



UNIVERSITÉ
DE REIMS
CHAMPAGNE-ARDENNE

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES TECHNOLOGIE SANTÉ



UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE CHIMIQUE ET DE MÉTALLURGIE (BULGARIE)

THÈSE EN COTUTELLE

Pour obtenir le grade de

**Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne
Docteur de l'Université de Technologie Chimique et de
Métallurgie**

Discipline : Génie Civil et Mécanique

Présentée et soutenue publiquement
Par

IVELINA IVANOVA

le 19 décembre 2013

Titre :

**COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE CONSOLES COURTES
EN BÉTON ARME RENFORCÉES OU RÉPARÉES PAR
COLLAGE DE MATÉRIAUX COMPOSITES**

JURY:

M. Yves DELMAS	Professeur à l'URCA, Reims, France	Président
M. François BUYLE-BODIN	Professeur à l'Université de Lille 1, France	Rapporteur
M. Siméon Vaskov VASSILEV	Professeur à l'UTA de Plovdiv, Bulgarie	Rapporteur
M. Alex LI	Professeur à l'URCA, Reims, France	Co-directeur
M. Dimitar DONTCHEV	Professeur à l'UTCM à Sofia, Bulgarie	Co-directeur
M. Marc QUIERTANT	Chercheur à l'IFSTTAR	Examineur
M. Nikolai BAROVSKY	Professeur à l'IMAS à Sofia, Bulgarie Reims,	Examineur
M. Jules ASSIH	Maitre de Conférences à l'URCA, Reims, France	Co-encadrant
M. Kliment HADJOV	Professeur à l'UTCM à Sofia, Bulgarie	Invité

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mes deux directeurs de recherche Monsieur Alex LI, Professeur de l'Université de Reims et Monsieur Dimitar DONTCHEV, Professeur à l'Université de Technologie Chimique et de Métallurgie (Bulgarie). Ils m'ont fait confiance et m'ont acceptée dans cette thèse en cotutelle raison pour laquelle je leur renouvelle toute ma gratitude. Leur calme et leur patience m'ont permis d'honorer ce travail en allant en son terme.

Un grand merci aussi et à mon co-encadrant Monsieur Jules ASSIH, Maître de Conférences à l'Université de Reims. Il m'a toujours encouragée car faire une thèse ce n'est pas si simple. Il a été toujours présent et m'a beaucoup aidé. Avec leurs expériences dans le domaine de la mécanique et du génie civil, couplées aux différents conseils qu'ils m'ont légués, m'a permis de gagner un temps précieux dans la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères à Monsieur Yves Delmas, Professeur des universités et Directeur de l'IUT de Reims pour m'avoir aussi fait confiance et pour ses conseils précieux durant mes travaux de recherche et l'élaboration de ce mémoire.

Tous ces travaux n'auraient pas aboutis sans l'aide et le sérieux travail des techniciens avec qui j'ai pu travailler au cours de ces trois années. Cependant, je tiens particulièrement à dire un grand merci à Monsieur Patrick JUPILLAT, Technicien au laboratoire de Génie civil au GRESPI, les techniciens du service général et du Département Génie Civil de l'IUT de Reims.

Enfin, un grand merci également à ma famille qui m'a toujours soutenu et a été présente pour moi, même à distance. Merci aussi à tous mes amis qui n'ont pas cessé de m'encourager constamment.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
TABLE DES MATIÈRES	5
NOTATIONS	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
CHAPITRE 1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	21
1.1 INTRODUCTION	21
1.2 TRAVAUX SUR LES CONSOLES COURTES	22
1.2.1 Définition	22
1.2.2 Historique de consoles courtes en béton armé.....	24
1.2.3 Modèles analytiques de consoles courtes en béton armé	32
1.2.3.1 Approche du modèle de Robinson par Khadraoui [KHA, 98]	32
1.2.3.2 Modèles de Kriz et Raths.....	35
1.2.3.2.1 Le corps d'épreuve	35
1.2.3.2.2 Modélisation du comportement du tirant dans la phase de fissuration	37
1.2.3.3 Modèle de Niedenhoff	40
1.2.3.3.1 Le tracé des isostatiques	40
1.2.3.3.2 Analyse du modèle.....	43
1.2.4 Mécanisme de fissuration du béton armé	44
1.2.5 Types de rupture des consoles courtes	46
1.2.5.1 Rupture par flexion-traction (FT):	47
1.2.5.2 Rupture par flexion-compression (FC):	47
1.2.5.3 Rupture par fendage suivant la diagonale de la console (D):.....	47
1.2.5.4 Rupture par cisaillement à l'encastrement (CE):.....	47
1.2.6 Confrontation des modèles.....	48
1.3 PATHOLOGIES DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ.....	51
1.3.1 Dégradation des structures en béton armé	51
1.3.2 Dégradations dues au vieillissement des structures en béton armé	52
1.3.3 Dégradation des ouvrages dues aux contraintes mécaniques	54
1.3.4 Fissures structurelles obliques	55
1.3.5 Mouvement courant et exceptionnel	56
1.4 ÉTUDES EFFECTUÉES SUR LES CONSOLES EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉES	57
1.4.1 Les travaux de Robert W. Corry et Charles W. Dolan [COR 01]	57
1.4.2 Les travaux de Mohamed A. Elgwady [ELG 05]	60
1.4.3 Les travaux de G. Campione, L. La Mandola et M. Papia [CAM&al, 05].....	64
1.4.3.1 Approche analytique [CAM05].....	65
1.4.3.2 Console avec les armatures tendues.....	68
1.4.3.3 Consoles en béton armé et fibrées ou renforcées par FRP	68
1.4.4 Les travaux de Ahmad et al [AHM 10].....	69
1.4.5 Les travaux de Anis et Muhammad [ANI 12]	72
1.5 CONCLUSION DU CHAPITRE 1	73
CHAPITRE 2 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX	79
2.1 INTRODUCTION	79
2.2 BÉTON.....	79
2.2.1 Composition du béton.....	79
2.2.2 Essai de compression	81
2.2.3 Essai de traction par flexion	83
2.3 ACIER	85
2.3.1 Essai de traction simple	85
2.3.2 Loi de comportement: Contrainte-déformation	85
2.4 MATÉRIAUX COMPOSITES EN FIBRES DE CARBONE.	86
2.4.1 Avantages des composites	87

2.4.1.1 Propriétés physiques et mécaniques	87
2.4.1.2 Poids.....	87
2.4.1.3 Tenue au feu	88
2.4.2 <i>Les inconvénients des composites</i>	88
2.4.3 <i>Caractéristiques mécaniques</i>	88
2.4.3.1 Mélange renfort-matrice.....	89
2.4.3.2 Loi de comportement :.....	89
2.4.4 <i>Caractéristiques des matériaux composites en fibres de carbone utilisés</i>	90
2.4.4.1 Matériaux composites tissus en fibres de carbone unidirectionnelles	90
2.4.4.2 Matériaux composites en fibres de carbone bidirectionnelles	91
2.4.4.3 Lamelle pultrudée à base de fibres de carbone - Sika CarboDur S1012.....	93
2.5 COLLE ADHÉSIVE	94
2.5.1 <i>Sikadur®-330-résine d'imprégnation époxydique</i>	94
2.5.2 <i>Sikadur-30-résine d'imprégnation époxydique</i>	96
2.6 CONCLUSION DU CHAPITRE 2	96

CHAPITRE 3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE..... 99

3.1 INTRODUCTION	99
3.2 MODÈLE EXPÉRIMENTAL	99
3.3 RÉALISATION DES CONSOLES COURTES EN BÉTON ARMÉ	100
3.3.1 <i>Préparation des armatures en acier</i>	101
3.3.2 <i>Mise en place des jauges de déformation sur les barres d'acier</i>	101
3.3.3 <i>Mise en place du béton</i>	102
3.3.4 <i>Préparation des surfaces avant le collage des matériaux composites</i>	103
3.3.5 <i>Collage des matériaux composites</i>	104
3.4 DISPOSITIF ET PARAMÈTRES EXPÉRIMENTAUX ÉTUDIÉS.....	105
3.4.1 <i>Dispositif expérimental</i>	105
3.4.2 <i>Les différents paramètres étudiés</i>	106
3.4.3 <i>Positions des jauges de déformation</i>	110
3.5 RÉSULTATS DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX	111
3.5.1 <i>Relation entre force et déformation</i>	111
3.5.2 <i>Analyse et discussions</i>	112
3.5.2.1 Console non renforcée-Évolution des déformations dans la section d'encastrement.....	112
3.5.2.2 Influence de l'épaisseur du matériau composite	115
3.5.2.2.1 Par plaques de deux cotes	115
3.5.2.2.1.1 Variation de la déformation en fonction de la charge appliquée.....	116
3.5.2.2.1.2 Influence de nombre de couches	118
3.5.2.2.2 Par bandage	120
3.5.2.2.2.1 Variation de la déformation en fonction de la charge appliquée.....	121
3.5.2.2.2.2 Comparaison de CB1u, CB2u, CB3u et CP5u	127
3.5.2.3 Influence du type de matériau composite en fibres de carbone	129
3.5.2.3.1 Par plaques des deux faces	129
3.5.2.3.1.1 Variation de la déformation en fonction de la charge appliquée de la console CPC.....	130
3.5.2.3.1.2 Comparaison de CPC et CP1u	131
3.5.2.3.2 Par bandage	133
3.5.2.3.2.1 Déformation en fonction de la charge appliquée de la console CB2b	133
3.5.2.3.2.2 Déformations du tirant aux points « G1 » et « G2 » des consoles CB2b et CB2u.....	134
3.5.2.4 Influence du type de renforcement	136
3.5.2.4.1 Par bandage	136
3.5.2.4.1.1 Déformations de la plaque, de l'acier et du béton de la console CB3u(5cm)	137
3.5.2.4.2 Influence de la longueur d'ancrage	138
3.5.2.4.2.1 Déformations des consoles CU+3u et CU3u.....	139
3.5.2.4.2.2 Comparaison de CU+3u et CU3u avec CB3u et CP3u	141
3.5.2.4.3 Influence de plaques composites inclinées	144
3.5.2.4.3.1 Comparaison des consoles courte renforce par les plaques composites inclinées	145
3.5.2.5 Distribution des déformations dans la section de la console:.....	145
3.5.2.6 Fissuration et modes de rupture des consoles courtes.....	149
3.5.2.6.1 Console courte de référence.....	149
3.5.2.6.2 Consoles renforcées par bandage, influence de l'épaisseur sur le mode de rupture	150
3.5.2.6.3 Consoles renforcées par plaques composites en fibres de carbone	153
3.5.2.6.4 Consoles renforcées par des tissus en fibres de carbone en U	156
3.5.2.6.5 Consoles renforcées par des plaques inclinées	157

3.6 CONCLUSION DU CHAPITRE 3	159
CHAPITRE 4 ÉTUDE ANALYTIQUE DES CONSOLES COURTES EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉES	167
4.1 INTRODUCTION	167
4.2 MODÈLES ANALYTIQUES	167
4.2.1 Console courte en béton armé non renforcée	167
4.2.1.1 Modèle de Robinson	168
4.2.1.2 Modèle de NIEDENHOFF	169
4.2.2 Console courte en béton armé renforcée	171
4.3 DIFFÉRENTES ÉTAPES DU CALCUL	173
4.4 RÉOLUTION DU PROBLÈME	173
4.5 SOLUTION DU MODÈLE DE RÉFÉRENCE	176
4.5.1 Phase linéaire élastique	176
4.5.2 Phase d'endommagement de la partie tendue	177
4.5.3 Phase d'endommagement des parties tendue et comprimée	178
4.5.4 Organigramme de la résolution numérique du problème	179
4.6 COMPARAISON COURBES EXPÉRIMENTALES ET THÉORIQUES	181
4.7 CONCLUSION DU CHAPITRE 4	181
CHAPITRE 5 ÉTUDE DE FATIGUE	185
5.1 INTRODUCTION	185
5.2 PARAMÈTRES DE MESURE	185
5.2.1 Tenue à la fatigue	185
5.2.2 Courbe de Wöhler	186
5.2.3 La règle de Miner	186
5.3 NOTION D'ENDOMMAGEMENT. LOIS DE DOMMAGE	187
5.4 INFLUENCE DE DIVERS PARAMÈTRES	188
5.5 MISE EN PLACE DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	189
5.6 OBJECTIF	189
5.7 PARAMÈTRES DE MISE EN PLACE	190
5.8 RÉSULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSIONS	192
5.9 CONCLUSION DU CHAPITRE 5	197
CONCLUSION GÉNÉRALE	199
PERSPECTIVES	203
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	205
ANNEXE 1: EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE CONSOLE	219
ANNEXE 2: SIKA CARBODUR®-S1012	221
ANNEXE 3 SIKADUR®-30	223
ANNEXE 4: SIKADUR®-330	227
ANNEXE 5: JAUGE D'EXTENSION	230
Liste des figures	233
Liste des tableaux	239
RÉSUMÉ	240
ABSTRACT	240

NOTATIONS

a	<i>portée de cisaillement (distance entre le point d'application de la résultante des charges et la section d'encastrement)</i>
A_f	<i>section des armatures résistant au moment de flexion</i>
A_h	<i>section des cadres horizontaux</i>
A_{mc}	<i>section des matériaux composites</i>
A_s	<i>section des armatures du tirant</i>
A_{sh}	<i>section totale des armatures</i>
A_{vf}	<i>section totale des armatures résistantes au frottement</i>
b	<i>largeur de la console</i>
d	<i>hauteur utile de la section d'encastrement</i>
d'	<i>hauteur de répartition des cadres</i>
E_b	<i>module d'Young du béton</i>
E_{mc}	<i>module d'Young du matériau composite</i>
E_s	<i>module d'Young de l'acier</i>
f_c	<i>résistance caractéristique à la compression du béton</i>
f'_c	<i>contrainte de cisaillement spécifique</i>
f_t	<i>résistance caractéristique à la traction du béton</i>
f_y	<i>limite élastique des armatures</i>
F	<i>effort appliqué à la console</i>
F_0	<i>charge nominale du début de la fissuration</i>
F_u	<i>effort de rupture ultime</i>
h	<i>hauteur de la section d'encastrement</i>
h_F	<i>hauteur de la section contenant le point d'application de la résultante des charges</i>
H	<i>charge horizontale appliquée</i>
k_z	<i>rapport entre le bras de levier et la hauteur utile</i>
l	<i>largeur de la bielle de béton</i>
l_c	<i>distance entre la section d'encastrement et la face libre de la console</i>
l_f	<i>longueur de la fissure diagonale</i>
l_p	<i>largeur de la plaque d'appui</i>
m	<i>nombre de cadres horizontaux</i>

M	<i>moment de flexion</i>
M_u	<i>moment de flexion ultime</i>
n	<i>coefficient d'équivalence acier-béton</i>
s_h	<i>espacement de deux cours de cadres horizontaux</i>
T	<i>effort dans le tirant à la charge F</i>
V	<i>charge verticale appliquée</i>
V_u	<i>charge verticale ultime</i>
y_0	<i>position de l'axe neutre par rapport au centre de la section du tirant</i>
y_i	<i>position par rapport à l'axe neutre du $i^{\text{ème}}$ cadre compté à partir du tirant</i>
y_{d0}	<i>position de la fibre séparant la zone tendue endommagée et celle tendue non endommagée</i>
y_{dc0}	<i>position de la fibre séparant la zone comprimée endommagée et celle comprimée non endommagée</i>
z	<i>bras de levier conventionnel pour le calcul des armatures du tirant</i>
α	<i>inclinaison du vecteur vitesse de déplacement par rapport au plan de rupture</i>
α_f	<i>angle de frottement interne déterminé à partir des essais [MAS 68]</i>
α_f	<i>l'angle entre l'armature de cisaillement de friction et le plan de cisaillement [MAT 74]</i>
δ	<i>largeur de la zone de rupture à la diagonale</i>
ϕ	<i>coefficient de réduction</i>
γ_b	<i>coefficient de sécurité sur la résistance du béton</i>
γ_s	<i>coefficient de sécurité sur la résistance de l'acier</i>
φ	<i>angle de frottement du béton</i>
θ	<i>inclinaison de la fissure diagonale par rapport aux armatures horizontales</i>
ε_{bc}	<i>déformation de la fibre de béton la plus comprimée</i>
ε_{d0}	<i>seuil initial d'endommagement du béton</i>
ε_{dc0}	<i>seuil initial d'endommagement en compression simple du béton</i>
ε_e	<i>déformation élastique limite des armatures du tirant</i>
ε_{mc}	<i>déformation du matériau composite</i>
ε_{pic}	<i>déformation correspondant au pic de contraintes de la courbe du comportement en compression du béton</i>
ε_{st}	<i>déformation du tirant</i>
λ	<i>portée relative (a/d)</i>
μ	<i>coefficient de frottement du béton</i>
ν	<i>coefficient effectif du béton</i>

ν_b	<i>coefficient de poisson du béton</i>
ν_s	<i>coefficient de poisson de l'acier</i>
ρ_h	<i>rapport entre la section des cadres horizontaux et celle du béton à l'encastrement</i>
ρ_s	<i>rapport entre la section des armatures supérieures et celle du béton à l'encastrement</i>
ρ_{sh}	<i>rapport entre la section totale des armatures et celle du béton à l'encastrement</i>
σ_{bc}	<i>contrainte dans le béton comprimé</i>
σ_{mc}	<i>contrainte dans le matériau composite</i>
σ_{si}	<i>contrainte dans le cadre se trouvant à la position y_i</i>
σ_{st}	<i>contrainte de traction sur le tirant à l'encastrement</i>
τ	<i>contrainte de cisaillement conventionnelle</i>
τ_u	<i>contrainte de cisaillement conventionnelle ultime</i>
τ_y	<i>limite élastique de la contrainte de cisaillement conventionnelle</i>
q	<i>pente de la droite</i>

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La durée en service, la réparation, le renforcement et la maintenance des ouvrages du génie civil et des ouvrages d'art correspondent de nos jours à un réel enjeu technico-économique de grande importance.

Les structures en béton armé ou en béton précontraint comme les ponts et les bâtiments sont principalement composées d'éléments comme des poutres, des poteaux, des consoles courtes et des autres éléments secondaires. Ces structures ont une durée de vie variant de 50 à 100ans. En effet, dans de nombreuses régions du monde, la détérioration des ponts, des garages de stationnement en béton armé ou en béton armé précontraint a atteint des proportions alarmantes.

Beaucoup de ces structures en Europe, en Amérique du sud, au Canada, en Australie et des autres régions ont déjà fait ou devront faire l'objet de travaux de renforcement ou de remplacement par collage de matériaux composites.

La réhabilitation de certains ouvrages d'art fait appel à la technique de renforcement par des plaques en acier. Connue depuis près de quarante ans, cette technique consiste à pallier à l'insuffisance de la résistance du béton.

En France comme à l'étranger, de nombreuses études sont faites pour mieux cerner la performance et la fiabilité de cette technique (renforcement par des tôles d'acier ou de dalles en béton armé).

Les applications du collage dans le Bâtiment Travaux Public (BTP) sont plus récentes. Il faudra attendre les années 70 pour voir apparaître quelques travaux significatifs notamment grâce à la technique dite du "béton plaqué" mise au point par Monsieur L'Hermitte [LHE 67]. Cette technique consiste à coller sur le béton des tôles en acier destinées au renforcement de structure présentant des insuffisances de résistance en flexion, en traction ou au cisaillement.

Depuis les premières études réalisées par L'Hermitte [LHE 67] et Theillout [THE 90], de nombreuses études [DEL 79], [DEL 85], [GIL 74], ont démontré l'efficacité et la fiabilité de cette technique lors qu'elle est correctement mise en œuvre. Malgré cela, la méthode comporte quelques défauts liés essentiellement à l'utilisation de l'acier, dont les principaux désavantages résident dans son poids volumique élevé, ce qui rend difficile la manipulation des plaques sur le lieu d'installation et dans sa vulnérabilité aux agressions chimiques plus particulièrement le problème de corrosion au niveau de l'adhésion acier/adhésif. De plus, ces plaques relativement courtes nécessitent parfois le recours à des joints.

Une méthode alternative nouvelle ([MEI, 92], [ASS 98], [DIA 01]) a consisté à remplacer l'acier par des lamelles fabriquées à partir des matériaux ultra-légers en résine époxy renforcée de fibres de carbone. Ces matériaux se distinguent par un faible poids volumique, une très haute

résistance à la traction et à la fatigue et des performances anti-corrosion remarquables. La liaison entre le béton et les lamelles est réalisée au moyen d'une colle époxy comme dans le cas des plaques en acier. De plus les lamelles peuvent être stockées enroulées sur elles-mêmes et dimensionnées à n'importe quelle longueur, ce qui rend les joints superflus.

Le développement spectaculaire de l'utilisation des matériaux composites dans le domaine de Génie Civil et le nombre relativement peu mais important d'articles scientifiques publiés ces dernières décennies attestent qu'il ait eu un effort relativement important dans le domaine de la recherche pour développer les méthodes de dimensionnement des structures en béton armé renforcées par collage de matériaux composites [BUY 01, 03, 04] et [QUI 12].

Une console est un élément prismatique en encorbellement sur un poteau. La console est dite courte lorsque la hauteur de sa section est au moins égale à sa portée. Cette dernière est la distance entre la section d'encastrement et le point d'application de la résultante des charges.

On distingue dans une console courte en béton armé, des armatures supérieures appelées armatures du tirant et des armatures réparties sous forme de cadres horizontaux. Les armatures du tirant servent sont destinées à résister aux contraintes de traction développées par la flexion. Les cadres horizontaux servent à frotter la bielle inclinée comprimée de béton pour minimiser la fissuration et éviter la rupture fragile.

Au sein de l'équipe Génie Civil du Groupe de Recherche Pour les Sciences de l'Ingénieur (GRESPI) des travaux comme ceux de [KHA 98], [DEL 96], où un bilan sur le dimensionnement et l'étude du comportement mécanique des consoles courtes en béton armé, ont été menés. Notons également que dans le cadre du Projet National français BHP 2000, Bourget et Delmas [BOU 01], Toutlemonde et al [TOU 98], ont travaillé sur le comportement des consoles courtes en béton en haute performance armé avec une résistance à la compression du béton de 70 à 120 MPa. Bourget et Delmas [BOU 01] montrent l'influence de la résistance du béton et du taux de renforcement en acier sur la charge ultime et la fissuration.

Notre étude se situe dans la continuité de ces travaux précédents. Mais nos objectifs sont:

- de renforcer ou de réparer la console courte en béton armé par collage de matériaux composites en fibres de carbone,
- d'évaluer l'effet du renforcement externe par collage de CFRP¹ sur la console en béton à la flexion et au cisaillement et soumise à sollicitations statiques et fatigue,
- à étudier l'efficacité des différentes configurations de CFRP sur la résistance des consoles à la flexion et au cisaillement,

¹ Carbon Fibre Reinforced Plate

- de proposer un modèle précise sur les comportements à la flexion et au cisaillement; et de proposer un dimensionnement des consoles courtes en béton armé renforcées par collage des CFRP, soumises à la flexion et au cisaillement aux ingénieurs praticiens,
- d'étudier les modes de défaillance (endommagement et rupture) des consoles courtes renforcées extérieurement par collage de différentes configurations de CFRP;
- de l'efficacité et des performances du renforcement des consoles courtes en béton armé par collage des CFRP externes.

Dans le premier chapitre, nous présentons une étude bibliographique en trois parties: la première concerne le bilan des travaux effectués sur les consoles courtes en béton armé, la deuxième partie concerne les pathologies des structures en béton armé, puis la dernière partie sur le renforcement des consoles courtes en béton armé par collage de matériaux composites.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, notamment le béton, l'acier et le matériau composite en fibres de carbone. Les ingénieurs sont souvent confrontés aux problèmes de sûreté et de durabilité d'ouvrages sensibles aux variations des propriétés de transfert. Selon son importance ou sa fonction, un ouvrage en béton, en béton armé ou en béton précontraint subit des modifications importantes au cours de son exploitation qui peuvent réduire sa capacité portante. Ces problèmes passent nécessairement par une meilleure connaissance du comportement des matériaux utilisés dans l'élaboration de ces ouvrages. Le modèle et le dispositif expérimental y sont décrits, de même que les différents essais simples réalisés pour caractériser le comportement de nos matériaux.

Dans la troisième partie de cette thèse, nous présenterons l'influence de certains paramètres tels que l'épaisseur du matériau composite en fibres de carbone, le type de renforcement (par bandage ou le collage simple des plaques composites), l'influence de l'orientation des tissus en fibres de carbone sur la performance mécanique des consoles courtes en béton armé renforcées. Ensuite, à l'aide des jauges de déformation, une étude plus fine du comportement d'une console en béton armé renforcée par collage de tissu composite est décrite. De même que la fissuration et les modes de rupture seront présentés.

Nous proposons dans le quatrième chapitre une étude analytique de notre modèle expérimental. L'endommagement du béton en traction et en compression est pris en compte dans l'approche analytique du problème. Considérons la section d'encastrement, en utilisant les hypothèses classiques de la Résistance des Matériaux (RdM), on écrit les équations d'équilibre appliquées à cette section où le moment de flexion est maximal. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par des essais expérimentaux.

Dans le dernier et cinquième chapitre, nous présenterons les essais de fatigue sur les consoles en béton armé renforcées par collage de tissus en fibres de carbone. Nous comparons les résultats obtenus par essais de fatigue sur les consoles en béton armé non renforcée et renforcée après un million de cycles. La fissuration et les modes de rupture seront exposés.

Nous terminons notre présentation par une perspective sur l'étude du renforcement des consoles courtes en béton armé par collage de matériaux composites.

1^{er} Chapitre

Étude bibliographique

Chapitre 1 Étude bibliographique

Les structures en béton armé ou en béton précontraint comme les ponts et les bâtiments (Figure 1-1), sont principalement composées d'éléments comme des poutres, des poteaux, des consoles courtes (Figure 1-2) et etc. Ces structures ont une durée de vie variant de 50 à 100 ans. En effet, dans de nombreuses régions du monde, la détérioration des ponts, des garages de stationnement en béton armé ou en béton armé précontraint a atteint des proportions alarmantes.

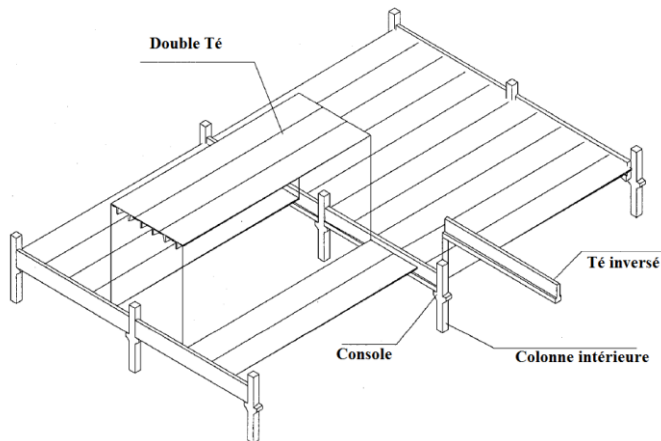


Figure 1-1: Prototype d'un garage de voiture où on voit l'utilité des consoles courtes en béton armé



Figure 1-2: Console courte dans une construction d'habitation

Ces dernières années, beaucoup de recherches ont été menées sur de nombreux aspects liés à l'utilisation de matériaux composites pour la réhabilitation et le renforcement des structures en Génie Civil. Le confinement des colonnes de béton à l'aide des tissus composites, le renforcement ou la réparation des poutres en béton sont parmi les thèmes de recherche considérés.

1.1 INTRODUCTION

La console courte en béton armé qui constitue par ailleurs un élément fréquemment utilisé dans le bâtiment ou dans les travaux publics. De nombreux travaux ont été réalisés sur les méthodes de dimensionnement et le comportement des consoles courtes en béton armé.

Cependant, la plupart des travaux de recherches ont été menées sur des consoles de géométries différentes soumises à une charge axiale ou sur les modèles de cisaillement pour se rapprocher plus du fonctionnement d'une console courte. Il y a peu de travaux de recherche sur le renforcement des consoles courtes par collage de matériaux composites.

Aucune recherche n'a été signalée dans la littérature sur le comportement dynamique des consoles courtes renforcées par collage de matériaux composites en fibres de carbone.

Nous présentons dans ce 1^{er} chapitre, un résumé des travaux sur les consoles courtes en béton armé, les problèmes liés à la pathologie des ouvrages en béton et en fin le bilan sur les travaux effectués sur le renforcement et la réparation des consoles courtes en béton armé.

1.2 TRAVAUX SUR LES CONSOLES COURTES

1.2.1 Définition

Une console courte en béton armé est une poutre dont le rapport entre la distance du point d'application de la charge P jusqu'à la section d'encastrement a et la hauteur utile d est inférieur ou égal à 1, Figure 1-3.

Les Figure 1-4 et 1-5 montrent un exemple d'appuis direct et indirect. Notre étude porte sur l'appui direct avec a qui représente la distance du point d'application de la résultante de la charge à la section d'encastrement (a ne doit pas être sous-évalué), l : longueur sur laquelle la charge appliquée est uniformément répartie.

$$\frac{a}{d} \leq 1$$

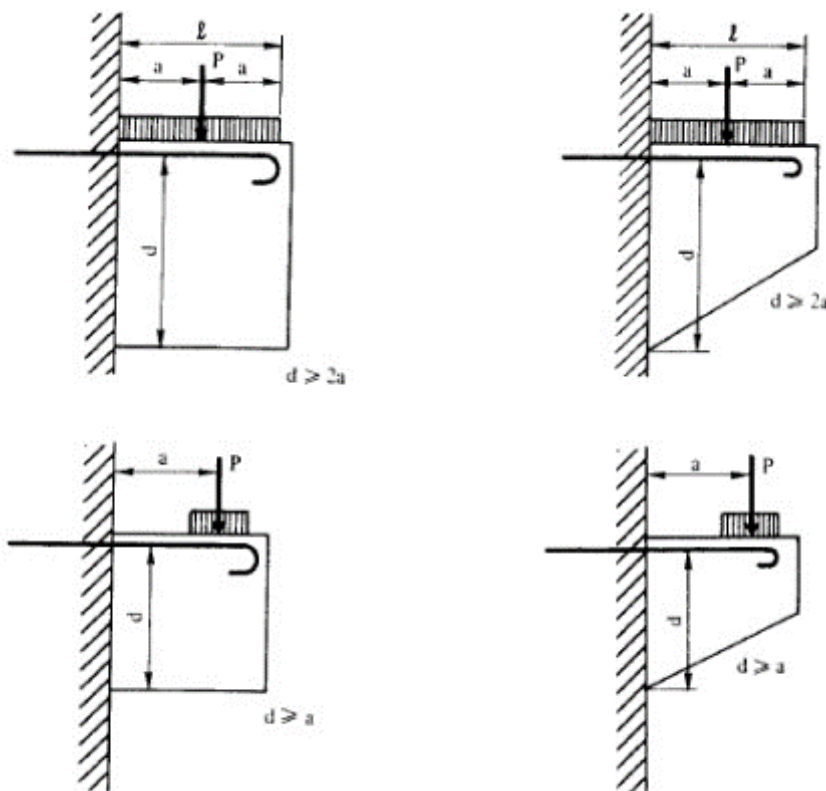


Figure 1-3: Consoles courtes

Lorsque la charge est directement appliquée au niveau de l'extrados de la console, on a un appui direct (Figure 1-4). Dans le cas contraire, on a un appui indirect (Figure 1-5). C'est le cas par exemple d'une console courte supportant une poutre, lorsque le volume de la console est noyé dans la poutre.

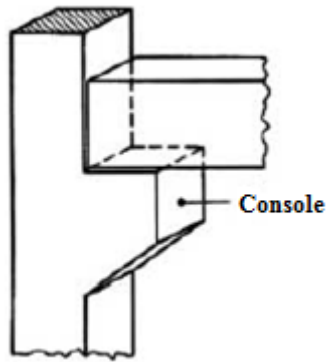


Figure 1-4 : Appui direct

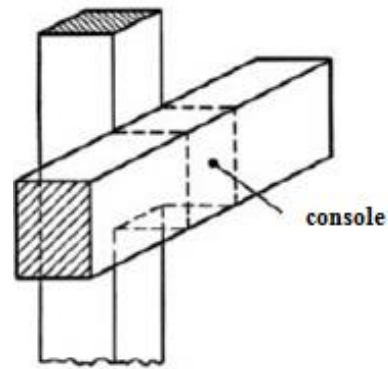


Figure 1-5 : Appui indirect

En effet, la Figure 1-6 montre un exemple d'application des structures en béton armé où on se sert des éléments « consoles courtes en béton armé » pour supporter des éléments importants.



Figure 1-6 : Pont Rio-Antirion, en Grèce [photo prise sur internet]

Il existe principalement trois types de consoles courtes Figure 1-7 consoles courtes sans poteaux, deux consoles courtes symétriques avec un poteau, consoles courtes non-symétriques. La concentration des contraintes induite par le poids des poutres sur les petites surfaces portantes sur les consoles peut provoquer parfois des fissures dans les structures. Bien évidemment qu'il est important d'apporter une attention particulière à ces éléments qui sont les consoles courtes.

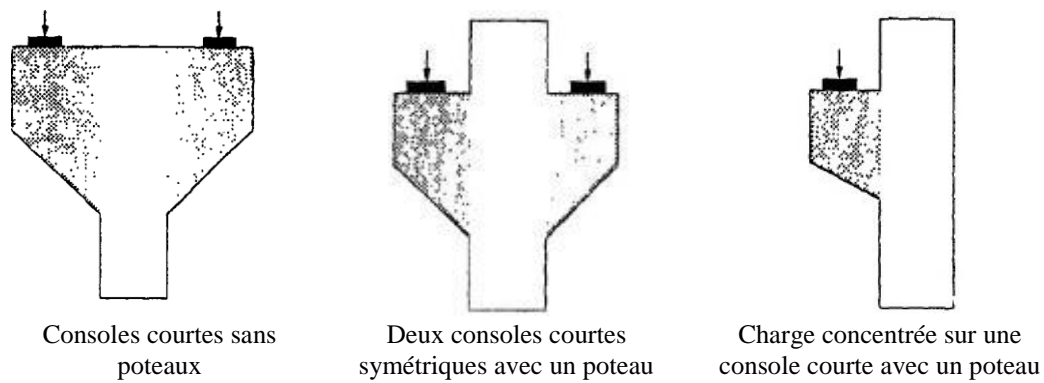


Figure 1-7: Différentes géométries de consoles courtes

1.2.2 Historique de consoles courtes en béton armé

Les premiers travaux sur les consoles courtes en béton armé avaient été effectués par Chambaud [CHA 53] en 1953 puis Birkland en 1966; Robinson et Hoang en 1968 [HOA 68, ROB 69]. Chambaud proposa une méthode fondée sur la transmission des charges à la section d'encastrement par des bielles inclinées de 45° (Figure 1-8). Il préconisa de répartir les aciers horizontaux sur toute la hauteur.

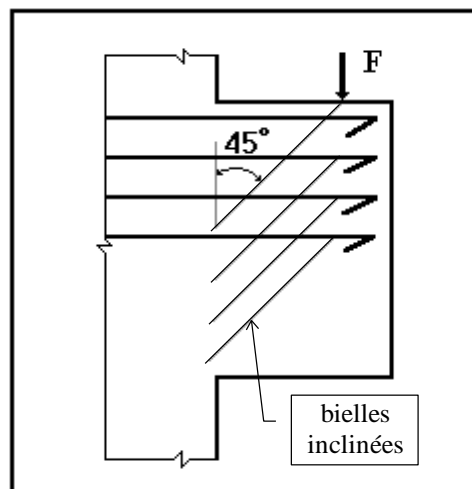


Figure 1-8: Transmission des efforts par des bielles inclinées de 45° [CHA 53]

Dans l'approche traditionnelle du renforcement des consoles, certains disposaient les armatures comme l'indique dans la Figure 1-9, afin de reprendre substantiellement les efforts de cisaillement.

Dans leurs travaux, **Franz et Niedenhoff** [NIE 61] ont montré que le renforcement des armatures en acier inclinées n'est pas efficace. Selon les travaux de Niedenhoff [NIE 61], le schéma mécanique de fonctionnement d'une console courte en béton armé, après fissuration,

correspond à un système triangulaire. Par contre, Mehmel [MEH 67] indique que ce fonctionnement correspond à un système de treillis statiquement indéterminé.

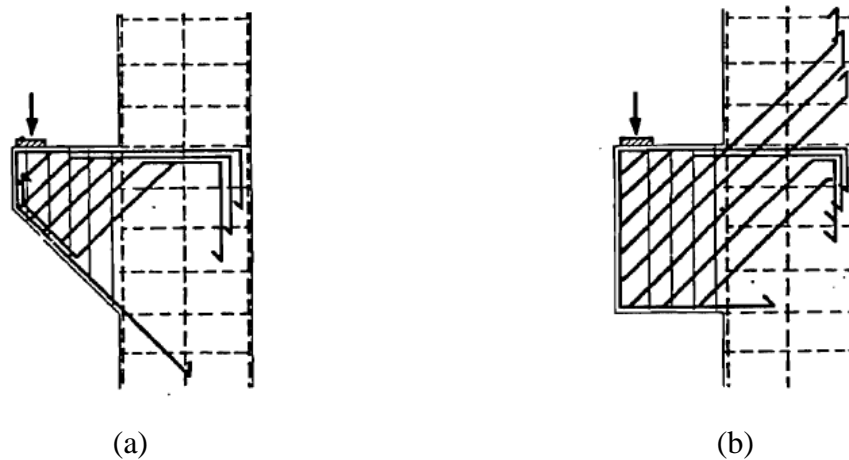


Figure 1-9: Renforcement des consoles courtes aux contraintes de cisaillement, [NIE 61]

Les résultats expérimentaux obtenus par Hoang [HOA 68] n'avaient pas permis de confirmer le schéma de la résistance mécanique illustré par Chambaud.

En 1965, **Kriz & Raths** ont entrepris une vaste étude expérimentale sur le comportement des consoles courtes renforcées de béton. Le but de cette étude était d'élaborer les critères de conception des consoles. La méthode de conception existante donnée par le code ACI ne fait aucune distinction entre les consoles et les autres éléments tels que des poutres ou des dalles, qui sont très différentes des consoles.

En effet, 195 consoles avaient été analysées, dont 124 ont été sollicitées verticalement, tandis que les 71 autres consoles sont sollicitées à la fois verticalement et horizontalement. Les détails de la console courte sont présentés dans la Figure 1-10 et la Figure 1-11. Les paramètres dans leur étude ont porté sur:

- la résistance du béton,
- le rapport a/d ,
- le rapport entre la charge horizontale et la charge verticale,
- le rapport entre les armatures principales en traction et les cadres horizontaux,

Ces travaux de recherche montrent que:

- la résistance de la console courte en béton armé a été considérablement réduite par la présence d'une force horizontale agissant sur la surface de la section du béton,

- la résistance d'une console (soumis à des charges verticales) peut être augmentée en ajoutant les armatures en traction et /ou des cadres en acier horizontaux.

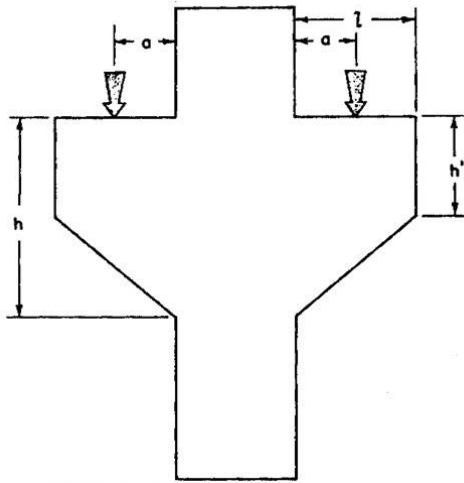


Figure 1-10: Géométrie des consoles utilisées par Kriz et Raths [KRI 65]

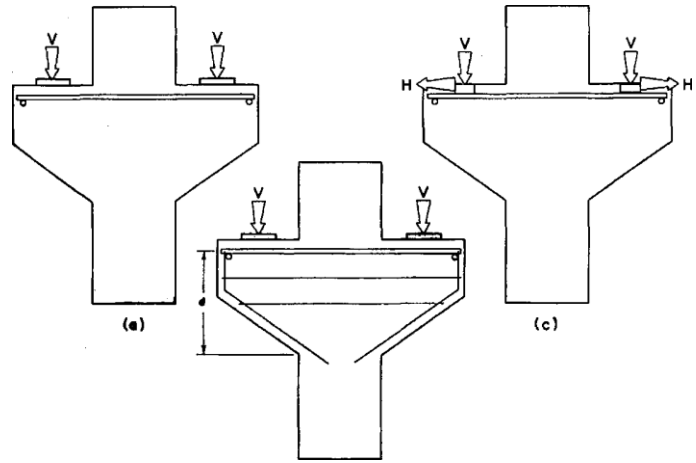


Figure 1-11: Les détails des différentes configurations étudiés par Kriz et Raths [KRI 65]

Kriz & Raths proposaient la formule suivante pour estimer la charge ultime de la console courte :

- Pour les consoles soumises à des charges verticales

$$V_u = 6,5bd\sqrt{f'_c}(1 - 0,5^{d/a})(1000\rho)^{1/3} \quad (1-1)$$

- Pour les consoles soumises à la fois la charge verticale et horizontale

$$V_u = 6,5bd\sqrt{f'_c}(1 - 0,5^{d/a})\left(\frac{1000\rho^{(1/3+0,4(H/V))}}{10^{0,8(H/V)}}\right) \quad (1-2)$$

où V_u = charge ultime,

b = largeur de la console,

d = hauteur effective,

f'_c = résistance du béton à la compression,

H = charge horizontale,

V = charge verticale,

ρ = taux d'armature

Le taux d'armature, ρ est défini différemment dans chacune des équations ci-dessus:

$$\text{Pour } \left(\frac{H}{V} = 0\right) \rightarrow \rho = \left(\frac{A_s + A_v}{bd}\right) \quad (1-3)$$

$$\text{Pour } \left(\frac{H}{V} \neq 0\right) \rightarrow \rho = \left(\frac{A_s}{bd}\right) \quad (1-4)$$

A_s est l'aire de la section du renforcement en traction,

A_v est l'aire de la section de cadres horizontaux

Mast [MAS 68] a proposé une théorie du cisaillement par friction à partir des travaux de Kriz et Raths. Il montre que :

- la théorie du cisaillement par friction peut être appliquée directement aux consoles lorsque le rapport a/d est inférieur à 0,7.
- Lorsque le rapport a/d est supérieur à 0,7, la rupture de la console courte peut être provoquée par flexion.
- Des renforcements en acier de traction doivent être placés dans la moitié supérieure de l'encorbellement afin d'empêcher le fractionnement prématuré de l'encorbellement.

Mast a proposé l'équation suivante pour déterminer la charge ultime V_u :

$$V_u = (A_{sv} f_y - H)(\tan \alpha_f) \quad (1-5)$$

où H = force horizontale

A_{sv} = surface totale de section transversale de renfort à travers l'interface console-poteau,

f_y = limite élastique de l'acier,

α_f = angle de frottement interne déterminé à partir des essais,

- $\alpha_f = 1,4$; interface béton-béton (surface rugueuse)

- $\alpha_f = 1,0$; interface béton-acier (section mixte).

L'équation (1-5) est valable lorsque les conditions suivantes sont assurées:

- pas de fissures d'interface entre l'acier et le béton,
- la résistance de cohésion du béton est négligée,
- l'angle de frottement interne est indépendant à la fois du béton et de la contrainte appliquée sur le béton.

Park et Paulay [PAR 75] ont développé une procédure de dimensionnement simple (Figure 1-12). Ils indiquent que dans les consoles peu armées, la fissure de flexion critique sur la colonne peut se propager à proximité du bord de la zone de compression, entraînant ensuite une rupture par cisaillement.

En raison de l'importance des consoles dans les principaux éléments structuraux, ils ont recommandé que les consoles soient conçues pour avoir une résistance qui dépasse la capacité de l'élément qu'ils soutiennent.

Dans la plupart des cas, le bras de levier interne peut être estimé à $z = 0.85d$ (Figure 1-12).

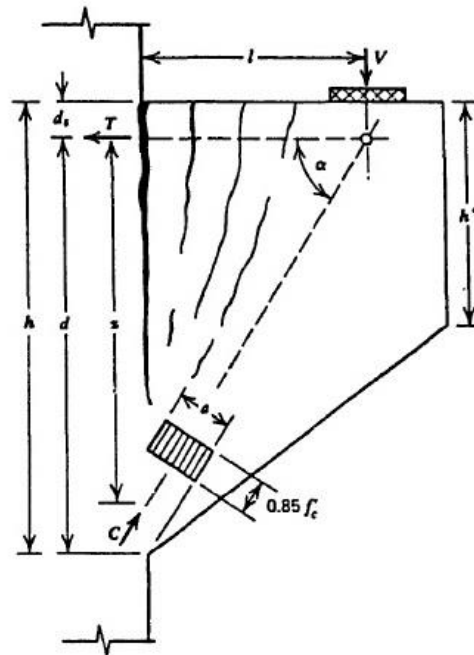


Figure 1-12 : Les forces internes et dimensions principales utilisées par Park et Paulay [PAR 75]

La force C, à l'appui de la compression, peut être déterminée par:

$$C = 0.85abf'_c = \frac{T}{\cos \alpha} = \frac{A_s f_y}{\cos \alpha} = \frac{V}{\sin \alpha} \quad (1-6)$$

$$\text{où : } a = \frac{A_s f_y}{0.85.b.\cos \alpha.f'_c}; \quad z = d - \frac{a}{2 \cos \alpha}; \quad \tan \alpha = \frac{z}{l};$$

avec

f_y = limite d'élasticité de l'acier,

C = force de la colonne comprimée du béton,

V = charge verticale appliquée,

T = contrainte dans l'armature principale de traction,

a = largeur de la colonne de béton comprimé,

b = largeur totale de la console,

d = hauteur effective de la console,

l = distance entre la section d'encastrement et le point de chargement.

La superficie requise de renforcement dans le principal élément de traction, (le tirant), est donnée par :

$$A_s = \frac{Vl}{z \cdot f_y} \quad (1-7)$$

Il est suggéré que la section des aciers horizontaux supplémentaires, devrait être obtenue en considérant les deux tiers de la hauteur de la console par la section des aciers supérieurs soit:

$$A_h \geq 0.25A_s \quad (1-8)$$

En 1974, Mattock [MAT 74] propose une autre méthode du cisaillement pour déterminer la charge ultime au cisaillement (Figure 1-13).

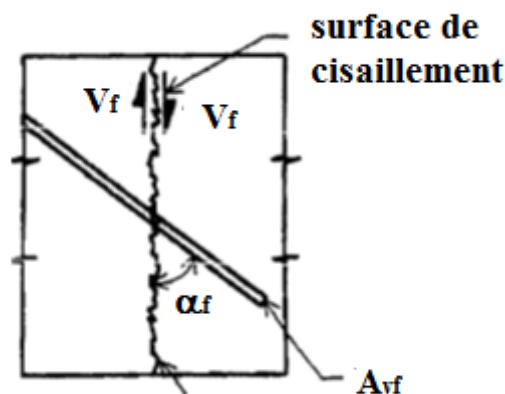


Figure 1-13: Modèle de cisaillement avec le renfort proposé par Mattock [MAT 74]

La position de l'armature principale se trouve à un angle α_f par rapport au plan de cisaillement. Mattock détermine la capacité maximale au cisaillement en utilisant la formule suivante:

$$V_u = A_{vf} f_y (\mu \sin \alpha_f + \cos \alpha_f) \quad (1-9)$$

V_u = charge ultime de cisaillement,

A_{vf} = surface de section transversale du renfort verticale,

f_y = limite d'élasticité de l'acier d'armature,

μ = coefficient de frottement utilisé dans les calculs de frottement de cisaillement,

α_f = angle entre l'armature et le plan de cisaillement.

Mattock a aussi montré qu'un moment appliqué sur une section fissurée ne réduit pas le cisaillement qui peut être transféré à travers la fissure. Le rapport a/d limité à 0,5 comme le recommande par l'ACI 318-71 était injustifiée par rapport à la conception de la console.

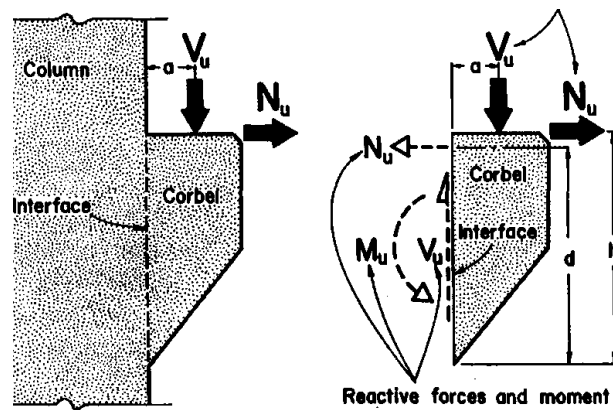


Figure 1-14 : Modèle proposé à la flexion par Mattock [MAT 74] [MAT 76]

Beaucoup d'autres chercheurs ont développé cette méthode et de nombreux programmes expérimentaux ont été effectués pour vérifier la validité de cette méthode. Les résultats des essais de Mattock [MAT 76] améliorent la théorie de rupture au cisaillement en prenant en considération les résultats expérimentaux. À partir de ces résultats, la théorie « Modified Shear Friction » a été développée.

Cette théorie considère la console courte comme un corps continu entre la colonne et l'encorbellement. La console est dimensionnée pour résister à une combinaison de charges verticales et horizontales en utilisant les lois de la statique:

$$M_u = V_u a + N_u (h - d) \quad (1-10)$$

où

M_u : moment ultime,

N_u = effort ultime horizontale,

V_u = effort ultime verticale,

h = hauteur totale de la console,

d = distance à partir de la fibre de compression extrême à son centre de gravité du renforcement en traction,

a = portée en cisaillement, la distance entre la charge verticale et la colonne.

Dans son approche de la résolution du problème, Mattock proposa que le dimensionnement de console basé sur « la résistance ultime utile » pour maintenir une marge de sécurité contre de grandes ouvertures de fissures (largeur des fissures ne doit pas dépasser 0,33 mm pour les structures exposées à l'extérieur et 0,41mm pour les structures exposées à l'intérieure). La résistance ultime utile a été définie comme la charge verticale à la section des armatures tendues.

Hermansen & Cowan [HER (74), (75)] ont montré que la théorie de cisaillement modifiée donne une plus grande précision que la théorie du cisaillement par frottement, en particulier dans le cas de taux du renforcement faible. Ils considèrent trois principaux modes de rupture comme étant dû à l'absence de cisaillement: la rupture à la flexion, et d'autres ruptures secondaires (ancrage, d'appui).

Les travaux de cisaillement effectués par Mattock et Hermansen [HER 75] ont montré que la contrainte de cisaillement ultime, V_u , pour une rupture par cisaillement pur d'une console en béton non fissurée est la suivante:

$$V_u = 4,0 + 0,8\rho f_y \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1-11)$$

L'équation ci-dessus peut être écrite sous la forme générale:

$$V_u = c + \rho f_y \tan(\alpha_f) \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1-12)$$

où c : contrainte apparente cohésive

$\tan(\alpha_f)$: coefficient de frottement.

Cette équation suppose que la quantité de renfort en traction pour empêcher une rupture par cisaillement dans un encorbellement portant une charge verticale V_u , est:

$$A_{sm} = \frac{V_u - cbd}{\tan(\alpha_f) f_y} \quad (1-13)$$

La rupture à la flexion est due à la plastification de l'armature principale ou dû à un écrasement ou déformation du béton à la compression. L'effort peut être calculé avec une précision raisonnable pour un a/d inférieur à 2,0. Par analogie aux treillis, la section des aciers A_{sf} pour éviter la rupture à la flexion est donnée par :

$$A_{sf} = \frac{V_u a}{d f_y} \quad (1-14)$$

Mattock indiquait que sa méthode de dimensionnement offre les avantages suivants:

- le concept est simple et évite de complexes équations empiriques,
- par rapport à la méthode du cisaillement par frottement, le modèle prédit des résultats moins conservateurs.

Une autre approche pour le dimensionnement des consoles courtes basée sur la méthode analogique aux treillis est proposée par Leonhardt et Moning en 1975 [LEO 75]. En 1987, les travaux réalisés par Fattuhi et puis par Abdul-Wahab sur l'influence des barres d'acier, montrent clairement que l'ajout d'acier améliore le comportement des consoles courtes et augmente la charge portante des éléments en béton armé.

Khadraoui [KHA 98], dans ses travaux de thèse, proposait une configuration de console courte en béton armé sous forme trapézoïdale. L'inclinaison de la face inférieure est choisie de

telle manière que la hauteur de la section contenant le point d'application de la résultante des charges, soit supérieure ou égale à la moitié de la hauteur de la section d'encastrement pour toutes les portées de cisaillement testées.

Les résultats de ces travaux ont permis de mettre en évidence les différents types de fissuration observés et de proposer un modèle analytique en utilisant la théorie de l'endommagement proposée par Mazars [MAZ 84].

Dans les parties suivantes, nous présentons dans un premier temps les méthodes du dimensionnement des consoles courtes en béton armé, ensuite les travaux de recherche effectués sur le renforcement des consoles courtes en béton armé par collage de matériaux composites.

1.2.3 Modèles analytiques de consoles courtes en béton armé

1.2.3.1 Approche du modèle de Robinson par Khadraoui [KHA, 98]

En fondant sur des résultats expérimentaux, Robinson a proposé un modèle semi-empirique qui permet d'estimer la charge ultime et la contrainte de cisaillement des consoles courtes en béton armé. Les hypothèses de ce modèle sont:

- La console tourne autour d'un axe normal à son plan moyen et situé, par rapport au tirant, à une distance égale à $7d/8$;
- La résultante des efforts de compression et de cisaillement agissants sur la partie inférieure de la section d'encastrement passe par cet axe. Cette approximation permet de simplifier le calcul en éliminant l'effet de la répartition des contraintes de compression et des contraintes tangentes à la base de la section d'encastrement.
- La contrainte de traction sur chaque armature (tirant et cadres horizontaux en acier) est proportionnelle à la distance entre cette armature et l'axe de rotation.
- A l'état ultime, le tirant atteint sa limite d'élasticité f_y ;
- Le béton tendu n'équilibre aucun effort.

Robinson considère que la rupture de la console courte se produit lorsque les armatures du tirant atteignent leur limite élastique conventionnelle ($\sigma_{st} = f_y$). D'où l'expression de la charge ultime théorique :

$$F_{u,th} = (1 + X_c) \frac{7d}{8a} A_s f_y \quad (1-15)$$

$$\text{avec : } X_c = \frac{64}{49d^2} \frac{A_h}{A_s} \sum_i y_i^2 \quad (1-16)$$

où a = la distance de la section au point d'application de la force,

f_y = limite élastique de l'acier

A_h = aire de la section des cadres horizontaux en acier

y_i = position de l'axe neutre.

La quantité X_c représente, pour une section du tirant (A_s) et une hauteur (d) constantes, l'influence de la répartition des cadres horizontaux et de leur section sur la charge de rupture ultime.

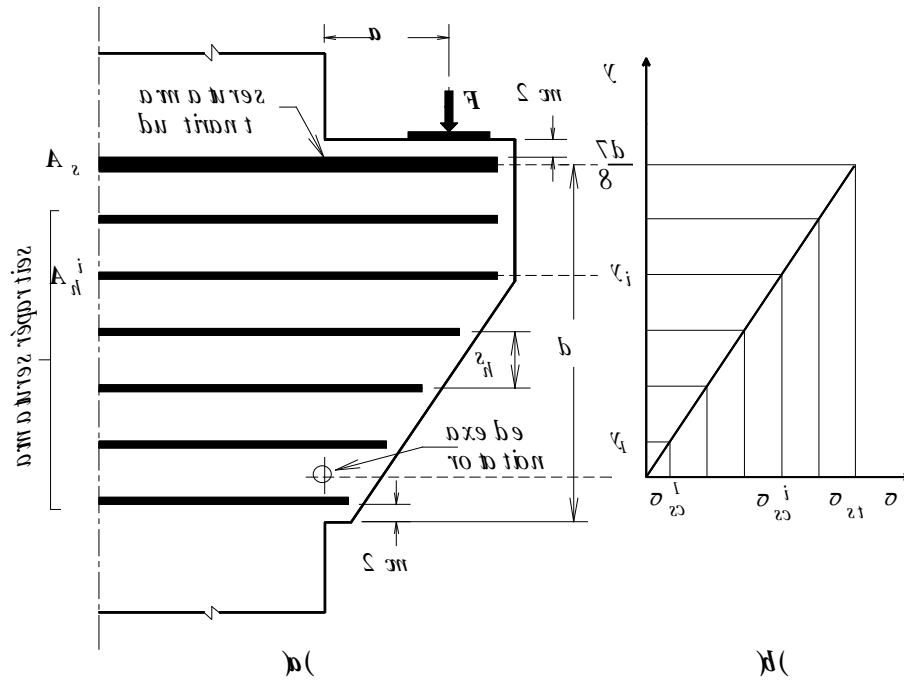


Figure 1-15: (a) Répartition des armatures et position de l'axe de rotation (b) Diagramme linéaire des contraintes sur les armatures à la section d'encastrement, [ROB 69]

La contrainte de cisaillement conventionnelle ultime $\tau_{u,th}$ peut être estimée par :

$$\tau_{u,th} = \frac{F_{u,th}}{bd} = (1 + X_c) \frac{7}{8} \frac{1}{\lambda} \rho_s f_y \quad (1-17)$$

$$\text{avec le taux d'acier:} \quad \rho_s = \frac{A_s}{bd} \quad (1-18)$$

Pour la console sans cadres ($A_h=0$), la contrainte de cisaillement conventionnelle ultime s'exprime par :

$$\tau_{u,th}^0 = \frac{F_{u,th}}{bd} = \frac{7}{8} \frac{1}{\lambda} \rho_s f_y \quad (1-19)$$

Et la contrainte de cisaillement conventionnelle ultime pour les consoles avec cadres horizontaux devient:

$$\tau_{u,th} = (1 + X_c) \tau_{u,th}^0 \quad (1-20)$$

Le modèle de Robinson ne tient pas compte d'influence de la résistance du béton et la limite élastique de l'acier sur la performance d'une console courte en béton armé.

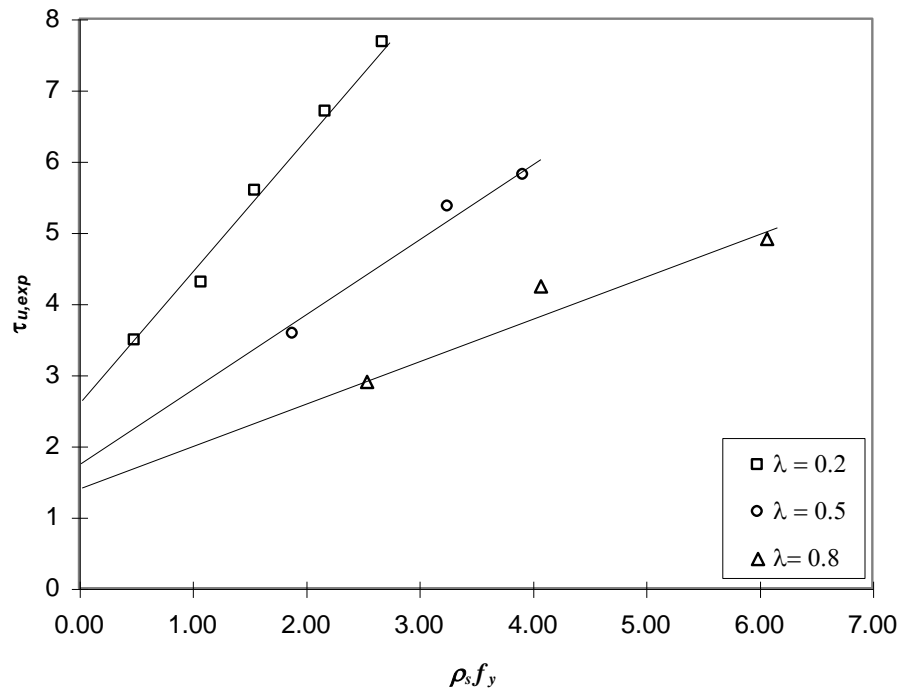


Figure 1-16 . Courbes de la contrainte conventionnelle ultime expérimentale en fonction de ($\rho_s f_y$) pour $\lambda = 0,2; 0,5; 0,8$ et $f_c \approx 30$ MPa, [KHA 98]

Dans son travail, Khadraoui a montré que la contrainte de rupture d'une console courte est une fonction affine de la variable ($\rho_s f_y$), soit :

$$\tau_{u,th}^0 = g(\lambda, f_c) \rho_s f_y + \tau'(\lambda, f_c) \quad (1-21)$$

Où les fonctions g et τ' dépendent de λ et f_c . La fonction τ' représente la contrainte supportée par le béton à la base de la section d'encastrement.

De plus la fonction g approximée par une fonction g' telle que :

$$g'(\lambda, f_c) = \frac{7}{8} \frac{\ell}{\lambda} \quad (1-22)$$

n'est pas justifiée.

Dans le cas des consoles courtes sans cadres horizontaux, la relation entre la contrainte au cisaillement ultime critique $\tau_{u,inf}$ et la contrainte au cisaillement ultime théorique $\tau_{u,th}$ peut être déterminée par

$$\tau_{u,inf} = \tau_{u,th} (1.25 - 0.08 \tau_{u,th}) \quad (1-23)$$

Dans cette relation les contraintes $\tau_{u,inf}$ et $\tau_{u,th}$ sont exprimées en MPa.

Dans le cas des consoles courtes avec cadres horizontaux et $0.5 \leq \lambda \leq 0.8$, $0.359\% \leq \rho_s \leq 1.436\%$.

Le rapport $\tau_{u,exp}/\tau_{u,th}$ peut s'écrire de la manière suivante :

$$\tau_{u,inf} = \tau_{u,th} (1.30 - 0.06\tau_{u,th}) \quad (1-24)$$

Dans cette relation, les contraintes $\tau_{u,inf}$ et $\tau_{u,th}$ sont exprimées en MPa.

Dans la condition que la résistance du béton à la compression est inférieure ou égale à 30 MPa, la contrainte au cisaillement ultime $\tau_{u,th}$ peut être déterminée par l'expression suivante :

$$\tau_{u,th} = \sqrt{\frac{f_c}{30}} (1 + X_c) \frac{7}{8} \frac{1}{\lambda} \rho_s f_y \quad (1-25)$$

Les cadres horizontaux doivent être vérifiés par la condition suivante :

$$\sum A_h \geq [\text{sup}(0.88; 0.44 \frac{d}{a})] A_s \quad (1-26).$$

1.2.3.2 Modèles de Kriz et Raths

Kriz [KRI 65] a proposé de modéliser le comportement de tirant, après les premières fissures du béton dans la zone tendue, afin d'estimer la charge nominale de la structure correspondant au début de la fissuration et la charge correspondant à la plastification de tirant en acier. Cette méthode semi-empirique permet également de calculer la charge ultime de la console courte en béton armé.

1.2.3.2.1 Le corps d'épreuve

La configuration de la console courte utilisée par Kriz est montrée dans la Figure 1-17.

Les paramètres étudiés dans ses essais sont :

- la présence ou l'absence des cadres horizontaux en acier,
- le taux des armatures de tirant par rapport à l'aire de la section du béton ρ_s ,
- le taux des cadres horizontaux par rapport à l'aire de la section du béton ρ_h ,
- la résistance du béton à la compression f_c ,
- le rapport entre la hauteur efficace d et la distance a ($\lambda = a/d$),
- la longueur de répartition de la charge (l_p),
- la limite élastique de l'acier.

Les cadres horizontaux sont répartis sur une hauteur d' telle que :

$$d' = ms_h = \frac{2}{3} \left(\frac{m}{m+1} \right) d \quad (1-27)$$

où s_h est l'espacement entre deux cadres horizontaux;

m est le nombre de cadres horizontaux.

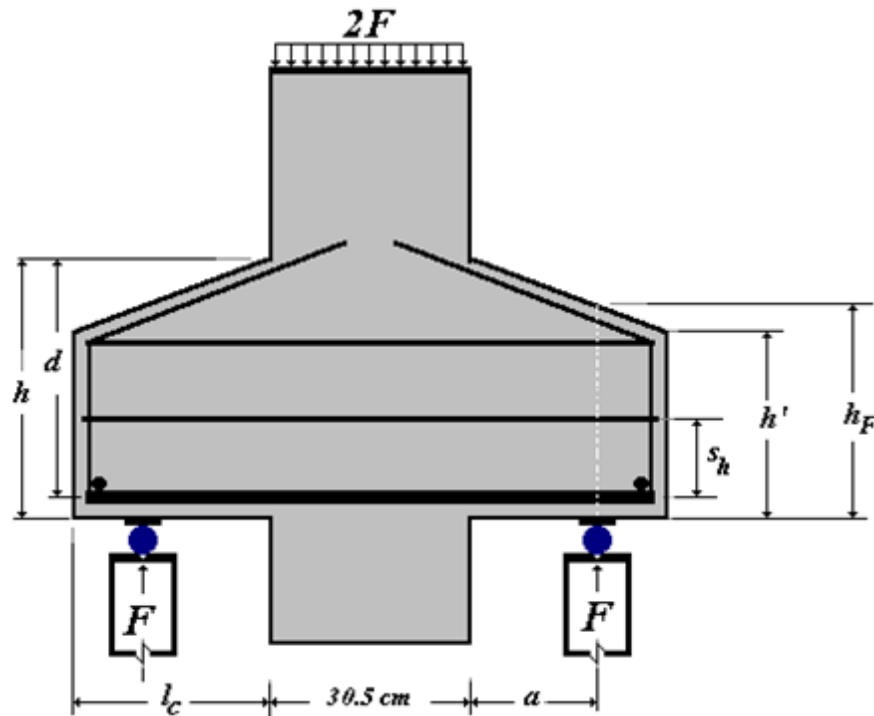


Figure 1-17 : Géométrie du corps d'épreuve [KRI 65].

Les intervalles de variation de chaque paramètre sont indiqués dans le tableau suivant :

Paramètres	b (cm)	a (cm)	h (cm)	h' (cm)	l _c (cm)	ρ _s (%)	ρ _h (%)	f _c (MPa)	f _y (MPa)
Intervalles de variation	20,3	7 à 31,8	45,7 à 114,3	15,2 à 66	15,2 à 60	0,21 à 1,86	0,34 à 0,93	14,6 à 46	275 à 660

Tableau 1-1: Variation des paramètres géométriques [KRI 65]

La section totale des cadres horizontaux $\sum A_h$ est prise supérieure ou égale au tiers de la section du tirant A_s . La longueur de répartition de la charge doit être suffisamment grande afin d'éviter l'écrasement local du béton sous la charge appliquée.

Dans la condition $h_F \geq \frac{h}{2}$; le comportement des consoles courtes ne dépend pas de l'inclinaison de leur plan inférieur [KRI 65]. h_F est la hauteur de la section se trouvant sous le point d'application de la charge.

1.2.3.2.2 Modélisation du comportement du tirant dans la phase de fissuration

Selon Kriz et Raths, le comportement mécanique global des consoles peut être distingué par trois phases (Figure 1-18) :

- Première phase linéaire jusqu'au début de la fissuration du béton dans la section tendue,
- Deuxième phase correspondant à la ligne droite après la fissuration du béton tendu et jusqu'au début de la plastification des armatures du tirant. Dans cette phase, l'effort de traction est totalement repris par les armatures. La rupture par la flexion-compression (FC), le fendage (D) où le cisaillement à l'encastrement (CE) peut apparaître dans cette phase avant le début de la plastification des armatures du tirant.
- Troisième phase peut exister, dans le cas où la quantité des cadres horizontaux et la résistance du béton sont suffisantes pour que la console supporte une augmentation de la charge appliquée, malgré la plastification du tirant. Dans cette troisième phase, la contrainte de traction reprise par le tirant est égale à la contrainte à la limite élastique des armatures (f_y). Kriz considère que cette phase correspond à l'état limite ultime et peut être modélisée par une droite :

$$F = q(A_s \sigma_{st}) + F_0 \quad (1-28)$$

avec :

F : charge appliquée

F_0 : charge nominale du début de la fissuration

σ_{st} : contrainte de traction des armatures supérieures (tirant)

q : pente de la droite

Par une analyse paramétrique, Kriz montre que la charge nominale du début de la fissuration (F_0) et la pente (q) peuvent se mettre sous les formes suivantes :

$$F_0 = \alpha_0 \cdot f_0(f_c) \cdot g_0(\lambda) \quad (1-29)$$

$$q = \beta_q \cdot b d \cdot f_q(f_c) \cdot g_q(\lambda) \quad (1-30)$$

Les formes des fonctions $f_0(f_c)$ et $f_q(f_c)$ d'une part, et des fonctions $g_0(\lambda)$ et $g_q(\lambda)$ d'autre part, sont déterminées par :

$$\begin{aligned}
f_0 &= \alpha_0' \sqrt[3]{f_c} \\
g_0 &= \alpha_0'' (\lambda)^{-k} \\
f_q &= \beta_q' \sqrt{f_c} \\
g_q &= \beta_q'' (c_4)^{-\lambda}
\end{aligned}
\tag{1-31}$$

F devient donc sous la forme suivante :

$$F = c_1 \cdot bd \cdot \lambda^{-c_2} \cdot \sqrt[3]{f_c} + c_3 \cdot (c_4)^{-\lambda} \cdot \sqrt{f_c} A_s \sigma_{st}
\tag{1-32}$$

En fondant sur les résultats expérimentaux, les valeurs des constantes numériques sont:

$$\begin{aligned}
c_1 &= 0.16 \\
c_2 &= \frac{5}{6} \\
c_3 &= \begin{cases} 0.31 & \text{pour les consoles sans cadres horizontaux} \\ 1.00 & \text{pour les consoles avec cadres horizontaux} \end{cases} \\
c_4 &= \begin{cases} 2.15 & \text{pour les consoles sans cadres horizontaux} \\ 10.0 & \text{pour les consoles avec cadres horizontaux} \end{cases}
\end{aligned}$$

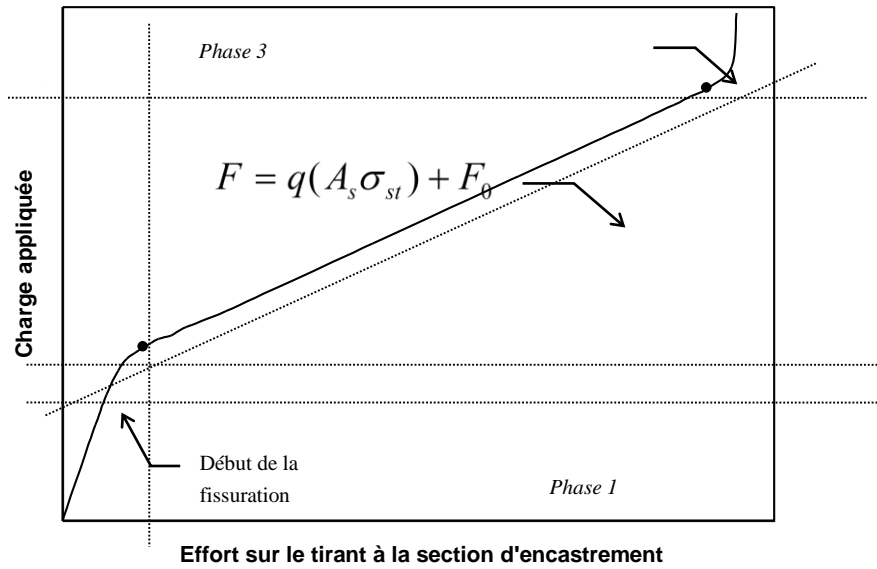


Figure 1-18 : Modélisation expérimentale du comportement du tirant à l'encastrement selon Kriz et Raths, [KRI 65]

La limite élastique de la contrainte de cisaillement conventionnelle est donnée par:

$$\tau_y = \frac{F_y}{bd} = c_1 \cdot \lambda^{-c_2} \cdot \sqrt[3]{f_c} + c_3 \cdot (c_4)^{-\lambda} \cdot \sqrt{f_c} \rho_s f_y
\tag{1-33}$$

τ_y et f_c exprimées en MPa.

La modélisation du comportement du tirant (phase 2) ne suffit pas pour prédire la charge de rupture. En effet, les trois modes de rupture (FC, D ou CE) peuvent se produire avant la plastification du tirant. De plus, il peut exister une troisième phase non linéaire dont le comportement est très difficile à modéliser. C'est pour cela que Kriz a proposé, simplement, une expression empirique de la charge de rupture pour les consoles armées avec des aciers de limite élastique voisine de 320 MPa, et dont le béton a une résistance à la compression comprise entre 15 et 47 MPa.

Kriz exprime la charge ultime de rupture F_u d'une console courte en béton armé en fonction de la largeur b , de la hauteur utile d , de la résistance du béton à la compression f_c , de la portée relative (λ) et du rapport entre la section totale des armatures et celle du béton à l'encastrement (ρ_{sh}).

$$F_u = Kbd\sqrt{f_c}f(\lambda)g(\rho_{sh}) \quad (1-34)$$

- F_u décroît rapidement lorsque λ augmente (λ très grand: cas de la flexion pure) et croît rapidement lorsque λ tend vers 0 ($\lambda=0$: cas du cisaillement pur).

- F_u croît dans l'intervalle de variation de ρ_{sh} .

Les fonctions f et g sont sous les formes suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} f(\lambda) = \xi_2(1 - K_2^{1/\lambda}) \\ g(\rho_{sh}) = \xi_3\rho_{sh}^{K_3} \end{array} \right\} \quad (1-35)$$

$$\text{où : } \quad \xi_2, \xi_3, K_3 > 0 \quad \text{et} \quad 0 < K_2 \leq 1$$

F_u peut donc s'écrire :

$$F_u = K_1bd\sqrt{f_c}(1 - K_2^{1/\lambda})\rho_{sh}^{K_3} \quad (1-36)$$

La contrainte de cisaillement ultime est alors :

$$\tau_u = 5.4\phi\sqrt{f_c}(1 - 0.5^{1/\lambda})\rho_{sh}^{1/3} \quad (1-37)$$

τ_u et f_c sont exprimées en MPa.

Le coefficient de réduction ϕ est :

$$\phi = \begin{cases} 0.81 & \text{pour les consoles sans cadres horizontaux} \\ 1.00 & \text{pour les consoles avec cadres horizontaux} \end{cases}$$

1.2.3.3 *Modèle de Niedenhoff*

Niedenhoff [NIE 61] a utilisé la méthode de la photoélasticité pour effectuer, au cours du chargement, la distribution des isostatiques de traction et de compression dans une console courte en béton armé. Cette méthode permet de déterminer l'état de déformation à la surface d'une structure recouverte de revêtements photoélastiques minces, par la mesure en lumière polarisée, de la biréfringence créée dans les recouvrements. L'étude est réalisée à l'aide d'un polariscope par réflexion. L'état de contrainte est ensuite déterminé à partir de l'état de déformation par application des lois de comportement du matériau composant la structure.

Niedenhoff déduit à partir de ces isostatiques, un schéma de la distribution des efforts internes dans les parties non fissurées de la console. Ce schéma permet d'obtenir la charge de la rupture ultime en considérant les matériaux, béton et acier, dans leur comportement global.

1.2.3.3.1 **Le tracé des isostatiques**

Le tracé des isostatiques de traction et de compression, dans une console courte en béton armé soumise à une charge verticale concentrée par l'intermédiaire d'un appui en néoprène [NIE 61] (Figure 1-19), montre :

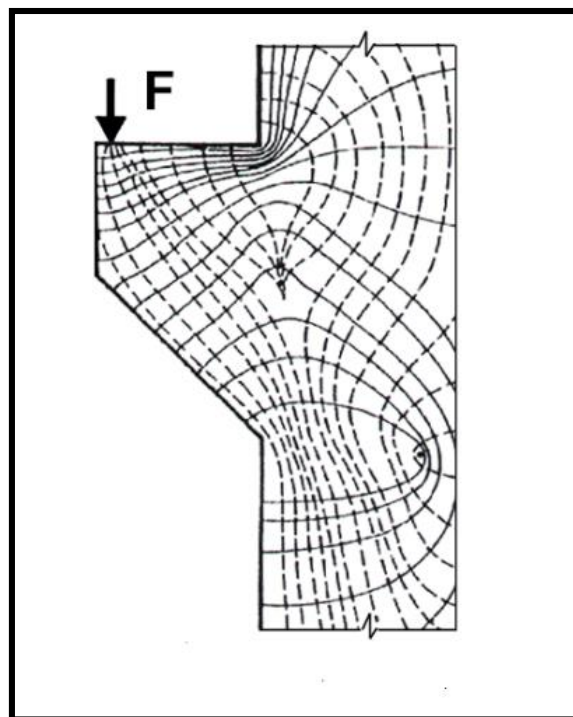


Figure 1-19 : Isostatiques de compression et de traction dans une console courte en béton armé sous chargement [NIE 61].

- Une concentration des isostatiques de traction (traits pleins) dans la partie supérieure de la console courte. Les isostatiques de traction, dans cette région, sont sensiblement parallèles à la face supérieure de la console.

- Une concentration des isostatiques de compression (en pointillés) au voisinage de la partie inférieure de la section d'encastrement.

- Lorsque ces isostatiques sont repérées sur une console courte de forme rectangulaire, le voisinage, de l'angle formé par la face parallèle à la section d'encastrement et la face inférieure de la console, n'est pratiquement pas sollicité. Ces isostatiques sont quasiment les mêmes que dans une console courte de forme trapézoïdale.

Les observations faites sur de nombreux essais ont permis à Niedenhoff de définir un mécanisme de fonctionnement, après fissuration, d'une console courte en béton armé. Ce fonctionnement correspond à une triangulation dans laquelle la rotation du système se fait dans la zone de concentration des isostatiques de compression avec déplacement sensiblement horizontal des fibres supérieures de la console courte.

Niedenhoff suggère donc de modéliser le mécanisme de fonctionnement d'une console courte en béton armé par un système triangulé comprenant un tirant horizontal constitué par des armatures supérieures tendues et une bielle inclinée de béton comprimé (Figure 1-20).

Le bras de levier (z) du système triangulé peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} z = k_z d \\ 0.5 \leq k_z < 1 \end{array} \right\} \quad (1-38)$$

k_z est un coefficient qui dépend des caractéristiques géométriques et mécaniques de la console.

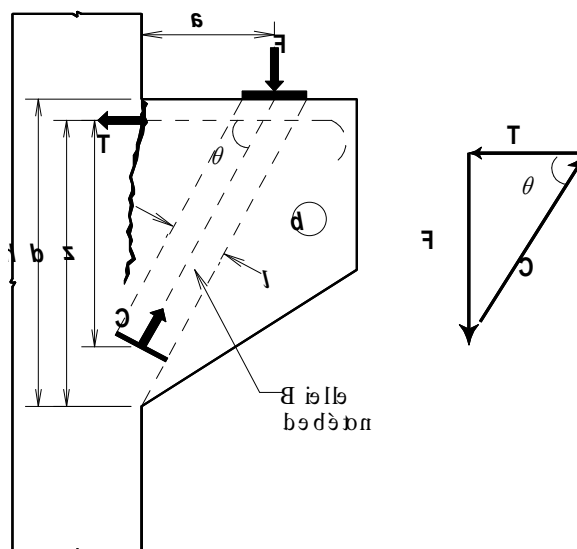


Figure 1-20 : Mécanisme de fonctionnement d'une console courte en béton armé [NIE 61]

Les isostatiques montrent que la zone, la plus sollicitée en compression, peut être modélisée par une bielle de béton comprimé dont la base est située dans la zone de concentration des contraintes de compression. Les contraintes de compression, à la base de la bielle inclinée, sont

sensiblement constantes sur toute la largeur l de la bielle. Cette largeur est déterminée par l'expression suivante :

$$l = 2(d - z) \cos \theta \quad (1-39)$$

θ : angle d'inclinaison de la bielle par rapport aux armatures du tirant.

La résultante des efforts de compression C dans la bielle inclinée d'un angle θ est :

$$C = lb\sigma_{bc} = 2(d - z)b\sigma_{bc} \cos \theta \quad (1-40)$$

σ_{bc} : contrainte moyenne dans la bielle comprimée.

L'équilibre statique du système triangulé entraîne :

$$\begin{cases} C \sin \theta - F = 0 \\ C \cos \theta - T = 0 \end{cases} \quad (1-41)$$

T représente l'effort dans le tirant à la charge F . Il est donné par la formule suivante :

$$T = A_s \sigma_{st} \quad (1-42)$$

Si on remplace C et T par leurs expressions données respectivement par les formules (1-40) et (1-42) dans le système d'équations de l'équilibre statique (1-41), on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2k_z d(1-k_z)\lambda}{k_z^2 + \lambda^2} b\sigma_{bc} - F = 0 \\ \frac{2d(1-k_z)\lambda^2}{k_z^2 + \lambda^2} b\sigma_{bc} - A_s \sigma_{st} = 0 \end{array} \right. \quad (1-43)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2k_z d(1-k_z)\lambda}{k_z^2 + \lambda^2} b\sigma_{bc} - F = 0 \\ \frac{2d(1-k_z)\lambda^2}{k_z^2 + \lambda^2} b\sigma_{bc} - A_s \sigma_{st} = 0 \end{array} \right. \quad (1-44)$$

La résolution de ce système permet de trouver les inconnues F et k_z qui dépendent de l'état de contrainte dans le tirant et dans la bielle de béton :

$$\left. \begin{array}{l} F = \frac{k_z}{\lambda} A_s \sigma_{st} \\ k_z = -\left(\frac{\lambda^2}{\rho_s} \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{st}} \right) + \sqrt{\left(\frac{\lambda^2}{\rho_s} \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{st}} \right)^2 + 2\left(\frac{\lambda^2}{\rho_s} \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{st}} \right) - \lambda^2} \end{array} \right\} \quad (1-45)$$

avec :

$$\lambda \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho_s}{\sigma_{bc}/\sigma_{st} - \rho_s}} \quad (1-46)$$

Les relations (1-45) ne permettent pas de décrire le comportement mécanique du tirant. En effet, pour déterminer la charge appliquée correspondante à une contrainte dans le tirant σ_{st} donnée, il faut connaître la valeur de k_z . Mais on ne peut pas déterminer k_z car on ne connaît

pas la contrainte dans la bielle de béton correspondante une contrainte dans le tirant donnée. Néanmoins, nous pouvons vérifier si, à l'état ultime de rupture, le fonctionnement d'une console courte correspond réellement à un système triangulé tel qu'il a été décrit ci-dessus. Pour cela, il faut confronter les résultats théoriques de ce modèle avec les résultats d'essais sur des consoles dont les contraintes, dans le tirant et dans la bielle, sont mesurées.

1.2.3.3.2 Analyse du modèle

Le modèle de Niedenhoff ne permet pas de décrire le comportement mécanique du tirant. Il ne permet pas non plus de prévoir les fissures pouvant survenir à l'intérieur du triangle constitué par la section d'encastrement, la bielle inclinée et le tirant.

Par contre, on peut l'utiliser pour dimensionner les consoles courtes à l'état ultime de rupture. Pour cela, Niedenhoff suggère de renforcer les consoles courtes par des armatures réparties, sous forme de cadres horizontaux, afin de couvrir les fissures et de frotter la bielle inclinée. Ces cadres horizontaux doivent avoir une section totale suffisamment grande pour que la contrainte de compression dans la bielle atteigne sa limite ultime après la plastification des armatures du tirant. Dans ce cas, le modèle de Niedenhoff permet de déterminer une limite inférieure de la charge de rupture. Il suffit de remplacer, dans les relations

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{k_z}{\lambda} A_s \sigma_{st} \\ k_z &= -\left(\frac{\lambda^2}{\rho_s} \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{st}}\right) + \sqrt{\left(\frac{\lambda^2}{\rho_s} \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{st}}\right)^2 + 2\left(\frac{\lambda^2}{\rho_s} \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{st}}\right) - \lambda^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-47)$$

σ_{st} par f_y et σ_{bc} par f_c .

On trouve :

$$F_u = \left(\sqrt{\left(\lambda \frac{f_c}{f_y}\right)^2 + 2\rho_s \frac{f_c}{f_y} - \rho_s^2} - \lambda \frac{f_c}{f_y} \right) b d f_y \quad (1-48)$$

$$\text{avec :} \quad \lambda \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho_s}{f_c/f_y - \rho_s}} \quad (1-49)$$

Nous avons vérifié, en utilisant les essais de Kriz (Tableau 1-1) que la relation (1-48) donne bien une limite inférieure de la charge de rupture des consoles dont la section totale des cadres horizontaux est supérieure ou égale au tiers de la section du tirant. En effet, pour toutes ces consoles, le rapport ($F_{u,exp}/F_{u,cal}$) entre la charge de rupture expérimentale et celle calculée par la relation (1-48) est supérieur à 1. La moyenne et l'écart type de ce rapport sont respectivement de 1,23 et 0,14. Par conséquent la relation (1-48) sous-estime largement la charge de rupture.

1.2.4 Mécanisme de fissuration du béton armé

Le mécanisme de la fissuration de consoles courtes sous chargement statique avait été analysé par Walraven et al. en 1981 [WAL 81]. Les équations pour prédire la charge portante ultime avaient été également proposées. Les résultats montrent que la résistance d'une console courte dépend à la fois du taux du renforcement et de la résistance du béton.

Les essais réalisés par Zielinski [ZIE 71 72 73] ont quatre causes fondamentales de la rupture du béton. Figure 1-1 illustre les quatre cas :

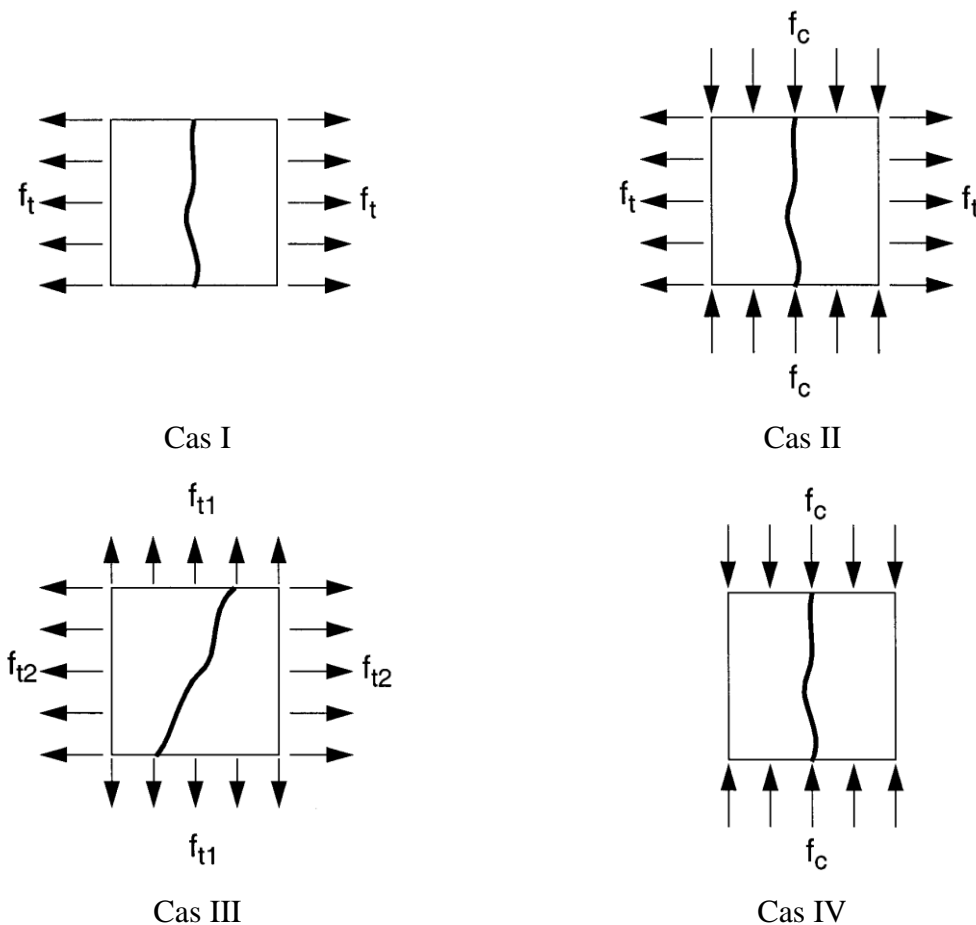


Figure 1-21 : Modes de fissuration du béton normal ('concrete73')

Cas I : Sous traction uniaxiale, la rupture du béton survient par une fissure perpendiculaire à la direction de traction.

Cas II : Sous traction et compression biaxiales, la rupture du béton survient par une fissure perpendiculaire à la direction de traction. La contrainte du béton sous traction-compression biaxiales est inférieure à celle sous compression uniaxiale.

Cas III : Sous traction biaxiale, la rupture survient par une fissure inclinée. L'angle de rupture varie de 45° à 90° par rapport à l'ensemble de cas de chargement. Dans le cas de

contraintes de traction égales, la rupture se produit à un angle de 45° . La résistance du béton sous traction biaxiale est environ $3/4$ de la charge en traction uniaxiale.

Cas IV : Sous compression uniaxiale, le béton se dégrade par la perte de cohésion et apparition de fissures parallèles à la charge. Dans le cas d'une compression biaxiale, la résistance du béton est supérieure (jusqu'à $1,25f_b$) que sous chargement uniaxial.

La rupture par traction se produit lorsque la déformation dans le sens de traction atteint $\varepsilon_{ct}=0,0015$. La rupture par compression se produit lorsque la déformation ultime atteint $\varepsilon_{cu}=0,0035$.

Plusieurs configurations (Figure 1-23) de console courte avaient été étudiées par Robinson. L'angle incliné par rapport à l'horizontal varie de 30° à 90° . La première fissure due à la flexion s'amorce à la partie supérieure de la jonction de la console avec le poteau et progresse vers l'intérieur du poteau (Figure 1-22).

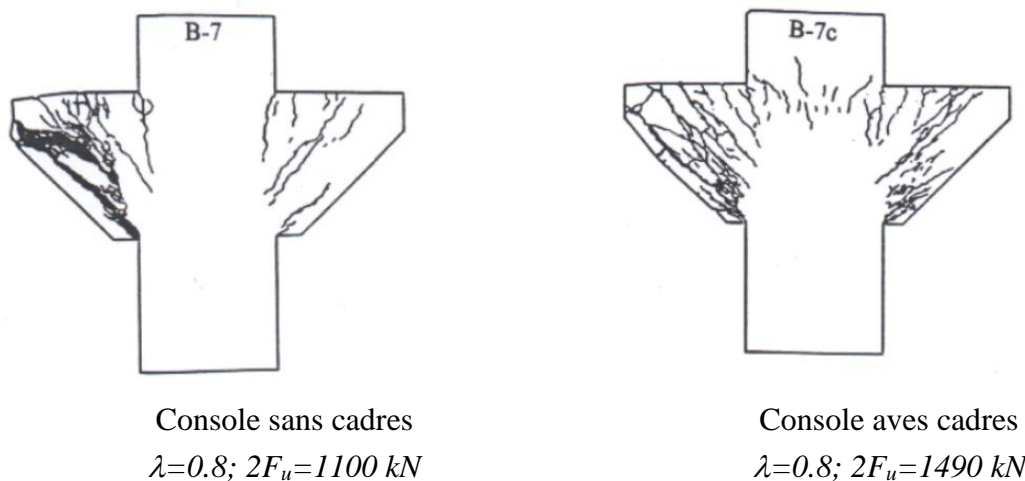


Figure 1-22 : Fissuration de consoles avec et sans cadres horizontaux ; selon [ROB 69]

Les résultats montrent que les fissures à l'encastrement ne deviennent jamais critiques. Lorsque les armatures du tirant atteignent leur limite élastique, la ruine de la console survient par d'autres fissures apparaissant sous la surface d'application de la charge et progressant obliquement vers la zone comprimée.

En effet, la configuration des fissures ne dépend pas de la configuration des consoles. En revanche, ces fissures sont plus fines et plus nombreuses pour les consoles munies de cadres horizontaux que pour celles qui n'en comportent pas.

Les résultats montrent aussi que la rupture se produit brutalement si la console ne comporte pas de cadres horizontaux. Cependant, elle est au contraire progressive et lente pour une console ayant des cadres horizontaux. La présence des cadres dans une console courte en béton armé

permet de limiter l'ouverture des fissures et d'augmenter la charge de la rupture ultime. La charge de la rupture ultime augmente en fonction de la section des cadres.

Les différentes formes des consoles étudiées (F_1 , F_2 , F_3 et F_4) n'ont une influence significative ni sur la configuration des fissures ni sur la résistance des consoles sans cadres horizontaux. Par contre, pour les consoles avec cadres horizontaux, les formes F_3 et F_4 se montrent un peu plus favorables, en ce qui concerne la résistance à la rupture, que les formes F_1 et F_2 .

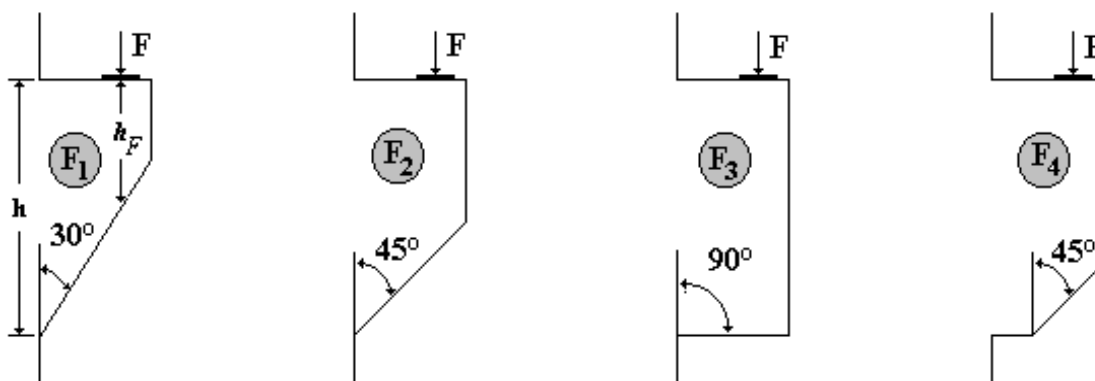


Figure 1-23 : Configurations des consoles étudiées par Robinson, [ROB 69].

Pour toutes les consoles, la première fissure apparaît à une charge inférieure à un tiers de la charge ultime de rupture. Elle s'amorce à la partie supérieure de la jonction de la console avec le poteau, et se propage vers l'intérieur du poteau (Figure 1-22). Cette fissure ne progresse jamais verticalement dans le plan d'encastrement de la console mais elle se propage toujours vers l'intérieur du poteau.

1.2.5 Types de rupture des consoles courtes

Park et Paulay [PAR 75] identifia relativement tôt les différents six mécanismes de rupture à partir des essais de Kriz et Rath.

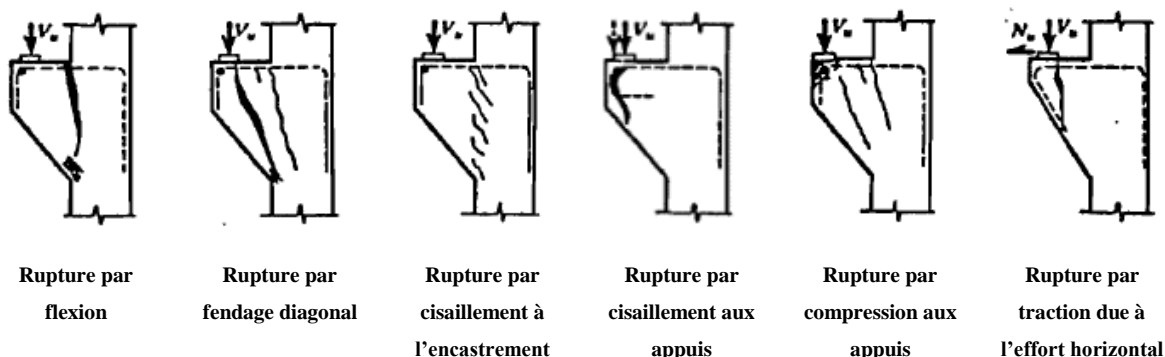


Figure 1-24: Mécanisme de rupture proposé par Park et Paulay [PAR&al 75]

Après analyse des résultats de Kris [KRI 65], Khadraoui [KHA 98] distingue quant à lui quatre types de rupture :

1.2.5.1 *Rupture par flexion-traction (FT):*

Les armatures du tirant atteignent leur limite élastique conventionnelle avant que le béton n'ait atteint sa résistance à la compression dans la bielle ou dans la partie inférieure de la section d'encastrement, figure 1-25 (a). Dans ce cas, les fissures dues à la traction développée par la flexion s'ouvrent excessivement et la rupture finale de la console se produit par écrasement du béton à la jonction de la face inférieure de la console avec le poteau.

1.2.5.2 *Rupture par flexion-compression (FC):*

Elle se produit par écrasement du béton, à la partie inférieure de la section d'encastrement, avant que les armatures du tirant n'aient atteint leur limite élastique. Il ne faut pas confondre les ruptures par flexion-traction et par flexion-compression. Dans le cas de la rupture par flexion-compression, figure 1-25 (b), les fissures dues à la traction restent limitées et très peu ouvertes.

1.2.5.3 *Rupture par fendage suivant la diagonale de la console (D):*

Elle se produit par fendage du béton le long de la ligne joignant le point d'application de la charge à la jonction de la face inférieure de la console avec le poteau, figure 1-25 (c).

1.2.5.4 *Rupture par cisaillement à l'encastrement (CE):*

La rupture par cisaillement du béton à l'encastrement se caractérise par le développement d'une série de plusieurs fissures (inclinées) le long de la section d'encastrement. La rupture finale se produit par glissement de cette section, figure 1-25 (d).

En résumé, ses résultats montrent que :

- Les types de rupture par cisaillement et par fendage sont prépondérants.
- La rupture par cisaillement à l'encastrement se produit surtout dans les consoles dont la portée relative (a/d) est inférieure à 0,171, alors que celle par fendage se produit surtout dans les consoles dont la portée relative est supérieure à 0,171.
- La rupture par flexion-traction se produit dans les consoles ayant une section des armatures du tirant faible, alors que celle par flexion-compression se produit dans les consoles dont la résistance à la compression du béton est faible.
- Kriz et Raths ont utilisé pour tous les corps d'épreuves des aciers dont la limite élastique est voisine de 320 MPa sauf pour trois d'entre eux. Ces derniers, dont la limite élastique des aciers est voisine de 670 MPa, se sont rompus par fendage.

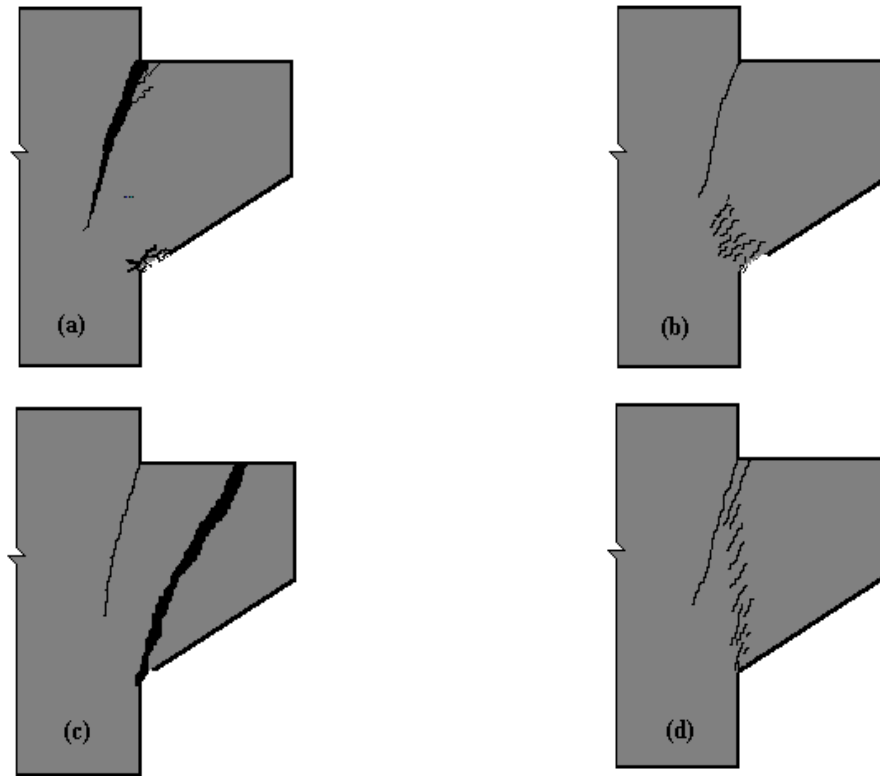


Figure 1-25: (a) rupture par traction-flexion (FT), (b) rupture par compression-flexion (FC), (c): Rupture par fendage (D), (d): Rupture par cisaillement (CE).

1.2.6 Confrontation des modèles

La confrontation des résultats de ces modèles avec l'expérience a montré que ces modèles surestiment ou sous-estiment, considérablement, la charge de rupture de certaines consoles. Par conséquent, nous avons déterminé les intervalles de variation des paramètres influents pour lesquels ces modèles sont valables Tableau 1-2. Nous avons aussi déterminé, pour chacun des modèles, une limite inférieure de la charge de rupture afin de l'utiliser pour dimensionner les consoles courtes en béton armé (Tableau 1-3).

Dans ses études, Khadraoui [KHA98] a montré qu'il faut :

- i-* Renforcer une console courte en béton, dans sa partie supérieure, par des armatures pour résister à la traction,
- ii-* Mettre une plaque d'appui suffisamment large pour mieux répartir les efforts de compression et éviter l'écrasement du béton sous l'appui,
- iii-* Répartir une certaine quantité de cadres horizontaux sur une hauteur efficace pour minimiser la fissuration,
- iv-* Tronquer, dans la mesure du possible, les parties de la console non sollicitées ; ce qui explique le choix d'une forme trapézoïdale.

Modèle	KRIZ	ROBINSON	NIEDENHOFF	KHADRAOUI
Portée relative ($\lambda=a/d$)	$0,115 \leq \lambda \leq 0,610$	$0,5 \leq \lambda \leq 0,8$	$0,29 \leq \lambda \leq 0,61$	$0,30 \leq \lambda \leq 0,50$
Rapport entre la section des armatures du tirant et celle du béton à l'encastrement ($\rho_s = A_s / bd$)	$0,0021 \leq \rho_s \leq 0,0186$	$0,0036 \leq \rho_s \leq 0,0144$	$0,0048 \leq \rho_s \leq 0,0123$	$0,0021 \leq \rho_s \leq 0,0186$
Section totale des cadres ($\sum A_h$)	$\sum A_h \geq \frac{1}{3} A_s$	$\sum A_h \geq [\sup(0,88; 0,44 \frac{d}{a})] A_s$	$\sum A_h \geq \frac{1}{3} A_s$	$\sum A_h \geq \frac{1}{3} A_s$
Hauteur de répartition des cadres (d')	$d' = \frac{2}{3} \left(\frac{m}{m+1} \right) d$	$d' = \frac{7}{8} d$	$d' = \frac{2}{3} d$	$d' = \frac{7}{8} d$

Tableau 1-2 : Intervalles de variations des paramètres influents pour chaque modèle [KHA 98]

Modèle	KRIZ	ROBINSON	NIEDENHOFF	KHADRAOUI
Hypothèses de base	modèle empirique	A la rupture : - La console tourne autour d'un axe situé, par rapport au tirant, à une distance égale à $7d/8$; - La résultante des efforts de compression et de cisaillement agissants à la base de l'encastrement passe par cet axe. - La distribution des contraintes de traction sur les armatures (tirant et cadres) est considérée comme linéaire; - $\sigma_{st}=f_y$	A la rupture : - Système triangulé constitué par la charge appliquée, l'effort sur le tirant et l'effort sur la bielle de béton, - $\sigma_{st}=f_y$ - $\sigma_{bc}=f_c$	Modèle endommageable isotrope : - échelle de la modélisation est celle d'un volume Élémentaire Représentatif - distribution linéaire des déformations dans la section d'encastrement
béton tendu : négligé ou non	non	oui	oui	non
Modes de rupture	rupture par les modes FT, FC, D ou CE	rupture par le mode FT	rupture par le tirant et la bielle	Rupture par la bielle
Charge de rupture théorique	$F_u = 5,4bd\sqrt{f_c}(1-0,5\lambda^2)\rho_{sh}^{\frac{1}{3}}$	$F_u = (1 + X_c) \frac{7d}{8a} A_s f_y$ avec : $X_c = \frac{64}{49d^2} \frac{A_h}{A_s} \sum_i y_i^2$	$F_u = (\sqrt{(\lambda x)^2 + 2\rho_s x - \rho_s^2})$ avec : $x = \frac{f_c}{f_y}$ et $\lambda \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho_s}{x - \rho_s}}$	$F_u = \frac{\lambda x b d f_c}{1 + \lambda \exp(-\beta \varepsilon_{st})}$
Moyenne de $\left(\frac{F_{u,exp}}{F_{u,th}}\right)$	1,04 sans cadres 1,11 avec cadres	0,97 sans cadres 1,02 avec cadres	1,01 sans cadres 1,23 avec cadres	1,05 avec cadres
Écart type de $\left(\frac{F_{u,exp}}{F_{u,th}}\right)$	0,13 sans cadres 0,08 avec cadres	0,09 sans cadres 0,10 avec cadres	0,14 sans cadres 0,14 avec cadres	0,06 avec cadres
Limite inférieure de la charge de rupture ($F_{u,inf}$)	$F_{u,inf} = \phi F_u$ avec : $\phi = 0,81$ sans cadres $\phi = 1,0$ avec cadres	$F_{u,inf} = F_u (\phi_1 - \phi_2 \frac{F_u}{bd})$ avec : $\phi_1 = 1,25$ et $\phi_2 = 0,08$ (sans cadres) $\phi_1 = 1,30$ et $\phi_2 = 0,06$ (avec cadres)	$F_{u,inf} = F_u$ pour les consoles avec cadres	$F_{u,inf} = F_u$ pour les consoles avec cadres

Tableau 1-3 : Comparaisons des différents modèles

1.3 PATHOLOGIES DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ

Les structures en béton armé sont les plus utilisées au monde. Ce succès est dû à plusieurs raisons : le béton est un matériau économique. Il est résistant, durable, isolant, et facile à mettre en œuvre. Il se marie bien avec l'acier. Le béton résiste bien à la compression et l'acier résiste bien à la traction.

Bref, Le béton est un matériau de construction formidable. Cependant, au cours du temps, il peut être amené à se dégrader.

La durabilité des ouvrages dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits. Le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage.

D'après la norme européenne (NBN EN 1504-9), les principales causes de détérioration des bétons et armatures sont : dégât mécanique, agression chimique, dégradation physique, dégradation des armatures, réparations inappropriées.

À la suite de chocs, de vibration, d'affaissement et des géotechniques, on peut avoir l'apparition de fissures ou d'éclats qu'il convient de repérer et d'identifier conventionnellement comme dégradations d'ordre mécanique.

1.3.1 Dégradation des structures en béton armé

Les causes principales de dégradation des structures en béton armé sont:

- Dégradations des matériaux à cause de la présence des agents agressifs



-
- Dégradations mécaniques issues des contraintes excessives appliquées en service.



- Mauvaise réparation :



La dégradation d'une construction en béton armé est la traduction d'une évolution lente et irréversible de ses variables d'état, conduisant à la diminution des marges nécessaires de sureté pour assurer son bon fonctionnement.

Nous disposons d'un indicateur qu'est la fissure dans une structure en béton armé. Il faut distinguer deux fissures : la fissure pathologique et la fissure pathogène. La différence entre ces deux fissures dépend essentiellement de l'origine de l'ouverture et de l'environnement.

Une fissure d'une ouverture de 0,3mm exposée à un environnement néfaste, peut présenter un caractère pathogène. Cette limite a été établie en fonction des propriétés de l'eau et de ses capacités d'infiltration [LIS 06].

1.3.2 Dégradations dues au vieillissement des structures en béton armé

Les phénomènes suivants sont les causes principales du vieillissement.

- ✓ Érosion, abrasion, chocs – ces phénomènes se situent en milieu fluvial et maritime, avec création des défauts géométriques de surface du béton, l'apparition d'épaufrure et par éclatements superficiels qui entraînent la mise à nu des armatures et l'accélération des risques de corrosion.



- ✓ Action des cycles de gel-dégel – le taux de porosité et de perméabilité des bétons l'eau peut s'infiltrer et sous l'action du gel, gonfler des contraintes internes et créer des fissures. La dégradation gel-dégel du béton est amplifiée par des chocs thermiques.



- ✓ Altération physico-chimique du béton
 - l'eau et l'hygrométrie
 - la carbonatation du béton, mécanismes d'alkaline –réaction entre les granulats et le ciment.
- ✓ Retrait du béton - l'élimination de la quantité d'eau en excédent dans la formulation d'un béton pour assurer des conditions d'ouvrabilité acceptables se traduit par des variations dimensionnelles du béton. Le retrait, gêné par la présence d'armature, a tendance à solliciter le béton en traction dès son plus jeune âge et, par conséquent, à créer des fissures.
- ✓ Corrosion des armatures en acier – la corrosion des armatures est un phénomène de détérioration du béton armé le plus répandu. Le développement de corrosion est très facile, il suffit que l'élément de structure soit exposé à l'humidité. D'une façon générale le mécanisme de corrosion se décompose en deux phases distinctes. La première est l'initiation de la corrosion. La deuxième consiste en la croissance de la corrosion des armatures.



1.3.3 Dégradation des ouvrages dues aux contraintes mécaniques

Les contraintes mécaniques induites par le chargement appliqué sur les structures peuvent entraîner, à long terme, des dommages irréversibles.

Les fissures dans le béton caractérisent la dégradation d'ordre mécanique. Les fissures «normales» sont liées au fonctionnement du matériau béton armé et ne sont pas préjudiciables. Ces fissures sont des fissures dues à la flexion et ayant une ouverture de 0,2 à 0,3 mm.

Les autres fissures sont des fissures dites «anormales». Ils ont pour conséquence l'altération de la rigidité de la structure porteuse et la formation d'articulation non désirées, en provoquant un changement de flux de forces et du système statique. Elles favorisent également la pénétration des facteurs de corrosion (humidité, CO₂, chlorures)

- Des mauvaises dispositions constructives (mauvaise dispositions des armatures, mauvaise composition du béton),
- Les effets de la température,
- Les charges et forces agissant sur la structure.

- ✓ Erreurs de conception ou d'exécution - intervenant au stade du dimensionnement de l'ouvrage, alors les causes de fissuration et de dégradation de la structure sont généralement induites par de graves erreurs dans la vérification de la stabilité de l'ouvrage et des conditions de résistance ou, plus simplement, par la prise en considérations d'hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement, de fonctionnement de l'ouvrage ou au stade de son exécution.

Ces erreurs sont à l'origine, généralement d'un mauvais dimensionnement des sections et d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations de fissures non acceptables.

En dernier lieu, une évaluation imparfaite des conditions de sollicitations cycliques des ouvrages et des lois de comportement en fatigue des matériaux est susceptible de remettre en cause les résultats de calcul et le dimensionnement pour une durée de vie escomptée.

- ✓ Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages – L'évolution des conditions de chargement est souvent induite soit par la modification des charges réglementaires sur essieux, soit par une modification de la fréquence des sollicitations qui s'exercent. La nécessité de prendre en considération des sollicitations extrêmes de l'exécution de l'ouvrage. Le cas de la mise en conformité des ponts ou bâtiments vis-à-vis des sollicitations sismiques ou le renforcement de certains éléments de l'ossature vis-à-vis de sollicitations accidentelles tel que l'impact de véhicules.
- ✓ Effets de la température – lors d'un incendie ou d'un choc thermique l'eau interstitielle se transforme en vapeur et, si cette vapeur ne peut s'échapper assez rapidement, la

pression de vapeur devient supérieure à la résistance en traction du béton, ce qui provoque une sorte d'écaillage de ce dernier. Cet écaillage progresse vers le cœur du matériau tant que l'incendie n'est pas maîtrisé tant que la température du béton reste élevée. Plus le béton a une perméabilité et une porosité réduites, plus les destructions sont importantes.

- ✓ Fatigue est un phénomène où les fissures se sont développées dans le béton. Les armatures sous l'effet d'un chargement répété conduit à un éclatement du béton d'enrobage et à la rupture de l'acier. La rupture par fatigue peut apparaître si des charges excessives sont appliquées répétitivement. Un exemple est l'affaissement d'une dalle en béton armé dû au chargement répétitif des roues sur un pont.

1.3.4 Fissures structurelles obliques

La fissuration oblique, sous forme d'une fissure isolée ou de plusieurs fissures en relais, traduit le plus souvent un mouvement de torsion de la voûte. Les fissures obliques présentent, soit un tracé régulier, soit un tracé résultant de la combinaison de fissures transversales et longitudinales (Figure 1-26).

C'est un désordre préoccupant car il peut constituer l'indication d'un problème grave pour la structure (Figure 1-27) ou en section courante.



Figure 1-26 cas où la fissure suit les joints d'une maçonnerie sans traverser les moellons.



Figure 1-27: basculement d'une tête, tassement de fondation, glissement du versant.

L'épaufrure (Figure 1-28) affecte la continuité du matériau et traduit le fait qu'un fragment s'en est détaché. On réservera donc ici le terme d'épaufrures aux défauts affectant les arêtes vives des éléments de structure (moellons, bétons coffrés), et dus :

- soit à des chocs accidentels ;
- soit à un problème au décoffrage;
- soit enfin à une altération du matériau (une arête vive de moellon ou de béton gelée prendra un aspect arrondi qui peut être qualifié d'épaufrure).



Figure 1-28: Epaufrure affectant la continuité du matériau

Ceci devient dangereux si l'ampleur de la dégradation compromet la stabilité de la structure, ou si des fers ont été mis à nu : passivation, ragréage.

1.3.5 Mouvement courant et exceptionnel

Les fondations peuvent subir des mouvements (en présence d'un sol déformable) susceptibles d'engendrer des dommages importants.

Exemple :

Un tassement différentiel de 1 cm. entre deux points d'appui distants de 5 m suffit à provoquer la fissuration.

Les tassements entraînent principalement des dommages structurels : fissures de cisaillement en diagonale ou fissures de traction horizontales et verticales sur les murs extérieurs.

Trois conditions doivent être réunies pour déclencher la fissuration :

- 1) un sol compressible sous le niveau d'assise des fondations ;
- 2) des charges irrégulièrement réparties aux fondations. Ce déséquilibre des efforts sur le sol provoque un tassement différentiel. Le sol se déformera donc plus ou moins selon les points d'appui;
- 3) la fragilité de la superstructure. Les déformations différentielles du sol vont engendrer des efforts de traction et de cisaillement dans la superstructure. Les points faibles et notamment les joints de maçonnerie seront les premiers à ne pas résister à ces contraintes.

Les autres causes de fissuration peuvent être :

- 1) l'implantation du bâtiment sur un sol hétérogène, renfermant des inclusions rocheuses qui constituent autant de points durs ou, au contraire, des débris végétaux (tourbes) ou des matières organiques en décomposition (vases) qui forment des zones compressibles ;
- 2) l'implantation de la maison directement sur la terre végétale de surface ou à une si faible profondeur que le sol n'est pas à l'abri du gel ;
- 3) la présence juxtaposée de 2 remblais d'âge différent sous les fondations : un ancien, peu compressible, et un récent, mal compacté lors des travaux ;
- 4) la création ultérieure d'une plate-forme contre une façade du pavillon. Elle crée une surcharge parasite excessive au droit de la semelle de ce mur.

1.4 ÉTUDES EFFECTUÉES SUR LES CONSOLES EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉES

Ce chapitre décrit certains (relativement peu) travaux les plus significatifs menés sur consoles en béton armé renforcées par collage de plaques composites en fibres de carbone.

1.4.1 Les travaux de Robert W. Corry et Charles W. Dolan [COR 01]

Dans les travaux menés en 2001, un programme de renforcement et de réparation des consoles colonnes avec bandage du tissu en fibres de carbone ont réalisés. La réparation des consoles en béton armé consiste à coller les tissus en fibres de carbone sur les consoles initialement endommagées à 75% de la charge ultime maximale. L'objectif est de mettre en évidence l'apport du renforcement en tissus composites. La console en béton armé ainsi réparée est chargée jusqu'à la charge ultime.

Le modèle non renforcé illustré sur la Figure 1-29: et réparé, Figure 1-30: par collage des tissus en fibres de carbone.

Le cas de chargement est indiqué sur la Figure 1-31 où V_u représente la force verticale de cisaillement et N_u la force de traction horizontale.



Figure 1-29: Modèle expérimental non renforcé [COR 01] Figure 1-30: Modèle renforcé par CFRP [COR 01]

Les dimensions de la colonne sont 450x300mm avec une hauteur de 760 mm et la console avec de long pour le plus grand et 300 mm.

Pour réparer la console, ils ont utilisé un tissu bidirectionnel, SikaWrap Hex103C. Les bandes ont une largeur de 150 mm.

La section d'acier pour le renforcement à la flexion et le moment de flexion sont déterminées selon le code du bâtiment de l'ACI par les équations suivantes respectivement :

$$A_f = \frac{M_u}{\phi \cdot f_y (d - a/2)} \quad (1-50)$$

$$a = \frac{A_f f_y}{0,85 f_c' b} \quad (1-51)$$

$$M_u = V_n a_1 + N_{uc} (h - d) \quad (1-52)$$

$$A_n = \frac{N_{uc}}{\phi \cdot f_y} \quad (1-53)$$

$$A_f = A_s - A_n \quad (1-54)$$

$$A_{vf} = A_s + A_h \quad (1-55)$$

$$N_{uc} = 0,01 \cdot V_n \quad (1-56)$$

$$A_s - \frac{0,10V_n}{\phi f_y} = \frac{(V_n a_1) + [0,10V_n(h-d)]}{\phi f_y (d - a/2)} \quad (1-57)$$

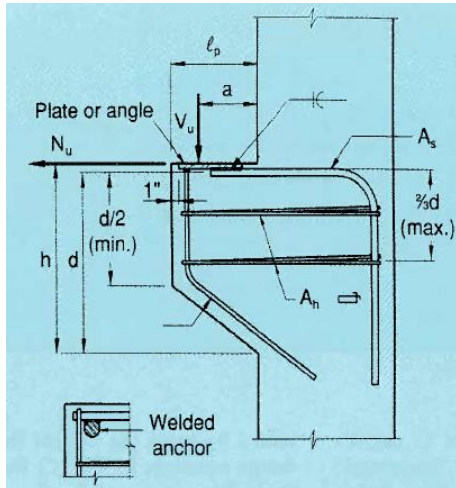


Figure 1-31: Configuration de chargement de PCI
Design Handbook [COR 01]

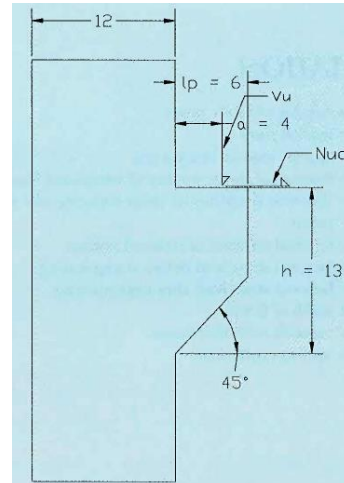


Figure 1-32: Dimensions de la console [COR 01]

La résolution de l'équation permet d'obtenir la résistance à l'effort tranchant :

$$V_n = A_{vf} \cdot \phi \cdot \mu \cdot f_y \quad (1-58)$$

A_f : section d'acier pour le renforcement à la flexion

ϕ : facteur de réduction de la capacité

f_y : limite élastique de l'acier

d : hauteur utile

f_c : résistance de compression du béton

V_n : effort nominal ultime

a_1 : zone d'enrobage

N_{uc} : effort ultime en compression

h : hauteur de la console

A_s : section des aciers

A_n : section d'acier pour résister à la traction

Dans le cas d'une réparation ou de renforcement, les deux équations suivantes permettant de déterminer la résistance à l'effort tranchant:

$$V_n = V_{br} + V_{fab} - N_{uc} \quad (1-59)$$

Avec

$$V_{fab} = (F_w n) \cdot \mu \quad (1-60)$$

Où n : nombre de couche du tissu en fibres de carbone,

w : largeur des tissus en fibres de carbone,

F : contrainte de rupture d'une couche de tissus en fibres de carbone,

μ : coefficient de cisaillement,

N_{uc} : force de traction égale à $0,1(V_{br} + V_{fab})$

V_{br} : effort théorique de cisaillement dans la console non renforcé

V_{fab} : effort tranchant du au renforcement de tissu composite en carbone

Pour une console endommagée à 75% de la charge théorique ultime puis réparée, les résultats montrent une augmentation de la charge ultime de 28% à 54% comme l'indique dans la Figure 1-33.

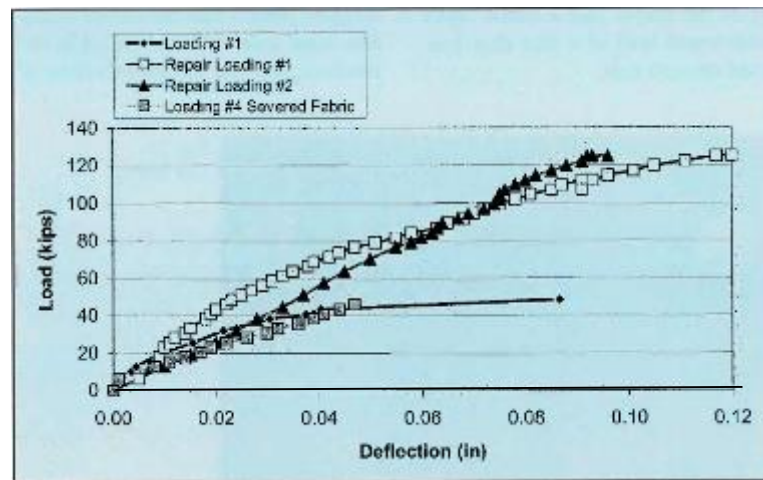


Figure 1-33: Résultats des courbes des consoles de renforcées et de référence, [COR 01].

Robert et al. indiquent qu'il existe trois modes de ruptures: rupture par flexion, rupture par cisaillement et la rupture par traction comme sur Figure 1-34.

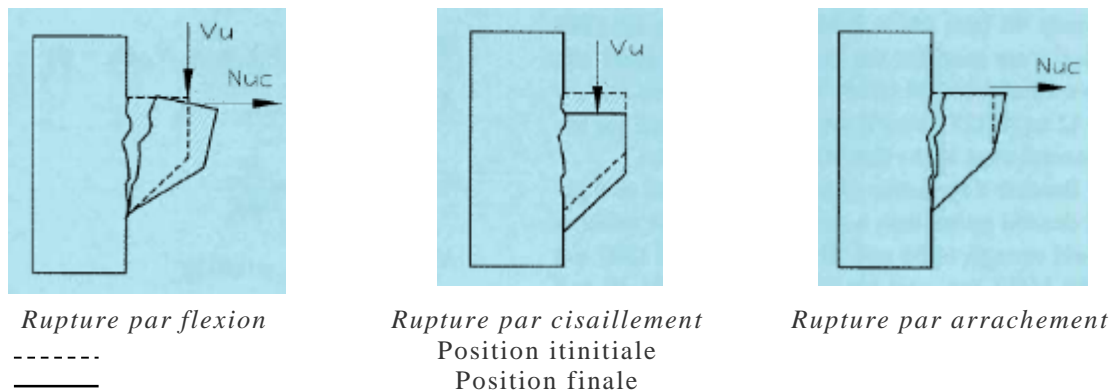


Figure 1-34: Modes de ruptures des consoles, [COR 01].

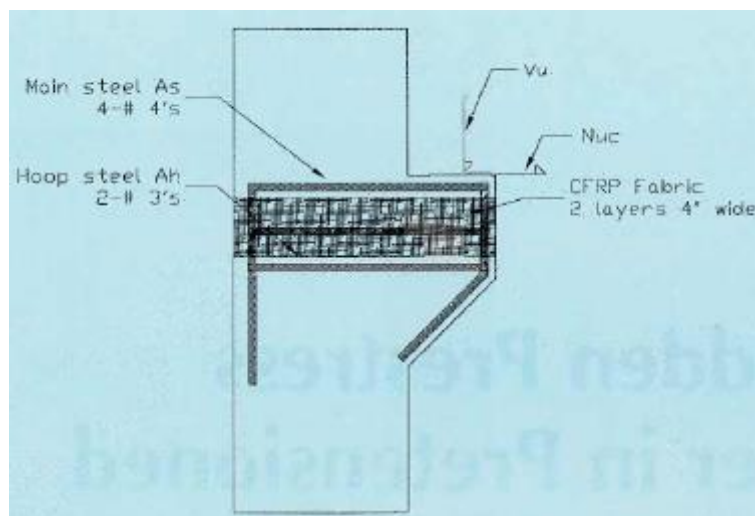


Figure 1-35: Modèle renforcé par un tissu CFRP, [COR 01].

Robert [COR 01] recommandait un minimum de deux couches de tissus en fibres de carbone (Figure 1-35) afin d'éviter une rupture fragile ou soudaine qui apparaît lors de la propagation d'une fissure dans la zone endommagée et réparée.

Il conclut également que la charge du renforcement maximum affectée au CFRP doit être telle que le facteur de charge sur la structure d'origine soit supérieur à un, sinon il aurait rupture du renfort CFRP.

1.4.2 Les travaux de Mohamed A. Elgwady [ELG 05]

Il a effectué une étude expérimentale sur l'efficacité de l'utilisation des tissus en fibres de carbone sur la capacité portante des consoles courtes.

Les consoles utilisées ont une épaisseur de 250 mm à l'intersection du poteau/console et de 150 mm à l'extrémité. La console est de 200 mm de largeur et 250 mm de longueur. Le renforcement en flexion est composé de trois barres d'acier avec 12 mm de diamètre et de deux

cadres horizontaux de 10mm de diamètre. Les consoles ont toutes une hauteur totale de 1250mm. Les dimensions transversales des colonnes sont de 400x200mm. Toutes les consoles testées ont toutes les mêmes dimensions. La Figure 1-36 montre les six consoles courtes en béton armé renforcées et non-renforcée:

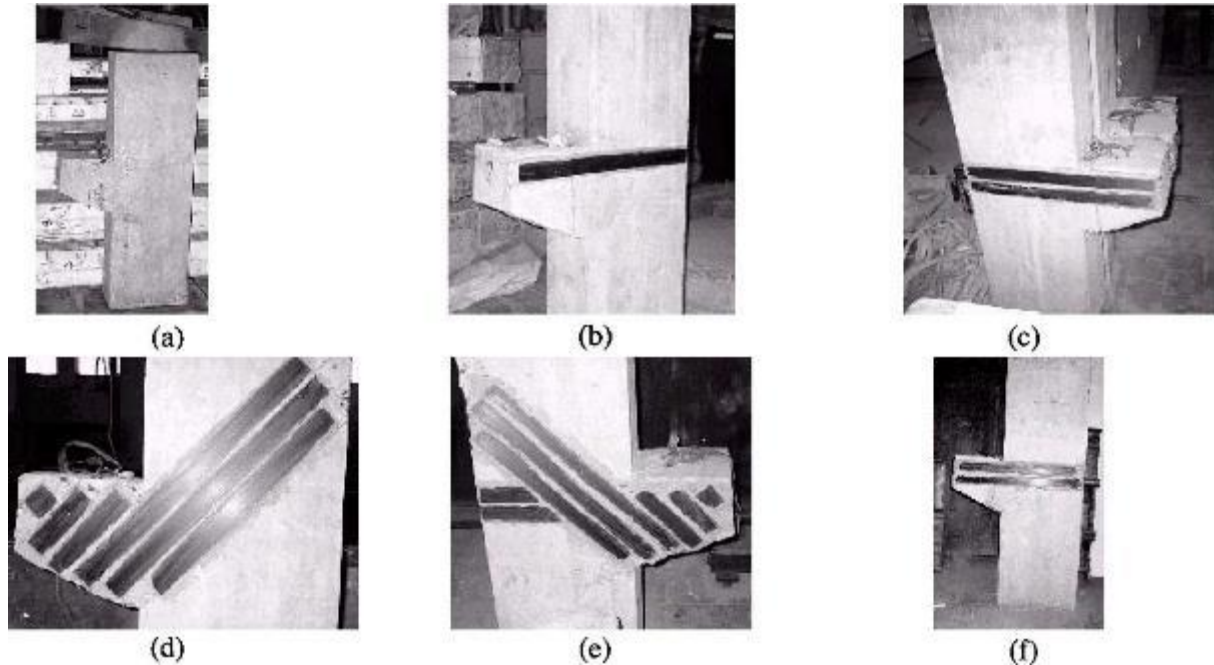


Figure 1-36: Éprouvettes (a) CONT, (b) 11HOR, (c) 21HOR, (d) 61DIG, (e) 82HAD, (f) 32 HOR, [ELG 05]

- Premier console est la console de contrôle.
- Deuxième console est une console renforcée par une bande horizontale,
- Troisième console est une console renforcée par deux bandes horizontales,
- Quatrième console est une console renforcée par six bandes diagonales,
- Cinquième console est une console renforcée par deux bandes horizontales et six bandes diagonales.
- Sixième console est une console renforcée par deux bandes horizontales et une bande diagonale.

Les résultats montrent que pour toutes consoles, la première fissure s'est produite soit dans la direction horizontale ou en diagonale, puis les fissures se propagent rapidement en diagonale. Enfin, la rupture par compression ou rupture fragile qui se produit hors de la zone de compression triangulaire inférieure causée par le décollement de bandes en fibres de carbone avec une couche de béton.

Pour les consoles de référence, la charge ultime de rupture est de 180kN. La première fissure visible verticale est apparue à 60 kN. Notons deux fissures : l'une verticale et l'autre fissure

diagonale qui apparaît presque à un angle de 45 degrés et est à 33% de la charge de rupture. L'augmentation de la charge conduit à la création de nouvelles fissures diagonales qui se propagent rapidement jusqu'à la rupture (Figure 1-37).

La première fissure de la console renforcée apparaît à 80 kN (soit 41% de la charge ultime). Cette fissure part du bord supérieur de la plaque composite en fibre de carbone sur la face supérieure de la console avec une longueur d'environ 20 mm. Aucune fissure n'est visible avant 150 kN, soit 250% de la charge de fissuration de la consoles de référence.

Comme la console de référence, il apparaît également une fissure diagonale à 165kN soit une augmentation de la charge appliquée de 10%. Plus de fissures mais la rupture se produit à l'identique à la console de référence c'est-à-dire par écrasement du béton dans la zone de compression de la console. La charge ultime était de 195 kN. La charge ultime augmente d'environ 8% par rapport celle de la console de contrôle.

Pour la console renforcée par deux bandes horizontales, la principale fissure apparaît à une charge de 180 kN, soit 300% de la charge de la console de référence. La propagation des fissures est plus rapide. La charge ultime augmente de 20% par rapport à celle de la console de référence.

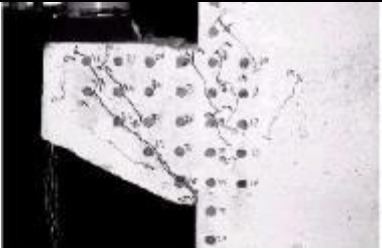


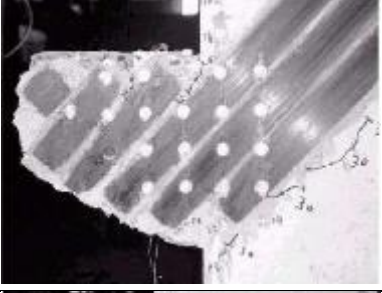
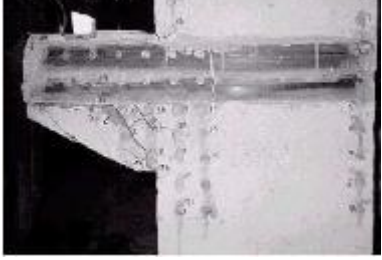
N	Console	Charge 1 ^{ère} fissure	F _{max} [kN]	Mode de rupture	Image
1	CONT	60	180	Rupture par cisaillement - fissure diagonale apparait à 45°	
2	11HOR	150	195	Rupture par cisaillement - fissure diagonale à 45°	
3	21HOR	180	215	Rupture par cisaillement - fissures autour CFRP - fissure diagonale apparait presque à 45°	
4	61DIG	210	310	Fissure diagonale entre les plaques CFRP - décollement	
5	32HOR	170	240	Fissure aux extrémités des CFRP - fissure diagonale à la rupture	
6	82HAD	-	220	Destruction explosive	

Figure 1-37 : Résultats des tests réalisés [ELG 05]

1.4.3 Les travaux de G. Campione, L. La Mandola et M. Papia [CAM&al, 05]

Sur la Figure 1-38, on a le détail des douze consoles utilisées dans leurs travaux présentés en 2005 [CAM 05].

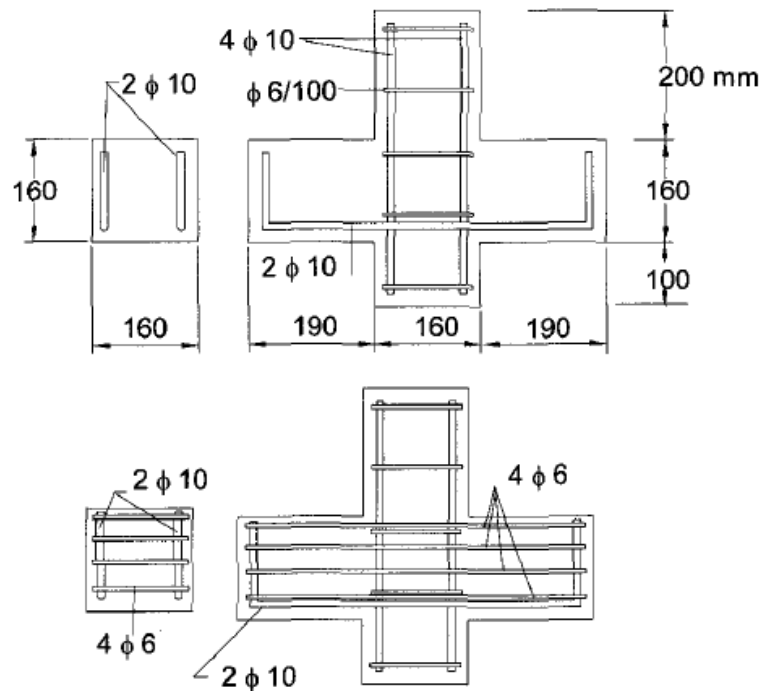


Figure 1-38 : Configuration des armatures des consoles utilisées par [CAM 05]

Chaque console est constituée par une poutre horizontale et une colonne verticale courte. La position des armatures et les différentes configurations testées sont présentées dans le Tableau 1-4. Toutes les éprouvettes sont sollicitées en flexion.

Type de console	Barres principaux	Barres transversales	Teneur en fibres	Nombre de couches FRP
1	/	/	/	/
2	/	/	1.0	/
3	2x10	/	/	/
4	2x10	4x6	/	/
5	2x10	/	1.0	/
6	2x10	/	/	1

Tableau 1-4 : Détail des différents paramètres étudiés par [CAM 05]

Les barres d'acier représentent 1% du volume du béton armé avec deux barres de 10mm de diamètre dans la zone tendue et des cadres en acier de 6mm de diamètre. Les tissus en fibres de carbone utilisés ont une épaisseur de 0,165mm.

Les caractéristiques mécaniques des armatures en acier et des bétons sont présentées dans les Tableau 1-5 et Tableau 1-6.

ϕ (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_u (%)
6	445	627	14,4
10	488	601	18,8

Tableau 1-5 : Caractéristiques mécaniques de l'acier [CAM 05]

Type	f'_c (Mpa)	ϵ_0	ϵ_{cu}	f_t (MPa)
Béton ordinaire	48,5	0,00263	/	4,09
Béton de fibres	46,31	0,00308	0,005	4,77

Tableau 1-6 : Les caractéristiques mécaniques des bétons en fibres métalliques ou ordinaires [CAM 05]

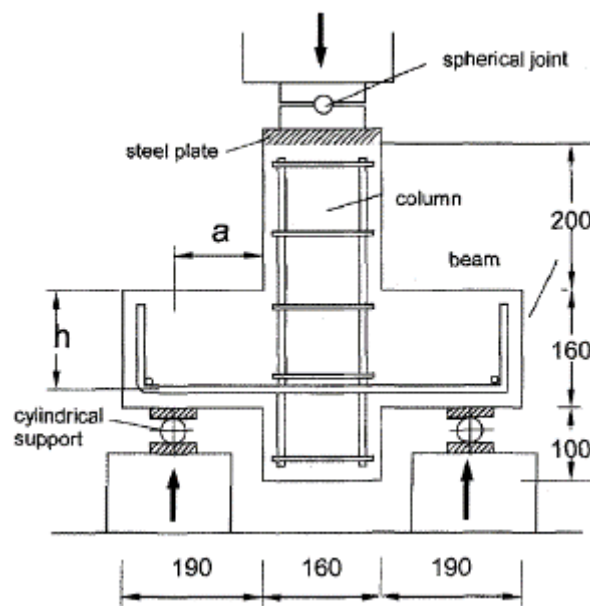


Figure 1-39 : Dispositif expérimental, [CAM 05]

	P_f	P_{max}	P_u	δ_{max}	δ_u
2 ϕ 10	64,50	155,20	25,95	3,93	4,27
2 ϕ 10 + 4 ϕ 6	60,50	197,65	85,45	3,26	5,40
2 ϕ 10 + FRP	/	192,20	93,12	3,35	4,52
2 ϕ 10 + FRC	104,00	240,75	147,35	4,60	12,75

Tableau 1-7 : Résultats des essais de flexion sur les consoles, [CAM 05]

où P_f : charge de la première fissuration, P_u : charge ultime, P_{max} : charge maximale,

1.4.3.1 Approche analytique [CAM05]

Du point de vue théorique, le comportement en flexion et en cisaillement des consoles en béton armé et fibreux fait actuellement l'objet de plusieurs recherches présentées dans la littérature [7-14]. Campione [CAM 05] examina dans ses travaux, l'influence de la géométrie du renfort, à savoir le pourcentage d'armatures en acier, sur la charge ultime de la structure.

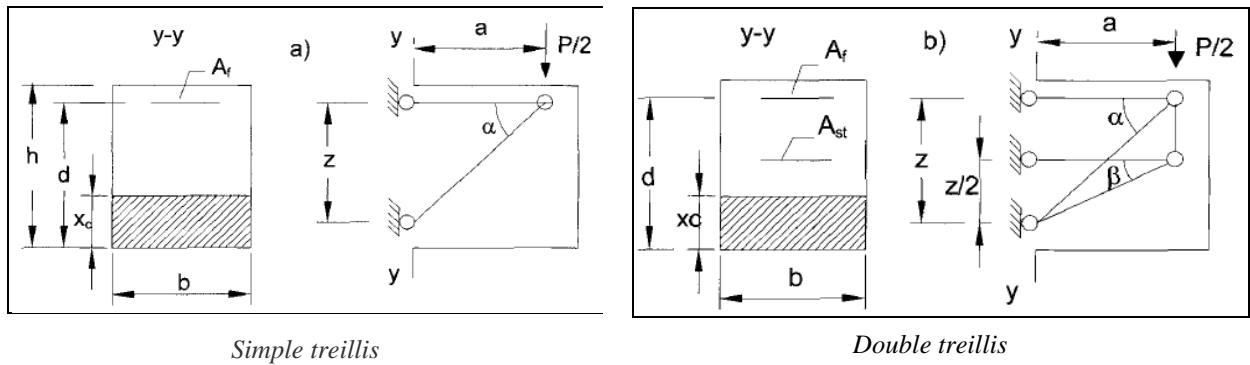


Figure 1-40 : Modèle équivalent en treillis [CAM05]

D'après les analyses des modèles de fissurations, il apparaît qu'il est possible de simplifier le problème de continuité par un treillis simulant la zone tendue et comprimée (Figure 1-40). Le modèle analytique proposé par [CAM 05] permet de déterminer la charge portante des consoles. Il est basé sur l'analyse de la rupture de consoles au moyen d'un treillis multiple équivalent, y compris tous les modes possibles de ruptures observées expérimentalement, comme la plastification de l'acier, écrasement en compression du béton, décollement de la plaque FRP et la délamination des tissus en fibres de carbone.

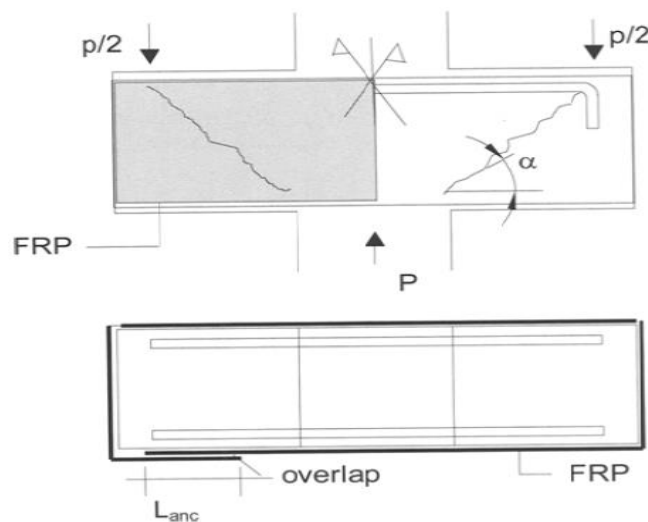


Figure 1-41 : Modèle théorique, [CAM05]

ε_r : représente la déformation moyenne dans la direction perpendiculaire à la fissure principale.

f'_c : est la contrainte de compression du béton (MPa).

Hwang [HWA 00] en tenant compte de l'existence des fissures obliques propose la formule ci-dessous :

$$\zeta = \frac{5,8}{\sqrt{f'_c}} \frac{1}{\sqrt{1 + 400\varepsilon_r}} \leq \frac{0,9}{\sqrt{1 + 400\varepsilon_r}} \quad (1-61)$$

Dans un schéma simplifié (Figure 1-42), Hwang [HWA 00] considère dans le cas d'une rupture par compression du béton que lorsqu'on atteint la limite élastique de l'acier. La valeur de ε_r peut être considérée égale à la limite élastique de l'acier.

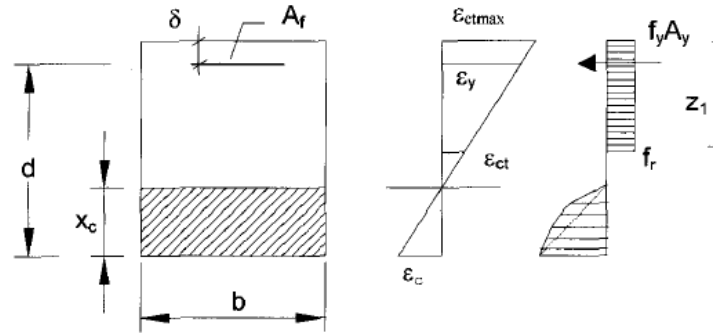


Figure 1-42: Diagramme de distribution des déformations et des contraintes dans la section d'une console renforcée, [HWA 00].

La force maximale dans la plaque est donnée par la formule ci-dessous [NEU 97] :

$$F_b = \psi_F \cdot h_w \sqrt{E_f t_f f_t'} \quad (1-62)$$

$$L_b = \psi_L \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_t'}} \quad (1-63)$$

L_b : longueur de recouvrement de la plaque FRP

f_t' : contrainte de traction du béton

ψ_F et ψ_L : constantes égales respectivement à 0,65 et 0,85

E_f : module d'élasticité du FRP,

A_c : section de la bielle comprimée

$$A_c = h_{eff} b$$

b : étant la largeur

h_{eff} : hauteur effective de la bielle dans la console

$$h_{eff} = x_c \cos(\alpha).$$

$$z_1 = (d - x_c) \left(1 - \frac{f_{ctf}}{f_y} \cdot \frac{E_s}{E_{ct}} \right) + \delta \quad (1-64)$$

z_1 : correspondant à la zone comprimée du béton.

f_{ctf} et f_y : sont respectivement des contraintes de traction du béton fibreux et la limite élastique des armatures principales

E_{ct} et E_s : module d'élasticité du béton et des aciers tendus

δ : épaisseur de la longueur de recouvrement.

Naaman [NAA 03] propose :

$$f_{ctf} = f_t' \cdot (1 - \nu_f) + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \tau \cdot \nu_f \cdot \frac{L_f}{D} \quad (1-65)$$

Et

$$f_{ctu} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot \nu_f \cdot \frac{L_f}{D} \quad (1-66)$$

Avec $\alpha_1=0.1$, $\alpha_2=0.5$, $\tau/f_{ct}=2$, $\lambda_1=0.25$, $\lambda_2=1.2$, $\lambda_3=1$.

1.4.3.2 Console avec les armatures tendues

La charge ultime dans le cas :

- d'une rupture par atteinte de la limite élastique de l'acier

$$P_{u1} = 2f_y A_f \tan \alpha \quad (1-67)$$

- d'une rupture par écrasement du béton

$$P_{u2} = 2\xi \cdot f_c' \cdot b \cdot x_c \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad (1-68)$$

De ces deux équations, on en déduit la charge de flexion ultime :

$$P_f = 2 \cdot \frac{f_r \cdot z_1 \cdot b}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} \quad (1-69)$$

1.4.3.3 Consoles en béton armé et fibrées ou renforcées par FRP

Les raideurs R_1 et R_2 dues à la présence de bandes composites en carbone s'expriment par :

$$R_1 = \frac{1}{\frac{a}{E_s A_{f1} \tan^2 \alpha} + \frac{\sqrt{a^2 + z^2}}{E_c A_{c1} \sin^2 \alpha}} \quad (1-70)$$

$$R_2 = \frac{1}{\frac{a}{E_s A_{f2} \tan^2 \beta} + \frac{\sqrt{a^2 + (z/2)^2}}{E_c A_{c2} \sin^2 \beta}} \quad (1-71)$$

Où $A_{c1} = b \cdot x_c \cdot \cos \alpha$ et $A_{c2} = b \cdot x_c \cdot \cos \beta$

$$\eta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1-72)$$

Les charges maximales suivant les cas sont:

- Rupture des tirants en aciers

$$P_{u1} = \frac{2}{\eta} f_y A_f \tan \alpha \quad (1-73)$$

- Rupture par compression du béton

$$P_{u2} = \frac{2\xi f'_c b x_c \sin \alpha \cos \alpha}{(1-\eta)} \quad (1-74)$$

- En présence des FRP, on a:

$$P_{u3} = \frac{2F_b \tan \beta}{(1-\eta)} \quad (1-75)$$

En comparant les valeurs théoriques et expérimentales, les résultats montrent que les formules proposées ne sont pas très satisfaisantes (Tableau 1-8). L'erreur commise sur P_{u1} est inférieure de moins de 24% c'est-à-dire on sous-estime les valeurs (ce qui est rassurant au niveau sécuritaire) alors que sur P_{u2} , on surestime les valeurs surtout pour le cas CFR de 32% de plus.

Type	Charge P (kN)			
	Experimental.	Analytique		
		η	P_{u1}	P_{u2}
/	155,20	1,00	149	184
4 Ø 6	197,65	0,77	168	225
FRP	192,20	0,90	146	195
CFR	240,75	1,00	232	319

Tableau 1-8 : Comparaison des résultats analytiques et théoriques, [CAM 05]

1.4.4 Les travaux de Ahmad et al [AHM 10]

La configuration utilisée est différente aux précédents travaux. Nous présentons le détail de la géométrie des neuf consoles testées par Ahmad [AHM 10] sur la Figure 1-43.

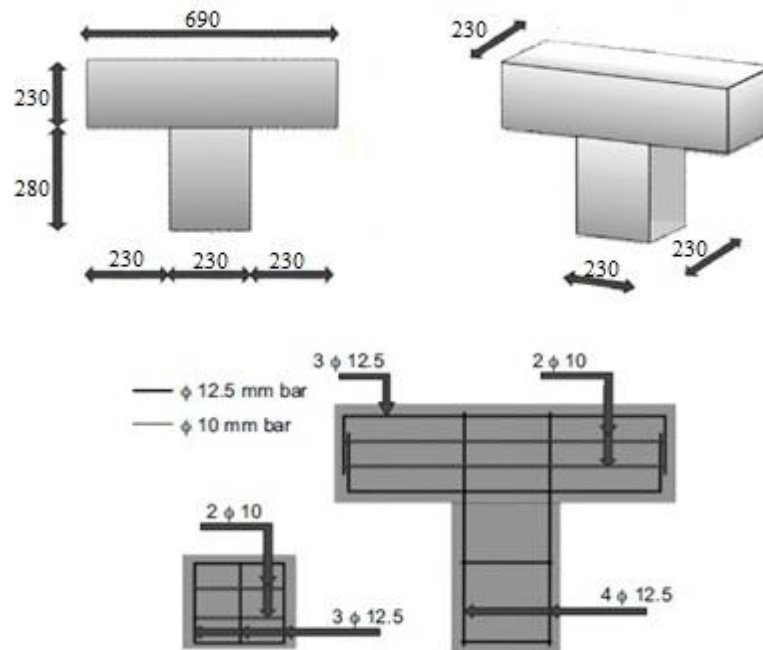


Figure 1-43: Détail de la géométrie des consoles et des armatures, [AHM 10]

Parmi ces neuf consoles, deux ont servi de référence c'est-à-dire non renforcées et les 7 autres ont été renforcées par des plaques en fibres de carbone stratifiées (CFRP) comme nous le montre le Tableau 1-9 et la Figure 1-44. Les consoles en béton armé sont toutes de même composition et une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 42 MPa.

Console	Résistance de compression du béton à 28 jours (MPa)	Barre d'acier		Configuration de tissu CFRP
		Armature principale (mm)	Armature répartie (mm)	
CBR-01	42.8	2-12.5 mm	2-10 mm	sans CFRP
CBR-02	42.8	2-12.5 mm	2-10 mm	sans CFRP
CBR-03	43.6	2-12.5 mm	2-10 mm	face avant et arrière
CBR-04	43.6	2-12.5 mm	2-10 mm	face avant et arrière
CBR-05	42.6	2-12.5 mm	2-10 mm	à 45° faces avant et arrière
CBR-06	42.3	2-12.5 mm	2-10 mm	à 45° faces avant et arrière
CBR-07	42.3	2-12.5 mm	2-10 mm	Revêtement en U
CBR-08	42.3	2-12.5 mm	2-10 mm	Revêtement en U
CBR-09	42.3	2-12.5 mm	2-10 mm	Bandage

Tableau 1-9 : Configuration des consoles en béton armé renforcées, [AHM 10].

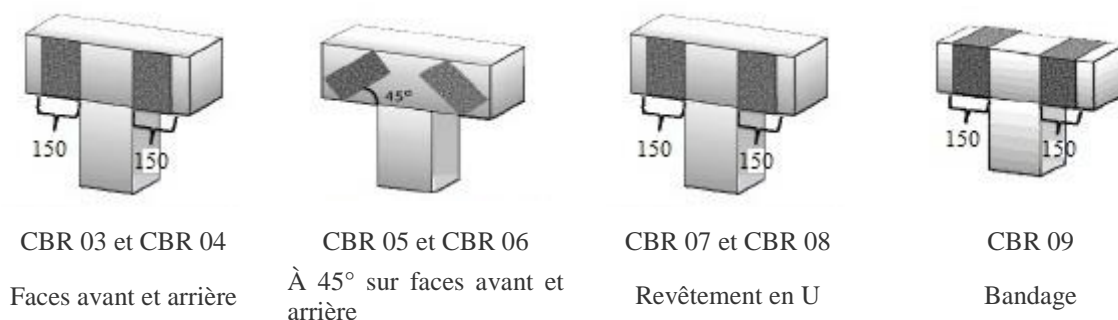


Figure 1-44 : Configuration des consoles renforcées, [AHM 10].

Fissuration et Modes de rupture

Les résultats montrent que les fissures apparaissent autour des articulations et se propagent vers le haut au point d'application. La ruine de la console est due à la principale fissure diagonale autour des joints, à savoir dans les zones de cisaillement (Figure 1-45).

Les fissures correspondantes à la charge ultimes font un angle variant de 50° à 70 ° par rapport au point d'application de la charge. Le Tableau 1-10 montre la charge ultime des consoles étudiées. La résistance ultime dépend essentiellement à la résistance au cisaillement.

La première fissure est apparue dans les deux consoles à une charge d'environ 270 kN. La charge de rupture pour les deux consoles de référence est presque identique, soit 630 kN. Le

cisaillement s'est produit le long d'un plan diagonal et l'angle de cisaillement a été assez proche, de 65 à 75 ° à l'entretoise de compression.

Console	Charge de la première fissure (kN)	Configuration de tissu CFRP	Charge de rupture (kN)	Augmentation en pourcentage (%)	Mode de rupture
CBR-01	274.4	sans CFRP	627.42	Console de référence	fissure diagonale de cisaillement
CBR-02	269.5	sans CFRP		Console de référence	fissure diagonale de cisaillement
CBR-03	362.7	faces frontale et arrière	730	16,4	fissure diagonale de cisaillement + rupture du tissu CFRP
CBR-04	343.1	faces frontale et arrière			fissure diagonale de cisaillement + rupture du tissu CFRP
CBR-05	299.0	à 45° sur la face de la console	725.50	8,1	ruine par cisaillement + rupture du tissu
CBR-06	299.0	à 45° sur la face de la console			ruine par cisaillement + rupture de tissu
CBR-07	358.7	U-revêtement	779.37	24,21	fissure de cisaillement + décollement de CFRP
CBR-08	303.9	U-revêtement			fissure de cisaillement + décollement de CFRP
CBR-09	392.4	bandage	788.19	25.63	ruine par cisaillement + rupture de tissu

Tableau 1-10 : Résultats des tests, [AHM 10]

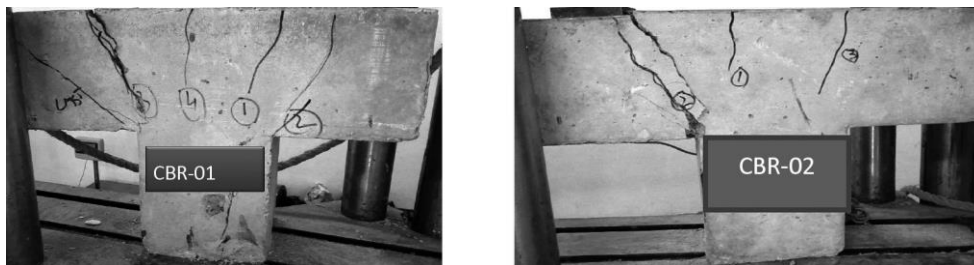


Figure 1-45 : Modes de fissuration des consoles de référence CBR-01 et CBR-02, [AHM 10]

Les travaux montrent que la résistance des consoles courtes en béton armé renforcées augmente de 8 à 25% par rapport à la console courte en béton armé non renforcée. Les études montrent également que:

- Le renforcement par bandage en U à l'aide de matériaux composites stratifiés CFRP, augmente substantiellement la charge ultime de la console, mais entraîne un décollement du matériau composite et une rupture fragile.
- La résistance au cisaillement des consoles entièrement enveloppées augmente légèrement par rapport aux consoles renforcées en U.

- Plus la surface de la fibre de carbone laminée est grande, plus la rupture de la console renforcée est fragile.

1.4.5 Les travaux de Anis et Muhammad [ANI 12]

En 2012, Anis et Muhammad [ANI 12] ont étudié également l'effet du renforcement en Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) sur le comportement et les capacités portantes des consoles courtes en béton armé renforcées et réparées.

Les variables étudiées comprennent le taux de renforcement, l'orientation des bandes, la quantité de bandes et le rapport a/d (la portée a sur la hauteur utile d).

Les résultats expérimentaux ont montré une importante amélioration dans le comportement et la résistance des consoles testées. Une augmentation de 44,5 à 60% de la charge ultime a été obtenue pour des consoles renforcées par des bandes inclinées par rapport à la charge ultime de la console de référence, et de 14,7 à 31,2% pour les consoles renforcées par des bandes horizontales.

Pour des consoles réparées avec des bandes en fibres de carbone, il y a une augmentation de 56% de la charge ultime par rapport à celle de la console de référence. Cependant, les consoles réparées montrent également une rigidité plus grande par rapport aux consoles de référence.

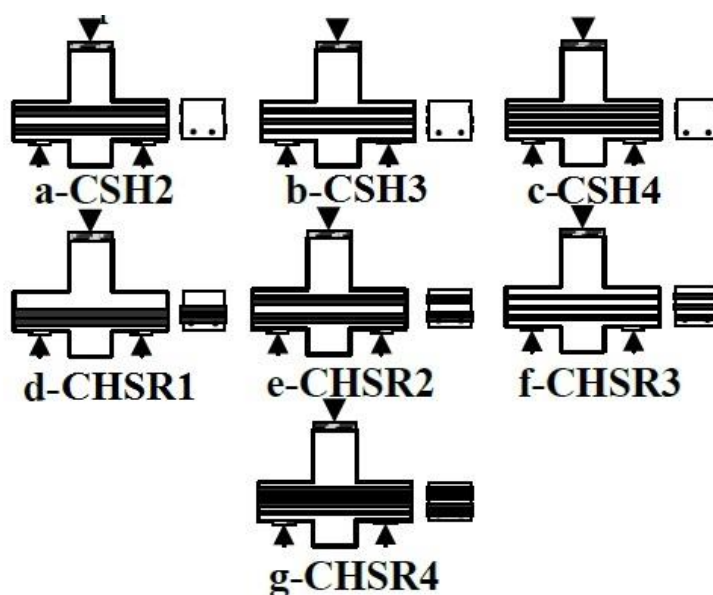


Figure 1-46: Détails des différents types de renforcement à la flexion [ANI 12]

La distribution, l'emplacement, l'orientation et la quantité de bandes de CFRP jouent un rôle important dans la modernisation des éléments(structures) renforcés, par conséquent, le renforcement des consoles par des bandes inclinées donne les meilleurs résultats si on le

compare avec les autres modèles de renforcement. Cela peut être dû à l'orientation des lamelles CFRP étant perpendiculaires aux fissures inclinées.

L'utilisation des bandes externes a un effet significatif sur les premières charges de fissuration où l'augmentation de la charge de fissuration pour la technique de renforcement à l'horizontale a été de 18,75%, tandis que l'augmentation de la charge de la première fissuration pour la technique du renforcement incliné est de 51,43%.

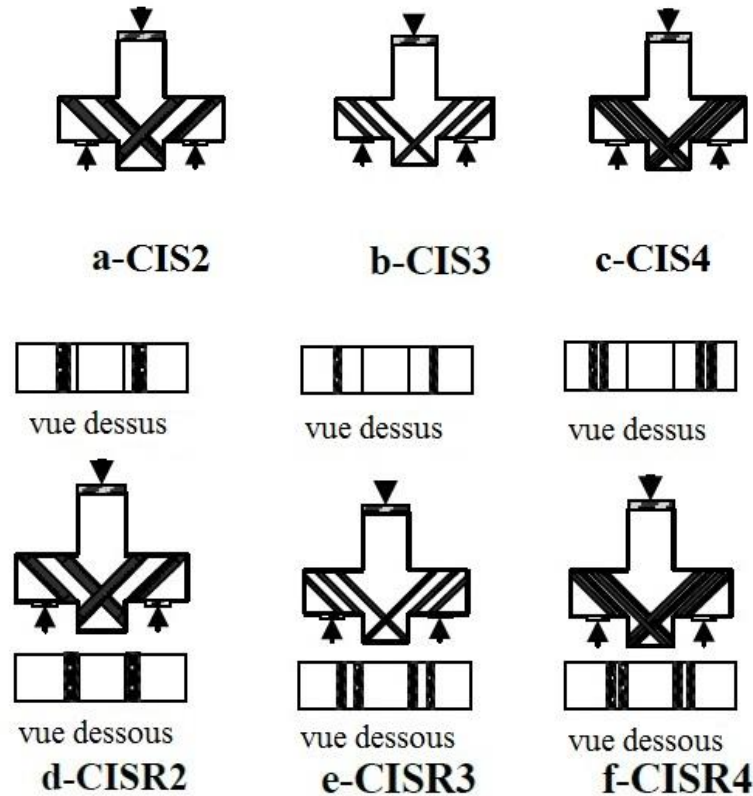


Figure 1-47 : Détails d'autres types de renforcement [ANI 12]

Dans le cas de renforcement par des bandes de fibres de carbone horizontalement, il y a peu d'effet sur la charge ultime par rapport aux consoles renforcées sur les deux faces. Par contre, le renforcement par bandage favorise une augmentation de la ductilité des consoles; gain attribué à l'effet du bandage du CFRP.

Pour la console réparée avec des bandes en fibres de carbone au cisaillement, la charge ultime a augmenté de 57% par rapport à la charge ultime de la console de référence.

Les résultats montrent une diminution moyenne de la largeur des fissures dues à la présence de bandes est de 24,3%.

1.5 CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents modèles de comportement mécanique des consoles courtes en béton armé. Ces modèles sont fondés sur des hypothèses

simplificatrices et aboutissent à des solutions analytiques qui ont nécessité des essais expérimentaux afin de valider ces modèles analytiques ou semi-empiriques.

Kriz et Raths ont utilisé une méthode de modélisation empirique et ont modélisé la deuxième phase du comportement du tirant à l'encastrement par une droite. La deuxième phase du comportement local du tirant, ainsi modélisé, ne suffit pas pour prédire la charge de rupture d'une console courte en béton armé. Kriz et Raths ont donc déterminé, par la même méthode, une expression empirique générale permettant de prévoir la charge ultime de rupture sans spécifier le mode de rupture.

Robinson considère que la console subit, au moment de la rupture ultime, une rotation autour d'un axe situé, par rapport au tirant, à une distance égale aux sept huitièmes de la hauteur utile. Il considère, dans son modèle, que la contrainte de traction sur chaque armature (tirant et cadres horizontaux) est proportionnelle à la distance entre cette armature et l'axe de rotation. Il simplifie davantage le problème en considérant que la résultante des efforts de compression et des efforts de cisaillement, à la base de la section d'encastrement, passe par l'axe de rotation. Ce modèle aboutit à une expression de la charge de rupture qui ne dépend pas de la résistance du béton. Robinson a corrigé cette expression en la multipliant par la racine carrée de la résistance du béton à la compression. En effet, il a utilisé les résultats de Kriz qui a démontré expérimentalement que la charge de rupture est proportionnelle à la racine carrée de la résistance du béton à la compression.

Niedenhoff a utilisé la méthode de la photoélasticité pour déterminer les isostatiques de traction et de compression dans une console courte. Il en a conclu que le fonctionnement mécanique d'une console courte, après fissuration, peut être modélisé par un système de trois forces constitué par la charge appliquée, l'effort du au tirant et l'effort de compression dans la bielle de béton. Ce modèle ne permet pas de décrire le comportement du tirant au cours du chargement. Mais il permet de déterminer une limite inférieure de la charge de rupture des consoles courtes en béton armé dont la section totale des cadres horizontaux est supérieure ou égale au tiers de la section du tirant.

En ce qui concerne la rupture, Robinson et Niedenhoff ne distinguent pas les quatre modes de rupture observés par Kriz :

- rupture par flexion-traction (FT);
- rupture par flexion-compression (FC);
- rupture par fendage de la diagonale (D);
- rupture par cisaillement à l'encastrement (CE).

En effet, Robinson a fretté ses consoles par une quantité importante de cadres sur toute la hauteur de la console. De ce fait, ces cadres empêchent l'ouverture excessive des fissures qui apparaissent entre la diagonale de la console et la section d'encastrement. Robinson considère donc que la rupture finale de la console se produit par flexion traction (FT) lorsque le tirant atteint sa limite élastique.

Pour Niedenhoff les deux modes de rupture (FC) et (D) n'en sont qu'un seul : la rupture par la bielle de béton comprimé. Par contre la rupture par le mode (CE) n'a pas été modélisée.

Ces modèles ne sont valables qu'à l'état ultime de rupture et ne permettent pas de décrire tout le comportement du tirant afin de suivre l'évolution de la première fissure qui apparaît à l'encastrement.

Dans l'état actuel des recherches, l'intérêt essentiel de ces modèles simples est de permettre une conception, avec une grande marge de sécurité, des consoles courtes en béton armé, sans pour autant oublier de réduire les quantités de matériaux utilisés afin de minimiser les coûts.

Cette étude bibliographie fait apparaître une augmentation de la charge portante des consoles courtes de 8 à 80% en fonction de la configuration de réparation ou de renforcement. La rigidité se trouve améliorée. Une diminution très sensible du nombre de fissures et de leur largeur. L'utilisation des bandes inclinées améliore la charge portante de façon significative. Le choix des matériaux et la préparation des surfaces à coller sont très importants.



2^{ème} Chapitre

PROPRIETES MECANIQUES DES MATÉRIAUX

Chapitre 2 Propriétés mécaniques des matériaux

2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés dans ce travail. Nous présentons également les lois de comportement mécanique du béton, de l'acier, du matériau composite et de l'adhésive par des essais mécaniques classiques : traction, compression et flexion.

2.2 BÉTON

Le béton retenu dans cette étude est un béton normal de type C30/35 dans la mesure où l'influence du type de béton sur le comportement des consoles courtes renforcées, ne fait pas l'objet de cette étude. La résistance du béton à 28 jours est de 33MPa.

2.2.1 Composition du béton.

Le béton est dosé à 400 kg/m³ de ciment CPJ-CEM II/A 32.5 R avec du sable roulé de classe 0/4 et de gravillon roulé de classe 4/12,5.

La formulation du béton est déterminée par la méthode de Faury qui prend en compte les courbes granulométriques du sable et du gravillon (Figure 2-1). La composition du béton en masse par mètre cube est donnée dans le Tableau 2-1.

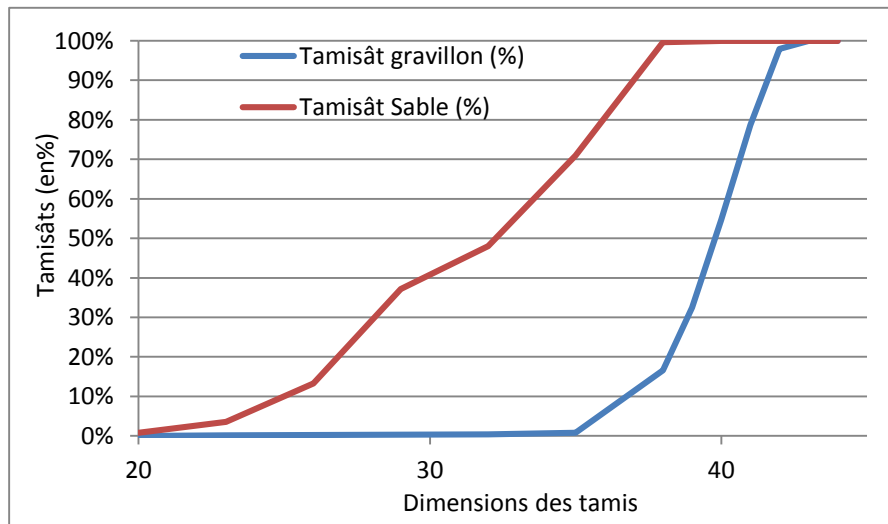


Figure 2-1: Analyse granulométrique des granulates utilisés

L'affaissement du béton frais a été réalisé à l'aide d'un cône d'Abrams (Figure 2-2). Le béton est ensuite introduit dans des moules cylindriques $\phi 16 \times H 32$ (cm) en 3 couches d'égales hauteurs, mises en place par une tige de piquage (25 fois par couche) (Figure 2-3). Les

éprouvettes ainsi obtenues serviront à obtenir les caractéristiques mécaniques (contrainte de compression, le module d'élasticité, ...) après 28 jours de séchage.

matériau	Caracteristiques	Diamètre (mm)	Composition en Masse (kg/m ³)
Ciment	CPJ-CEM II/A 32.5 R	-	400
Sable	-	0/4	598
Gravillon	-	4/12,5	1123
Eau	-	-	210

Tableau 2-1: Composition en masse pour 1m³ de béton

L'affaissement du béton sous l'effet de son propre poids est ensuite mesuré grâce au portique de mesure (Figure 2-4) et arrondi au centimètre le plus proche. La mesure est effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage (Figure 2-4). L'affaissement mesuré en moyenne du béton est de 7±1 cm.

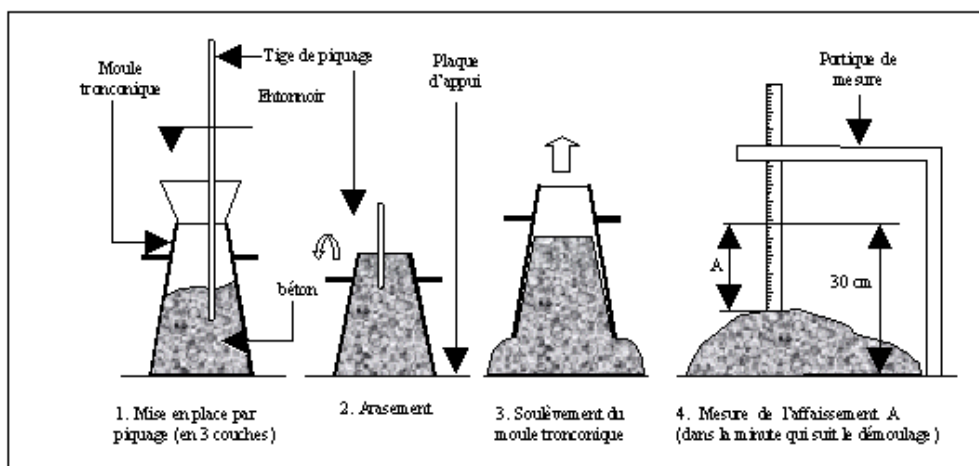


Figure 2-2: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams



Figure 2-3: Remplissage du cône d'Abrams



Figure 2-4: Mesure de l'affaissement du béton

2.2.2 Essai de compression

Les essais sur le comportement du béton en compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques $\varnothing 16 \times H 32$ cm. Les essais sont réalisés à l'aide d'une machine de compression "CONTROLAB" d'une capacité de charge maximale de 3000kN. La vitesse de chargement appliquée en compression est de 10kN/s.

Les déformations longitudinales et transversales des éprouvettes cylindriques sont mesurées à l'aide de jauges de déformations dont la longueur de la grille est égale à 6 cm.



Figure 2-5: Machine de compression "Controlab"

L'éprouvette cylindrique en béton doit présenter une surface lisse et bien perpendiculaire par rapport à la charge appliquée afin d'assurer la charge bien répartie sur la surface entière de l'éprouvette. Par conséquent, il est indispensable et nécessaire de rectifier ou de surfacer la surface du béton à l'aide du mélange soufre-sable fin. La température de fusion du soufre étant basse, un dispositif simple (Figure 2-6) avec deux poignés permet d'obtenir des surfaces lisses comme le montre dans la Figure 2-7.

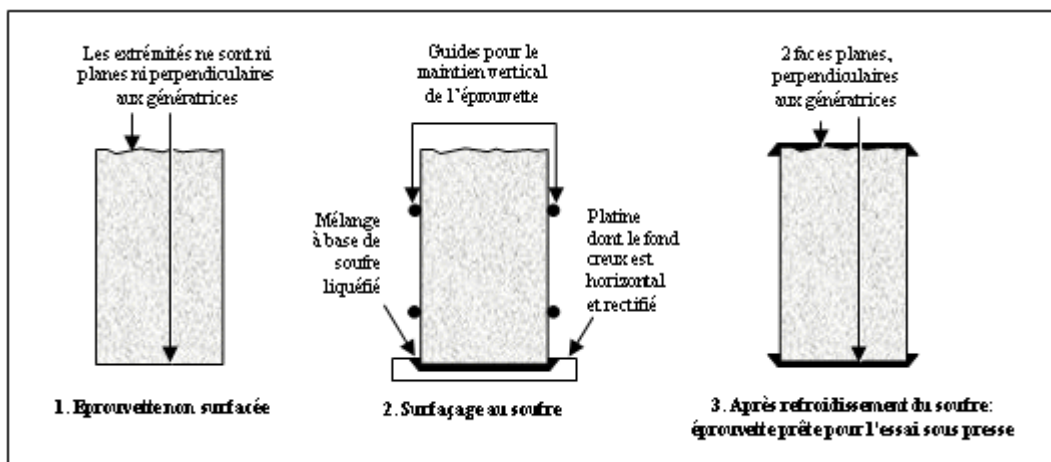


Figure 2-6: Principe du surfacage des éprouvettes cylindriques à l'aide du soufre



Figure 2-7: Eprouvettes cylindriques



Figure 2-8: Position des jauges de déformation sur l'éprouvette

Chaque gâchée (capacité maximale de malaxeur est de 250 litres) est caractérisée par trois éprouvettes cylindriques et trois éprouvettes prismatiques.

Les valeurs moyennes de la résistance de compression, du module d'élasticité et du coefficient de Poisson obtenues sont données dans Tableau 2-2.

Propriété	Symbole	Valeur
Résistance à la compression à l'âge de 28 jours	f_c	$33,2 \pm 2,5$ MPa
Module d'Young	E_b	30200 ± 30 MPa
Coefficient de Poisson	ν_b	0,25

Tableau 2-2 : Caractéristiques du béton sollicité en compression

Les jauges de déformation collées sur les éprouvettes comme les montre dans la Figure 2-8, permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques du béton.

La Figure 2-9 présente une des courbes contrainte-déformation obtenues lors des essais de compression. La contrainte maximale à la compression est de 33 MPa et une déformation maximale de 0,34%.

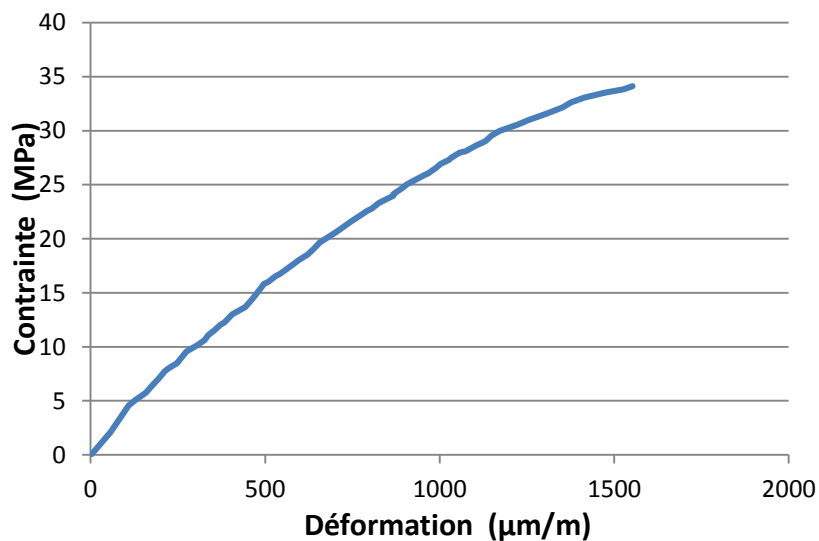


Figure 2-9: Courbe « Contrainte-Déformation » en compression du béton utilisé

La rupture des éprouvettes cylindriques en béton est caractérisée par un cône (Figure 2-10 et Figure 2-11) conforme à la ruine classique de ce type d'éprouvettes.

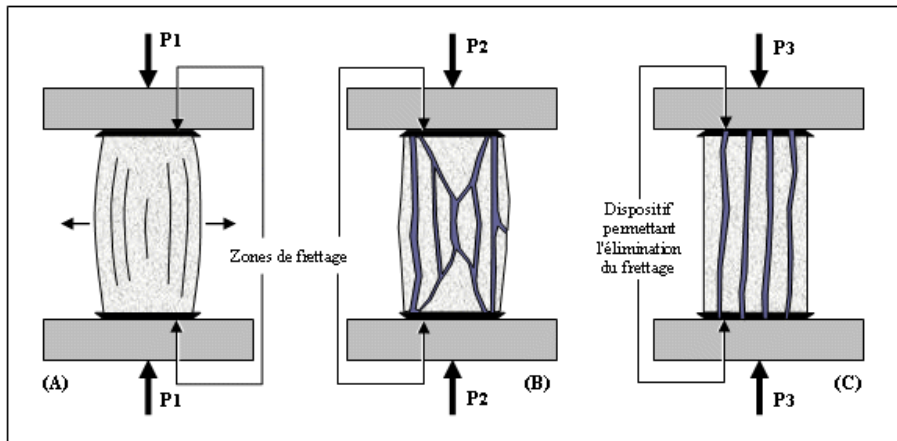


Figure 2-10: Mode de rupture des éprouvettes cylindriques en compression



Figure 2-11 : Forme conique caractéristique de la rupture d'éprouvettes cylindriques en béton

2.2.3 Essai de traction par flexion

Des éprouvettes prismatiques en béton, de dimensions 10x10x40cm ont été testées en utilisant une machine de flexion d'une capacité de charge maximale de 150 kN (Figure 2-12). La vitesse de chargement est de 0,17kN/s. Les résultats des essais donnent comme valeur moyenne de traction par flexion est de 4.87 ± 0.67 MPa.



Figure 2-12: Dispositif pour l'essai de traction par flexion 4 points sur les éprouvettes prismatiques et l'éprouvette après la rupture

La Figure 2-13 montre la courbe force – déformation obtenue par une jauge de déformation installée sur la surface inférieure du béton.

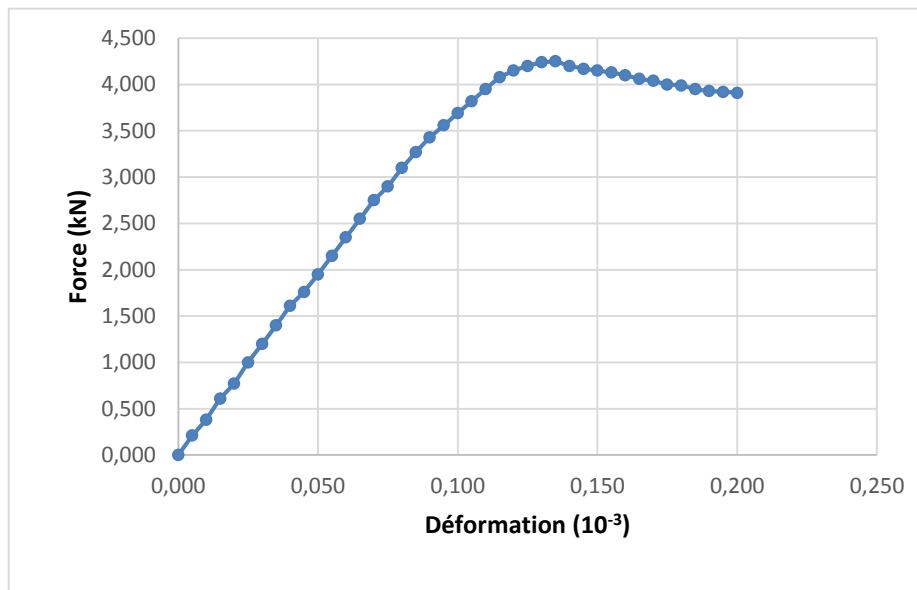


Figure 2-13: Courbe « Force-Déformation » obtenue dans un essai de traction par flexion d'une éprouvette 10x10x40 cm du béton utilisé

La loi de comportement utilisée est la formule de Park et Paulay suivante:

Lorsque la déformation $\varepsilon \leq \varepsilon_0 = 0,002$

La contrainte en compression

$$f_c = f_c' \left[2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2-1)$$

Lorsque la déformation $\varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} = 0,0035$

La contrainte en compression

$$f_c = f_c' \left[1 - 0,15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0} \right] \quad (2-2)$$

où

ε : déformation du béton,

ε_0 : déformation du béton correspondant à la contrainte maximale en compression du béton f_c'

ε_{cu} : déformation maximale du béton

f_c' : résistance à la compression du béton.

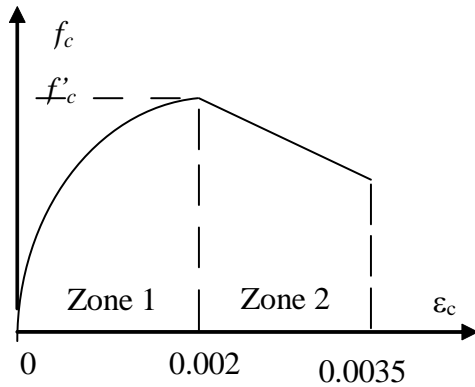


Figure 2-14 : Comportement du béton (Park, 1975).

2.3 ACIER

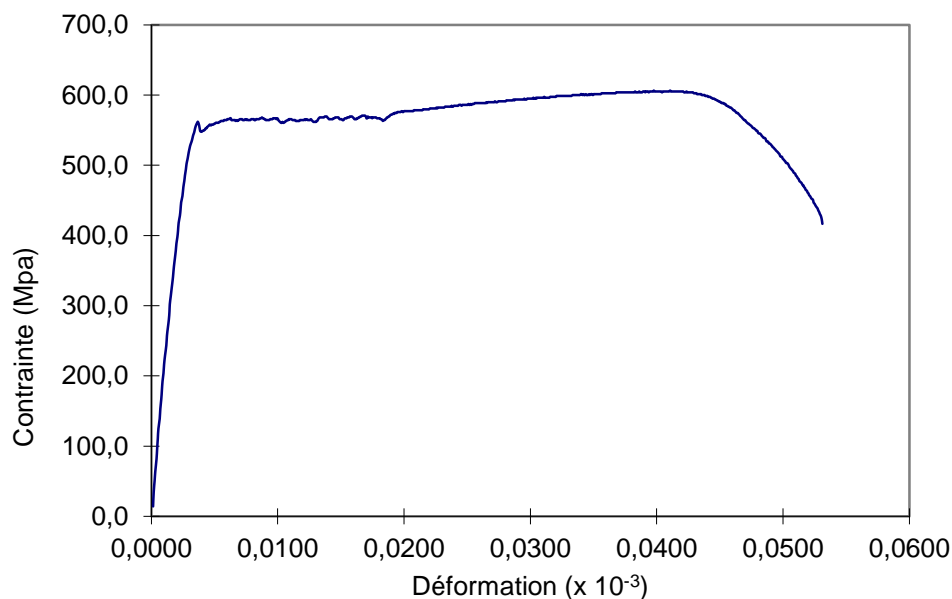
Les essais de traction simple ont été réalisés sur des barres d'acier de 10mm de diamètre de type Haute Adhérence (HA).

2.3.1 Essai de traction simple

Les trois essais ont été effectués à une vitesse de déplacement constante de 5kN/s à l'aide d'une machine de traction simple de type MTS d'une capacité maximale de 250 kN. Les déformations longitudinales et transversales sont mesurées à l'aide des jauges de déformation.

2.3.2 Loi de comportement: Contrainte-déformation

La Figure 2-15 permet de déterminer la limite élastique, le module d'élasticité et les déformations correspondantes.

Figure 2-15: Courbe « Contrainte-Déformation » d'une barre d'acier (ϕ 10cm) sollicitée en traction simple

Le comportement mécanique de l'acier utilisé est de type élasto-plastique Figure 2-15. Les caractéristiques mécaniques de l'acier sont résumées dans le Tableau 2-3.

Propriétés	Symbole	Value	Unité
Limite élastique	f_y	520 ± 20	MPa
La résistance à la rupture	f_u	610 ± 10	MPa
Module d'Young	E_s	200000 ± 10000	MPa
Allongement de la rupture	ε_y	11.04 ± 0.06	%
Coefficient de Poisson	ν_s	0,30	

Tableau 2-3: Caractéristiques mécaniques de l'acier ($\phi 10\text{cm}$) utilisé.

La loi de Hooke est applicable et elle est donnée par la formule suivante :

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \text{ si } \sigma \leq f_y \quad (2-3)$$

et
$$\sigma = f_y, \text{ si } \sigma > f_y \quad (2-4)$$

Où σ est la contrainte de l'acier, E est le module d'Young, ε est la déformation de l'acier et f_y est la contrainte à la limite élastique de l'acier.

Cette relation peut être illustrée par la figure suivante :

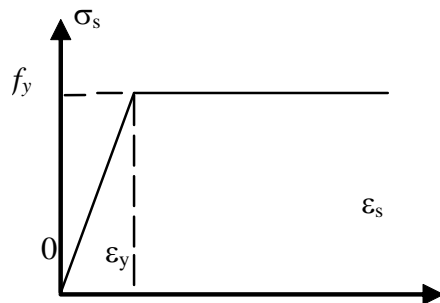


Figure 2-16: Relation entre la contrainte et la déformation de l'acier

2.4 MATÉRIAUX COMPOSITES EN FIBRES DE CARBONE.

Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté. Citons par exemples bois et torchis, matériaux de la vie quotidienne, utilisés dès l'antiquité par l'homme. On appelle « matériaux composites » des arrangements de fibres d'un matériau résistant (renfort) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice conserve leur disposition géométrique aux fibres et leur transmet les sollicitations auxquelles est soumise la pièce.

Les matériaux composites renforcés utilisés dans le bâtiment peuvent être :

- ✚ à matrice thermodurcissable (polyester, vinylester, phénolique, polyuréthane),
- ✚ à matrice thermoplastique; ces derniers sont en nette progression. Les renforts sont en fibres de verre, de kelvar ou de carbone tissées ou non.

Les procédés de transformation utilisés dans le bâtiment sont principalement : la compression SMC (Sheet Moulding Compound) et BMC (Bulk Moulding Compound), le drapage ou le procédé RTM, la découpe de rouleaux thermoplastiques renforcés, par exemple en polycarbonate, la pultrusion, largement développée aux USA, reste encore peu développée en France.

Les technologies évoluent actuellement vers: l'utilisation de composites à matrice thermoplastiques; le développement du marché de la rénovation ; les composites intelligents qui, en intégrant des capteurs à fibres optiques, permettent de mesurer les déformations des structures.

2.4.1 Avantages des composites

2.4.1.1 *Propriétés physiques et mécaniques*

Les composites apportent au bâtiment la souplesse des formes, la résistance aux contraintes climatiques, et la résistance aux séismes. Les composites permettent de mieux protéger les bâtiments contre les agressions extérieures grâce à leurs qualités :

- de résistance à la corrosion,
- d'étanchéité et d'isolation thermique,
- d'isolation phonique,
- de bonne tenue aux variations climatiques, de température et d'humidité (dômes, maisons mobiles).

La grande rigidité, la résistance aux vibrations des composites à fibres de carbone et leur haut pouvoir d'absorption d'énergie justifient leur emploi dans les constructions en zone sismique.

2.4.1.2 *Poids*

La légèreté des composites constitue dans certains cas un avantage intéressant pour leur utilisation dans les bâtiments, par exemple pour des charpentes sous toiture réalisées en poutres pultrudées ou des tabliers.

La mise en œuvre des structures en composites requiert des équipements moins chers, plus légers et de taille plus réduite que pour la réalisation de bâtiments en béton et limite le recours aux grues. Cet avantage est décisif en milieu très urbanisé.

2.4.1.3 *Tenue au feu*

Les matériaux composites jouent un rôle important dans la sécurité en cas d'incendie :

- réduction des émissions toxiques ;
- limitation de la propagation des flammes.

Les composites permettent de réduire les conséquences d'un incendie grâce à leur résistance au feu et à leur capacité de limiter l'opacité des fumées et les émissions toxiques.

2.4.2 **Les inconvénients des composites**

L'utilisation des composites dans le bâtiment ne pourra se développer en France que si les prescriptions techniques actuelles sont mieux adaptées à leur spécificité.

Les caractéristiques mécaniques des composites sont généralement inférieures à celle des bétons pour certaines fonctions structurelles, en particulier :

- la résistance à la fissuration,
- la fragilité, conséquence de l'absence de déformation plastique.

Les composites doivent s'imposer face à la forte concurrence des bétons spéciaux (béton étanche, béton résistant à la fissuration) dont l'utilisation est mieux connue des concepteurs du génie civil.

2.4.3 **Caractéristiques mécaniques**

Les caractéristiques mécaniques du mélange renfort/matrice peuvent être estimées à partir des caractéristiques de chacun des constituants. On trouve à ce sujet dans la littérature un certain nombre de relations obtenues par voie théorique ou semi-empirique, et dont les résultats ne concordent pas toujours avec les valeurs déduites d'essais. L'une des raisons en est que les fibres elles-mêmes présentent, suivant leur nature, une anisotropie plus ou moins marquée. Sur le tableau ci-dessous, l'on notera de faibles valeurs des modules d'élasticité longitudinaux dans le sens perpendiculaire aux fibres pour le carbone et le kevlar, le verre apparaissant isotrope. Cette particularité est due à l'étirage, lors de leur élaboration, des fibres de carbone et de kevlar, qui entraîne l'orientation des chaînes de molécules.

Dans le cas simple d'états de contraintes planes on peut faire apparaître les coefficients élastiques qui permettent de relier les contraintes appliquées aux déformations qu'elles induisent.

2.4.3.1 *Mélange renfort-matrice*

Teneur en volume de renfort est déterminé par :

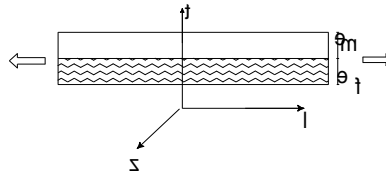
$$V_f = \frac{\text{volume de renfort}}{\text{volume total}} \quad (2-5)$$

La teneur en volume de matrice est telle que:

$$V_m = \frac{\text{volume de matrice}}{\text{volume total}} \quad (2-6)$$

$$\text{avec} \quad V_m + V_f = 1 \quad (2-7)$$

$$\text{La masse volumique} \quad \rho = \frac{\text{masse totale}}{\text{volume total}} \quad (2-8)$$



où e_m et e_f représentent l'épaisseur de la matrice et de la fibre.

2.4.3.2 *Loi de comportement :*

La loi de comportement est décrite sous la forme suivante:

$$\varepsilon = \frac{1+\nu}{E} \Sigma - \frac{\nu}{E} \text{trace}(\Sigma) \mathbf{I} \quad (2-9)$$

où E et ν sont des coefficients élastiques du matériau considéré

ε est le tenseur de déformation

Σ est le tenseur des contraintes

\mathbf{I} est le tenseur unité.

La plaque en matériau composite utilisée est constituée d'une ossature appelée renfort qui assure la tenue mécanique et d'une protection appelée matrice qui est généralement une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) et qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort. Les tissus en fibres de carbone sont utilisés dans cette étude.

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Il peut se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes (mat) ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles) en fonction de l'application envisagée. Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance à la compression faible.

2.4.4 Caractéristiques des matériaux composites en fibres de carbone utilisés

Nous avons utilisé des matériaux composites tissus en fibres de carbone unidirectionnelles (Figure 2-17) et bidirectionnelles (Figure 2-21) et des lamelles "CarboDur" (Figure 2-24).

Les éprouvettes ont été instrumentées à l'aide de jauges de déformation KOYOWA type KFG - 2-120-D16-11, avec un facteur de jauge de $2.07 \pm 1.0\%$, de 2 mm de longueur. Les jauges de déformation « rosette » enregistrent les microdéformations dans les directions longitudinale « V » et horizontale « H » (Figure 1-27).

2.4.4.1 Matériaux composites tissus en fibres de carbone unidirectionnelles

C'est un tissu de renforcement de structures, à base de fibres de carbone uni directionnelle orienté de 0° dans le sens de la longueur du tissu. Il est composé de 99% fil de chaîne en fibres de carbone et de 1% de fil de trame en fibres thermoplastiques blanches (Figure 2-17). L'épaisseur du tissu est de 0,2mm.

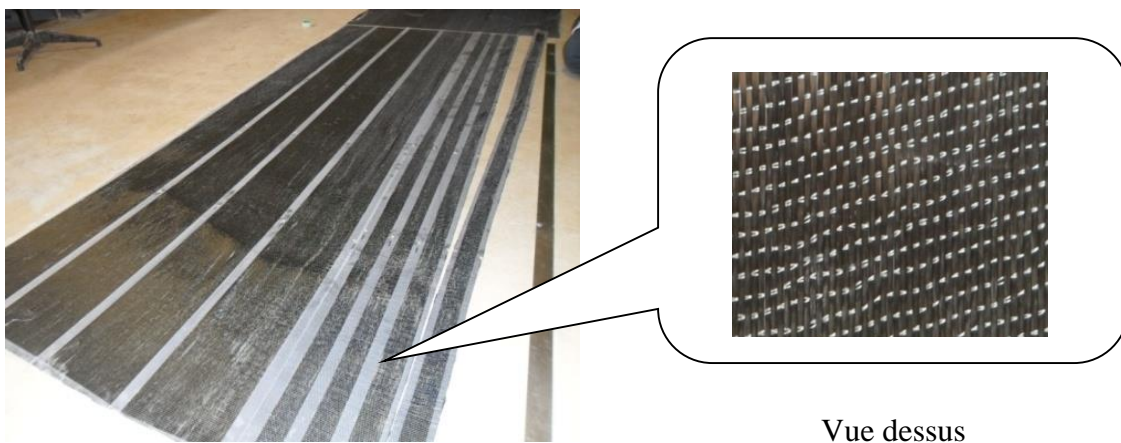


Figure 2-17: Tissus en fibres de carbone unidirectionnelles

Les caractéristiques mécaniques de matériau composite (tissu de fibres de carbone unidirectionnelles avec l'adhésif SIKA 330) sont présentées dans le Tableau 2-4.

Propriétés	Symbole	Valeur
Charge de rupture	Fr	4,62 kN
Module d'élasticité	E	86200 MPa
Déformation ultime	ε	$9182 \cdot 10^{-6}$
Coefficient de Poisson :	ν	0,45

Tableau 2-4 : Résultats des essais de traction des fibres unidirectionnelles

Les jauges de déformation appelées « rosettes » collées sur les éprouvettes comme le montre sur la Figure 2-20, permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques des tissus en fibres de carbone unidirectionnelles. La Figure 2-18 présente la courbe « Force-Déformation » obtenues lors des essais de traction pour le matériau composite en fibres de carbone.

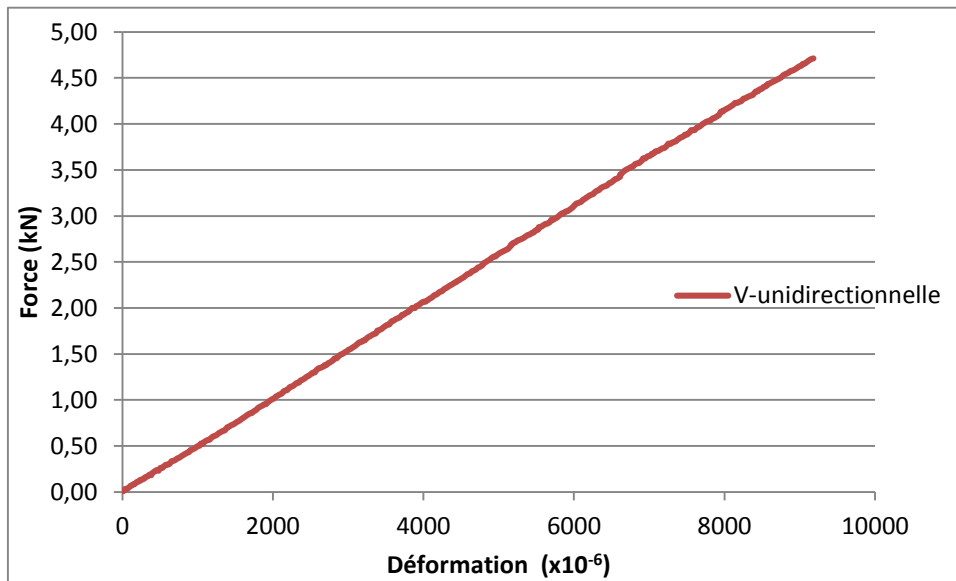


Figure 2-19 : Comportement de la plaque en tissu de fibres de carbone unidirectionnelles.

La Figure 2-20 illustre le mode de rupture conventionnel de l'éprouvette avec l'orientation des fibres de carbone à 0° .



Figure 2-20: Rupture d'une éprouvette composite en fibres de carbone unidirectionnelles sollicitée en traction

2.4.4.2 *Matériaux composites en fibres de carbone bidirectionnelles*

Le matériau composite est composé d'un tissu de renforcement de structures, à base de fibres de carbone bidirectionnelles, orienté de $45/45^\circ$ dans le sens de la longueur du tissu. (Figure 2-17). L'épaisseur du tissu est de 0,5mm. Le Tableau 2-5 présente les caractéristiques mécaniques du matériau composite en tissu de fibres de carbone bidirectionnelles.

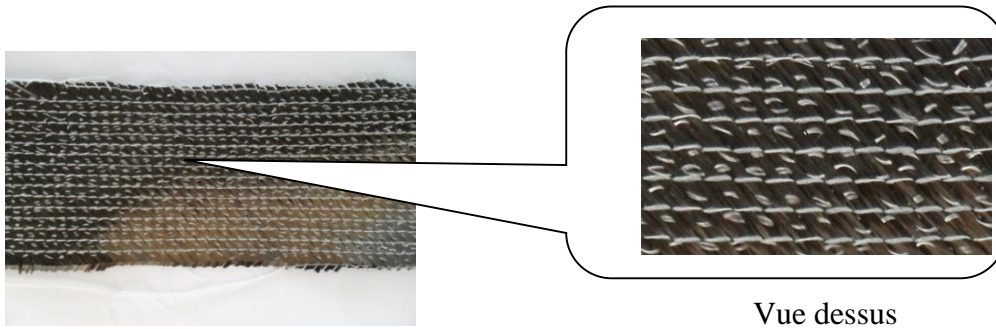


Figure 2-21 : Tissu en fibres de carbone bidirectionnelles

Propriétés	Symbole	valeur
Charge de rupture	Fr	3,5 kN
Module d'élasticité	E	87300 MPa
Déformation ultime	ϵ	11360×10^{-6}
Coefficient de Poisson :	ν	0,35

Tableau 2-5 : Caractéristiques des plaques en tissu de fibres de carbone bidirectionnelles

La Figure 2-22 présente la courbe « Force-Déformation » obtenue lors de l'essai de traction du matériau composite en fibres de carbone bidirectionnelles.

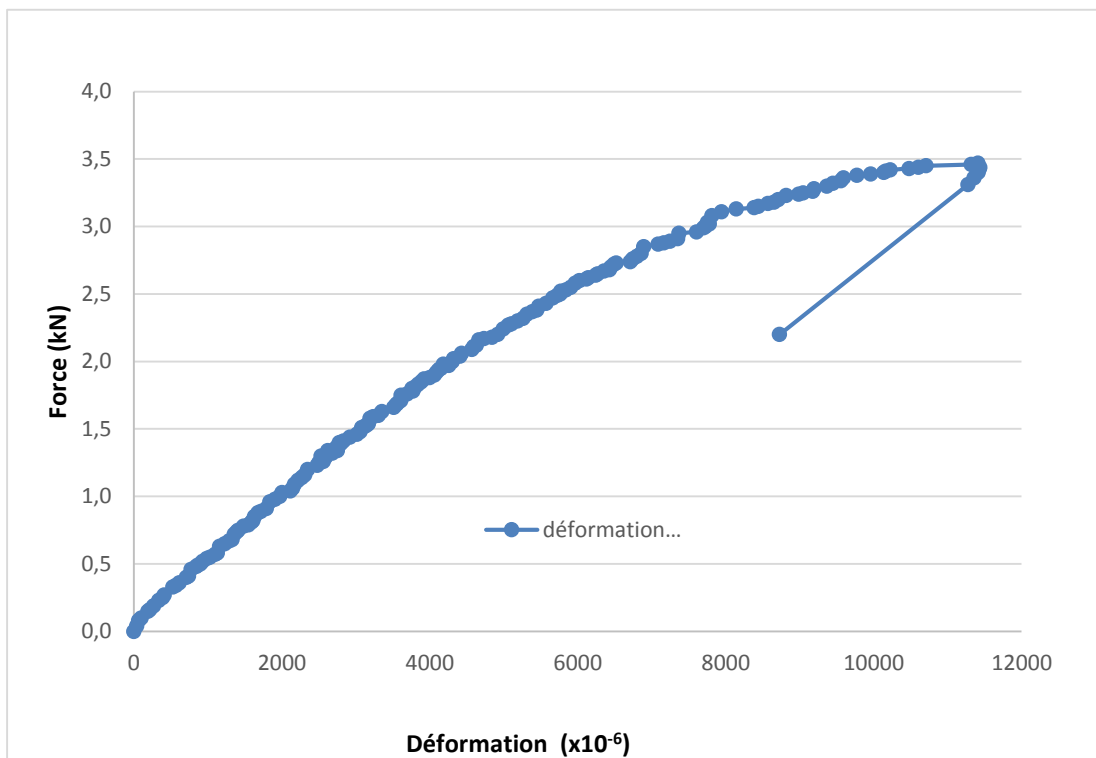


Figure 2-22 : Comportement de la plaque en tissu de fibres de carbone bidirectionnelles.

La Figure 2-23 illustre la rupture de l'éprouvette avec l'orientation des fibres de carbone des tissus bidirectionnels +45/-45°.

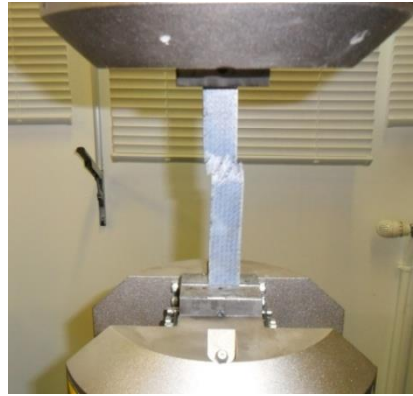


Figure 2-23 : Rupture d'une plaque composite en tissu de fibres de carbone bidirectionnelles à 45° sollicitée en traction

2.4.4.3 Lamelle pultrudée à base de fibres de carbone - Sika CarboDur S1012

Les "Sika CarboDur S" sont des P.R.F.C. (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) pultrudés, à base de fibres de carbone noyées dans une matrice époxydique. Ils se présentent sous forme de lamelles préfabriquées, avec une épaisseur du tissu de 1,25mm (Figure 2-24) (ANNEXE 2).



Figure 2-24: Lamelle en fibres de carbone Sika CarboDur S1012

Les caractéristiques mécaniques de matériau composite « CarboDur » sont résumées dans le Tableau 2-6.

Propriétés	symbole	valeur
Module d'élasticité	E	165 000MPa
Résistance en traction uni axiale	σ	3100 MPa
Élongation à la rupture :		>1,70 %

Tableau 2-6 : Caractéristiques mécaniques de la lamelle CarboDur S1012

2.5 COLLE ADHÉSIVE

Nous avons utilisé deux types de colles (Sikadur-330 et Sikadur 30): l'une pour l'application des tissus composites et l'autre pour coller les plaques "carbodor".

2.5.1 Sikadur®-330-résine d'imprégnation époxydique

La colle adhésive "Sikadur-330" est une résine époxyde thixotrope à 2 composants (Figure 2-25). C'est un mélange de résine époxydique et de fillers spéciaux. Sikadur®-330 conforme aux exigences de la norme NF EN 1504-4 en tant que produit de collage de matériaux composites.



Figure 2-25: Résine époxyde thixotrope à 2 composants, composant A – « blanc » et composant B – « gris »



Figure 2-26 : Mélange de A + B – « gris claire »

Trois éprouvettes ont été préparées selon la norme. Les essais de traction ont été effectués avec une vitesse de chargement de 0,05 kN/s. Ces essais ont été réalisés sur une machine de flexion INSTRON 8801 (Figure 2-25). L'éprouvette a été instrumentée d'une "rosette" pour obtenir en même temps les déformations longitudinales et transversales et les caractéristiques mécaniques du matériau étudié.

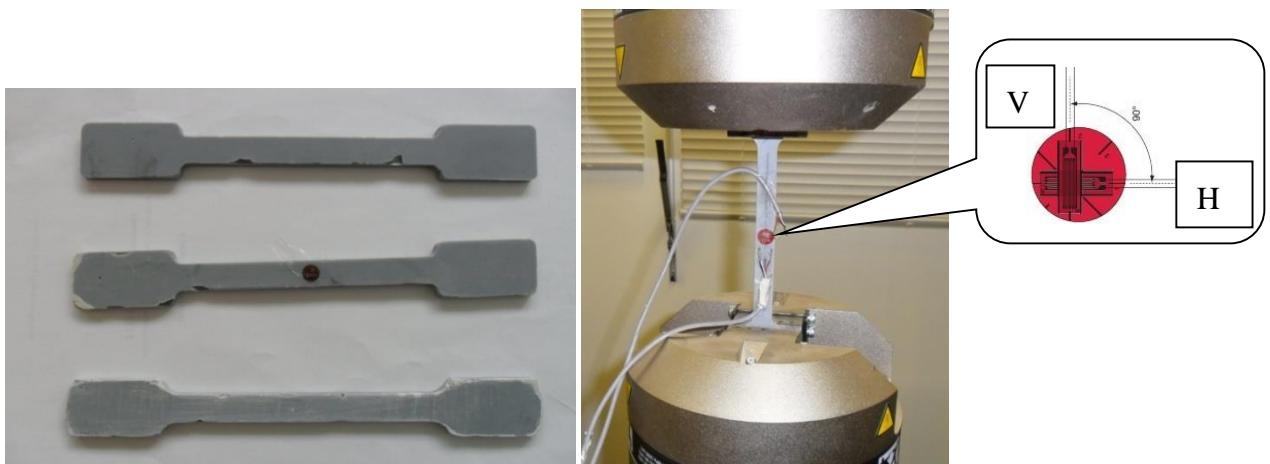


Figure 2-27 : L'adhésif sous traction simple.

Le Tableau 2-7 donne les valeurs moyennes pour les éprouvettes qui ont été testées. La Figure 2-28 montre le comportement à la traction de l'adhésif "Sikadur-330" de type élastique linéaire jusqu'à rupture. La figure montre bien que l'adhésif "Sikadur-330 est un matériau fragile.

Propriétés	symbole	valeur
Charge de rupture	Fr	1,95 kN
Module d'élasticité	E	4100 MPa
Déformation ultime	ε	$7488 \cdot 10^{-6}$
Coefficient de Poisson :	ν	0,41

Tableau 2-7 : Caractéristiques mécaniques de l'adhésive Sakadur-330

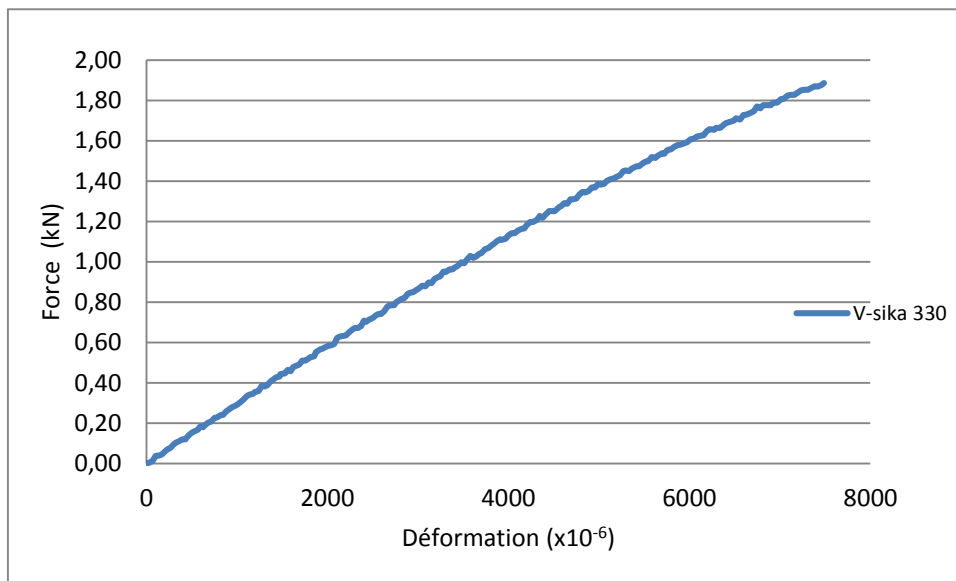


Figure 2-28 : Courbe « Force-Déformation » en traction de la colle adhésive "Sikadur-330"

Les types de ruptures ont été montrés sur la Figure 2-29 suivante :

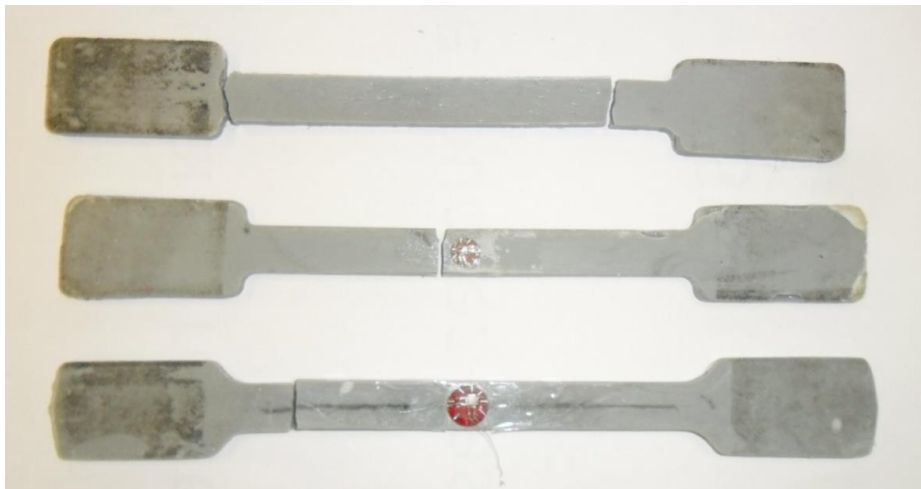


Figure 2-29 : Ruptures des éprouvettes adhésives instrumentées d'une rosette de jauges électriques

2.5.2 Sikadur-30-résine d'imprégnation époxydique

Nous avons utilisé aussi la colle "Sikadur-30". C'est une résine époxyde thixotrope à 2 composants: mélange de résine époxydique et de fillers spéciaux. Sikadur-30 est conforme aux exigences de la norme NF EN 1504-9 en tant que produit de collage de plaques de renforcement que sont les plaques « carbodur » (Sikadur-30- voir l'Annexe 2).

Le Tableau 2-8 présente les valeurs des caractéristiques mécaniques pour la colle « Sika dur 30 » utilisée pour le collage des lamelles à base de fibres de carbone. Ces valeurs sont issues de la notice Produit "Edition 2408 2011, Numéro 3022, version N°2012-07, Sikadur-30".

Propriétés	symboles	Valeur
Module d'élasticité en traction	E	11200 MPa
Résistance en traction uniaxiale	σ	24 MPa
Résistance en cisaillement	τ	16 MPa

Tableau 2-8: Propriétés de la colle "Sikadur 30"

2.6 CONCLUSION DU CHAPITRE 2

La bonne connaissance des caractéristiques et du comportement mécanique des matériaux est indispensable pour la compréhension et l'interprétation du comportement de notre structure en béton armé renforcée.

Des jauges électriques ont permis de mesurer les déformations unitaires du béton, de l'armature et du matériau composite et de connaître leur comportement sous des sollicitations simples (traction simple, compression, cisaillement).

Les consoles courtes en béton armé, éléments communs des structures en béton ou d'ouvrages, sont sous-dimensionnées afin de mettre en évidence l'influence du renforcement par collage des tissus en fibres de carbone.

La méconnaissance de l'influence des différents paramètres sur le comportement de notre corps d'épreuve nous conduit dans le chapitre suivant à examiner l'effet de la variation de l'épaisseur (nombre de couches de tissus) de la plaque composite en fibres de carbone et du joint adhésif, la longueur d'ancrage du tissu, l'angle de collage de la plaque, de même que l'étude locale du comportement mécanique de consoles en béton armé renforcées.

3^{ème} Chapitre

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES CONSOLES COURTES EN BÉTON ARME RENFORCÉES

Chapitre 3 Étude expérimentale

3.1 INTRODUCTION

Nous avons effectué des essais sur des consoles courtes en béton armé renforcées par collage de matériau composite instrumentées par des jauges électriques. Ces essais nous permettent de mieux comprendre les phénomènes de fissuration et de rupture; et de faire une analyse plus fine du comportement du tirant à l'encastrement.

Nous présentons et interprétons, dans ce chapitre, les résultats de ces essais où nous montrons l'influence de certains paramètres comme l'épaisseur de la plaque composite symbolisée par le nombre de couches des tissus composites en fibres de carbone sur la charge ultime de rupture et sur le comportement local à l'aide des jauges de déformation.

Cependant, bien évidemment, nous décrivons dans un premier temps le modèle expérimental, ensuite le dispositif pour la réalisation des différents essais.

3.2 MODÈLE EXPÉRIMENTAL

Le modèle expérimental est constitué par deux consoles identiques encastrées dans un poteau symétriquement par rapport à son axe vertical (Figure 3-1). Le poteau a pour dimensions 15x30x100 cm et est suffisamment rigidifié par des armatures longitudinales et transversales afin d'assurer une parfaite transmission des efforts verticaux aux consoles. Le corps d'épreuve est soumis à un essai de flexion en position inversée par rapport à la réalité.

Toutes les consoles sont de forme trapézoïdale et ont la même géométrie avec une épaisseur de 15 cm (Figure 3-1). L'inclinaison de la face inférieure est choisie de telle manière que la hauteur de la section, contenant le point d'application de la résultante des charges, soit supérieure ou égale à la moitié de la hauteur de la section d'encastrement pour toutes les portées de cisaillement testées.

Les armatures du tirant de l'une des deux consoles d'un corps d'épreuve traversent le poteau horizontalement pour constituer les armatures du tirant de l'autre console. Cette disposition assure, d'une part, un ancrage droit suffisant compte tenu de la longueur de la section du poteau, et d'autre part, une meilleure symétrie des efforts de traction transmis aux consoles.

L'ancrage des armatures du tirant, du côté de la face libre de la console, est constitué par une barre de même diamètre que celles-ci. Cette barre est soudée perpendiculairement aux armatures du tirant.

Les armatures réparties sont des cadres horizontaux et les armatures de montage sont disposées comme indiqué à la Figure 3-1.

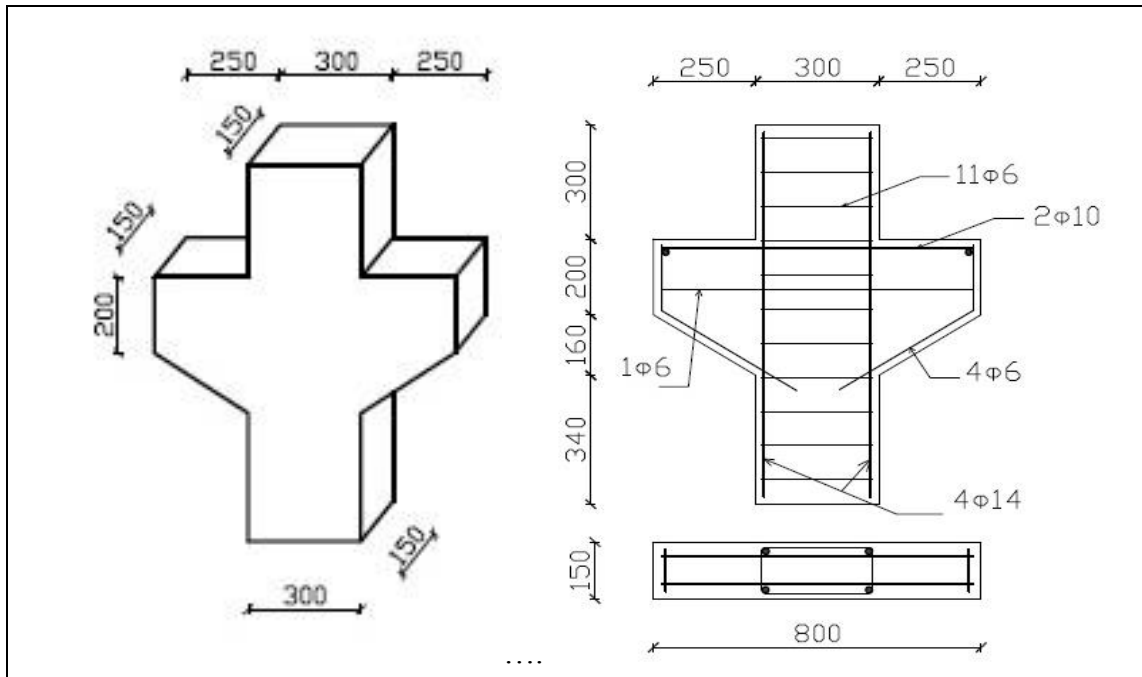


Figure 3-1 : Géométrie et dimensions des consoles courtes en béton armé

3.3 RÉALISATION DES CONSOLES COURTES EN BÉTON ARMÉ

Nous avons réalisé 26 consoles en béton armé. Toutes les consoles courtes ont les mêmes dimensions et le même renforcement en armature.

Dans ce paragraphe, un suivi de technique des travaux d'élaboration des consoles courtes en béton armé est présenté. Suivant un ordre chronologique les étapes principales sont :

- Préparation des armatures en acier
- Mise en place des jauges de déformation sur la surface de l'acier et protection
- Mise en place du béton
- Traitement de surface de la console courte en béton armé afin d'assurer une bonne adhérence entre le béton et le renforcement en matériaux composites
- Mise en place du renforcement par collage de matériaux composites

- Mise en place des jauges de déformation sur la surface des matériaux composites et sur le béton

3.3.1 Préparation des armatures en acier.

Le modèle expérimental de la Figure 3-2 fait l'objet déjà de référence pour les travaux de Khadraoui [KHA 98] sur le comportement mécanique de console courte en béton armé. En effet, il paraît intéressant de partir de ce modèle pour le renforcer et de suivre son comportement dans le temps c'est-à-dire en le soumettant à un essai de fatigue. Deux barres d'acier HA 10 sont utilisées comme tirants. Les barres d'acier lisses de diamètre 6mm ont été utilisées comme cadres. La Figure 3-2(a) illustre l'armature et le coffrage prêt à recevoir le béton, Figure 3-2 (b).



(a)



(b)

Figure 3-2 : Ferrailage des consoles courtes

3.3.2 Mise en place des jauges de déformation sur les barres d'acier

Nous préparons les surfaces de façon minutieuse qui vont recevoir les jauges électriques à l'aide de papier abrasif et des produits nécessaires pour une adhésion parfaite de la jauge. Le collage des jauges nécessite une préparation minutieuse de la surface de l'acier. La nécessité d'avoir une très bonne adhérence entre la jauge et la surface d'acier donne lieu à une technique de dégraissage de la barre en acier en profondeur.

Les jauges électriques sont utilisées pour effectuer des mesures locales de déformation de l'acier ou du béton.

Nous respectons les recommandations de chez « Vishay » pour le collage des jauges. En effet, on a utilisé successivement :

-
- un conditionneur (M- Prep Conditionner A /a water based acidic surface cleaner/).
 - Ensuite le neutraliseur (M- Prep Neutralizer 5A /a water based alkaline surface cleaner/), dont l'action assure le dégraissage en profondeur et un neutraliseur pour éviter l'action du conditionneur sur la jauge de déformation collée. La surface de la jauge de déformation est ensuite traitée par un produit qui permet d'accélérer l'action de la colle (M200 Catalyst- C).
 - Et finalement la jauge est collée par M- BOND 200 ADHESIVE. Tous les produits utilisés, dans la procédure du collage des jauges de déformation sont de type "Vishay Micromeasurements".

Ensuite, on câble les jauges en soudant les fils qui seront reliés à un conditionneur pour la mesure des déformations (Figure 3-3).

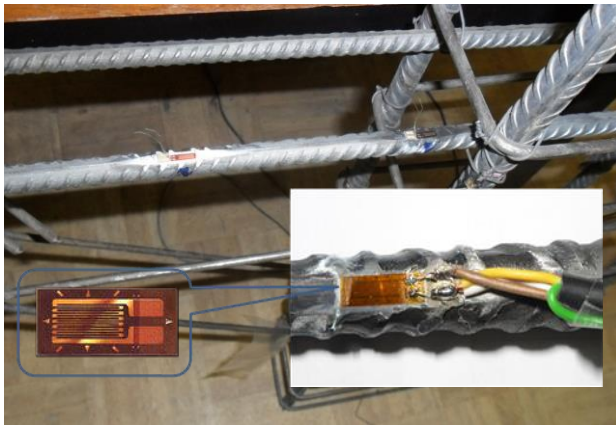


Figure 3-3 : Mise en place des jauges



Figure 3-4 : Protection des jauges

Toutes les jauges collées sont ensuite protégées par des produits spéciaux afin d'éviter leur endommagement par l'action de l'humidité et des actions mécaniques pendant le coulage du béton comme par exemple les vibrations Figure 3-4.

3.3.3 Mise en place du béton

La Figure 3-5 montre la mise en place du béton. Le temps de vibration est de 9 secondes tous les 10cm. Une fois le moule rempli, une règle est utilisée pour enlever le surplus du béton et rendre la surface plane.



Figure 3-5 : Mise en place du béton

3.3.4 Préparation des surfaces avant le collage des matériaux composites

La préparation de surface qui va recevoir les plaques composites est d'une importance primordiale et demande beaucoup de soins. La préparation des surfaces de béton doit être effectuée par l'élimination de toute matière comme : l'huile, la graisse, etc. Différentes techniques existent : brossage mécanique, sablage à l'aide de sable de grains fins etc...

Dans notre cas, nous avons sablé toutes nos consoles courtes en béton armé (Figure 3-6) à l'aide de sable de grains fins de diamètre de l'ordre du micron. Les empreintes de ces grains de sable sur la surface de la console, vont recevoir après application de la colle les charges (composition de la résine) qui contribuent grandement à la résistance mécanique de l'ensemble collé.

Les quatre coins de la console sont arrondis afin de réduire la diminution de la résistance et pour éviter la déchirure prématurée du matériau composite.

Préparation de la surface doit être effectuée juste avant l'opération de soudage pour empêcher toute contamination. Après, la contamination peut être évitée par l'application de la colle sur le béton.



Figure 3-6 : Traitement de surface par sablage

3.3.5 Collage des matériaux composites

La surface du béton est sablée et présente un aspect un peu rugueux. Elle est prête à recevoir le matériau composite. Nous avons utilisé l'adhésif époxy "Sikadure-330" composée d'une résine époxy A et d'un durcisseur B. La résine et le durcisseur ont été soigneusement mélangés dans un rapport de 4:1.

Le mélange est appliqué en premier sur le béton à l'aide d'une brosse comme indiqué sur la Figure 3-7 (b). Ensuite, le tissu en fibres de carbone est placé sur la surface qui a reçu la colle. De la même façon, on réalise la plaque désirée. Une pression doit être appliquée pour faire sortir l'excès de colle, Figure 3-7 (a).



a) Sortie excès de colle



b) Application à l'aide d'un pinceau de la colle

Figure 3-7 : Collage de matériaux composites

Le tissu de fibres de carbone est appliqué à la brosse (Figure 3-7). La pression doit être appliquée pour faire sortir l'excès de colle et de maintenir la plaque en place jusqu'à ce que la colle durcisse.

Mise en place des jauges de déformation sur le béton et les matériaux composites.

Pour le besoins de cette étude, les jauges d'extension sont collées sur la plaque composite et sur le béton. La Figure 3-8 montre les trois points où sont collées les jauges sur la plaque composite et une de grandes dimensions sur le béton.



Figure 3-8 : Mise en place des jauges sur matériau composite et sur le béton

Après cette opération de collage des jauges, elles sont câblées puis connectées au système d'acquisition où les données initialement électriques sont transformées en microdéformations ($\mu\text{m/m}$). Les jauges utilisées sont de type 120 ohms et nous disposons d'une chaîne d'acquisition « système 4000 » de 50 voies pour acquérir toutes les données.

3.4 DISPOSITIF ET PARAMÈTRES EXPÉRIMENTAUX ÉTUDIÉS

3.4.1 Dispositif expérimental

Nous disposons d'une presse de compression d'un vérin d'une capacité de 3000kN, d'un Bâti de flexion avec un vérin hydraulique de capacité nominale de 1000kN, Figure 3-9 du Laboratoire de Génie Civil du GRESPI de l'URCA. La console en béton armé est soumise ainsi à un essai de flexion en position inversée par rapport à la réalité. La charge est appliquée au corps d'épreuve par la base du poteau au moyen d'un vérin alimenté par le groupe hydraulique. La vitesse de chargement moyenne est de 0,02 kN/s.

Chaque console du corps d'épreuve est soumise à une charge verticale équivalente à la réaction du dispositif d'appui, soit la moitié de la charge du vérin. Le dispositif d'appui est constitué par un demi-cylindre en acier. La plaque de bois est centrée sur ce cylindre. Pour éviter l'écrasement local du béton sous l'appui, on interpose entre la console et l'appui une plaque de bois dur d'épaisseur 3mm.



Figure 3-9 : Dispositif expérimental

Nous présentons dans les paragraphes suivants les différents paramètres étudiés et les résultats et les discussions qui en découlent.

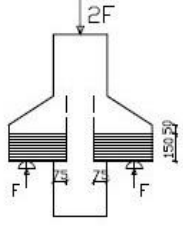
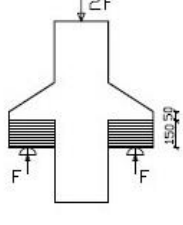
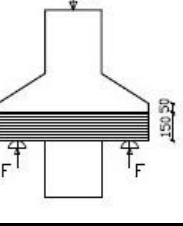
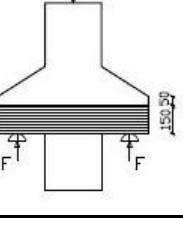
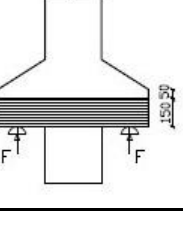
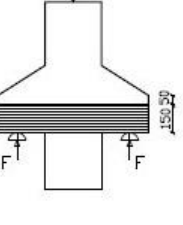
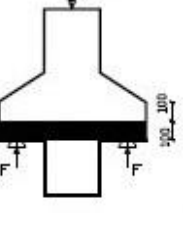
3.4.2 Les différents paramètres étudiés

Nous avons étudié l'influence des paramètres suivants :

- ◆ **Épaisseur des tissus en fibres de carbone** : nombre de couches 1, 2, 3 et 5,
- ◆ **Type du matériau composite** : tissus en fibres de carbone Unidirectionnel, Bidirectionnelle et lamelle "Carbodur".
- ◆ **Type de renforcement** : Par plaque de tissus en fibres de carbone collées sur les deux faces, par bandage, par plaques en forme U et inclinées.

Nous présentons dans le Tableau 3-1, les différentes configurations de consoles en béton armé testées. Il s'agit d'étudier l'influence de l'épaisseur de la plaque composite en fibres de carbone à travers le nombre de couches du tissu composite, l'influence du type du matériaux composites unidirectionnel ou bidirectionnel ou en lamelle "CarboDur", l'ancrage à travers la surface de la plaque, l'influence du type de renforcement à savoir par bandage ou en collant directement les plaques sur les faces du béton ou les plaques inclinées.

N°	Notation	Type de renforcement des Consoles courtes en béton armé	N. de couches	Hauteur (cm)	Schéma
1	C0	Reference sans renforcement	0	—	
2	CB1u	Console renforcée par Bandage d'1 couche unidirectionnelle	1	15	
3	CB2u	Console renforcée par Bandage de 2 couches unidirectionnelles	2	15	
4	CB3u	Console renforcée par Bandage de 3 couches unidirectionnelles	3	15	
5	CB5u	Console renforcée par Bandage de 5 couches unidirectionnelles	5	15	
6	CB2b	Console renforcée par Bandage de 2 couches bidirectionnelles	2	15	

7	CU+3u	Console renforcée par 2 Plaques en forme de U + 7,5 cm de. 3 couches unidirectionnelles - collées sur deux faces	3	15	
8	CU3u	Console renforcée par 2 Plaques collées sur deux faces en forme U + 0cm. 3 couches unidirectionnelles	3	15	
9	CP1u	Console renforcée par Plaques collées sur les 2 faces. 1 couche unidirectionnelle.	1	15	
10	CP2u	Console renforcée par Plaques de 2 couches unidirectionnelles collées sur les 2 faces	2	15	
11	CP3u	Console renforcée par Plaques de 3 couches unidirectionnelles collées sur les 2 faces.	3	15	
12	CP3u+ PA3u	Console renforcée par 2 Plaques collées sur les 2 faces latérales 3 couches unidirectionnelles. + 2 Plaques horizontales collées sur les 2 faces de la section au point d'appui. 3 couches unidirectionnelles.	3	15	
13	CPC	Console Renforcée par 2 Plaques « Carbodur »	1	10	

14	CB3u(5cm)	Console renforcée par Bandage 3couches unidirectionnelles	3	5	
15	CI2b	Console renforcée par plaques Inclinées de 2 couches bidirectionnelles - sur les deux faces	2	5	
16	CIU2b	Console renforcée par morceaux Inclinés en forme U - 2 couches bidirectionnelles –sur les deux faces	2	5	
17	CI2b+ B3u(5cm)	Console renforcée par morceaux Inclinés constitués de 2 couches bidirectionnelles – collés sur les deux faces + Bandage 3 couches unidirectionnelles de 5cm de largeur.	3	5	
18	CIU2b+ B3u(5cm)	Console renforcée avec 3 plaques Inclinées en forme de U de 2 couches bidirectionnelles sur les deux faces + Bandage 3 couches unidirectionnelles avec une largeur 5cm	2 3	5 5	

Tableau 3-1 : La configuration des spécimens testés

Remarques :

Le spécimen de contrôle est la console sans renforcement qu'on a notée "C0", la lettre "C" désigne le Console (zéro) 0 indication sans renforcement.

Pour les autres consoles : la première lettre "C" désigne toujours Console. La deuxième lettre représente le type de renforcement (par exemple: **P** pour **Plaque**, **B** pour **Bandage** et **I** pour **Inclinée**). Ensuite, le chiffre indique le nombre de couches (par exemple: 1, 2, 3, 5). Enfin, la petite lettre indique le type de matériau composite (par exemple **u** pour unidirectionnelle et **b** pour bidirectionnel).

Deux types de renforcement sont effectifs pour étudier l'influence de l'épaisseur de plaque composite en fibres de carbone. On distingue les consoles renforcées par collage de plaques sur les deux faces latérales des consoles, notons 3 : CP1u; CP2u, CP3u et le collage par bandage de tissus notons 5 : CB1u; CB2u; CB3u; CB5u; CB2B.

Nous comparons utilement la charge ultime et à l'aide des jauges de déformation, le comportement mécanique local de la structure.

3.4.3 Positions des jauges de déformation

Nous nous appuyons sur la technique basée sur l'extensométrie à jauges électriques (Annexé 5) pour étudier localement le comportement de la structure sous sollicitation. Cette technique permet de mesurer la déformation des jauges collées sur la surface de la plaque (tissus) en fibres de carbone collée, sur la surface du béton et sur la surface de l'acier.

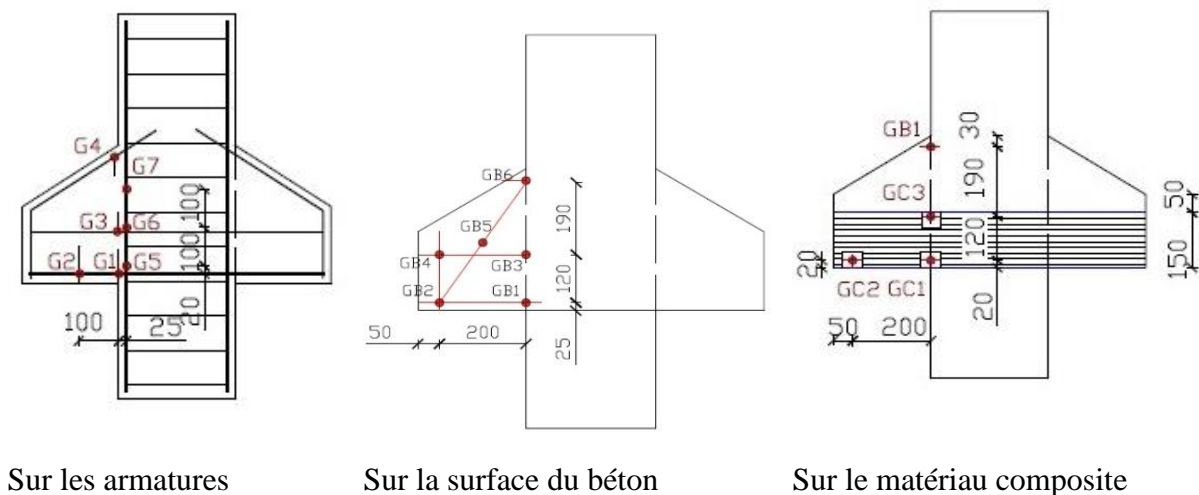


Figure 3-10 : Position des jauges électriques dans les consoles courtes.

En fonction des consoles courtes étudiées, il y a sept jauges collées sur la surface des aciers, six sur la surface du béton et trois sur la surface des matériaux composites. Les positions des jauges sont indiquées dans la

Figure 3-10 et le Tableau 3-2.

N°	Matériau	Position verticale par rapport à la barre tirant	Position horizontale par rapport au bord gauche du poteau
G1	Acier	0	0
G2	Acier	0	100 mm
G3	Acier	100 mm	0
G4	Acier	310 mm	0
G5	Acier	0	25 mm
G6	Acier	100 mm	25 mm
G7	Acier	200 mm	25 mm
GB1	Béton	0	200 mm
GB2	Béton	0	0
GB3	Béton	120 mm	200 mm
GB4	Béton	120 mm	0
GB5	Béton	150,5mm	100 mm
GB6	Béton	310 mm	0
GC1	TFC	0	0
GC2	TFC	0	200 mm
GC3	TFC	120 mm	0

- TFC : tissus en fibres de carbone

Tableau 3-2 : Position des jauges

3.5 RÉSULTATS DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus par des essais expérimentaux sur la résistance ultime, la relation charge-déformation, le comportement mécanique des consoles courtes renforcées en variant l'épaisseur des tissus en fibres de carbone, le type de matériaux composites et le modèle du renforcement.

3.5.1 Relation entre force et déformation

Des courbes $F = f(\varepsilon)$ décrivant le comportement local de la plaque composite, l'acier et le matériau béton sont présentées (F est la force appliquée et ε la déformation relative indiquée par la jauge placée à l'abscisse x).

Nous déterminons les changements de pentes $dF/d\varepsilon$ qui correspond à l'apparition de microfissures ou un changement d'état. Nous attribuons le changement de signe de $dF/d\varepsilon$ à l'amorçage de la propagation rapide des fissures au voisinage de la rupture ultime de la structure.

Les consoles courtes ont été testées jusqu'à la rupture sous une charge monotone avec une vitesse de chargement moyenne de 0,02 kN/s.

3.5.2 Analyse et discussions

3.5.2.1 Console non renforcée-Évolution des déformations dans la section d'encastrement

La Figure 3-11 montre les courbes « Force-Déformation » de l'acier, de la console courte de référence, obtenues à l'aide des jauges de déformation situées aux points « G1 », « G3 » et « G4 » de la section d'encastrement. On distingue principalement trois différentes parties:



- La première partie nommée "Zone 1" représente la zone élastique. Les déformations de l'acier à ces trois différents points, augmente linéairement en fonction de la charge appliquée. La jauge « G1 » est collée sur l'une des deux barres de l'armature supérieure, ce qui permet d'obtenir les déformations locales sur le tirant. Par ailleurs, elle permet aussi de mesurer les allongements relatifs des armatures. Les débuts de déformation commencent au point « G1 » puis « G3 » et « G4 ». C'est bien normal car cette barre soumis à des contraintes en traction et la position de la jauge « G1 » est plus éloignée de la position de l'axe neutre.

- Dans la deuxième partie, "Zone 2" les déformations augmentent très rapidement en fonction de la charge appliquée. Il y a un changement de position linéaire qui s'étend jusqu'au palier horizontal respectivement des courbes « G1 », « G3 » et « G4 ». Ce changement de pente est la suite de l'apparition de fissures dans le béton tendu et le début de plastification d'acier dans la section d'encastrement due à la charge en flexion. La barre tirant contribue à la résistance en traction ou en flexion. Cependant, dans la zone de la jauge « G4 », il n'y a pas de fissures enregistrées

- Dans la troisième partie, les déformations augmentent également linéairement en fonction de la charge appliquée comme dans la deuxième partie. Cette zone est la suite de la zone 2. Les pentes des courbes « Force-Déformation » sont similaires, mais à des valeurs de déformation et de charge beaucoup plus élevées. La séparation de ces deux zones est due à l'apparition de fissure diagonale qui est due à l'effort tranchant.

Évidemment, la déformation dans la partie tendue de la console est plus importante. Mais la valeur maximale de la déformation à la position de la jauge « G4 » restent relativement faible, inférieures à $500\mu\text{m/m}$.

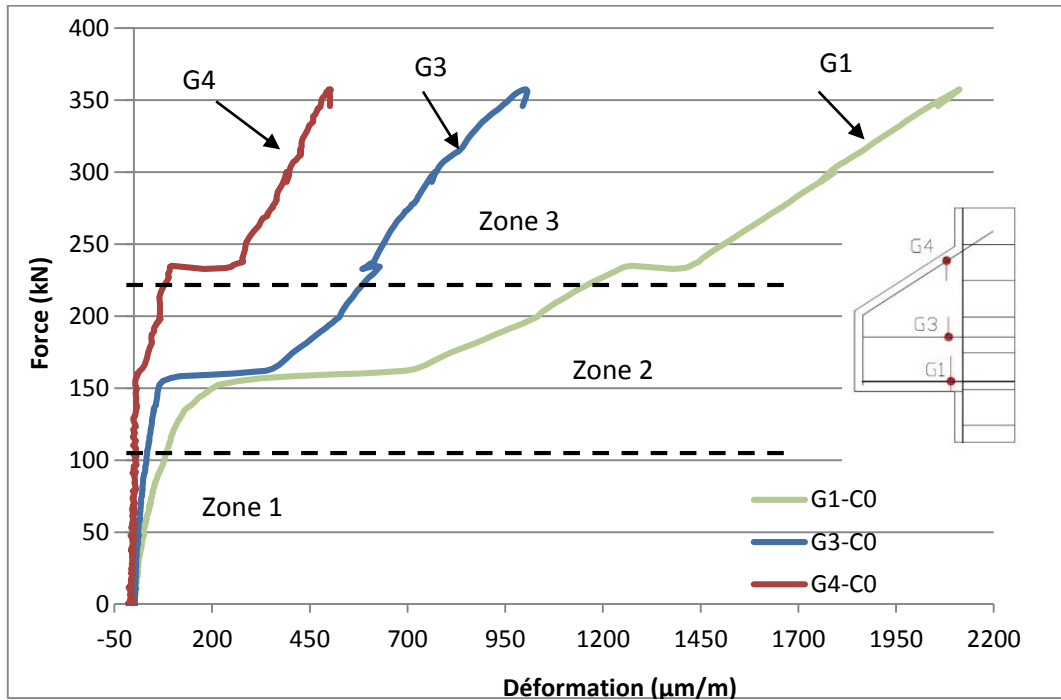


Figure 3-11: Courbes «Force-Déformation» de la console de référence(C0), obtenues par des jauges «G1», «G3» et «G4» dans la section d'encastrement sur l'acier.

La figure 3-12 nous indique les déformations dans le poteau de la console. Les résultats montrent bien le changement de la position de l'axe neutre en fonction de la charge appliquée.

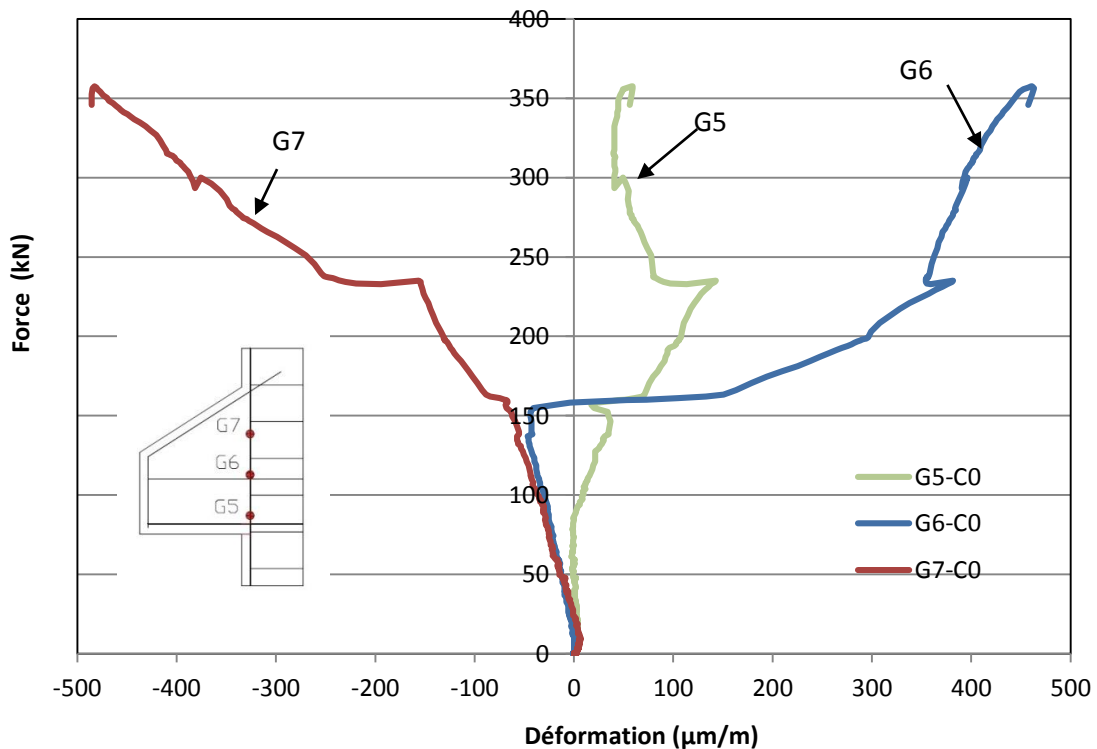


Figure 3-12 : Courbes «Force-Déformation» de la console courte de référence (C0), obtenues par les jauges «G5», «G6» et «G7» sur la barre d'acier du poteau

A la charge d'environ 160 kN, la zone comprimée à la position de la jauge « G6 » passe en zone tendue. La valeur maximale de la déformation ne dépasse pas non plus 500µm/m.

La position de la jauge « G6 » est située à 12cm par rapport à la position de la jauge « G5 », juste au dessus de la position de l'axe neutre.

Les paliers des courbes « Force-Déformation » à 240 et 300 kN sont caractérisés par l'apparition de grandes fissures dues à la flexion et de la fissure diagonale due à l'effort tranchant.

La figure 3-13 montre la variation des déformations suivant la charge dans le béton. Les valeurs des déformations à la position de la jauge « GB1 » augmentent très rapidement. Par contre, les valeurs des déformations aux positions des jauges « GB3 » et « GB6 » sont pratiquement négligeables. Les déformations au point « GB6 » restent dans la zone comprimée et ne varie que après la charge de 300kN. Ce changement de la courbe est due à l'apparition des fissures diagonales dans le béton. Il faut indiquer que la jauge « GB1 » a été cassée après la charge 137 kN. La variation de la déformation dans cette zone ne peut plus être enregistrée après cette charge.

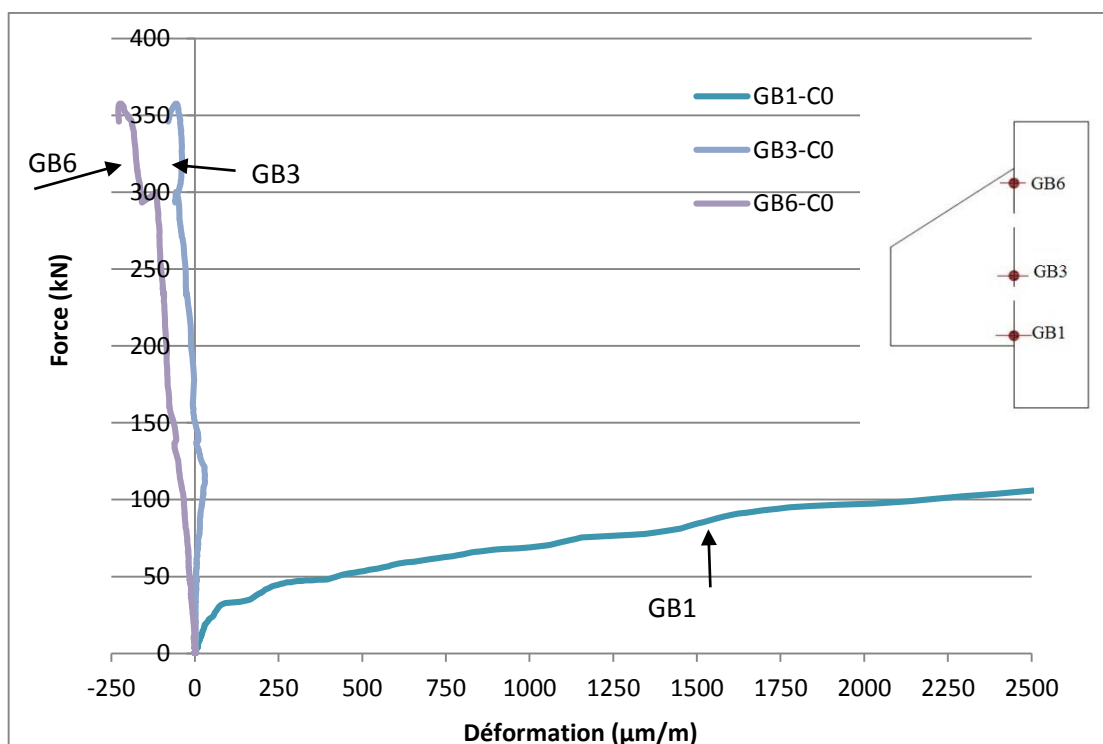


Figure 3-13 : Courbes «Force-Déformation» de la console courte de référence (C0), obtenues par les jauges «GB1», «GB3» et «GB6» dans la section d'encastrement sur le béton.

La Figure 3-14 montre les déformations locales à deux points différents du tirant dans la partie tendue de la console. A la charge de 240kN, il y a un changement radical de la courbe « G2 », qui devrait être en compression. Ce changement peut être s'expliquer par l'apparition de la fissure oblique, qui modifie considérablement le comportement local de la console. La jauge se comprime en affichant des valeurs négatives jusqu'à (-1400×10^{-6}) .

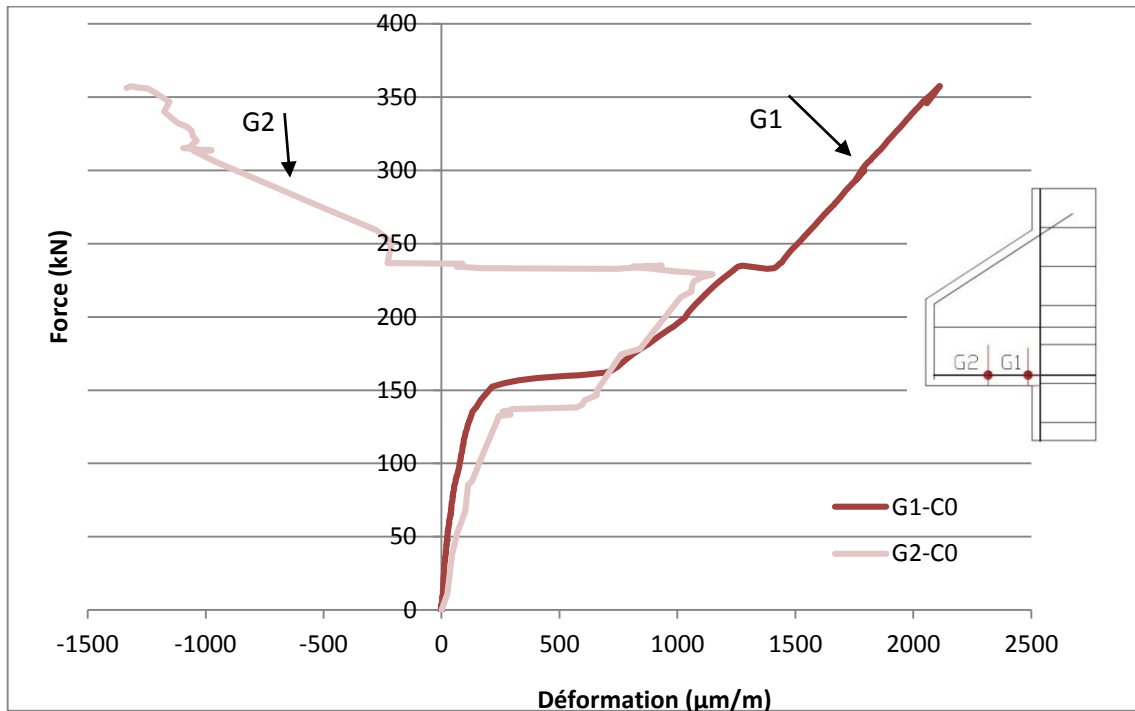


Figure 3-14: Courbes «Force-Déformation» de la console de référence(C0) : obtenues par des jauges «G1» et «G2» sur le tirant.

3.5.2.2 Influence de l'épaisseur du matériau composite.

3.5.2.2.1 Par plaques de deux cotes

- **Charge ultime**

Trois différentes épaisseurs (1 couche, 2 couches et 3 couches) de plaques composites en fibres de carbone ont été testées. Les charges ultimes et le rapport entre la charge ultime et la charge maximale de la console courte non renforcée est présentées dans le Tableau 3-3. La charge ultime pour la console de référence est notée F_0 et est égale à 357kN. F_u est la charge ultime de résistance pour chaque console renforcée. Les résultats montrent que la charge ultime maximale des consoles courtes renforcées se trouve dans le cas d'une console courte renforcée par deux couches de tissus en fibres de carbone avec une charge de 552kN et un rapport F_u/F_0 de 155%.



À partir de la deuxième couche d'épaisseur de plaque composite, il y a un arrachement de la plaque avec le béton. Ce phénomène s'accroît encore plus lorsque l'épaisseur de la plaque augmente, donc l'efficacité du renforcement est bien limitée.

Notation	Configuration des consoles	F_u (kN)	F_u/F_0
C0	Sans renforcement	357	100%
CP1u	Renforcé avec une plaque d'une couche de tissus (n=1)	532	149%
CP2u	Renforcé avec une plaque 2 couches de tissus (n=2)	552	155%
CP3u	Renforcé avec une plaque 3 couches de tissus (n=3)	380	106%

Tableau 3-3: Influence de l'épaisseur de la plaque composite sur la charge de rupture

La Figure 3-15 met en évidence l'efficacité du renforcement en fonction de nombre de couches des tissus en fibres de carbone sur la résistance de la console renforcée. On peut constater que le nombre de couches recommandé est de 2 et permet d'obtenir une augmentation de la charge portante de 50% de plus par rapport à une console courte non renforcée. Dans le cas de plaque de 3 couches en tissu de carbone on observe une diminution de la charge portante. Durant l'essai, on a constaté un décollement prématuré de la plaque causé probablement par la rigidité de la plaque.

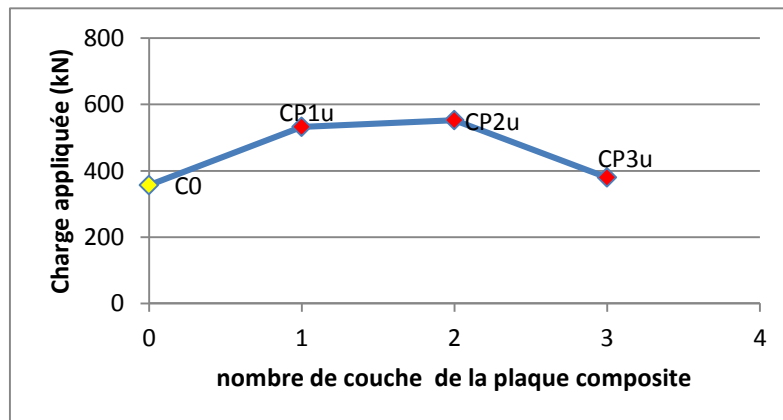


Figure 3-15: Influence de l'épaisseur de la plaque composite sur la charge ultime

3.5.2.2.1.1 Variation de la déformation en fonction de la charge appliquée

Nous présentons ici la variation de la déformation en fonction de la charge appliquée des consoles courtes renforcées par 1 et 3 couches de tissus en fibres de carbone. Une comparaison entre ces deux types de renforcement va être également effectuée.

- **Console courte renforcée par une couche de tissus en fibres de carbone (CP1u)**

La Figure 3-16 montre les déformations locales de l'acier, du béton et de la plaque composite dans la section d'encastrement d'une console renforcée par une couche de tissu composite collée sur les deux faces de la console.

L'analyse de ces courbes montre que le comportement mécanique est élastique linéaire jusqu'à la charge de 140 kN. Les déformations sont très petites. Cependant, la contribution des matériaux composites à la résistance de la console est évidente.

À partir de cette charge de 140 kN, la contribution des matériaux composites à la résistance à la flexion est plus importante. Les courbes de « G1 » et « GC1 » dans la Figure 3-16 montrent bien que la déformation dans le matériau composite est beaucoup plus élevée que celle de l'acier. Sous la charge appliquée, la déformation dans le matériau composite augmente très rapidement et la valeur maximale de la déformation peut atteindre 11000 $\mu\text{m/m}$. Par contre, la valeur maximale de la déformation dans l'acier n'a que 2800 $\mu\text{m/m}$.

Le palier apparaît dans la courbe « G1 » à 246 kN marque le début de l'apparition de la fissure oblique. Cette fissure propage du niveau de l'appui vers la partie supérieure de l'encastrement c'est-à-dire la position de la jauge « GB1 ». Un deuxième palier, correspondant à une charge de 330kN, caractérise dans ce cas précis le début de l'endommagement des tissus en fibres de carbone. La zone de la position de la jauge « GB1 » est bien en compression.

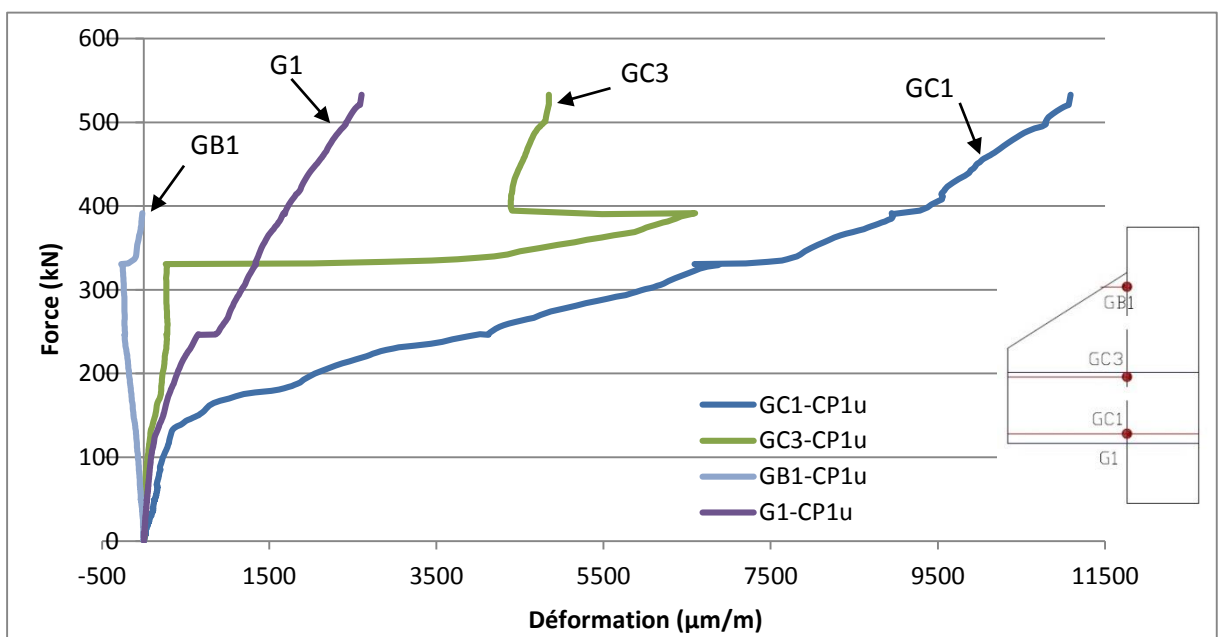


Figure 3-16 : Courbes «Force-Déformation» de la console CP1, obtenues par des jauges «G1», «GC1», «GC3» et «GB1» dans la section d'encastrement.

- **Console courte renforcée par trois couches de tissus en fibres de carbone (CP3u)**

Comme dans le cas précédant, la Figure 3-17 montre les déformations dans la section d'encastrement de la console renforcée par trois couches de tissu en fibres de carbone collé sur les deux faces de la console.

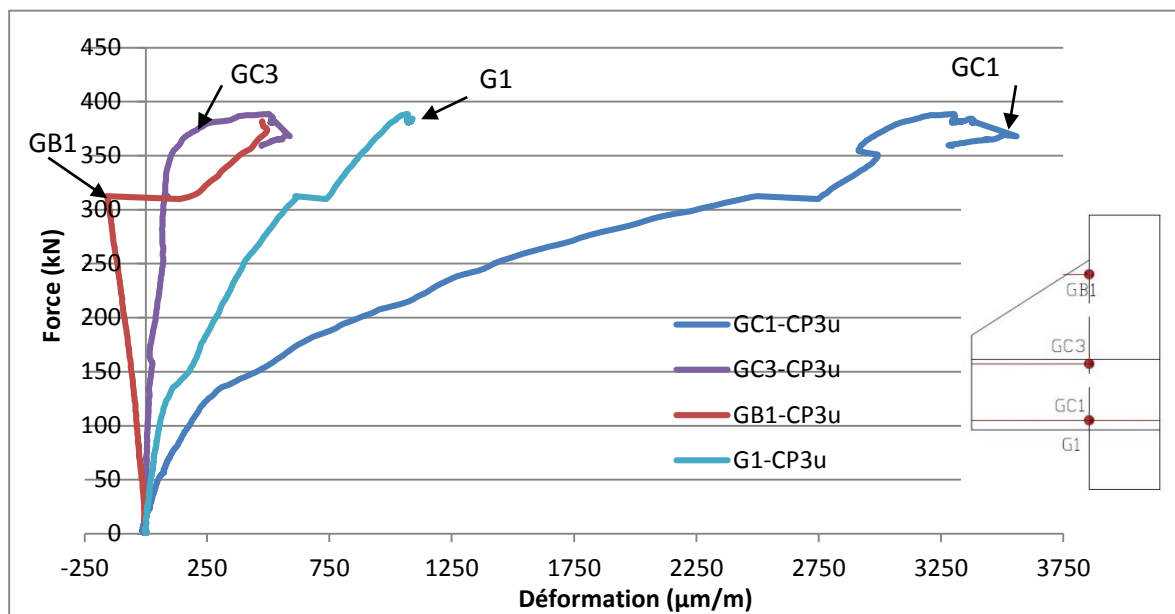


Figure 3-17 : Courbes «Force-Déformation» de la console CP3u, obtenues par des jauges «G1», «GC1», «GC3» et «GB1» dans la section d'encastrement

On constate également que les plaques en tissus de fibres de carbone reprennent plus de déformations par rapport à l'acier. Par conséquent, l'augmentation de l'épaisseur de renforcement, le domaine de la zone élastique augmente également (145kN).

Il est intéressant de souligner que la jauge « GC3 » n'a pas détecté le début de l'endommagement de tissus en fibres de carbone. Par contre, les jauges « GB1 », « G1 » et « GC1 » détectent clairement le deuxième palier de la courbe « Force-Déformation » à une charge de 310 kN. Ceci peut être dû fait que la console renforcée par trois couches devient plus rigide.

3.5.2.2.1.2 Influence de nombre de couches

Les jauges « G1 » dans la Figure 3-18 présentent les déformations locales du tirant dans les consoles renforcées par collage des tissus sur ses deux faces. Les courbes « Force-Déformation » montrent les variations des déformations suivant la charge appliquée. Avant l'apparition des fissures dues à la flexion, l'allure des courbes de quatre consoles est similaire. Le renforcement permet d'augmenter la rigidité de la console et de retarder l'apparition des fissures obliques.

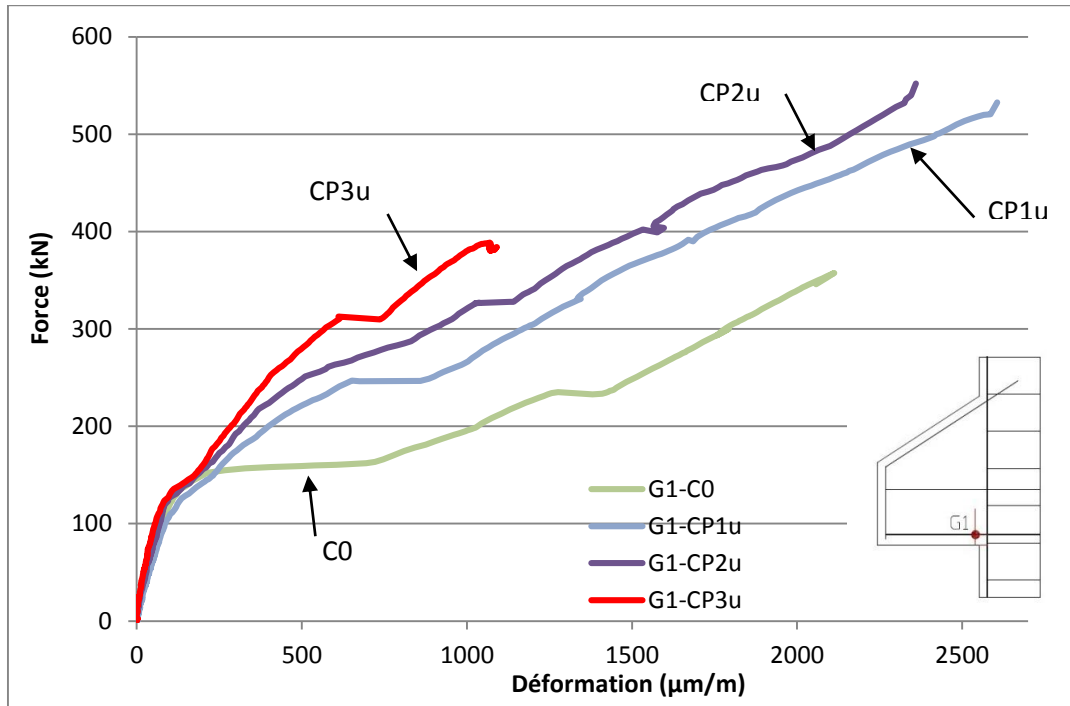


Figure 3-18: Influence de l'épaisseur de plaque composite des consoles CP1, CP2u et CP3, au point «G1» sur le tirant

Figure 3-19 présente la variation des déformations locales dans la même position de différentes consoles. Cette figure nous montre l'efficacité du renforcement.

Jusqu'à 140kN les courbes du point « GC1 » des consoles CP1u, CP2u et CP3u sont identiques. On peut observer que plus l'épaisseur de la plaque augmente, plus la rigidité de la console courte renforcée augmente.

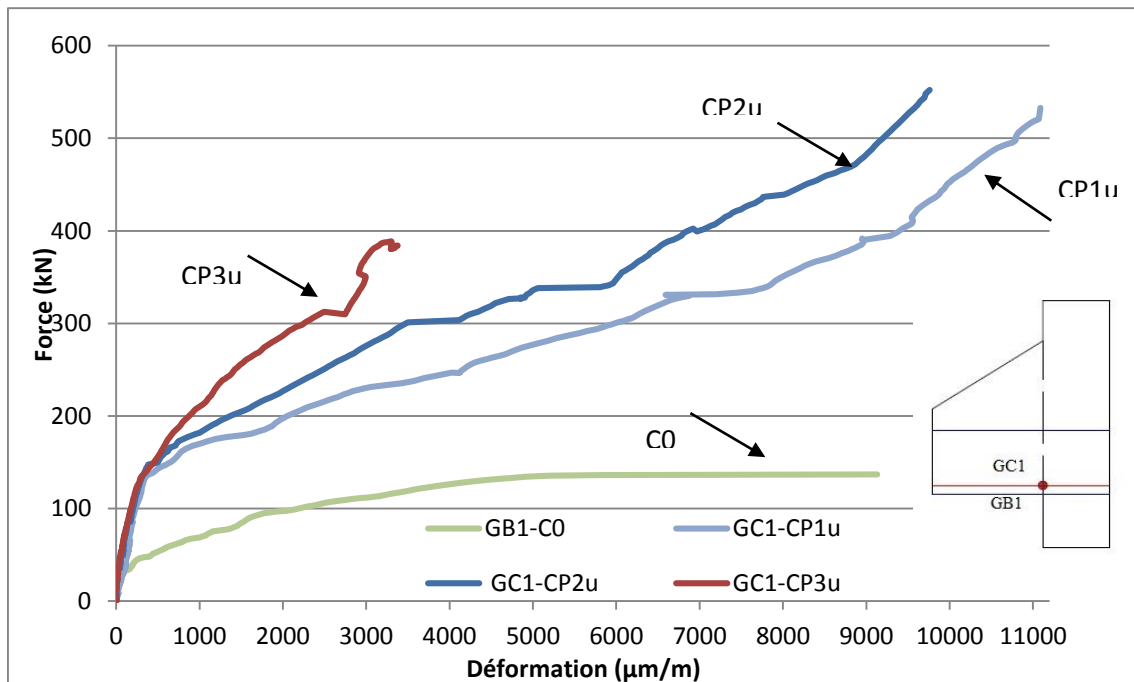


Figure 3-19: Influence de l'épaisseur de plaque composite au point « GC1 » du matériau composite des consoles renforcée CP1u, CP2u, CP3u et non renforcée C0 (« GB1 » au même point identique que « GC1 »)

3.5.2.2.2 Par bandage

- **Charge ultime**

Nous avons testé cinq consoles courtes dont quatre renforcées par bandage avec un nombre de couches différent variant de 1, 2, 3, et 5. Les matériaux composites utilisés sont des tissus en fibres de carbone unidirectionnelles. Les charges ultimes et le rapport entre la charge ultime F_u sur la charge ultime de la console de référence F_0 (F_u/F_0) sont présentés dans le Tableau 3-4. En général, la charge ultime de la console augmente en fonction du nombre de couches. Le cas optimal se trouve dans une console courte renforcée par trois couches de bandage en fibres de carbone. La valeur du rapport F_u/F_0 peut atteindre à 182%.



Notation	Configuration des consoles	F_u (kN)	F_u/F_0
C0	Sans renforcement	357	100%
CB1u	Bandage (n=1couche)	488	137%
CB2u	Bandage (n=2 couches)	508	142%
CB3u	Bandage (n=3 couches)	651	182%
CB5u	Bandage (n=5 couches)	626	175%

Tableau 3-4: Influence de l'épaisseur du bandage sur la charge ultime. (n= nombre de couches)

Par rapport aux consoles renforcées par des tissus en fibres de carbone sur les deux faces de la console, l'effet du renforcement par bandage est très significatif. Ceci peut être dû à l'effet de confinement du béton.

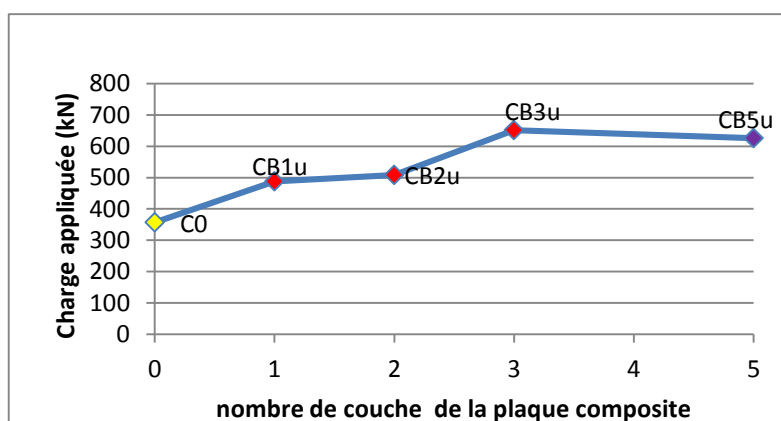


Figure 3-20: Influence de l'épaisseur du tissu composite sur la charge de rupture d'une console renforcée par bandage.

La Figure 3-20 permet de mettre en évidence l'efficacité du renforcement par bandage. Les résultats montrent une augmentation de la charge ultime des consoles renforcées de 137 à 182%

par rapport à celle de la console de référence. L'effet du renforcement sur la résistance ultime est faible. Le même constat peut être observé sur la Figure 3-20 pour le nombre de bandage entre trois et cinq couches. Selon les résultats obtenus, il est très utile de renforcer une console courte par trois couches de bandage.

3.5.2.2.1 Variation de la déformation en fonction de la charge appliquée

- **Console courte renforcée par bandage d'une couche (CB1u)**

La Figure 3-21 nous montre les déformations dans la section d'encastrement présentées par les jauges « G1 », « GC1 », « GC3 », « GB1 ». La jauge « G1 » est collée sur la surface de l'acier, les jauges « GC1 » et « GC3 » sur la surface de composite et la jauge « GB1 » sur la surface du béton. On peut observer clairement sur cette figure que les premières microfissures dues à la flexion apparaissent à une charge de 65kN. Le comportement mécanique de cette console courte renforcée est différent à celui des consoles renforcées par le composite à ses deux faces. Les valeurs de la déformation aux positions des jauges « GB1 » et « GC3 » sont relativement faibles.

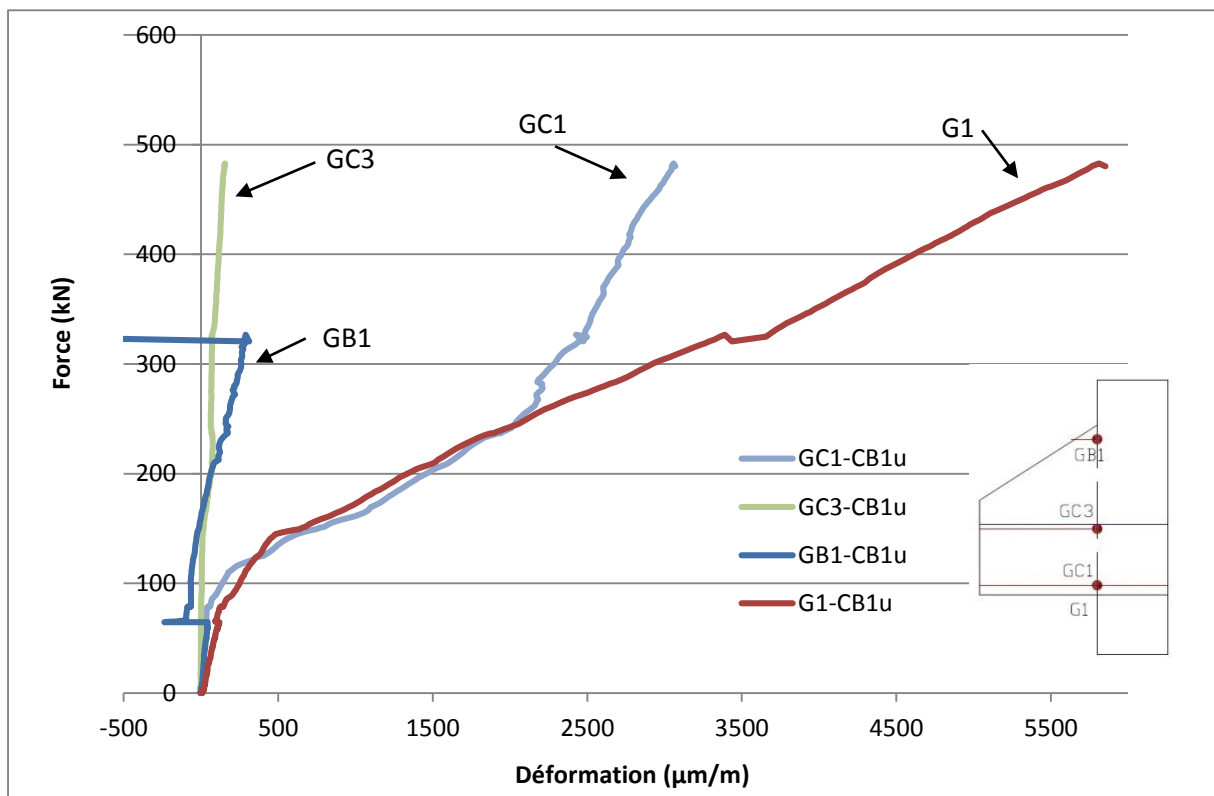


Figure 3-21 . Courbes «Force-Déformation» de la console CB1u, obtenues par des jauges «G1», «GC1», «GC3» et «GB1» dans la section d'encastrement.

Le changement de pente des courbes « G1 », « GC1 » et « GB1 » donne l'indication de l'apparition des fissures dues à l'effort tranchant. Un palier aux environs des 320kN, marque le

changement de comportement et l'apparition des fissures inclinées, avec l'acier qui reprend visiblement les efforts. L'apparition de la fissure diagonale entraînerait le changement de signe de « GB1 » qui devient positif même si les valeurs sont très inférieures à $500\mu\text{m/m}$.

Les déformations de la jauge GC3 sont presque nulles car la jauge est placée proche l'axe neutre.

Comportement du tirant

La Figure 3-22, montre que la courbe présentée par la jauge « G1 » confirme bien que les premières fissures apparaissent toujours en premier lieu dans la section d'encastrement. Notons que plus on s'approche des appuis et plus grande est le deuxième palier qui se trouve à 325kN . Ce phénomène est visible que ce soit dans les renforcements par bandage ou par collage de plaques en tissus de fibres de carbone collées sur les deux faces.

Entre la zone de la première fissure due à la flexion et la deuxième grande fissure due à l'effort tranchant, la valeur de la déformation au point « G1 » est beaucoup plus grande que celle au point « G2 ». À l'apparition des fissures dues à l'effort tranchant, la valeur de la déformation à la position de jauge « G2 » est inférieure à $500\mu\text{m/m}$ et celle à la position de la jauge « G1 » est supérieure à $3000\mu\text{m/m}$. Il est utile d'indiquer qu'à partir de la charge 325kN , les déformations au point « G2 » et au point « G1 » augmentent avec la même vitesse en fonction de la charge appliquée. Le béton étant fissuré le tirant devient homogène.

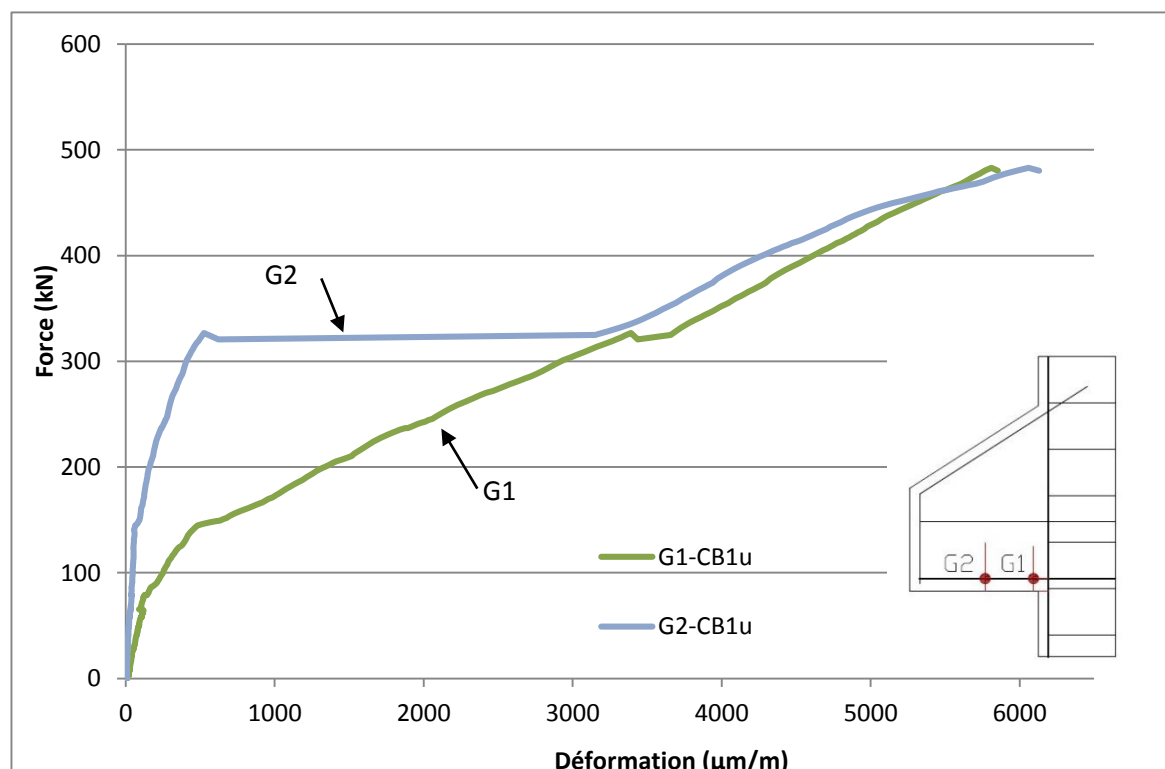


Figure 3-22 : Courbes «Force-Déformation» de la console CB1u, obtenues par les jauges «G1» et «G2» sur le tirant.

- **Console courte renforcée par bandage de deux couches (CB2u)**

La Figure 3-23 montre les déformations dans la section d'encastrement de la console CB2u. La première fissure de flexion apparaît à 140 kN comme dans le cas de CB1u.

Deux paliers sont visibles à 230 et 350kN. Le premier marque l'apparition d'une première fissure diagonale et la deuxième marque, la deuxième fissure diagonale qui va entraîner la ruine de la console.

Contrairement à la console CB1u, c'est la plaque composite qui reprend plus les efforts rapport au matériau en acier comme la montre dans la Figure 3-23.

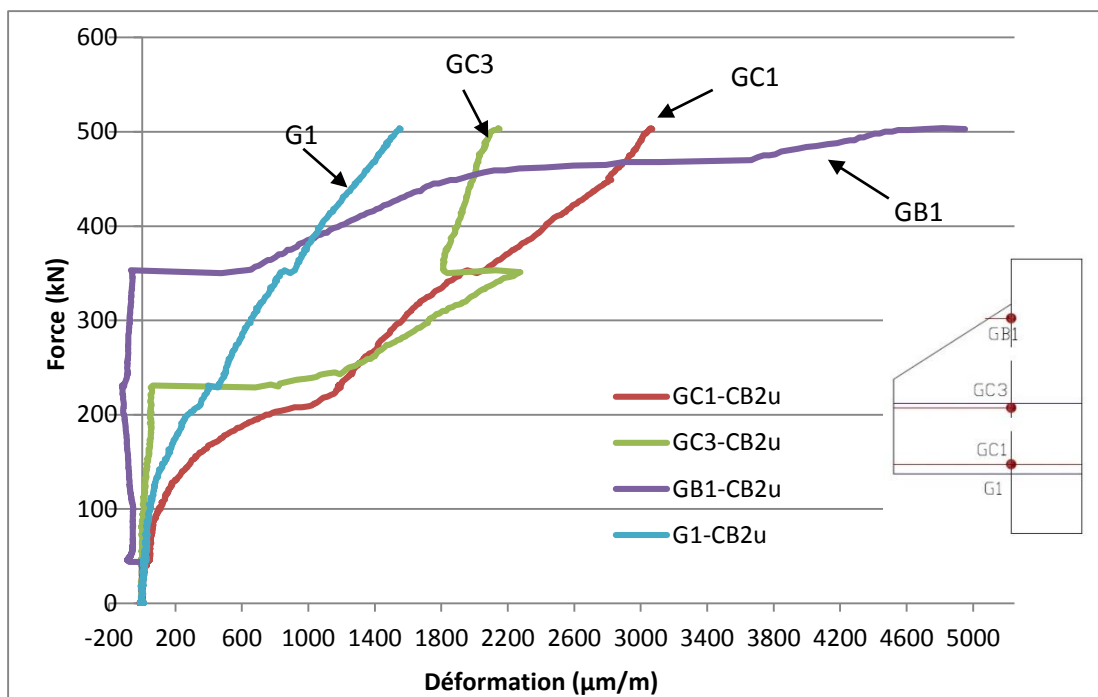


Figure 3-23 : Courbes «Force-Déformation» de la console CB2u, obtenues par des jauges «G1», «GC1», «GC3» et «GB1» dans la section d'encastrement.

Comportement du tirant

Mêmes observations que précédemment, les courbes des tirants présentent les mêmes allures avec deux paliers à 230 et à 350kN. Cependant, les déformations entre des jauges G1 et G2 ne sont pas très différentes.

Après la charge appliquée à 350kN, pour le même effort, la jauge « G2 » se déforme plus que celle de la jauge « G1 » (Figure 3-24). Ce phénomène est bien contraire à ce qu'on a observé dans le cas de la console renforcée par bandage de 1 couche.

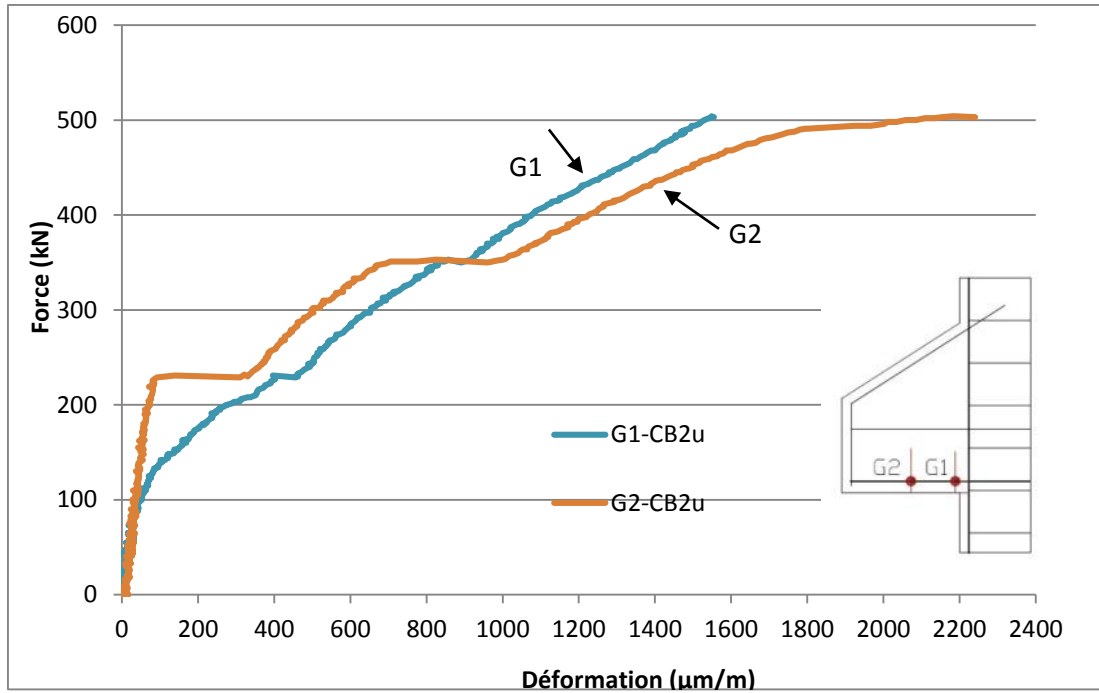


Figure 3-24: Courbes «Force-Déformation» de la console CB2u, obtenues par les jauges «G1» et «G2» sur le tirant

- **Console courte renforcée par bandage de trois couches (CB3u)**

Comportement dans la section d'encastrement

La Figure 3-25 montre la variation de la déformation en fonction de la charge. Dans la même position (« G1 » et « GC1 »), le matériau composite se déforme plus par rapport à l'acier. Les résultats montrent que plus l'épaisseur de la plaque augmente et plus le premier palier sur la courbe « GC1 » est grand.

Les microfissures apparaissent à 175kN ce qui entraîne l'apparition du palier sur la courbe « GC1 » à 220kN. Le deuxième palier à 365kN sur les courbes « GB1 », « G1 » et « GC1 » lorsque la fissure diagonale apparaît et le troisième palier à 560kN correspondant à l'ouverture de la fissure diagonale qui entraîne la ruine de la console. Le renforcement par bandage de trois couches améliore considérablement la résistance à l'effort tranchant.

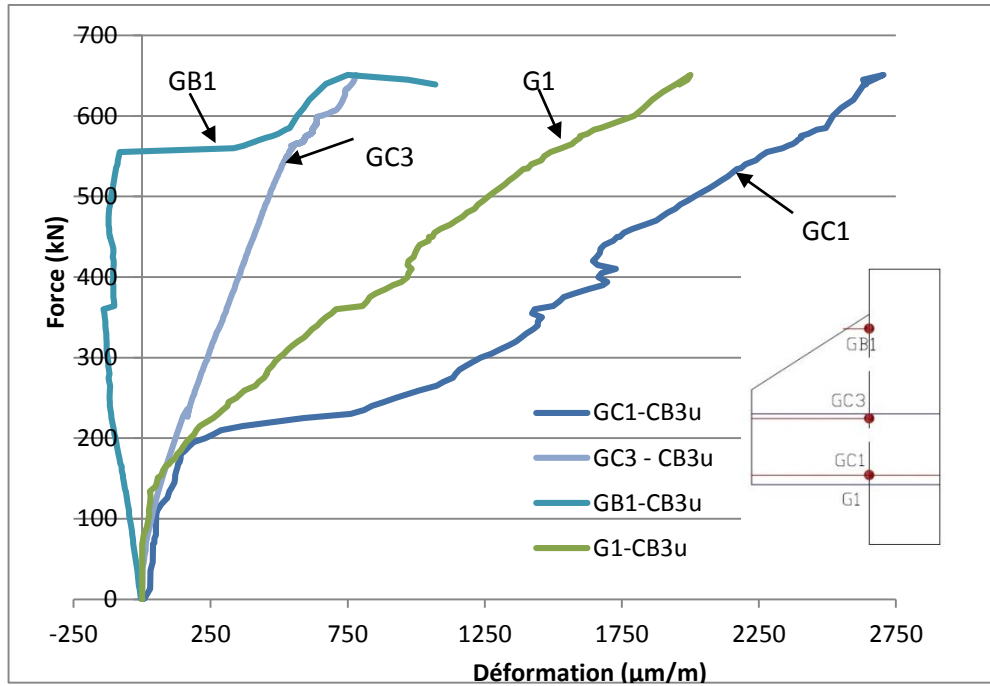


Figure 3-25 : Courbes «Force-Déformation» de la console CB3u, obtenues par des jauges «G1», «GC1», «GC3» et «GB1» dans la section d'encastrement.

Comportement du tirant

La Figure 3-26 montre bien que les déformations obtenues par les jauges « G1 » et « G2 » situées sur le tirant de la console courte renforcée CB3u sont presque nulles jusqu'à 160kN.

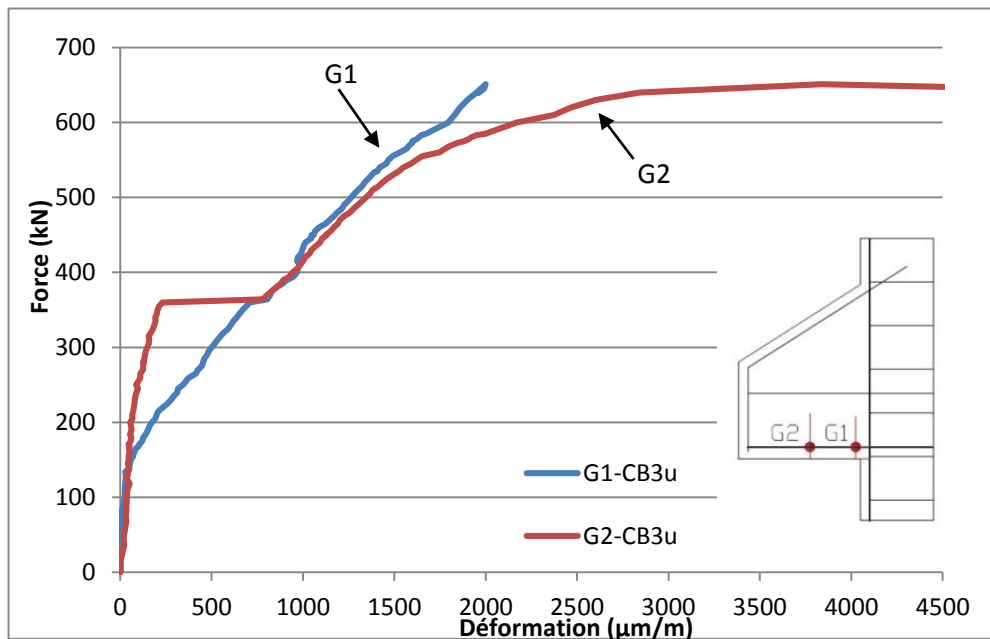


Figure 3-26: Courbes «Force-Déformation» de la console CB3u, obtenues par les jauges «G1» et «G2» sur le tirant

Au niveau de la charge à 365kN sur les courbes « Force-Déformation » ont enregistré un palier sur les deux jauges. Il est bien visible que la jauge « G2 » rattrape la déformation de la jauge « G1 ». Ensuite, les déformations des 2 jauges évoluent de la même façon.

La rigidité de la console renforcée CB3u se trouve réduite au 1/3 par rapport à la console non renforcée.

- **Console courte renforcée par bandage de cinq couches (CB5u)**

Comportement dans la section d'encastrement

La Figure 3-27 montre la variation de la déformation on fonction de la charge appliquée de la console courte renforcée par bandage de cinq couches CB5u. Sur cette figure, on a la même observation sur la courbe « G1 » et la courbe « GC1 ». Ces deux jauges n'ont pas détecté l'apparition de la fissure diagonale au niveau de la charge 550 kN. Cependant, en comparaison avec les autres consoles courtes renforcées, la valeur de la déformation à la position de la jauge « GC3 » est importante. En particulier, le comportement local à la position de la jauge « GC3 » est différent. La valeur de la déformation, correspondant à l'apparition de la fissure diagonale, est de 1100 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Ces résultats confirment également que le renforcement augmente clairement la performance de la résistance au cisaillement et à la flexion de la console.

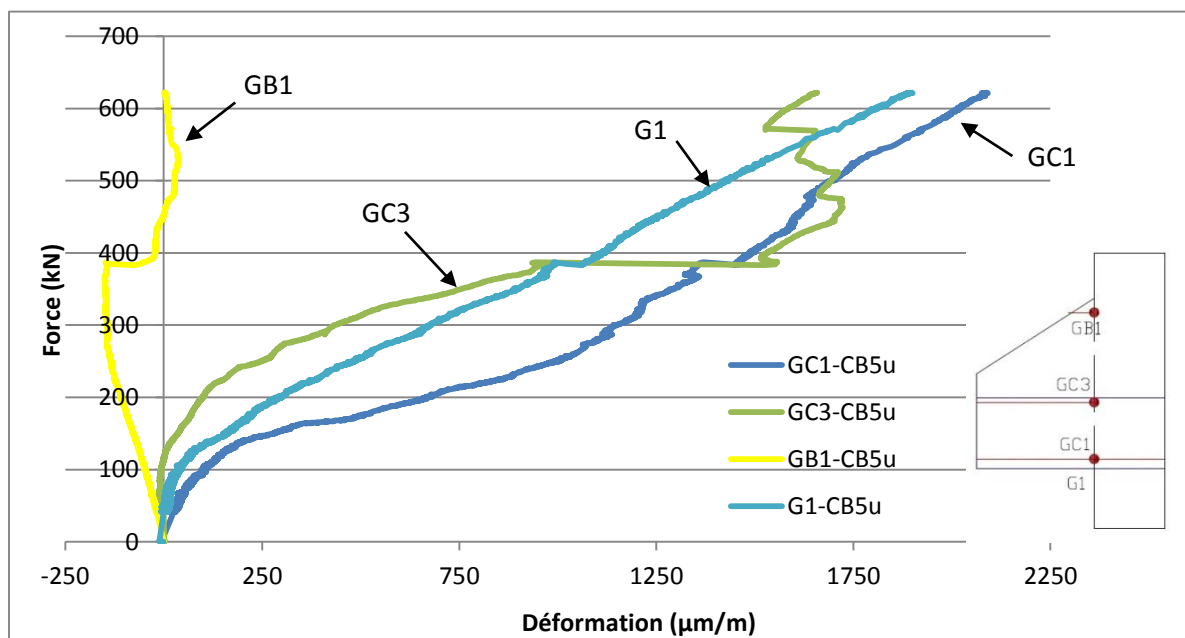


Figure 3-27 : Courbes «Force-Déformation» de la console CB5u, obtenues par des jauges «G1», «GC1», «GC3» et «GB1» dans la section d'encastrement.

3.5.2.2.2 Comparaison de CB1u, CB2u, CB3u et CP5u

Comparaison des tirants au Point « G1 »

La Figure 3-28 montre la comparaison des courbes obtenues par des jauges à la position « G1 » située sur l'acier du tirant de quatre différentes consoles courtes renforcées et la console de référence.

On peut constater que les courbes des consoles courtes renforcées CB2u, CB3u et CB5u sont similaires et la charge ultime augmente avec une réduction des déformations.

Dans le cas de la console CB1u, la valeur de la déformation est très importante. Par rapport à la console de référence, la rigidité augmente considérablement.

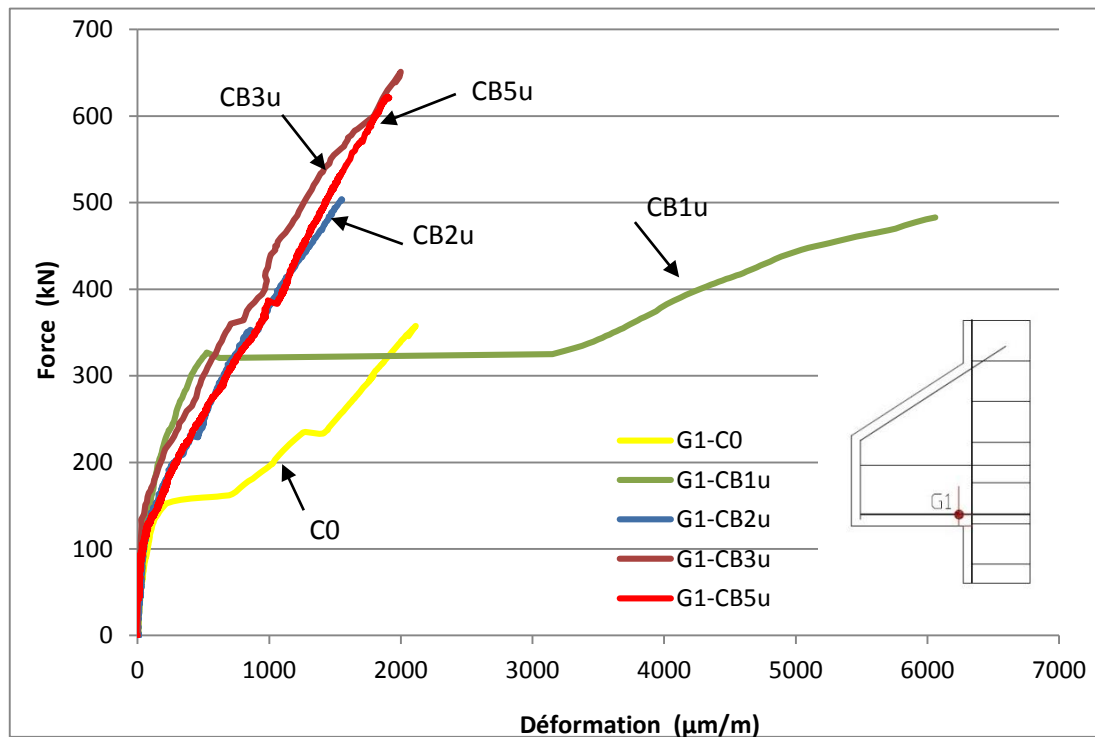


Figure 3-28 : Courbes des comportements du tirant en fonction de l'épaisseur des tissus composites obtenue par la jauge « G1 » des consoles CB1u, CB2u, CB3u, CB5u et C0, console de référence.

Comportement du tissu composite aux points « GC1 » et « GC3 »

Nous présentons sur la Figure 3-29 les déformations au point « GC1 » sur matériau composite des différentes consoles renforcées par bandage et au point « GB1 » sur le béton de la console de référence. Nous pouvons observer que la déformation dans le cas de la console de référence est en compression et la valeur maximale de la déformation est d'environ $-200 \mu\text{m/m}$. après le renforcement, la valeur de la déformation devient positive et la valeur maximale de la déformation peut atteindre $3000 \mu\text{m/m}$. Suivant la charge appliquée, la déformation et la rigidité de la console renforcée diminuent en fonction du nombre de couches.

A la position de la jauge « GB3 » collée sur la surface du béton de la console de référence (Figure 3-30), on trouve également que la déformation est en compression. Par contre, la valeur de la déformation dans la jauge « GC3 » située au même endroit, mais colle sur la surface du composite pour les consoles renforcées est en positive. Avant l'apparition de la fissure diagonale, le comportement local des consoles renforcées est similaire

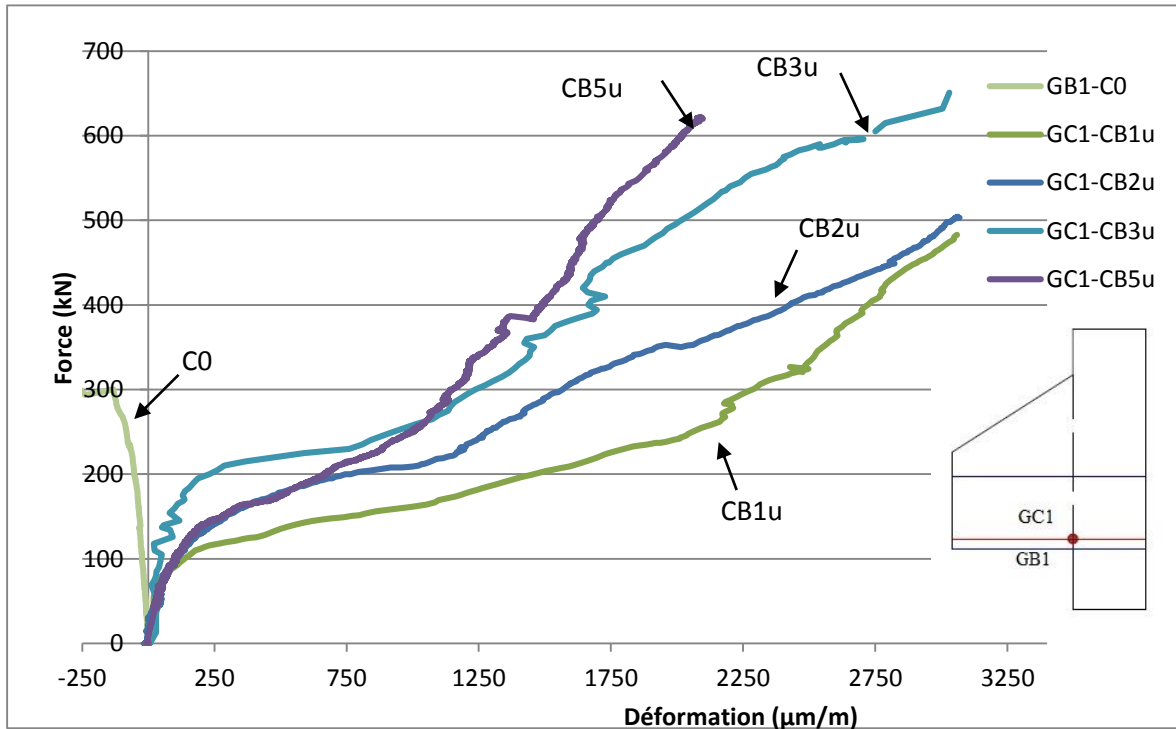


Figure 3-29: Courbes de l'Influence de l'épaisseur de bandage des tissus composites enregistrées par la jauge « GC1 » des consoles CB1u, CB2u, CB3u, CB5u et C0.

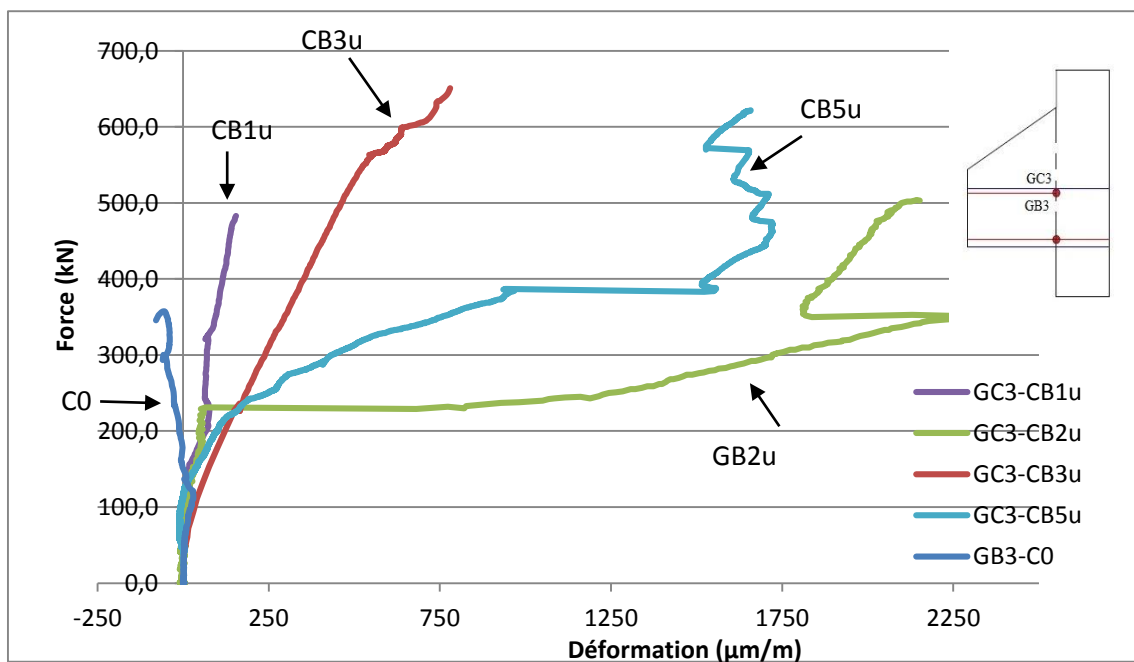


Figure 3-30: Comparaison des déformations de la plaque composite enregistrée par la jauge « GC3 » de la plaque composite pour différentes épaisseurs CB1u, CB2u, CB3u et CB5u

. Parmi les quatre courbes, on peut distinguer deux types de courbe: un pour les courbes CB1u et CB3u, l'autre CB2u et CB5u. Dans le cas des courbes CB1u et CB3u, il n'y a pas palier de la courbe « Force-Déformation » enregistré. Dans le cas des courbes CB2u et CB5u, on trouve que la déformation augmente rapidement suivant la charge appliquée.

Comportement du béton comprimé au point « GB1 »

La Figure 3-31 montrent la variation des déformations sur la surface du béton à la position de la jauge « GB1 » des différentes consoles renforcées et « GB6 » de la console non-renforcée. La présence du renfort par bandage de tissu composite en fibres de carbone modifie légèrement les déformations. La force correspondante à l'apparition de la fissure due à la flexion augmente suivant le nombre de couches du renforcement.

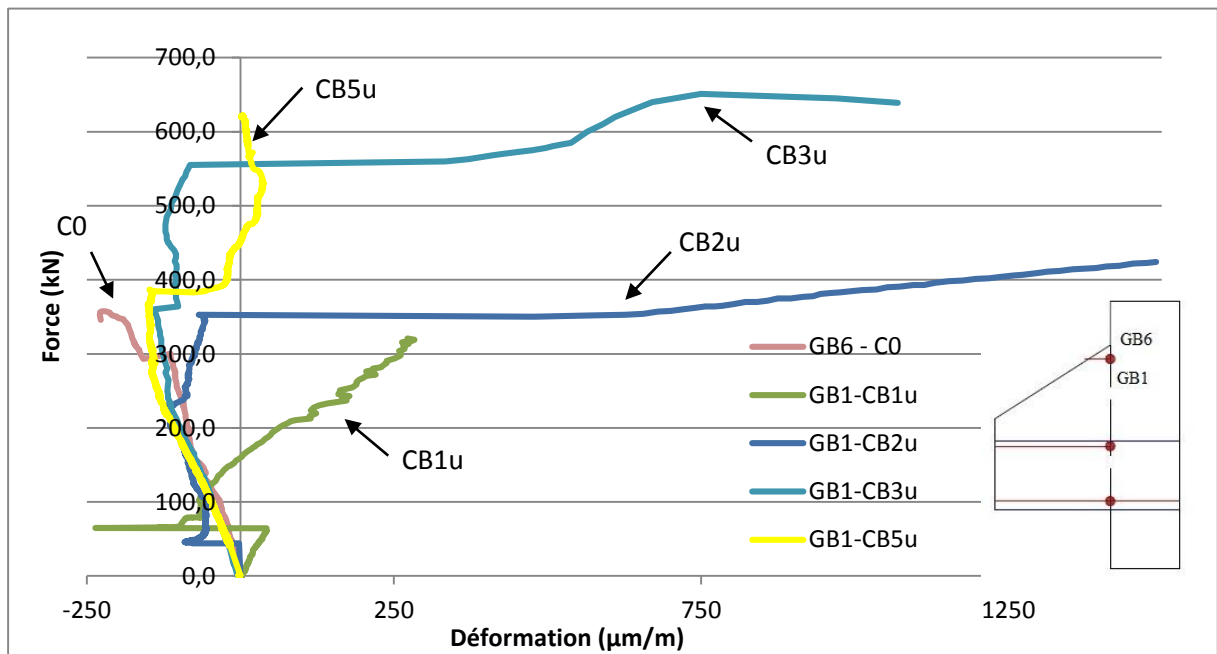


Figure 3-31: Comparaison de la déformation du béton enregistrée par la jauge « GB1 » pour différentes épaisseurs: CB1u, CB2u, CB3u et CB5u

3.5.2.3 Influence du type de matériau composite en fibres de carbone

3.5.2.3.1 Par plaques des deux faces

- **Charge ultime**

Nous utilisons les plaques de tissu en fibres de carbone et lamelle « carbodur ». La lamelle « carbodur » est plus rigide. Elle peut engendrer un décollement de la plaque de façon prématurée, ce qui donne des résistances plus faibles par rapport aux consoles renforcées par plaque de tissu en fibre de carbone. Les résultats dans le Tableau 3-5, montrent que la charge



ultime de rupture de la console courte renforcée par plaque de tissu est 1,26 fois supérieure à celle de la plaque collée.

Notation	Configuration des consoles	F_u (kN)	F_u/F_0
C0	Sans renforcement	357	100%
CP1u	Renforcé avec une plaque de tissus sur les deux faces	532	149%
CPC	Plaque « carbodur »/10cm de largeur	440	123%

Tableau 3-5: Influence de tissu et de la plaque composites en fibres de carbone

3.5.2.3.1.1 Variation de la déformation en fonction de la charge appliquée de la console CPC

Les Figure 3-32 et Figure 3-33 montrent les déformations dans la section d'encastrement et du tirant de la console courte renforcée par « carbodur » CPC. Les mêmes observations que pour les plaques collées sur les deux faces. Les courbes sont plus claires. La zone des jauges « G4 » et « GB1 » est bien en compression et la zone de trois autres jauges « G1 », « G3 » et « GC1 » sont en traction. La contribution de lamelle « carbodur » à la résistance est plus importante que celle de l'acier.

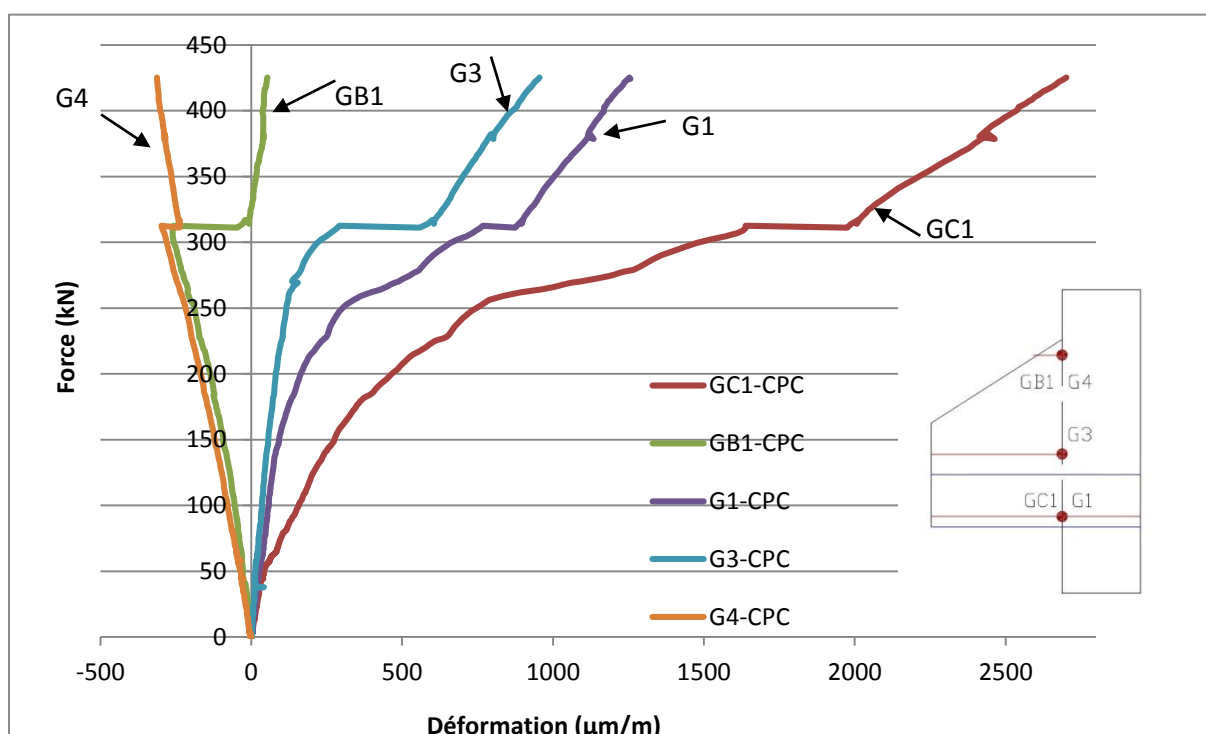


Figure 3-32: Courbes «Force-Déformation» de la console CPC, obtenues par des jauges «G1», «G3», «G4», «GC1», et «GB1» dans la section d'encastrement

C'est visible que l'apparition des premières fissures obliques est à une charge de 310kN. La déformation de la zone de la jauge « GB1 » passe de la compression à la traction dès l'apparition

de la fissure diagonale. La fissure diagonale modifie radicalement le comportement de la console renforcée.

Les résultats dans la Figure 3-33 montrent que la console renforcée par la lamelle « carbodur » est plus rigide par rapport à la console renforcée par les tissus en fibres de carbone CP1u. La console renforcée CP1u se déforme beaucoup plus que celle renforcée par la lamelle « carbodur » et elle peut résister à une plus grande charge appliquée.

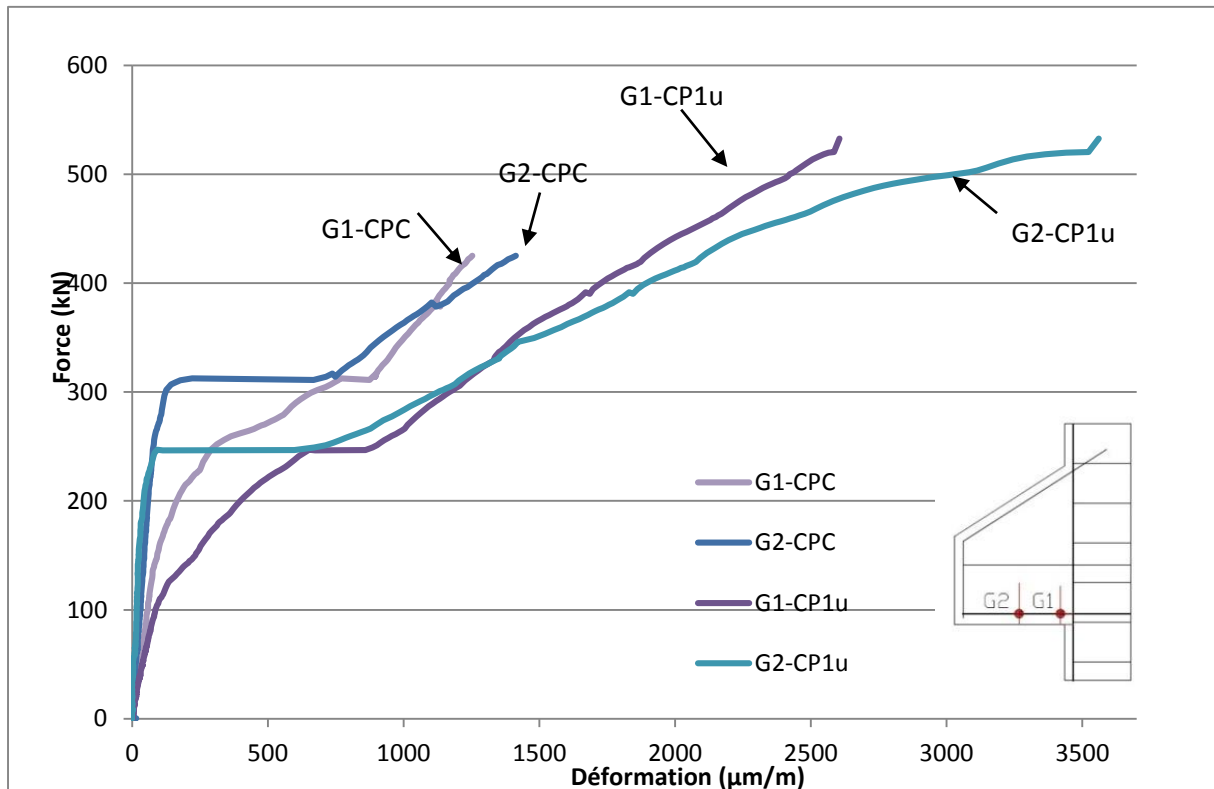


Figure 3-33: Comparaison des déformations locales des jauges « G1 » et « G2 », dans des consoles CPC et CP1u

3.5.2.3.1.2 Comparaison de CPC et CP1u

La Figure 3-34 présente une comparaison des courbes « Force-Déformation » dans le composite des consoles renforcées par la lamelle et les tissus en fibre de carbone. On peut observer que la valeur de la charge correspondant à l'apparition des fissures diagonales augmente après le renforcement. Cet effet est plus significatif dans le cas du renforcement par la lamelle «Carbodur». Par contre, la rigidité de ces trois courbes est similaire.

La Figure 3-34 montre les déformations dans le béton à la position « GC1 » des consoles CP1u et CPC. On trouve le même constat que sur la Figure 3-33. La rigidité de la console CPC est plus importante.

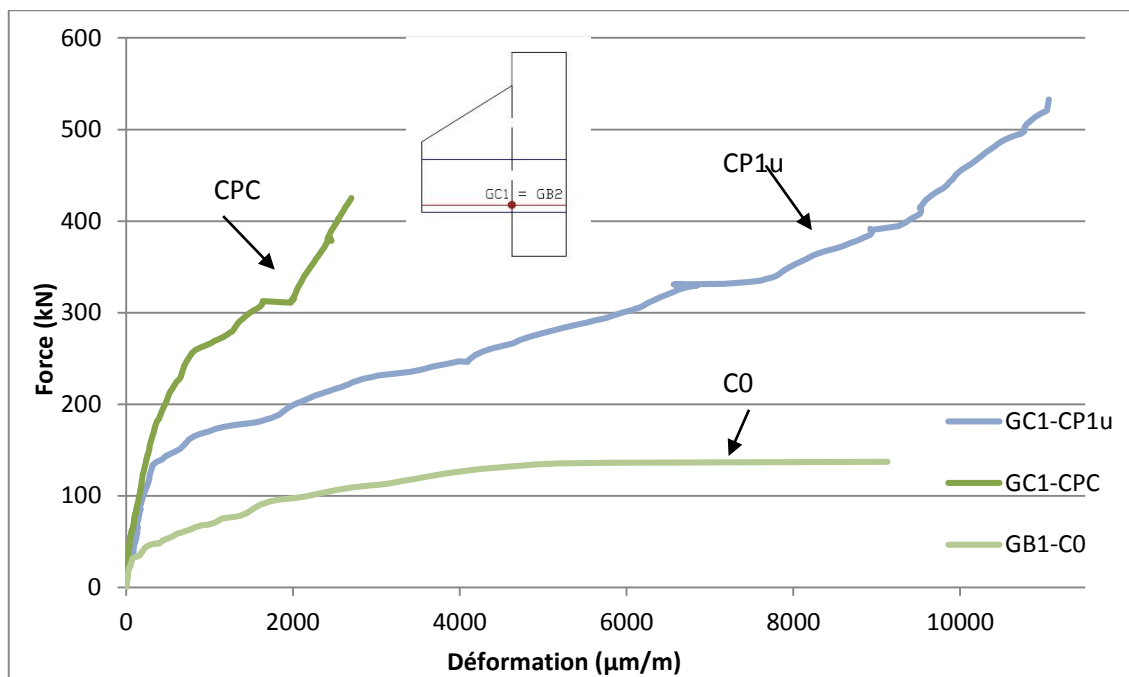


Figure 3-34: Comparaison des déformations du tissu au point « GC1 » des consoles renforcées CP1u, CPC

La Figure 3-35 montre la variation de la déformation dans le béton à la position « GB1 ». La valeur de la déformation dans le cas de la console CP1u est plus élevée par rapport aux deux autres consoles. Par contre, la valeur maximale de la déformation dans le béton à cette position est assez faible et varie de $-225 \mu\text{m/m}$ et $-275 \mu\text{m/m}$.

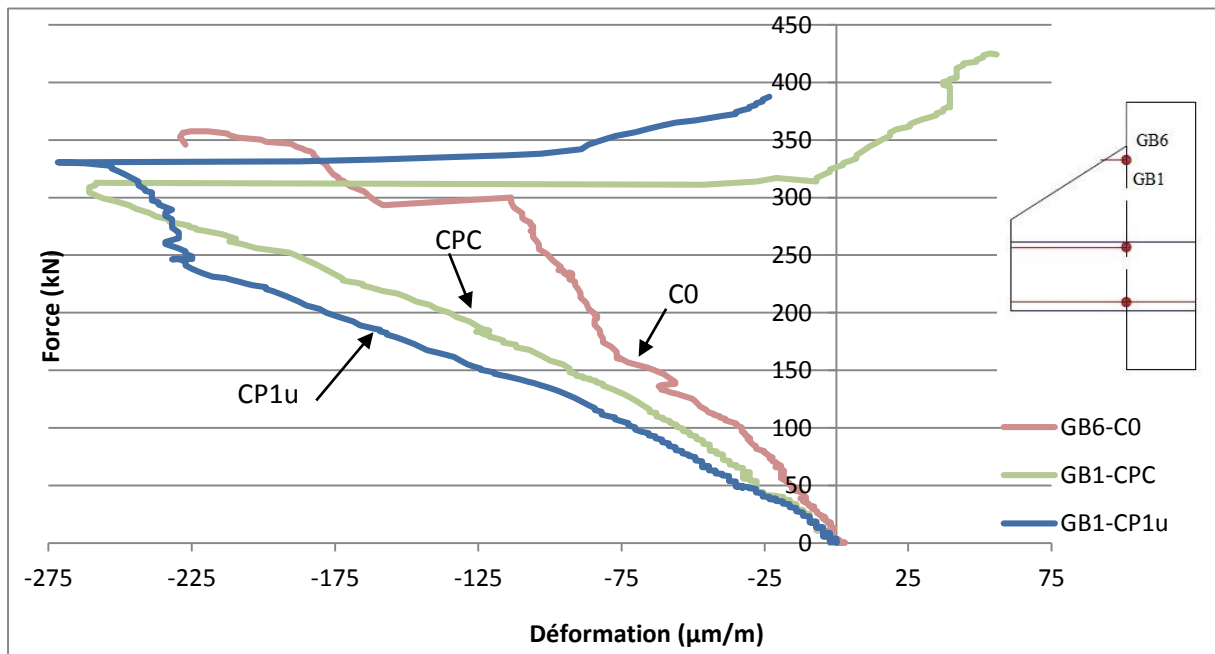


Figure 3-35 : Comparaison de déformation du béton au point « GB1 » des consoles CP1u et CPC

3.5.2.3.2 Par bandage

- **Charge ultime**

Nous utilisons tissu en fibres de carbone avec unidirectionnelles et bidirectionnelles.

La console renforcée par les tissus en fibres de carbone unidirectionnelles montre une charge ultime plus élevée que celle des tissus en fibres de carbone bidirectionnelles, soit 7% de plus (Tableau 3-6).



Notation	Configuration des consoles	F_u (kN)	F_u/F_0
C0	Sans renforcement	357	100%
CB2u	Renforcée par B andage- 2 couches u nidirectionnelles	508	142%
CB2b	Renforcée par B andage- 2 couches b idirectionnelles	481	135%

Tableau 3-6 : Influence du type de tissus sur la charge ultime

3.5.2.3.2.1 Déformation en fonction de la charge appliquée de la console CB2b

La Figure 3-36 montre la variation de la déformation en fonction de la charge de la console renforcée par bandage de deux couches CB2b. Sur ces courbes, on peut noter que la jauge « GC1 » collée sur la surface du composite n'a pas détecté l'apparition de la fissure diagonale.

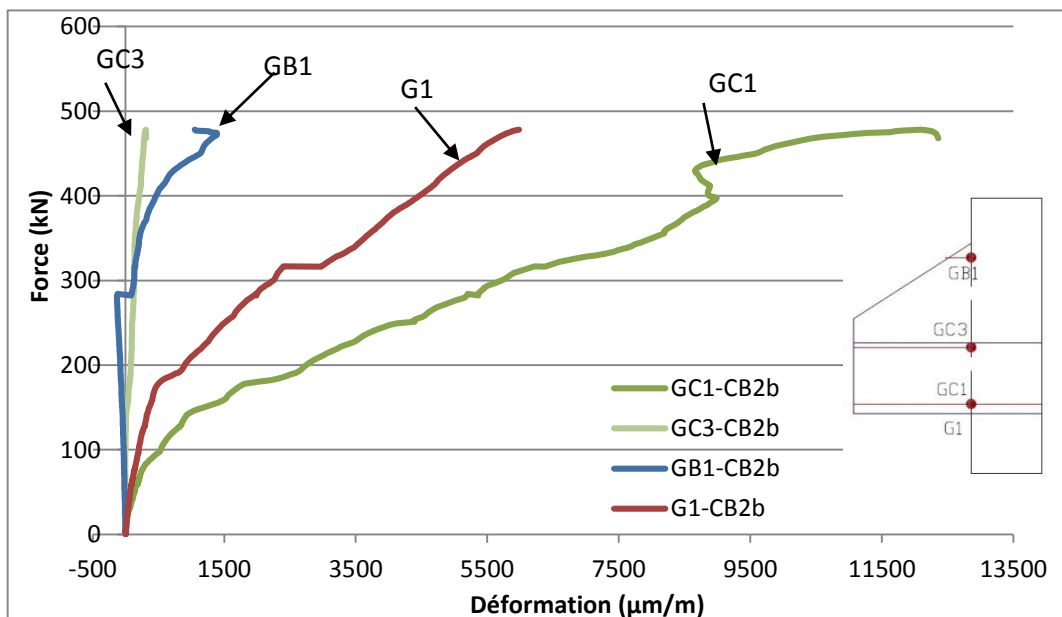


Figure 3-36 : Courbes «Force-Déformation» de la console CB2b, présenté par des jauges «G1», «GC1»,

La jauge « GB1 » collée sur la surface du béton détecte l'apparition de la fissure diagonale plutôt que la jauge « G1 » collée sur l'acier. La valeur de la déformation à la position de la jauge « GC3 » collée sur le matériau composite est relativement faible. Les résultats montrent que la console renforcée avec des tissus bidirectionnels se déforme plus avec une valeur de la

déformation de 12000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Sur la même position, le matériau composite se déforme plus vite que l'acier.

3.5.2.3.2.2 Déformations du tirant aux points « G1 » et « G2 » des consoles CB2b et CB2u

La Figure 3-37 montre la comparaison de la déformation entre la console renforcée CB2b et la console renforcée CB2u. On peut observer sur ces courbes que le comportement local des consoles renforcées par les tissus bidirectionnels et les tissus unidirectionnels est bien différent. La console courte renforcée par les tissus bidirectionnels montre un comportement plus rigide. La valeur maximale de la déformation est quatre fois plus faible que celle de la console renforcée par les tissus unidirectionnels en fibres de carbone.

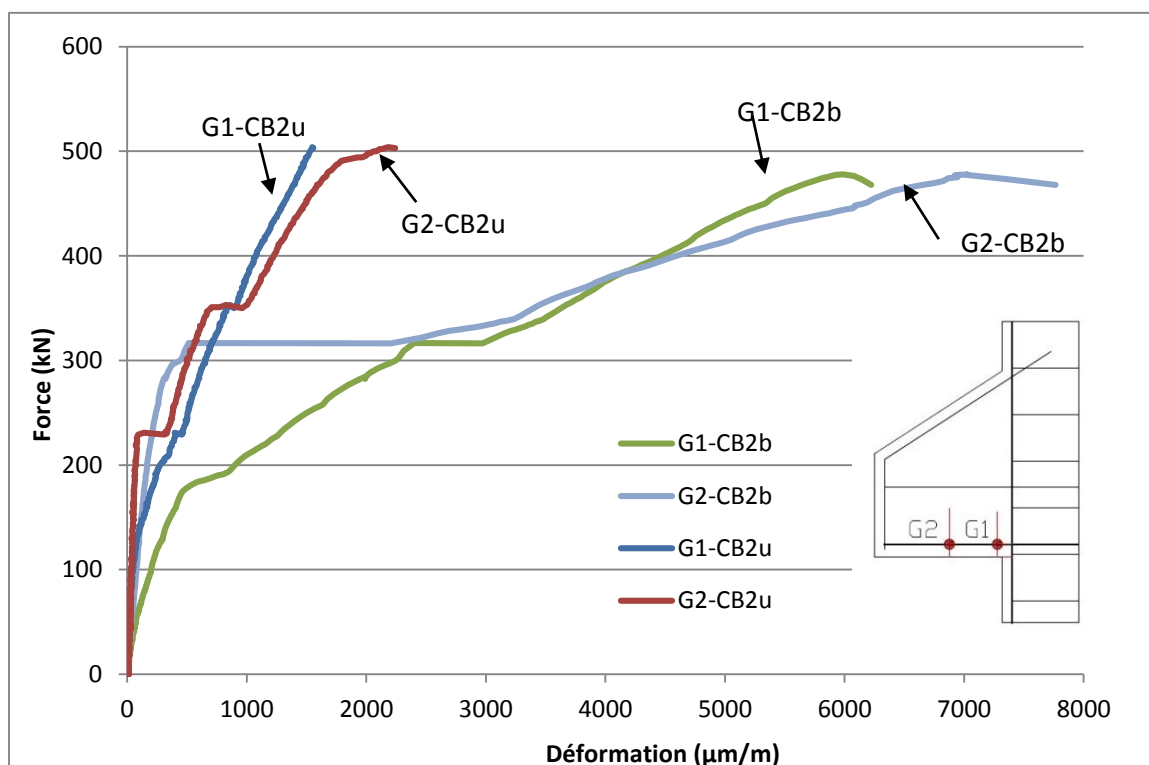


Figure 3-37 : Comparaison des déformations du tirant enregistrées par les jauges « G1 » et « G2 » des consoles CB2b et CB2u

Déformation de la plaque en tissu de fibres de carbone aux points « GC1 », « GC3 » et « GB1 » du béton.

Les Figure 3-38 à Figure 3-40 présentent respectivement les déformations obtenues par les jauges GC1, GC3 et GB1 soit respectivement sur la plaque composite, et sur le béton en un seul point GC1. On compare ensuite les courbes *force-déformation* des plaques en fibres de carbone unidirectionnelles CB2u et bidirectionnelles, CB2b.

Dans le cas de la console de référence C0, la zone de la jauge « GB3 » est en compression. Après le renforcement de la console, cette zone passe de la compression à la traction. Dans le cas de la console CB2u, la fissure diagonale se propage et passe par la zone de la jauge « GC3 » (figure 3-39). La variation de la déformation à la position de la jauge GB1 (figure 3-40) des

trois consoles est pratiquement identique. Par contre, après l'apparition des fissures diagonales, la variation de la déformation de la console renforcée CB2u est de $4750 \mu\text{m/m}$. Cette valeur est largement supérieure à celle de la console renforcée CB2b. La contribution du renforcement à la déformation dans le cas de CB2u est plus importante. La variation de la déformation de la console C0 s'arrête à une valeur de $-360 \mu\text{m/m}$. Il est utile de noter que cette valeur correspond à l'apparition de la fissure diagonale de la console renforcée (CB2b).

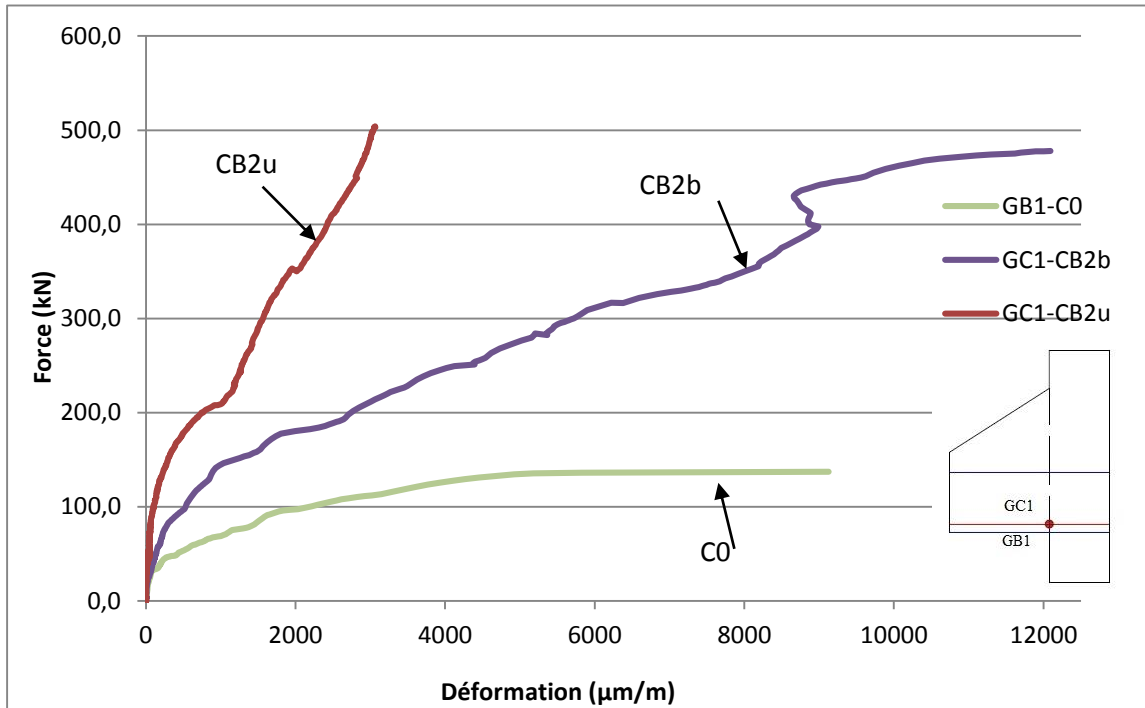


Figure 3-38 : Comparaison des déformations du tissu au point « GC1 » sur matériau composite de consoles renforcées CB2b et CB2u et non renforcée C0 (« GB1 » au point identique que « GC1 »)

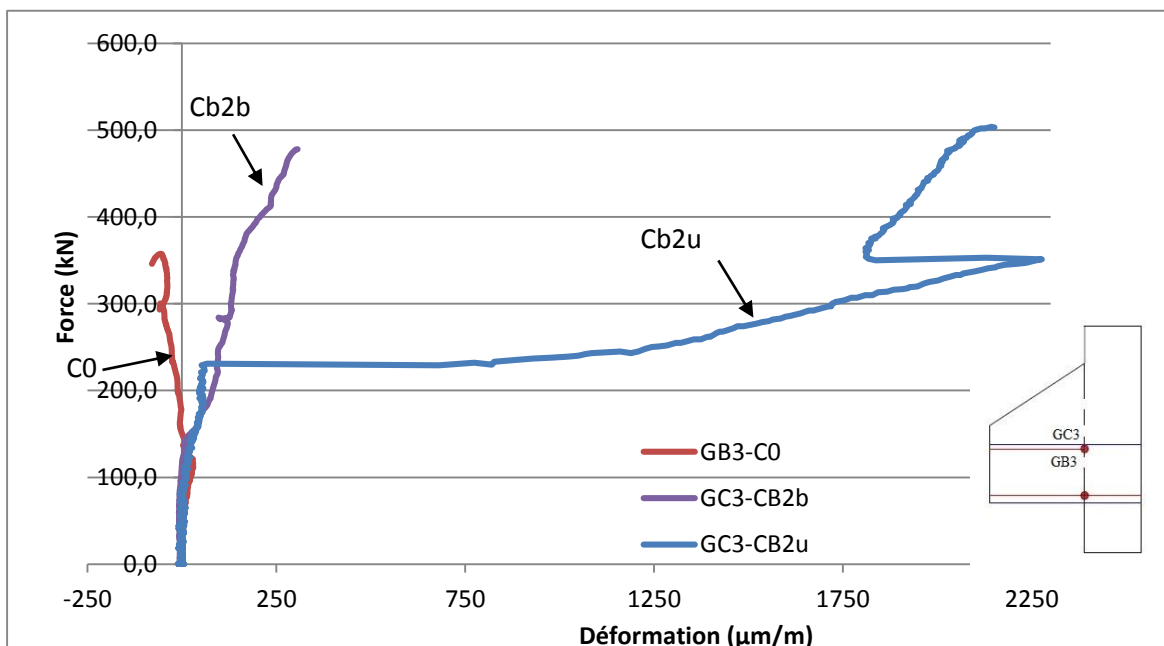


Figure 3-39 : Comparaison des déformations de la plaque en tissu de fibres au point « GC3 » des consoles renforcées CB2b et CB2u et non renforcée C0 (« GB3 » au point identique que « GC3 »)

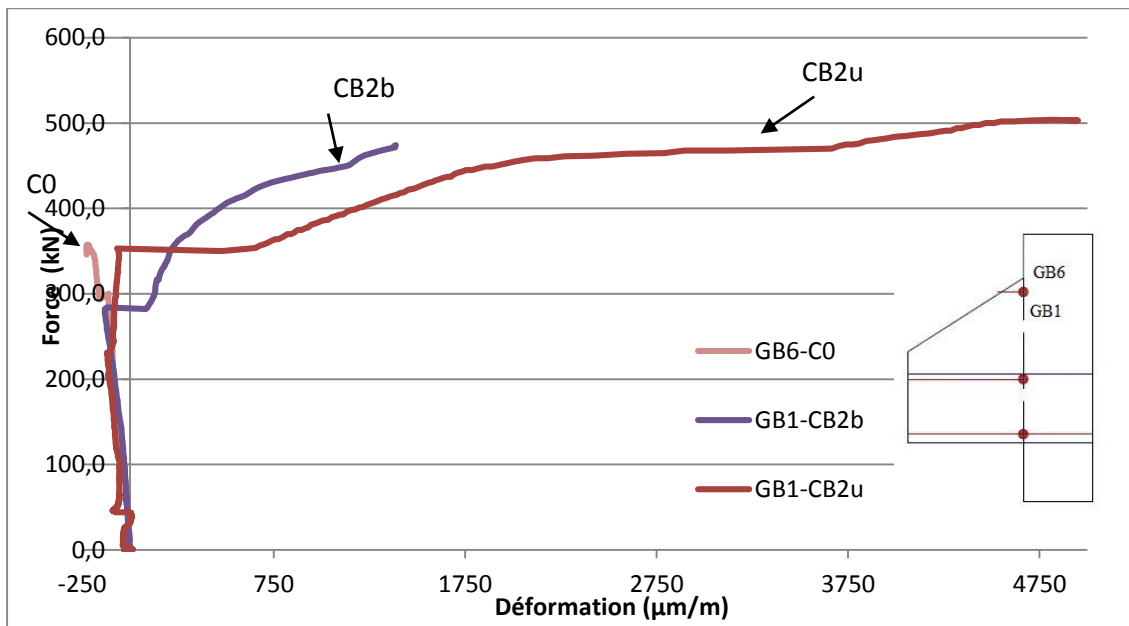


Figure 3-40 : Comparaison des déformations du béton au point « GB1 » des consoles renforcées CB2b et CB2u et non renforcée C0 (« GB6 »)

3.5.2.4 Influence du type de renforcement

3.5.2.4.1 Par bandage

- **Charge ultime**

Deux types de largeurs des plaques en tissu en fibres de carbone sont utilisés : 15 et 5 cm. Le Tableau 3-7 indique qu'en prenant le tiers de la largeur on a 30 % d'augmentation de charge. Nous avons choisi 5cm pour assurer la reprise des efforts dans la zone tendu, donc en plaçant la bande au niveau de l'acier. Et les 15 cm de largeur qui couvrent toute la mi-hauteur jusqu'à la position de l'axe neutre.



Notation	Configuration des consoles	Surface(%)	F_u (kN)	F_u/F_0
C0	Sans renforcement	0	357	100%
CB3u	Renforcée par Bandage-3 couches unidirectionnelles	100	651	182%
CB3u(5cm)	Console renforcée par Bandage 3couches unidirectionnelles de 5cm de largeur	33,3	458,8	129%

Tableau 3-7 : L'effet du bandage sur la charge ultime

3.5.2.4.1.1 Déformations de la plaque, de l'acier et du béton de la console CB3u(5cm)

La Figure 3-41 suivante présente l'évolution des déformations des consoles renforcées CB3u et CB3u(5cm). Dans le cas de la console renforcée CB3u(5cm), la rigidité de la console est moins grande. Par contre, les valeurs des déformations sont plus importantes.

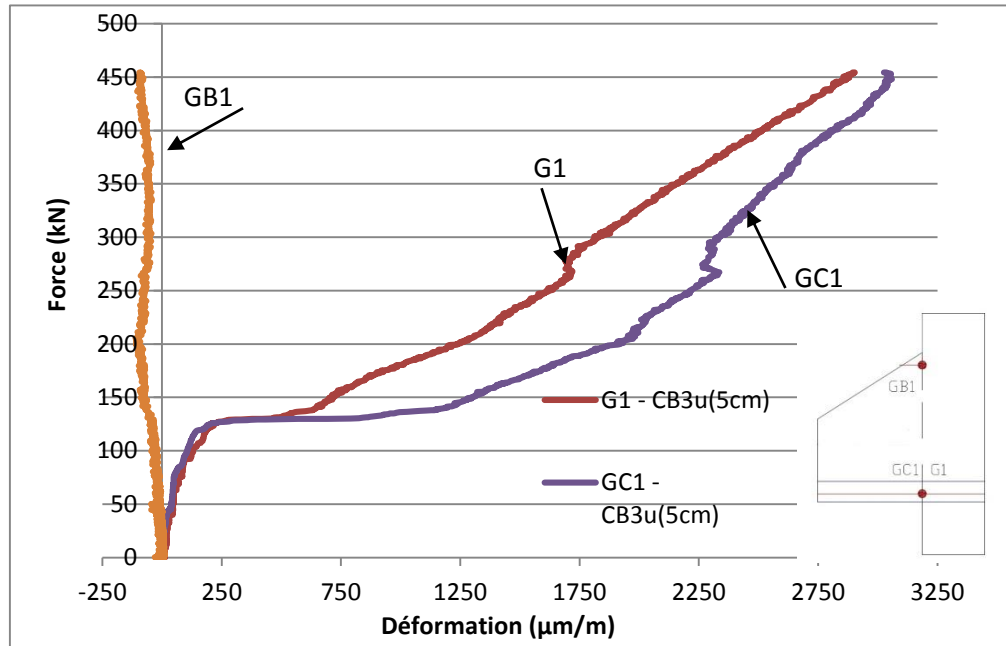


Figure 3-41 : Courbes «Force-Déformation» de la console CB3u(5cm), obtenues par des jauges «G1», «GC1», et «GB1» dans la section d'encastrement

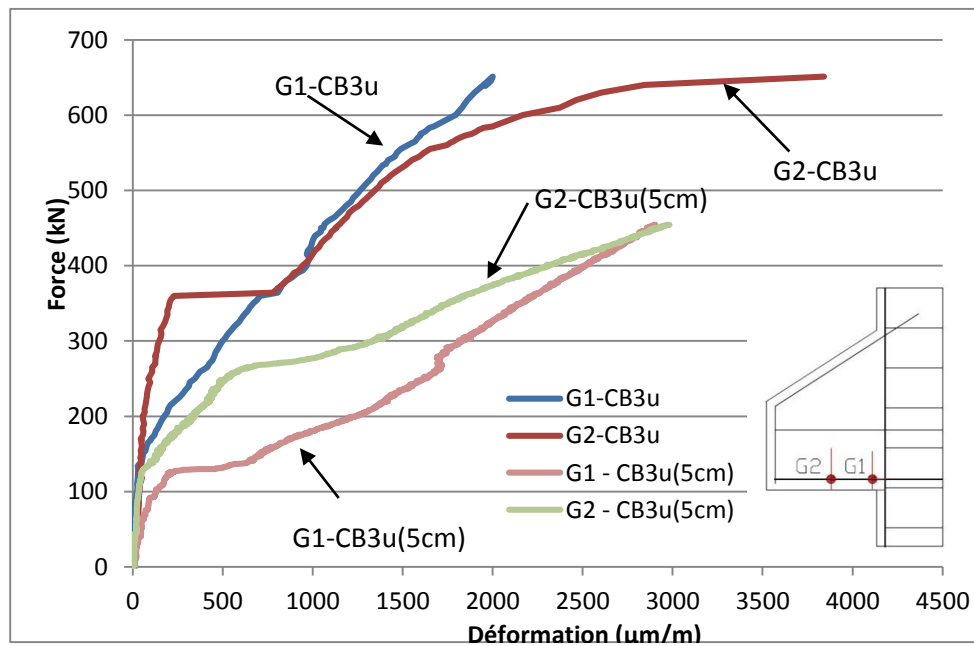


Figure 3-42 : Comparaison des déformations du tirant présenté par les jauges « G1 » et « G2 » des consoles renforcéeCB3u et CB3u(5cm)

Si on compare uniquement la différence des déformations à la position des jauges « G1 » et « G2 » (Figure 3-42), on observe bien que l'influence de la surface renforcée est importante.

Suivant l'augmentation de la surface renforcée, la rupture de la console renforcée n'est plus fragile et brutale.

3.5.2.4.2 Influence de la longueur d'ancrage

- **Charge ultime**

Nous avons utilisé le même nombre de couches c'est-à-dire l'équivalent de 3 couches de tissus en fibres de carbone unidirectionnelles. On distingue le renforcement en U des consoles par des bandes en fibres de carbone unidirectionnelles de 150mm de hauteur (CU+3u; CU3u). Les configurations A et B (Figure 3-43) décrivent deux plaques composites en U collées dans la zone tendue



de la console espacées de 7,5cm symétriquement par rapport au poteau. Les résultats montrent que la longueur d'ancrage



de 7,5cm a peu d'influence que la charge ultime de rupture de la console courte en béton armé soit respectivement 447kN et 430kN. Par contre, cela modifie sensiblement le mode de rupture que nous détaillerons plus tard dans la partie fissuration et rupture.

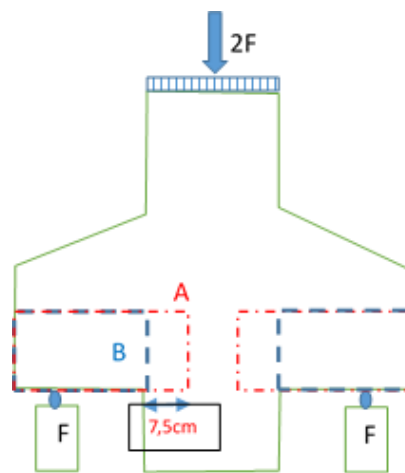


Figure 3-43 : Les deux configurations A et B du collage en U des plaques composites

Même si la charge additionnelle en capacité portante reste relativement faible 17 et 21%, nous notons une modification significative du comportement mécanique des consoles renforcées. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3-8.

Notation	Configuration des consoles	Surface(%)	F_u (kN)	F_u/F_0
C0	Sans renforcement	0	357	100%
CB3u	Renforcée avec Bandage en 3 couches unidirectionnelles	100	651	182%
CP3u	Renforcée sur deux faces en 3 couches unidirectionnelles	84,2	380	106%
CU+3u	Renforcée par bandage -15 cm en 3 couches unidirectionnelles :	84,2	430	120%
CU3u	Renforcée par bandage -30 cm en 3 couches unidirectionnelles .	68,4	447	125%

Tableau 3-8 : Résultats du type de renforcement des consoles

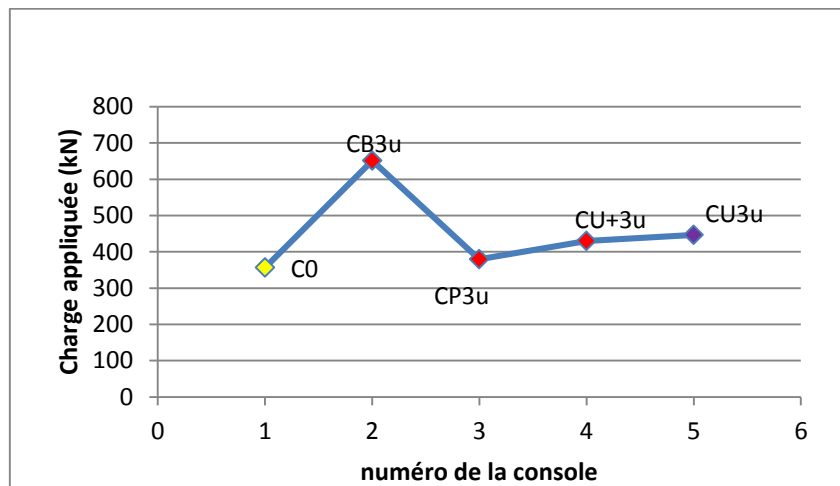


Figure 3-44 : Influence de la longueur d'encrage

Les résultats montrent que la réparation ou le renforcement par bandage de tissus composites en fibres de carbone est amélioré très sensiblement de 82% de plus la charge ultime de la console de référence. Avec uniquement un tiers de la surface (le cas de CB3u(5cm)), nous obtenons 25% en plus en charge, alors qu'à 100%, nous obtenons que 63%; (Tableau 3-8). Les résultats montrent qu'en dehors du bandage la longueur d'ancrage du tissu a peu d'influence sur la charge ultime.

3.5.2.4.2.1 Déformations des consoles CU+3u et CU3u

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que la longueur d'ancrage a peu d'influence sur la charge portante de nos consoles renforcées. Néanmoins, les jauges placées sur la plaque composite nous montrent une déformation plus importante lorsque la longueur d'encrage est plus grande.

Déformation dans la section d'encastrement

Les comportements dans les sections d'encastrement de la configuration A et B sont différents. Les jauges collées sur le matériau composite montrent qu'après les premières fissurations, pour la configuration B, le bloc change de signe et se comprime alors que dans la configuration A, les déformations sont semblables à celles d'une console renforcée par bandage.

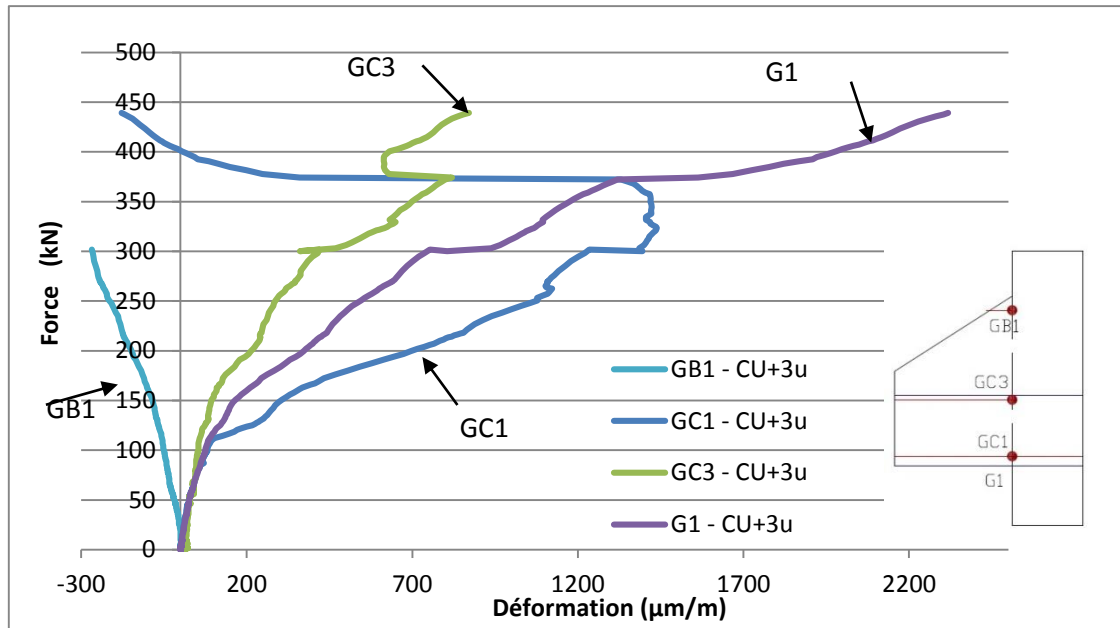


Figure 3-45 : Courbes «Force-Déformation» de la console CU+3u, obtenues par les jauges «G1», «GC1», «GC3» et «GB1» dans la section d'encastrement.

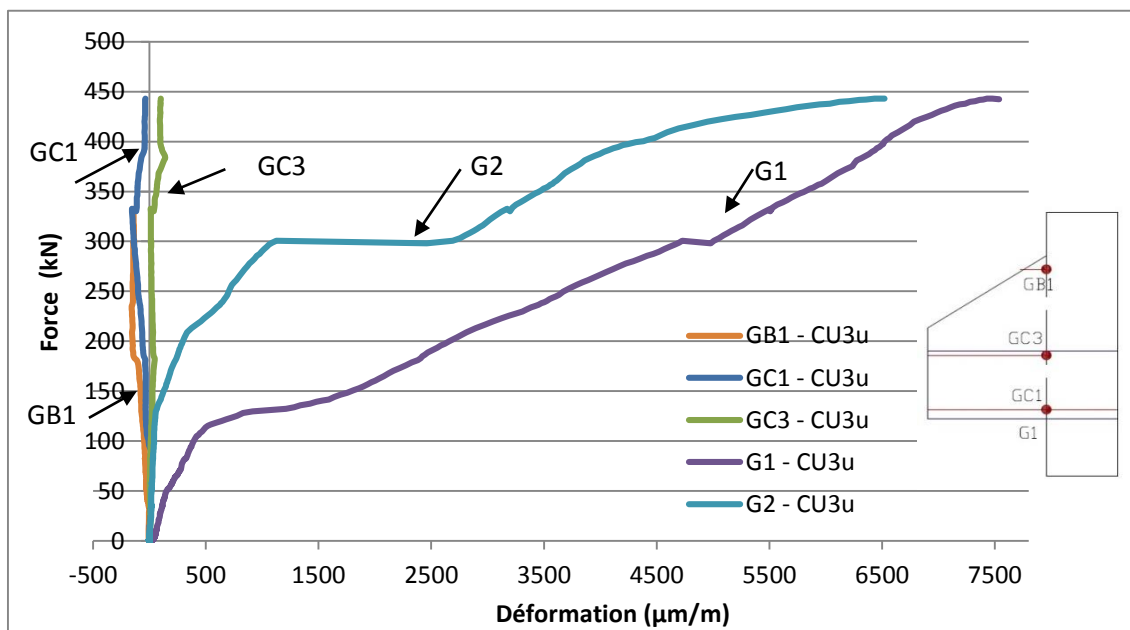


Figure 3-46 : Courbes «Force-Déformation» de la console CU3u, obtenues par les jauges «GC1», «GC3», «GB1», «G1» et «G2» sur le béton, matériau composite et sur l'acier.

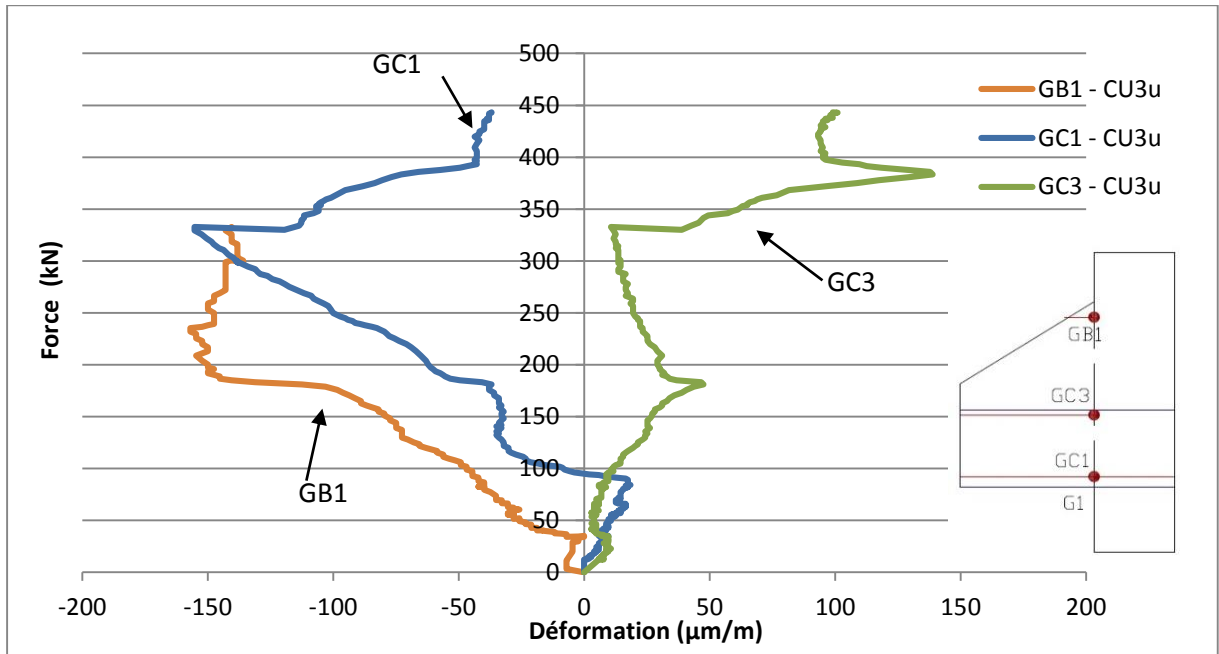


Figure 3-47 : Courbes «Force-Déformation» de la console courte CU3u, présenté par les jauges «GC1», «GC3» et «GB1» sur le béton et matériau composite.

3.5.2.4.2.2 Comparaison de CU+3u et CU3u avec CB3u et CP3u

- **Comparaison des tirants au Point « G1 » et « G2 »**

La Figure 3-48 présente les déformations du tirant de la console renforcée par collage d'une plaque composite en U+7,5 aux deux extrémités comme indiqué sur la Figure 3-43 (configuration A).

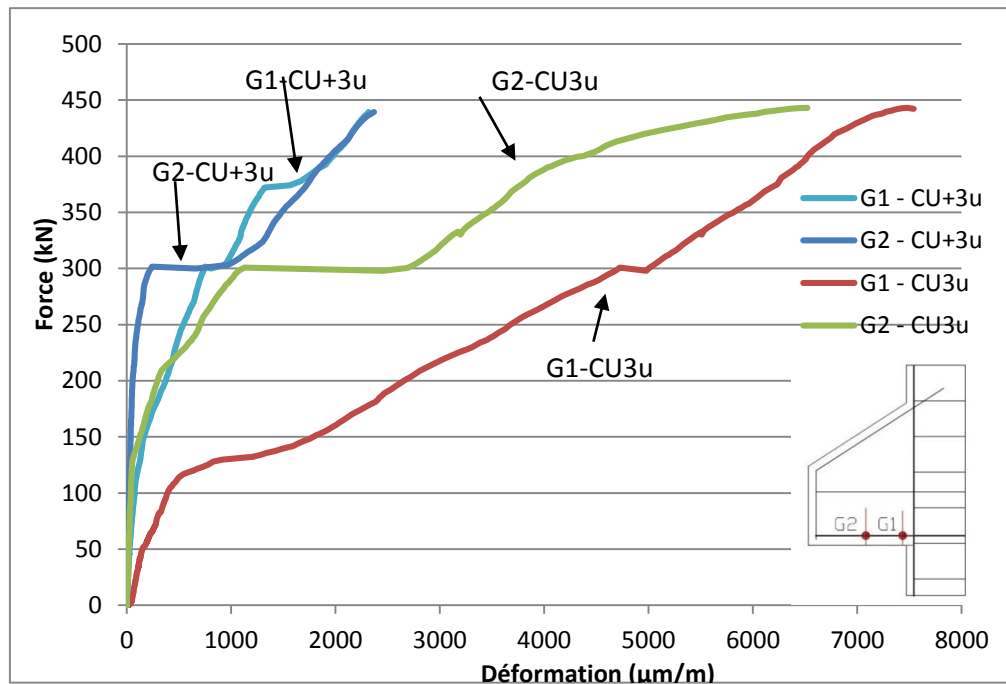


Figure 3-48 : Déformations du tirant aux points « G1 » et « G2 » de la console courte renforcée CU3u et CU3u.

Les résultats montrent une fissuration beaucoup plus tôt (110kN, le jauge « G1 ») avec 2 paliers : un à 300kN où le tirant reprend les efforts avec l'apparition de la fissure diagonale et l'autre à 380kN où les deux points de mesure présentent les mêmes valeurs de déformation et de comportement. Ce comportement est semblable à celui d'une console renforcée par bandage.

Par contre, pour la console CU3u (pour la configuration B, Figure 3-43), montre que sur le tirant la jauge « G1 » se déforme plus que le point « G2 » du début jusqu'à la fin. Même si on observe le seul et même palier à 300kN dans ce cas-ci. La partie renforcée se comporte comme un bloc et modifie considérablement le mode de rupture.

- **Comparaison des comportements du tirant des consoles renforcées par bandage, plaque et en U au point « G1 »**

La Figure 3-49 montre les déformations du tirant (Jauge « G1 ») des différents types de renforcement à savoir: par bandage, par collage directe du tissu composite sur la surface du béton ou la plaque en forme de U. Le palier à 300kN où il y a apparition de la fissure diagonale est commun à tous les cas sauf pour le cas du bandage (CB3u) où il est plus élevé (380kN). Évidemment, ce résultat confirme bien que le tirant dans le cas du bandage se déforme moins donc l'augmente la rigidité de la console.

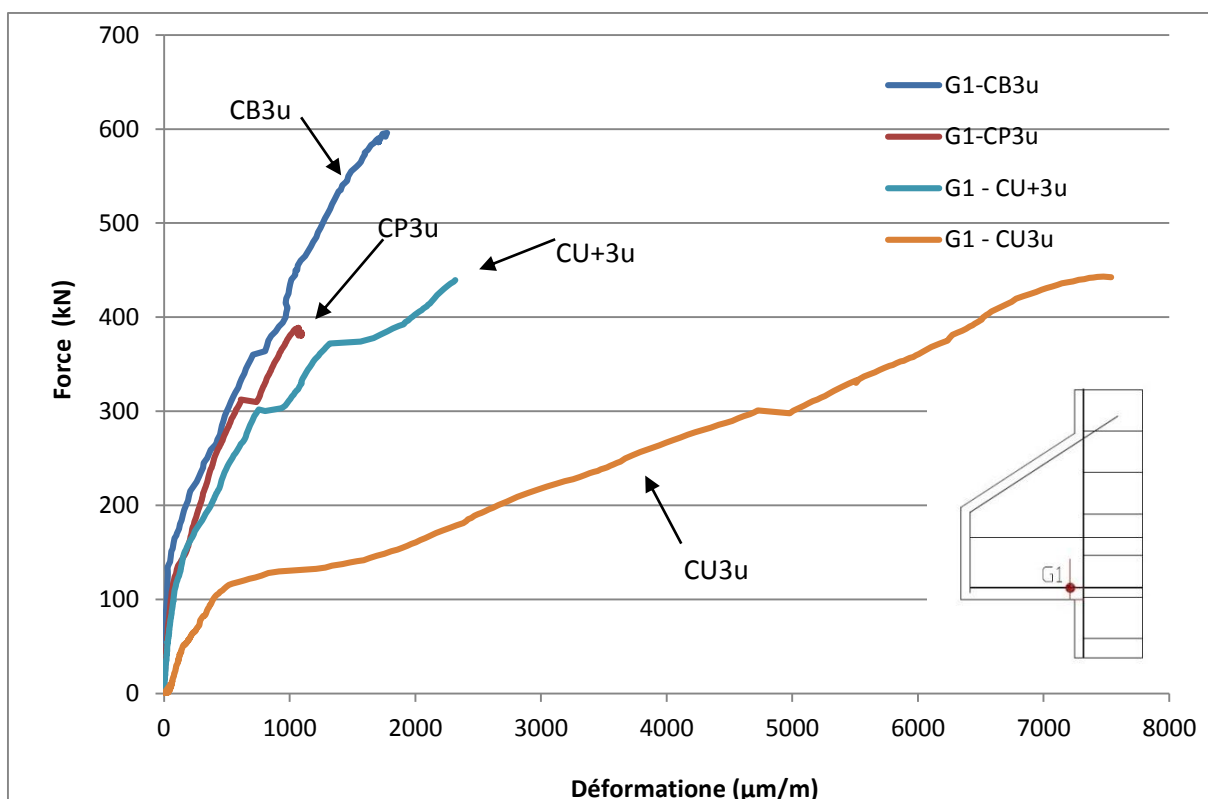


Figure 3-49 : Comparaison des déformations du tirant enregistrée par la jauge « G1 » des consoles CB3u, CP3u, CU+3u et CU3u

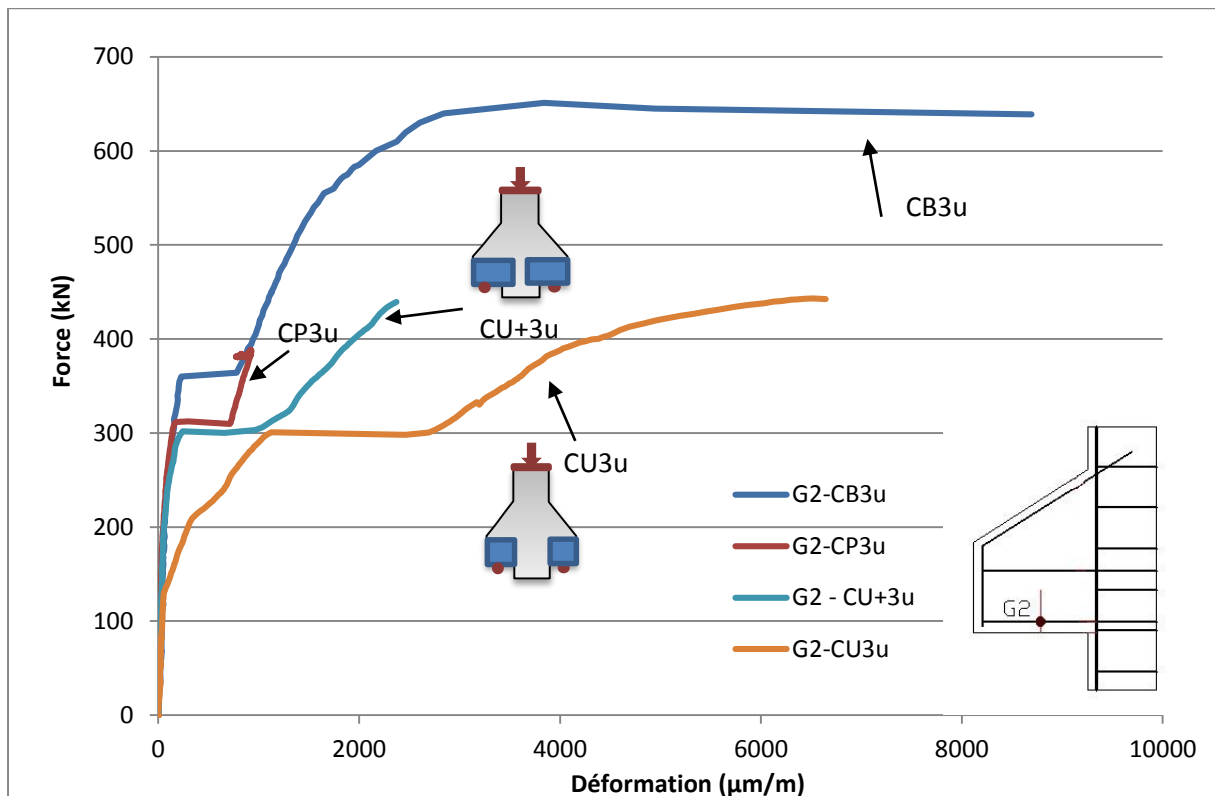


Figure 3-50 : Comparaison des déformations du tirant enregistrée par la jauge « G2 » des consoles CB3u, CP3u, CU+3u et CU3u

- **Comparaison des comportements de la plaque composite des consoles renforcées par bandage, plaque et en U au point GC1**

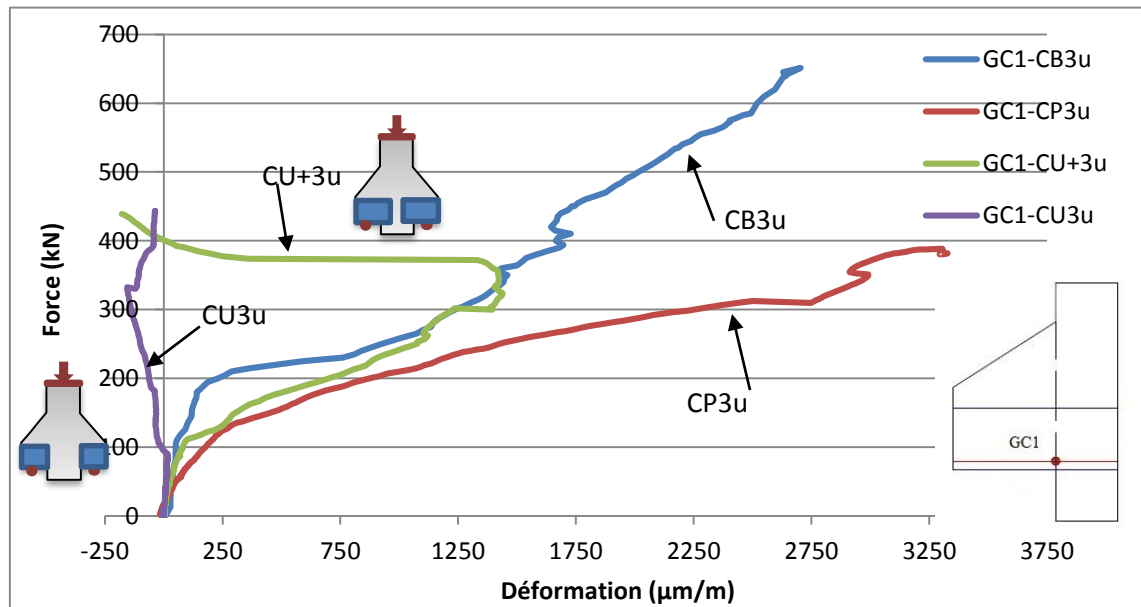


Figure 3-51 : Comparaison de la déformation présentée par jauge « GC1 » des consoles CB3u, CP3u, CU+3u et CU3u

Les matériaux composites des consoles renforcées par bandage se déforment plus, voir la Figure 3-51 contrairement au tirant. Les plaques composites en U se déforment peu et dès l'apparition des premières fissures se compriment. Par contre, à 300kN, palier caractéristique, la console CU+3u (Configuration A) la jauge « GC1 » change de signe malgré l'accroissement de la charge. Il y aurait un transfert des déformations de l'acier vers le matériau composite qui joue bien son rôle en augmentant la charge portante ultime et réduit la rigidité de la console.

3.5.2.4.3 Influence de plaques composites inclinées

- **Charge ultime**

Le Tableau 3-9 présenté l'influence de l'orientation des tissus en fibres de carbone sur la charge ultime des consoles. Les résultats montrent une augmentation de la charge de rupture de 28 à 46% de plus par rapport à la console non renforcée. La résistance ultime de la console renforcée CI2b, la console renforcée par les plaques inclinées de deux couches bidirectionnelles sur les deux faces de la console, est plus grande.



Notation	Configuration des consoles	Surface	F _u (kN)	F _u /F ₀
C0	Sans renforcement	0	357	100%
CI2b	Console renforcée par plaques Inclinées de 2 couches bidirectionnelles- sur les deux faces	63,6	520	146%
CIU2b	Console renforcée par morceaux Inclinées en forme U - 2 couches bidirectionnelles –sur les deux faces	79,4	458,8	129%
CI2b+CB3u(5cm)	Console renforcée par morceaux Inclinés constitués de 2 couches bidirectionnelles – collées sur les deux faces + Bandage 3 couches unidirectionnelles de 5cm de largeur.	96,9	476,4	133%
CIU2b+CB3u(5cm)	Console renforcée par morceaux Inclinés en forme U - 2 couches bidirectionnelles –de deux faces+Bandage 3 couches unidirectionnelles avec une largeur 5cm	112,7	455,5	128%

Tableau 3-9 : Influence des plaques inclinées sur la charge ultime des consoles renforcées

Les plaques inclinées à 45° permettent de coudre la fissure diagonale. Ces plaques jouent le rôle de cadre comme dans le cas d'une poutre en béton armé. Ce type de renforcement modifie les modes de fissuration et de rupture. Mais sur la Figure 3-52, la meilleure configuration reste la console renforcée par des plaques inclinées à 45° qui fonctionnent comme les cadres dans une poutre en béton armé.

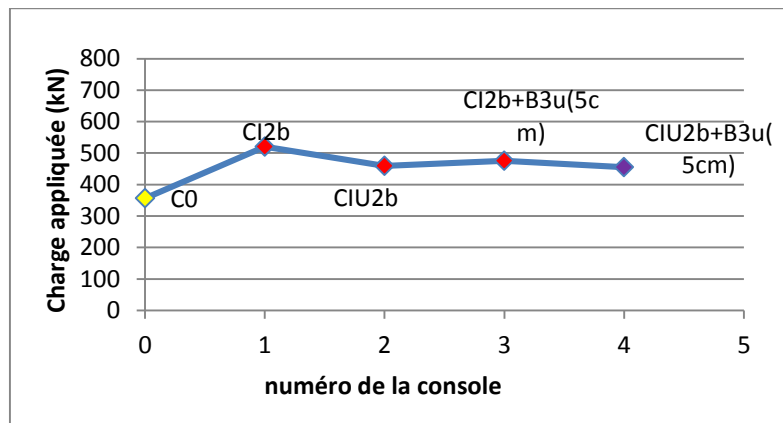


Figure 3-52 : Influence du type de renforcement sur la charge ultime.

3.5.2.4.3.1 Comparaison des consoles courtes renforcées par les plaques composites inclinées

La Figure 3-53 présente la variation des déformations en fonction de la charge à la position de la jauge « G1 » qui est collée sur la surface de l'acier. On peut observer que l'allure de trois courbes est similaire sauf la courbe de CI2b. Dans le cas de la console renforcée CI2b, la valeur maximale de la déformation est plus importante et la charge ultime est la plus élevée.

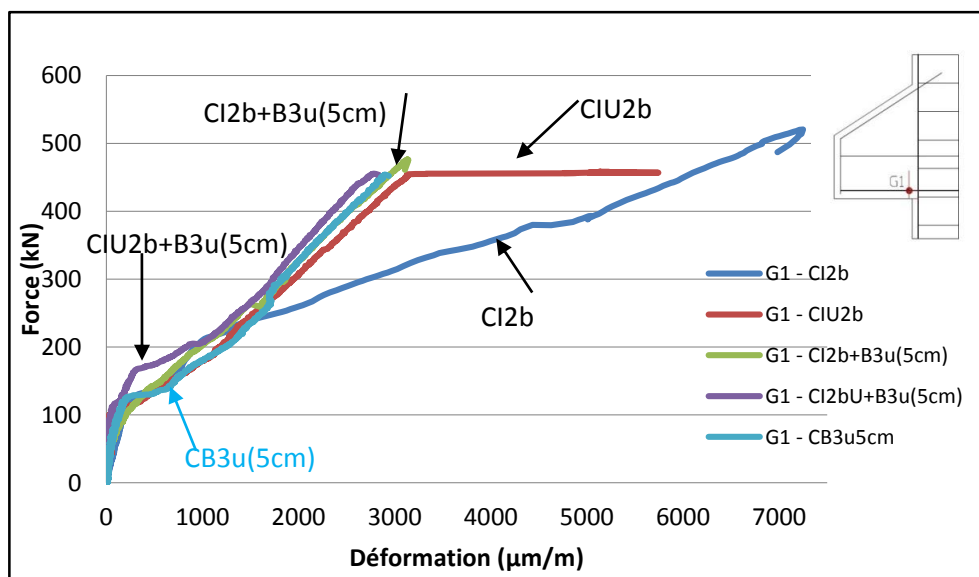


Figure 3-53 : Comparaison des déformations du tirant obtenues par la jauge « G1 » des consoles CI2b, CIU2b, CI2b+B3u(5cm) et CIU2b+B3u(5cm)

3.5.2.5 Distribution des déformations dans la section de la console:

La Figure 3-54 montre la répartition des déformations dans la section d'encastrement de la console de référence C0. Ceci permet de mettre en évidence une des hypothèses des résistances des matériaux à savoir les déformations dans la section restent planes après déformation.

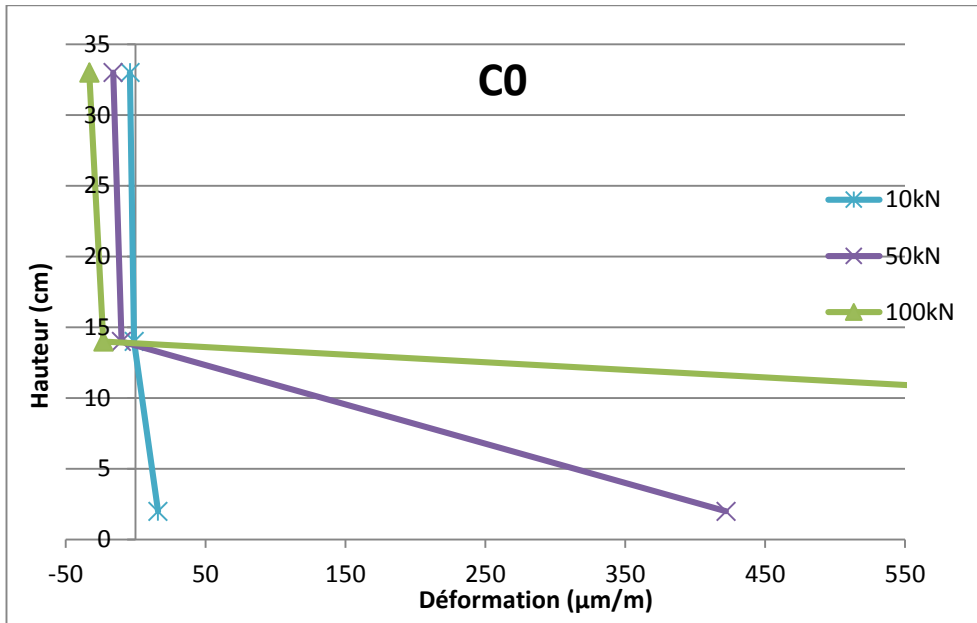


Figure 3-54: État des déformations dans la section d'encastrement d'une console non renforcée.

Dans le cas de la console de référence, la répartition de la déformation avant la charge 10 kN est linéaire. A la charge de 50 kN, la répartition de la déformation n'est plus linéaire due à l'apparition des fissures dans le béton.

Dans le cas de la console renforcée CB1u (Figure 3-55), avant la charge 100kN, la répartition de la déformation est linéaire. La zone de la position de 14 cm a la plus grande déformation. Le domaine élastique de la console est amélioré.

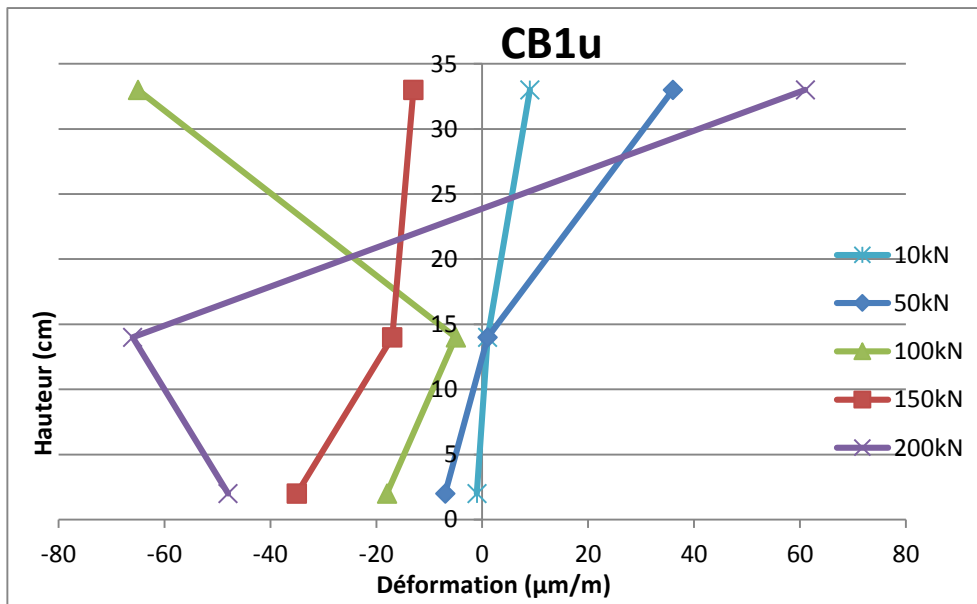


Figure 3-55: Distribution des déformations dans la console CB1u.

La Figure 3-56 montre clairement la position de l'axe neutre qui varie en fonction de la force appliquée. Suivant la charge, la position de l'axe neutre montre vers la zone comprimée.

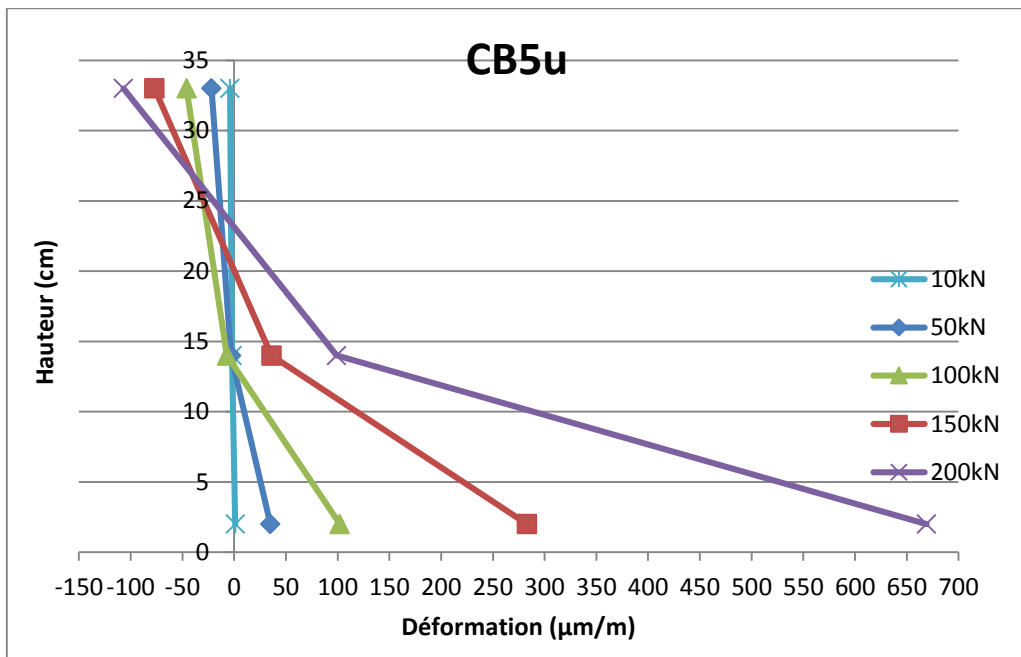


Figure 3-58: Distribution des déformations dans la console CB5u:

La Figure 3-59 présente la répartition des déformations dans la section de la console renforcée CB2b suivant l'augmentation de la charge. Cette figure montre que la valeur de la déformation est très importante (2800 $\mu\text{m/m}$) dans la zone tendue auprès de la fibre inférieure de la console. Cependant, la valeur de la déformation auprès de la fibre supérieure est très faible qui ne dépasse pas à 100 $\mu\text{m/m}$.

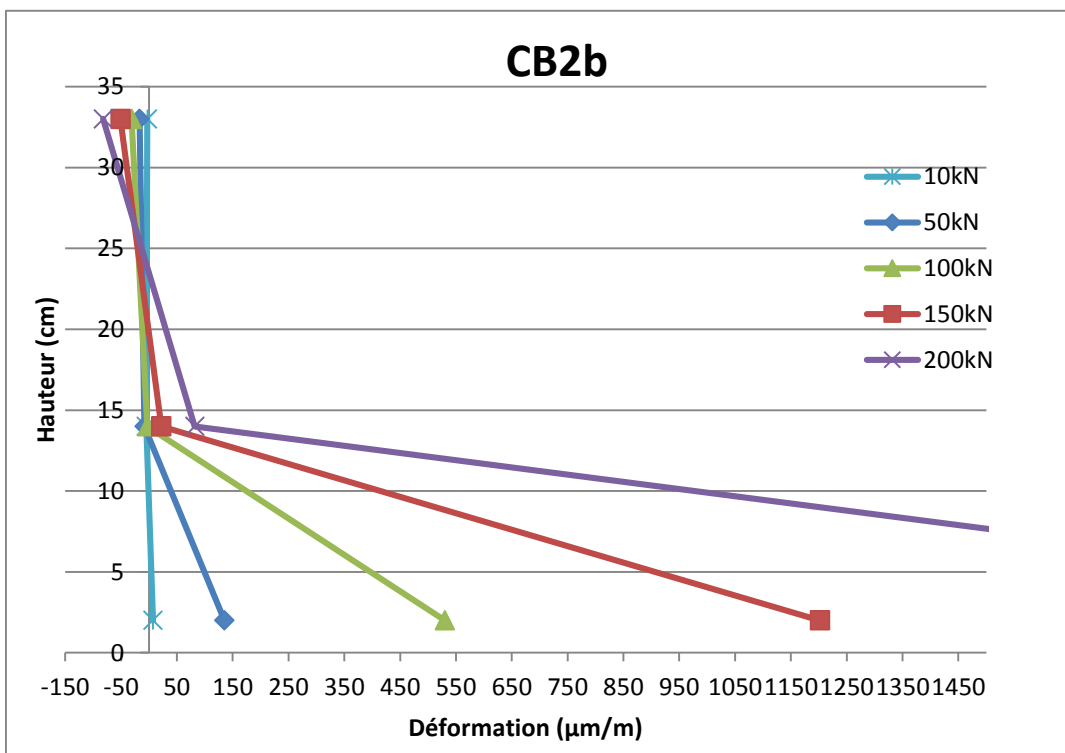


Figure 3-59 : Distribution des déformations dans la console CB2b.

3.5.2.6 Fissuration et modes de rupture des consoles courtes

Dans cette partie, nous présentons la fissuration et les modes de ruptures des consoles courtes renforcées. Les résultats expérimentaux montrent que la charge portante et la rigidité des consoles courtes renforcées augmentent en fonction d'épaisseur du renforcement, de type de renforcement, de la surface renforcée et de type en matériaux composites.

Plusieurs types de rupture sont observés:

- rupture par fendage diagonal,
- rupture par compression,
- rupture par cisaillement,
- rupture par cisaillement + fendage diagonal,
- rupture par compression + fendage diagonal,
- rupture de la plaque en tissus en fibres de carbone
- rupture par décollement de la plaque composite aux extrémités.

3.5.2.6.1 Console courte de référence



Figure 3-60 : Fissuration et rupture de la console de référence C0.

La ruine de la console de référence se produit par une fissure par *fendage diagonal*. La première fissure s'amorce dans la partie supérieure à la jonction de la console avec le poteau à 60 kN. Par contre, la fissure oblique commence au niveau de l'appui à 235 kN et se propage

vers la partie supérieure de la section d'encastrement. Au début, c'est une fissure de flexion, presque verticale jusqu'au niveau de l'axe neutre de la console, puis la fissure s'incline à 65° degrés par rapport à la direction horizontale. La rupture de la console se produit suivant cette dernière fissure à 357 kN (Figure 3-60). Nous observons une autre fissure à 335 kN sur la fibre inférieure à environ 5cm du point d'appui.

3.5.2.6.2 Consoles renforcées par bandage, influence de l'épaisseur sur le mode de rupture

Le mode de rupture des consoles courtes renforcées par bandage est caractérisé par une fissure diagonale. L'augmentation du nombre de couches conduit à une rupture par compression du béton (écrasement du béton) dans la partie supérieure de la console dans la section d'encastrement.

Le Tableau 3-10 présente les modes de ruptures, les valeurs de charge à laquelle apparaissent la première fissuration, la fissure oblique et la charge maximale ultime des consoles courtes renforcées par bandage.

Notation	F ₁ (kN)	F ₂ (kN)	F _u (kN)	Modes de rupture
C0	60	235	357	Rupture par fendage diagonal
CB1u	140	325	488	Rupture du tissu CFRP
CB2u	140	350	508	Rupture par compression
CB3u	140	365	651	Rupture par cisaillement + fendage diagonal
CB5u	130	380	626	Rupture par compression
CB3u (5cm)	135	265	458,8	Rupture par fendage diagonal
CB2b	165	316	481	Rupture par compression + fendage diagonal

- F₁=charge correspondant à l'apparition de la Première fissuration, F₂ =Charge correspondant à l'apparition de la fissure oblique, F_u=charge ultime.

Tableau 3-10 : Charges caractéristiques et types de ruptures des consoles renforcées par bandage

Dans le cas des consoles courtes en béton armé renforcées, par 1 et 2 couches de tissu en fibres de carbone, par bandage, on distingue la rupture du tissu composite après l'apparition d'une fissure initialement verticale (jusqu'à 12cm). Elle s'incline ensuite entre 65°-70° degrés, semblable à celle de la console de référence. Cette fissure oblique commence au niveau de l'appui vers la section d'encastrement comme nous le montre la Figure 3-61 et Figure 3-60.



Figure 3-61 : Rupture de la console renforcée par bandage, 1 couche unidirectionnelle - CB1u

Cependant, pour la console renforcée par bandage de deux couches, la rupture survient par fendage diagonal incliné d'un angle compris entre 65° - 70° degrés. La verticalité au début comme précédemment dans le cas d'une couche disparaît. Par contre, on a la ruine par compression du béton mais la ruine par la *compression*, Figure 3-62.



Figure 3-62 : Rupture de la console renforcée par bandage, 2 couches unidirectionnelles - CB2u



Figure 3-63 : Rupture de console renforcée par bandage, 3 couches unidirectionnelles - CB3u

La Figure 3-63 présente la rupture de la console courte renforcée par bandage de trois couches. Comme dans le cas précédent de 2 couches, on a toujours la fissure oblique avec un angle de 72° degré environ. La ruine est produite par *cisaillement + fendage*. Ce qui confirme les observations précédentes.

Pour la console courte renforcée par bandage de cinq couches, deux fissures s'amorcent aux voisinages des appuis, Figure 3-64. La ruine est principalement due à la rupture par *compression* du béton, probablement occasionnée par la plus grande rigidité de la plaque dont la partie tendue de la console.



Figure 3-64 : Rupture de console renforcée par bandage, 5 couches unidirectionnelles - CB5u

Le renforcement par bandage avec des plaques en tissus de fibres de carbone bidirectionnelles ne modifie pas le mode de rupture de ces consoles. La Figure 3-65 montre une rupture par *compression + fendage* diagonale avec un angle 75° .



Figure 3-65: Rupture de la console renforcée par bandage, 2 couches bidirectionnelles - CB2b

Le renforcement de console par bandage de trois couches de tissu de fibres de carbone d'une hauteur de 5 cm, présente un mode de rupture semblable à celui de la console de référence. La première fissure s'amorce dans la partie supérieure au croisement entre le poteau et la section verticale d'encastrement. La fissure oblique commence au niveau de l'appui et se propage vers

la partie supérieure de la section d'encastrement. Contrairement à la même fissure dans la console de référence, dans cette console, la section verticale est plus courte Figure 3-66.



Figure 3-66 : Rupture de la console renforcée par bandage 3 couches unidirectionnelles et 5cm de largeur CB3u(5cm)

3.5.2.6.3 Consoles renforcées par plaques composites en fibres de carbone

L'objectif de cette partie de l'étude est de savoir si l'épaisseur de la plaque en fibres de carbone avait une influence sur le renforcement par collage de plaques de tissus en fibres de carbone sur les 2 faces de la console courte en béton armé.

Le Tableau 3-11 présente comme dans les cas précédents: le mode de rupture, les valeurs de charge des premières fissurations et la charge maximale ultime

Notation	F_1 (kN)	F_2 (kN)	F_u (kN)	Mode de rupture
C0	60	235	357	Rupture par fendage diagonale
CP1u	140	246	532	Rupture de la plaque CFRP
CP2u	145	325	552	Rupture par fendage diagonal + décollement de la plaque CFRP
CP3u	145	310	380	Rupture par décollement de la plaque CFRP
CP3u+PA3u	90	324	389	Rupture par fendage diagonale + décollement de la plaque CFRP
CPC	150	309	440	Rupture compression + décollement de la plaque CFRP

- F_1 =charge correspondant à l'apparition de la Première fissuration, F_2 =Charge correspondant à l'apparition de la fissure oblique, F_u =charge ultime.

Tableau 3-11 : Charges caractéristiques et types de ruptures des consoles renforcées par plaques des 2 faces

Pour le renforcement par plaques *d'une couche* collées sur les deux faces de la console, la ruine survient par *une rupture de la plaque* composite. Bien évidemment, comme la Figure 3-67 nous le montre, la fissure s'initie verticalement de 8cm puis s'incline de $67^\circ \pm 2$. La ruine survient par rupture de la plaque composite en tissus de fibres de carbone.



Figure 3-67 : Rupture de la console renforcée par plaques de deux côtés, 1 couche unidirectionnelle - CP1u

Dans les cas du renforcement par plaques de deux ou trois couches, la ruine se produit par décollement de la plaque aux extrémités de la console renforcée, Figure 3-68, Figure 3-69 et Figure 3-70.



Figure 3-68 : Rupture de la console renforcée par plaques de deux côtés, 2 couches unidirectionnelles - CP2u

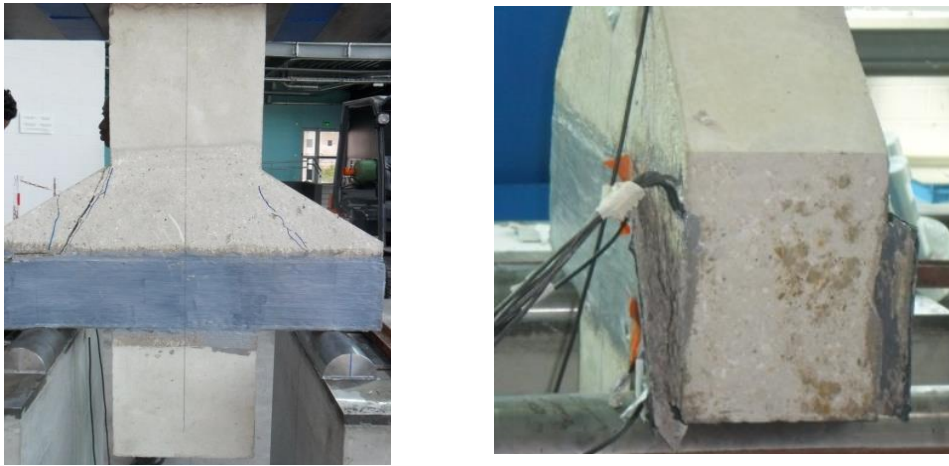


Figure 3-69 : Rupture de la console renforcée par plaques de deux côtés, 3 couches unidirectionnelles – CP3u

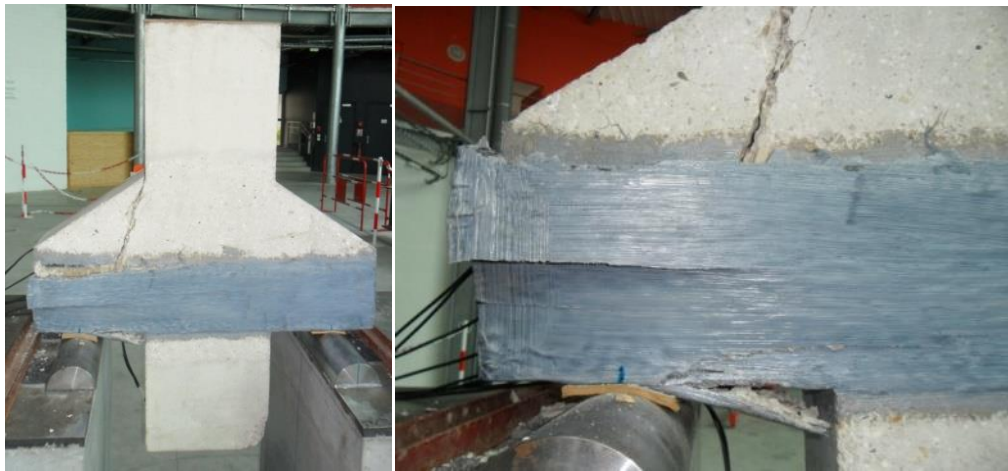


Figure 3-70 : Rupture de la console renforcée par plaque de deux côtés, 3 couches unidirectionnelles + plaque collée sur les deux appuis – CP3u + PA3u

La Figure 3-71 présente l'état de la console renforcée par une plaque "carbodor" après la rupture. La ruine est provoquée par la fissure diagonale et par compression ensuite il y a décollement de la plaque composite. Le décollement de la plaque est prématuré à cause certainement de la rigidité de la plaque carbodor.



Figure 3-71 : Rupture de la console renforcée par plaque "CarboDur" sur les deux faces – CPC

3.5.2.6.4 Consoles renforcées par des tissus en fibres de carbone en U

L'objectif de cette partie de l'étude, reste toujours de mettre en évidence, l'influence du type de renforcement sur la charge ultime de la console renforcée. Les modes de de fissuration et de rupture y sont décrits également. En effet, nous nous sommes intéressés particulièrement à l'influence de la longueur de plaque composite. Le Tableau 3-12, présente comme dans les cas précédents, les modes de rupture, les charges d'apparition des premières fissures, de la fissure oblique et la charge maximale.

Les résultats montrent une augmentation minimale de 20% à 82% par rapport à la console renforcée par bandage. La ruine de la console renforcée est provoquée par le décollement de la plaque aux extrémités, après l'apparition de la fissure oblique diagonale (.Figure 3-72).

Notation	F_1 (kN)	F_2 (kN)	F_u (kN)	Modes de rupture
C0	60	235	357	Rupture par fendage diagonal
CU+ 3u	125	298	430	Rupture par cisaillement + décollement de la plaque CFRP
CU3u	130	298	447	Rupture par cisaillement-fendage

- F_1 =charge correspondant à l'apparition de la Première fissuration, F_2 =Charge correspondant à l'apparition de la fissure oblique, F_u =charge ultime.

Tableau 3-12 : Charges caractéristiques et types de ruptures des consoles renforcées par plaque en forme U



Figure 3-72 : Rupture de la console renforcée par plaque en forme U+, 3 couches unidirectionnelles – CU+3u

Dans le cas où la longueur de la plaque s'arrête au niveau de la section d'encastrement, la ruine de console renforcée est provoquée par cisaillement avec l'apparition de deux fissures: une oblique et l'autre verticale liée probablement au cisaillement (Figure 3-73).



Figure 3-73 : Rupture de la console renforcée par plaque en forme U, 3 couches unidirectionnelles – CU3u

3.5.2.6.5 Consoles renforcées par des plaques inclinées

L'objectif de cette partie de l'étude permet de connaître l'efficacité du renforcement par des plaques inclinées sur le comportement de la structure renforcée, comme les consoles de la Figure 3-74 à la Figure 3-77. L'idée est de "coudre" la fissure et d'analyser l'influence sur la charge ultime et le mode de rupture.

Le Tableau 3-13, présente les différents modes de rupture et la charge ultime.

Notation	F ₁ (kN)	F ₂ (kN)	F _u (kN)	Mode de rupture
C0	60	235	357	Rupture par fendage diagonal
CI2b	116	380	520	Rupture par fendage diagonal
CIU2b	100	175	458,8	Rupture par fendage diagonal + décollement du tissu CFRP aux extrémités
CI2b+ B3u(5cm)	70	260	476,4	Rupture par fendage diagonal + décollement de plaques en tissu inclinées CFRP
CIU2b+ B3u(5cm)	115	200	455,5	Rupture par fendage + rupture de la plaque CFRP

- F₁=charge correspondant à l'apparition de la Première fissuration, F₂ =Charge correspondant à l'apparition de la fissure oblique, F_u=charge ultime.

Tableau 3-13 : Charges des ruptures et types de ruptures des consoles renforcées par bandes inclinées

Les résultats montrent que le mode de la fissuration et de rupture des consoles courtes par des plaques inclinées ont été considérablement modifiés. La "couture" du renforcement joue son rôle en réduisant l'ouverture des fissures avec un croissement de la charge ultime de 46% dans le cas de la console renforcée CI2b par rapport à la console de référence. L'influence de la bande d'une hauteur de 5cm est relativement peu.



Figure 3-74 : Rupture de la console renforcée par bandes inclinées de deux faces (CI2b)



Figure 3-75 : Rupture de la console renforcée par bandes inclinées en forme de U des deux faces (CIU2b)



Figure 3-76 : Rupture de la console renforcée par bandes inclinées des deux faces plus bandage 3 couches unidirectionnelles de 5cm de largeur (CI2b+B3u(5cm))



Figure 3-77 : Rupture de la console renforcée par bandes inclinées en forme de U des deux faces plus bandage 3 couches unidirectionnelles de 5cm de largeur (CIU2b+B3u(5cm))

3.6 CONCLUSION DU CHAPITRE 3

En analysant les courbes données par les jauges de déformation, les charges ultimes et les modes de ruptures, on peut conclure que lorsqu'une console courte en béton armé renforcée par des plaques ou des tissus en fibres de carbone, est soumise à la charge croissante, le comportement de la console renforcée peut être distingué par différentes phases:

- **Phase élastique globale (I)**

Dans cette phase, le béton tendu, la plaque composite et l'acier se déforment de la même façon en fonction de la charge appliquée. Cette phase est terminée par l'apparition des fissures dans zone du béton tendu dues à la flexion.

- **Propagation de fissures (II)**

Lorsque la contrainte de traction sur la fibre inférieure atteint sa limite, le béton se fissure. Cependant, la valeur de la contrainte reste assez faible. Après la fissuration du béton, le béton en compression, l'acier et la plaque composite continuent à se comporter élastiquement suivant l'augmentation de la charge.

Notons par ailleurs que l'augmentation de la charge entraîne l'ouverture de la fissure due à la flexion. Dans cette phase, la contribution de plaque composite en fibres de carbone à la résistance est plus importante que cela de l'acier.

Cette phase s'achève à l'apparition de la fissure diagonale due à l'effort tranchant. La plaque composite reprend donc tous les efforts.

- **Domaine de reprise de la force après la fissure diagonale (III).**

Après le renforcement, la console devient plus rigide. La rupture de nos consoles est due à la fissure diagonale. La fissure diagonale s'ouvre progressivement suivant l'augmentation de la charge.

La Figure 3-78 présente globalement les différents domaines de fissuration.

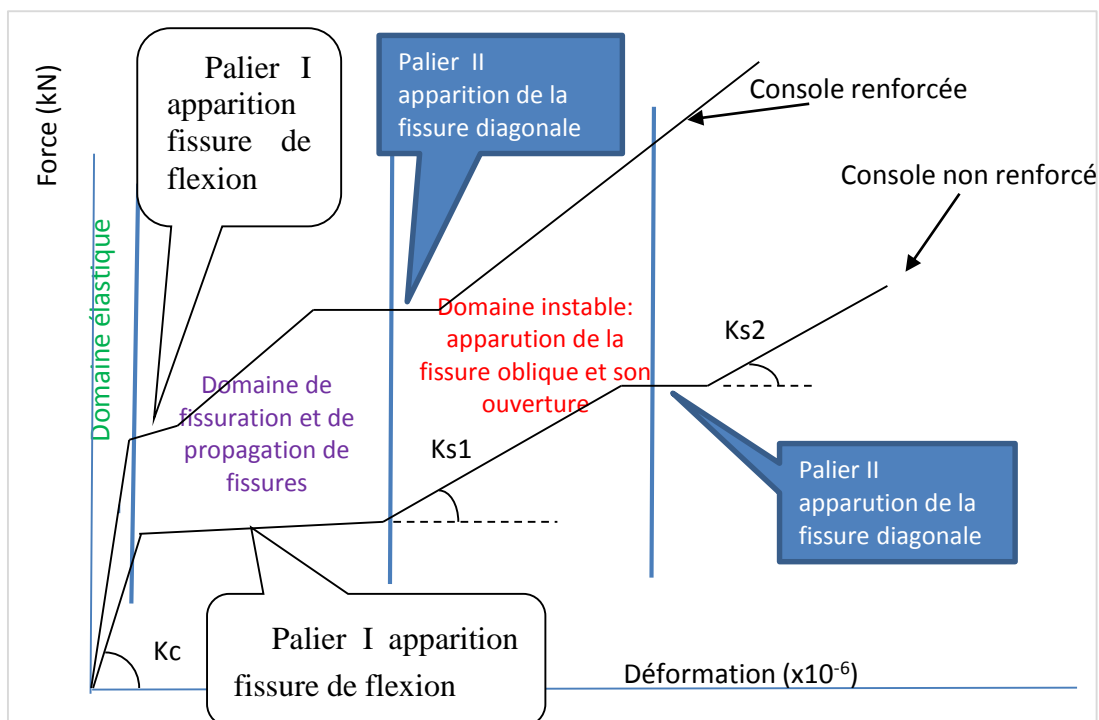


Figure 3-78 : Différentes phases du comportement mécanique d'acier des consoles courtes non renforcée et console courte renforcée.

La Figure 3-79, nous montre comment le matériau composite reprend les efforts et se déforme plus tandis que l'acier lui se déforme moins.

- 1) Le renforcement par les matériaux composites permet d'augmenter considérablement la résistance et améliorer le comportement mécanique des consoles courtes étudiées. La résistance ultime de la console peut être le double avec le renforcement par collage du tissu

composite en fibres de carbone. Après le renforcement, la console renforcée devient plus rigide. Cependant, la valeur de la déformation de la plaque en fibres de carbone peut atteindre 1200 $\mu\text{m}/\text{m}$.

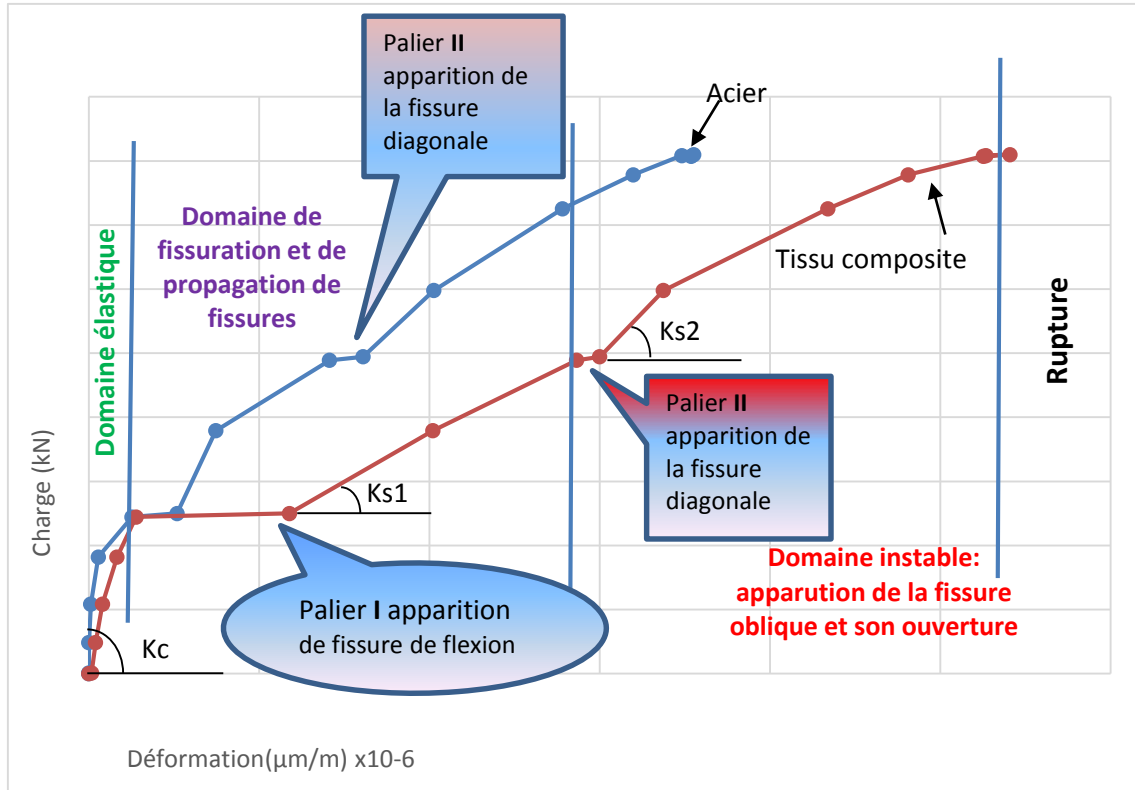


Figure 3-79 : Différentes phases du comportement mécanique d'acier et matériau composite de la console courte renforcée

Console	Kc	Ks1	Ks2
C0	0,84	0,1	0,18
CP1u	0,98	0,17	0,16
CP3u	1,40	0,36	0,23
CPC	1,62	0,13	0,30
CB1u	0,64	0,06	0,07
CB2u	1,54	0,3	0,23
CB3u	4,3	0,33	0,24
CB5u	1,81	0,28	0,29
CB2b	0,44	0,08	0,05
CB3u(5cm)	0,95	0,1	0,14
CU+3u	1,05	0,18	0,09
CU3u	0,23	0,05	0,06
CI2b	0,5	0,05	0,06
CIU2b	2,5	0,09	0,13
CI2b+B3u(5cm)	0,67	0,12	0,14
CIU2b+B3u(5cm)	2,06	0,11	0,14

Tableau 3-14 : La rigidité, de la console courte renforcée en fonction de différents types de renforcement

-
- 2) Dans le cas du renforcement par de tissus en fibres de carbone sur les deux faces de la console, l'épaisseur optimale du renforcement est de 2 couches pour avoir 55% de plus de la résistance.
 - 3) Dans le cas du renforcement par bandage, la contribution des tissus en fibres de carbone à la résistance la plus élevée est de trois couches. L'augmentation de la résistance ultime est de 82%. Après cette épaisseur, la résistance n'augmente plus.
 - 4) Le renforcement par bandage de tissus en fibres de carbone permet de mettre en évidence l'effet de confinement du béton.
 - 5) Les résultats expérimentaux montrent également que le renforcement par trois plaques composites d'une hauteur de 5cm est assez efficace en raison de son effet positif sur la résistance au cisaillement.
 - 6) Le renforcement par les plaques composites en fibres de carbone permet également d'augmenter de façon significative la rigidité de la console courte en béton armé.
 - 7) Les principaux types de ruptures de consoles courtes renforcées peuvent être résumés en plusieurs modes (Tableau 3-15) de rupture : la rupture de la plaque composite, la rupture par fendage, la rupture par décollement partielle de la plaque à l'extrémité de la console, la rupture par compression, la rupture par cisaillement, la rupture par cisaillement-fendage et la rupture par compression - fendage.



Figure 3-80: Rupture du matériau composite



Figure 3-81: Rupture par fendage et décollement à l'extrémité de la plaque



Figure 3-82: Rupture par compression



Figure 3-83: Rupture par cisaillement



Figure 3-84: Rupture par compression + fendage + décollement de l'extrémité de la plaque



Figure 3-85: Rupture par fendage diagonal

Tableau 3-15 : Les principaux types de ruptures



4^{ème} Chapitre

ÉTUDE ANALYTIQUE DES CONSOLES COURTES EN BÉTON ARME RENFORCÉES

Chapitre 4 Étude analytique des consoles courtes en béton armé renforcées

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude analytique des consoles courtes renforcées afin d'estimer la charge ultime des consoles renforcées et de simuler le comportement mécanique des consoles courtes renforcées. Avant de proposer un modèle, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Les sections planes restent planes après déformation (hypothèse de Navier -Bernoulli). La distribution des déformations dans la section d'encastrement est donc linéaire.
- La section d'encastrement est soumise principalement aux contraintes de traction dues au moment fléchissant. On néglige l'effet de l'effort tranchant.
- Le principe de Saint-Venant est vérifié tant que la zone sous la plaque d'appui n'est pas trop dégradée. Nous discuterons la limite de validité de cette hypothèse lors de la confrontation avec l'expérience.
- Le matériau béton est élastique endommageable dans les parties tendues et comprimées.
- Le comportement de l'acier est considéré comme élasto-plastique parfait.
- le matériau composite est élastique jusqu'à la rupture.

4.2 MODÈLES ANALYTIQUES

4.2.1 Console courte en béton armé non renforcée

Plusieurs modèles analytiques ont été présentés dans le chapitre 1. Nous appliquons deux modèles à nos consoles courtes et analysons la pertinence de ces modèles à nos structures.

La Figure 1-1 donne les dimensions de notre console courte. La section de la colonne est de 150x300mm avec une hauteur totale de 1000 mm et la section d'une console 150x250mm.

Robinson considère que la rupture de la console courte se produit lorsque les armatures du tirant atteignent leur limite élastique conventionnelle, f_y . D'où l'expression de la charge ultime théorique proposée est de la forme suivante:

$$F_{u,th} = (1 + X_c) \frac{7d}{8a} A_s f_y \quad (4-1)$$

avec :

$$X_c = \left(\frac{8}{7d} \right)^2 \frac{A_h}{A_s} \sum_i y_i^2 \quad (4-2)$$

où a est la distance de la section au point d'application de la force,

f_y = contrainte à la limite élastique de l'acier.

A_h = aire de la section des cadres horizontaux en acier.

y_i : position de l'axe de la barre i .

La quantité X_c représente, pour une section du tirant (A_s) et une hauteur (d) constantes, l'influence de la répartition des cadres horizontaux et de leur section sur la charge de rupture ultime.

La contrainte de cisaillement conventionnelle ultime $\tau_{u,th}$ peut être estimée par :

$$\tau_{u,th} = \frac{F_{u,th}}{bd} = (1 + X_c) \frac{7}{8} \frac{1}{\lambda} \rho_s f_y \quad (4-3)$$

avec le taux d'acier:

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd} \quad (4-4)$$

Ce modèle est utilisable lorsque les conditions suivantes sont satisfaisantes:

$$0,0036 \leq \rho_s \leq 0,0144 ; \quad \sum A_h \geq \left[\sup\left(0,88; 0,44 \frac{d}{a}\right) \right] A_s \quad (4-5)$$

Dans notre cas, la valeur de ρ_s est de $0,0043$ et $\sum A_h / A_s = 0,36$. Ces deux valeurs sont satisfaites aux conditions nécessaires du modèle.

4.2.1.2 *Modèle de NIEDENHOFF*

Niedenhoff suggère de modéliser le mécanisme de fonctionnement d'une console courte en béton armé par un système triangulé comprenant un tirant horizontal constitué par des armatures supérieures tendues et une bielle inclinée de béton comprimé.

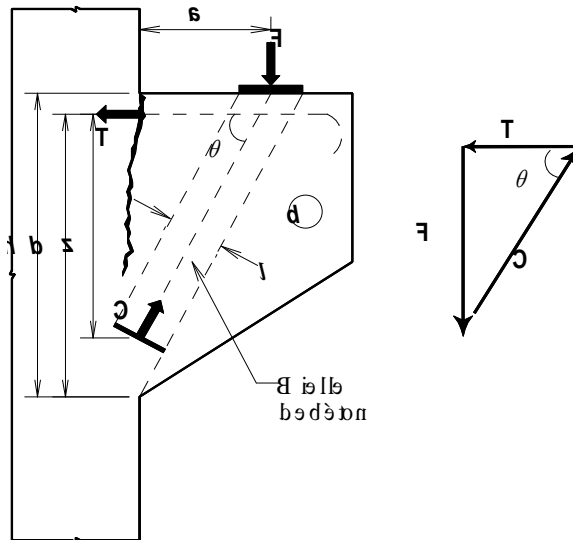


Figure 4-3 : Mécanisme de fonctionnement d'une console courte en béton armé [NIE 61]

Selon Niedenhoff, la zone de la section la plus sollicitée en compression est caractérisée par une bielle de béton comprimé. La base est située dans la zone de concentration des contraintes en compression.

La résolution de ce système permet de trouver les inconnues F_u et k_z qui dépendent de l'état de contrainte dans le tirant et dans la bielle de béton :

$$F_u = (\sqrt{(\lambda x)^2 + 2\rho_s x - \rho_s^2} - \lambda x) b d f_y \quad (4-6)$$

Avec $x = \frac{f_c}{f_y}$; $\lambda = a/d$

Cette méthode est applicable lorsque :

$$0,0048 \leq \rho_s \leq 0,0123$$

$$\sum A_h \geq \frac{1}{3} A_s.$$

Dans notre cas, la valeur de ρ_s est de 0,0043 et $\sum A_h / A_s = 0,36$ qui est supérieure à 1/3.

Ces deux valeurs sont satisfaites aux conditions nécessaires du modèle.

1.2.2.3 Comparaison des charges ultimes obtenues par les essais et les modèles analytiques de Robinson et de Niedenhoff

Le tableau suivant donne la comparaison des valeurs obtenues par des modèles analytiques et des essais expérimentaux.

Tableau 4-1 : Comparaison de la charge ultime obtenue analytiquement et expérimentalement.

Modèle	a (mm)	b (mm)	d (mm)	As (mm ²)	Ah (mm ²)	yi (mm)	F _u (kN)	F _u /F _t
Robinson	150	150	335	157	56,6	225	357,1	1
Niedenhoff	150	150	335	213,6	----	----	386,9	1,08
Test							357	1

Les deux modèles utilisés sont pertinentes pour estimer la force ultime d'une console courte non renforcée. La formule proposée par Robinson donne une estimation exacte par rapport à la valeur obtenue par l'essai. Cependant, il faut souligner que la contrainte en compression du béton ne peut pas être trop élevée en comparaison avec la valeur de 30 MPa. La modèle de Niedenhoff nous donne une estimation de 386,9kN. Cette valeur est de 8% de plus par rapport à la valeur expérimentale. Cette différence est bien acceptable.

4.2.2 Console courte en béton armé renforcée

Pour estimer la contribution des matériaux composites à la résistance de la console courte renforcée, nous proposons d'utiliser la formule suivante :

$$V_f = E_f \varepsilon_{fe} h_f l_f c_f \sin \alpha \quad (4-7)$$

Où :

α = l'angle des fibres par rapport à la direction longitudinale ;

E_f = module d'élasticité de tissus en fibres de carbone ;

$$\rho_f = \frac{4t_f L_f}{b d} \quad (4-8)$$

Dans le cas du renforcement sur deux faces de la console :

$$\varepsilon_{fe} = 0,18 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,3} \times \varepsilon_{fu} \quad (4-9)$$

Dans le cas du renforcement par bandage:

$$\varepsilon_{fe} = 0,14 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_f \rho_f} \right)^{0,3} \times \varepsilon_{fu} \quad (4-10)$$

ε_{fu} est la déformation ultime de tissus en fibres de carbone d'une couche.

c_f est un coefficient d'épaisseur du renforcement qui est déterminé par :

Pour une couche : $c_f = c_{f1} = 1$; (4-11)

Pour deux couches : $c_{f2} = (1,12)^{(t_{f2}/t_{f1}-1)}$; (4-12)

Pour trois couches : $c_{f3} = (1,12)^{(t_{f3}/t_{f1}-1)}$ $c_{f3} = 1,12^{\frac{(t_{f3}-1)}{t_{f1}}}$ (4-13)

Dans cette expression, le nombre de couches ne peut pas dépasser trois.

h_f = hauteur du renforcement ;

l_f = longueur efficace du renforcement, dans notre cas, $l_f = a$.

L_f = longueur totale du renforcement ;

f_c = contrainte en compression du béton ;

t_{f1} = épaisseur du renforcement d'une couche ;

t_{f2} = épaisseur du renforcement de deux couches ;

t_{f3} = épaisseur du renforcement de trois couches ;

Dans le tableau suivant, on montre les valeurs estimées par la formule proposée et les valeurs obtenues expérimentalement.

Console	t_f (mm)	V_{fu-e} (essais) (kN)	V_{fu-c} (calcul) (kN)	V_{fu-c} / V_{fu-e}
CP1u	1,2	175	171,9	0,98
CP2u	2,4	195	189,1	0,97
CB1u	1,2	131	133,7	1,02
CB2u	2,4	151	149,8	0,99
CB3u	3,6	294	316,9	1,08

Tableau 4-2 : Comparaison de la charge ultime obtenue par la théorie et le test pour les consoles renforcées

On peut constater que les valeurs estimées par la formule proposée sont satisfaisantes par rapport aux valeurs obtenues par les essais expérimentaux. L'écart maximal entre les deux méthodes n'est que de 8%. Cependant, le modèle proposé est acceptable et peut être applicable

pour tous les types de renforcement. Bien évidemment les travaux supplémentaires sont nécessaires.

4.3 DIFFÉRENTES ÉTAPES DU CALCUL

On raisonne au niveau de la section d'encastrement et on détermine les éléments de réduction du torseur des contraintes généralisées pour un chargement donné.

Le calcul se fait en trois étapes (Figure 4-4) :

- 1- Au début du chargement, les endommagements dans les parties tendues et comprimées D_t et D_c sont nuls. Toutes les fibres tendues et comprimées ont un comportement élastique linéaire.
- 2- Puis, l'endommagement commence dans la fibre la plus tendue et progresse vers l'axe neutre de la section d'encastrement. La position y_{do} , correspondant à la déformation ε_{do} , sépare la partie tendue en une zone endommagée et l'autre saine (Figure 4-4).
- 3- Ensuite l'endommagement apparaît aussi dans la fibre la plus comprimée et progresse vers l'axe neutre de la section d'encastrement. De la même manière, la position y_{dc} correspondant à la déformation ε_{dco} sépare la partie comprimée en une zone endommagée et l'autre saine.

4.4 RÉOLUTION DU PROBLÈME

On résout le problème dans le cas où les déformations dans le tirant et dans la fibre du béton la plus comprimée (ε_{st} et ε_{bc}) vérifient :

$$\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_e \quad (4-14)$$

$$\varepsilon_{bc} \leq \varepsilon_{pic} \quad (4-15)$$

avec :

ε_e : limite élastique des armatures ;

ε_{pic} : la déformation correspondant au pic de contraintes du comportement en compression.

L'inéquation (4-15) est justifiée par le fait que lorsque le tirant atteint sa limite élastique, la console courte continue éventuellement à encaisser des efforts ; mais l'ouverture de la fissure à l'encastrement est tellement importante que l'on peut considérer la rupture comme atteinte. De plus, si les armatures ont un comportement élasto-plastique parfait, et que le matériau

composite un comportement élastique, on peut considérer que lorsque le tirant atteint sa limite élastique, la rupture se produit à charge constante. Ceci permet, tout en évitant un calcul trop complexe dans le domaine plastique des armatures, de déterminer la charge de rupture avec une bonne précision.

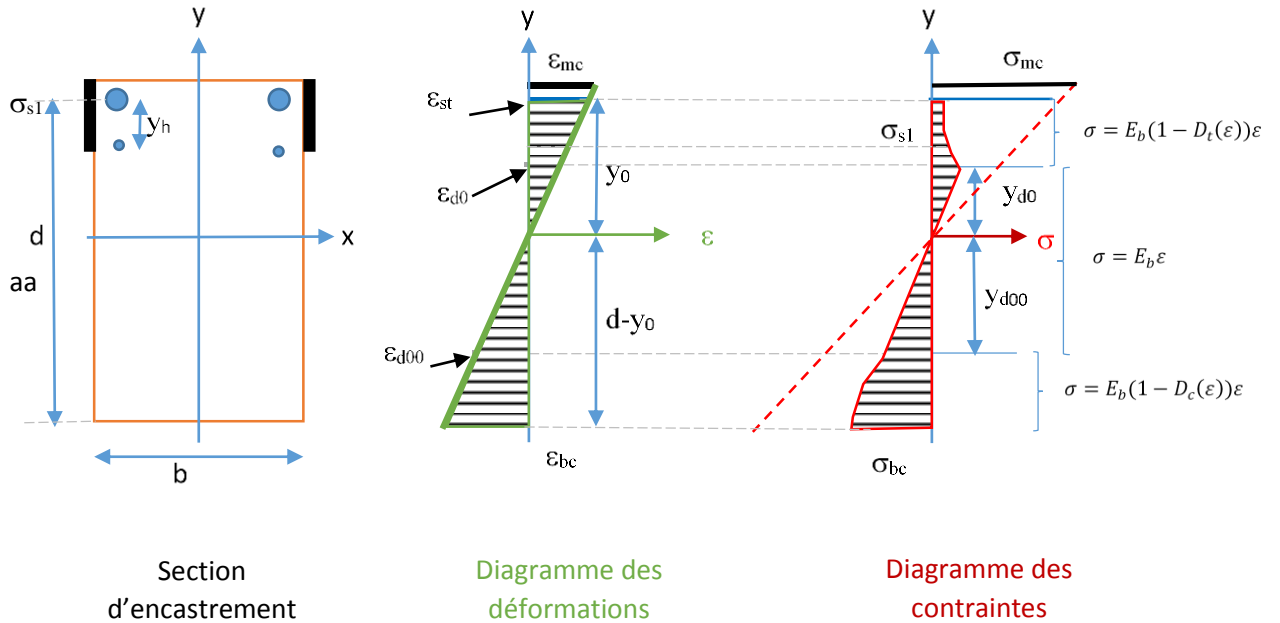


Figure 4-4 : Diagrammes des déformations et des contraintes dans la section d'encastrement

La linéarité des déformations de la section d'encastrement nous permet d'exprimer la déformation en un point quelconque de la section d'encastrement en fonction de sa position par rapport à l'axe neutre (y), de la déformation du tirant (ε_{st}), la déformation du matériau composite (ε_{mc}) et de la position de l'axe neutre (y_0) :

$$\varepsilon(y) = \frac{\varepsilon_{st} + \varepsilon_{mc}}{2y_0} y \quad (4-16)$$

Pour une déformation du tirant ε_{st} ou du matériau composite fixée, exprimons que la résultante du torseur des contraintes généralisées est nulle :

$$A_{mc} \sigma_{mc} + A_s \sigma_{st} + \sum_{i=1}^2 A_h \sigma_{si} + \int_{-(d-y_0)}^{y_0} b \sigma(\varepsilon) dy = 0 \quad (4-17)$$

La contrainte dans un cadre (i) situé à la position (y_i) par rapport à l'axe neutre est :

$$\sigma_{si} = \frac{E_s \varepsilon_{st}}{y_0} y_i \quad (4-18)$$

$$\sigma_{mc} = E_{mc} \varepsilon_{mc} \quad (4-19)$$

$$\text{donc : } \sum_{i=1}^2 A_h \sigma_{si} = \frac{A_h E_s \varepsilon_{st}}{y_0} \sum_i y_i \quad (4-20)$$

$$\text{or : } y_1 = y_0 - s_h \quad (4-21)$$

$$y_2 = y_0 - 2s_h$$

$$y_1 + y_2 = 2y_0 - 3s_h \quad (4-22)$$

$$\text{d'où : } 2A_h \sigma_{s1} = \frac{A_h E_s \varepsilon_{st}}{y_0} [2y_0 - 3s_h] \quad (4-23)$$

L'expression (4-17) devient :

$$A_{mc} E_{mc} \varepsilon_{mc} + S_1(y_0) \varepsilon_{st} + b y_0 \int_{-(d-y_0)}^{y_0} [1 - D(\varepsilon)] \varepsilon dy = 0 \quad (4-24)$$

avec :

$$S_1(y_0) = n[A_{sh} y_0 - 3A_h s_h] \quad (4-25)$$

et $A_{sh} = A_s + 2A_h$ représente la section totale du tirant et des cadres.

$n = \frac{E_s}{E_b}$ est le coefficient d'équivalence entre l'acier et le béton.

Exprimons que le moment résultant du torseur des contraintes généralisées est égal au moment fléchissant :

$$A_{mc} \sigma_{mc} y_i + A_s \sigma_{st} y_0 + \sum_{i=1}^2 A_h \sigma_{si} y_i + \int_{-(d-y_0)}^{y_0} b \sigma(\varepsilon) y dy = M \quad (4-26)$$

avec :

$$M = aF$$

En tenant compte des équations (4-19), on obtient :

$$\sum_{i=1}^2 A_h \sigma_{si} y_i = \frac{A_h E_s \varepsilon_{st}}{y_0} \sum_i (y_0 - i s_h)^2$$

$$\text{Or } \sum_{i=1}^2 (y_0 - i s_h)^2 = 2y_0^2 - 6s_h y_0 + 5s_h^2;$$

$$\text{D'où : } \sum_{i=1}^2 A_h \sigma_{si} y_i = \frac{A_h E_s \varepsilon_{st}}{y_0} [2y_0^2 - 6s_h y_0 + 5s_h^2]$$

L'expression (4-26) devient :

$$F = A_{mc} \frac{E_{mc} y_0}{b} \varepsilon_{mc} + \frac{E_b}{a y_0} S_2(y_0) \varepsilon_{st} + \frac{b E_b}{a} \int_{-(d-y_0)}^{y_0} [1 - D(\varepsilon)] \varepsilon dy \quad (4-27)$$

avec : b : largeur de la console courte

$$S_1(y_0) = n[A_{sh}y_0 - 3A_h s_h] + A_{mc} y_0 \quad (4-28)$$

$$S_2(y_0) = nA_{sh}y_0^2 + 6nA_h[\frac{5}{6}s_h^2 - y_0 s_h] + A_{mc} y_0^2 \quad (4-29)$$

La solution du problème posé revient donc à déterminer les inconnues y_0 et F du système d'équations constitué par les équations (4.27) et (4.24);

Avec : $D(\varepsilon) = D_t(\varepsilon) + D_c(\varepsilon)$

$$D_t(\varepsilon) = \begin{cases} 0 & \text{si } \varepsilon \leq \varepsilon_{d0} \\ 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1-A_t)}{\varepsilon} - \frac{A_t}{\exp(B_t(\varepsilon - \varepsilon_{d0}))} & \text{si } \varepsilon \geq \varepsilon_{d0} \end{cases} \quad (4-30)$$

$$D_c(\varepsilon) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \geq \varepsilon \geq -\varepsilon_{dc0} \\ 1 + \frac{\varepsilon_{dc0}(1-A_c)}{\varepsilon} - \frac{A_c}{\exp[-B_c v\sqrt{2}(\varepsilon + \varepsilon_{dc0})]} & \text{si } \varepsilon \leq -\varepsilon_{dc0} \end{cases} \quad (4-31)$$

$$\varepsilon_{dc0} = \frac{\varepsilon_{d0}}{v\sqrt{2}} \quad (4-32)$$

4.5 SOLUTION DU MODÈLE DE RÉFÉRENCE

On résout le problème de la manière suivante :

- On détermine la position de l'axe neutre y_0 par l'équation (4-27) en fonction de la déformation du tirant.

- Puis on reporte ce résultat dans l'équation (4-29) pour déterminer la charge appliquée correspondant à cette déformation.

4.5.1 Phase linéaire élastique

Les endommagements dans les parties tendues et comprimées sont nuls.

Dans ce cas : $-\varepsilon_{dc0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{d0}$ pour tout $-(d - y_0) \leq y \leq y_0$

entraîne : $\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{d0}$ et $\varepsilon_{bc} \geq -\varepsilon_{dc0}$

avec : $\varepsilon_{bc} = \frac{-(d - y_0)}{y_0} \varepsilon_{st}$

Et la résolution du système d'équation est aisée. On trouve une forme analytique des expressions de l'axe neutre et de la charge appliquée :

$$y_0 = \frac{bd^2 + 6ns_h A_h}{2(bd + nA_{sh})} \quad (4-33)$$

$$F = \frac{E_b}{ay_0} \left\{ S_2(y_0) + \frac{b}{3} [y_0^3 + (d - y_0)^3] \right\} \varepsilon_{st} \quad (4-34)$$

Dans cette phase, l'expression (4-33) montre que la position de l'axe neutre (y_0) est indépendante de la déformation du tirant et du matériau composite et l'expression (4-34) montre que F est bien proportionnel à la déformation du tirant.

4.5.2 Phase d'endommagement de la partie tendue

L'endommagement commence à évoluer dans la partie tendue de la section d'encastrement lorsque ε_{st} devient supérieure à ε_{d0} . Dans cette partie l'endommagement s'amorce dans la fibre supérieure (la plus tendue) et se propage vers la fibre neutre. La partie comprimée reste saine jusqu'à ce que la déformation de la fibre du béton la plus comprimée ε_{bc} atteinte ($-\varepsilon_{dc0}$). Dans ce cas :

$$\begin{cases} \varepsilon \geq \varepsilon_{d0} & \text{pour tout } y_{d0} \leq y \leq y_0 \\ -\varepsilon_{dc0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{d0} & \text{pour tout } -(d - y_0) \leq y \leq y_{d0} \\ y_{d0} = \varepsilon_{d0} y_0 / \varepsilon_{st} \end{cases}$$

Ce qui entraîne : $\varepsilon_{st} \geq \varepsilon_{d0}$ et $\varepsilon_{bc} \geq -\varepsilon_{dc0}$

L'équation de l'axe neutre devient :

$$S_1(y_0) + \frac{b}{2} [\varepsilon_{d0}^2 (1 + 2\chi_{dt}) \left(\frac{y_0}{\varepsilon_{st}}\right)^2 - (d - y_0)^2] = 0 \quad (4-35)$$

avec :

$$\chi_{dt}(\varepsilon_{st}) = (1 - A_t) \left(\frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{d0}} - 1\right) + A_t a_t \left\{ 1 + a_t - \left(\frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{d0}} + a_t\right) \exp\left(\frac{1}{a_t} \left(1 - \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{d0}}\right)\right) \right\}$$

$$a_t = \frac{1}{B_t \varepsilon_{d0}}$$

et l'expression de la charge appliquée (4-35) devient :

$$F = \frac{E_b}{ay_0} \left\{ S_2(y_0) + \frac{b}{3} [\varepsilon_{d0}^3 (1 + 3\xi_{dt}(\varepsilon_{st})) \left(\frac{y_0}{\varepsilon_{st}}\right)^3 + (d - y_0)^3] \right\} \varepsilon_{st} \quad (4-36)$$

avec :

$$\xi_{dt}(\varepsilon_{st}) = \frac{1}{2} (1 - A_t) \left(\frac{\varepsilon_{st}^2}{\varepsilon_{d0}^2} - 1\right) + A_t a_t \left\{ 1 + 2a_t (1 + a_t) - \left[\frac{\varepsilon_{st}^2}{\varepsilon_{d0}^2} + 2a_t \left(\frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{d0}} + a_t\right)\right] \exp\left[\frac{1}{a_t} \left(1 - \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{d0}}\right)\right] \right\}$$

Pour une déformation donnée ε_{st} , ou ε_{mc} , la relation (4-35) est une équation du second degré à une seule inconnue y_0 . La position de l'axe neutre dépend donc de ε_{st} ou de ε_{mc} ce qui signifie que l'évolution de l'endommagement modifie la position de l'axe neutre.

Pour une déformation du tirant donnée ε_{st} , on calcule y_0 et on l'injecte dans l'expression (4-36) pour calculer la charge appliquée correspondante.

4.5.3 Phase d'endommagement des parties tendue et comprimée

L'endommagement continue à évoluer dans la partie tendue. À partir d'une déformation du tirant qui entraîne une déformation ε_{bc} de la fibre la plus comprimée inférieure à $(-\varepsilon_{dc0})$, l'endommagement commence aussi à évoluer dans la partie comprimée de la section d'encastrement.

Dans cette partie l'endommagement s'amorce dans la fibre inférieure (la plus comprimée) et se propage vers la fibre neutre.

Dans ce cas :

$$\begin{cases} \varepsilon \geq \varepsilon_{d0} & \text{pour tout} & y_{d0} \leq y \leq y_0 \\ -\varepsilon_{dc0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{d0} & \text{pour tout} & -y_{dc0} \leq y \leq y_{d0} \\ \varepsilon \leq -\varepsilon_{dc0} & \text{pour tout} & -(d - y_0) \leq y \leq y_{dc0} \\ y_{d0} = \varepsilon_{d0} y_0 / \varepsilon_{st} \\ y_{dc0} = \varepsilon_{dc0} y_0 / \varepsilon_{st} \end{cases}$$

entraîne : $\varepsilon_{st} \geq \varepsilon_{d0}$ et $\varepsilon_{bc} \leq -\varepsilon_{dc0}$

L'équation de l'axe neutre devient :

$$S_1(y_0) + \frac{b}{2} \left[\varepsilon_{d0}^2 (1 + 2\chi_{dt}) \left(\frac{y_0}{\varepsilon_{st}} \right)^2 - \varepsilon_{dc0}^2 (1 + 2\chi_{dc}) \left(\frac{y_{dc0}}{\varepsilon_{st}} \right)^2 \right] = 0 \quad (4-37)$$

avec : $\chi_{dc}(\varepsilon_{st}) = -(1 - A_c) \left(1 + \frac{\varepsilon_{bc}}{\varepsilon_{dc0}} \right) + A_c a_c \left\{ 1 + a_c + \left(\frac{\varepsilon_{bc}}{\varepsilon_{dc0}} - a_c \right) \exp \left(\frac{1}{a_c} \left(1 + \frac{\varepsilon_{bc}}{\varepsilon_{dc0}} \right) \right) \right\}$

$$a_c = \frac{1}{B_c \varepsilon_{d0}}$$

$$\varepsilon_{bc} = \frac{-(d - y_0)}{y_0} \varepsilon_{st} \quad \text{où} \quad \varepsilon_{bc} = \frac{-(b - y_0)}{y_0} \varepsilon_p$$

L'expression de la charge appliquée devient :

$$F = \frac{E_b}{a y_0} \left\{ S_2(y_0) + \frac{b}{3} \left[\varepsilon_{d0}^3 (1 + 3\xi_{dt}) \left(\frac{y_0}{\varepsilon_{st}} \right)^3 + \varepsilon_{dc0}^3 (1 + 3\xi_{dc}) \left(\frac{y_{dc0}}{\varepsilon_{st}} \right)^3 \right] \right\} \varepsilon_{st} \quad (4-38)$$

avec :

$$\xi_{dc}(\varepsilon_{st}) = \frac{1}{2}(1 - A_c) \left(\frac{\varepsilon_{bc}^2}{\varepsilon_{dc0}^2} - 1 \right) + A_c a_c \left\{ 1 + 2a_c(1 + a_c) - \left[\frac{\varepsilon_{bc}^2}{\varepsilon_{dc0}^2} + 2a_c \left(a_c - \frac{\varepsilon_{bc}}{\varepsilon_{dc0}} \right) \right] \exp \left[\frac{1}{a_c} \left(1 + \frac{\varepsilon_{bc}}{\varepsilon_{dc0}} \right) \right] \right\}$$

$$\text{et } \varepsilon_{bc} = \frac{-(d - y_0)}{y_0} \varepsilon_{st}.$$

L'équation (4-37) montre que y_0 est une fonction implicite qui dépend de ε_{st} . Pour la résoudre, on se donne une déformation ε_{st} et on détermine numériquement la position de l'axe neutre qui lui correspond. Ensuite, on injecte y_0 dans l'expression (4-38) pour calculer la charge appliquée correspondante à cette déformation.

4.5.4 Organigramme de la résolution numérique du problème

Pour un chargement monotone croissant, la déformation dans le tirant est aussi croissante. Nous résolvons donc le problème en augmentant la déformation du tirant (ε_{st}) à partir de zéro jusqu'à sa limite élastique (ε_e). Pour chaque ε_{st} , on calcule la position de l'axe neutre (y_0) puis on déduit la charge appliquée. Mais pour un ε_{st} donné, il faut savoir dans quelle phase on doit effectuer le calcul : il faut comparer ε_{st} avec ε_{d0} et ε_{bc} avec ε_{dc0} . La comparaison de ε_{st} avec ε_{d0} est évidente car ε_{st} est donné par contre la comparaison de ε_{bc} avec ε_{dc0} avant d'effectuer le calcul est impossible car ε_{bc} dépend de y_0 . Mais comme la succession des phases considérées se fait naturellement dans l'ordre suivant :

- Phase 1 : élastique linéaire,
- Phase 2 : endommagement de la partie tendue,
- Phase 3 : endommagement des parties tendue et comprimée.

La figure 4-5 montre l'algorithme utilisé.

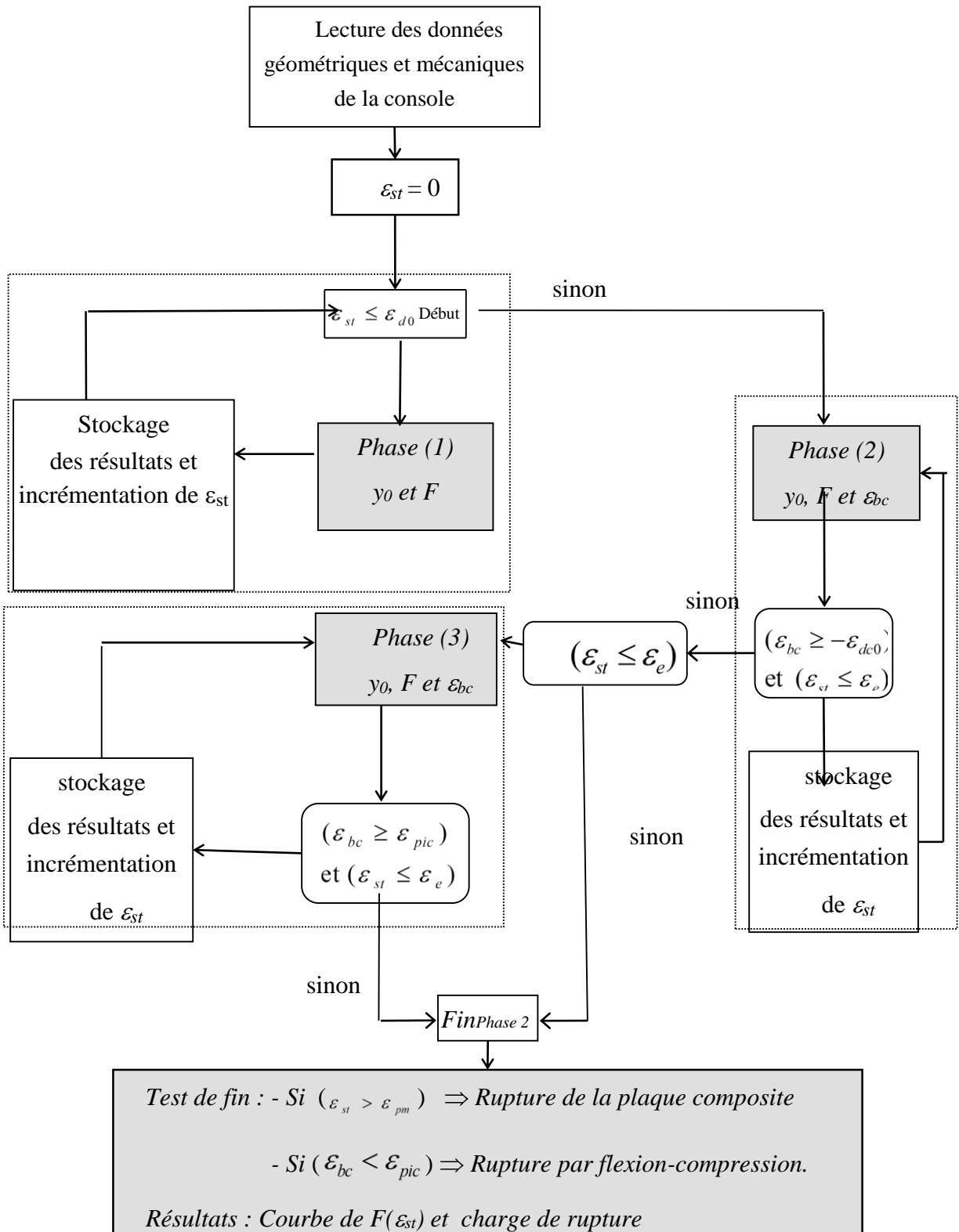


Figure 4-5: Organigramme de calcul de la charge appliquée en fonction de la déformation du tirant : Calcul de la charge de rupture

4.6 COMPARAISON COURBES EXPÉRIMENTALES ET THÉORIQUES

Les résultats théoriques sont relativement satisfaisants. Un recalage des résultats théoriques sont nécessaires et aussi de tenir compte de l'effet de bandage.

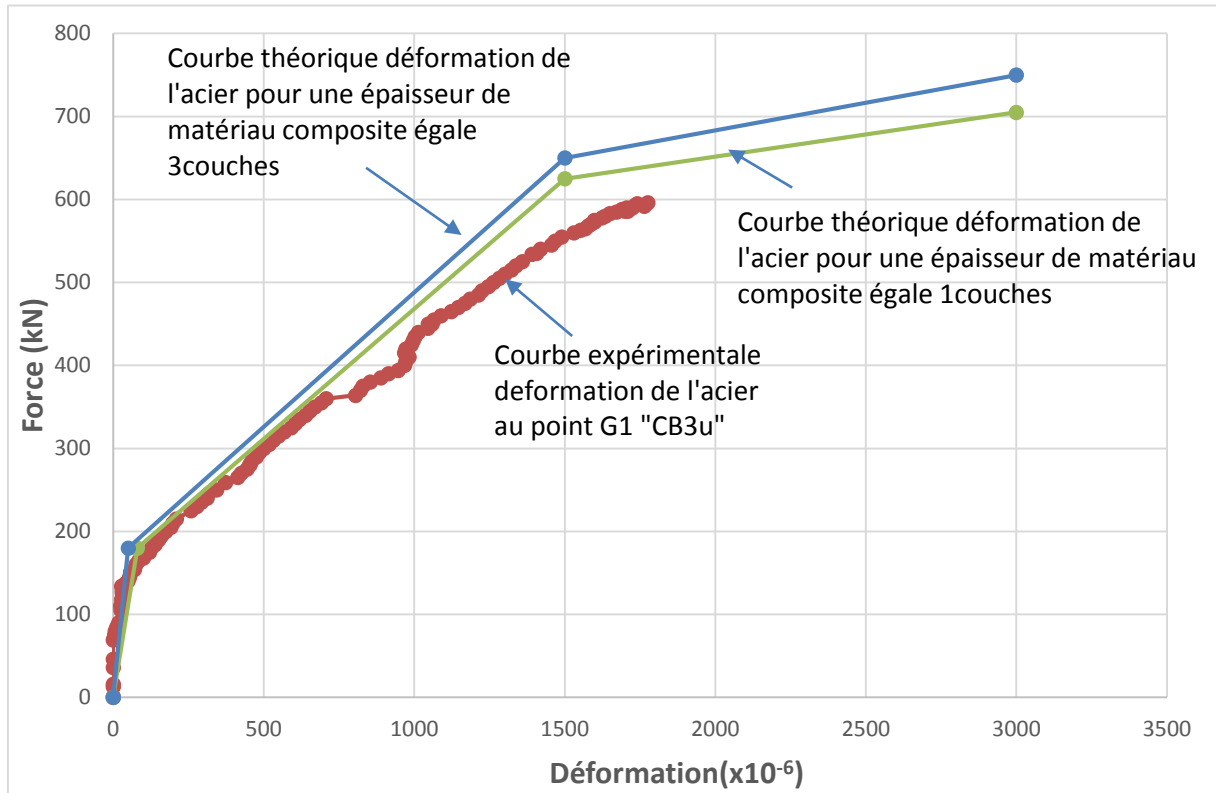


Figure 4-6: Comparaison courbes théorique et expérimentale

4.7 CONCLUSION DU CHAPITRE 4

Nous avons proposé un modèle du comportement en flexion de la section d'encastrement d'une console courte en béton armé. Dans ce modèle, nous avons considéré qu'au voisinage de la section d'encastrement, les sections planes restent planes après déformation et nous avons négligé l'effet de l'effort tranchant. Nous avons mis en équation l'équilibre de la section d'encastrement en utilisant la théorie générale des poutres fléchies.

Le modèle proposé, par le fait qu'il tient compte de l'endommagement du béton, a permis de montrer l'influence de la charge appliquée sur l'évolution et la propagation de l'endommagement à la section d'encastrement. De plus il permet de décrire les trois phases du comportement du tirant à l'encastrement.

Les différentes comparaisons que nous avons effectuées avec l'expérience montrent le comportement globale d'une console renforcée mais présentent encore des valeurs élevées et nécessite une bonne identification des 6 paramètres nécessaires dans le traçage des courbes force-déformations. En revanche, les résultats montrent l'intérêt de l'utiliser pour dimensionner les consoles courtes en béton armé avec ou sans armatures réparties.

Une limitation du modèle proposé provient du fait qu'il prévoit la charge de rupture par la plastification du tirant, alors que la rupture peut se produire par cisaillement à la diagonale de la console à une charge inférieure à celle qui plastifie le tirant. Il faut donc calculer la charge de la rupture éventuelle suivant la diagonale de la console, par la méthode qui fera l'objet de perspectives d'amélioration de ce modèle.

5^{ème} Chapitre

ÉTUDE DE FATIGUE DES CONSOLES COURTES EN BÉTON ARME RENFORCÉES

Chapitre 5 Étude de fatigue

5.1 INTRODUCTION

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure [NOR 93].

La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte qui peut être bien inférieure à la limite élastique du matériau. Les étapes principales de la fatigue sont :

- l'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau),
- la propagation de fissures et la rupture finale.

En effet, cette partie de notre travail porte sur le comportement de notre modèle c'est-à-dire une console courte en béton armé renforcée par collage de tissus composites en fibres de carbone sous chargements répétés jusqu'à un million de cycles.

Le présent chapitre se propose, d'une part de préciser les différentes approches expérimentales utilisées pour estimer la durée de vie en service, d'autre part de déterminer l'influence des principaux paramètres expérimentaux.

5.2 PARAMÈTRES DE MESURE

Les paramètres souvent utilisés pour prédire le comportement en fatigue et ainsi le nombre de cycles à rupture d'une structure sont : l'amplitude de cette sollicitation (chargement ou déformation imposée), sa valeur moyenne, l'état de surface et le milieu dans lequel la structure sera utilisée.

L'estimation du comportement en fatigue des composants ou des structures en service est un problème qui nécessite une réponse pluridisciplinaire qui prend en compte le type de chargement cyclique qui correspond généralement à des sollicitations d'amplitudes variables [LEM, 88].

Différentes démarches peuvent être utilisées qui dépendent de la connaissance de la structure considérée, de celle des sollicitations en service et du type d'équipement disponible pour les essais.

5.2.1 Tenue à la fatigue

Sous l'action de charges répétées ou alternées, la rupture d'un matériau peut se produire sous des contraintes inférieures à la résistance du matériau en statique : c'est la rupture en fatigue. Cette rupture vient principalement de fissures microscopiques qui apparaissent dans le matériau

dès les premiers cycles de chargement et qui progressent doucement à chaque fois que l'on sollicite le matériau. Il existe de nombreuses courbes pour définir la durée de vie en fatigue d'un matériau. Ces courbes sont issues de campagnes d'essais et reflètent le comportement statistique du matériau, elles sont souvent tracées à 90% de probabilité de résistance.

On trace sur la courbe de Wohler ou courbe S.N. (Stress-Number of cycles) l'amplitude de la contrainte de cisaillement alternée en fonction du nombre de cycles à la rupture. La contrainte moyenne est nulle.

5.2.2 Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler qui représente les contraintes en fonction du nombre de cycles, est souvent utilisée pour estimer le degré d'endommagement lié à la fatigue des matériaux.

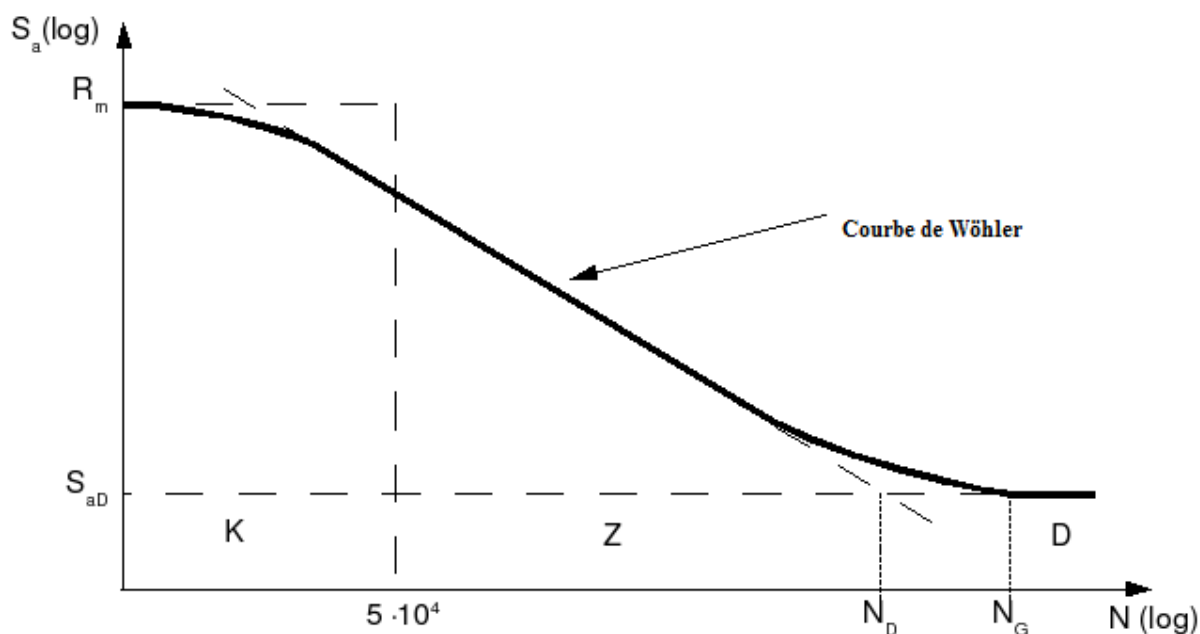


Figure 5-1 : La courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler est le plus ancien diagramme et le seul qui permette de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans le domaine de fatigue. Cette courbe définit une relation entre la contrainte appliquée σ (sigma parfois notée S) et le nombre de cycles à la rupture NR (en fait nombre de cycles pour lequel on observe $P\%$ de ruptures). En pratique, la courbe de Wöhler est généralement donnée pour une probabilité de rupture $P = 0,5$.

5.2.3 La règle de Miner

La règle de Miner considère que les dommages correspondants sont additifs, c'est ce qu'on appelle cumul linéaire. La rupture survient lorsque la somme des dommages relatifs à chaque amplitude atteint l'unité.

L'endommagement conventionnel au sens de Miner est défini par le rapport entre le nombre de cycles effectués pour un chargement périodique au nombre de cycles qui entraînera la rupture sous la même sollicitation.

5.3 NOTION D'ENDOMMAGEMENT. LOIS DE DOMMAGE

Dans l'industrie et le génie civil, pour estimer le degré d'endommagement lié à la fatigue des matériaux, on utilise souvent la courbe de Wöhler.

Pour la tracer, on réalise généralement des essais simples qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude de chargement constante S_a fluctuant autour d'une valeur moyenne fixée et à noter le nombre de cycles au bout duquel l'amorçage d'une fissure est observé, appelé ici nombre de cycles à rupture NR ; ceci est fait pour plusieurs valeurs de l'amplitude alternée S_a et de R ; le rapport de charge R est le rapport de la contrainte minimum à la contrainte maximum du cycle périodique.

Pour plus de commodité, ce nombre NR est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique, et l'amplitude de contrainte S_a est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire ou logarithmique pour plusieurs valeurs de R . $R=-1$ correspond à un cycle symétrique alterné, $R=0$ correspond à un cycle répété, $R>0$ correspond à des contraintes ondulés.

La décomposition du chargement (par la méthode de comptage rainflow) permet d'exprimer celui-ci en cycles simples caractérisés par une contrainte alternée S_a et un rapport de charge R . Ainsi, à chaque structure essayée, correspond donc un point du plan (NR, S_a) et à partir d'un certain nombre d'essais à contrainte généralement décroissante, on peut établir la courbe de Wöhler.

La caractérisation d'un matériau dans le domaine de la fatigue conventionnelle peut être faite par les courbes de Wöhler, en fonction du rapport de charge R , issues d'essais sur éprouvettes lisses. On peut aussi effectuer des essais sur éprouvettes entaillées pour valider les méthodes de calcul en fatigue des structures.

On définit généralement :

- la fatigue conventionnelle au-delà de 50 000 cycles, les courbes de Wöhler obtenues avec des essais de fatigue en effort imposé sont pertinentes.
- la fatigue oligocyclique en deçà de 50 000 cycles, domaine dans lequel il y a interaction entre deux modes de ruine, la fatigue et l'instabilité ductile.

La loi de Marco et Starkey [NOR 96] est également basée sur la fraction de vie, mais, par l'introduction d'un exposant $m(\sigma)$ fonction du niveau de contrainte, elle conduit à une évolution non linéaire du dommage

$$d = \left(\frac{n_i}{N_{ri}} \right)^{m(\sigma_i)} \quad (5-1)$$

Le dommage est ensuite cumulé linéairement:

$$D = \sum_i \left(\frac{n_i}{N_{ri}} \right)^{m(\sigma_i)} \quad (5-2)$$

La loi de Lemaitre-Chaboche pour laquelle ni l'évolution du dommage ni le cumul ne sont linéaires

L'incrément du dommage est, non seulement fonction de l'état contraint appliqué, mais aussi de l'état de dommage de la structure étudiée. Ceci permet de prendre en compte l'histoire du dommage et notamment l'ordre d'application des niveaux de contrainte.

Ainsi, sous une contrainte uniaxiale, l'incrément du dommage est de la forme

$$dD = F(\sigma_{\max}, \sigma_m, D) dn \quad (5-3)$$

5.4 INFLUENCE DE DIVERS PARAMÈTRES

Un grand nombre de paramètres sont susceptibles d'influencer les résultats des essais. Cette observation confirme la complexité de phénomènes d'endommagement par fatigue sous amplitude variable, dont la connaissance est encore très imparfaite.

En effet, ces phénomènes dépendent largement, d'une part de la réponse de la microstructure du matériau testé aux sollicitations mécaniques, d'autre part des domaines de fatigue concernés (part relative des phases d'amorçage ou de propagation des fissures, niveaux relatifs des sollicitations vis-à-vis du comportement élastique du matériau).

En conséquence, certains résultats de la littérature peuvent apparaître contradictoires si l'on ne considère que l'évolution d'un seul paramètre. Les essais de fatigue sous amplitude variable nécessitent, d'une part des efforts pour développer des séquences de sollicitation pertinentes vis-à-vis de la simulation envisagée, d'autre part des moyens d'essais complexes et maîtrisés, en particulier pour la commande et l'asservissement des cycles appliqués. Ces difficultés expérimentales sont compensées par de nombreux avantages que présente ce type d'essais vis-à-vis de l'approche traditionnelle sous amplitude constante.

On peut citer, en particulier :

- une estimation plus précise de la durée de vie en fatigue
- une définition plus réaliste des points d'amorçage, dans le cas de composants complexes
- des valeurs plus exactes de la dispersion des durées de vie une estimation de la durée de vie à l'amorçage plus proche de la réalité industrielle

5.5 MISE EN PLACE DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Nous avons utilisé le même dispositif que dans le cas d'un chargement monotone. Mais la Figure 5-2 montre les deux consoles testées, une non renforcée qui sert de référence et l'autre renforcée pour mettre en évidence l'effet du renforcement par collage. Nous disposons d'une chaîne d'acquisition "wishay" de 24 voies pour enregistrer les déformations locales des points judicieusement ou sont collées les jauges de contrainte.

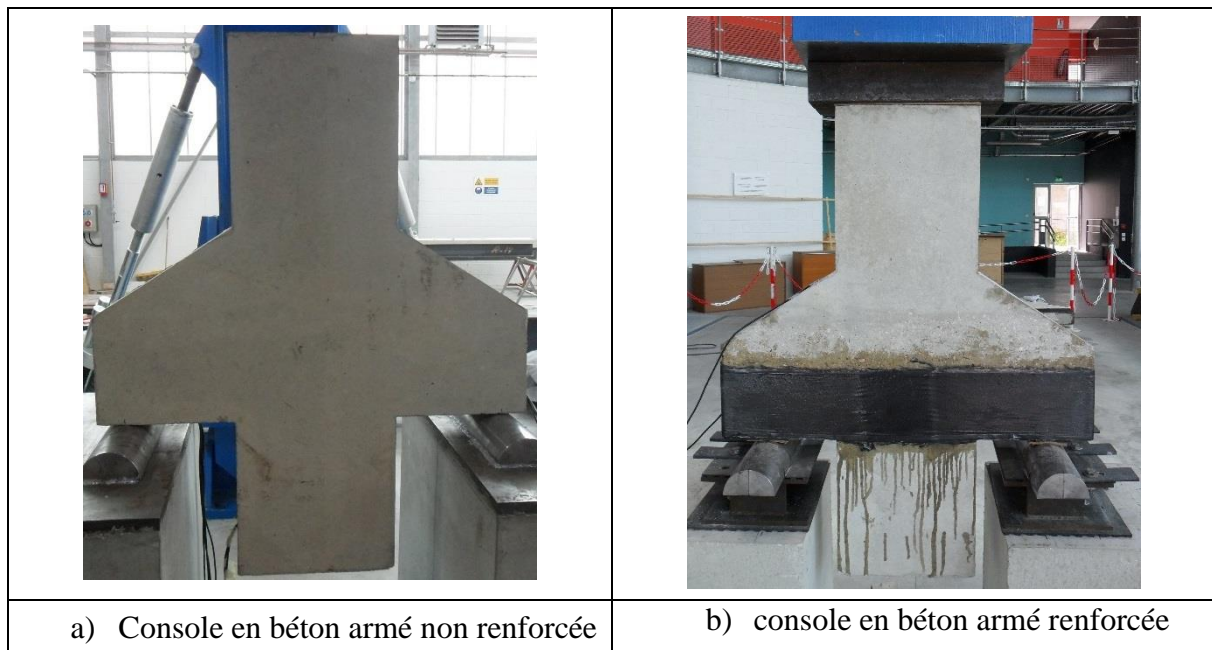


Figure 5-2: Mise en place des consoles en béton armé pour les essais de fatigue

5.6 OBJECTIF

L'objectif de cette étude était, hormis le comportement sous chargement statique, de comprendre le comportement d'une console courte en béton armé renforcée par collage de tissu composite en fibres de carbone sous chargement répétés.

Nous initions une fissure de flexion et nous appliquons une série de chargements répétés dans le but de connaître le phénomène qui provoquerait la rupture.

5.7 PARAMÈTRES DE MISE EN PLACE

La Figure 5-3 montre le comportement du tirant des consoles renforcée et non renforcée. Les charges de rupture sont respectivement 357kN pour la console de référence et de 651kN pour la console renforcée par bandage de matériaux en fibres de carbone. Par contre, les débuts de changement des courbes apparaissent pour la console non renforcée à 60kN et de 140kN pour la console renforcée, soit respectivement 17% et 22% de leur charges de rupture. Le premier palier apparait respectivement à 235kN et 365kN soit 65% et 56% de leurs charges de rupture. L'apparition de ce palier est liée à l'apparition de la fissure diagonale.

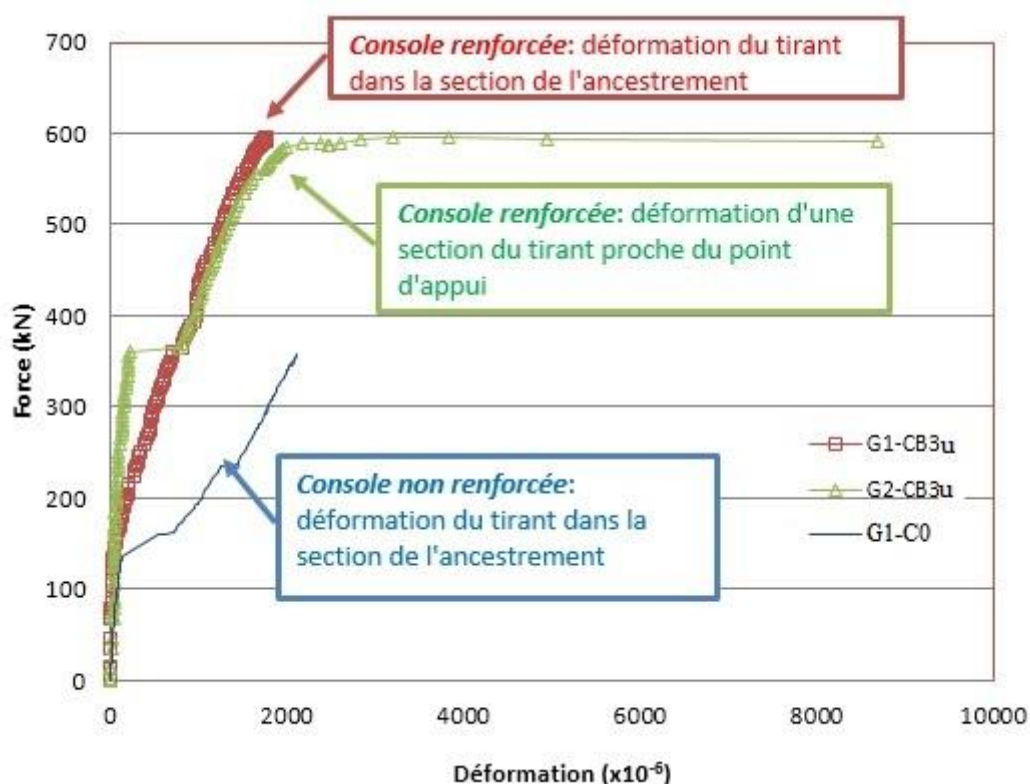


Figure 5-3: Comparaison de comportement d'une console non renforcée et celui d'une console renforcée par bandage d'une plaque composite en fibres de carbone.

L'étude expérimentale précédente permet d'identifier l'apparition des fissures et leur propagation.

Connaissant la courbe Charge-déformation de nos consoles renforcées ou pas, on a défini une valeur moyenne de charge qui correspond à la moyenne de la charge entre 20 à 40% de la charge ultime de rupture.

On fixe l'amplitude et on compte le nombre de cycles s'il y a rupture à la limite de 1 million de cycles.

Dans un premier temps, la console non armée est chargée jusqu'à l'initiation de la première fissure caractérisée par un changement de pente puis dans un second temps, on applique un signal triangulaire avec une contrainte moyenne jusqu'à 1 million de cycles.

Cas de sollicitation:

Les chargements varient de façon simple (onde triangulaire). Les variables caractéristiques de l'essai sont:

- les charges maximales F_{max} et minimale F_{min} ;
- l'amplitude de contrainte $F_a = \frac{F_{max}-F_{min}}{2}$
- contrainte alternative $\Delta F = F_{max} - F_{min} = 2F_a$
- le rapport des contraintes $R = \frac{F_{min}}{F_{max}}$

Selon les valeurs relatives de la contrainte alternative ΔF et la contrainte statique F_m , on distingue les essais sous sollicitations :

- alternées symétriques ($F_m=0$; $R=-1$);
- répétées asymétriques ($0 < F_m < \sigma_a$; $-1 < R < 0$ ou $F_m = F_a$; $R=0$)
- Ondulées ($F_m > F_a$; $0 < R < 1$)

La fréquence est de 05s pour 1 million de cycles.

Dans notre cas, on a :

	Console de référence	Console renforcée par bandage
$F_{max}(kN)$	71,4	142,8
$F_{min}(kN)$	130,2	260,4

Figure 5-4 : Valeurs maximum et minimum des forces appliquées lors du test de fatigue

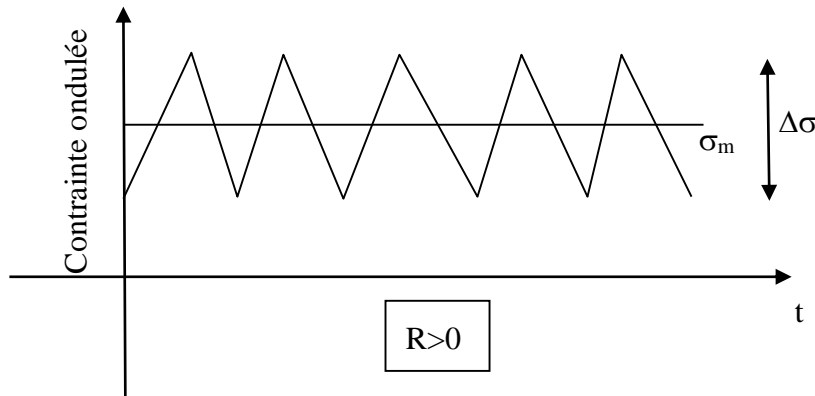


Figure 5-5: Forme des contraintes ondulées

5.8 RÉSULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSIONS

Deux consoles courtes en béton armé ont été testées: une non renforcée qui sert de référence et l'autre renforcée. Les deux ont été sollicitées un million de cycles selon les cas indiqués dans la Figure 5-4.

Console C0

Les résultats, pour la console de référence C0 non renforcée au bout d'un million de cycles, montrent que:

- il n'y a pas eu de ruine de la console courte en béton armé, Figure 5-10.
- Beaucoup de fissures apparentes (5) et surtout l'apparition de la fissure diagonale (Figure 5-11) sur la console. Les fissures pénétrantes (obliques) dans le poteau sont visibles.
- La charge ultime de rupture reste sensiblement la même après un million de cycles.

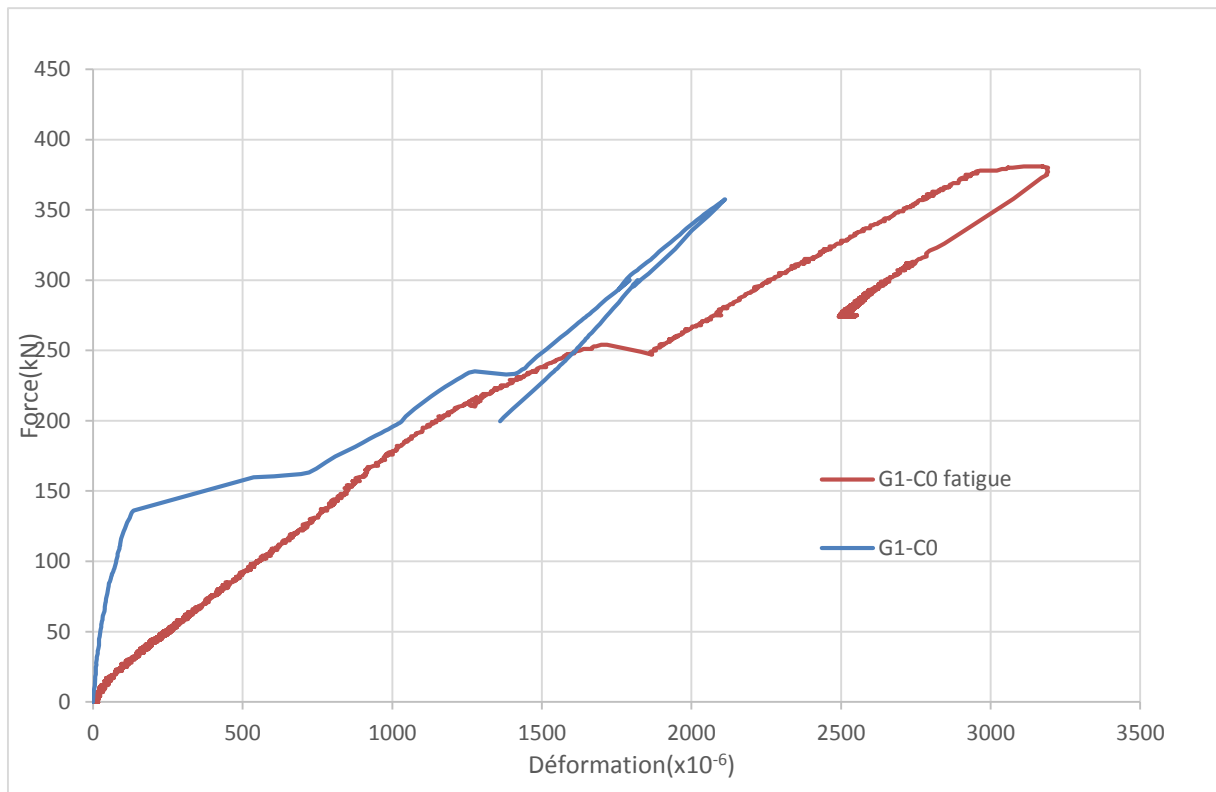


Figure 5-6: Comparaison de comportement entre console après un million de cycles "G1-C0 fatigue" et la console de référence "G1-C0" toutes les deux soumises à un essai de flexion simple.

Après un million de cycles, la charge de rupture de la console en béton armé renforcée par bandage de tissu en fibres de carbone unidirectionnelles, après une sollicitation simple en flexion est de 381kN soit une augmentation de 6%. En effet, il y aurait peu d'impact sur la charge ultime de rupture après un million de cycles.

Par contre, la partie élastique du béton disparaît et l'acier reprend directement les efforts jusqu'au palier à 350kN.

On compare sur la Figure 5-7, au point GB1, le comportement pour le béton d'une console courte en béton armé après un million de cycles et celui de référence. Les résultats montrent que dès l'apparition de la fissure diagonale au palier à 250kN, les deux consoles se comportent différemment. Le mode de chargement modifie le comportement t après le palier 250kN et l'état de fissuration de la console.

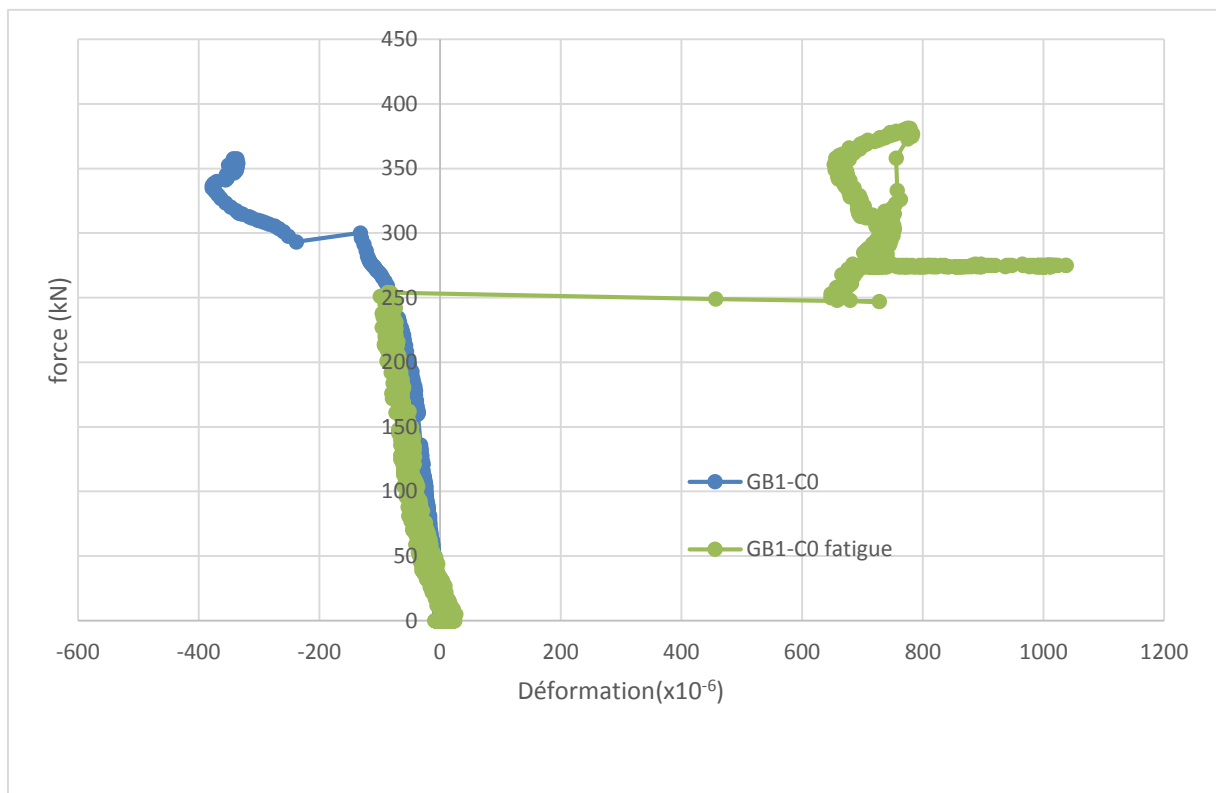


Figure 5-7: Comportement du béton avant et après un million de cycles

L'apparition du palier à 250kN, caractérisée physiquement par la fissure diagonale entraîne une rétribution des déformations dans la zone comprimée de la console sous chargement cyclique (courbe verte) et atteignent $+1000\mu\text{m/m}$.

Les déformations du tirant au niveau de la section d'encastrement sont relativement petites de l'ordre 100×10^{-6} comme l'indique la Figure 5-8.

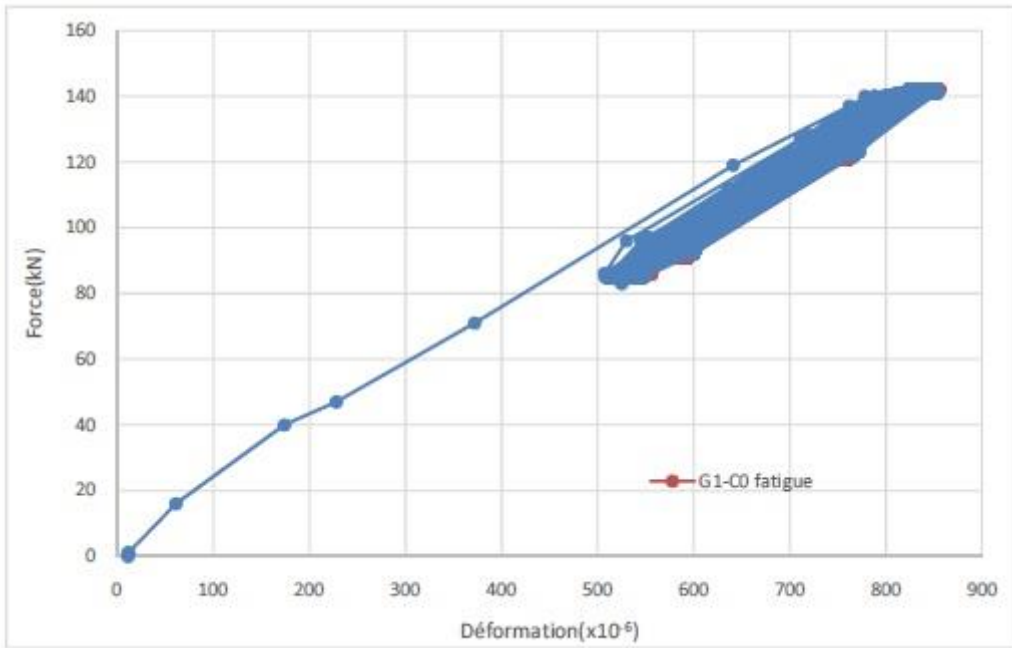


Figure 5-8: Déformations du tirant à la section encastrement (G1) durant un million de cycles

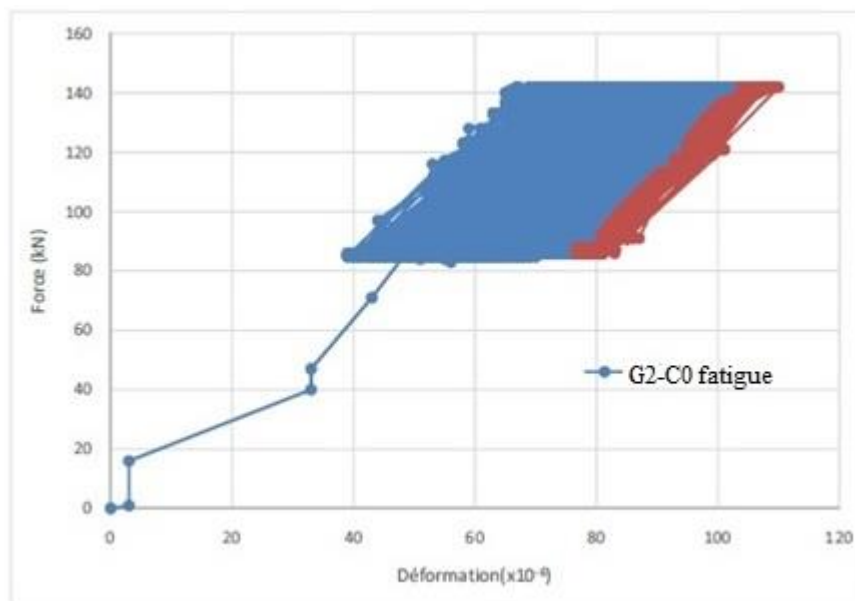


Figure 5-9: Déformations du tirant à l'appui (G2) durant un million de cycles

La Figure 5-9 présente les déformations au point G2 du tirant proche de l'appui où s'initie la fissure diagonale.

Les déformations sont plus importantes mais restent inférieures à 600×10^{-6} . Mais elles sont suffisantes pour engendrer les désordres dans la structure.

Mode de rupture de C0

Nous montrons sur la Figure 5-10, l'état de fissuration de la console après un million de cycles.



Figure 5-10: Après un million de cycles d'une console en béton armé non renforcée



Figure 5-11: Vue de près de la fissure diagonale après 1 million de cycles

Nous comparons à l'état de fissuration d'une console non fatiguée sur la Figure 5-12. La fissure diagonale entraîne la ruine de la console, ce qui n'est pas le cas de la console soumise à un chargement cyclique après 1 million de cycles.



Figure 5-12: Sous chargement monotone jusqu'à la rupture

Console renforcée CB3u

La console renforcée présente deux de fissures visibles sur la Figure 5-14 et elles sont peu (voire non visibles à l'œil nu) nombreuses à juste titre à cause du bandage. La Figure 5-13 présente les déformations en un point de la structure où on a collé une jauge de déformation. Les déformations de la plaque composite lors des cycles moins de 400 microdéformations sont insuffisantes pour engendrer les fissures comme dans le cas d'une console non renforcée. Le renforcement par bandage est utile.

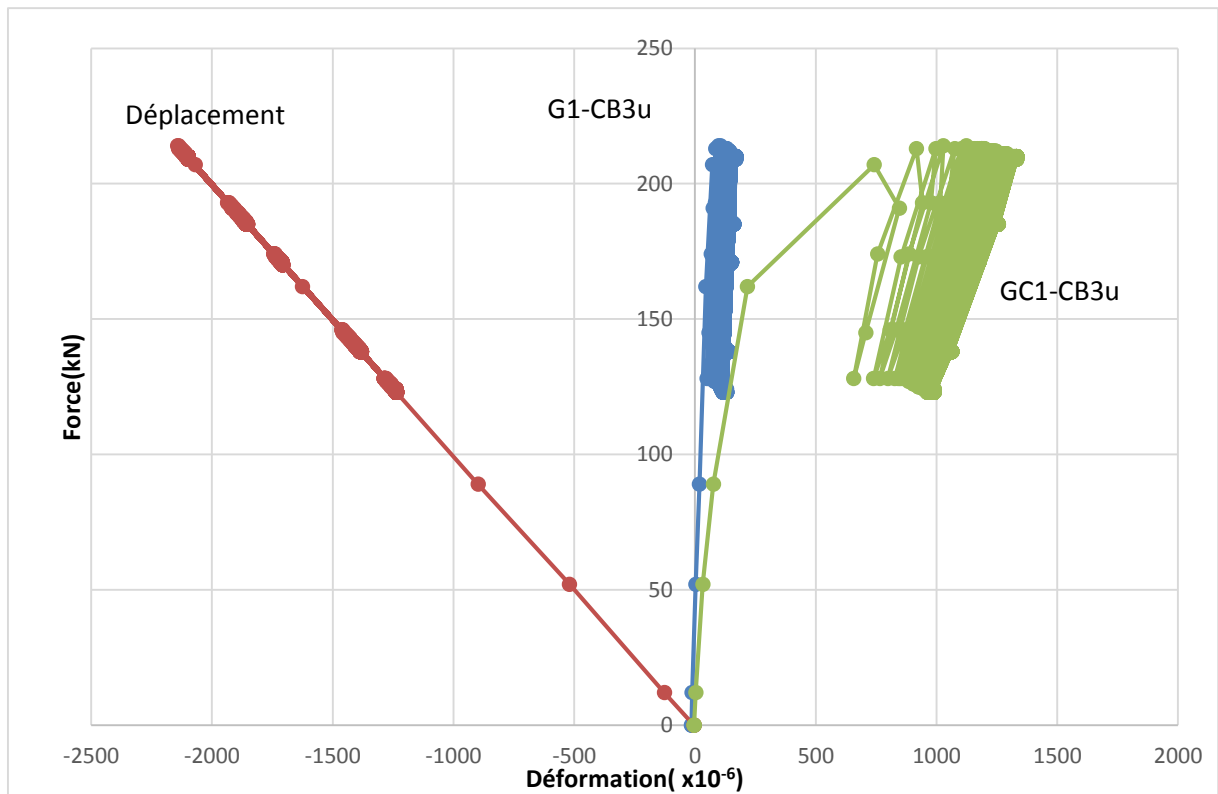


Figure 5-13: Essais de fatigue sur une console en béton armé renforcée CB3u.

La charge de rupture est de 584kN contre 651kN soit 11% moins que la console renforcée sous à un essai de flexion simple sans fatigue. Comme le montre la Figure 5-14, il n'y a pas eu de fissure visible après les un million de cycles.



Figure 5-14: Après 1 million de cycles d'une console renforcée.

5.9 CONCLUSION DU CHAPITRE 5

L'objet de ce travail est l'estimation de la dégradation des propriétés mécaniques par fatigue des structures en béton armé au cours d'une histoire de sollicitations, le vent, considéré comme une action aléatoire. En raison des non-linéarités inhérentes à ce type de problème, une méthode de Monte-Carlo est retenue.

L'adhérence étant supposée parfaite pour ce type de chargement, la fatigue est prise en compte pour le béton comprimé et les armatures tendues par l'intermédiaire de courbes de Wöhler associées à la loi de cumul de miner.

Cette partie de travail, met en évidence l'effet de fatigue sur les consoles courtes en béton armé renforcées avec une charge de rupture sensiblement inférieure 10% par rapport à une console courte en béton armé sollicitée en chargement monotone.

Le travail montre aussi une modification remarquable du mode de fissuration et celui de la rupture.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a porté sur le renforcement de consoles courtes en béton armé par collage de matériau composite en fibres de carbone. Afin d'étudier le rôle de chacun des paramètres qui a une influence sur la tenue mécanique et la durabilité de nos consoles renforcées, nous avons retenu l'essai de flexion trois points. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux cas des consoles courtes en béton armé présentant un défaut tel qu'un sous-dimensionnement des aciers tendus.

L'étude bibliographique montre que pour le renforcement des consoles, ce sont les fibres de carbone qui possèdent les meilleures propriétés mécaniques, physiques et chimiques alors que les fibres de verre sont très sensibles à l'action du rayonnement ultra-violet et les fibres de kevlar à l'action de l'eau.

Nous avons caractérisé à l'aide des essais simples tels que la traction, la compression, la flexion simple nos différents matériaux comme le béton (avec une composition normale), l'acier et le matériau composite. Les caractéristiques mécaniques du béton utilisé sont obtenues par des essais expérimentaux.

Nous avons ensuite décrit la préparation des surfaces (béton et plaque (Carbodur)) destinées à recevoir l'adhésif, et la mise au point de notre corps d'épreuve. Ce dernier est instrumenté par des capteurs à jauges électriques, ce qui nous a permis de suivre les déformations superficielles en divers points judicieusement choisis.

Dans nos premières expériences sur nos consoles courtes en béton courant armé renforcées par les tissus composites en fibres de carbone, nous avons constaté une nette amélioration de la charge portante ultime pouvant atteindre le double de la valeur obtenue par une console non renforcée et une augmentation du tiers de la rigidité de la console renforcée par bandage.

Plusieurs types de rupture sont observés:

- rupture par fendage diagonal,
- rupture par compression,
- rupture par cisaillement,
- rupture par cisaillement + fendage diagonal,
- rupture par compression + fendage diagonal,
- rupture de la plaque en tissus en fibres de carbone
- rupture par décollement de la plaque composite aux extrémités.

Nous avons mené une étude expérimentale sur l'influence des principaux paramètres : épaisseur et longueur des tissus, l'orientation des tissus par rapport à la charge appliquée, surface renforcée, sur les charges ultimes et le comportement local de la console renforcée.

À l'aide des courbes force-déformation de l'acier et des matériaux composites, nous avons montré l'existence de quatre phases qui apparaissent successivement au cours de l'essai expérimentale :

- Une première phase dans laquelle tous les éléments constitutifs de la console ont un comportement élastique,
- Une deuxième phase dans laquelle des fissures apparaissent rapidement dans le béton tendu tout en gardant une faible ouverture des fissures. La propagation des fissures est continue.
- Une troisième phase due à la plastification des aciers et à l'apparition des fissures diagonales. Il se forme une fissure verticale (perpendiculaire aux tirants) due au développement de concentrations de contraintes dans l'interface béton-composite aux extrémités de la structure. L'ouverture de cette fissure entraîne la ruine de la console.

Les résultats montrent que :

- Le renforcement par les matériaux composites permet d'augmenter considérablement la résistance ultime et améliorer le comportement mécanique local et global des consoles courtes étudiées. La résistance ultime de la console augmente de 50% à 82% selon le cas du renforcement. Après le renforcement, la console renforcée devient plus rigide. Cependant, la valeur de la déformation dans les tissus en fibres de carbone peut atteindre à 1200 $\mu\text{m}/\text{m}$.
- Dans le cas du renforcement par de tissus en fibres de carbone sur les deux faces de la console, l'épaisseur optimale du renforcement est de 2 couches.
- Dans le cas du renforcement par bandage, la contribution des tissus en fibres de carbone à la résistance la plus élevée est de trois couches. L'augmentation de la résistance ultime est maximale, 82%. Après cette épaisseur, il y a une décroissance de la résistance des consoles renforcées.
- Le renforcement par bandage de tissus en fibres de carbone permet de mettre en évidence l'effet de confinement du béton.
- Les résultats expérimentaux montrent également que le renforcement par trois couches de tissus en fibres de carbone avec une hauteur de 5cm est assez efficace en raison de son effet positif sur la résistance au cisaillement.
- Le renforcement par les plaques composites en fibres de carbone permet également d'augmenter de façon significative la rigidité de la console courte en béton armé.
- Selon le type du renforcement, il existe cinq modes de rupture de consoles courtes renforcées : la rupture par la flexion et décollement partielle des tissus en fibres de

carbone à l'extrémité de la console, la rupture par l'écrasement du béton dans la zone comprimée, la rupture par cisaillement, la rupture et la rupture par flexion-cisaillement

La charge ultime de la console courte en béton armé non renforcée peut être correctement estimée en utilisant des modèles analytiques. L'écart entre les valeurs obtenues par le test et le calcul est très faible. Par contre, la valeur de la charge de la rupture calculée par un modèle analytique sur une console courte renforcée est relativement complexe. L'écart entre les valeurs obtenues par le test et le calcul est assez important. L'amélioration de ce modèle est nécessaire.

Nous avons proposé un modèle qui simule le comportement mécanique de la console courte en béton armé renforcée et endommagée. Dans ce modèle, nous avons considéré qu'au voisinage de la section d'encastrement, les sections planes restent planes après déformation. Le modèle proposé, par le fait qu'il tient compte de l'endommagement du béton, a permis de montrer l'influence de la charge appliquée sur l'évolution et la propagation de l'endommagement à la section d'encastrement. De plus il permet de décrire le comportement local et la variation de déformation en fonction de la charge ainsi les trois phases du comportement de la console renforcée. Les différentes comparaisons que nous avons effectuées avec l'expérience confirment la validité de ce modèle et montrent l'intérêt de l'utiliser pour dimensionner les consoles courtes en béton armé avec ou sans armatures réparties.

L'étude effectuée sur la dégradation des propriétés mécaniques par fatigue des consoles en béton armé renforcée ou montre que la charge de rupture d'une console est influencée par le type du chargement cyclique. La variation de la charge ultime est sensiblement à 10% par rapport à une console courte en béton armé sollicitée en chargement monotone. Le travail montre également une modification remarquable du mode de fissuration et de la rupture.

PERSPECTIVES

En basant sur les travaux effectués et les résultats obtenus, il est fortement recommandé de développer un modèle analytique qui permet d'estimer correctement la charge ultime des consoles courtes renforcées par des différentes méthodes. Il est utile de noter que les paramètres qui influencent le comportement mécanique et la charge ultime de la console renforcée sont nombreux. Le modèle développé doit être applicable aux différents types de renforcement.

Il est nécessaire également d'analyser et simuler le comportement mécanique de la console courte renforcée en développant notre modèle analytique. C'est toujours difficile d'évaluer théoriquement l'influence du type du renforcement, en particulier l'influence du renforcement par bandage.

L'étude dans ce travail sur le problème de fatigue n'est pas complète. Il est utile d'effectuer davantage des essais expérimentaux et des approches analytiques en variant les principaux paramètres.

Une approche numérique du problème de la structure à travers un maillage judicieusement adapté permettra d'améliorer le modèle analytique basé sur la théorie de l'endommagement proposé actuellement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ACI 318-71] ACI Committee 318 “**Building Code Requirements for Reinforced Concrete**”; (ACI-71), American Concrete Institute 1971.
- [ACI 318-75] ACI Committee 318 “**Building Code Requirements for Reinforced Concrete**” (ACI-75), American Concrete Institute 1975.
- [ACI 318 83] ACI Committee 318 “**Building Code Requirements for Reinforced Concrete**” (ACI-83), American Concrete Institute 1983.
- [ACI 440] ACI Committee 440 “**Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening of Concrete Structures**”, (American Concrete Institute 2002, Michigan, USA.
- [AFGS 11] AFGC “**Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites**” – Recommandations provisoires. Bulletin scientifique et technique de l’AFGC, Fév. 2011
- [AHM 10] AHMAD S., SHAH A., NAWAZ A., SALIMULLAH K., “**Shear Strengthening of Corbels with Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRP)**”, *Materiales de Construcción*, Vol. 60, 299, 79-97, julio-septiembre 2010.
- [ANI 12] ANIS A. MOHAMAD-Ali, MUHAMMAD Abed Attiya “**Experimental behaviour of reinforced concrete corbels strengthened with carbon fibre reinforced polymer strips**”, *Basrah Journal for Engineering Science*, 2012. pp 31-45.
- [ASS 98] ASSIH J. “**Contribution à l’étude du Renforcement et de la Réparation de Poutre en Béton Armé par Collage de Plaques Composites en Fibres de Carbone**”, Thèse de doctorat, UFR Sciences de Reims, 1998.
- [BAZ 80] BAZANT Z., GAMBAROVA P.G., “**Rough cracks in reinforced concrete member**”, *J of structural Division, ASCE*, V.106, N°4, 1980, pp 819-842.
- [BAZ 84] BAZANT Z., GAMBAROVA P.G., “**Cracks shear in concrete: Crack band microplane model**”, *J of structural Engineering, ASCE*, V.110, N°9, 1984, pp 2015-2035.
- [BER 71] BERNETT E.W., BALASOORIYA B.M.A., “**Shear strength of prestressed beams with thin webs failing in inclined compression**”, *Journal of American Concrete Institute*, V. 68, N° 3, pp. 204-212, 1971.

-
- [BOU 00] BOURGET M. and DELMAS Y.; "**Dimensionnement des consoles courtes en BTHP**", Rapport d'étude du PN BHP 2000 (1998)
- [BOU 01] BOURGET M., DELMAS Y. and TOUTLEMONDE T., "**Experimental study of the behavior of reinforced high-strength concrete short corbel**", Materials and Structures/ Matériaux et Constructions, Vol.34, April 2001, pp. 155-162
- [BUY-02] BUYLE-BODIN, et al, "**Finite element modeling of flexural behavior of externally bonded CFRP reinforced concrete Structures**", Engineering Structures, 24(11), pp.1423-1429.
- [BUY-03] BUYLE-BODIN, et al, "**Experimental analysis of flexural behavior of externally bonded CFRP reinforced concrete structures**", Materials and Structures/Matériaux et Constructions, 36 (258), pp.238-241.
- [BUY-04] BUYLE-BODIN, et al, "**Use of carbon fibre textile to control premature failure of reinforced concrete beams strengthened with bonded CFRP plates.**", Journal of Industrial Textiles, volume33, Issue 3, January 2004, pages 145-157.
- [BRE 71] BRESSON J., "**Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures – Béton plaqué**", Annales ITBTP, n° 278, 1971.
- [BRE 72] BRESSON J., "**Renforcement par collage d'armatures du passage inférieur du CD 126 sous l'autoroute du sud**", Annales de l'ITBTP, série Béton, Béton armé, N° 122, Supplément N° 297, Sept. 1972, pp. 3-24.
- [CAM 05] CAMPIONE G., LA MENDOLA L. and PAPIA M., "**Flexural behaviour of concrete corbels containing steel fibers or wrapped with FRP sheets**", Materials and Structures 38 (July 2005) 617-625
- [CHA 53] CHAMBAUD et LEBELLE., "**Formulaire du béton armé**", S.D.T. Ed. PARIS; 1ere Edition 1953
- [CHA 69] CHATELAIN J., "**L'extensométrie par jauges à fil résistant**", Bulletin de liaison des laboratoires routiers, L.C.P.C, Supplément au N° 39, Août 1969.
- [CHE 82] CHEN W.F., "**Plasticity in reinforced concrete**", McGraw-Hill, Inc., New York, N.Y. (1982).
- [COR 01] CORRY R.W., DOLAN C.W., "**Strengthening and Repair of a Column Bracket Using a Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Fabric**", edited by PCI Journal, January-February 2001, pp.54-63

- [DEL 79] DELMAS J.P., "**Contribution à l'étude des collages structuraux: application au mortier plaqué**", Thèse ès Sciences Physiques, U.E.R. Sciences de Reims, 1979.
- [DEL-85] DELMAS Y., "**Contribution à l'étude théorique et expérimentale du collage de tubes métalliques par l'intermédiaire de résines époxydes**"; Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, U.E.R. Sciences de Reims, 1985
- [DEL 99] DELMAS Y., KHADRAOUI A., BUYLE BODIN F. "**Prévision du comportement en flexion de consoles courtes en béton armé. Prise en compte de l'endommagement du béton / Flexural behavior prediction for reinforced concrete corbels taking into account concrete damaging**", Materials and structures, FRA, 1999, 32, n 223, 651-662
- [DEN 87] DENNIS J.E., Woods D.J., "**New Computing Environments: Microcomputers in Large-Scale Computing**", edited by A. Wouk, SIAM, 1987, pp. 116-122.
- [DIA 01] DIAGANA, C., "**Contribution à l'étude expérimentale et théorique de structures en béton armé renforcées à l'effort tranchant par collage de composites à matrice organique**", Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2001.
- [DIV 86] DIVAKAR M.P., FAFITIS A., SHAH S.P., "**Constitutive model for shear transfer in cracked concrete**", Journal of structural Engineering, V.113, N°5, 1986, pp 1045-1062.
- [ELG 05] ELGWADY M.A., RABIÉ M., MOSTAFA M.T., "**Strengthening of corbels using CFRP an experimental program**", Cairo University, Giza, Egypt, 2005
- [EXN 79] EXNER H., "**On the effectiveness factor in plastic analysis of concrete. Plasticity in reinforced concrete (Report of the Working Commission)**", Int. Assoc. for Bridge and Struct. eng., Zurich, Switzerland, 29, 35-42. (1979).
- [FAT 87] FATTUHI N.I., "**SFRC corbel tests**", ACI Struct. J. 84 (1987), pp 640-651.
- [FAT 90] FATTUHI N.I., "**Strenght SFRC corbels subjected to vertical load**", Journal of structural engineering V.116, N°3, 1990, pp 701-718.
- [FED 84] FEDDERSEN B., NIELSEN M.P., "**Plastic Analysis of reinforced concrete beams in pure bending or pure torsion**", Bygningsstatistiske Meddelelser, Vol. 55, N° 2, 1984.

-
- [FER 05] FERNANDES R.M. & EL DEBS M.K., “**Análise da capacidade resistente de consoles de concreto armado considerando a contribuição da armadura de costura. Cadernos de Engenharia de Estruturas**”, São Carlos, v. 7, n. 25, p.103-128, 2005.
- [FOU 96] FOURE B., “**Justification sous sollicitations tangentés**”, Bulletin des Laboratoire des Ponts et Chaussées, spécial XIX (1996), pp 43-52
- [FUE 87] FUENTES A., “**Le béton armé après fissuration**”, Edition Eyrolles, 1987, pp 119-127.
- [GAM 87] GAMBAROVA P.G., “**Modelling of interface problems in reinforced concrete. IBASE Colloquium**”, Computational mechanics of concrete structures - Advances and applications. 1987, pp 1-16.
- [GIL 74] GILIBERT Y., DELMAS J.P., COLLOT C., “**Contribution à l'étude des bétons plaqués**”, Bulletin RILEM, vol. 7, n° 41, Matériaux et constructions, sept - oct, 1974.
- [GIL 78] GILIBERT Y., “**Contribution à l'étude de l'adhésivité des matériaux collés par l'intermédiaire de résines époxydiques**”, Thèse ès Sciences Physiques, U.E.R. Sciences des Reims, 1978.
- [HAR 82] HARA T., OTSUKA T., “**The applicability of plasticity theory on the shear strength of reinforced concrete corbels**”, Transactions of Japan concrete institute, V.4, 1982, pp 287-296.
- [HER 71] HERMANSEN B.R. “**Conventionally Reinforced Concrete Brackets**”, BSc Thesis, Heriot-Watt University, Edinburgh, Apr. 1971.
- [HER 74] HERMANSEN B.R. and COWAN J. “**Modified Shear-Friction Theory for Bracket Design**”, ACI Jurnal v.71, Nº2, Feb. 1974, pp.55-60.
- [HER 75] HERMANSEN B.R. and COWAN J. “**Second Thoughts on Shear-Friction**”, Concrete (UK) Aug. 1975, pp.31-32.
- [HOA 68] HOANG L. H., “**Recherche expérimentale sur les consoles courte en béton armé**”, Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des sciences de l'Université de Paris, 1968. Non publiée.
- [HWA 00] HWANG, S., LU W. and LEE H., “**Shear strength prediction for reinforced concrete corbels**”, ACI Struct. J. 97 (2000) 543-552.

- [JEN 75] JENSEN B. C., “**Lines of discontinuity of displacements in the theory of plasticity of plain and reinforced concrete**”, Magazine of concrete research, V.21, N°92, 1975, pp 143-150.
- [JIA 86] JIANG D.H., SHEN J.H., “**Strength of concrete slabs in punching shear**”, J. Struct. eng., ASCE, 112(12), 2578-2591. (1986).
- [KAC 63] KACHANOV L.M., “**Analytical methods of creep design especially with in the non-linear range**”. Math. Fac. Leningrad State Univ., USSR, 1963.
- [KHA 94] KHADRAOUI A., DELMAS Y., “**Etude de la résistance au cisaillement des consoles courtes en béton armé par la méthode de l’analyse limite**”, IVXeme Rencontres Universitaires de génie civil, Clermont-Ferrand Mai 1996.
- [KHA 98] KHADRAOUI A., DELMAS Y., “**Analyse et modélisation du comportement mécaniques des consoles courtes en béton armé**”, Thèse de doctorat, UFR Sciences de Reims, 1998.
- [KHA 99] KHADRAOUI A., BOURGET M. DELMAS Y., “**Prévision du comportement en flexion de consoles courtes en béton armé. Prise en compte de l’endommagement du béton**” Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 32, November 1999, pp 211-662
- [KRE 66] KREFELED WJ, THURTON C. W., “**Contribution of longitudinal steel to shear resistance of reinforced concrete beams**”, ACI Journal, April 1966, pp 451-476.
- [KRI 65] KRIZ, L.B. and RATHS, C.H. “**Connections in Precast Concrete Structures—Strength of Corbels**”, *PCI Journal*, Vol. 10, No. 1, 1965, pp 16-61.
- [LEM 78] LEMAITRE J; CHABOCHE J.L., “**Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement**”, Journal Méc. Appl. Cachan, France 1978, 2 (3), pp. 317-365.
- [LEM 88] LEMAITRE J., CHABOCHE J.-L., “**Mécanique des matériaux solides**”, Paris, Dunod, 1988, p.544
- [LEO 75] LEONHARDT F. and MONING E., “**Lectures On Concrete Construction Part 2**”, Springer-Verlag, New York, 1975
- [LHE 67] L'HERMITE R, BRESSON J., “**Béton armé d'armatures collées**”, colloque RILEM, 4-6 sept, Paris, pp 175-203, 1967.
- [LHE 67] L'HERMITE R., “**L'application des colles et résines dans la construction**”, Ann ITBTP, série Béton et Béton armé, 239, nov 1967.

-
- [LIS 06] LISSONDRE L. “**Analyse de la fissuration des bétons et des techniques de mis en œuvre en vue d’optimiser la réalisation des ouvrages**”, INSA de Strasbourg, Juin 2006
- [MAS 68] MAST, R.F. “**Auxiliary Reinforcement in Concrete Connections**”, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol. 94, No. ST6, June 1968, pp 1485-1501.
- [MAT 72] MATTOCK A.H., and HAWKINS N. M., “**Research on shear transfer in reinforced concrete**”, PCI Journal, V.17, N°2, March-April 1972, pp 55.
- [MAT 74] MATTOCK A.H., “**Shear transfer in concrete having reinforcement at an angle to the shear Plane**”, A.C.I. Special Publication 42, Shear in reinforced concrete, Detroit, Michigan, 1974, pp. 17-42.
- [MAT 74a] MATTOCK A.H., “**Discussion of the paper « Modified shear friction theory for bracket design**”, by B. R. Hermansen and J. Cowan, ACI Journal, V.71, N° 8, August, 1974, pp. 421-423.
- [MAT 76j] MATTOCK H., “**Design proposals for reinforced concrete corbels**”,. PCI Journal, V.21, N°2, Mai-Juin 1976, pp 18-42.
- [MAT 76f] MATTOCK A.H., Li W. K., and Want, T.C., “**Shear transfer in lightweight reinforced concrete**”, Journal, Prestressed Concrete Institute, V.21, N°1, Janv-Fev 1976, pp.20-39.
- [MAT 76m] MATTOCK A.H., CHEN C., “**The behavior of reinforced concrete corbels**”, PCI Journal, V.21, N°2, Mars-Avril 1976, pp 52-77.
- [MAZ 77] MAZARS J., “**Existence of Critical Strain Energy Release Rate for Concrete**”, In Proc of I.C.F.4 (Taplin), 1205- 1209, University of Waterloo publishers, Waterloo, Canada, 1977.
- [MAZ 84] MAZARS J., “**Application de l’endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structures**”, Thèse de Doctorat d’Etat, Univ. Paris 6. juin 1984.
- [MEI 91] MEIER U., KAISER H., “**Strengthened of Structures with CFRP laminates**”, Proceeding of the ASCE conference - ACM materials in civil engineering structures, p.224 - 232, 1991.
- [MEI 92] MEIER U. “**Carbone fiber-reinforced polymers: modern materials in bridge engineering**”, Structural Engineering International, 2: 7-12, 1992.

- [MEI, 92] MEIER U and KAISER H, “**Bâtiment: renforcement des structures par des stratifiés en fibres de carbone**”, Composites (PARIS), 1992; vol: 32; pp: 42-48
- [MEH 65] MEHMEL A. and BECKER, G. “**Zur Schubmessung des Kutzen Kvagarmes**”, Ucr Bauingenieur, Vol. 40, No. 6, 1965, pp 224-231.
- [MEH 67] MEHMEL A. and FREITAG W., “**Tragfähigkeitsversuche an Stahlbetonkonsolen**”, Ucr Bauingenieur, Vol. 42, No. 10, 1967, pp362-369.
- [NAA 03] NAAMAN A.E., “**Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites**”, Proc. of IV Int. RILEM Workshop HPRFCC4, Ann Arbor, MI, USA (2003) 5-13.
- [NAN 00] NANNI A., “**Carbon fibers in Civil Structures: Rehabilitation and New Construction**”, Proc., The Global Outlook for Carbon Fiber 2000, Intertech, San Antonio, Texas, December 4-6, 2000, 6 pp.
- [NBN EN 1504-9] Produits et système pour la protection et la réparation des structures en béton. Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité : Partie 2 : System de protection de surface pour béton. Bruxelles NBN 2005.
- [NIE 61] NIEDENHOFF H., “**Untersuchen über das Traverhalten von Konsolen und Kurzen Tragarmen**”, Thèse de Docteur-Ingénieur, Technische Hochschule Karlsruhe, 5 juin 1961.
- [NIEL78] NIELSEN M.P., BRAESTRUP M. W., JENSEN B. F., BACH F., “**Concrete plasticity, beam shear, shear in joints, punching shear**”. Danish soc. for struct. Sci. and Eng, Copenhagen, Denmark, 129. (1978).
- [NIEL84] NIELSEN M.P., “**Limit analysis and concrete plasticity**”, Prentice-Hall, Englewood Cliff N. J. (1984).
- [NEL 64] NELDER J.A., MEAD R., “**A simplex method for function minimisation**”, Computer Journal, V7, 1964, pp308-313.
- [NIEL 78] NIELSEN M.P., BRAESTRUP M. W., JENSEN B. F., BACH F., “**Concrete plasticity, beam shear, shear in joints, punching shear**”, Danish soc. for struct. Sci. and Eng, Copenhagen, Denmark, 129. (1978).
- [NIEL 84] NIELSEN M.P., “**Limit analysis and concrete plasticity**”, Prentice-Hall, Englewood Cliff N. J. (1984).

-
- [NEU 97] NEUBAUER, U. and ROSTASY, F.S., “**Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates**”, Concrete & Composites, Proc. of the 7 th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, Vol. 2 (1997) 109-118.
- [NOR 93] NORMAN E. DOWLINGS, “**Mechanical behavior of materials**”, Englewood Cliffs (NJ), Prentice Hall, 1993, 780 p.
- [FRA 63] FRANZ G. and NIEDENHOFF H., “**The Reinforcement of Brackets and Short Deep Beams**”, A translation of the article in German that appeared in Beton-und Stahlbetonbau. Vol. 58, No. 5, 1963. pp 112-120. London, Cement and Concrete Association, Publication 61.114. 1964. PP 17.
- [PAR 75] PARK R. and PAULAY T., “**Reinforced Concrete Structures**”, John Wiley & Sons.Inc. 1975, pp 690-697.
- [ROB 69] ROBINSON J.R., “**L’armature des consoles courtes. Aus theorie und praxis des stahlbetonbaues**”, Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin/München 1969.
- [ROB 75] ROBINSON J.R., “**Éléments constructifs spéciaux du béton armé**”, Paris, Eyrolles, 1975, pp 111-162.
- [THE 90] THEILLOUT J.-N. “**Renforcement des structures par la Technique des tôles collées**”, Bull. Liaison Labo. P. et Ch. - 169 - sept.-oct. 1990.
- [TOU 98] TOUTLEMONDE F., BARAZILLIER D. and LARRARD F., “**Recent advances in France in High Performance Concrete technology**”, Proceedings of SEWC’98, July 98 (Structural Engineering World Wide, Elsevier Sciences 1998)
- [TOU 00] TOUTLEMONDE F., QUIERTANT M., DUBROCA S., PETIT F. (2000) “**Justification du renforcement des voussoirs préfabriqués des tunnels : expérimentation sur voussoirs en béton armé et béton de fibres**”, Tunnels et Ouvrages Souterrains, n°162, pp. 333 - 341, décembre.2000.
- [TRIA 99] fibTG9.3-EBR “**Shear strengthening**” 1999/08/28 Mater. Construcc., Vol. 60, 299, 79-97, julio-septiembre 2010. ISSN: 0465-2746. doi: 10.3989/mc.2010.50009.
- [WAL81] WALRAVEN J., “**Fundamental analysis of aggregate interlock**”, J. Structural Division, ASCE, V.107, N°11, 1981, pp 2245-2270.
- [WAL87] WALRAVEN J., FRENAY J., “**Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members**”, PCI Journal, V.32, N°1, 1987, pp 66-88.

- [QAR 10] QARANI O, ZRAR A., HOTHMAN S., “**Ultimate shear strength of reinforced high strength concrete corbels subjective to vertical load**”, Al-Rafidain Engineering, vol 18, N°1, January 2010.
- [QUI 00] QUIERTANT M., SHAO J.-F., HOTEIT N. (2000) “**A numerical study of the influence of plastic damage on in situ stress estimation in clayey rocks**”, Studia Geotechnica et Mechanica, vol. **XXII**, n°1-2, pp. 3-22..2000.
- [QUI 01] QUIERTANT M., TOUTLEMONDE F., SEIGNOL J.-F. (2001) “**Une alternative en béton de fibres pour voussoirs de tunnel : présentation et analyse des résultats expérimentaux**”, Revue Française de Génie Civil, septembre.2001.
- [QUI 11] QUIERTANT M., CLEMENT J.-L., (2011) “**Behavior of RC columns strengthened with different CFRP systems under eccentric loading**”, Construction and Building Materials, Vol. 25(2), Sp. Iss. pp.452-460, Feb 2011.
- [QUI 12] QUIERTANT M]. BENZARTI K. “**Matériaux composites pour le renforcement des structures de génie civil**”, Revue des composites et des matériaux avancés Vol.22 N° 2/Mai-Août 2012.
- [ZIE 67] ZIELINSKI Z.A., “**Behaviour and ultimate strength of rectangular reinforced concrete beams in bending and high shear**”, Bulletin N°81, North Carolina State University, Raleigh 1967.
- [ZIE 69] ZIELINSKI Z.A., “**Research on ultimate strength in shear of bonded and unbounded concrete beam**”, International Symposium Shear, Torsion and Bond in Reinforced and Prestressed Concrete, P.S.G. College of Technology , Combatore, India, 1969.
- [ZIE 71] ZIELINSKI Z.A., “**A new approach to ultimate strength of reinforced concrete beams in bending and high shear**”, 2nd International Symposium Concrete Bridge Design, ACI Publication, 1971, pp. 411-456.

Annexes



ANNEXE 1: EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE CONSOLE

Given: 12 x 12 in. (305 x 305 mm) column with a bracket
Bracket dimensions (see Fig. B1)

$$a = 4 \text{ in. (101.6 mm)}$$

$$l_p = 6 \text{ in. (152.4 mm)}$$

$$h = 13 \text{ in. (330 mm)}$$

$$d = 12 \text{ in. (305 mm)}$$

Loads:

$V_{u1} = 50$ kips (222 kN) factored load before CFRP strengthening

$V_{u2} = 75$ kips (333 kN) factored load after CFRP strengthening

$$N_{uc} = 20 \text{ percent of } V_u$$

Fabric strength $F = 5.56$ kips per in. per layer (975 kN per meter per layer) per manufacturer's recommendations (see Table 1).⁸

$$f_y = 60 \text{ ksi (413 MPa)}$$

$$f'_c = 4000 \text{ psi (27.5 MPa)}$$

Required: Design the steel and CFRP reinforcement.

Solution: The bracket is designed in accordance with ACI 318-99.

Calculate N_{uc1} and N_{uc2} :

$$N_{uc1} = 0.2 V_{u1} \Rightarrow N_{uc1} = 10 \text{ kips (44.5 kN)}$$

$$N_{uc2} = 0.2 V_{u2} \Rightarrow N_{uc2} = 15 \text{ kips (66.7 kN)}$$

Check d for the maximum shear stress limits permitted by ACI 318:

$$V_n = 0.2 (f'_c b_d) \text{ or equal to } 800 b_d \text{ for } f'_c = 4000 \text{ psi}$$

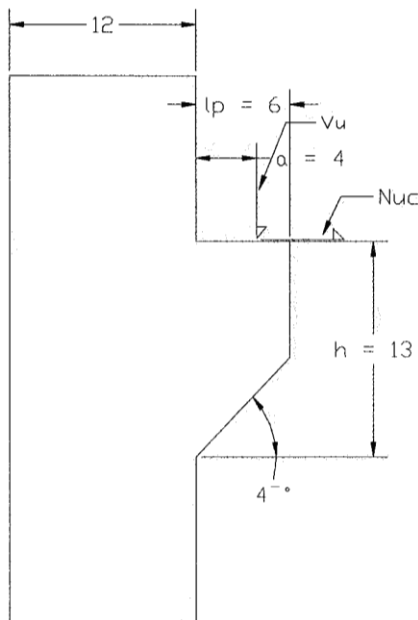


Fig. B1. Design example bracket.

Hence, both equations give the same results.

$$b = 12 \text{ in.}, \text{ therefore, } V_n = 9600 d.$$

$$V_u = 9600 d, \text{ therefore,}$$

$$d = 5.2 \text{ in.} < 12 \text{ in. (132 mm} < 304 \text{ mm)}$$

$$d = 12 \text{ in. (304 mm)} > 5.2 \text{ in. (132 mm) required, ok}$$

Shear-friction steel, A_{vf} :

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi \mu f_y} \quad (\text{ACI 11-25})$$

where

A_{vf} = area of steel required for shear-friction reinforcement

$$\phi = 0.85$$

$$\mu = 1.4 \text{ (ACI 11.7.4.3)}$$

Substituting values in the above equation:

$$A_{vf} = 0.70 \text{ sq in. (450 mm}^2\text{)}$$

The flexural design equation is used to determine the required flexural steel, A_f :

$$A_f = \frac{V_u a_1 + N_{uc}(h - d)}{\phi f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)}$$

where

A_f = area of steel required for flexural reinforcement

$$\phi = 0.85$$

$$a_1 = 4 \text{ in. (102 mm)}$$

$$a = 1/2 \text{ in. (12 mm)}$$

Substituting values in the above equation:

$$A_f = 0.350 \text{ sq in. (224 mm}^2\text{)}$$

Tensile steel, A_n .

$$A_n = \frac{N_{uc}}{\phi f_y} \quad (\text{ACI 318, Section 11.9.3.4})$$

$$A_n = 0.196 \text{ sq in. (126 mm}^2\text{)}$$

Calculate A_s :

$$A_s = A_f + A_n \Rightarrow A_s = 0.546 \text{ sq in. (350 mm}^2\text{)}$$

or

$$A_s = \frac{2}{3} A_{vf} + A_n \Rightarrow A_s = 0.663 \text{ sq in. (427 mm}^2\text{)}$$

$$A_s = 0.663 \text{ sq in. (427 mm}^2\text{)}$$

Check $A_{s \min}$:

$$A_{s \min} = 0.04 \frac{f'_c}{f_y} b d \Rightarrow A_{s \min} = 0.384 \text{ sq in. (248 mm}^2\text{)}$$

$$A_s > A_{s \min}, \text{ ok}$$

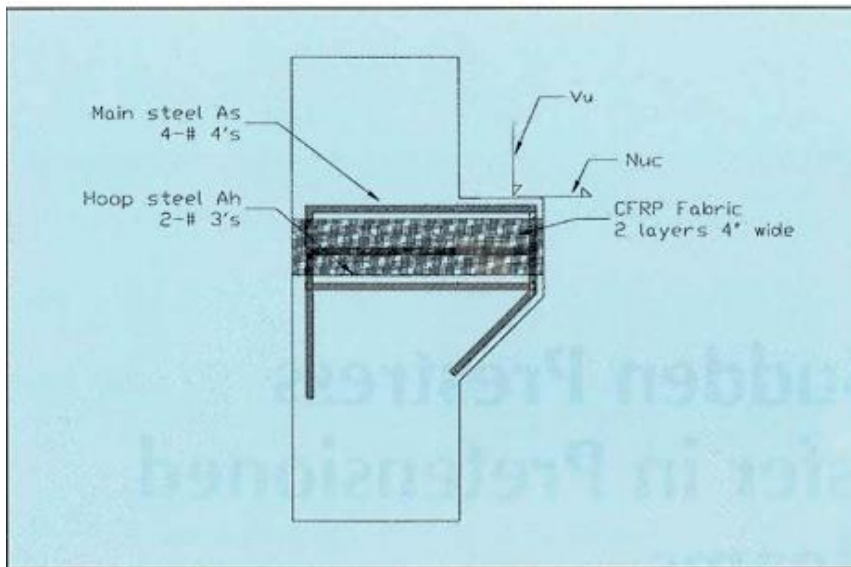


Fig. B2.
CFRP design example.

Calculate A_h :

$$A_h = 0.5 A_f \Rightarrow A_h = 0.175 \text{ sq in. (113 mm}^2\text{)}$$

or

$$A_h = 0.5 \frac{2}{3} A_{vf} \Rightarrow A_h = 0.233 \text{ sq in. (114 mm}^2\text{)}$$

$$A_h = 0.233 \text{ sq in. (427 mm}^2\text{)}$$

Select main reinforcing steel: Use four # 4 bars, $A_s = 0.78$ sq in. (503 mm²). For hoop steel, use two # 3 bars, $A_h = 0.44$ sq in. (284 mm²).

Detailing and layout of the steel should be done in accordance with the PCI Design Handbook.

The next step is to design the CFRP reinforcement to carry an additional 25 kips (111 kN) of load.

$$V_u = \phi V_n \quad (12)$$

$$\phi V_n = \phi V_{br} + \phi V_{fab} - N_{uc} \quad (13)$$

$$V_{fab} = (Fwn)\mu \quad (11)$$

where

$$\phi V_n = 75 \text{ kips (333 kN)}$$

$$\phi V_{br} = 50 \text{ kips (222 kN)}$$

$$\phi = 0.75$$

$$N_{uc} = 15 \text{ kips (66.7 kN)}$$

Therefore:

$$\phi V_{fab} - N_{uc} = 25 \text{ kips (111 kN)}$$

from which $V_{fab} = 53.3$ kips (237 kN).

By substituting this value into Eq. (11) and assuming that $n = 1$, a required width w of 13.7 in. (348 mm) is obtained. The available CFRP width is the flat portion of the bracket minus 1 in. (25.4 mm) on either side, i.e., 7 in. - 2 in. = 5 in. (127 mm). Therefore, two layers of CFRP are required and are desirable to avoid a single layer solution.

Select two 4 in. (102 mm) wide layers. The equivalent width is 4 in. x 2 layers x 2 sides = 16 in. (400 mm). The total required fabric is 70 in. x 4 in. (1800 x 100 mm), including a 10 in. (250 mm) overlap. The final bracket design is shown in Fig. B2.

ANNEXE 2: SIKA CARBODUR®-S1012

Lamelles pultacées à base de fibres de carbone pour renforcement de structures

➤ Description

Les Sika CarboDur S sont des P.R.F.C. pultrudés (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone), à base de fibres de carbone noyées dans une matrice époxydique. Ils se présentent sous forme de lamelles préfabriquées en usine, et sont conçus pour le renforcement des structures en béton armé, en béton précontraint, en bois, en maçonnerie, en métal.

Pour le collage des lamelles en surface du support, l'adhésif structural utilisé est le Sikadur®-30.

Les lamelles peuvent également être engravées dans des rainures en suivant le principe du système de renforcement dit « engravé en surface du béton » (traduction du terme anglais « NSM »). Les colles structurales utilisées sont alors soit le Sikadur-30 ou Sikadur -330 pour les applications en sous face, le Sikadur-300 pour les applications en horizontal (renforcement vis-à-vis des moments négatifs en chapeaux). En complément, Sikadur-33 conditionné en cartouche peut être utilisé.

Utilisation

Différents cas de renforcement de structures :

- **Augmentation de charges**
 - Augmentation de la capacité portante des poutres, des dalles : augmentation des charges d'exploitation, trafic, changement de destination du local, ...
- **Endommagement des éléments de structures**
 - Dégradation des matériaux de la structure
 - Corrosion, diminution ou sectionnement d'armatures internes (chocs, incendie)
- **Charges dynamiques, séismes Amélioration des conditions de service**
 - Réduction de flèche de planchers, poutres
 - Réduction des contraintes dans les armatures internes
 - Diminution de l'ouverture des fissures
- **Modification de la structure**
 - Création de trémies (voile, dalle, poutre.)
 - Élimination de murs, poteaux
- **Mise en conformité suite à l'évolution de la réglementation**
 - Renforcement parasismique
 - Nouveau code de calcul
- **Défauts de conception, défauts de calcul**
 - Insuffisance ou déficience des sections d'acier interne
 - Défaut de positionnement des armatures dans le béton

Caractéristiques / Avantages

- Insensible à la corrosion
- Très haute performance
- Excellente durabilité
- Facile à transporter (légèreté, conditionnement en rouleau)
- Longueur illimitée (rouleau de 10 à 250 mètres suivant le type de lamelle utilisé)

- Application économique (pas de matériel de levage, ni de serrage)
- Peut recevoir un revêtement (peinture, mortier...)
- Croisement aisé des lamelles grâce à la faible épaisseur
- Facilité d'application, en particulier en sous face, sans moyen auxiliaire de placage ni de serrage
- Excellente tenue à la fatigue
- Facile à préparer, applicable en plusieurs couches superposées
- Finition excellente des bords de lamelles (imprégnation et alignement des fibres) obtenue lors de la fabrication par pultrusion

Agréments / Essais / Normes

- Avis Technique CSTB N° 3/10-669 (annule et remplace N° 3/07- Essais 502)
- Essais de traction et de cisaillement inter-laminaire sur les Lamelles PRFC (avant et après vieillissement accéléré)
- Essai de cisaillement à simple de recouvrement - Lamelle PRFC sur Béton (avant et après vieillissement accéléré)
- Essai de tenue aux UV du système Sika CarboDur (avec et sans revêtement de protection Sikagard)

➤ Caractéristiques techniques

Couleurs

PRFC (Polymère Renforcé de Fibres de Carbone –matrice résine époxy) de couleur noire

Densité - 1,60

Température de transition vitreuse >100 °C

Pourcentage Volumique des fibres >68 %

➤ Caractéristiques physiques et mécaniques

Module d'Élasticité	Valeur dans le sens longitudinal des fibres	selon la norme EN 2561
	Valeur moyenne 165000 MPa	
Résistance en traction uni axiale	Valeur moyenne 3100 MPa	selon la norme EN2561
Élongation à la rupture	Valeur dans le sens longitudinal des fibres	selon la norme EN 2561
	Valeur minimum >1,70 %	

ANNEXE 3 SIKADUR®-30

Adhésive structural pour le collage de renforts

➤ Description

- Sikadur®-30 est une colle structurale thixotrope à 2 composants, mélange de résine époxydique et de fillers spéciaux, conçue pour une utilisation à une température comprise +8°C et +35°C.

Utilisation

Produit de collage de renforts structuraux selon la norme NF EN 1504-9, principe 4 Renforcement Structural, méthode 4.3 Renforcement par plats collés

- **- Procédé Sika® CarboDur®** de renforcement de structures en béton, brique, bois par matériaux composites (voir détails sur les Notices Produit Sika® CarboDur® et l'avis technique CSTB N° 3/10-669).
- **Procédé par plats métalliques collés**

Caractéristiques / Avantages

- Facile à mélanger et à appliquer.
- Application sans primaire.
- Excellente résistance au fluage sous charge permanente.
- Excellente adhérence sur les lamelles Sika® CarboDur®, béton, maçonnerie, acier, fonte, aluminium, bois.
- Durcissement non affecté par l'humidité.
- Colle à hautes performances
- Thixotropie: aptitude à l'application sur surfaces verticales et en sous-face.
- Durcit sans retrait.
- Composants de couleurs différentes : permet le contrôle de l'homogénéité du mélange
- Hautes résistances mécaniques initiales et finales.
- Hautes résistances à l'abrasion et aux chocs.
- Imperméable aux liquides et à la vapeur d'eau.

Agréments / Essais / Normes

- Conforme aux exigences de la norme NF EN 1504-4 (collage structural).
- Avis Technique N° 3/10-669 (annule et remplace N° 3/07-502) - procédé Sika® CarboDur®
- Deutsches Institut für Bautechnik Z-36.12-29, 2006: General construction authorisation for Sika® CarboDur®.
- IBMB, TU Braunschweig, test report No. 1871/0054, 1994: Approval for Sikadur®-30 Epoxy adhesive.
- IBMB, TU Braunschweig, test report No. 1734/6434, 1995: Testing for Sikadur®-41 Epoxy mortar in combination with Sikadur®-30 Epoxy adhesive for bonding of steel plates

➤ Caractéristiques techniques

Couleurs / consistance

Composant A: blanc
 Composant B: noir
 Mélange A+B: gris clair

Densité	1,65 kg/l + 0,1 kg/l (mélange A+B, à +23°C)
Aptitude à la mise en place	selon la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) Aptitude à la mise en place sur surfaces verticales : aucun affaissement jusqu'à 3-5 mm d'épaisseur à +35°C
Écrasement	selon la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) 4.000 mm ² à +15°C à 15 kg
Épaisseur par couche	30 mm max. Quand plusieurs kits doivent être utilisés : les préparer au fur et à mesure des besoins (et non à l'avance) afin de ne pas réduire la durée d'utilisation du kit (durée de vie en pot).
Retrait	0,04% selon la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte)

Coefficient de Dilatation Thermique - $2,5 \cdot 10^{-5}$ par °C (plage de temp. de -10°C à +40°C)

Stabilité Thermique - Température de transition vitreuse (T_G)

Selon la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte)

Temps de durcissement	Température de durcissement	T _G
7 jours	+45°C	+62°C

HDT (*Heat Deflection Temperature*) (selon la norme ASTM-D 648)

Temps de durcissement	Température de durcissement	HDT
3 h	+80°C	+53°C
6 h	+60°C	+53°C
7 jours	+35°C	+53°C
7 jours	+10°C	+36°C

➤ Caractéristiques physiques et mécaniques

Résistance en compression

(Selon la norme EN196)

Temps de durcissement	Température de durcissement	
	+10°C	+35°C
12h	-	80 – 90 MPa
1 jour	3 - 5 MPa	15 - 18 MPa
3 jours	13 - 16 MPa	16 - 19 MPa
7 jours	14 - 17 MPa	16 - 19 MPa

Résistance en cisaillement

Rupture du béton (~15MPa)

(selon FIP 5.15)

Temps de durcissement	Température de durcissement	
	+15°C	+35°C
1 jour	3 - 5 MPa	15 - 18 MPa
3 jours	13 - 16 MPa	16 - 19 MPa
7 jours	14 - 17 MPa	16 - 19 MPa

18 MPa (7 jours à +23°C)**(selon la norme DIN53283)****Résistance en traction**

(Selon la norme DIN53283)

Temps de durcissement	Température de durcissement	
	+15°C	+35°C
1 jour	18 - 21 MPa	23 - 28 MPa
3 jours	21 - 24 MPa	25 - 30 MPa
7 jours	24 - 27 MPa	26 - 31 MPa

Dureté Shore D	≥70 (après 48h à +23°C)	
Adhérence	> 4 MPa rupture dans le béton (support sablé) (selon la norme EN 24624) Adhérence sur acier > 21 MPa selon la norme EN 24624, sur support sablé suivant le degré de soin Sa. 2,5. (Valeur moyenne > 30 MPa).	
Module d'Élasticité	En compression : 9600 MPa	selon la norme ASTM D 695 (à +23°C)
	En traction: 11200 MPa	selon la norme ISO 527 (à +23°C)

➤ **Mise en œuvre****Ratio de mélange** - Part A : Part B = 3 :1 en poids ou en volume**Mélange** - Vider complètement le composant B dans le composant A (grand emballage).

Mélanger avec un malaxeur muni de l'hélice Sika® de malaxage, pendant au moins 3 minutes à faible vitesse (maxi 300 tours/minute) pour entraîner le moins d'air possible, jusqu'à obtention d'une consistance homogène et d'une teinte uniforme (couleur gris clair). Ensuite verser le mélange dans un autre contenant propre, et continuer le malaxage pendant encore une minute. Attention de ne mélanger que le nombre de kits qui pourront être mis en place durant la Durée Pratique d'Utilisation.

Méthode d'application - Consulter la Notice Produit des lamelles Sika® CarboDur®, l'avis technique CSTB N° outils 3/10-669, le CCT sur la Technique NSM (barres gravées).

Durée de vie en pot

(selon FIP)

Température	+8°C	+20°C	+35°C
Pot-life	~ 120 mn	~ 90 mn	~ 20 mn
Temps ouvert	~ 150 mn	~ 110 mn	~ 50 mn

La durée de vie en pot débute quand les 2 composants sont mélangés. Elle est plus courte à hautes températures et plus longue à basses températures. Plus la quantité mélangée est importante, plus la durée de vie en pot est courte. Pour obtenir une durée de vie en pot plus longue à hautes températures, diviser le produit une fois mélangé en plusieurs portions. Une autre méthode consiste à rafraîchir (pas en dessous de 5°C) les composants A et B avant de les mélanger.

ANNEXE 4: SIKADUR®-330

Résine d'imprégnation époxydique pour tissu de renforcement

➤ Description

- Sikadur ®-330 est une résine d'imprégnation époxydique, thixotrope, à 2 composants, mélange de résine époxydique et de fillers spéciaux.
- Sikadur®-330 est conforme aux exigences de la norme NF EN 1504-4 en tant que produit de collage de plaques de renforcement.

Utilisation

- Sikadur -330 est une résine de collage/d'imprégnation utilisée pour
- les tissus «secs» de renforcement de structures de la gamme SikaWrap® (exemple SikaWrap®-230 C).
- Primaire d'imprégnation du support pour les tissus «humides» de renforcement de structures (SikaWrap®-600 C). Nous consulter.
- Colle structurale pour le collage des Lamelles Sika® CarboDur® sur support d'aspect fin et régulier.

Caractéristiques / Avantages

- Facile à mélanger et à appliquer, à la truelle et au rouleau
- Conçue pour les méthodes d'imprégnation manuelle de tissus « secs »
- Thixotropie: aptitude à l'application sur surfaces verticales et en sous- face.
- Excellente adhérence sur de nombreux supports
- Application sans primaire préalable
- Hautes résistances mécaniques

Agréments / Essais / Normes

- Conforme aux exigences de la norme NF EN 1504-4 (collage structural).
- Avis Technique N° 3/10-669 (annule et remplace N° 3/07-502)

➤ Caractéristiques techniques

Couleurs / consistance

Composant A: blanc

Composant B: gris

Mélange A+B: gris clair

Consistance crémeuse

Coefficient de Dilatation Thermique - $4,5.10^{-5}$ par °C (plage de température de -10°C à +40°C)

Viscosité

Température	Viscosité
+10°C	~ 10.000 mPas
+23°C	~ 6.000 mPas
+35°C	~ 5.000 mPas

Stabilité Thermique

Heat Déflexion Température (HDT), selon la norme ASTM D648

Temps de Durcissement	Température	HDT
7 jours	+10°C	+36°C
7 jours	+23°C	+47°C
7 jours	+35°C	+53°C
7 jours à +10 °C plus 7 jours à +23°C	-	+43°C

➤ Caractéristiques physiques et mécaniques

Résistance en traction	30 MPa (7 jours à +23°C)	(selon la norme DIN 53455)
Adhérence	> 4 MPa rupture dans le béton (support sablé) (selon la norme EN 24624)	
Module d'Élasticité	Flexion: 3800 MPa (7 jours à +23°C) Traction: 4500 MPa (7 jours à +23°C)	(selon la norme DIN 53452) (selon la norme DIN 53455)
Allongement à rupture	0,9% (7 jours à +23°C) (selon la norme DIN 53455)	

➤ Mise en œuvre

Ratio de mélange - Part A : Part B = 4 :1 en poids

Mélange - Mélanger pendant au moins 3 minutes à faible vitesse (maxi 600 tours/minute) pour entraîner le moins d'air possible, jusqu'à obtention d'une teinte totalement homogène (couleur gris clair). Ensuite verser le mélange dans un autre contenant propre et continuer le malaxage pendant encore une minute. Attention de ne mélanger que le nombre de kits qui pourront être mis en place durant la Durée de vie en pot Consulter l'Avis Technique CSTB N° 3/10-669

Méthode d'application

Avant l'application, contrôler l'humidité du support, l'humidité relative et le point de rosée.

Couper le tissu SikaWrap® aux dimensions désirées.

- Application du Sikadur®-330:

Appliquer le Sikadur -330 sur le support préparé à l'aide d'une truelle, d'un rouleau ou d'une brosse.

- Mise en place du tissu et marouflage :

Sans attendre, placer et positionner le tissu dans le sens adéquat. Maroufler le tissu sur la couche de résine à l'aide du rouleau marouffleur afin que la résine traverse et imprègne uniformément toute la surface du tissu SikaWrap®.

Cette opération se réalise aisément, sans forcer, dans le sens longitudinal des fibres, de façon à évacuer l'air éventuellement emprisonné, sans créer de faux plis, ni déformer le tissu.

Lisser la surface à l'aide d'une large brosse pour homogénéiser la surface du composite ainsi réalisé.

- Application de couche supplémentaire de tissu SikaWrap

Appliquer une couche de résine Sikadur®-330 (dans un délai de 60 minutes à 23°C après l'application de la couche précédente) sur la couche précédente de tissu encore fraîche et répéter l'opération précédente de marouflage Si ce n'est pas possible, attendre au moins 12 heures avant l'application.

- Recouvrement :

Cas de pose dans le sens longitudinal des fibres : le recouvrement du tissu SikaWrap® doit être d'au moins 100mm.

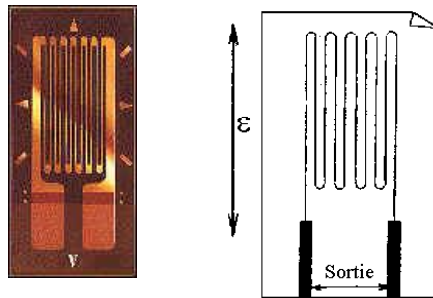
Durée de vie en pot

La durée de vie en pot (pot life) débute quand les 2 composants sont mélangés. Elle est plus courte à hautes températures et plus longue à basses températures. Plus la quantité mélangée est importante, plus la durée de vie en pot est courte. Pour obtenir une plus longue durée de vie en pot à hautes températures, diviser le produit, une fois mélangé, en plusieurs parties. Une autre méthode consiste à rafraîchir (pas en dessous de 5°C) les composants A et B avant de les mélanger.

ANNEXE 5: JAUGE D'EXTENSION

Les jauges d'extension sont utilisées pour effectuer des mesures locales de déformation de l'acier ou du béton.

Ces jauges d'extension appelées aussi "jauge de contrainte" sont une application particulière du principe de changement de résistance lorsqu'on étire un fil métallique. Leur usage très répandu résulte de la facilité d'installation ainsi que de la grande précision obtenue grâce aux appareils connexes. On les retrouve dans des applications variées de mesure des microdéformations et de force. La plupart des cellules de charge et des balances de précision sont conçues à partir de ces jauges.



Jauge d'extension

Si on considère un fil fin que l'on soumet à une traction, dans les limites de son domaine élastique, il s'allonge sous l'effet de la charge, cependant, sa section diminue. Le changement de dimension résultant cause une augmentation de la résistance électrique du fil. On traduit ainsi une variation de déformation en une variation de résistance électrique. La sensibilité d'une jauge est spécifiée en terme de facteur de jauge (K); le rapport entre la proportion de changement de résistance et la proportion de changement de longueur :

$$K = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\epsilon}$$

où K = facteur de jauge (constante qui dépend des matériaux)

dR/R = variation unitaire de la résistance

dL/L = variation unitaire de la longueur

ϵ = déformation unitaire

Sous la forme la plus simple, une jauge est constituée par un fil très fin collé sur un support, feuille très mince, et arrangé suivant la forme de la figure 1. La majeure partie de sa longueur est distribuée parallèlement à une direction fixe suivant " X ". Des fils plus gros servent à souder les sorties à des câbles de liaison aux instruments. Lorsqu'on désire connaître l'allongement d'une structure suivant une direction donnée, on colle la jauge, fils parallèles à cette direction. La mesure des variations de résistance est liée à l'allongement relatif ou la déformation longitudinale.

Relation entre contraintes et déformations pour un matériau homogène, isotrope et dans son domaine de déformations linéaires.

État de contraintes uni axial

Critère : un état de contraintes uni axial n'a qu'une contrainte principale non nulle.

$$\left. \begin{array}{ll} \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} & \sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \\ \varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} & \sigma_x = -E \cdot \frac{\varepsilon_y}{\nu} \\ \gamma_{xy} = 0 & \tau_{xy} = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Axe } X \text{ dans la direction de la} \\ \text{contrainte principale non nulle.} \end{array}$$

État de contraintes bi axial

Critère : un état de contraintes bi axial a deux et deux seulement contraintes principales non nulles.

$$\left. \begin{array}{ll} \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} & \sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \\ \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} & \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} & \tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Dans toute direction} \\ \\ G = \frac{E}{2(1+\nu)} \end{array}$$

Définitions :

E – Module d'élasticité

τ – cisaillement

σ - Contrainte normale

γ - glissement

ε – déformation normale

G – module de rigidité

ν – coefficient de Poisson

Une jauge collée peut servir très longtemps au point où elle est collée, par contre, on ne peut la décoller sans la détruire.

La connaissance des déformations sert à calculer les contraintes lorsqu'on connaît les lois qui lient ces grandeurs. Généralement, on utilise les relations linéaires du domaine élastique lorsqu'on étire un matériau.

D'autre part les jauges servent à réaliser des capteurs. Ces capteurs sont des dispositifs mécaniques destinés à transformer une grandeur physique quelconque, pression, force, accélération, etc., en déformation d'une pièce dite corps d'épreuve. Des jauges collées sur celle-ci détectent ces déformations, en vue de la mesure de la grandeur physique. Ces capteurs peuvent servir indéfiniment.



LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1: PROTOTYPE D'UN GARAGE DE VOITURE OU ON VOIT L'UTILITÉ DES CONSOLES COURTES EN BÉTON ARMÉ	21
FIGURE 1-2: CONSOLE COURTE DANS UNE CONSTRUCTION D'HABITATION	21
FIGURE 1-3: CONSOLES COURTES,.....	22
FIGURE 1-4 : APPUI DIRECT.....	23
FIGURE 1-5 : APPUI INDIRECTE	23
FIGURE 1-6 : PONT RIO-ANTIRION, EN GRÈCE [IMAGE INTERNET]	23
FIGURE 1-7: DIFFÉRENTES GÉOMÉTRIES DE CONSOLES COURTES	24
FIGURE 1-8: TRANSMISSION DES EFFORTS PAR DES BIELLES INCLINÉES DE 45° [CHA 53]	24
FIGURE 1-9: RENFORCEMENT DES CONSOLES COURTES AUX CONTRAINTES DE CISAILLEMENT, [NIE 61]	25
FIGURE 1-10: GÉOMÉTRIE DES CONSOLES UTILISÉES PAR KRIZ ET RATHS [KRI 65]	26
FIGURE 1-11: LES DÉTAILS DES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS ÉTUDIÉS PAR KRIZ ET RATHS [KRI 65]	26
FIGURE 1-12 : LES FORCES INTERNES ET DIMENSIONS PRINCIPALES UTILISÉES PAR PARK ET PAULAY [PAR 75]	28
FIGURE 1-13: MODÈLE DE CISAILLEMENT AVEC LE RENFORT PROPOSÉ PAR MATTOCK [MAT 74]	29
FIGURE 1-14 : MODÈLE PROPOSÉ À LA FLEXION PAR MATTOCK [MAT 74] [MAT 76]	30
FIGURE 1-15: (A) RÉPARTITION DES ARMATURES ET POSITION DE L'AXE DE ROTATION (B) DIAGRAMME LINÉAIRE DES CONTRAINTES SUR LES ARMATURES À LA SECTION D'ENCASTREMENT, [ROB 69]	33
FIGURE 1-16 . COURBES DE LA CONTRAINTE CONVENTIONNELLE ULTIME EXPÉRIMENTALE EN FONCTION DE ($\rho_s F_v$) POUR $\lambda = 0,2; 0,5;$ $0,8$ ET $F_c \approx 30$ MPA, [KHA 98]	34
FIGURE 1-17 : GÉOMÉTRIE DU CORPS D'ÉPREUVE [KRI 65].	36
FIGURE 1-18 : MODÉLISATION EXPÉRIMENTALE DU COMPORTEMENT DU TIRANT À L'ENCASTREMENT SELON KRIZ ET RATHS, [KRI 65]	38
FIGURE 1-19 : ISOSTATIQUES DE COMPRESSION ET DE TRACTION DANS UNE CONSOLE COURTE EN BÉTON ARMÉ SOUS CHARGEMENT [NIE 61].	40
FIGURE 1-20 : MÉCANISME DE FONCTIONNEMENT D'UNE CONSOLE COURTE EN BÉTON ARMÉ [NIE 61]	41
FIGURE 1-21 : MODES DE FISSURATION DU BÉTON NORMAL ('CONCRETE73')	44
FIGURE 1-22 : FISSURATION DE CONSOLES AVEC ET SANS CADRES HORIZONTAUX ; SELON [ROB 69]	45
FIGURE 1-23 : CONFIGURATIONS DES CONSOLES ÉTUDIÉES PAR ROBINSON, [ROB 69].	46
FIGURE 1-24: MÉCANISME DE RUPTURE PROPOSÉ PAR PARK ET PAULAY [PAR&AL 75]	46
FIGURE 1-25: (A) RUPTURE PAR TRACTION-FLEXION (FT), (B) RUPTURE PAR COMPRESSION-FLEXION (FC), (C): RUPTURE PAR FENDAGE (D), (D): RUPTURE PAR CISAILLEMENT (CE).	48
FIGURE 1-26 CAS OÙ LA FISSURE SUIV LES JOINTS D'UNE MAÇONNERIE SANS TRAVERSER LES MOELLONS.	55
FIGURE 1-27: BASCULEMENT D'UNE TÊTE, TASSEMENT DE FONDATION, GLISSEMENT DU VERSANT.	55
FIGURE 1-28: EPAUFRURE AFFECTANT LA CONTINUITÉ DU MATÉRIAU	56
FIGURE 1-29: MODÈLE EXPÉRIMENTAL NON RENFORCÉ [COR 01]	57
FIGURE 1-30: MODÈLE RENFORCÉ PAR CFRP [COR 01].....	57
FIGURE 1-31: CONFIGURATION DE CHARGEMENT DE PCI DESIGN HANDBOOK [COR 01]	58
FIGURE 1-32: DIMENSIONS DE LA CONSOLE [COR 01]	58
FIGURE 1-33: RÉSULTATS DES COURBES DES CONSOLES DE RENFORCÉES ET DE RÉFÉRENCE, [COR 01]	59
FIGURE 1-34: MODES DE RUPTURES DES CONSOLES, [COR 01].....	60
FIGURE 1-35: MODÈLE RENFORCÉ PAR UN TISSUS CFRP, [COR 01].	60

FIGURE 1-36: ÉPROUVETTES (A) CONT, (B) 11HOR, (C) 21HOR, (D) 61DIG, (E) 32HOR, (F) 82 HAD, [ELG 05].....	61
FIGURE 1-37 : RÉSULTATS DES TESTS RÉALISÉS [ELG 05]	63
FIGURE 1-38 : CONFIGURATION DES ARMATURES DES CONSOLES UTILISÉES PAR [CAM 05]	64
FIGURE 1-39 : DISPOSITION EXPÉRIMENTAL, [CAM 05]	65
FIGURE 1-40 : MODÈLE ÉQUIVALENT EN TREILLIS [CAM05]	66
FIGURE 1-41 : MODÈLE THÉORIQUE, [CAM05].....	66
FIGURE 1-42: DIAGRAMME DE DISTRIBUTION DES DÉFORMATIONS ET DES CONTRAINTES DANS LA SECTION D'UNE CONSOLE RENFORCÉE, [HWA 00].	67
FIGURE 1-43: DÉTAIL DE LA GÉOMÉTRIE DES CONSOLES ET DES ARMATURES, [AHM 10]	69
FIGURE 1-44 : CONFIGURATION DES CONSOLES RENFORCÉES, [AHM 10].	70
FIGURE 1-45 : MODES DE FISSURATION DES CONSOLES DE RÉFÉRENCE CBR-01 ET CBR-02, [AHM 10].....	71
FIGURE 1-46: DÉTAILS DES DIFFÉRENTS TYPES DE RENFORCEMENT À LA FLEXION [ANI 12]	72
FIGURE 1-47 : DÉTAILS D'AUTRES TYPES DE RENFORCEMENT [ANI 12]	73
FIGURE 2-1: ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES GRANULATS UTILISÉS	79
FIGURE 2-2: MESURE DE L'AFFAISSEMENT AU CÔNE D'ABRAMS	80
FIGURE 2-3: REMPLISSAGE DU CÔNE D'ABRAMS	80
FIGURE 2-4: MESURE DE L'AFFAISSEMENT DU BÉTON	80
FIGURE 2-5: MACHINE DE COMPRESSION "CONTROLAB"	81
FIGURE 2-6: PRINCIPE DU SURFAÇAGE DES ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES À L'AIDE DU SOUFRE	81
FIGURE 2-7: EPROUVETTES CYLINDRIQUES	82
FIGURE 2-8: POSITION DES JAUGES DE DÉFORMATION SUR L'ÉPROUVETTE	82
FIGURE 2-9: COURBE « CONTRAINTE-DÉFORMATION » EN COMPRESSION DU BÉTON UTILISÉ	82
FIGURE 2-10: MODE DE RUPTURE DES ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES EN COMPRESSION	83
FIGURE 2-11 : FORME CONIQUE CARACTÉRISTIQUE DE LA RUPTURE D'ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES EN BÉTON	83
FIGURE 2-12: DISPOSITIF POUR L'ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION 4 POINTS SUR LES ÉPROUVETTES PRISMATIQUES ET L'ÉPROUVETTE APRÈS LA RUPTURE.....	83
FIGURE 2-13: COURBE « FORCE-DÉFORMATION » OBTENUE DANS UN ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION D'UNE ÉPROUVETTE 10X10X40 CM DU BÉTON UTILISÉ.....	84
FIGURE 2-14 : COMPORTEMENT DU BÉTON (PARK, 1975).	85
FIGURE 2-15: COURBE « CONTRAINTE-DÉFORMATION » D'UNE BARRE D'ACIER (ϕ 10CM) SOLLICITÉE EN TRACTION SIMPLE.....	85
FIGURE 2-16: RELATION ENTRE LA CONTRAINTE ET LA DÉFORMATION DE L'ACIER.....	86
FIGURE 2-17: TISSUS EN FIBRES DE CARBONE UNIDIRECTIONNELLES	90
LES JAUGES DE DÉFORMATION APPELÉES « ROSETTES » COLLÉES SUR LES ÉPROUVETTES COMME LE MONTRE SUR LA FIGURE 2-20, PERMETTENT DE DÉTERMINER LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES TISSUS EN FIBRES DE CARBONE UNIDIRECTIONNELLES. LA FIGURE 2-18 PRÉSENTE LA COURBE « FORCE-DÉFORMATION » OBTENUES LORS DES ESSAIS DE TRACTION POUR LE MATÉRIAU COMPOSITE EN FIBRES DE CARBONE.	91
FIGURE 2-19 : COMPORTEMENT DE LA PLAQUE EN TISSU DE FIBRES DE CARBONE UNIDIRECTIONNELLES.	91
FIGURE 2-20: RUPTURE D'UNE ÉPROUVETTE COMPOSITE EN FIBRES DE CARBONE UNIDIRECTIONNELLES SOLLICITÉE EN TRACTION	91
FIGURE 2-21 : TISSU EN FIBRES DE CARBONE BIDIRECTIONNELLES	92
FIGURE 2-22 : COMPORTEMENT DE LA PLAQUE EN TISSU DE FIBRES DE CARBONE BIDIRECTIONNELLES.....	92
FIGURE 2-23 : RUPTURE D'UNE PLAQUE COMPOSITE EN TISSU DE FIBRES DE CARBONE BIDIRECTIONNELLES À 45° SOLLICITÉE EN TRACTION.....	93
FIGURE 2-24: LAMELLE EN FIBRES DE CARBONE SIKA CARBODUR S1012.....	93
FIGURE 2-25: RÉSINE ÉPOXYDE THIXOTROPE À 2 COMPOSANTS, COMPOSANT A – « BLANC » ET COMPOSANT B –« GRIS »	94

FIGURE 2-26 : MÉLANGE DE A + B —« GRIS CLAIR »	94
FIGURE 2-27 : L'ADHÉSIF SOUS TRACTION SIMPLE.	94
FIGURE 2-28 : COURBE « FORCE-DÉFORMATION » EN TRACTION DE LA COLLE ADHÉSIVE "SIKADUR-330"	95
FIGURE 2-29 : RUPTURES DES ÉPROUVETTES ADHÉSIVES INSTRUMENTÉES D'UNE ROSETTE DE JAUGES ÉLECTRIQUES	95
FIGURE 3-1 : GÉOMÉTRIE ET DIMENSIONS DES CONSOLES COURTES EN BÉTON ARMÉ.....	100
FIGURE 3-2 : FERRAILLAGE DES CONSOLES COURTES	101
FIGURE 3-3 : MISE EN PLACE DES JAUGES	102
FIGURE 3-4 : PROTECTION DES JAUGES	102
FIGURE 3-5 : MISE EN PLACE DU BÉTON	103
FIGURE 3-6 : TRAITEMENT DE SURFACE PAR SABLAGE	103
FIGURE 3-7 : COLLAGE DE MATÉRIAUX COMPOSITES	104
FIGURE 3-8 : MISE EN PLACE DES JAUGES SUR MATÉRIAU COMPOSITE ET SUR LE BÉTON	104
FIGURE 3-9 : DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	105
FIGURE 3-10 : POSITION DES JAUGES ÉLECTRIQUES DANS LES CONSOLES COURTES.	110
FIGURE 3-11: COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE DE RÉFÉRENCE(C0), OBTENUES PAR DES JAUGES «G1», «G3» ET «G4» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT SUR L'ACIER.	113
FIGURE 3-12 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE COURTE DE RÉFÉRENCE (C0), OBTENUES PAR LES JAUGES «G5», «G6» ET «G7» SUR LA BARRE D'ACIER DU POTEAU.....	114
FIGURE 3-13 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE COURTE DE RÉFÉRENCE (C0), OBTENUES PAR LES JAUGES «GB1», «GB3» ET «GB6» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT SUR LE BÉTON.	114
FIGURE 3-14: COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE DE RÉFÉRENCE(C0) : OBTENUES PAR DES JAUGES «G1» ET «G2» SUR LE TIRANT.....	115
FIGURE 3-15: INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA PLAQUE COMPOSITE SUR LA CHARGE ULTIME	116
FIGURE 3-16 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CP1, OBTENUES PAR DES JAUGES «G1», «GC1», «GC3» ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT.	117
FIGURE 3-17 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CP3U, OBTENUES PAR DES JAUGES «G1», «GC1», «GC3» ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT	118
FIGURE 3-18: INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE PLAQUE COMPOSITE DES CONSOLES CP1 ET CP3, AU POINT «G1» ET «G2» SUR LE TIRANT.	119
FIGURE 3-19: INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE PLAQUE COMPOSITE AU POINT « GC1 » DU MATÉRIAU COMPOSITE DES CONSOLES RENFORCÉE CP1U, CP3U ET NON RENFORCÉE C0 (« GB1 » AU MÊME POINT IDENTIQUE QUE « GC1 »).....	119
FIGURE 3-20: INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU TISSU COMPOSITE SUR LA CHARGE DE RUPTURE D'UNE CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDAGE.....	120
FIGURE 3-21 . COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CB1U, OBTENUES PAR DES JAUGES «G1», «GC1», «GC3» ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT.	121
FIGURE 3-22 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CB1U, OBTENUES PAR LES JAUGES «G1» ET «G2» SUR LE TIRANT.	122
FIGURE 3-23 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CB2U, OBTENUES PAR DES JAUGES «G1», «GC1», «GC3» ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT.	123
FIGURE 3-24: COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DA LA CONSOLE CB2U, OBTENUES PAR LES JAUGES «G1» ET «G2» SUR LE TIRANT	124
FIGURE 3-25 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CB3U, OBTENUES PAR DES JAUGES «G1», «GC1», «GC3» ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT.	125

FIGURE 3-26: COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CB3U, OBTENUES PAR LES JAUGES «G1» ET «G2» SUR LE TIRANT	125
FIGURE 3-27 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CB5U, OBTENUES PAR DES JAUGES «G1», «GC1», «GC3» ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT.	126
FIGURE 3-28 : COURBES DES COMPORTEMENTS DU TIRANT EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES TISSUS COMPOSITES ENREGISTRÉE PAR LA JAUGE « GC1 » DES CONSOLES CB1U, CB2U, CB3U, CB5U ET C0, CONSOLE DE RÉFÉRENCE.....	127
FIGURE 3-29: COURBES DE L'INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE BANDAGE DES TISSUS COMPOSITES ENREGISTRÉES PAR LA JAUGE « GC1 » DES CONSOLES CB1U, CB2U, CB3U, CB5U ET C0.....	128
FIGURE 3-30: COMPARAISON DES DÉFORMATIONS DE LA PLAQUE COMPOSITE ENREGISTRÉE PAR LA JAUGE « GC3 » DE LA PLAQUE COMPOSITE POUR DIFFÉRENTES ÉPAISSEURS CB1U, CB2U, CB3U ET CB5U	128
FIGURE 3-31: COMPARAISON DE LA DÉFORMATION DU BÉTON ENREGISTRÉE PAR LA JAUGE « GB1 » POUR DIFFÉRENTES ÉPAISSEURS: CB1U, CB2U, CB3U ET CB5U.....	129
FIGURE 3-32: COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CPC, OBTENUES PAR DES JAUGES «G1», «G3», «G4», «GC1», ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT.....	130
FIGURE 3-33: COMPARAISON DES DÉFORMATIONS LOCALES DES JAUGES « G1 » ET « G2 », DANS DES CONSOLES CPC ET CP1U.	131
FIGURE 3-34: COMPARAISON DES DÉFORMATIONS DU TISSU AU POINT « GC1 » DES CONSOLES RENFORCÉES CP1U, CPC.....	132
FIGURE 3-35 : COMPARAISON DE DÉFORMATION DU BÉTON AU POINT « GB1 » DES CONSOLES CP1U ET CPC.....	132
FIGURE 3-36 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CB2B, PRÉSENTÉ PAR DES JAUGES «G1», «GC1», «GC3» ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT.	133
FIGURE 3-37 : COMPARAISON DES DÉFORMATIONS DU TIRANT ENREGISTRÉES PAR LES JAUGES « G1 » ET « G2 » DES CONSOLES CB2B ET CB2U.....	134
FIGURE 3-38 : COMPARAISON DES DÉFORMATIONS DU TISSU AU POINT « GC1 » SUR MATÉRIAU COMPOSITE DE CONSOLES RENFORCÉES CB2B ET CB2U ET NON RENFORCÉE C0 (« GB1 » AU POINT IDENTIQUE QUE « GC1 »).....	135
FIGURE 3-39 : COMPARAISON DES DÉFORMATIONS DU TISSU AU POINT « GC3 » SUR MATÉRIAU COMPOSITE DES CONSOLES RENFORCÉES CB2B ET CB2U ET NON RENFORCÉE C0 (« GB3 » AU POINT IDENTIQUE QUE « GC3 »).....	135
FIGURE 3-40 : COMPARAISON DE DÉFORMATION DU BÉTON AU POINT « GB1 » SUR LE BÉTON COMPOSITE DES CONSOLES RENFORCÉES CB2B ET CB2U ET NON RENFORCÉE C0 (« GB6 » AU POINT IDENTIQUE QUE « GB1 »)	136
FIGURE 3-41 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CB3U(5CM), OBTENUES PAR DES JAUGES «G1», «GC1», ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT	137
FIGURE 3-42 : COMPARAISON DE LA DÉFORMATION DU TIRANT PRÉSENTÉ PAR LES JAUGES « G1 » ET « G2 » DES CONSOLES RENFORCÉE CB3U ET CB3U(5CM)	137
FIGURE 3-43 : LES DEUX CONFIGURATIONS A ET B DU COLLAGE EN U DES PLAQUES COMPOSITES	138
FIGURE 3-44 : INFLUENCE DE LA LONGUEUR D'ENCRAGE	139
FIGURE 3-45 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CU+3U, PRÉSENTÉ PAR DES JAUGES «G1», «GC1», « GC3 » ET «GB1» DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT.	140
FIGURE 3-46 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE CU3U, PRÉSENTÉ PAR LES JAUGES «GC1», «GC3», «GB1», «G1» ET « G2 » SUR LE BÉTON, MATÉRIAU COMPOSITE ET SUR L'ACIER.....	140
FIGURE 3-47 : COURBES «FORCE-DÉFORMATION» DE LA CONSOLE COURTE CU3U, PRÉSENTÉ PAR LES JAUGES «GC1», «GC3» ET «GB1» SUR LE BÉTON ET MATÉRIAU COMPOSITE.	141
FIGURE 3-48 : COMPARAISON DE LA DÉFORMATION DU TIRANT AUX POINTS « G1 » ET « G2 » DE LA CONSOLE COURTE RENFORCÉE CU3U ET CU3U.	141
FIGURE 3-49 : COMPARAISON DES DÉFORMATIONS DU TIRANT ENREGISTRÉE PAR LA JAUGE « G1 » DES CONSOLES CB3U, CP3U, CU+3U ET CU3U	142

FIGURE 3-50 : COMPARAISON DES DÉFORMATIONS DU TIRANT ENREGISTRÉE PAR LA JAUGE « G2 » DES CONSOLES CB3U, CP3U, CU+3U ET CU3U	143
FIGURE 3-51 : COMPARAISON DE LA DÉFORMATION PRÉSENTÉE PAR JAUGE « GC1 » DES CONSOLES CB3U, CP3U, CU+3U ET CU3U	143
FIGURE 3-52 : INFLUENCE DE DIFFÉRENTS TYPES DE RENFORCEMENT PAR PLAQUES COMPOSITES BIDIRECTIONNELLES INCLINÉES SUR LA CHARGE DE RUPTURE	145
FIGURE 3-53 : COMPARAISON DES DÉFORMATIONS DU TIRANT PRÉSENTÉ PAR LA JAUGE « G1 » DES CONSOLES CI2B, CIU2B, CI2B+B3U(5cm) ET CIU2B+B3U(5cm)	145
FIGURE 3-54: ÉTAT DES DÉFORMATIONS DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT D'UNE CONSOLE NON RENFORCÉE.	146
FIGURE 3-55: DISTRIBUTION DES DÉFORMATIONS DANS LA CONSOLE CB1U.	146
FIGURE 3-56 : DISTRIBUTION DES DÉFORMATIONS DANS LA CONSOLE CB2U.	147
FIGURE 3-57 : DISTRIBUTION DES DÉFORMATIONS DANS LA CONSOLE CB3U.	147
FIGURE 3-58: DISTRIBUTION DES DÉFORMATIONS DANS LA CONSOLE CB5U:	148
FIGURE 3-59 : DISTRIBUTION DES DÉFORMATIONS DANS LA CONSOLE CB2B.....	148
FIGURE 3-60 : FISSURATION ET RUPTURE DE LA CONSOLE DE RÉFÉRENCE C0.	149
FIGURE 3-61 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDAGE, 1 COUCHE UNIDIRECTIONNELLE - CB1U	151
FIGURE 3-62 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDAGE, 2 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES - CB2U.....	151
FIGURE 3-63 : RUPTURE DE CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDAGE, 3 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES - CB3U	151
FIGURE 3-64 : RUPTURE DE CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDAGE, 5 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES - CB5U	152
FIGURE 3-65: RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDAGE, 2 COUCHES BIDIRECTIONNELLES - CB2B.....	152
FIGURE 3-66 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDAGE 3 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES ET 5CM DE LARGEUR CB3U(5cm).....	153
FIGURE 3-67 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR PLAQUES DE DEUX CÔTES, 1 COUCHE UNIDIRECTIONNELLE - CP1U	154
FIGURE 3-68 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR PLAQUES DE DEUX CÔTES, 2 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES - CP2U	154
FIGURE 3-69 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR PLAQUES DE DEUX CÔTES, 3 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES – CP3U	155
FIGURE 3-70 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR PLAQUE DE DEUX CÔTES, 3 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES + PLAQUE COLLÉE SUR LES DEUX APPUIS – CP3U + PA3U	155
FIGURE 3-71 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR PLAQUE "CARBODUR" DE DEUX CÔTES – CPC	155
FIGURE 3-72 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR PLAQUE EN FORME U+, 3 COUCHES UNIDIRECTIONNELLE – CU+3U	156
FIGURE 3-73 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR PLAQUE EN FORME U, 3 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES – CU3U.....	157
FIGURE 3-74 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDES INCLINÉES DE DEUX CÔTES (CI2B)	158
FIGURE 3-75 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDES INCLINÉES EN FORME DE U DES DEUX CÔTES (CIU2B)	158
FIGURE 3-76 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDES INCLINÉES DE DEUX CÔTES PLUS BANDAGE 3 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES DE 5CM DE LARGEUR (CI2B+B3U(5cm))	159
FIGURE 3-77 : RUPTURE DE LA CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDES INCLINÉES EN FORME DE U DES DEUX CÔTES PLUS BANDAGE 3 COUCHES UNIDIRECTIONNELLES DE 5CM DE LARGEUR (CIU2B+B3U(5cm))	159
FIGURE 3-78 : DIFFÉRENTES PHASES DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'ACIER DES CONSOLES COURTES NON RENFORCÉE ET CONSOLE COURTE RENFORCÉE.	160
FIGURE 3-79 : DIFFÉRENTES PHASES DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'ACIER ET MATÉRIAU COMPOSITE DE LA CONSOLE COURTE RENFORCÉE	161
FIGURE 3-80: RUPTURE DE LA PLAQUE COMPOSITE	163
FIGURE 3-81: RUPTURE PAR FLEXION ET DÉCOLLEMENT À L'EXTRÉMITÉ DE LA PLAQUE	163
FIGURE 3-82: RUPTURE PAR COMPRESSION	163
FIGURE 3-83: RUPTURE PAR CISAILLEMENT.....	163

FIGURE 3-84: RUPTURE FLEXION-FENDAGE.....	163
FIGURE 3-85: RUPTURE PAR FENDAGE.....	163
FIGURE 4-1 : DIMENSION DE LA CONSOLE COURTE EN BÉTON ARMÉ.....	168
FIGURE 4-2 : (A) RÉPARTITION DES ARMATURES ET POSITION DE L'AXE DE ROTATION (B) DIAGRAMME LINÉAIRE DES CONTRAINTES SUR LES ARMATURES À LA SECTION D'ENCASTREMENT, [ROB 69].....	168
FIGURE 4-3 : MÉCANISME DE FONCTIONNEMENT D'UNE CONSOLE COURTE EN BÉTON ARMÉ [NIE 61].....	170
FIGURE 4-4 : DIAGRAMMES DES DÉFORMATIONS ET DES CONTRAINTES DANS LA SECTION D'ENCASTREMENT.....	174
FIGURE 4-5: ORGANIGRAMME DE CALCUL DE LA CHARGE APPLIQUÉE EN FONCTION DE LA DÉFORMATION DU TIRANT : CALCUL DE LA CHARGE DE RUPTURE.....	180
FIGURE 4-6: COMPARAISON COURBES THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE.....	181
FIGURE 5-1 : LA COURBE DE WÖHLER.....	186
FIGURE 5-2: MISE EN PLACE DES CONSOLES EN BÉTON ARMÉ POUR LES ESSAIS DE FATIGUE.....	189
FIGURE 5-3: COMPARAISON DE COMPORTEMENT D'UNE CONSOLE NON RENFORCÉE ET CELUI D'UNE CONSOLE RENFORCÉE PAR BANDAGE D'UNE PLAQUE COMPOSITE EN FIBRES DE CARBONE.....	190
FIGURE 5-4: FORME DES CONTRAINTES ONDULÉES.....	191
FIGURE 5-5: COMPARAISON DE COMPORTEMENT ENTRE CONSOLE APRÈS UN MILLION DE CYCLES "G1-C0 FATIGUE" ET LA CONSOLE DE RÉFÉRENCE"G1-C0" TOUTES LES DEUX SOUMISES À UN ESSAI DE FLEXION SIMPLE.....	192
FIGURE 5-6: COMPORTEMENT DU BÉTON AVANT ET APRÈS UN MILLION DE CYCLES.....	193
FIGURE 5-7: DÉFORMATIONS DU TIRANT À LA SECTION ENCASTREMENT (G1) DURANT UN MILLION DE CYCLES.....	194
FIGURE 5-8: DÉFORMATIONS DU TIRANT À L'APPUI (G2) DURANT UN MILLION DE CYCLES.....	194
FIGURE 5-9: APRÈS UN MILLION DE CYCLES D'UNE CONSOLES EN BÉTON ARMÉ NON RENFORCÉE.....	195
FIGURE 5-10: VUE DE PRÈS DE LA FISSURE DIAGONALE APRÈS 1 MILLION DE CYCLES.....	195
FIGURE 5-11: SOUS CHARGEMENT MONOTONE JUSQU'À LA RUPTURE.....	195
FIGURE 5-12: ESSAIS DE FATIGUE SUR UNE CONSOLE EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉE CB3U.....	196
FIGURE 5-13: APRÈS 1 MILLION DE CYCLES D'UNE CONSOLE RENFORCÉE.....	197

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1: VARIATION DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES [KRI 65]	36
TABLEAU 1-2 : INTERVALLES DE VARIATIONS DES PARAMÈTRES INFLUENTS POUR CHAQUE MODÈLE [KHA 98].....	49
TABLEAU 1-3 : COMPARAISONS DES DIFFÉRENTS MODÈLES	50
TABLEAU 1-4 : DÉTAIL DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES ÉTUDIÉS PAR [CAM 05].....	64
TABLEAU 1-5 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE L'ACIER [CAM 05].....	65
TABLEAU 1-6 : LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES BÉTONS EN FIBRES MÉTALLIQUES OU ORDINAIRE [CAM 05].....	65
TABLEAU 1-7 : RÉSULTATS DES ESSAIS DE FLEXION SUR LES CONSOLES, [CAM 05].....	65
TABLEAU 1-8 : COMPARAISON DES RÉSULTATS ANALYTIQUES ET THÉORIQUES, [CAM 05]	69
TABLEAU 1-9 : CONFIGURATION DES CONSOLES EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉES, [AHM 10].....	70
TABLEAU 1-10 : RÉSULTATS DES TESTS, [AHM 10].....	71
TABLEAU 2-1: COMPOSITION EN MASSE POUR 1M ³ DE BÉTON	80
TABLEAU 2-2 : CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON SOLlicitÉ EN COMPRESSION.....	82
TABLEAU 2-3: CARACTÉRISTIQUES DE L'ACIER UTILISÉ ϕ 10CM.	86
TABLEAU 2-4 : RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION DES FIBRES UNIDIRECTIONNELLES	90
TABLEAU 2-5 : CARACTÉRISTIQUES DES PLAQUES EN TISSU DE FIBRES DE CARBONE BIDIRECTIONNELLES	92
TABLEAU 2-6 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE LA LAMELLE CARBODUR S1012.....	93
TABLEAU 2-7 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE L'ADHÉSIVE SAKADUR-330	95
TABLEAU 2-8: PROPRIÉTÉS DE LA COLLE "SIKADUR 30"	96
TABLEAU 3-1 : LA CONFIGURATION DES SPÉCIMENS TESTÉS	109
TABLEAU 3-2 : POSITION DES JAUGES	111
TABLEAU 3-3: INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA PLATE COMPOSITE SUR LA CHARGE DE RUPTURE.....	116
TABLEAU 3-4: INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU BANDAGE SUR LA CHARGE ULTIME. (N= NOMBRE DE COUCHES).....	120
TABLEAU 3-5: INFLUENCE DE TISSU ET DE LA PLAQUE COMPOSITES EN FIBRES DE CARBONE	130
TABLEAU 3-6 : INFLUENCE DU TYPE DE TISSUS SUR LA CHARGE ULTIME	133
TABLEAU 3-7 : L'EFFET DU BANDAGE SUR LA CHARGE ULTIME.....	136
TABLEAU 3-8 : RÉSULTATS DU TYPE DE RENFORCEMENT DES CONSOLES	139
TABLEAU 3-9 : INFLUENCE DES PLAQUES INCLINÉES SUR LA CHARGE ULTIME DES CONSOLES RENFORCÉES.....	144
TABLEAU 3-10 : CHARGES CARACTÉRISTIQUES ET TYPES DE RUPTURES DES CONSOLES RENFORCÉES PAR BANDAGE	150
TABLEAU 3-11 : CHARGES CARACTÉRISTIQUES ET TYPES DE RUPTURES DES CONSOLES RENFORCÉES PAR PLAQUE DE DEUX COTES....	153
TABLEAU 3-12 : CHARGES CARACTÉRISTIQUES ET TYPES DE RUPTURES DES CONSOLES RENFORCÉES PAR PLAQUE EN FORME U	156
TABLEAU 3-13 : CHARGES DES RUPTURES ET TYPES DE RUPTURES DES CONSOLES RENFORCÉES PAR BANDES INCLINÉES.....	157
TABLEAU 3-14 : LA RIGIDITÉ, DE LA CONSOLE COURTE RENFORCÉE EN FONCTION DE DIFFÉRENTS TYPES DE RENFORCEMENT	161
TABLEAU 3-15 : LES PRINCIPAUX TYPES DE RUPTURES	163
TABLEAU 4-1 : COMPARAISON DE LA CHARGE ULTIME OBTENUE ANALYTIQUEMENT ET EXPÉRIMENTALEMENT.	170
TABLEAU 4-2 : COMPARAISON DE LA CHARGE ULTIME OBTENUE PAR LA THÉORIE ET LE TEST POUR LES CONSOLES RENFORCÉES	172

RÉSUMÉ

Ce travail porte sur l'étude du comportement mécanique d'une console courte en béton armé renforcée par collage de tissus en fibres de carbone et en particulier sur l'influence du nombre de couches de tissus en fibres de carbone, du type du renforcement, de l'orientation des tissus composites, du type de tissus en fibres de carbone.

Les résultats montrent que la performance de la console n'augmente pas linéairement en fonction de l'épaisseur de la plaque composite. Il existe une épaisseur optimale de tissus en fibres de carbone. Dans le cas du renforcement sur les deux faces du béton, il existe un nombre de couches optimales. Dans le cas du renforcement par bandage, l'épaisseur de matériaux composites plus intéressants est de trois couches. Par contre, la résistance de la console renforcée dépend fortement de la surface renforcée.

Les résultats montrent également que le comportement d'une console renforcée peut être présenté en trois phases: la phase élastique globale, la phase de la propagation de fissures et la phase de l'ouverture des fissures diagonales. Le renforcement de la console permet d'augmenter considérablement la résistance ultime de 20 à 82% et la rigidité de la console. Les ruptures des consoles renforcées peuvent être résumées en cinq modes.

En se basant sur les résultats obtenus et les modèles existants, la résistance ultime de la console renforcée et non renforcée a été estimée et analysée. Un modèle basant sur la théorie de l'endommagement a été développé dans ce travail. L'effet de fatigue sur le comportement et sur la résistance ultime de la console courte renforcée a été également étudié dans ce travail.

Mots clefs : *renforcement, console courte, comportement mécanique, matériaux composites, béton armé, endommagement, mécanisme de fissuration et de rupture, collage.*

ABSTRACT

This study deals with mechanical behaviour of strengthening reinforced concrete corbel by bonding carbon fibre sheet and in particular the influence of the number of layers of carbon fiber fabric, the type of strengthening, the orientation of the composite fabric and the type of carbon fiber fabrics .

The results show that the performance of the corbel does not increase linearly with the thickness of the composite plate. There is an optimum thickness of the carbon fiber fabrics. In the case of strengthening on both sides of the concrete, there are an optimum number of layers. In the case of fully wrapped strengthening, the most interesting thickness of the composite is three layers. However, the resistance of the strengthening reinforced concrete corbel depends strongly on the bonded surface.

The results also show that the behavior of strengthening corbel can be presented in three phases: the overall elastic phase, the phase of crack propagation and the phase of the opening of diagonal cracks. Strengthening the corbel can significantly increase the ultimate strength from 20% to 82 % and the stiffness of the corbel. The failure of the strengthening corbel can be summarized in five modes.

Based on the results obtained and the existing models, the ultimate strength of the strengthening corbel or without strengthening, was estimated and analyzed. A model based on damage theory has been developed in this work. The effect of fatigue on the behavior and ultimate strength of the reinforced concrete corbel has also been studied.

Keywords: *strengthening, short corbel, mechanical behaviour, composite materials, reinforced concrete, damage, mechanism of crack and failure, bonding*
