2 7 7 2 19 43 23 20</p>	<p>h</p> <p>1 1 2 1 2 2 2 0 3 2 3 3 3 2 2 3 4 3 3 4 2 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4</p>	<p>k</p> <p>1 0 0 1 1 1 2 0 1 1 0 0 1 2 0 2 1 4 1 3 3 1 2 4 2 3 1 3 4 2 5 1</p>	<p>i</p> <p>0 1 0 0 0 1 0 2 0 1 2 1 1 0 2 2 1 0 0 0 2 2 0 2 1 1 0 3 2 1 3 0 2 3 0 2 3 0 2</p>
<p>Latice : Tetragonal</p> <p>S.G. : P42/mmm (136)</p> <p>a = 4.09500</p> <p>c = 2.70800</p> <p style="text-align: center;">Z = 2</p>		<p>Mol. weight = 60.08</p> <p>Volume [CD] = 45.41</p> <p>Dx = 4.394</p> <p>Mcor = 1.91</p>				
<p>Additional Patterns: See PDF 00-045-1374, ANX: AX2. Analysis: O2 Si1. Formula from original source: Si O2. ICSD Collection Code: 74531. Hypothetical Structure: Structure calculated theoretically. Minor Warning: No R value given in the paper. No e.s.d. reported/abstracted on the cell dimension. Wyckoff Sequence: 1a (P42/MNM). Data collection flag: Ambient.</p>						
<p>Calculated from ICSD using POWD-12++ (2004) Lacks, D.J., Gordon, R.G., Phys. Rev. B: Condens. Matter, volume 48, page 2889 (1993)</p>						
<p>Radiation : CuKα1</p> <p>Lambda : 1.54060</p> <p>SSPOM : F30-1000(0.0000,30)</p>		<p>Filter :</p> <p>d-sp : Calculated spacings</p>				

Annexes
Calcium Silicate, Ca₂SiO₄, Hexagonal, Pattern: 00-023-1042

Pattern : 00-023-1042		Radiation = 1.540600	Quality : Indexed								
<p>Ca₂SiO₄</p> <p>Calcium Silicate</p>		<p>2θ</p> <p>22.783</p> <p>31.797</p> <p>33.027</p> <p>40.529</p> <p>46.535</p> <p>58.195</p> <p>59.096</p>	<p>l</p> <p>20</p> <p>80</p> <p>100</p> <p>40</p> <p>60</p> <p>40</p> <p>20</p>	<p>h</p> <p>1</p> <p>1</p> <p>1</p> <p>2</p> <p>2</p> <p>2</p> <p>3</p>	<p>k</p> <p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>1</p> <p>0</p>	<p>i</p> <p>1</p> <p>2</p> <p>0</p> <p>2</p> <p>2</p> <p>1</p> <p>0</p>					
<p>Lattice : Hexagonal</p> <p>S.G. : P63mc (186)</p> <p>a = 5.41900</p> <p>c = 7.02300</p> <p style="text-align: center;">Z = 2</p>		<p>Mol. weight = 172.24</p> <p>Volume [CD] = 178.60</p> <p>Dx = 3.203</p>									
<p>General Comments: Low temperature pattern (20 C) of α-"Ca₂ Si O₄". Unit cell parameters refined from other α-patterns. Sample Preparation: Synthesized from "Ca₂ Si O₄". "K₂ O" + "Ca Mg Si O₄" (stabilized by impurities? MC). Unit Cell Data Source: Powder Diffraction. Data collection flag: Ambient.</p>											
<p>Yamagushi et al., Yogyo Kyokaiishi (J. Ceram. Assoc. Jpn.), volume 71, page 21 (1963)</p> <p>Eysel, Hahn., Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 131, page 322 (1970)</p>											
<p>Radiation :</p> <p>SSPOM: F7- 14(0.0290,17)</p>		<p>Filter :</p> <p>α-sp : Not given</p>									

Annexes

Calcium Manganese Silicate, $\text{Ca}_{2.32}\text{Mn}_{0.68}\text{Si}_2\text{O}_7$, Body-centered orthorhombic, Pattern:

00-040-0055

Pattern : 00-040-0055		Radiation = 1.540600		Quality : High			
$\text{Ca}_{2.32}\text{Mn}_{0.68}\text{Si}_2\text{O}_7$		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	
Calcium Manganese Silicate		15.608	4	2	0	0	
		17.597	13	2	0	2	
		19.386	5	1	1	0	
		21.025	2	1	1	2	
		21.536	9	0	1	3	
		22.584	12	2	0	4	
		24.033	12	2	1	1	
		25.369	62	1	1	4	
		26.701	6	2	1	3	
		29.121	9	2	0	6	
		29.585	100	3	1	0	
		30.688	8	3	1	2	
		31.373	90	1	1	6	
		32.558	9	4	0	2	
		32.803	6	0	0	8	
		33.903	69	3	1	4	
		35.847	7	0	2	0	
		36.588	11	4	1	1	
		36.978	4	1	2	1	
		37.474	27	2	1	7	
		38.388	15	1	1	8	
		38.731	19	3	1	6	
		40.227	9	4	0	6	
		41.325	3	0	0	10	
		41.989	2	4	1	5	
		42.803	3	2	2	4	
		43.738	3	5	1	0	
		44.462	3	2	1	9	
		44.740	2	3	1	8	
		45.163	3	3	2	3	
		46.043	6	1	1	10	
		46.823	30	2	2	6	
		48.439	20	4	2	0	
		49.400	8	0	2	8	
		50.170	4	0	0	12	
		50.729	11	5	1	6	
		51.039	13	6	0	4	
		52.086	14	2	2	8	
		52.817	11	2	0	12	
		54.226	4	1	1	12	
		54.614	14	6	0	6	
		54.976	8	4	2	6	
		55.755	4	5	1	8	
		58.321	6	1	3	4	
		59.229	12	0	0	14	
		60.529	8	7	1	2	
		61.626	7	1	3	6	
		63.146	8	0	2	12	
Lattice : Body-centered orthorhombic S.G. : I2cm (46) a = 11.35680 b = 5.00710 c = 21.81900 a/b = 2.26814 c/b = 4.35761 Z = 8		Mol. weight = 298.51 Volume [CD] = 1240.73 Dx = 3.196					
General Comments: Mn-kilchoanite. Data collection flag: Ambient.							
Kimata, M., Mineral. Mag., volume 50, page 511 (1986)							
Radiation : CuK α Lambda : 1.54178 SS/FOM : F30- 40(0.0117,65)		Filter : d-sp : Diffractometer					