

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun De Tiaret.

Faculté Des Sciences Appliquées

Département Génie Civil



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Présenté par :

SAFAR Djamila

TOUATI Saliha

Sujet du mémoire :

**Etude des poutres mixtes en acier par collage des dalles en
matériaux légers : Analyse et modélisation**

Soutenu publiquement Le 25./06./2024, devant le jury composé de :

Pr. Mohamed ZIDOUR

Pr. Tahar HASSAINE DAOUADJI

Pr. Tayeb BENSATTALAH

Dr. Abdelkader SAOULA

Dr. Aicha KABLIA

Président

Rapporteur

Co- Rapporteur

Examineur

Examinatrice

Promotion : 2023/2024

Remerciement

Remerciements Au nom d'Allah, le Clément, le Miséricordieux, paix et bénédictions sur son Prophète Mohammed. Nous tenons à exprimer notre gratitude envers Allah le Tout-Puissant pour nous avoir donné la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

Nous sommes sincèrement reconnaissants envers Monsieur Tahar HASSAIN DAOUADJI qui, en tant qu'encadreur, a été attentif et disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire. Sa décision d'encadrer notre travail, ainsi que l'aide et le temps qu'il a généreusement accordés, méritent notre reconnaissance. Nous présentons nos excuses les plus sincères à notre encadreur si nous avons été en retard dans notre travail. Sans son soutien précieux, sa patience, sa gentillesse, son professionnalisme et ses encouragements, ce travail n'aurait pas pu être accompli. Nous lui exprimons donc notre profonde gratitude pour son soutien, ses remarques et ses conseils judicieux qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail. Nous tenons également à remercier notre chère Co-encadrante, Pr. Tayeb BENSATTALAH, pour son assistance et ses orientations dans le domaine de la programmation tout au long de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers les membres du jury, le Dr. AbdeLkader SAOULA et le Pr. Mohamed ZIDOUR.

Dédicace

À mes chers parents, dont le soutien indéfectible et l'amour inconditionnel ont été ma source d'inspiration et de force tout au long de ce parcours académique.

À ma tendre grand-mère, dont la sagesse et les prières ont illuminé mon chemin et m'ont donné le courage d'aller de l'avant dans les moments difficiles.

À mes sœurs, qui ont été mes compagnes de voyage, mes confidentes.

À toute ma grande famille et mes voisins, ainsi qu'à mes amis proches qui m'ont encouragé sans relâche.

À vous tous, je dédie ce mémoire avec une profonde gratitude et un immense amour. Vos encouragements, votre soutien et votre présence ont rendu cette réalisation possible. Puissent vos bénédictions continuer à illuminer mon chemin vers de nouveaux défis et de nouvelles réalisations.

Je dédie ce modeste travail S.Djamila

Dédicace

*A mes chers parents, Qui m'ont tout donné sans rien en retour Qui ont toujours
cru en moi Je vous aime énormément*

A mes frères: Tayeb, Youcef, Mohamed

A mes sœurs: Nawel, Khayra A toute ma grande famille et voisins.

*A mes amis: Mes amis d'enfance, Mes amis de la faculté Merci d'avoir toujours
partagé avec moi les moments de joie et de peine, Recevez à ce travail en
témoignage de tous les bons moments qu'on a passés ensemble..*

A tous ceux qui me sont chers.

Je dédie ce modeste travail T.Saliha

Résumé

Dans cette étude, un élément de structure de poutre composite acier-béton simplement supportée, liée avec un adhésif a été développé dans cette étude, la poutre composite acier-béton renforcée avec un élément de plaque CFRP peut être utilisée pour modéliser le comportement non linéaire des poutres composites. Le problème du glissement et des contraintes interfaces dans les poutres composites acier-béton renforcées par des plaques CFRP est analysé à l'aide de la théorie élastique linéaire. L'analyse est basée sur l'approche de compatibilité de déformation, où les contraintes de cisaillement et normales sont supposées être invariantes sur toute l'épaisseur de la couche adhésive. Le modèle adopté prend en compte les déformations de cisaillement adhérentes en supposant une contrainte de cisaillement linéaire à travers la profondeur de la poutre composite acier-béton. Cette solution est destinée à être appliquée aux poutres constituées de toutes sortes de matériaux liés par une fine plaque composite. Un effet remarquable des déformations par cisaillement des éléments a été noté dans les résultats. Nous observons que les cisaillements importants se concentrent et glissent sur les bords du composite acier-béton. Pour les sections de poutres composites acier-béton, un coefficient géométrique est déterminé pour montrer l'effet des déformations de cisaillement adhérentes. Les prédictions théoriques sont comparées à d'autres solutions analytiques et expérimentales existantes qui démontrent la précision de l'élément utilisé. La prédiction exacte de ces contraintes sera très importante pour faire une analyse précise du mode de rupture. Il est montré que les contraintes normales et de cisaillement à l'interface sont influencés par les paramètres de matériau et de géométrie de la poutre composite acier-béton. Cette étude est utile pour la compréhension du comportement mécanique de la connexion et de la conception de telles structures.

Mots clés : Solution analytique, adhésif, déformations en cisaillement, glissement, poutre composite, contrainte d'interface.

Abstract

In this study, a simply supported steel-concrete composite beam element, bonded with adhesive, was developed. The steel-concrete composite beam reinforced with a CFRP plate element can be used to model the nonlinear behavior of composite beams. The problem of slipping and interface stresses in CFRP-reinforced steel-concrete composite beams is analyzed using linear elastic theory. The analysis is based on the strain compatibility approach, where shear and normal stresses are assumed to be invariant across the adhesive layer's thickness. The adopted model considers adherent shear deformations by assuming a linear shear stress throughout the depth of the steel-concrete composite beam. This solution is intended to be applied to beams made of various materials bonded by a thin composite plate. A significant effect of shear deformations of the elements was noted in the results. We observe that significant shears concentrate and slip at the edges of the steel-concrete composite. For steel-concrete composite beam sections, a geometric coefficient is determined to show the effect of adherent shear deformations. Theoretical predictions are compared to other existing analytical and experimental solutions demonstrating the accuracy of the element used. The precise prediction of these stresses will be crucial for an accurate failure mode analysis. It is shown that normal and shear stresses at the interface are influenced by material and geometry parameters of the steel-concrete composite beam. This study is useful for understanding the mechanical behavior of the connection and designing such structures.

Keywords: Analytical solution, adhesive, shear deformations, slipping, composite beam, interface stress.

المخلص

في هذه الدراسة، تم تطوير عنصر هيكلي للجسر المركب الصلب - الخرسانة المدعوم ببساطة، وربطه بالمواد اللاصقة. يمكن استخدام الجسر المركب الصلب - الخرسانة المدعوم بعنصر لوح CFRP لنمذجة السلوك غير الخطي للجسور المركبة. يتم تحليل مشكلة الانزلاق وضغوط الواجهات في الجسور المركبة الصلب - الخرسانة المدعومة بألواح CFRP باستخدام نظرية المرنة الخطية. تستند التحليل إلى نهج التوافق في التشوهات، حيث يُفترض أن تكون الضغوط العرضية والطولية ثابتة عبر سمك طبقة المادة اللاصقة. يأخذ النموذج المعتمد في الاعتبار التشوهات العرضية الملتصقة عن طريق افتراض توزيع ضغوط القص الخطية عبر عمق الجسر المركب الصلب - الخرسانة. تهدف هذه الحلول إلى تطبيقها على الجسور المكونة من جميع أنواع المواد المرتبطة بلوحة مركبة رقيقة. لوحظ تأثير ملحوظ للتشوهات العرضية للعناصر في النتائج. نرى أن التشوهات الكبيرة تتركز وتنزلق على حواف الجسور المركبة الصلب - الخرسانة. بالنسبة لأقسام الجسور المركبة الصلب - الخرسانة، يتم تحديد معامل هندسي لإظهار تأثير التشوهات العرضية الملتصقة. تتم مقارنة التوقعات النظرية مع حلول تحليلية وتجريبية أخرى موجودة تُظهر دقة العنصر المستخدم. إن التنبؤ الدقيق لهذه الضغوط سيكون مهمًا لإجراء تحليل دقيق لوضع الكسر. يُظهر أن الضغوط الطولية والعرضية عند الواجهة يتأثرون بمعلمات المادة والهندسة للجسر المركب الصلب - الخرسانة. تعتبر هذه الدراسة مفيدة لفهم السلوك الميكانيكي للاتصال وتصميم مثل هذه الهياكل".

الكلمات الرئيسية: الحل التحليلي، المادة اللاصقة، التشوهات في الانحناء، الانزلاق، الجسر المركب، الضغط الواجهي.

Sommaire

Remerciement.....	I
Résumé.....	V
Abstract.....	VI
الملخص.....	VII
Sommaire.....	VII
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XVI
Notations	XVII
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur les structures mixtes

I.1 Introduction.....	4
I.2 Généralités sur les structures mixtes acier béton.....	4
I.2.1. Les poutres mixtes.....	5
I.2.2. Les dalles mixtes.....	6
I.2.3. Poteaux mixte acier-béton.....	7
I.3 Utilisation des structures mixtes dans la construction.....	8
I.4 Matériaux utilisés dans un élément mixte.....	9
I.5 Caractéristiques des matériaux utilisés dans la construction mixte.....	9
I.6 Comportement des matériaux utilise dans les structures mixtes acier-béton.....	12
I.7 Avantages de la construction mixte.....	16
I.8 Inconvénients de la construction mixte	17
I.9 Conclusion.....	17

Chapitre II : Collage des dalles en construction civil

II .1 Introduction	18
II .2 Les dalles légers	18
II .2.1. Historique	18
II .2.2. Définition et classification de béton léger	19
II.3 Association de deux matériaux	19
II.3 .1 Connexion par goujons	20

II.3 .2 La connexion par adhérence	23
II.3 .3 La connexion par collage	24
II.4 Conclusion	26
Chapitre III : Généralité sur les matériaux composites	
III.1 Introduction.....	27
III.2 Le concept général des matériaux composites.....	27
III.3 Définition.....	29
III.4 Le renfort.....	29
III.4.1 Revue des différents renforts disponibles.....	30
III.5 Les matrice.....	36
III.5.1 La matrice organique.....	36
III.5.2 Matrice céramique.....	37
III.5.3 Matrice métallique.....	38
III.6 Problèmes liés à l'utilisation des matériaux composites dans le génie civil.....	38
III.6.1 Introduction.....	38
III.6.2 Résistance des matériaux composites.....	38
III.6.3 Les propriétés du pli élémentaire.....	38
III.7 Caractéristiques du mélange renfort-matrice.....	40
III.8 Structures du composite	40
III.8.1 Les monocouches.....	41
III.8.2 Les stratifiées	41
III.8.3 Les sandwichs.....	43
III.9 Hybridation Intra fils.....	43
III.9.1 Introduction.....	43
III.9.2 Propriétés matérielles des composites hybrides	44
III.10 Les charges et additifs.....	46
III.11 Les adhésifs.....	47
III.12 Avantages et inconvénients des composites.....	47
III.13 Conclusion.....	48
Chapitre VI : Modélisation des poutres mixtes acier-béton	
VI.1 Introduction.....	49
VI.2 Importance de la l'étude.....	49
VI.3 Hypothèse de la présente méthode.....	50
VI.4 Analyse.....	52

VI.4.1 Interface 1	53
VI.4.2 Interface 2	64
VI.5 Conclusion	67

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Introduction.....	68
V.2. Présentation des caractéristiques mécaniques et géométrique des modèles.....	68
V.2.1. Caractéristiques mécaniques des modèles.....	68
V.2.2. Présentation géométrique des modèles	69
V.3. Résultats et discussion	74
V.3.1. Modèle 1 et 2 : interface 1	74
V.3.2. Modèle 1 et 2 : Interface 2	83
V.3.3. Modèle 3 : interface 1 : Poutre en section Té.....	88
V.3.4. Modèle 4 : interface 1 : Poutre à section Sections Variables.....	91
V.4. Conclusion.....	93
Conclusion et perspective.....	94
Référence bibliographique	96

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les structures mixtes

<i>Figure I-1: Elément de construction</i>	5
<i>Figure I-2 : Profilé connecté à une dalle mixte</i>	6
<i>Figure I-3: Utilisation des dalles préfabriquées</i>	6
<i>Figure I-4 : Type des poteaux mixtes</i>	7
<i>Figure I-5 :Relation contrainte déformation spécifique des aciers</i>	10
<i>Figure I-6 : Diagramme contrainte déformation de calcul des armatures</i>	10
<i>Figure-7 : Diagramme parabolique conventionnel</i>	11
<i>Figure I-8 :Loi de comportement de l'acier doux</i>	11
<i>Figure I-9 : Critère de Von Mises dans le plan 2D</i>	13
<i>Figure I-10 : Etat bi-axiale des contraintes</i>	13
<i>Figure I-11 : Loi de comportement du béton en traction</i>	13
<i>Figure I-12 : Représentation du critère Drucker-Prager dans des repères de contraintes Principales</i>	15

Chapitre II : Collage des dalles en construction civil

<i>Figure II.7 : Exemples de connecteurs</i>	21
<i>Figure II.8: Types de connecteurs utilisés dans les poutres mixtes</i>	21
<i>Figure II.9: Connexion de la dalle préfabriquée à l'aide de groupes de goujons</i>	22
<i>Figure II.10: Exemple de connexion par adhérence</i>	24
<i>Figure II.11: Schéma de classement des connecteurs pour les structures mixtes</i>	25

Chapitre III : Généralité sur les matériaux composites

<i>Figure III-1 : Conception d'un matériau composite</i>	28
<i>Figure III-2 : Description d'un matériau composite</i>	29
<i>Figure III-3 : La classification des types de renforts</i>	30
<i>Figure III-4 : Exemples des fibres de carbone</i>	31
<i>Figure III-5 : Fibres de verre</i>	32
<i>Figure III-6 : Histogramme des résistances à la rupture en traction des fibres</i>	33

<i>Figure III-7 : Propriétés des fibres d'aramide.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure III-8 : Fibres métalliques.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III-9 : Fibres naturelles.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III-10 : Relation contrainte déformation en traction pour les différents composants.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III-11 : Illustration d'un renfort fibreux unidirectionnel.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure III-12 : composite monocouche.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure-III-13 : Une plaque stratifiée.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure-III-14 : Matériau composite stratifié.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III-15 : Composite sandwich.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III-16 : Système de coordonnées utilisées pour une plaque hybride intrafils.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure III-17 : Exemples des charges.....</i>	<i>47</i>

Chapitre VI : Modélisation des poutres mixtes acier-béton

<i>Figure VI.1 : Vue en coupe d'une poutre composite acier-béton reliée mécaniquement (modèle existant) et collée (nouveau modèle).....</i>	<i>50</i>
<i>Figure VI.2a : Poutre mixte acier béton renforcée par composite: sous chargement uniformément répartie.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure VI.2b : Poutre mixte acier béton renforcée par composite: sous chargement ponctuelle concentrée au milieu</i>	<i>51</i>
<i>Figure VI.3 : Segment différentielle d'une poutre mixte acier béton renforcée par composite.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure VI.4: Charge concentré.....</i>	<i>60</i>

Chapitre V : Résultats et discussions

<i>Figure V.1a : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section symétrique: sous une charge uniformément répartie (a).....</i>	<i>69</i>
<i>Figure V.1b : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section symétrique: sous une charge concertée au milieu (b).....</i>	<i>69</i>
<i>Figure V.2a : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section dissymétrique sans raidisseur: sous une charge uniformément répartie (a).....</i>	<i>70</i>
<i>Figure V.2b : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section dissymétrique sans raidisseur : sous une charge concertée au milieu (b).....</i>	<i>70</i>

<i>Figure V.2c : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section dissymétrique avec raidisseur: sous une charge uniformément répartie (c)</i>	70
<i>Figure V.2d : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section dissymétrique avec raidisseur : sous une charge concertée au milieu (d)</i>	71
<i>Figure V.3a : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section en T:sous une charge uniformément répartie (a)</i>	71
<i>Figure V.3b: Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section en T: sous une charge concentré au milieu (b)</i>	71
<i>Figure V.4a : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section variable renforcé par des raidisseurs : sous des charges uniformément répartie(a)</i>	72
<i>Figure V.4b : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section variable renforcé par des raidisseurs : sous une charge concentré au milieu (b)</i>	72
<i>Figure V.4c : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section variable renforcé par des raidisseurs avec une forme linéaire au niveau de console: sous une charge uniformément répartie(c)</i>	72
<i>Figure V.4d : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section variable renforcé par des raidisseurs avec une forme linéaire au niveau de console: sous une charge concentré au milieu (d)</i>	73
<i>Figure V.4e : Les coupes des poutres mixtes acier béton symétriquement chargé et appui d'une section variable</i>	73
<i>Figure V.4f : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section variable renforcé par des raidisseurs avec une forme convexe au niveau de console: sous des charges uniformément répartie(f)</i>	73
<i>Figure V.4g : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section variable renforcé par des raidisseurs avec une forme concave au niveau de console: sous des charges uniformément répartie (g)</i>	74
<i>Figure V.4h : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section variable renforcé par des raidisseurs avec une forme concave avec un trou au niveau des consoles: sous des charges uniformément répartie (h)</i>	74
<i>Figure V.4i : Poutre mixte acier béton symétriquement chargé et appui d'une section variable renforcé par des raidisseurs avec une forme concave avec cinq trous tous le 1.5 m de la longueur : sous des charges uniformément répartie (i)</i>	74
<i>Figure V.5 : Courbe charge –glissement d'une poutre mixte acier –béton : comparaison des résultats expérimentale et analytique</i>	75

<i>Figure V.6 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la légèreté de la dalle cas du modèle 1</i>	75
<i>Figure V.7 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la légèreté de la dalle cas du modèle 2 sans raidisseur</i>	76
<i>Figure V.8 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la légèreté de la dalle cas du modèle 2 avec raidisseur</i>	76
<i>Figure V.9 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la rigidité de la poutre métallique cas des modèles 1 et 2</i>	77
<i>Figure V.10 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la rigidité de la poutre métallique cas des modèles 1 et 2</i>	77
<i>Figure V.11 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la liaison Acier-Béton cas du modèle 1</i>	78
<i>Figure V.12: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la liaison Acier-Béton cas du modèle 2 sans raidisseur</i>	78
<i>Figure V.13 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la liaison Acier-Béton cas du modèle 2 avec raidisseur</i>	79
<i>Figure V.14 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la hauteur des raidisseurs cas du modèle 2 avec raidisseur</i>	80
<i>Figure V.15 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la hauteur des raidisseurs cas du modèle 2 avec raidisseur</i>	80
<i>Figure V.16 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton du module de Young de la colle E_a cas du modèle 1</i>	81
<i>Figure V.17 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton du module de Young de la colle E_a cas du modèle 2 sans raidisseur</i>	82
<i>Figure V.18 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton de l’Effet d’épaisseur de la colle cas du modèle 1</i>	82
<i>Figure V.19 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton de l’Effet d’épaisseur de la colle cas du modèle 2 sans raidisseur</i>	84
<i>Figure V.21 : influence de l’épaisseur de la plaque CFRP sur la contrainte normale cas du modèle 1</i>	85
<i>Figure V.22 : influence de l’épaisseur de la plaque CFRP sur la contrainte de cisaillement cas du modèle 2 sans raidisseur</i>	85
<i>Figure V.23 : influence de l’épaisseur de la plaque CFRP sur la contrainte Normale cas du modèle 2 sans raidisseur</i>	86

Figure V.24 : effet des composites hybrides sur la contrainte de cisaillement cas du modèle 1.....87

Figure V.25: effet des composites hybrides sur la contrainte de cisaillement cas du modèle 2 sans raidisseur.....87

Figure V.26: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton effet de la légèreté de la dalle cas du modèle 3.....88

Figure V.27: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton Effet des Modules de Young E_a cas du modèle 3.....89

Figure V.28: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton effet de l’épaisseur de la colle t_a cas du modèle 3.....90

Figure V.29: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton effet de l’épaisseur de la colle t_a cas du modèle 3.....90

Figure V.30 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton cas du modèle 4 (e.f.g).....91

Figure V.31: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton effet de l’épaisseur de la colle t_a : cas du modèle 4 (g-f-e).....91

Figure V.32: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton Effet de Module de Young de la colle E_a : cas du modèle 4 (g-f-e).....92

Liste des tableaux

Chapitre II : Collage des dalles en construction civil

<i>Tableau II.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers</i>	19
---	----

Chapitre III : Généralité sur les matériaux composites

<i>Tableau III-1- Propriétés des fibres de carbone</i>	31
<i>Tableau III-2- Propriétés des fibres de Verre</i>	33
<i>Tableau III-3- Propriétés des fibres d'aramide</i>	34
<i>Tableau III-2- Propriétés des Résines thermodurcissables</i>	37

Chapitre V : Résultats et discussions

<i>Tableau V.1 : propriété mécaniques des matériaux</i>	68
<i>Tableau V.2 : Comparaison des contraintes d'interface pour une poutre métallique renforcée par une plaque en CFRP sous une charge uniformément répartie et une charge concentrée au milieu de la poutre</i>	83
<i>Tableau V.3 : effet de la longueur non renforcer « a »</i>	84
<i>Tableau V.4 : effet des composites hybrides dans le cas des charges uniformément répartie et concentré au milieu</i>	84
<i>Tableau V.5 : effet des composites hybrides dans le cas des charges uniformément répartie et concentré au milieu</i>	88
<i>Tableau V.6 : Effet des trous dans la section convexe dans le cas des charges uniformément répartie et concentré au milieu</i>	93

Notation

b_0 : Épaisseur de l'âme du profilée en I.

t_0 : Épaisseur de la semelle du profilée en I.

b_1 : Largeur de la dalle.

b_2 : Largeur de la poutre métallique.

t_1 : Hauteur de la poutre métallique.

$du_1(x)$ et $du_2(x)$: sont les déplacements longitudinaux à la base de la dalle de béton et au sommet de la poutre en acier.

$\varepsilon_1(x)$ et $\varepsilon_2(x)$: sont les déformations de la dalle et la poutre en acier induites par la flexion.

E : le module d'élasticité.

$M(x)$: le moment de flexion.

y et y' : sont les coordonnées locales dont l'origine est la surface supérieure et l'inférieure de l'adhérence.

G_1 et G_2 : sont les modules de cisaillement transversal de la dalle en béton et de la poutre en acier.

$\sigma_{xy(1)}$ et $\sigma_{xy'(2)}$: sont les contraintes de cisaillement dans la dalle et la poutre en acier.

$W_1^{(N)}$ et $W_2^{(N)}$: sont les déplacements transversales.

t_1 et t_2 et t_3 : sont les épaisseurs respectives de la dalle de béton et de la poutre en acier et la plaque composite.

$u_1^{(N)}$: Le déplacement à la surface supérieure de l'adhérence supérieure.

$u_2^{(N)}$: Le déplacement de l'adhérence inférieure à l'interface.

N_1 et N_2 et N_3 : sont les forces longitudinales pour la dalle de béton et la poutre en acier et la plaque composite CFRP.

E_1 et E_2 et E_3 : sont les modules de Young de la dalle et la poutre en acier et la plaque composites.

I_1 et I_2 et I_3 : sont les moments d'inerties de la dalle et la poutre en acier et la plaque composites.

A_1 et A_2 et A_3 : sont les surfaces de la dalle et la poutre en acier et la plaque composites.

G_{a1} : le module de cisaillement de la l'adhésif.

t_{a1} : l'épaisseur de l'adhésif.

K_1 : la rigidité en cisaillement de l'adhésif.

M_1 et M_2 et M_3 : sont des moments de flexion de la dalle et la poutre en acier et la plaque CFRP.

φ : Coefficient de courbure.

ξ : Coefficient qui tient compte de la forme géométrique de la poutre en acier .

Δ : Constant d'intégration.

$S(x)$: Le glissement entre la dalle et la poutre en acier.

K_{n1} : La rigidité normale de l'adhésif.

E_{a1} et E_{a2} : sont les modules de Young respectives de l'adhésif.

t_{a1} et t_{a2} : sont les épaisseurs respectives de l'adhésif.

L : longueur de la travée.

a : Distance entre l'appui et le bord de la plaque composite.

b : Distance entre le point d'application de la force concentrée et le bord de la plaque.

$\sigma_1(x)$ et $\sigma_2(x)$:sont les contraintes normales de l'interface 1 et 2.

$\tau_1(x)$ et $\tau_2(x)$: sont les contraintes de cisaillement de l'interface 1 et 2.

$V_1(x)$ et $V_2(x)$ et $V_3(x)$: sont les efforts de tranchant respectivement de la dalle et la poutre en acier et la plaque en CFRP.

x : Distance comptée à partir du bord de la plaque composite.

$w_1(x)$ et $w_2(x)$ $w_3(x)$: Déplacement verticale de dalle et la poutre métallique et de la plaque composite.

L_p : Longueur de la plaque de renforcement composite.

$m_1, m_2, \lambda, \beta, n_1, n_2$ et n_3 : Paramètres définis par les équations en fonction de la méthode exposée ou développée.

h_r : épaisseur de raidisseur.

Introduction générale

Ces dernières années, la technique de collage a été largement utilisée dans la construction comme alternative aux techniques d'assemblage conventionnelles, telles que le boulonnage, le soudage, le rivetage et le serrage. L'utilisation la plus populaire du collage dans la construction concerne la réparation et la modernisation des poutres en acier à l'aide de plaques CFRP en polymère renforcé de fibres de carbone. Lorsque deux éléments capables de résister à des moments de flexion sont reliés élastiquement ensemble à l'interface, une interaction, partielle ou complète, entre les deux éléments. Lorsque la connexion élastique est flexible, des déformations directes différentielles au niveau de l'interface commune existent, entraînant un glissement, et des déformations différentielles peuvent également en résulter, donnant lieu à un soulèvement entre les deux éléments. De nombreuses études ont été menées concernant l'analyse des structures composites dans le passé, conçu comme: soit une interaction totale a été supposée, soit les connecteurs de cisaillement ont été traités comme des ressorts rigides ou élastiques, soit une liaison utilisant un adhésif entre la dalle en béton et la poutre en acier.

Les structures composites acier-béton, qui combinent la haute résistance à la traction de l'acier et la haute résistance à la compression du béton, ont été largement utilisées dans les bâtiments à plusieurs étages et les ponts du monde entier. Au début des années 1960, une technique efficace de collage a été introduite pour relier la dalle de béton et la poutre en acier par un joint adhésif, et non par les connecteurs métalliques de cisaillement conventionnel. Cette poutre composite acier-béton collée par adhésif est considérée comme une structure alternative très prometteuse car elle présente les avantages de réduire la concentration des contraintes, d'éviter le soudage sur site et d'utiliser la dalle de béton préfabriquée. Récemment, un certain nombre d'études sur les tests expérimentaux et la simulation numérique de poutres composites acier-béton collées ont été présentées dans la littérature.

L'élément composite acier-béton est plus rigide et plus résistant que la poutre en acier et la dalle de béton seul. Le principal obstacle est la connexion à l'interface acier-béton. Les performances de l'élément composite dépendent fortement de la connexion entre la poutre en

acier et la dalle en béton. La connexion à l'interface acier-béton doit être capable de résister à la charge appliquée et de transférer les contraintes de l'une à l'autre. L'efficacité de l'assemblage composite dépend du degré d'interaction entre l'acier et le béton. Le degré d'interaction dépend de la rigidité au cisaillement de l'assemblage composite et qui sont directement liés. Cette interaction est évalué par le glissement relatif induit à l'interface composite. Sur la base du glissement relatif à l'interface des assemblages composites acier-béton, ils peuvent être globalement classés en assemblages flexibles et semi-rigides. Les connecteurs mécaniques, qui ont une valeur de glissement relativement plus élevée, tels que les goujons, sont considérés comme des connexions flexibles ou semi-rigides et les connexions collées sont considérées comme des connexions rigides. Le comportement des assemblages composites acier-béton a été largement étudié dans plusieurs études. Les connecteurs à goujons mécaniques sont courants dans les connexions composites acier-béton. Les assemblages composites acier-béton collés sont encore nouveaux pour les applications de génie civil. Peu d'études ont été menées sur les connexions collées au cours de la dernière décennie.

Le renforcement des structures en acier in situ avec des feuilles composites en plastique renforcé de fibres (plaques CFRP) liées extérieurement est de plus en plus utilisé pour la réparation et la réhabilitation des structures existantes. Plusieurs chercheurs ont développé plusieurs méthodes analytiques pour prédire les performances d'interface des réparations liées. Une caractéristique importante d'une poutre composite acier-béton renforcée avec une plaque CFRP est la concentration importante de contraintes dans l'adhésif aux extrémités de la plaque CFRP. Le présent travail concerne la poutre composite acier-béton liée renforcée par des plaques CFRP. La poutre composite est composée d'une dalle en béton, d'une poutre en acier renforcée par une plaque CFRP reliée au moyen d'un joint adhésif; dans les deux interfaces béton - acier et acier-CFRP. L'objectif de cette étude est d'analyser le comportement mécanique de la structure composite renforcée avec plaque CFRP, plus précisément une analyse et une modélisation des contraintes interfaces dans les deux interfaces. L'analyse théorique a été présentée et développée afin de déterminer l'influence de certains paramètres, tels que la nature de l'adhésif et l'irrégularité d'épaisseur des joints de colle. Le mode de défaillance et la répartition des contraintes sont également abordés. Par conséquent, le modèle amélioré adopté décrit une meilleure réponse réelle des poutres composites acier-béton et permet l'évaluation des contraintes interfaces, dont la connaissance est très importante dans la conception de telles structures.

Le présent manuscrit de master comporte cinq chapitres :

- **Le premier chapitre** présente une recherche bibliographique sur les structures mixte acier-béton, dont l'objectif de donner un aperçu de l'état de connaissances sur les éléments de structures mixtes à savoir (Les poutres mixtes, Les dalles mixtes, Les poteaux mixtes). Les différents types des éléments de structures mixtes sont détaillés ainsi que les différents matériaux utilisés aux poutres mixtes de bâtiments et aux ponts mixtes.
- La suite de la recherche bibliographique présentée en **deuxième chapitre** aborde la technique de collage des dalles légères en génie civil, en montrant l'importance du collage dans le domaine de la construction civile et industrielle.
- **Le troisième chapitre** est une recherche sur les matériaux composites à base de fibres de carbone, leurs mises en œuvre, leurs principales propriétés et leurs utilisations dans le domaine de génie civil.
- **Le quatrième chapitre** est consacré à un développement mathématique d'un modèle pour le calcul des contraintes d'interface acier-composite et acier-béton; pour le cas des poutres en métalliques mixte acier-béton-composite.
- **Dans le cinquième chapitre**, nous s'intéressons à la présentation des résultats et discussions. La validation du modèle a été bien démontrée pour les différents modèles que nous avons présentés, cette validation est basée sur une comparaison de nos résultats obtenus avec ceux issus de la littérature ainsi qu'une confrontation expérimentale - analytique a été présentée. Une fois les modèles validés, nous avons présenté une étude paramétrique en montrant l'influence sur le comportement des poutres mixtes.

Chacun de ces chapitres est terminé par une conclusion partielle, dont le bilan est effectué en conclusion générale, et qui permet d'envisager des perspectives aux travaux présentés.

Chapitre I : Généralité sur les structures mixtes

I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les structures mixtes acier-béton. L'objectif de cette étude est de donner un aperçu de l'état de connaissances sur les éléments de structures mixtes à savoir (Les poutres mixtes, Les dalles mixtes, Les poteaux mixtes). Les différents types des éléments de structures mixtes sont détaillés dans ce chapitre ainsi que les différents matériaux utilisés aux poutres mixtes de bâtiments et aux ponts mixtes, dalles mixtes et poteaux mixtes. Nous allons présenter ensuite, les avantages et les inconvénients des constructions mixtes par rapport aux autres types de constructions (Khattara et al. 2020).

I.2 Généralités sur les structures mixtes acier béton

En règle générale, la construction mixte consiste en l'emploi de divers matériaux ou composants au sein d'un même élément architectonique. La conception de cet élément structurel mixte vise à optimiser l'utilisation des propriétés de chaque matériau présent.

Les matériaux pour un travail en commun sont proposés dans la littérature sous différentes formes : acier-béton, bois-béton ou acier-bois. Toutefois, la combinaison d'acier et de béton est la plus répandue dans le domaine de la construction mixte dans le secteur du bâtiment et des ouvrages d'art en raison de ses performances structurelles et de sa facilité d'utilisation par rapport aux autres combinaisons.

Ce système de construction en acier-béton présente également d'autres bénéfices, tels que :

Le béton a une bonne résistance à la compression et l'acier présente une grande résistance à la traction.

La présence du béton va réduire les effets d'instabilité de l'élément en acier notamment le déversement de la semelle supérieure des profilés en I.

La collaboration entre le béton rigide et l'acier ductile va permettre à la structure mixte de se comporter de manière optimale contre les charges climatiques et sismiques.

Le béton va apporter une protection à l'acier contre la corrosion et le feu, rendant ainsi la structure plus durable et sécuritaire.

La combinaison des deux matériaux fournit une grande résistance, ce qui permet de franchir de plus grande portées des éléments mixte.

La grande portée des éléments horizontaux mixte acier-béton permet de réduire le nombre de poteaux intermédiaire ce qui offre à la fois un avantage économique et architectural.

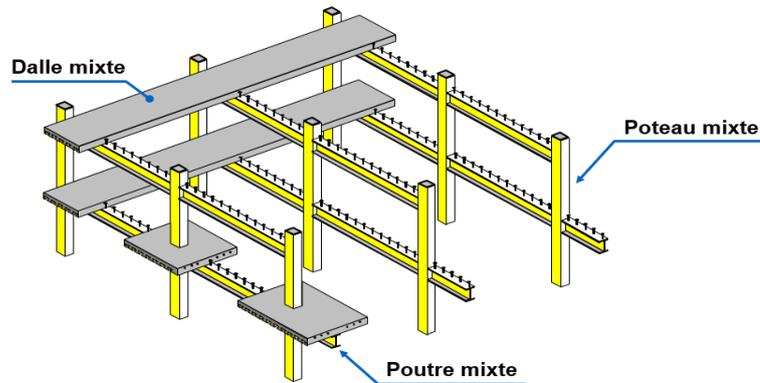


Figure I-1: Élément de construction

I.2.1. Les poutres mixtes

Les poutres en acier-béton mixtes sont des éléments porteurs fléchis qui se composent d'une poutre métallique et d'une dalle en béton. En général, il s'agit d'un profilé en acier relié à une dalle en béton. Pour le coffrage non stable ou sur un coffrage stable, tel qu'une tôle profilée en acier ou une série de dalles préalables (Khattara, Mousselmal,2020)(figures I.2 et I.3) .

Compositions : Une poutre mixte comporte trois composantes :

Une partie en béton, se présentant habituellement sous la forme d'une dalle en béton, à la partie supérieure de la section

Un profilé en acier.

Une tôle qui joue le rôle de coffrage perdue.

Une connexion, assurée le plus souvent par des goujons connecteurs.(Maqoi et al).

Elles peuvent être :

- des profilés métalliques plus des dalles coulées sur le coffrage.
- des profilés métalliques plus des dalles partiellement préfabriquées.
- des profilés métalliques plus des dalles complètement préfabriquées.

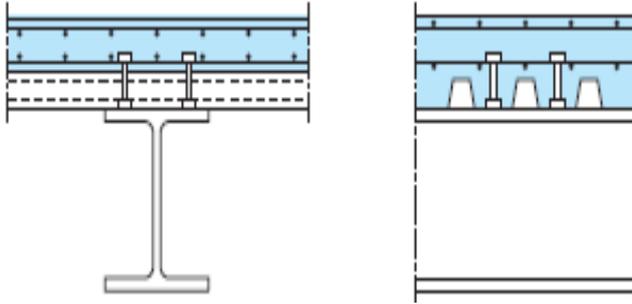


Figure I-2. Profilé connecté à une dalle mixte

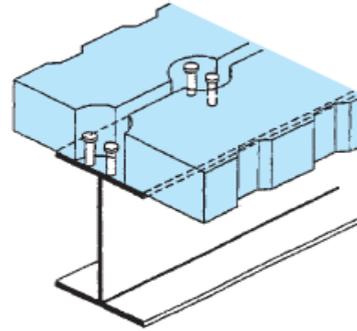


Figure I-3: Utilisation des dalles préfabriquées

I.2.2. Les dalles mixtes

Une dalle mixte est composée d'une tôle mince profilée en acier qui a été spécialement conçue pour assurer une séparation structurale efficace avec le béton de la dalle qu'elle va recevoir. Les dalles mixtes sont particulièrement recommandées pour les utilisations dans les constructions en acier, car elles peuvent fonctionner de manière composite avec les poutres de plancher en acier. Les dalles mixtes ont la capacité de créer une interaction composite avec des poutres fabriquées à partir d'autres matériaux, comme le béton armé ou le bois.

- Les tôles profilées assurent diverses fonctions:
- elles offrent une surface de travail lors de la construction;
- elles servent de coffrage lors du bétonnage du plancher;
- elles jouent le rôle d'armature inférieure pour le béton de la dalle.

On trouve sur le marché une grande diversité de tôles profilées la forme, la hauteur, l'entre-axe de leurs nervures, le raidissement de leurs parois, le recouvrement entre les tôles contiguës et la manière dont l'action composite avec le béton est assurée sont des caractéristiques distinctives de ces tôles (Khattara, Mousselmal, 2020).

La hauteur totale des dalles mixtes varie en général de 120 à 180mm ; elle est fonction notamment de la résistance au feu exigée. La hauteur classique des nervures (de la tôle) est entre 40 et 85mm. Les entraxes varient de 150 à 300mm. L'épaisseur de la tôle utilisée varie entre 0.75 et 2 mm (Khattara, Mousselmal, 2020).

I.2.3. Poteaux mixte acier-béton

Les éléments qui sont utilisés pour prendre en charge les charges verticales sont principalement constitués d'un profil métallique recouvert entièrement ou partiellement de béton, ou d'un tube en acier rempli de béton. Il existe une grande variété de poteaux mixtes selon leurs sections (carrée, rectangulaire ou circulaire) et de leur degrés d'enrobages en béton (enrobé totalement de béton ou partiellement).

- Les plus courants présentent une section carrée ou rectangulaire, obtenue à partir d'un profilé en acier, de type H ou I, enrobé totalement de béton (figure I.4a).
- Ou partiellement enrobé dans les deux chambres comprises entre l'âme et les semelles (figure I.4b).

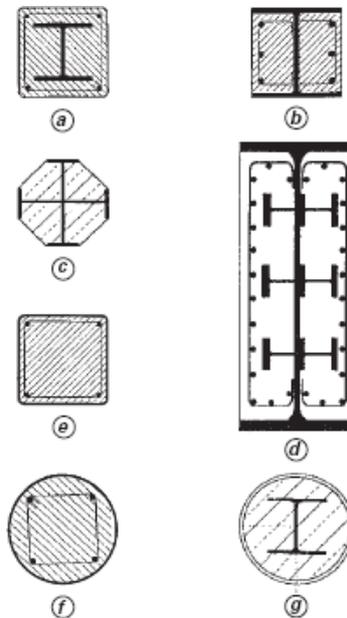


Figure I-4. Types des poteaux mixtes

La section cruciforme (figure I.4c) fait appel à deux profilés, identiques ou non, dont l'un est découpé en deux T qui sont ensuite ressoudés de part et d'autre de l'âme du second. Dans le cas d'un poteau rectangulaire, entièrement ou partiellement bétonné, avec un profilé de grande hauteur, il peut être utile de renforcer le profilé dans chaque chambre par un ou plusieurs petits profilés en H ou en T à ailes épaisses, soudés sur l'âme (figure I. 4d). Des poteaux mixtes sont également présents, avec des profilés creux remplis de béton, de forme carrée, rectangulaire ou circulaire (figures I.4 e et I.4 f). Parfois, un profilé en acier, section I ou H, est placé à l'intérieur d'un profilé creux circulaire (figure I.4g).

I.3 Utilisation des structures mixtes dans la construction

L'optimisation de la résistance aux charges, de la raideur et de la ductilité sont des aspects essentiels lors de tout dimensionnement, ainsi que les aspects architecturaux, économiques, de fabrication et d'utilisation des poutres, dalles et poteaux et leur utilisations dans la constructions civile et industrielle.

Aspects architecturaux : Structures mixtes permettent de nombreuses variations architecturales pour combiner les différents types d'éléments mixtes.

En plus de réduire les dimensions des poutres, la construction mixte permet :

- des portées plus importantes.
- des dalles plus minces.
- des poteaux plus élancés et offre une grande flexibilité et de nombreuses possibilités lors de la conception.

Aspects économiques : L'intérêt économique des structures mixtes provient de dimensions plus réduites (la rigidité plus élevée entraîne des flèches plus faibles, des portées plus grandes et des hauteurs totales plus faibles) et d'une construction plus rapide. Les rapports portée sur hauteur ($l/h=35$) des poutres sont faibles et peuvent présenter plusieurs avantages:

- La réduction des hauteurs permet de réduire la hauteur totale du bâtiment et permet dès lors une diminution de la surface des murs extérieurs.

Les portées plus grandes pour des hauteurs identiques (par rapport aux autres méthodes de construction) permettent de réduire le nombre des poteaux par plancher ce qui offre plus de flexibilité, pour une même hauteur totale de bâtiment, celui-ci peut présenter plus d'étages.

Les structures mixtes sont simples à construire et présentent des temps de construction réduits:

- économie de coûts suite à la réalisation plus rapide du bâtiment.
- coûts de financement plus faibles.
- prêt à l'emploi plus rapidement et donc revenu d'utilisation plus élevé (Saadi).

I.4 Matériaux utilisés dans un élément mixte

Pour réaliser les différents éléments structuraux mixtes, on utilise généralement quatre matériaux de base :

L'acier de construction.

L'acier d'armature ou de renfort.

Les tôles profilées en acier.

Le béton.

Ces matériaux sont décrits dans différents codes réglementaires. Certaines exigences essentielles sont abordées également dans des règlements comme les Eurocodes (Khattara, Mousselmal, 2020).

I.5 Caractéristiques des matériaux utilisés dans la construction mixte

On donne les caractéristiques du béton armé (béton et armature), des profilés en aciers et des tôles de coffrages de construction en relation directe avec le calcul et la conception des éléments mixtes.

Acier de construction : En construction métallique, on utilise des aciers dont les caractéristiques sont définies par des valeurs minimales ou maximales. Il existe plusieurs types de classification des aciers, basés soit sur leur composition chimique (aciers alliés, aciers non alliés, ect...) soit sur leur caractéristique mécanique (résistance à la traction, limite d'élasticité). La classification couramment utilisée en construction métallique Nuance d'acier qui est définie par sa limite d'élasticité f_y (Amiraoui, 2004). Les codes de calcul couvrent le calcul des structures mixtes fabriquées à partir des matériaux en acier relevant des nuances courantes définies dans les normes européennes.

Les valeurs de calcul des principales caractéristiques des aciers de construction sont les suivantes :

- Module d'élasticité longitudinale : $E=210000 \text{ N/mm}^2$.
- Module de cisaillement : $G=\frac{E}{2(1+\nu)} \approx 80769 \text{ N/mm}^2$
- Coefficient de Poisson : $\nu=0.3$
- Masse volumique : $\rho_a=78.50 \text{ kN/mm}^2$

Selon la figure I.5 le calcul analytique accepte l'idéalisation de la relation contrainte-déformation de l'acier de construction en tant qu'élastique parfaitement plastique pour les calculs et la conception. Ces dernières méthodes de calcul acceptent l'idéalisation de la relation contrainte-déformation pour les calculs et la conception. Comme illustré dans la figure I.5, l'acier de construction est présenté sous une forme élastique parfaitement plastique.

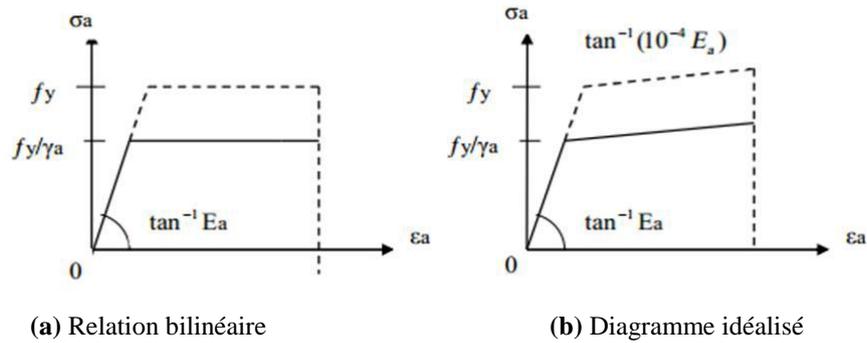


Figure I-5. Relation contrainte déformation spécifique des aciers

Acier d'armature pour béton : Les aciers d'armature se démarquent des aciers de construction non seulement par leur apparence, mais aussi par leur processus de fabrication, leur composition chimique et leurs caractéristiques mécaniques. Ils se distinguent par leur limite supérieure ou apparente d'élasticité, qui correspond dans ce dernier cas à un allongement permanent de 0,2 %.

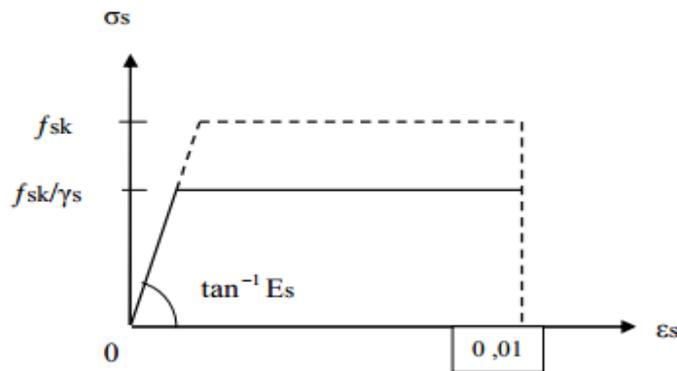


Figure I-6. Diagramme contrainte déformation de calcul des armatures

Son module d'élasticité est très stable. Il peut être considéré comme équivalent à celui de l'acier utilisé dans la construction (figure I.6).

Le Béton :Le béton se caractérise par sa capacité à résister à la compression. Nous nous concentrons donc exclusivement sur les propriétés mécaniques du béton, car ce sont elles qui influencent sa résistance. La définition de la relation contrainte-déformation conventionnelle est la suivante (Khattara, Mousselmal, 2020) (figure I.7). En ce qui concerne les poutres et dalles mixtes du bâtiment, le béton utilisé est généralement de type ordinaire à résistances f_{c28} connu. Cependant, en fonction de la situation, il est possible d'utiliser un béton de qualité légère.

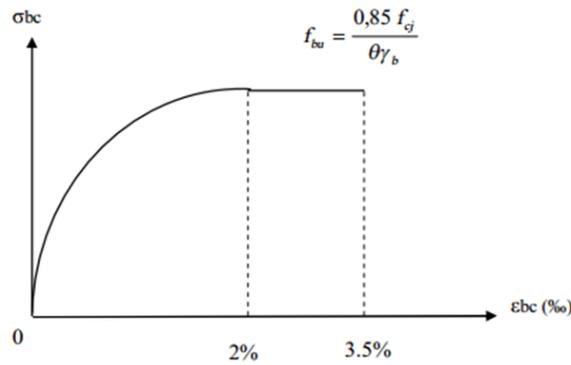


Figure I-7. Diagramme parabolique conventionnel

Le module d'élasticité E du béton est un élément qui présente une dispersion importante, principalement en fonction de la résistance à la compression sur cylindre 16×32 . Néanmoins, les caractéristiques du béton évoluent au fil du temps. Le comportement du béton est principalement influencé par le fluage et le retrait (Amiraoui, 2004).

I.6 Comportement des matériaux utilisés dans les structures mixtes acier-béton

Comportement de l'acier : Le diagramme de la figure I.8 illustre le comportement courant d'un acier structural utilisé dans la construction mixte. Le diagramme contrainte déformation présente une pente initiale linéaire, avec un module d'élasticité habituellement égal 210000 MPa . Lorsqu'on effectue un déchargement dans la zone élastique, la structure de l'acier retrouve son état initial de déformation ($x = 0$). Le comportement élastique se poursuit jusqu'à atteindre la limite élastique de l'acier pour une déformation $\epsilon_y = f_y / E_a$.

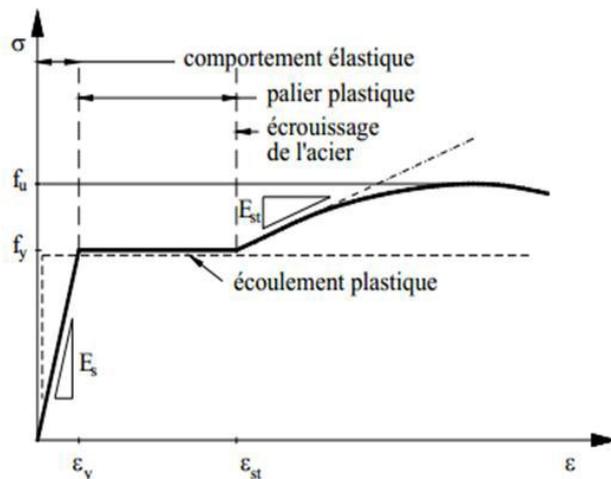


Figure I-8. Loi de comportement de l'acier doux

Une augmentation des déformations au-delà de cette limite entraîne un résultat. L'écoulement plastique se produit sans ou avec une diminution minimale des contraintes jusqu'à ce que la déformation d'écrouissage est résulte. Par la suite, la contrainte augmente jusqu'à ce que la limite maximale du matériau, suivie de la rupture de l'acier, soit atteinte (Bujnak, 2007).

La caractéristique essentielle pour l'acier dans la construction mixte est la limite élastique f_y . Les aciers utilisés dans la plupart des applications sont de la classe E24. La limite élastique varie en fonction de la composition chimique de L'acier, en particulier son taux de carbone, ainsi que son processus de laminage. En règle générale, il est possible de dire que l'augmentation de la limite élastique entraîne une diminution de la longueur du palier plastique, ce qui diminue la ductilité de l'acier. Il s'agit d'un des obstacles qui restreignent l'utilisation des aciers à haute résistance, en particulier dans la construction mixte, car un tel acier ne permet pas de prévoir le développement de la résistance plastique de la section mixte à l'ELU.

Le comportement de l'acier est généralement similaire en compression et en traction lorsqu'il est soumis à des sollicitations uniaxiales en phase élastique. Effectivement, on prend généralement en compte la limite élastique f_y et le module de Young E_s , qui sont mesurés à l'aide d'essais de traction.

Pour la compression, le critère de Von Mises permet de décrire le seuil d'élasticité pour un état de contraintes dans le plan en utilisant des sollicitations bi-axiales de la manière suivante :

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2 = f_y^2 \quad (\text{I.1})$$

Dans le repère des contraintes principales, le critère s'écrit sous la forme suivante :

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = f_y^2 \quad (\text{I.2})$$

Représenté par une courbe limite dans le plan des contraintes de forme elliptique illustrée à la Figure I.9 et I.10. Dans le cas du cisaillement pur ($\sigma_1^2 = -\sigma_2^2 = \tau_{xy}$), la contrainte limite plastique decisaillement τ_y vaut :

$$\tau_y = \tau_{xy} = \frac{f_y}{3} \quad (\text{I.3})$$

En pratique, l'approximation $\tau_y=0,6 \cdot f_y$ est parfois utilisée. (Bujnak, 2007)

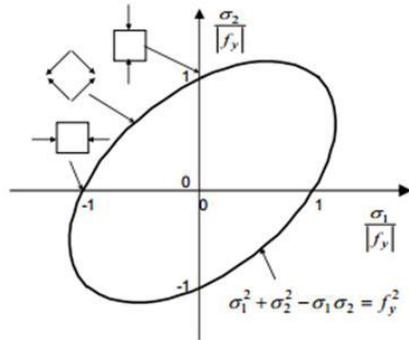


Figure I-9. Critère de Von Mises dans le plan 2D

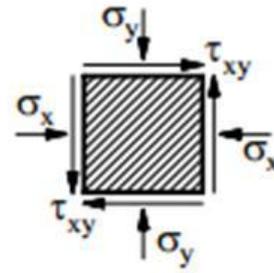


Figure I-10. Etat bi-axiale des contraintes

Comportement du béton : L'analyse de comportement du béton lors de la compression et de la traction. Les deux situations nécessitent l'utilisation de modèles de calcul qui permettent de simuler le comportement bi-axiales des éléments en béton (compression) et en béton armé. Les (traction) sont exposés. Par la suite, nous créons un modèle qui illustre le comportement du béton lorsqu'il est soumis à des sollicitations bi-axiales, qui peut être utilisé pour des analyses tridimensionnelles à l'aide de la MEF.

Comportement uni-axial du béton en traction

Il est souvent négligé dans les méthodes de calcul que le béton présente une résistance à la traction f_t beaucoup plus faible que celle à la compression, afin d'éviter les problèmes de sécurité. C'est l'une des motivations derrière le développement du béton armé. En effet, il est essentiel d'utiliser des barres d'armature en acier afin de répondre aux sollicitations en traction. En règle générale, on réalise des tests de fendage sur les éprouvettes cylindriques afin de mesurer la résistance à la traction du béton f_t . La relation contrainte-déformation du béton sollicité en traction est illustrée dans la figure I.11.

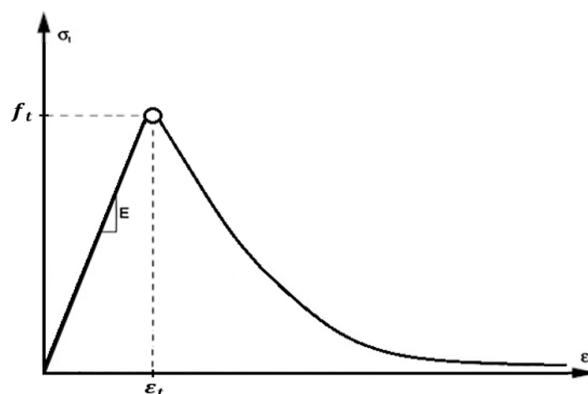


Figure I-11. Loi de comportement du béton en traction

En ce qui concerne la traction, le béton traverse deux étapes successives :

Comportement élastique : La contrainte augmente progressivement avec la déformation lors d'une phase élastique linéaire, jusqu'à ce que la résistance totale de traction f_t soit atteinte.

Comportement élastique-endommageable : Après le pic f_t , il y a chute brutale de la résistance qui due faiblitte du béton (formations de fissure qui va par la suite elle se propage et en conséquence une rupture qui se produit). Où ; nous avons constaté une diminution quasi instantanée de la résistance avec une augmentation de la déformation. Cette étape illustre la détérioration rapide du béton par fissuration et met en évidence la vulnérabilité de ce matériau en cas de traction.

Comportement multiaxial du béton en traction et en compression

Selon le critère de Drucker-Prager, on peut évaluer le comportement du béton lorsqu'il est soumis à une sollicitation multiaxiale. Ce produit a été mis en place afin de traiter la déformation plastique des sols, mais il peut également être utilisé pour le béton, car celui-ci est considéré comme un matériau granulaire. L'objectif de ce critère est de représenter la surface de charge, qui est ici représentée comme un seuil de fermeture. Effectivement, en ce qui concerne le béton, cette surface de charge représente à la fois la limite du domaine élastique et le seuil maximum qui représente la détérioration du matériau. En réalité, le critère de Drucker-Prager est un ajout de termes aux critères de Tresca et de Von Mises (valides pour les matériaux métalliques) pour le béton. On peut décrire le critère Drucker-Prager en utilisant des contraintes principales. Comme suit :

$$\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} = A + B(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (I.4)$$

En considérant σ_c comme la contrainte ultime uni-axiale en compression, le critère de Drucker-Prager devient :

$$\frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_c = A - B\sigma_c \quad (I.5)$$

En considérant σ_t comme la contrainte ultime uni-axiale en traction, le critère de Drucker-Prager s'écrit :

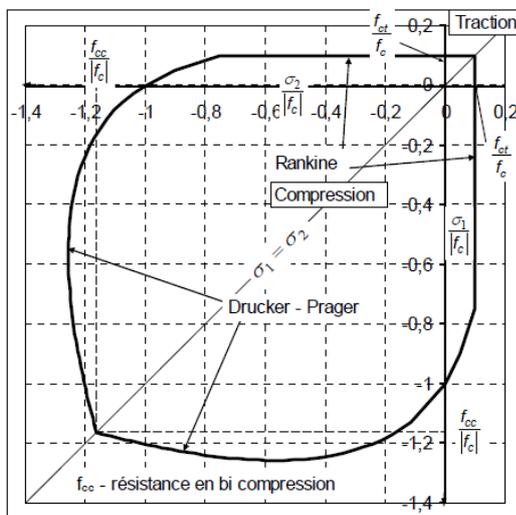
$$\frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_t = A - B\sigma_t \quad (I.6)$$

La résolution de ces deux équations, les formules de A et B peuvent être données :

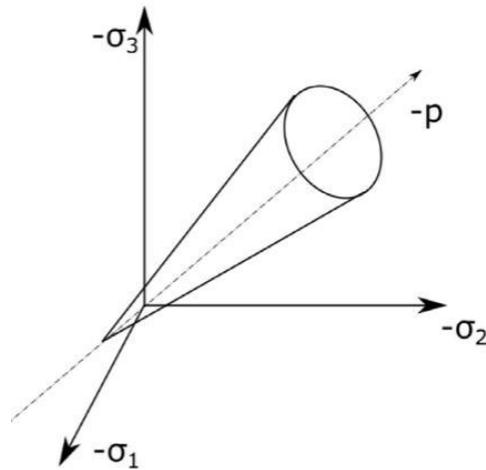
$$A = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_c \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \right) \quad (I.7)$$

$$B = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_t - \sigma_c}{\sigma_c + \sigma_t} \right) \quad (I.8)$$

En utilisant la méthode multiaxiale, la surface de charge dans l'espace tridimensionnel adopte une forme conique, comme illustré dans la figure I.12.b, en raison de la dissymétrie du comportement du béton entre la compression et la traction. Sur un plan bi-axial, il est possible de remplacer la surface de charge de Drucker-Prager par une autre surface de charge qui combine deux surfaces de plasticité, telles que définies par Feenstra dans son étude, à savoir celle de Drucker-Prager pour la partie de compression et celle de Rankine pour la partie de traction (voir la figure I.12.a).



(a) Dans le plan bidimensionnelle



(b) Dans l'espace tridimensionnelle

Figure I-12. Représentation du critère Drucker-Prager dans des repères de contraintes Principales

I.7 Avantages de la construction mixte : en général, les avantages potentiels des éléments structuraux mixtes sont :

- La construction mixte permet une réalisation rapide.
- Le poids de la partie métallique exigé dans la construction mixte est de manière Significative moins que si les matériaux étaient employés indépendamment.
- Il n'y a aucun besoin de coffrage, car les profilés en acier peuvent être employés comme soutient d'éléments de coffrage de bois pour le béton, ou avec l'aide de quelques appuis verticaux provisoire. Le coffrage de bois de construction peut être remplacé par des éléments de béton préfabriqué ou de tôle en acier.

Pour les poutres mixtes :

Une amélioration de la résistance au feu, surtout si la semelle des poutres est enrobée de béton ou se trouve dans l'épaisseur de la dalle.

Une résistance améliorée vis-à-vis de l'instabilité locale (voilement de la semelle du profilé).

Une rigidité flexionnelle plus importante (flèches plus faibles).

En particulier pour les dalles mixtes

un gain sur le poids total de la structure

une rigidité flexionnelle plus importante (flèches plus faibles)

une amélioration de la résistance au feu des poutres, surtout si leur semelle est enrobée de béton ou se trouve dans l'épaisseur de la dalle

une réduction de la hauteur du plancher structurel et, donc, une augmentation de la hauteur utile de chaque étage.

Pour les poteaux mixtes :

Une amélioration de la résistance au feu

Une conservation des dimensions externes de poteau d'étage en étage par l'adaptation du type de profilé en acier aux charges à soutenir.

Augmentation de la tenue au flambement.

Augmentation de la résistance en cas de séisme.

I.8 Inconvénients de la construction mixte : L'inconvénient principal de la construction mixte est la nécessité de fournir des connecteurs à l'interface acier -béton. Mais pour les poteaux mixtes, il n'est pas obligatoire de placer les connecteurs.

Un autre inconvénient mineur est qu'elle est légèrement plus compliquée comme méthode de construction par rapport aux méthodes traditionnelles, ces inconvénients sont vite rattrapés par le nombre d'avantages déjà cités (Amiraoui,2004).

I.9 Conclusion

En général, on peut qualifier une structure de mixte si, dans la plupart de ses composants (poutres, poteaux, assemblages, dalles), elle combine deux matériaux de natures et de propriétés différentes, ici l'acier et le béton, dans le but de tirer le meilleur parti de cette association, tant sur le plan du fonctionnement structural que sur celui du coût de construction. La construction mixte offre de nombreuses opportunités pour moderniser et industrialiser le secteur de la construction. La spécificité du fonctionnement d'un élément mixte réside dans l'association. La connexion entre les deux matériaux, acier et béton, permet de réaliser une mécanique à l'interface des deux matériaux. Cela entraînera une augmentation

de la rigidité et de la résistance de l'élément. Enfin, cette méthode d'exécution grâce à ses possibilités de fusion entre les deux matériaux (acier et béton) présente de nombreux bénéfices économiques et techniques, tels que la rapidité de montage, la précision d'assemblage et la création d'éléments monolithiques,...etc.

Chapitre II : Collage des dalles en construction civile

II .1 Introduction

Le présent document aborde la technique de collage des dalles légères en génie civil. L'introduction fournit une description générale du sujet et explique l'importance du collage dans le domaine de la construction. Il présente également les objectifs et les principaux points qui seront abordés dans ce document, tels que les avantages des dalles légères, les différentes méthodes de collage, les matériaux utilisés, la préparation des surfaces à coller, l'application de la colle, le processus de pressage et de séchage, le contrôle de la qualité, la résistance et la durabilité des dalles collées.

II .2 Les dalles légers

II .2.1. Historique

L'idée d'utiliser des granulats légers pour la confection du béton en vue d'obtenir un matériau qui possède à la fois un faible poids, une résistance appréciable et une isolation thermique ou acoustique est assez ancienne. L'historique de la production des agrégats légers à partir des sources naturelles remonte au temps des Préromains et continue aujourd'hui avec les roches volcaniques poreuses mais ces ressources sont limitées aux régions d'activités volcaniques. En effet le Panthéon de Rome est un exemple de construction ayant nécessité l'emploi de béton léger. Cette structure est remarquable tant du point de vue architectural que structural. Son dôme, d'un diamètre de 43m est une réalisation architecturale majeure pour l'époque. A la base de la structure on retrouve un béton ordinaire, alors qu'un béton léger, contenant des pierres ponceuses, a été utilisé pour la construction de la coupole.

A partir de la fin du 19ème siècle, avec le développement du béton armé, et à cause de la rareté des agrégats naturels poreux et à leur existence dans la plupart des pays développés, des recherches pour la fabrication d'agrégats légers artificiels commencèrent. A partir de 1950, de nombreuses constructions à plusieurs étages furent conçues entièrement en béton léger pour bénéficier de l'avantage d'un faible poids mort. De telles applications dans la construction stimulèrent la recherche concertée des diverses. Organisations nationales et internationales sur les propriétés des bétons légers.

Grâce aux ajouts minéraux, aux adjuvants et aux granulats légers de grande qualité maintenant disponibles, il est aujourd'hui possible de fabriquer des bétons légers à haute performance dotés d'une très bonne rhéologie et d'une excellente durabilité. Les conditions nécessaires pour développer au maximum leur résistance en compression ne sont toutefois pas encore complètement maîtrisées. En effet, bien que certaines formulations aient pu atteindre une résistance en compression de 70 à 100MPa à 28 jours, il est encore difficile d'obtenir plus de 60 MPa pour une masse volumique inférieure à 1900 kg/m³

II .2.2. Définition et classification de béton léger

Les bétons légers sont des bétons à haute porosité dont la masse volumique apparente Varie dans les limites de 500 à 1800 Kg/m³. Les bétons, dont la masse volumique est inférieure à 500 Kg/m³sont classés comme bétons extra-légers.

Du point de vue de leur application les bétons légers se répartissent en 3 types :

- Bétons pour isolation thermique.
- Bétons isolants et porteurs.
- Bétons de structure (porteurs).

Les principales caractéristiques des bétons légers sont représentées dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers :

Destinations des bétons	Masse volumique En kg/m ³	Résistance à la Compression en MPa	Conductibilité thermiqueλ, W/m°C
Bétons isolants	<500	<2,5	<0,2
Bétons isolants et Porteurs	500–1400	3.5-15	0.2-0.5
Bétons de structure	1400-1800	15-40	0.5-0.9

II.3 Association de deux matériaux

Il est crucial d'assurer une connexion efficace entre la dalle en béton et la structure en acier.

Une telle connexion vise à ce que les divers matériaux collaborent pour obtenir une structure monolithique. Ainsi, une dalle dans une structure mixte ne se limite plus à être une simple

dalle. au lieu d'être un poids mort à la flexion longitudinale, elle joue un rôle actif dans le comportement de la poutre mixte, ce qui améliore la rigidité de la structure lors de la flexion.

Trois familles principales de connexions existent :

- la connexion par goujons métalliques,
- la connexion par adhérence
- la connexion par collage.

Jusqu'à présent, seule utilisation de connecteurs métalliques est utilisée et appliquée en accord avec les règles de calcul. Les structures mixtes acier/béton collées sont l'objet de notre travail (Tout, 2014).

II.3 .1 Connexion par goujons

Les connecteurs peuvent être mentionnés comme le soudage, le rivetage ou le boulonnage. Aujourd'hui, cette technique est relativement bien maîtrisée et régulée dans le secteur de la construction. En général, on relie la dalle de béton à la poutre en acier en utilisant des goujons à tête soudés. Grâce à leur résistance au glissement, garantissent la transmission des forces tangentielles entre la section d'acier et la dalle de béton. Lorsque la connexion permet un transfert adéquat des efforts, le caractère mixte est garanti. Ainsi, il est nécessaire que le nombre de goujons soit tel que leur augmentation ne modifie plus la résistance à la flexion de la poutre. Cependant, l'emploi de goujons peut entraîner une augmentation de la charge des structures, ce qui a un impact économique considérable. Les connexions sont occasionnelles, ce qui signifie que les contraintes ne sont pas réparties de manière homogène. Il est possible que cela provoque une fissuration prématurée du béton et entraîne la destruction des structures.

Dans des milieux agressifs, les connecteurs peuvent être très corrodés et se briser facilement. En outre, les solutions en cours ne peuvent être que des adaptations des solutions utilisées pour les dalles coulées en place : au lieu de disposer les goujons de manière régulière le long de la dalle, ils sont souvent placés en groupes dans des "poches" ou "fenêtres" de béton .

Les fissures causées par le bétonnage en deux étapes peuvent entraîner une mise en œuvre relativement lente. Quelques améliorations ont été apportées aujourd'hui, comme des connecteurs linéaires, mais les détails constructifs restent assez complexes (Meaud, 2012).

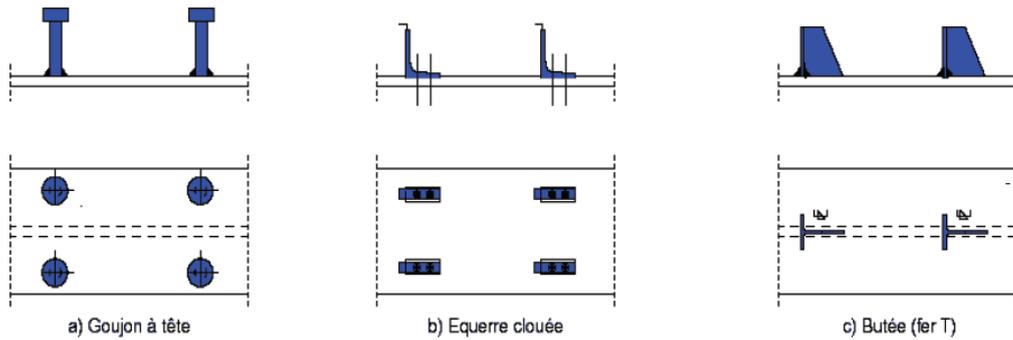


Figure II.7 : Exemples de connecteurs.

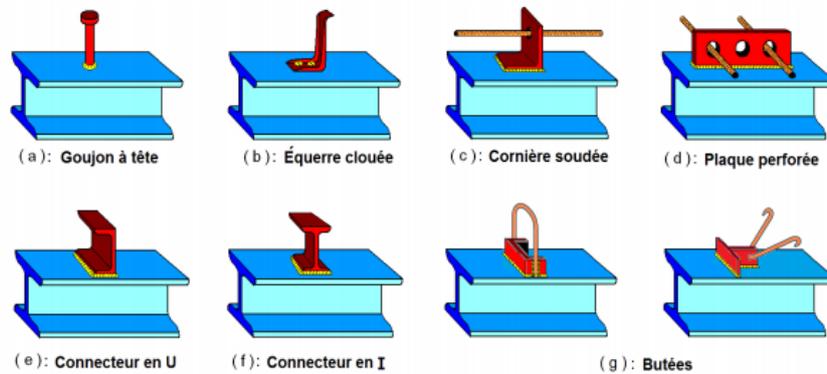


Figure II.8: Types de connecteurs utilisés dans les poutres mixtes.

Il existe deux techniques possibles pour la réalisation des ponts mixtes :

- Technique traditionnelle avec bétonnage sur place.
- Technique occasionnelle d'un béton préfabriqué.

II.3 .1.1 Technique traditionnelle (bétonnage sur site)

La dalle en béton armé est la solution la plus fréquemment employée pour la construction de poutres mixtes. Sur le chantier, elle est coulée et reliée par des goujons. Avec la mise en place des entretoises à mi-hauteur de l'âme des poutres principales, il est possible de passer un coffrage mobile. Cependant, deux techniques de coffrages sont couramment utilisées. Le coffrage à étagage, compatible avec des hauteurs libres relativement faibles. Ce coffrage offre la possibilité de prendre en considération le poids du béton sur les poutres principales uniquement lorsque celui-ci est soulevé. Deuxième types coffrage avec chariot de coffrage sont disponibles. La configuration de ces chariots peut varier en fonction de leur chemin de roulement, qu'il soit supérieur ou inférieur. Lors de la phase de bétonnage de ces types de coffrages, les poutres principales sont chargées de prendre en charge le poids du coffrage ainsi

que le poids du béton frais. Les poutres en comportement mixte ne répondant pas à ces demandes, il est nécessaire de dimensionner les poutres métalliques, ce qui entraîne une augmentation de la quantité d'acier requise. Afin de mettre en place cette méthode de mise en œuvre du béton, il est essentiel que la poutre métallique puisse supporter les contraintes causées par le béton frais, tout en étant efficace pour prévenir leur instabilité globale et leur déversement. Actuellement, on maîtrise parfaitement cette technique traditionnelle,

Mais elle comporte des désavantages tels que :

- la durée de construction prolongée.
- la nécessité d'un équipement mobile très lourd.
- la présence des fissures dans le béton.

II.3 .1 .2 Technique occasionnelle (préfabrication)

Il est possible d'améliorer la conception précédente en utilisant des segments de dalle préfabriqués.

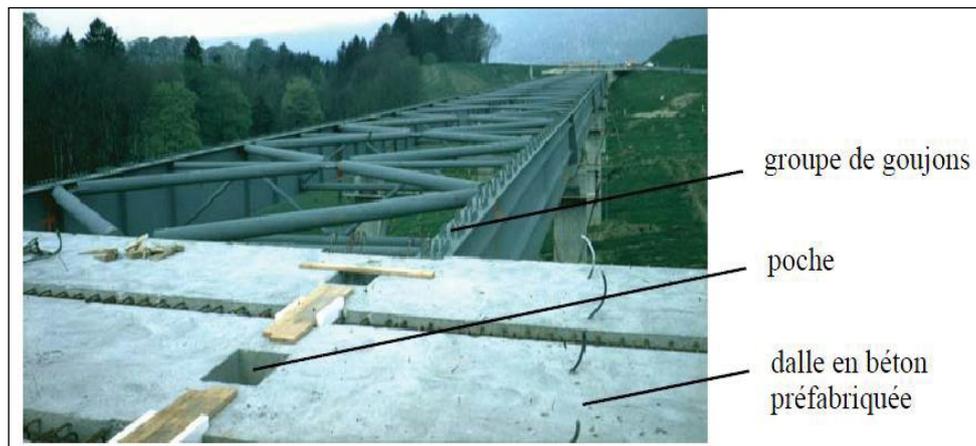


Figure II.9: Connexion de la dalle préfabriquée à l'aide de groupes de goujons

Dans les éléments préfabriqués, il est prévu de réserver des espaces (fenêtre de bétonnage) pour les groupes de goujons afin de réaliser la connexion de cisaillement avec les poutres principales. Dans la seconde phase, les dalles sont reliées à la structure en utilisant du béton pour les réservations rectangulaires et les joints transversaux de la dalle (voir figure II.9). Des ponts mixtes peuvent aussi être réalisés avec des dalles entièrement préfabriquées.

Le système de recouvrement de ces tabliers entièrement préfabriqués est équipé de joints transversaux avec un jeu de 400 mm. En général, on regroupe les connecteurs de cisaillement de type goujons au niveau des joints, avec une distance d'entre eux de 1,8 mètre. Une fois les

éléments placés sur les poutres principales, les joints et les réservations pour les goujons sont renforcés avec du béton ; cette méthode offre des avantages tels qu'un gain de temps dans la mise en place de la dalle sur le chantier et une qualité élevée de la dalle en limitant les effets du retrait, ce qui accroît la durabilité de la structure. Cependant, elle présente également les principaux désavantages suivants : Le bétonnage en deux étapes entraîne des fissures, une concentration des contraintes et une exécution relativement lente, surtout lorsque le nombre de poches est élevé (Tout ,2014).

II.3 .2 La connexion par adhérence

Il semblerait que la connexion par adhérence soit une solution intéressante pour résoudre les problèmes rencontrés lorsqu'on utilise des connecteurs mécaniques. Le concept de connexion par adhérence implique que la résistance de la connexion n'est pas causée par des vibrations mécaniques occasionnelles qui provoquent la compression du béton, mais plutôt par le cisaillement le long d'une ou plusieurs interfaces entre la dalle de béton et la poutre en acier. Un exemple de connexion par adhérence est présenté dans la (Figure II.10): une dalle préfabriquée à nervure longitudinale dans sa face inférieure est posée sur les poutres en acier.

Il s'agit de poutres équipées d'un connecteur linéaire. La surface supérieure est fréquemment recouverte d'une couche d'adhérence qui augmente la surface cisillée et donc la résistance de la connexion. Les surfaces de la dalle en béton en contact avec le coulis de ciment sont différentes fois rugueuses, puis un coulis de ciment est injecté depuis une extrémité de l'ouvrage dans l'espace laissé libre entre la dalle en béton et la poutre en acier afin de réaliser la connexion.

Celle méthode possède de nombreux avantages comme un mode de construction rapide, l'absence de bétonnage sur chantier (uniquement des travaux d'injection). On peut aussi remarquer que l'absence de poches de goujons va permettre d'empêcher une fissuration prématurée due à une concentration de contraintes due à des bétons d'âge différents (Thomann, 2005).a montré (sur des poutres mixtes acier-béton) que la connexion par adhérence permet au système d'assurer une grande résistance statique à l'effort rasant et une très grande rigidité par rapport aux connecteurs type goujons, et possède une faible ductilité dans les conditions d'essais. Toutefois, la résistance à la fatigue, à la traction et certains aspects de la technique d'exécution n'ont pas encore été étudiés et nécessitent donc des règles conservatrices de dimensionnement pour assurer la sécurité des ouvrages.

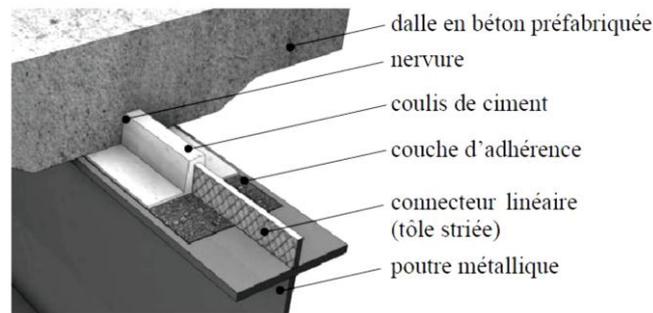


Figure II.10: Exemple de connexion par adhérence.

II.3 .3 La connexion par collage

II.3 .3 .1 Introduction

Après avoir prouvé ses efficacités dans le renforcement ou la réparation de structures anciennes par l'utilisation de composites colles, de nombreuses études se concentrent désormais sur son utilisation dans le cas de structures neuves. En particulier, étant donné qu'il est parfaitement adapté à la problématique de l'association mécanique de matériaux différents, le collage structural semble être une excellente option pour connecter des structures mixtes qui associent un matériau performant en compression à un matériau capable de tirer. De nos jours, la plupart de ces structures mixtes sont fabriquées en acier et en béton, et elles sont généralement reliées par des connecteurs ponctuels de type goujons (Setra ,2010).

II.3 .3 .2 Contexte sur la thématique des structures mixtes assemblées par collage

La particularité des constructions mixtes en génie civil réside dans la possibilité de faire fonctionner deux matériaux différents en flexion dans la même section. Cela nécessite une optimisation du dimensionnement afin que le matériau ayant les meilleures caractéristiques de compression puisse réellement fonctionner sous ce type de sollicitation, tout comme le matériau ayant les meilleures caractéristiques de traction. Les structures mixtes acier-béton sont donc courantes, l'ossature métallique travaillant principalement en traction et le béton en compression. Dans cette situation, il est essentiel de réaliser la connexion entre les deux matériaux car cela dépend du monolithisme de la section obtenue.

De nos jours, il est courant d'utiliser des connecteurs locaux comme des goujons soudés à l'ossature métallique pour cette connexion. Il est important de souligner que cette connexion n'est pas parfaite car il y a un léger glissement au niveau de l'interface qui est pris en

considération dans les codes de dimensionnement (Figure II.11). Dans cette optique, la solution du collage présente un intérêt spécifique car elle permet, à condition d'utiliser une résine structurale, de réaliser une liaison parfaite sans glissement, ce qui permet d'optimiser les dimensions de la structure. Il existe déjà des expériences de construction de structures mixtes en acier-béton collées en Allemagne à la fin des années 1960 (Schollmayer, 2009), et plusieurs études ont prouvé le bon fonctionnement de ce type de connexion (Meaud et al, 2014), (Si Larbi et al, 2007) et (Chataigner, 2016).

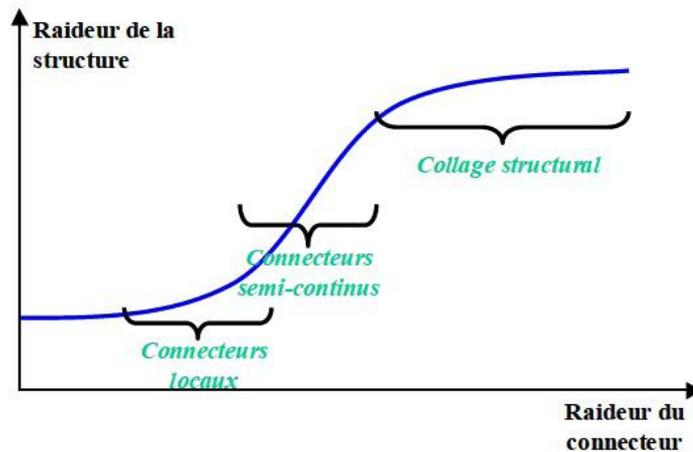


Figure II.11: Schéma de classement des connecteurs pour les structures mixtes.

II.3 .3 .3 L'assemblage par collage présente de nombreux avantages

- Il permet d'assembler des matériaux de nature très différente.
- Respecter l'intégrité des matériaux, l'assemblage étant continu, les efforts sont réparties uniformément, évitant ainsi les concentrations de contraintes.
- La continuité de la liaison qui assure, aux assemblages collés, une meilleure tenue en fatigue.
- La préparation ne nécessite pas d'échauffement local important et ainsi ne modifie pas les propriétés des matériaux à assembler.
- Absorbe les vibrations et chocs.
- Améliore la résistance à la corrosion galvanique.
- Améliore l'étanchéité dans les joints.
- Permet de réduire la masse de l'assemblage tout en étant efficace.

Mais cette technique connaît aussi des désavantages :

- les surfaces doivent être parfaitement propres.

- Les traitements de surfaces mécaniques ou chimiques sont souvent nécessaires pour, respectivement, modifier la rugosité qui permet d'augmenter les surfaces de contact et augmenter les énergies libres de surface.
- Le manque de moyens fiables de contrôle non-destructif.
- D'un point de vue économique (Miklofsky et al,1962) a montré en étudiant les coûts engendrés par la construction d'un pont mixte acier béton connecté, soit avec des goudons soit avec un adhésif, que l'on pouvait diminuer de 20% le coût global de ces structures (prise en compte du prix, de la quantité des matériaux, de la main d'œuvre et des temps de fabrication).
- L'assemblage de structure par collage semble donc être une solution intéressante, tant d'un point de vue mécanique qu'économique et pratique. Donc c'est cette solution qui sera retenue dans cette étude. Pour cela, nous allons détailler quelques généralités sur cette solution, nommée collage structural (Tout ,2014).

II.4 Conclusion

L'utilisation des dalles légères en génie civil présente de nombreux avantages. Elles offrent une réduction significative du poids des structures tout en conservant une résistance adéquate. Les différents types de dalles légères, tels que les dalles préfabriquées en béton ou les dalles en nid d'abeilles, offrent une diversité de choix en termes de conception et de matériaux. La conception des dalles légères nécessite une analyse approfondie des charges, des contraintes et des performances requises. Les matériaux utilisés dans les dalles légères sont sélectionnés pour leur légèreté et leur durabilité, tels que le béton allégé ou les composites. Les méthodes de construction des dalles légères doivent être adaptées aux spécificités de chaque projet. Les applications des dalles légères en génie civil sont vastes, allant des ponts aux planchers industriels. De nombreux projets ont déjà mis en œuvre des dalles légères avec succès. Les performances et la durabilité des dalles légères sont étroitement surveillées pour garantir la sécurité des utilisateurs. Cependant, il est important de prendre en compte les limitations et les considérations de sécurité lors de l'utilisation de ce type de dalle. En conclusion, l'utilisation des dalles légères en génie civil présente de nombreux avantages en termes de poids, de résistance, de diversité de conception et de durabilité, et constitue une solution prometteuse pour de nombreuses applications structurelles.

Chapitre III : Généralité sur les matériaux composites

III.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, l'industrie de la transformation des matériaux composites a bénéficié d'une croissance rapide et régulière, soutenue en particulier par la diversité des applications puisque les composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes,...etc. Ils enrichissent les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions, aussi, ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements et/ou structures grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ce chapitre a pour objectif de définir le concept de matériau composite, connaître sa composition, ses propriétés et de classer ces différentes structures. D'une façon générale, un matériau composite est un matériau composé de plusieurs matériaux de nature ou d'origine différentes et dont ces caractéristiques mécaniques sont supérieures à celles des matériaux entrant dans sa composition. La condition fondamentale pour que cette définition soit valide, est que la cohésion de l'ensemble soit assurée par des liaisons mécaniques, physiques ou chimiques. Ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

III.2 Le concept général des matériaux composites

Un composite est un matériau qui diffère des matériaux macroscopiquement homogènes habituels comme les métaux et les polymères. Il comprend des fibres continues ou coupées d'un matériau résistant « renfort » qui est noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible et il existe plusieurs types d'arrangement des fibres en fonction de leur utilisation par variation de l'angle d'inclinaison. La matrice a un double rôle: Elle conserve la disposition des fibres et leur transmet les sollicitations auxquelles la pièce est soumise. Les composites Fibres-Résine sont appelés "Matériaux Composites" par habitude et sont capables de répondre de façon optimale à la conception des pièces mécaniques. En

effet, les renforts fibreux sont disposés de façon judicieuse dans la matrice qui conserve leur disposition géométrique et leur transmet les sollicitations.

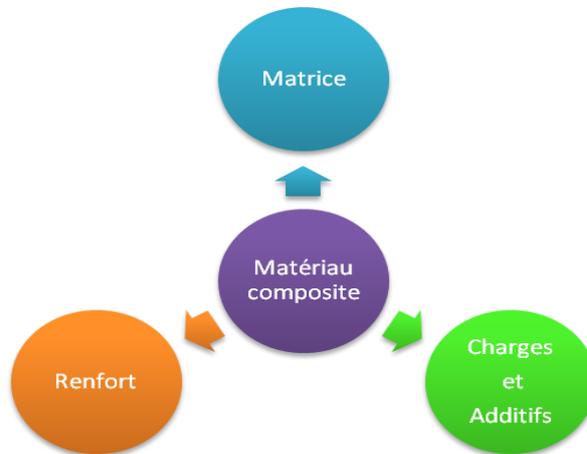


Figure III-1 –conception d'un matériau composite

A l'opposé des matériaux traditionnels, le composite sait s'adapter aux exigences de conception alors qu'une conception traditionnelle découle habituellement des propriétés des matériaux constitutifs. Ainsi, de nos jours, un très grand nombre de composites sont utilisés de manière courante et il est pratiquement impossible de les traiter tous de la même manière, tant leurs propriétés sont variables. Cependant, nous pouvons distinguer quelques familles de composites en fonction du type de matrice et de renforts utilisés.

Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope. On distinguera selon les renforts utilisés:

- Les matériaux composites dits de « grande diffusion (GD) » dont les propriétés mécaniques sont plus faibles mais d'un coût compatible avec une production en grande série ; représentent 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés. le taux de renfort avoisinant 30% à 35%.
- Les matériaux composites dits de « haute performance (HP) », présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important. Ce sont les plus employés en aéronautique et dans le spatial, Les renforts sont plutôt des fibres longues dont le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le coût (Hassaine Daouadji, 2020).

III.3 Définition

Un matériau composite est un assemblage d'au moins de deux matériaux ayant une forte capacité d'adhésion. Le nouveau matériau ainsi élaboré possède des performances supérieures à celles des éléments pris séparément. Il est généralement constitué de deux composants, une ossature appelée renfort qui assure la tenue mécanique et d'une protection appelée matrice qui assure la cohésion de la structure et le transfert des charges entre les renforts. A ces deux composants principaux peuvent s'ajouter des additifs qui permettent de modifier l'aspect, ou les caractéristiques du matériau. Peuvent être incorporés pour améliorer la résistance au feu, diminuer le retrait, modifier la couleur...etc. D'une manière générale, les matériaux composites structuraux sont une part de la nature du renfort sont fortement anisotropes, c'est-à-dire que leurs propriétés sont très différentes suivant la direction considérée (Hassaine Daouadji, 2020).

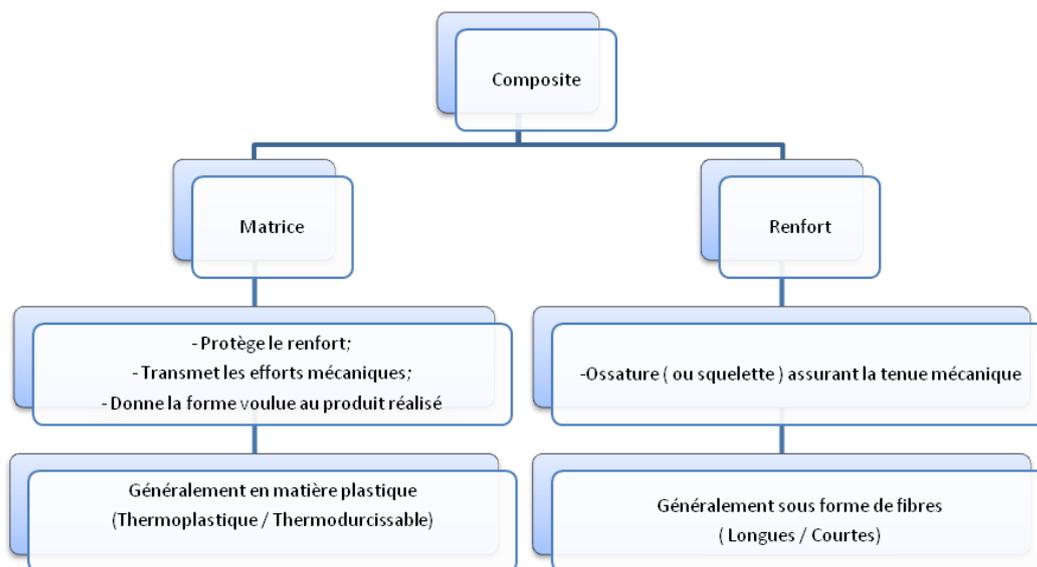


Figure III-2- Description d'un matériau composite

III.4 Le renfort

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée ci-dessous:

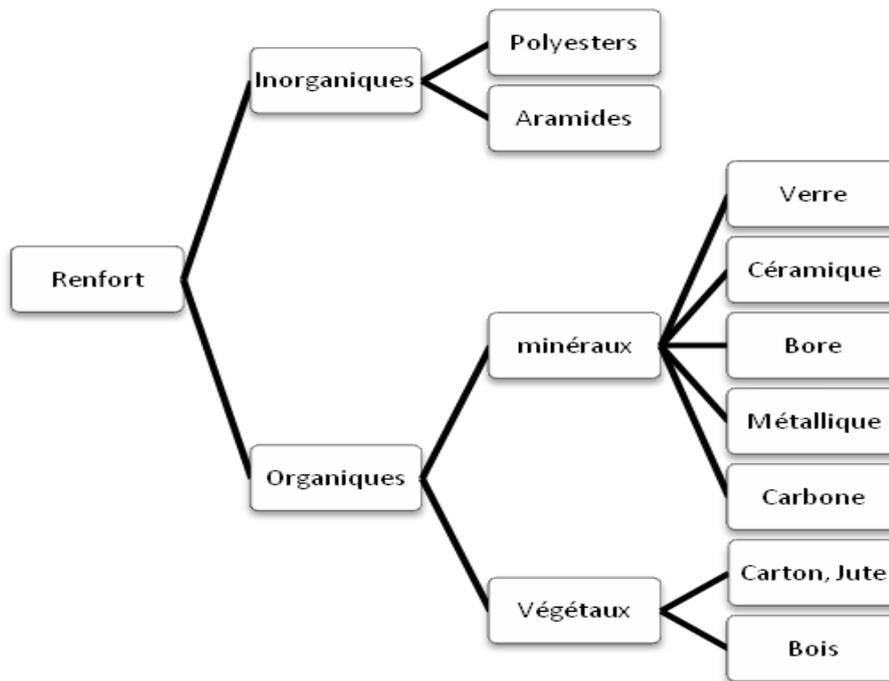


Figure III-3- La classification des types de renforts

III.4.1 Revue des différents renforts disponibles

III.4.1.1 Les fibres de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances en aéronautique, en construction industrielle, dans les sports et les loisirs. Très fortement orientées, les microstructures des fibres de carbone donnent une importante rigidité et résistance des fibres dans la direction longitudinale que dans la direction transversale.

Avantages des fibres de carbone:

- Excellentes propriétés mécaniques.
- Très bonne tenue en température (non oxydante).
- Dilatation thermique nulle.
- Bonne conductibilité thermique et électrique.
- Bonne tenue à l'humidité.
- Usinage aisé.
- Faible densité.

Inconvénients des fibres de carbone:

- Une mauvaise résistance à l'abrasion et aux chocs.
- Leur recyclage (broyage problématique).
- Leur conductivité, de nombreuses électrocutions ont frappé des pêcheurs après avoir heurté une ligne électrique avec leur canne ou des marins en manœuvrant le mât de leur voilier.
- Cette fibre provoquerait sous certaines formes des risques de cancer du poumon.
- Prix très élevé.



Figure III-4 - Exemples des fibres de carbone.

Tableau III-1- Propriétés des fibres de carbone

Propriétés en traction	HR	IM	HM
R _t (MPa)	3000 à	4000 à	47000 à
	5000	4500	52000
E _{oT} (MPa)	220000 à	235000 à	275000 à
	240000	250000	300000
A _R (%)	1.2 à1.5	1.6 à1.8	1.4à1.6
Masse volumique (g /cm ³)	1.75 à1.8	1.75 à1.8	1.7 à1.8

III.4.1.2 Les fibres de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion (GD). Elles sont les plus anciennes (1940) et les moins chères des fibres du marché, et celles dont on réalise le plus fort tonnage. Les fibres de verre constituent le principal renfort, utilisé dans plus de 95% des matériaux composites. L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par un vieillissement accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de températures élevées.



Figure III-5 - Fibres de verre.

Avantage des fibres de verre

- Bonne résistance spécifique (pour le verre R).
- Une bonne adhérence entre fibres et résines (matrices).
- De bonnes propriétés mécaniques, mais inférieures à celles de la fibre de carbone.
- Des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications.
- Tenue à la température élevée.
- Incombustibilité.
- Dilatation et conductivité thermique faible.
- Bon rapport de performances mécanique/prix.

Inconvénients des fibres de verre

- Faible module (par rapport au carbone ou aramide)
- vieillissement au contact de l'eau

Tableau III-2- Propriétés des fibres de Verre

Propriétés en traction	Verre E	Verre R	Verre S
R_t (MPa)	3400	4400	4900
E_{oT} (MPa)	73000	86000	87000
A_R (%)	4.9	5.2	-----
Masse volumique (g/cm^3)	2.54	2.55	2.54

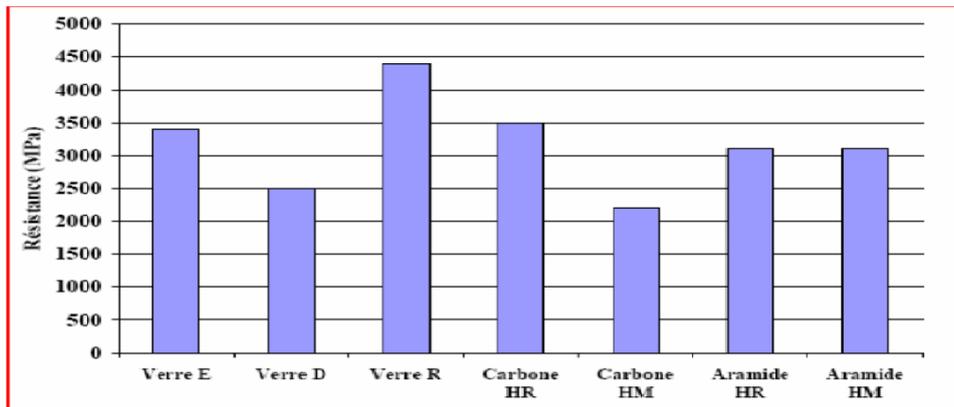


Figure III-6 - Histogramme des résistances à la rupture en traction des fibres.

III.4.1.3 Fibres d'aramide

Elles sont issues de la chimie organique des polyamides Aromatiques (ou poly-aramide) par synthèse chimique à basse température; ses propriétés diffèrent des polyamides aliphatiques classiques. Les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) mais qui souffrent d'une adhérence moyenne entre matrice et fibre et d'un prix encore trop élevé.

Les chaînes de polymères alignées donnent une résistance et une rigidité plus importantes dans la direction longitudinale que dans la direction transversale. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- Les fibres à bas module: utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- Les fibres à haute module: employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

Avantage des fibres d'aramide

- Bonne résistance spécifique à la traction.
- Faible densité.
- Dilatation thermique nulle.
- Absorption des vibrations, amortissement.
- Excellente résistance aux chocs et à la fatigue.
- Bon comportement chimique vis-à-vis des carburants.

Inconvénients des fibres d'aramide

- Prix très élevé.
- Faible tenue en pression.
- Reprise d'humidité importante (4%).
- étuvage avant imprégnation.
- Faible adhérence avec les résines d'imprégnation.
- Sensibilité aux UV.
- Usinage difficile.

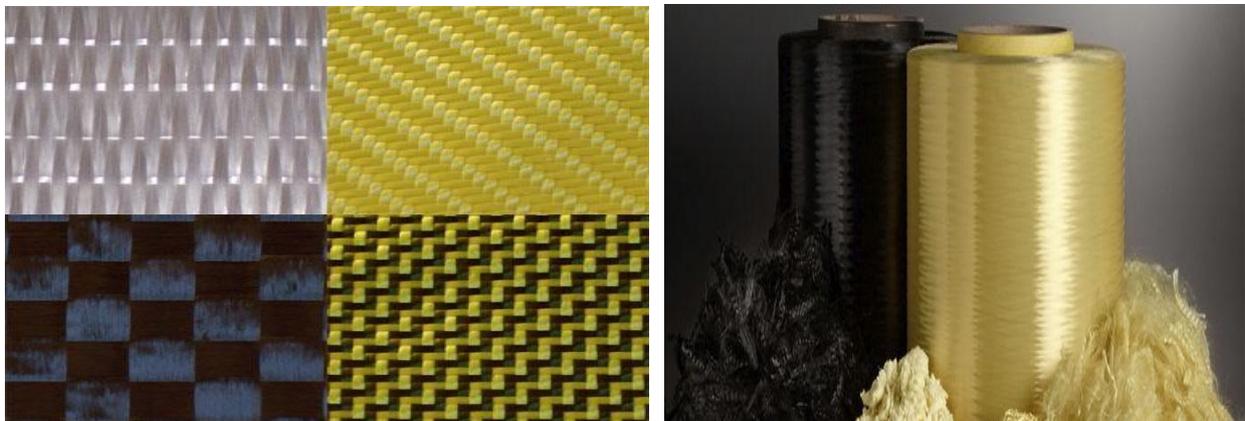


Figure III-7- Propriétés des fibres d'aramide

Tableau III-3- Propriétés des fibres d'aramide

Propriétés en traction	Kevlar49	Kevlar29
R_t (MPa)	3000	2700
E_{oT} (MPa)	120000 à 130000	60000
A_R (%)	2.1	4
Masse volumique (g/ cm ³)	1.45	1.44

III.4.1.4 Fibres métalliques.

Elles sont les plus chères de toutes, en raison de leur difficulté de fabrication. Elles approchent les propriétés d'un cristal parfait. Ces fibres sont utilisées avec des matrices métalliques pour leurs bonnes conductibilités thermique et électrique ainsi que leurs caractéristiques thermo mécaniques



Figure III-8 - Fibres métalliques

III.4.1.5 Fibres naturelles

Elles pourront constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur plus grande facilité de recyclage lorsque leurs propriétés physiques seront mieux appréhendées. Actuellement, elles présentent plusieurs solutions techniques majeures pour une utilisation massive dans les matériaux composites.



Figure III-9 - Fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine :

Les fibres végétales qui comprennent :

- Des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- Les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie),
- Les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco).
- Les fibres animales qui proviennent des poils, telles que la toison animale, et des sécrétions telles que la soie.
- Les fibres minérales telles que l'amiante.

III.5 Les matrices

La matrice a pour rôle principal dans les matériaux composites de protéger les fibres de l'environnement et leur fournir un support latéral. Elle permet également de transmettre les efforts aux renforts. En fonction de la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés en trois familles, les composites à matrices organiques (CMO) les plus répandues, les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité comme le spatial, le nucléaire et le militaire, la troisième famille c'est les composites à matrices métalliques (CMM) (Hassaine Daouadji, 2020).

III.5.1 La matrice organique

Les matériaux composites peuvent être fabriqués à partir de matrices composées de divers matériaux polymères. Les substances composées. Les familles de résines "thermodurcissables" ou "thermoplastiques" peuvent les contenir. Résines "thermodurcissables" et "thermoplastiques" (Belblidia 2018).

a) Résine thermodurcissable(TD)

Les structures moléculaires de cette classe sont beaucoup plus complexes et difficiles à représenter par un simple croquis. Elles constituent un réseau tridimensionnel de thèmes fondamentaux. Les plus courantes sont les aminoplastes, les polyamides, les phénoliques, les polyesters et les époxydes. Ils sont créés par l'interaction chimique d'une résine de base avec son catalyseur ou durcisseur, plus une variété d'autres substances (telles que les accélérateurs et les inhibiteurs) qui ajoutent des qualités uniques à la fois au matériau et à la réaction chimique (charges). Une fois durci, le matériau ne peut pas être fondu ; il ne peut être qu'usiné (Alain, 1996).

Tableau III-2- Propriétés des Résines thermodurcissables.

Propriétés En traction	Polyester	Epoxyde	Polyamide	Phénolique	Silicone
$E_{\sigma T}$ (MPa)	30 à90	30 à100	Environ 90	20 à60	20 à60
A_R (%)	2000 à3000	2500 à4000	Environ 3000	1000 à5000	Environ 3000
Densité (g/ cm ³)	1.1 à1.3	1.1 à1.3	Environ 1.3	1.2 à1.4	1 à1.1

b) Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques se caractérisent par leur capacité à passer de manière réversible d'un état solide à un état pâteux. Elles présentent plusieurs avantages qui découlent directement de leur définition: Traitement rapide du thermoformage; Du fait de leur réversibilité, elles peuvent être recyclées et soudées. Cependant, la mise en œuvre de ces résines est coûteuse car elle nécessite des températures élevées (300 à 400°C). Comme elles sont plus durables que les résines thermodurcissables, la capacité des composites à résister aux chocs devrait être améliorée. Au départ, les résines thermoplastiques présentaient deux inconvénients majeurs: leur résistance limitée aux solvants et leur faible résistance à la température. Ces substances nécessitent un processus quelque peu compliqué pour l'imprégnation des fibres, et leur dureté à température ambiante rend la draperie partielle difficile. Sachant que l'industrialisation n'en est qu'à ses débuts, on peut s'attendre à un développement considérable de ces résines à l'avenir (Castanié, Guerda, 2013).

III.5.2 Matrice céramique

Mais comme les matériaux céramiques se cassent facilement, un troisième ingrédient est ajouté à ces composites afin de le "dé fragilisé". L'interphase entre la fibre et la matrice est mince et facilement clivable. Elle doit offrir une liaison fibre/matrice qui soit à la fois suffisamment élevée pour transmettre la charge appliquée à la pièce directement au renfort fibreux et suffisamment faible pour empêcher les fissures de la matrice de s'étendre au renfort et de briser les fibres. Il fonctionne donc comme un fusible mécanique. Toutefois, en fonction de la composition de ces phases, il peut également protéger les fibres de l'oxydation. La nature robuste et résistante du composite provient de cette interphase, qui aide à prévenir une rupture catastrophique (Camus et al).

III.5.3 Matrice métallique :

Une matrice métallique présente les avantages suivants par rapport à une matrice organique:

- Qualités mécaniques accrues
- Une plus grande plage de températures de travail une excellente conductivité électrique et thermique (dissipation de la chaleur)
- Simplicité d'assemblage et d'usinage.

Il convient de mentionner que les matrices métalliques restent plus chères que les matrices organiques. Les matrices métalliques sont fabriquées par diverses méthodes, notamment le

dépôt physique en phase vapeur, l'imprégnation en phase liquide et la stratification (Benheni ,2023).

III.6 Problèmes liés à l'utilisation des matériaux composites dans le génie civil

II.6.1 Introduction

Suite à la mise en œuvre initiale des composites dans le génie civil au début des années 1980, et avec l'avancement de diverses procédures et méthodes de traitement, l'utilisation des composites a suscité une attention significative de la part de l'industrie et des laboratoires de recherche. Malgré cela, l'adaptabilité des matériaux composites aux applications de renforcement pose un certain nombre de problèmes, en dépit de leurs nombreux avantages (fortes qualités mécaniques, légèreté, résistance à la corrosion, etc.) Ces problèmes peuvent être directement liés à la mécanique des composites, qui fait actuellement l'objet d'études en raison de l'hétérogénéité et de l'anisotropie des matériaux, ou à la structure renforcée elle-même, comme le décollement, la durabilité (Andjami ,2013).

III.6.2 Résistance des matériaux composites

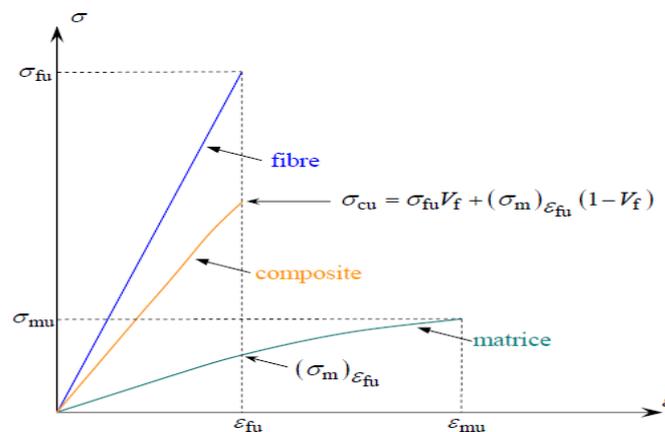


Figure III-10 - Relation contrainte déformation en traction pour les différents composants.

Il est fondamental pour le concepteur de prévoir et de connaître les caractéristiques géométriques et mécaniques d'un mélange "renfort - matrice" qui est la structure de base des pièces composites.

En général, le composite est formulé pour satisfaire à des critères de résistances, de rigidité ou bien de tenue à l'action de l'environnement. Les propriétés finales (figure III.5). Dépendent des propriétés élémentaires de chaque constituant. L'évaluation des propriétés des matériaux

composites se fait à différentes échelles. Il s'agit d'une approche multi- échelles : celle de la fibre élémentaire, du pli élémentaire puis du composite (Hassaine Daouadji, 2020).

III.6.3 Les propriétés du pli élémentaire

A l'échelle du pli élémentaire, le matériau composite a deux directions privilégiées; la direction longitudinale (L) et la direction transversale (T) (Figure III-2). Dans un matériau composite unidirectionnel, les fibres sont le plus souvent réparties d'une manière aléatoire, plutôt que suivant un arrangement régulier. Il n'existe pas qu'une seule possibilité d'arrangement des fibres mais une infinité de possibilités.

Des expressions simplifiées et pratiques des modules peuvent être obtenues en faisant une approche simplifiée du comportement mécanique de la cellule élémentaire du matériau composite unidirectionnel.

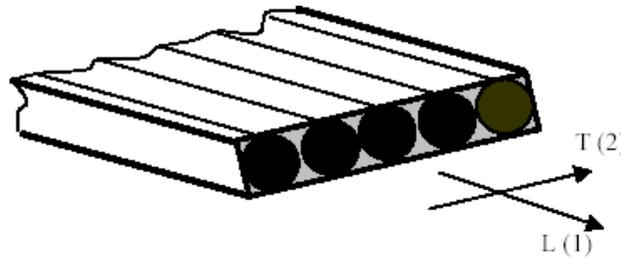


Figure III-11 -Illustration d'un renfort fibreux unidirectionnel.

Si nous considérons un composite constitué de deux composants: une résine de caractéristiques E_m et ν_m et des fibres longues unidirectionnelles considérées isotropes et de caractéristiques E_f et ν_f , le taux volumique de fibres dans la résine est noté V_f . Le matériau ainsi constitué est isotrope transverse dans la mesure où l'on observe une unique différence entre les caractéristiques selon les directions L et T . Il existe des formules simplifiées qui permettent la prédiction de ces coefficients à partir des caractéristiques des constituants. Ces lois simplifiées sont connues sous le nom de lois des mélanges dans le cas des unidirectionnels. Ces lois de mélange s'inscrivent dans le concept d'homogénéisation des caractéristiques de matériaux multi-phasiques ou hétérogènes. Ces lois trouvent de nombreuses validations dans la littérature scientifique. Elles sont nombreuses et s'adaptent en fonction du type de constituant, du taux de fibre ou encore de l'arrangement des fibres dans la résine.

III.7 Caractéristiques du mélange renfort-matrice:

Teneur en masse de renfort : $M_{fib} = (\text{masse de renfort}) / (\text{masse total})$

Teneur en masse de matrice : $M_m = (\text{masse de matrice}) / (\text{masse total})$

$$M_{fib} + M_m = 1 \quad (III.1)$$

Teneur en volume de renfort: $V_{fib} = (\text{volume de renfort}) / (\text{volume total})$

Teneur en volume de matrice : $V_m = (\text{volume de matrice}) / (\text{volume total})$

$$V_{fib} + V_m = 1 \quad (III.2)$$

La fraction volumique des fibres V_{fib} typique est de l'ordre de 0,60 – 0,65.

$$\text{Module d'élasticité du composite : } E_f = E_{fib} V_{fib} + E_m V_m \quad (III.3)$$

$$\text{Résistance en traction du composite : } f_f = f_{fib} v_{fib} + f_m v_m \quad (III.4)$$

$$\text{Coefficient de poisson du composite: } f_f = v_{fib} V_{fib} + v_m V_m \quad (III.5)$$

Où : E_f est le module d'Young du matériau composite dans la direction des fibres, E_{fib} le module d'Young des fibres, E_m le module d'Young de la matrice, V_{fib} la fraction volumique des fibres, V_m la fraction volumique de la matrice, f_f la résistance en traction du matériau composite, f_{fib} la résistance en traction des fibres, f_m la résistance en traction de la matrice, v_f est le coefficient de poisson du composite, v_{fib} est le coefficient de poisson des fibres, v_m est le coefficient de poisson de la matrice. La résistance et le module d'Young des fibres sont plus importants par rapport à ceux de la matrice, le comportement mécanique des matériaux composites est donc piloté par les propriétés mécaniques des fibres et la quantité de fibres (fraction volumique) (Hassaine Daouadji, 2020).

III.8 Structures du composite

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types principaux :

- Les monocouches.
- Les stratifiées.
- Les sandwiches.

III.8.1 Les monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort: à fibres longues (unidirectionnelles 1D, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

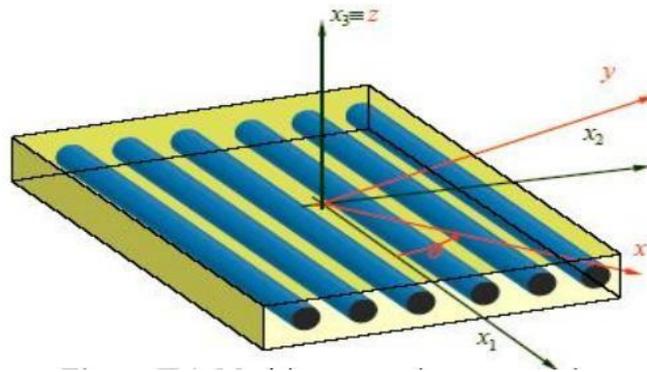


Figure III-12 - composite monocouche.

III.8.2 Les stratifiées

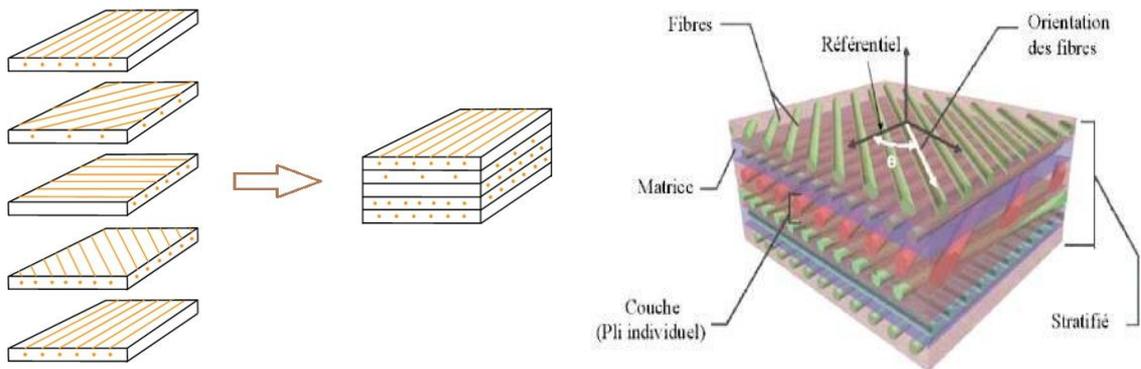


Figure-III-13 - Une plaque stratifiée

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. Les stratifiés sont, avec les panneaux sandwich, les matériaux composites qui ont les meilleures performances structurales. L'idée de base est celle de superposer des couches anisotropes, renforcées avec des fibres longues, uni- ou bi-directionnelles, en orientant les couches de sorte à obtenir un matériau final ayant les propriétés souhaitées, en terme de comportement élastique, rigidité, résistance etc...).

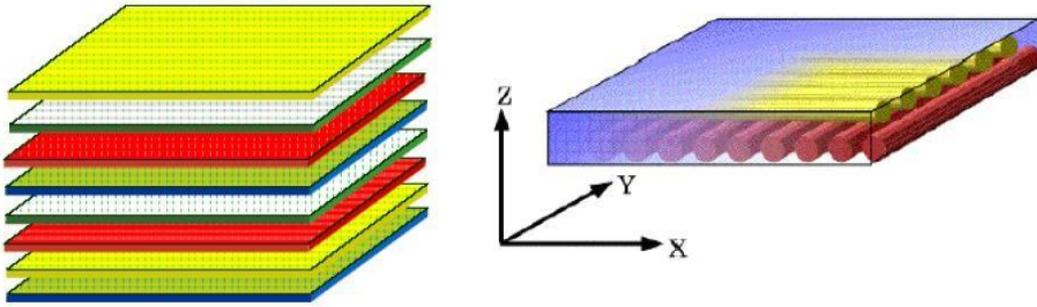


Figure-14 - Matériau composite stratifié.

La conception du matériau devient donc une phase de la conception structurale, leurs qualités est d'être de hautes performances mécaniques. L'un des avantages des stratifiés est la possibilité d'orienter les fibres selon des directions adaptées aux efforts imposés à la structure. La conception d'une structure stratifiée passe donc par le choix des matériaux, des orientations des fibres et de l'agencement des plis (séquence d'empilement de plis d'inclinaison donnée). Le choix de l'empilement est plus particulièrement, des orientations permettront d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

Un stratifié possédant l'empilement (0, +45, 90,-45) est un stratifié avec 4 couches dans les directions 0°, +45°, 90° et -45°, l'orientation 0° coïncidant avec la direction « 1 » du repère principal du composite.

Ces plans seront répartis symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié. Il est recommandable que les stratifiés soient:

- **Equilibrés**: stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction + θ que de couches orientées suivant la direction - θ ;
- **Symétriques** : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen ;
- **Orthogonales**: stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches à 90°.

Parmi les stratifiés, on peut citer quatre principaux types :

- **Stratifié Unidirectionnel**: l'orientation des fibres est la même dans tous les plis, ils sont toutes dans la même direction. Exemple: un stratifié unidirectionnel à 0°, $\theta=0^\circ$ dans les différents plis.
- **Stratifié à Pli Orienté $\pm\theta$ (angle ply)**: l'orientation des fibres est alternée d'un pli à l'autre, (+ θ /- θ /, avec θ différent de 0 ou de 90°).

- **Stratifié à Pli Croisé (cross ply):** l'orientation des fibres est alternée d'un pli à l'autre, $0/90^\circ/0/90^\circ$.
- **Stratifié Symétrique:** l'orientation des fibres est symétrique par rapport à la ligne centrale du stratifié, c.à.d. pour chaque pli à angle θ au-dessus du plan médian il y a un pli à angle égal de l'autre côté du plan médian, $\theta(z)=\theta(-z)$.

III.8.3 Les sandwichs

Les matériaux composites de types sandwichs sont principalement constitués de deux composants nommés : peau et noyau. Cette technique consiste à déposer une âme (constituée d'un matériau léger possède de bonnes caractéristiques en compression) entre deux feuilles ou peau. Les âmes peuvent être pleines (bois, mousse, balsa, structure a nid d'abeille ect...) ou creuses (alliages métalliques léger, papier ect...). Les peaux sont des stratifiés ou des feuilles d'alliages légers. Par ce fait les sandwichs deviennent assez légers et offrent une très grande rigidité en flexion (Hassaine Daouadji).

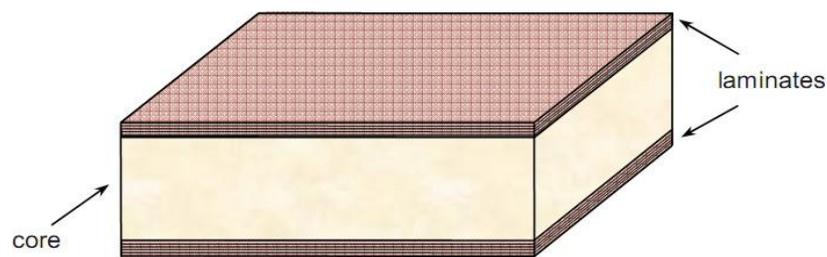


Figure III-15 - Composite sandwich.

III.9 Hybridation Intra fils

III.9.1 Introduction

L'hybridation intra fils consiste à combiner les fibres dans la même couche, un modèle analytique est présenté en utilisant la théorie de cisaillement d'ordre élevé de plaques. Dans un premier temps, les propriétés élastiques de la plaque hybride sont obtenues en utilisant la loi des mélanges. Ensuite ; l'équation du mouvement de la plaque stratifiée est obtenue en utilisant le principe d'Hamilton. Les expressions mathématiques sont obtenues à l'aide de la solution de Navier pour différentes conditions aux limites. D'autre part, un modèle en éléments finis est utilisé pour valider les résultats obtenus par la présente théorie afin d'étudier le comportement du composite hybride sous différents types de sollicitations (Ben Henni ,2019).

III.9.2 Propriétés matérielles des composites hybrides

Dans cette étude, on considère une plaque composite stratifiée à fibres hybrides, dans laquelle les couches peuvent contenir deux types de fibres : Carbone/Verre, Carbone/Kevlar et Kevlar/Verre. Les propriétés mécaniques de ces matériaux dépendent des propriétés des fibres et de la matrice, dont les quantités dans les matériaux composites sont spécifiées par des fractions volumiques. Le système de coordonnées de la plaque est illustré sur la figure (III-13) Le module longitudinal du composite E_1 est donné par l'équation suivante en utilisant la loi des mélanges:

$$E_1 = E_f^{(1)}V_f^{(1)} + E_f^{(2)}V_f^{(2)} + E_m V_m \quad (\text{III.1})$$

Où $E_f^{(1)}, E_f^{(2)}$ et E_m sont les modules de Young de la fibre 1, de la fibre 2 et de la matrice

Respectivement, $V_f^{(1)}, V_f^{(2)}$ et V_m sont les fractions volumiques de la fibre 1, de la fibre 2 et de la matrice respectivement. Ces fractions volumiques vérifient les relations suivantes : (Ben Henni, 2019).

$$V_f^{(1)} + V_f^{(2)} + V_m = 1 \quad (\text{III.2})$$

$$V_f = V_f^{(1)} + V_f^{(2)} \quad (\text{III.3})$$

Où V_f est la fraction volumique totale de la fibre.

D'autre part, les fractions volumiques normalisées de fibres sont définies comme suit:

$$W_f^1 = \frac{V_f^{(1)}}{V_f}, W_f^2 = \frac{V_f^{(2)}}{V_f} \quad (\text{III.4})$$

D'où:

$$E_1 = V_1 \left[E_f^{(1)} W_f^{(1)} + E_f^{(2)} (1 - W_f^{(1)}) \right] + E_m (1 - V_f) \quad (\text{III.5})$$

Le coefficient de Poisson dans le plan du composite hybride V_{12} peut être calculé comme suit:

$$V_{12} = V_f \left[v_f^{(1)} W_f^{(1)} + v_f^{(2)} (1 - W_f^{(1)}) \right] + V_m (1 - V_f) \quad (\text{III.6})$$

Où $v_f^{(1)}, v_f^{(2)}$ sont les coefficients de Poisson du premier et du deuxième type de fibres respectivement et V_m est le coefficient de Poisson de la matrice.

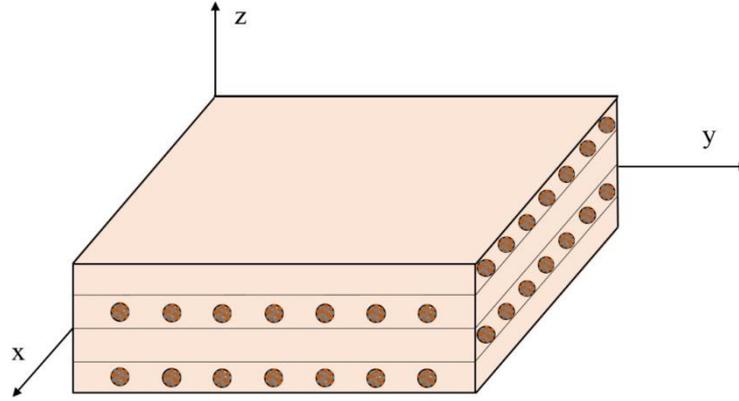


Figure III-16 - Système de coordonnées utilisées pour une plaque hybride intra fils

Les modules de cisaillement des fibres et de la matrice sont donnés par:

$$G_1^{(1)} = \frac{E_f^{(1)}}{2(1+V_f^{(1)})}, G_1^{(2)} = \frac{E_f^{(2)}}{2(1+V_f^{(2)})}, G_m = \frac{E_m}{2(1+V_m)} \quad (\text{III.7})$$

Où $G_f^{(1)}, G_f^{(2)}$ sont les modules de cisaillements du premier et du deuxième type de fibre respectivement, G_m est le module de cisaillement de la matrice.

Le module de cisaillement total des fibres est donné par:

$$G_f = GV_f^{(1)}W_f + G_f^{(2)}(1-W_f) \quad (\text{III.8})$$

Les modules de compressibilité des fibres et de la matrice sont donnés par:

$$K_f = \frac{E_f^{(1)}W_f}{3(1-2V_f^{(1)})} + \frac{E_f^{(2)}W_f}{3(1-2V_f^{(2)})}, K_m = \frac{E_m}{3(1-2V_m)} \quad (\text{III.9})$$

Les modules de compressibilité latéraux des fibres et de la matrice sont donnés respectivement par:

$$K_f = k_f = \frac{G_f}{3}, K_m = k_m = \frac{G_m}{3} \quad (\text{III.10})$$

Les modules de cisaillement dans le plan et hors du plan de la plaque composite sont donnés par :

$$\left. \begin{array}{l} G_{12} = G_{13} = G_m \frac{(1+V_f) + G_m(1-V_f)}{G_f(1-V_f) + G_m(1+V_f)} \\ G_{23} = G_m \left[1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + (1-V_f) \frac{k_m + \frac{7}{3}G_m}{2k_m + \frac{8}{3}G_m}} \right] \end{array} \right\} \quad (III.11)$$

Le module de compressibilité latéral total de la plaque composite hybride est donné par:

$$K_L = k_m + \frac{V_f}{\frac{1}{(k_f - k_m + \frac{1}{3}G_f - G_m)} + \frac{1-V_f}{k_m + \frac{3}{4}G_m}} \quad (III.12)$$

Enfin, le module de Young transversal total de la plaque composite hybride est donné par:

$$E_2 = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{23}} \frac{2(V_{12})^2}{E_1}} \quad (III.13)$$

III.10 Les charges et additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières. Les quantités de produits peuvent varier de quelques dizaines de pourcentage dans le cas de charges à quelques pourcentages et moins dans le cas d'additifs. Les propriétés particulières qui peuvent généralement être améliorées portent sur les résistances mécaniques (compression) et les propriétés de mise en œuvre. Nous pouvons ainsi citer en exemple les charges renforçant qui se présentent sous forme sphérique (microbilles de verres) ou non sphérique (écailles de mica), les charges non renforçant qui ont pour rôle de diminuer le coût de la résine et peuvent contribuer à l'augmentation de certaines propriétés (masse volumique, dureté, module d'élasticité) (Belblidia, 2018). Les additifs interviennent comme lubrifiants, colorants ou agents anti-ultraviolets.



Figure III-17 - Exemples des charges

III.11 Les adhésifs

Les colles, quel que soit leur état (liquide, pâte ou bien film) sont constituées de polymères organiques et appartiennent à l'une des trois catégories suivantes :

- Les thermodurcissables, dont le réseau polymère possède une structure tridimensionnelle. Ils présentent une rigidité élevée et de très bonnes propriétés mécaniques,
- Les thermoplastiques, constitués de chaînes linéaires, qui présentent en général des propriétés mécaniques inférieures à celles des thermodurcissables,

Les élastomères, très souples et peu résistants, mais qui présentent une très forte adhésivité (Belblidia, 2018).

III.12 Avantages et inconvénients des composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils s'offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.
- Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion:

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication (Belblidia, 2018).

III.13 Conclusion

Le composite est généralement conçu pour répondre à des exigences de résistance, de rigidité ou de résistance à l'environnement. Les caractéristiques finales sont basées sur les caractéristiques fondamentales de chaque composant. Dans ce chapitre, nous avons abordé toutes les questions liées aux matériaux composites et à l'assemblage d'une matrice et d'un renfort présentant des fibres. Nous avons examiné leurs avantages (rigidité élevée, résistance à la corrosion, isolation thermique et phonique...) ainsi que leurs inconvénients (mauvaise résistance à la chaleur, sensibilité de ces matériaux aux impacts...), ainsi que leurs caractéristiques mécaniques. L'emploi des matériaux composites dans le secteur de la construction démontre qu'ils représentent une excellente alternative aux solutions classiques. Ce chapitre nous a précédemment exposé. La combinaison des fibres (carbone, verre et Kevlar) dans la même couche est appelée hybridation intra fils, tandis que l'hybridation inter couche (ou couche par couche) est appelée hybridation inter couche. Étant donné que la théorie des stratifiés sera utilisée pour renforcer la face de tension inférieure d'une poutre en béton, il est essentiel d'examiner la zone de contact entre le béton et le composite, également connue sous le nom d'interface. Une recherche sur les diverses approches.

Chapitre VI : Modélisation des poutres mixtes acier-béton

VI.1 Introduction

Les structures composites acier-béton, qui combinent la haute résistance à la traction de l'acier et la haute résistance à la compression du béton, ont été largement utilisées dans les bâtiments à plusieurs étages et les ponts dans le monde entier. Au début des années 1960, une technique de collage efficace a été introduite pour relier la dalle en béton et la poutre en acier par un joint adhésif, et non par des connecteurs de cisaillement métalliques conventionnels ; Les avantages de cette méthode sont la réduction de la concentration des contraintes, l'absence de soudage sur le chantier et l'utilisation d'une dalle de béton préfabriquée. Et d'autre part l'analyse de la poutre métallique collée avec une plaque composite, Il est montré que les contraintes de cisaillements et normales à l'interface sont influencées par le matériau et les caractéristiques géométriques de la poutre. Les matériaux composites ont été identifiés en tant que nouveaux matériaux innovateurs pour la réparation et le renforcement des structures. Ainsi son utilisation est une solution efficace pour augmenter la résistance globale des structures

L'étude présente les contraintes d'interfaces de cisaillement et normales (interface 1) et les contraintes d'interfaces de cisaillement et normales (interface 2) dans une poutre mixte acier-béton simplement soutenue et renforcée par une plaque composite en PRFC et soumise à des charges mécaniques. Contrairement à certaines études existantes, l'hypothèse selon laquelle les adhérences ont la même courbure n'est pas utilisée dans la présente étude. Les résultats obtenus sont très satisfaisants par rapport à ceux donnés dans la littérature.

VI.2 Importance de la l'étude

Le but de l'étude était de traiter de l'analyse analytique du comportement mécanique des structures mixte acier-béton-composite liées par collage. La poutre en acier et la dalle en béton sont assemblées par adhésifs, ainsi que la poutre en acier et la plaque CFRP. La figure VI.1. Montre la nouveauté du modèle qu'a été présenté par nos encadreurs, le nouveau modèle présenté par rapport aux modèles existants dans la littérature, où nous avons montré l'efficacité de la technique de collage structural en génie civil. L'effet des principaux

paramètres, tels que la nature adhésive et l'épaisseur irrégulière du joint adhésif, sur les performances mécaniques et la charge ultime est étudié.

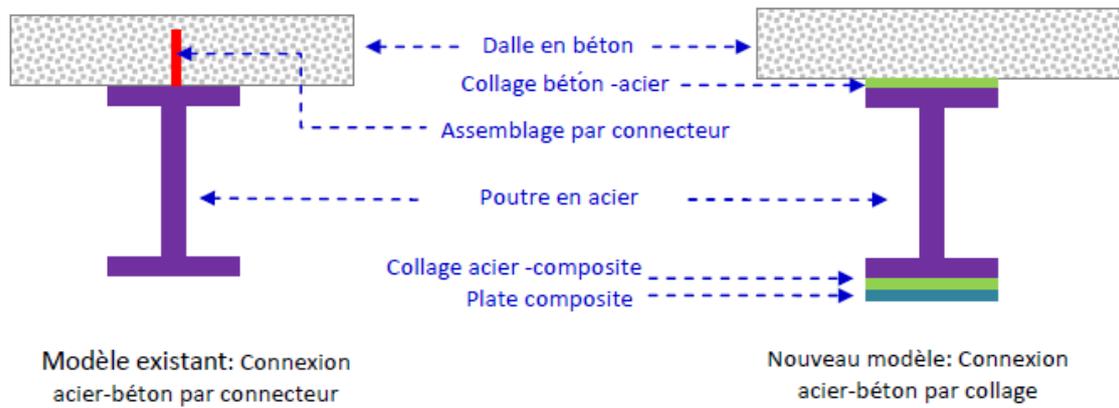


Figure VI.1. Vue en coupe d'une poutre composite acier-béton reliée mécaniquement (modèle existant) et collée (nouveau modèle)

Les modes de défaillance les plus courants pour les poutres mixte acier-béton-composite sont le glissement de la dalle en béton armé et le décollement de la plaque CFRP. Ces types de ruptures empêchent la poutre mixte acier-béton renforcée d'atteindre sa capacité de flexion ultime et doivent donc être inclus dans les considérations de conception. Ces deux modes de rupture prématurée (glissement du béton et décollement de la plaque CFRP) sont provoqués par le cisaillement et les concentrations de contraintes normales dans les deux couches adhésives (interfaces 1 et 2). Des solutions de forme fermée de concentrations de contraintes sont nécessaires pour développer des directives de conception pour le renforcement des poutres acier-béton-composite.

VI.3 Hypothèse de la présente méthode

Cette analyse prend en compte les contraintes de cisaillement et les déformations transversales dans la poutre en acier et la dalle en béton armé, mais ignore les contraintes transversales normales (figures VI.2a et VI.2b). L'une des approches analytiques pour les dalles en béton collées à la poutre en acier renforcée par une plaque a été présentée afin de la comparer à une approche analytique, cette approche analytique est basée sur les hypothèses suivantes :

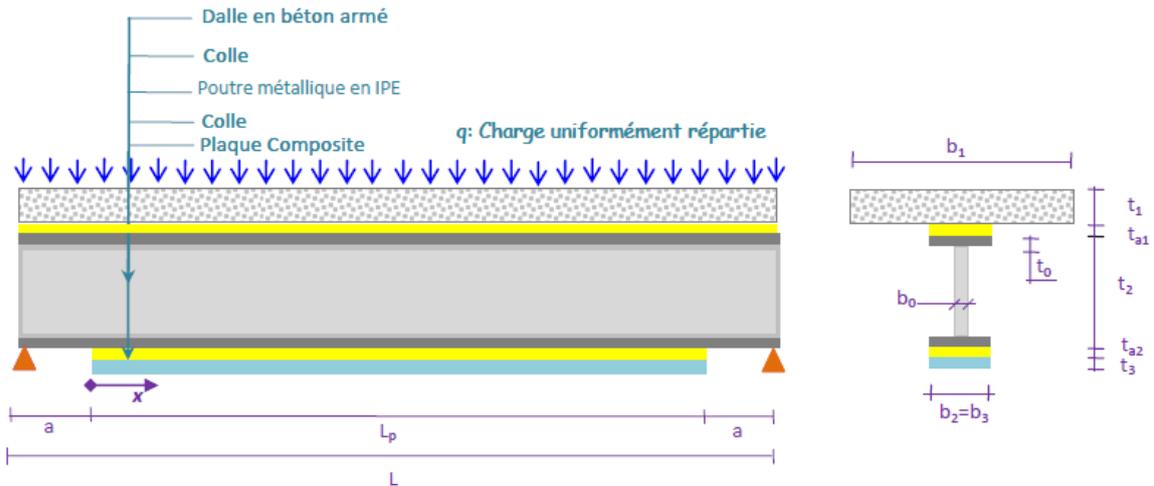


Figure VI.2a. Poutre mixte acier béton renforcée par composite: sous chargement uniformément répartie

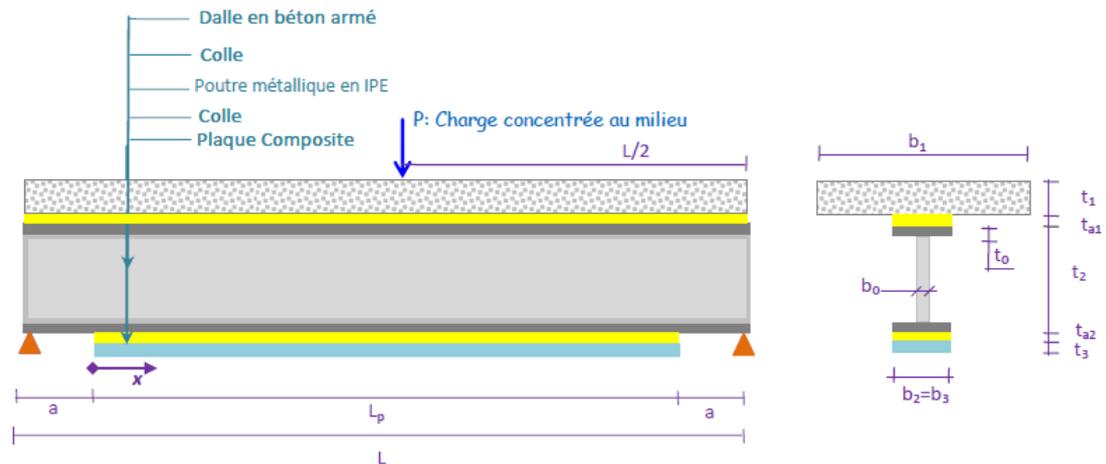


Figure VI.2b : Poutre mixte acier béton renforcée par composite: sous chargement ponctuelle concentrée au milieu

- L'approche analytique est basée sur les hypothèses suivantes (HassaineDaouadji et al. 2019)
- Relation élastique entre la contrainte et la déformation pour le béton, l'acier, la plaque et l'adhésif
- La poutre composite est simplement soutenue et peu profonde, c'est-à-dire que les sections planes restent planes en flexion.
- La liaison entre la dalle de béton et la poutre en acier étant imparfaite, il y aura possibilité de glissement entre ces deux éléments.

- Il y a une liaison parfaite entre la plaque composite et la poutre en acier ; aucun glissement n'est autorisé à l'interface entre la plaque et la poutre en acier (c'est-à-dire qu'il y a une liaison parfaite à l'interface entre l'acier adhésif et la plaque).
- L'adhésif est censé ne jouer qu'un seul rôle dans le transfert des contraintes à la fois : de la dalle en béton à la poutre en acier ; de la plaque en PRFC et de la poutre en acier.
- Les contraintes dans la couche adhésive ne changent pas dans la direction de l'épaisseur.

VI.4 Analyse

Une section différentielle dx peut être découpée dans la poutre composite acier-béton renforcée avec une plaque CFRP (Fig. VI.2a. et VI.2b.), comme le montre la Figure VI.3. La poutre composite est composée de quatre matériaux : matériau composite CFRP, béton, adhésif et poutre en acier. Dans la présente analyse, le comportement élastique linéaire est considéré comme valable pour tous les matériaux; le béton, les plaques CFRP et l'acier qui doivent partager la résistance aux forces et aux moments provoqués par les charges transversales q (charge uniformément répartie) et P (charge concentrée). Dans le cas général, les déformations qui en résultent doivent s'adapter à tout glissement d'interface en plus des déformations de flexion et axiales habituelles. Le composite étant un matériau orthotrope, ses propriétés matérielles varient d'une couche à l'autre. Dans l'étude théorique (HassaineDaouadji et al. 2019), la théorie des composites est utilisée pour déterminer les comportements de contrainte de cisaillement et de déformation de la plaque composite liée extérieurement afin d'étudier l'ensemble des performances mécaniques de la structure composite renforcée. Dans ce qui suit, la rigidité de la plaque de renfort est nettement inférieure à celle de la poutre en acier composite à renforcer avec une plaque CFRP. Le moment de flexion dans la plaque composite peut être négligé pour simplifier les opérations de dérivation des contraintes de cisaillement. D'autre part, la théorie du stratifié est utilisée pour déterminer la contrainte et la déformation de la plaque composite liée extérieurement afin d'étudier l'ensemble des performances mécaniques de la structure composite renforcée.

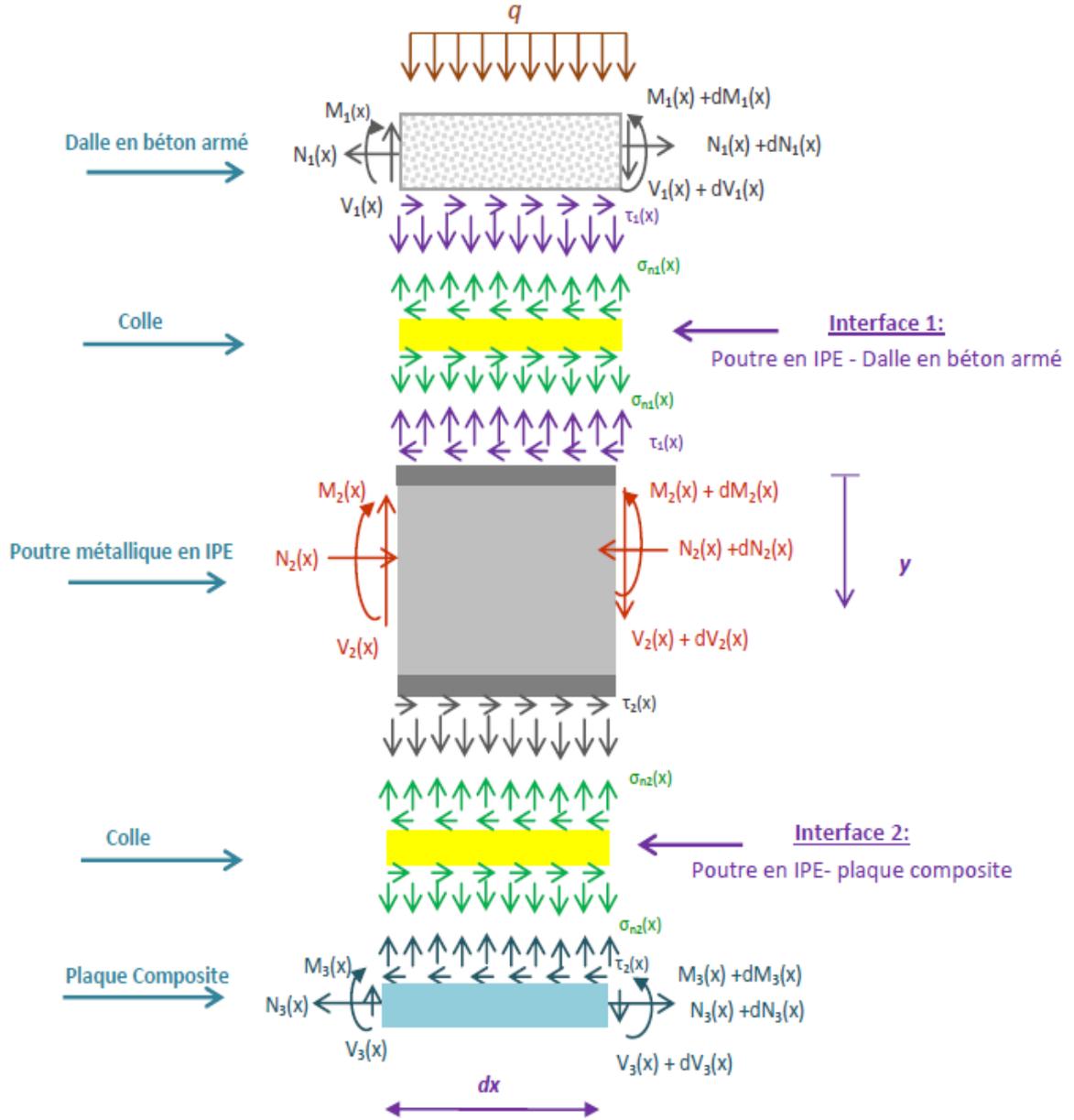


Figure VI.3. Segment différentielle d'une poutre mixte acier béton renforcée par composite.

VI.4.1 Interface 1

VI.4.1.1 Distribution des contraintes de cisaillement le long d'interface acier-béton

Les contraintes dans le béton près de l'interface adhésive et dans la poutre d'acier externe peuvent être exprimées comme suit, respectivement :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \varepsilon_1^{(M)} + \varepsilon_1^{(N)} \quad (VI.1.1)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \varepsilon_2^{(M)} + \varepsilon_2^{(N)} \quad (VI.1.2)$$

Où $du_1(x)$ et $du_2(x)$ sont les déplacements longitudinaux à la base de la dalle de béton et au sommet de la poutre en acier, respectivement. $\varepsilon_1(x)$ et $\varepsilon_2(x)$ sont les déformations induites par la flexion.

Le moment au niveau de la dalle de béton et la poutre en acier, respectivement, et ils s'écrivent comme suit :

$$\varepsilon_1^{(M)}(x) = \frac{du_1^{(M)}(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) \quad (\text{VI.1.3})$$

$$\varepsilon_2^{(M)}(x) = \frac{du_2^{(M)}(x)}{dx} = \frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) \quad (\text{VI.1.4})$$

Où E est le module d'élasticité et I le moment d'inertie. Les indices 1 et 2 désignent respectivement les deux adréments : l'élément en béton et la poutre en acier. $M(x)$ est le moment de flexion tandis que y_1 et y_2 sont les distances du bas de la dalle de béton et du haut de la poutre d'acier à leur centre respectif. $\varepsilon_1^{(M)}(x)$ et $\varepsilon_2^{(M)}(x)$ sont les contraintes longitudinales inconnues du béton et de la poutre en acier, respectivement, à l'interface de l'adhésif et sont dues aux forces longitudinales, Ces contraintes sont données comme suit :

$$\varepsilon_1^{(N)}(x) = \frac{du_1^{(N)}(x)}{dx} \quad (\text{VI.1.5})$$

$$\varepsilon_2^{(N)}(x) = \frac{du_2^{(N)}(x)}{dx} \quad (\text{VI.1.6})$$

Où $du_1^{(N)}$ et $du_2^{(N)}$ représentent le déplacement de l'adhésif induit par la force longitudinale, à l'interface entre la partie supérieure de la dalle de béton et l'adhésif, ainsi qu'à l'interface entre la partie inférieure de la poutre en acier et l'adhésif.

Pour déterminer les déformations longitudinales $\varepsilon_1^{(N)}(x)$ et $\varepsilon_2^{(N)}(x)$, les déformations de cisaillement de l'ensemble de la structure, il est nécessaire d'utiliser les données qui sont incorporés dans cette analyse. Il est raisonnable de supposer que les contraintes de cisaillement qui se développent sont continuées à travers l'interface adhésif-adhérent. En outre, l'équilibre exige que la contrainte de cisaillement soit nulle à la surface libre. En utilisant la même méthodologie que celle développée par Benatallah et al. 2020, $du_1^{(N)}(x, y)$ et $du_2^{(N)}(x, y)$ cet effet est pris en compte. Une variation parabolique des déplacements longitudinaux et dans les deux adhérents (dalle de béton et poutre en acier)

$$U_1^{(N)}(x, y) = A_1(x)y^2 + B_1(x)y + C_1(x) \quad (\text{VI.1.7})$$

$$U_2^{(N)}(x, y) = A_2(x)y'^2 + B_2(x)y' + C_2(x) \quad (\text{VI.1.8})$$

Où (y) (y') est un système de coordonnées locales dont l'origine est la surface supérieure de l'adhérence supérieure inférieure Figure (VI.2).

Les contraintes de cisaillement dans les deux adhérents sont données par :

$$\sigma_{xy(1)} = G_1 \gamma_{xy(1)} \quad (\text{VI.1.9})$$

$$\sigma_{xy'(2)} = G_2 \gamma_{xy'(2)} \quad (\text{VI.1.10})$$

Avec :

$$\gamma_{xy(1)} = \frac{dU_1^{(N)}}{dy} + \frac{dW_1^{(N)}}{dx} \quad (\text{VI.1.11})$$

$$\gamma_{xy(2)} = \frac{dU_2^{(N)}}{dy} + \frac{dW_2^{(N)}}{dx} \quad (\text{VI.1.12})$$

G_1 et G_2 sont les modules de cisaillement transversal de la dalle en béton et de la poutre en acier, respectivement. En négligeant les variations du déplacement transversal $W_1^{(N)}$ et $W_2^{(N)}$ (induites par le déplacement longitudinal) avec la coordonnée longitudinale x .

$$\gamma_{xy(1)} \approx \frac{dU_1^{(N)}}{dy} \quad (\text{VI.1.13})$$

$$\gamma_{xy(2)} \approx \frac{dU_2^{(N)}}{dy} \quad (\text{VI.1.14})$$

Les contraintes de cisaillement sont exprimées comme suit

$$\sigma_{xy(1)} = G_1(2A_1y + B_1) \quad \sigma_{xy'(2)} = G_2(2A_2y' + B_2) \quad (\text{VI.1.15})$$

Les contraintes de cisaillement doivent satisfaire aux conditions suivantes : (VI.1.16)

$$\sigma_{xy(1)}(x, t_1) = \sigma_{xy(2)}(x, 0) = \tau_1(x) = \tau_1 \quad (\text{VI.1.17})$$

$$\sigma_{xy(1)}(x, 0) = 0, \quad \sigma_{xy'(2)}(x, t_2) = 0 \quad (\text{VI.1.18})$$

t_1, t_2 sont les épaisseurs respectives de la dalle de béton et de la poutre en acier. La condition (IV.1.17) découle de la continuité et de l'hypothèse de contraintes de cisaillement uniformes ($\tau_1(x) = \tau_1$) à travers l'adhésif. La condition (IV.1.18) stipule qu'il n'y a pas de contraintes de cisaillement à la surface supérieure de la dalle de béton (c'est-à-dire $y=0$) et à la surface inférieure de la poutre en acier (c'est-à-dire $y' = t_2$). Ces conditions permettent d'obtenir :

$$\sigma_{xy(1)} = \frac{\tau_1(x)}{t_1} y \quad (\text{VI.1.19})$$

$$\sigma_{xy(2)} = \left(1 - \frac{y'}{t_2}\right) \tau_1(x) \quad (\text{VI.1.20})$$

Ensuite, avec une relation constitutive linéaire du matériau, la déformation de cisaillement de l'élément pour la dalle en béton et pour la poutre en acier s'écrit comme suit :

$$y_{xy(1)} = y_1 = \left(\frac{\tau_1}{G_1 t_1}\right) y \quad (\text{VI.1.21})$$

$$y_{xy(2)} = \left(1 - \frac{y'}{t_2}\right) \frac{\tau_1}{G_2} \quad (\text{VI.1.22})$$

Les fonctions de déplacement longitudinal (N) pour la dalle de béton supérieure et (N) pour la dalle de béton inférieure sont les suivantes cs de la poutre en acier inférieure, dues aux forces longitudinales, sont données par :

$$U_1^{(N)}(y) = U_1^{(N)}(0) + \int_0^y y_1(y) dy = U_1^{(N)}(0) + \frac{\tau_1}{2G_1 t_1} y^2 \quad (\text{VI.1.23})$$

$$U_2^{(N)}(y') = u_2^{(N)} + \int_0^{y'} y_2(y') dy' = u_2^{(N)} + \left(y' + \frac{y'^2}{2t_2}\right) \tau_1 \quad (\text{VI.1.24})$$

Où ($U_1^{(N)}(0)$) représente le déplacement à la surface supérieure de l'adhérence supérieure (dû aux forces longitudinales). Et $u_2^{(N)}$ est le déplacement de l'adhésif induit par la force longitudinale à l'interface entre l'adhésif et l'adhérence inférieure. Il est à noter qu'en raison de la parfaite adhérence des joints, les déplacements sont continus à l'interface entre l'adhésif et l'adhérence.

Par conséquent, $u_2^{(N)}$ le doit être équivalent au déplacement de l'adhérence inférieure à l'interface et $u_1^{(N)}$ (le déplacement à l'interface entre l'adhésif et l'adhérence supérieure) doit être identique au déplacement de l'adhérence supérieure à l'interface. Sur la base de l'eqt(IV.1.23) et $u_1^{(N)}$ peut être exprimé comme suit :

$$u_1^{(N)} = U_1^{(N)}(y = t_1) = U_1^{(N)}(0) + \frac{\tau_1 t_1}{2G_1} \quad (\text{VI.1.25})$$

En utilisant l'eqt. (IV.1.25) l'eqt. (IV.1.23) peut être réécrite comme suit :

$$U_1^{(N)}(y) = u_1^{(N)} + \frac{\tau_1}{2G_1 t_1} y^2 + \frac{\tau_1 t_1}{2G_1} [0,1] \quad (\text{VI.1.26})$$

La forcerésultante longitudinale, pour la dalle de béton supérieure, est la suivante :

$$N_1 = b_1 \int_0^{t_1} \sigma_1^N(y) dy \quad (VI.1.27)$$

Et la force résultante longitudinale, N_2 pour la poutre en acier peut s'écrire :

$$N_2^N = b_2 \int_0^{t_{a1}} \sigma_2^N(y') dy' + b_0 \int_{t_0}^{t_{a1}-t_0} \sigma_2^N(y') dy' + \int_{t_2-t_0}^{t_2} \sigma_2^N(y') dy' \quad (VI.1.28)$$

Où σ_1^N et σ_2^N sont les contraintes normales longitudinales pour les adhérences supérieure et inférieure, respectivement. En transformant ces contraintes en fonctions des déplacements et en substituant les équations (IV.1.24) et (IV.1.26) aux déplacements, les équations (IV.1.27) et (IV.1.28) peuvent être réécrites comme suit :

$$N_1 = E_1 b_1 \int_0^{t_1} \frac{dU_1^{(N)}}{dx} dy = E_1 A_1 \left(\frac{dU_1^{(N)}}{dx} - \frac{t_1 d\tau_1}{3G_c dx} \right) \quad (VI.1.29)$$

Et :

$$\begin{aligned} N_2 &= E_2 \left(b_2 \int_0^{t_0} \frac{dU_2^{(N)}}{dx} dy' + b_0 \int_{t_0}^{t_{a1}-t_0} \frac{dU_2^{(N)}}{dx} dy' + b_2 \int_{t_{a1}-t_0}^{t_2} \frac{dU_2^{(N)}}{dx} dy' \right) \\ &= E_2 A_2 \left[\frac{dU_2^{(N)}}{dx} - \frac{1}{6G_2 t_2} \left(b_2 \left((t_2 - t_0)^3 - t_0^3 - t_2^3 + 6t_2^2 t_0 \right) + b_0 \left((3t_{a1}^2 (t_2 - 2t_0) - (t_2 - t_0)^2 + t_0^2) \right) \right) \frac{d\tau(x)}{dx} \right] \end{aligned} \quad (VI.1.30)$$

Par conséquent, les déformations longitudinales induites par les forces longitudinales eqt(IV.1.4) peuvent être exprimées comme suit :

$$\varepsilon_1^{(N)} = \frac{du_1^{(N)}(x)}{dx} = \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1 d\tau_1}{3G_1 dx} \quad (VI.1.31)$$

$$\varepsilon_2^{(N)} = \frac{du_2^{(N)}(x)}{dx} = \frac{N_2}{E_2 A_2} \quad (VI.1.32)$$

$$+ \frac{1}{6G_2 t_2} \left(b_2 \left((t_2 - t_0)^3 - t_0^3 - t_2^3 + 6t_2^2 t_0 \right) + b_0 \left((3t_{a1}^2 (t_2 - 2t_0) - (t_2 - t_0)^2 + t_0^2) \right) \right) \frac{d\tau(x)}{dx}$$

En substituant les eqt. (IV.1.31), (IV.1.32), (IV.1.33) et (IV.1.34) aux eqt. (IV.1.1) et (IV.1.2) respectivement, ces derniers deviennent :

$$\varepsilon_1^{(N)} = \frac{du_1^{(N)}(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} + \frac{t_1 d\tau_1}{3G_1 dx} \quad (VI.1.33)$$

$$\varepsilon_2^{(N)} = \frac{du_2^{(N)}(x)}{dx} = -\frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} + \frac{1}{6G_2 t_2} \left(b_2 \left((t_2 - t_0)^3 - t_0^3 - t_2^3 + 6t_2^2 t_0 \right) + b_0 \left(\left(3t_{a1}^2 (t_2 - 2t_0) - (t_2 - t_0)^2 + t_0^2 \right) \right) \frac{d\tau(x)}{dx} \right) \quad (\text{VI.1.34})$$

Où (x) sont les forces axiales dans chaque élément, la section transversale. La contrainte de cisaillement dans l'adhésif peut être exprimée comme suit :

$$\tau_1 = \tau_1(x) = K_1 [u_1(x) - u_2(x)] \quad (\text{VI.1.35})$$

Où $K_2 = \frac{G_{a1}}{t_{a1}}$ est la rigidité en cisaillement de l'adhésif, G_{a1} est le module de cisaillement et t_{a1} l'épaisseur de l'adhésif, respectivement ; $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont les déplacements longitudinaux à la base de l'adhésif .

$$\frac{d\tau_1(x)}{dx} = K_2 \left[\frac{du_1(x)}{dx} - \frac{du_2(x)}{dx} \right] \quad (\text{VI.1.36})$$

La prise en compte de l'équilibre horizontal donne :

$$\frac{dN_1(x)}{dx} = \tau_1(x) \quad (\text{VI.1.37})$$

$$\frac{dN_2(x)}{dx} = -\tau_1(x) \quad (\text{VI.1.38})$$

Où :

$$N_1(x) = N(x) = \int_0^x \tau_1(x) \quad (\text{VI.1.39})$$

$$N_2(x) = -N(x) = \int_0^x \tau_1(x) \quad (\text{VI.1.40})$$

La condition d'égalité des courbures de la poutre et de la dalle permet d'obtenir la relation suivante :

$$\varphi = \frac{M_1(x)}{E_1 A_1} = \frac{M_2(x)}{E_2 A_2} = \frac{M_1(x) + M_2(x)}{E_1 A_1 + E_2 A_2} \quad (\text{VI.1.41})$$

Sous une charge verticale, la variation du moment sur une longueur dx est équilibrée par l'effort tranchant (qui correspond à la théorie élémentaire de la poutre où) combiné à l'action de la liaison.

$$dM_1(x) = V_1 dx - \tau_1(x) y_1 \quad (\text{VI.1.42})$$

$$dM_2(x) = V_2 dx - \tau_1(x) y_2 \quad (\text{VI.1.43})$$

Le moment d'équilibre du segment différentiel de la poutre plaquée donne :

$$M_{T_1}(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(y_1 + y_2 + t_{a1}) \quad (\text{IV.1.44})$$

En substituant eqt. Les(IV.1.33), (IV.1.34), (IV.1.37), (IV.1.38) dans l'eqt(IV.1.35) onobtient :

$$\frac{d\tau_1(x)}{dx} = K_2 \left[\frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) - \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} - \frac{t_1}{3G_1} + \frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} \right. \quad (\text{VI.1.45})$$

$$\left. - \frac{1}{6G_2 t_2 A_2} \left(b_2 \left((t_2 - t_0)^3 - t_0^3 - t_2^3 + 6t_2^2 t_0 \right) + b_0 \left(\left(3t_{a1}^2 (t_2 - 2t_0) - (t_2 - t_0)^2 + t_0^2 \right) \right) \frac{d\tau(x)}{dx} \right) \right]$$

$$\frac{d^2\tau_1(x)}{K_2 \cdot dx^2} = \left[\frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) - \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} - \frac{t_1}{3G_1} + \frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} \right. \quad (\text{VI.1.46})$$

$$\left. - \frac{1}{6G_2 t_2 A_2} \left(b_2 \left((t_2 - t_0)^3 - t_0^3 - t_2^3 + 6t_2^2 t_0 \right) + b_0 \left(\left(3t_{a1}^2 (t_2 - 2t_0) - (t_2 - t_0)^2 + t_0^2 \right) \right) \frac{d^2\tau(x)}{dx^2} \right) \right]$$

La substitution des forces de cisaillement (eqt. (IV.1.42) et (IV.1.43)) et des forces axiales (eqt. (IV.1.37)et(IV.1.38)) dans l'eqt. (IV.1.46) donne l'équation différentielle suivante pour la contrainte de cisaillement interrassiale.

$$\frac{d^2\tau_1(x)}{K_2 \cdot dx^2} - K_1 \left[\frac{(y_1 + y_2)(t_{a1})}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right] \frac{d\tau_1(x)}{dx} + K_1 \frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1} \cdot V_{T_1}(x) = 0 \quad (\text{VI.1.47})$$

Où :

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_{a1}}{G_{a1}} \xi \right)} \quad (\text{VI.1.48})$$

Et :

$$\xi = \frac{1}{G_2 t_2 A_2} \left(b_2 \left((t_2 - t_0)^3 - 6t_2^2 t_0 \right) \right) \quad (\text{VI.1.49})$$

Pour des raisons de simplicité, les solutions générales présentées ci-dessous se limitent à un chargement qui est soit concentré, soit uniformément réparti sur une partie ou sur la totalité de la portée de la poutre, ou sur les deux. Pour un tel chargement, $\frac{d^2 V_{T_1}(x)}{dx^2} = 0$ et la solution générale de l'équation (IV.1.48)est donnée sous la forme simplifiée suivante :

$$\tau_1(x) = \Delta_1 e^{\lambda \cdot x} + \Delta_2 e^{-\lambda \cdot x} + \delta \cdot V_{T_1}(x) \quad (\text{VI.1.50})$$

$$\lambda_1 = \sqrt{K_1 b_2 \left[\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right]} \quad (\text{VI.1.51})$$

Et

$$\delta = \frac{K_1}{\lambda} \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \quad (\text{VI.1.52})$$

Δ_1 et Δ_2 sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites (VI.1.52b)

Application à une poutre composite acier-béton en flexion trois points : Dans ce document, nous étudions une poutre simplement soutenue avec une charge unique concentrée à mi-portée figure (VI.4).

$\tau_1(x) = 0$ à $x = \frac{L}{2}$, et $\frac{d\tau_1(x)}{dx} = 0$ à $x = \frac{L}{2}$, où L longueur de la travée

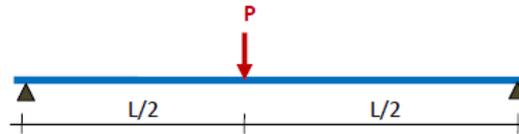


Figure VI.4: Charge concentré

Contrainte de cisaillement interrassiale pour une charge ponctuelle: Car en tant que

$0 \leq x \leq \frac{L}{2}$ comme:

$$\tau_1(x) = \frac{\delta \cdot P \cdot e^{\left(-\lambda_1 \frac{L}{2} + \lambda_1 x\right)}}{2 \cdot \left(e^{\left(-\lambda_1 \frac{L}{2}\right)} + e^{\left(\lambda_1 \frac{L}{2}\right)} \right)} - \delta \cdot \frac{P}{2} \quad (\text{VI.1.53})$$

VI.4.1.2 Distribution des contraintes normales le long de interface acier-béton pour une charge uniformément répartie

La contrainte normale dans l'adhésif peut être exprimée comme suit:

$$\sigma_1(x) = K_{n1} \cdot \Delta w(x) = K_{n1} \cdot \left(\frac{dw_1(x)}{dx} - \frac{dw_2(x)}{dx} \right) \quad (\text{VI.1.54})$$

Où K_{n1} est la rigidité normale de l'adhésif par unité de longueur et peut être déduite comme suit :

$$K_{n1} = \frac{\sigma_1(x)}{\Delta w_1(x)} = \frac{E_{a1}}{t_{a1}} \quad (\text{VI.1.55})$$

$(dw_1(x))$ et $(dw_2(x))$ sont les déplacements verticaux de la dalle de béton et de la poutre en acier, respectivement.

La double différenciation de l'équation (IV.1.54) donne :

$$\frac{d^2\sigma_1(x)}{d^2\Delta w_1(x)} = K_{n1} \cdot \left(\frac{d^2w_1(x)}{dx^2} - \frac{d^2w_2(x)}{dx^2} \right) \quad (\text{VI.1.56})$$

Considérant les relations moment-courbure pour la dalle de béton et la poutre en acier, respectivement :

$$\frac{d^2w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1I_1}, \quad \frac{d^2w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2I_2} \quad (\text{VI.1.57})$$

L'équilibre entre la dalle de béton et la poutre en acier conduit aux relations suivantes :

$$\text{Dalle de béton: } \frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) - y_1\tau_1(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_1(x)}{dx} = -\sigma_{n1}(x) - q \quad (\text{VI.1.58a})$$

$$\text{Poutre en acier: } \frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - y_2\tau_1(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_2(x)}{dx} = \sigma_{n2}(x) \quad (\text{VI.1.58b})$$

Sur la base des équations d'équilibre ci-dessus, les équations différentielles régissant la déflexion de la dalle en béton et de la poutre en acier, exprimées en termes des contraintes d'interfaces de cisaillement et de contraintes normales, sont les suivantes :

Dalle en béton:

$$\frac{d^4w_2(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1I_1}\sigma_{n1}(x) + \frac{y_1}{E_1I_1} \frac{d\tau_1(x)}{dx} + \frac{q}{E_1I_1} \quad (\text{VI.1.59})$$

$$\text{Poutre en acier: } \frac{d^4w_2(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_2I_2}\sigma_{n1}(x) + \frac{y_2}{E_2I_2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{VI.1.60})$$

La substitution des équations (IV.1.57) et (IV.1.58) dans la quatrième dérivée de la contrainte d'interface normale obtenue à partir de l'équation (IV.1.59) donne l'équation différentielle suivante pour la contrainte normale interface :

$$\frac{d^4\sigma_{n1}(x)}{dx^4} + K_{n1} \cdot b_2 \left(\frac{1}{E_1I_1} + \frac{1}{E_2I_2} \right) \cdot \sigma_{n1}(x) + K_{n1} \cdot b_2 \left(\frac{y_1}{E_1I_1} - \frac{y_2}{E_2I_2} \right) \cdot \frac{d\tau_1(x)}{dx} + K_{n1} \cdot \frac{q}{E_1I_1} \quad (\text{VI.1.61})$$

La solution générale de cette équation différentielle du quatrième ordre est la suivante :

$$\sigma_{n1}(x) = e^{-\beta \cdot x} [\Delta_3 \cos(\beta \cdot x) + \Delta_4 \sin(\beta \cdot x)] + e^{\beta \cdot x} [\Delta_5 \cos(\beta \cdot x) + \Delta_6 \sin(\beta \cdot x)] - \mu_2 q \quad (\text{VI.1.62a})$$

Pour de grandes valeurs de x , on suppose que la contrainte normale s'approche de zéro, et par conséquent $\Delta_5 = \Delta_6 = 0$. La solution générale est donc la suivante, Où :

$$\sigma_{n1}(x) = e^{-\beta \cdot x} [\Delta_3 \cos(\beta \cdot x) + \Delta_4 \sin(\beta \cdot x)] - \mu_1 \cdot \frac{d\tau_1(x)}{dx} - \mu_2 q \quad (\text{VI.1.62b})$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_{n1} \cdot b_2 \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right)}{4}} \quad (\text{VI.1.63})$$

$$\mu_1 = \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad (\text{VI.1.64})$$

$$\text{Et : } \mu_2 = \left(\frac{E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{VI.1.65})$$

Δ_3 et Δ_4 sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites.

VI.4.1.3 Contraintenormaleinterface pour une charge ponctuelle

Les constantes et dans l'eqt. (VI.62c) sont déterminées en utilisant les conditions aux limites appropriées figure (VI.3) et sont écrites comme suit :

$$\sigma_{n1}(x) = e^{-\beta \cdot x} [\Delta_3 \cos(\beta \cdot x) + \Delta_4 \sin(\beta \cdot x)] - \left(\frac{E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) q \quad (\text{VI.1.66})$$

$$\Delta_3 = \frac{E_{a1}}{2 \cdot \beta^2 t_{a1} E_1 I_1} [V_{T1}(0) + \beta M_{T1}(0)] \quad (\text{VI.1.67})$$

$$\Delta_4 = \frac{E_{a1}}{2 \cdot \beta^2 t_{a1} E_1 I_1} M_{T1}(0) \quad (\text{VI.1.68})$$

$$\mu_3 = \frac{E_{a1} \cdot b_2}{t_{a1}} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} \right) \quad (\text{VI.1.69})$$

Les expressions ci-dessus pour les constantes Δ_3 et Δ_4 ont été laissées en termes de moment de flexion $M_{T1}(0)$ et la force de cisaillement $V_{T1}(0)$ à l'extrémité des adhérents. Avec les constantes Δ_3 et Δ_4 déterminée, la contrainte normale interface peut alors être trouvée en utilisant eqt(IV.1.63).

VI.4.1.4 Distribution du glissement le long de l'interfaceacier-béton

La contrainte de glissement relative à l'interface est calculée comme suit :

$$\frac{dS(x)}{dx} = \frac{du_1(x)}{dx} - \frac{du_2(x)}{dx} = \varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x) \quad (\text{VI.1.70})$$

Comme indiqué dans les hypothèses, le glissement de l'adhésif est proportionnel à la force de cisaillement, $\tau(x)$ que le connecteur a transmis. La constante de proportionnalité est la rigidité de l'adhésif K_2 .

La contrainte de cisaillement dans l'adhésif peut être exprimée comme suit :

$$\tau_1 = \tau_1(x) = K_2 [u_1(x) - u_2(x)] \Leftrightarrow \tau(x) = K_2 \cdot S(x) \quad (\text{VI.1.71})$$

$$S(x) = \frac{1}{K_2} \tau_1(x) = \frac{t_{a1}}{G_{a1}} (\Delta_1 e^{\lambda \cdot x} + \delta \cdot V_{T1}(x)) \quad (\text{VI.1.72})$$

Où $S(x)$ représentent le glissement entre les adhérents et les $K_2 = \frac{G_{a1}}{t_{a1}}$ est la rigidité au cisaillement de l'adhésif, G_{a1} et t_{a1} sont le module de cisaillement et l'épaisseur de l'adhésif.

VI.4.1.5 Glissement interface pour une charge ponctuelle

Dans le cas des poutres simplement soutenues avec une charge unique figure (VI.3), le glissement dû à la charge est le suivant :

$$S(x) = \frac{\delta \cdot P}{2} \left[\frac{e^{-\lambda \cdot \frac{L}{2} + \lambda \cdot x}}{(e^{-\lambda \cdot \frac{L}{2}} + e^{\lambda \cdot \frac{L}{2}})} + 1 \right] \quad (\text{VI.1.73})$$

VI.4.2 Interface 2

VI.4.2.1 Distribution de la contrainte d'interface de cisaillements le long de l'interface CFRP-béton

L'équation différentielle suivante pour la contrainte d'interface donne comme suit (Rabahi 2016) :

$$\frac{d^2 \tau_2(x)}{dx^2} - K_3 \left(A_{11} + \frac{b_3}{E_2 A_2} + \frac{(y_2 + t_3 / 2)(y_2)}{E_1 I_1 D_{11} + b_2} b_3 D_{11} \right) \tau_2(x) + V_{T2}(x) = 0 \quad (\text{VI.2.1})$$

$$\text{Où } K_3 = \frac{1}{\left(\frac{t_{a2}}{G_a 2} + \frac{t_2}{4G_2} \right)} \quad (\text{VI.2.2})$$

Pour des raisons de simplicité, les solutions générales présentées ci-dessous se limitent à des charges concentrées ou uniformément réparties sur une partie ou sur la totalité de la portée de la poutre, ou sur les deux. Pour un tel chargement, $d^2 V_T(x)/dx^2 = 0$, et la solution générale de l'équation (IV.2.1) est donnée par :

$$(\text{VI.2.3})$$

$$\lambda^2 = K_3 \left(A_{11}' + \frac{b_3}{E_2 A_2} + \frac{(y_2 + t_3 / 2)}{b_3} b_3 D_{11}' \right)$$

$$m_1 = \frac{K_3}{\lambda^2} \left(\frac{(y_2 + t_3 / 2)}{E_2 I_2 D_{11}' + b_3} D_{11}' \right) \quad (\text{VI.2.4})$$

Et Δ_7 et Δ_8 sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites. La présente étude porte sur une poutre simplement soutenue soumise à une charge uniformément répartie. Compte tenu des conditions aux limites, en raison de la symétrie, la contrainte de cisaillement à mi- portée est nulle.

$$\tau \left(\frac{L_p}{2} \right) = \Delta_7 \cosh \left(\lambda \frac{L_p}{2} \right) + \Delta_8 \sinh \left(\lambda \frac{L_p}{2} \right) + m_1 V_{T2} \left(\frac{L_p}{2} \right) = 0 \quad (\text{VI.2.5})$$

Où L_p est la longueur de la plaque PRFC Figure (VI.2). À l'extrémité de la plaque de PRFC, la force longitudinale $[N_2(0) = N_3(0)]$ et le moment $M_3(0)$ sont nuls. Par conséquent, le moment dans la section au niveau de la compression de la plaque est résisté par la poutre seule et peut être exprimé comme suit :

$$M_3(0) = M_{T2}(0) = \frac{qa}{2} (L - a) \quad (\text{VI.2.6})$$

En appliquant la condition limite ci-dessus :

$$\frac{d\tau_2(x=0)}{dx} = -m_2 M_{T2}(0) \text{ avec } m_2 = \frac{K_2 y_2}{E_2 I_2} \quad (\text{VI.2.7})$$

D'après les trois équations ci-dessus :

$$\Delta_8 = \frac{-m_2 qa}{2\lambda} (L - a) + \frac{m_1}{\lambda} q \quad (\text{VI.2.8})$$

$$\Delta_7 = -\Delta_8 \tanh \left(\frac{\lambda L_p}{2} \right), \quad V_{T2} \left(\frac{L_p}{2} \right) = 0 \quad (\text{VI.2.9})$$

Dans la pratique, $\lambda L_p / 2 > 10$ et par conséquent $\tanh(\lambda L_p / 2) \approx 1$. L'expression de Δ_7 peut donc être simplifiée comme suit : $\Delta_7 = -\Delta_8$

La substitution de Δ_7 et Δ_8 donne une expression de la contrainte de cisaillement interface en tout point :

$$\tau_2(x) = \left[\frac{m_2 a}{2} (L - a) - m_1 \right] \frac{q e^{-\lambda x}}{\lambda} \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{VI.2.10})$$

Où q est la charge uniformément répartie et x , a , L et L_p sont définis dans la figure (VI. 2)

Dans le cas où la poutre en béton armé est soumise à une charge ponctuelle, comme le montre

la figure 3, la solution générale pour la contrainte d'interface de cisaillement est donnée par les expressions suivantes :

$$\text{Pour } a < b : \tau_2(x) = \begin{cases} \frac{m_2}{\lambda} P a e^{-\lambda x} + m_1 P & 0 \leq x \leq (b-a) \\ \frac{m_2}{\lambda} P a e^{-\lambda x} + m_1 P & (b-a) \leq x \leq \frac{L_p}{2} \end{cases} \quad (\text{VI.2.11})$$

$$\text{Pour } a > b : \tau_2(x) = \frac{m_2}{\lambda} P b e^{-\lambda x} \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{VI.2.12})$$

Où P est la charge concentrée et $k_4 = \lambda (b-a)$. Les valeurs de m_1 et m_2 tiennent compte de la déformation en cisaillement des adhérences.

VI.4.2.2 Distribution de la contrainte normale interface le long de l'interface

CFRP-béton

La contrainte d'interface normale dans l'adhésif peut être exprimée comme suit

$$\sigma_2(x) = K_{n2} \Delta w(x) = K_{n2} [w_3(x) - w_2(x)] \quad (\text{VI.2.13})$$

Où K_{n1} est la rigidité normale de l'adhésif par unité de longueur et peut s'écrire comme suit :

$$K_{n2} = \frac{\sigma_{n2}(x)}{\Delta w_2(x)} = \frac{\sigma_{n2}(x)}{\Delta w_2(x) / t_{a2}} \left(\frac{1}{t_{a2}} \right) = \frac{E_{a2}}{t_{a2}} \quad (\text{VI.2.14})$$

et sont les déplacements normaux des adhérents 2 et 3, respectivement. En faisant deux fois la différence avec l'équation (IV.2.13) on obtient :

$$\frac{d^2 \sigma_{n2}(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{VI.2.15})$$

En considérant les relations moment-courbure pour la poutre et le renfort externe, respectivement, on obtient :

$$\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2 I_2} \quad \text{Et} \quad \frac{d^2 w_3(x)}{dx^2} = -\frac{D_{11} M_3(x)}{E_3 I_3} \quad (\text{VI.2.16})$$

L'équilibre des adhérences 2 et 3 conduit aux relations suivantes :

$$\text{Adhérent 2: } \frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - b_3 y_2 \tau_2(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_2(x)}{dx} = -b_3 \sigma_{n2}(x) - q \quad (\text{VI.2.17})$$

$$\text{Adhérent 3: } \frac{dM_3(x)}{dx} = V_3(x) - b_3 \frac{t_3}{2} \tau_2(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_3(x)}{dx} = b_2 \sigma_{n2}(x) \quad (\text{VI.2.18})$$

Sur la base des équations d'équilibre ci-dessus, les équations différentielles régissant la déformation des adhérences 2 et 3, exprimées en termes de contrainte d'interface de cisaillement et normales, sont les suivantes :

$$(\text{VI.2.19})$$

$$\text{Adhérent 2: } \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_2 I_2} b_3 \sigma_{n_2}(x) + \frac{y_2}{E_2 I_2} b_3 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_2 I_2}$$

$$\text{Adhérent 3: } \frac{d^4 w_3(x)}{dx^4} = -D'_{11} \sigma_{n_2}(x) + D'_{11} \frac{t_3}{2} \frac{d\tau_2(x)}{dx} \quad (\text{VI.2.20})$$

Donne l'équation différentielle suivante pour la contrainte normale interface :

$$\frac{d^4 \sigma_{n_2}(x)}{dx^4} + K_{n_2} \left(D'_{11} + \frac{b_2}{E_2 I_2} \right) \sigma_{n_2}(x) - \frac{q K_{n_2}}{E_2 I_2} = 0 \quad (\text{VI.2.21})$$

La solution générale de cette équation différentielle du quatrième ordre est la suivante :

$$\sigma_{n_2}(x) = e^{-\beta x} [\Delta_9 \cos(\beta x) + \Delta_{10} \sin(\beta x)] + e^{\beta x} \Delta_{11} [\cos(\beta x) + \Delta_{12} \sin(\beta x)] - n_2 q \quad (\text{VI.2.22})$$

Pour de grandes valeurs de x, on suppose que la contrainte normale s'approche de zéro et que, par conséquent, $\Delta_{11} = \Delta_{12} = 0$. La solution générale devient donc :

$$\sigma_{n_2}(x) = e^{-\beta x} [\Delta_9 \cos(\beta x) + \Delta_{10} \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau_2(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{VI.2.23})$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_{n_2}}{4} \left(D'_{11} + \frac{b_3}{E_2 I_2} \right)} \quad (\text{VI.2.24})$$

$$\text{Où } n_1 = \left(\frac{y_2 b_3 - D'_{11} E_2 I_2 t_3 / 2}{D'_{11} E_2 I_2 + b_3} \right) \text{ et } n_2 = \frac{1}{D'_{11} E_2 I_2 + b_3} \quad (\text{VI.2.25})$$

Les constantes Δ_9 et Δ_{10} de l'équation (IV.2.23) sont déterminées en utilisant les conditions aux limites appropriées et s'écrivent comme suit :

$$\Delta_9 = \frac{K_{n_2}}{2\beta^3 E_2 I_2} [V_{T_2}(0) + \beta M_{T_2}(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau_2(0) \quad (\text{VI.2.26})$$

$$\Delta_{10} = -\frac{K_{n_2}}{2\beta^2 E_2 I_2} M_{T_2}(0) \quad (\text{VI.2.27})$$

Où

$$n_3 = b_3 K_{n_2} \left(\frac{y_2}{E_2 I_2} - \frac{D'_{11} t_3}{2b_3} \right) \quad (\text{VI.2.28})$$

Les expressions ci-dessus pour les constantes Δ_9 et Δ_{10} ont été laissées en termes de moment de flexion $M_{T_2}(0)$ et de force de cisaillement $V_{T_2}(0)$ à l'extrémité de la plaque de soffite. Une fois les constantes Δ_9 et Δ_{10} déterminées, la contrainte d'interface normale peut être calculée à l'aide de l'équation (IV.2.23).

VI.5 Conclusion

Dans la présente étude, une nouvelle analyse théorique des poutres mixtes en acier collé avec les dalles légers (interface 1) et les plaques composites (interface 2). Comparé aux solutions existantes, le modèle actuel est réel. Après la validation de cette nouvelle méthode avec celle de Bensattalah et al. 2020 et Bouzaoui 2007 pour l'interface 1 et Rabahiet al. 2016 pour l'interface 2, il a été alors possible d'appliquer cette première. Les résultats prouvent qu'il existe un glissement entre la dalle et la poutre et une concentration élevée des efforts de cisaillement et décollement aux extrémités de la plaque composite.

Chapitre 5 : Résultats et discussions

V.1. Introduction :

Le modèle analytique élastique développé dans cette étude a été utilisé pour analyser d'une poutre mixte acier-béton. Un programme de calcul basé sur les équations précédentes a été écrit pour calculer les contraintes d'interfaces dans une poutre composite acier-béton-composite. Le matériau CFRP a été sélectionné dans les présents exemples comme plaque liée. Cependant, l'analyse est également applicable à d'autres types de matériaux composites. Le matériau utilisé pour les présentes études est une poutre composite acier-béton dont les propriétés matérielles de la poutre composite sont répertoriées ci-dessous (Tableau V.1) et les caractéristiques sont illustrées sur les figures (de figure V.1a à la figure. V.3b). La poutre composite acier-béton est soumise à une charge uniformément répartie et concentrée appliquées séparément. Le programme d'étude paramétrique était basé sur un travail d'analyse d'une approche analytique, qui aidera les ingénieurs à optimiser leurs paramètres de conception, les effets de plusieurs paramètres ont été étudiés.

V.2. Présentation des caractéristiques mécaniques et géométrique des modèles :

V.2.1. Caractéristiques mécaniques des modèles :

Tableau V.1 : propriété mécanique des matériaux

Composant		Module de Young (MPa)	Coefficient de poisson
Dalle en béton	Ordinaire	$E_1 = 36600$	$\nu_1 = 0.2$
	Siporex	$E_1 = 2736$	$\nu_1 = 0.2$
	Polyester	$E_1 = 2000$	$\nu_1 = 0.2$
	Cellulaire	$E_1 = 2500$	$\nu_1 = 0.2$
	Granulat légère	$E_1 = 10000$	$\nu_1 = 0.2$
Adhésives	Adhésive 1	$E_{a1} = 12300$	$\nu_{a1} = 0.34$
	Adhésive 2	$E_{a2} = 3000$	$\nu_{a2} = 0.34$
Plaque CFRP		$E_3 = 140000$	$\nu_3 = 0.28$
Plaque GFRP		$E_3 = 65000$	$\nu_3 = 0.28$
Poutre en acier IPE 220		$E_2 = 200000$	$\nu_2 = 0.3$

V.2.2. Présentation géométrique des modèles :

Modèle 1 : Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuyée d'une section symétrique.

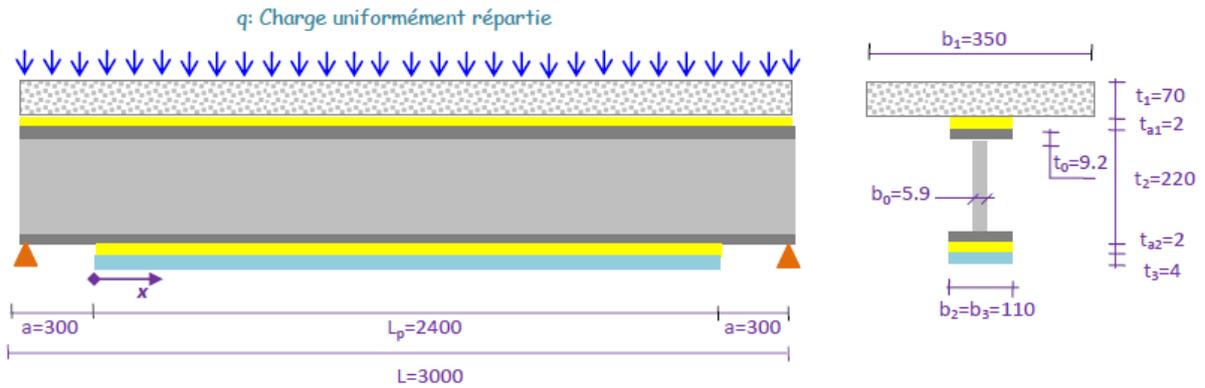


Figure V.1a. Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuyée d'une section symétrique: sous une charge uniformément répartie (a)

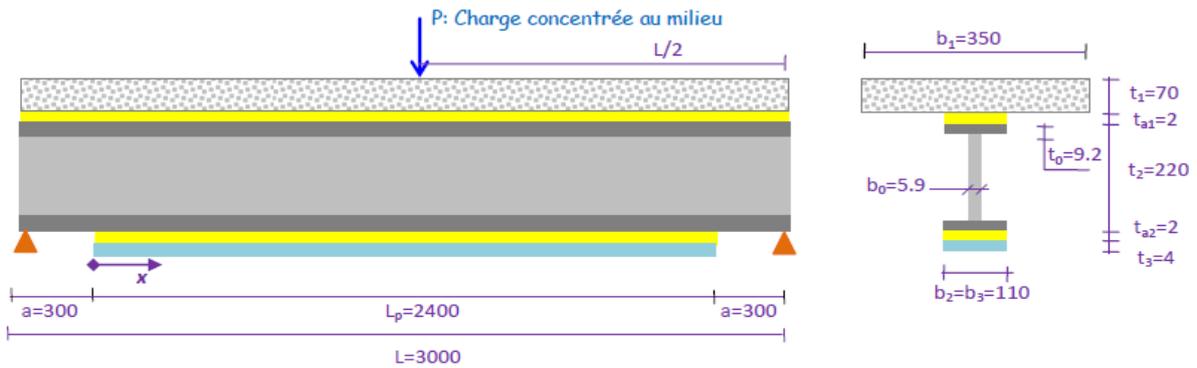


Figure V.1b. Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuyée d'une section symétrique: sous une charge concentrée au milieu (b)

Modèle 2 : Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuyée d'une section dissymétrique avec et sans raidisseur.

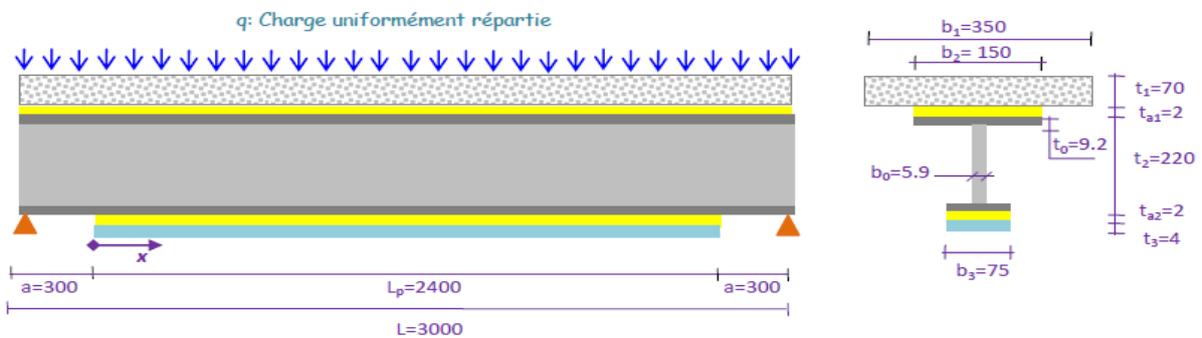


Figure V.2a. Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuyée d'une section dissymétrique sans raidisseur: sous une charge uniformément répartie (a)

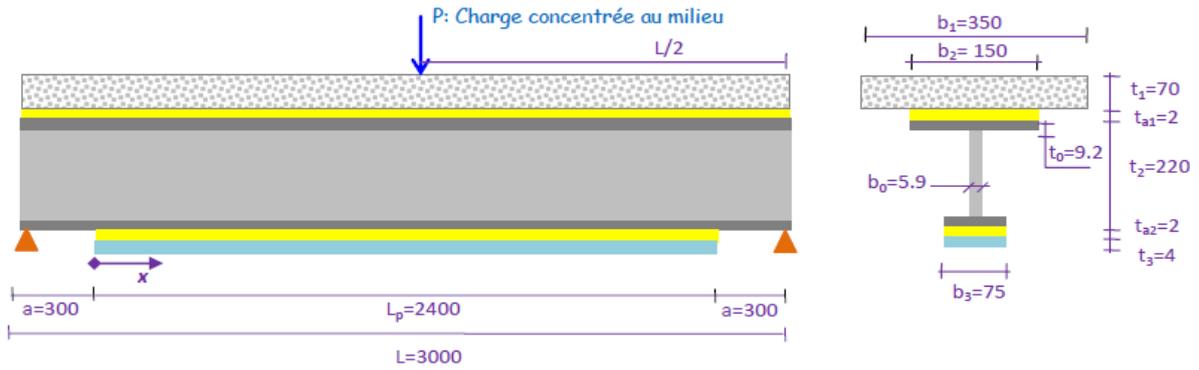


Figure V.2b. Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuie d'une section dissymétrique sans raidisseur : sous une charge concentrée au milieu (b)

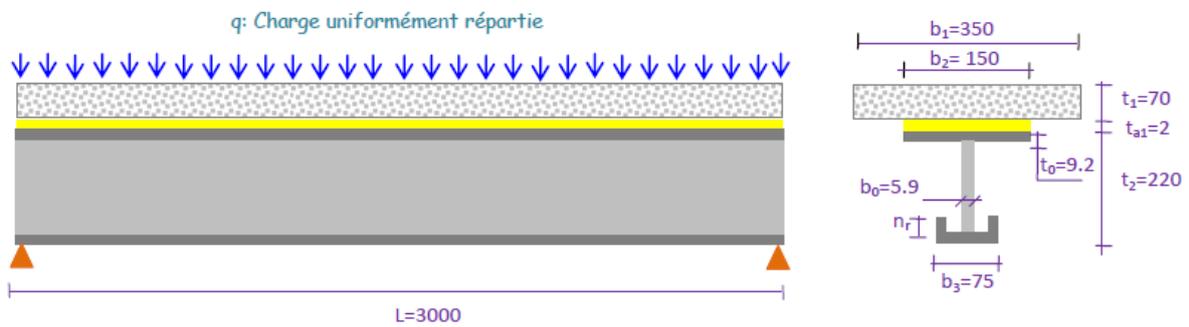


Figure V.2c. Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuie d'une section dissymétrique avec raidisseur: sous une charge uniformément répartie (c)

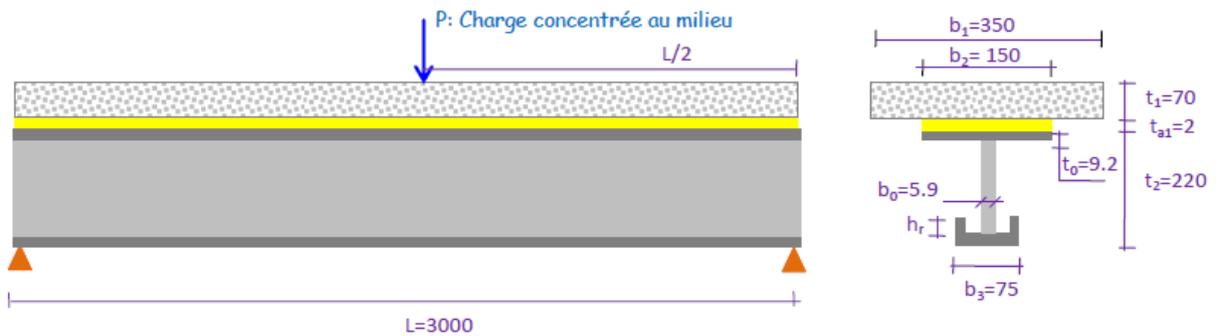


Figure V.2d. Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuie d'une section dissymétrique avec raidisseur : sous une charge concentrée au milieu (d)

Modèle 3. Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuyée d'une section en T.

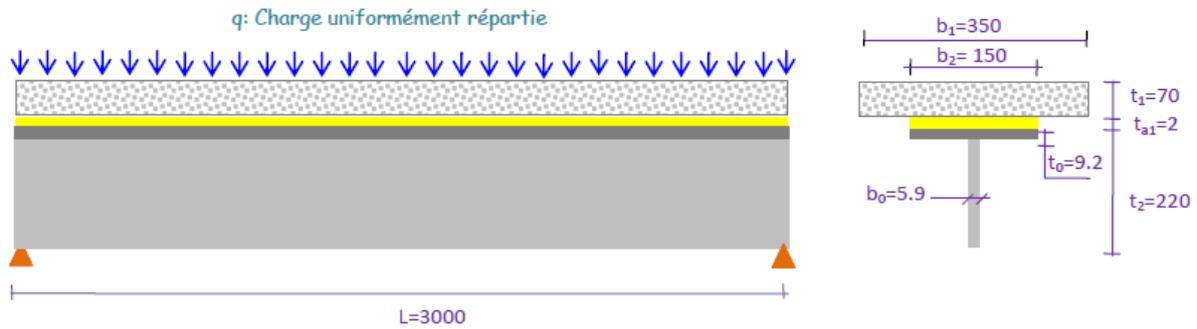


Figure V.3a. Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuyée d'une section en T: sous une charge uniformément répartie (a)

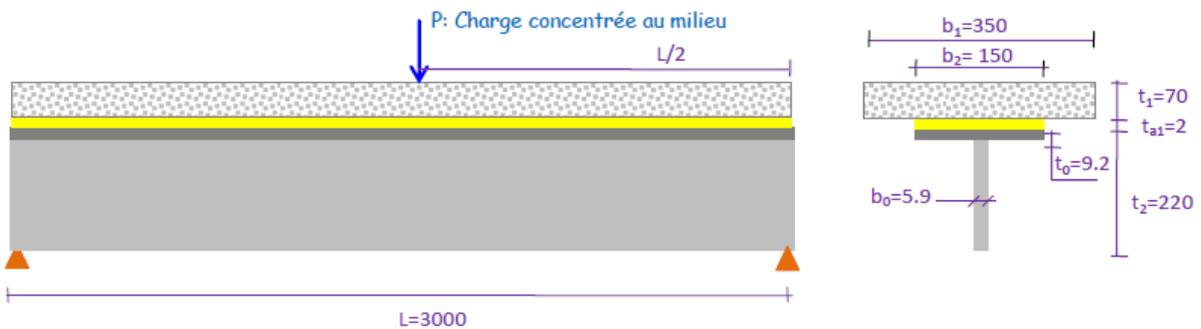


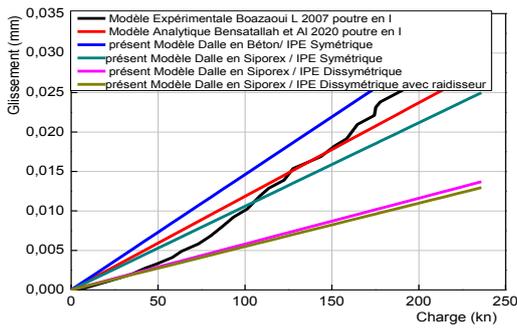
Figure V.3b. Poutre mixte acier béton symétriquement chargée et appuyée d'une section en T: sous une charge concentrée au milieu (b)

V.3. Résultats et discussion :

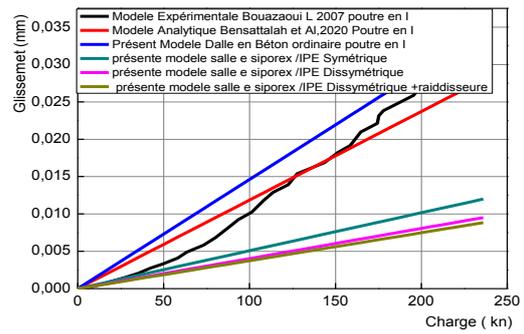
V.3.1. Modèle 1 et 2 : interface 1 :

V.3.1. Validation de présent modèle : Modèle 1 et 2

Pour valider par comparaison le glissement de la poutre acier-béton renforcée par une plaque composite CFRP dans les modèles 1 et 2 avec les résultats expérimentaux de Bouazaoui (2007) et les résultats analytiques de Bensatallah (2020), pour examiner les méthodes analytiques utilisées dans les modèles 1 et 2 et les comparer aux approches expérimentales et analytiques de référence. On prend en compte les matériaux utilisés, les conditions aux limites, les charges appliquées (concentrée-uniformément répartie) et les méthodes de mesure pour une comparaison précise.



Cas de charge concentré



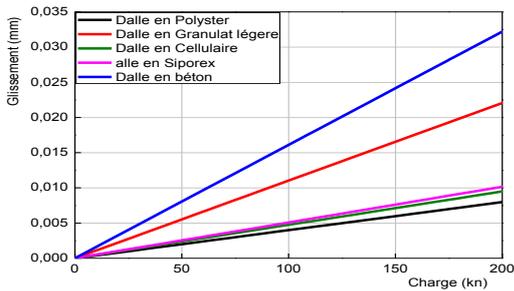
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.5 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : comparaison des résultats expérimentale et analytique

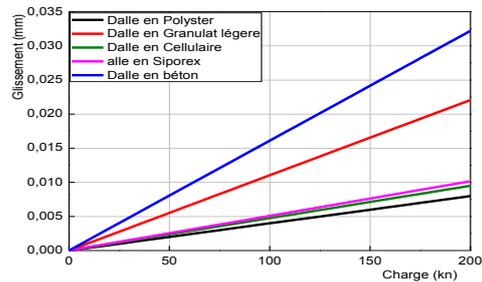
V .3.1.2.Etude paramétrique :

V.3.1.2.1. Effet de la légèreté de la dalle :

a) IPE symétrique : cas du modèle 1.



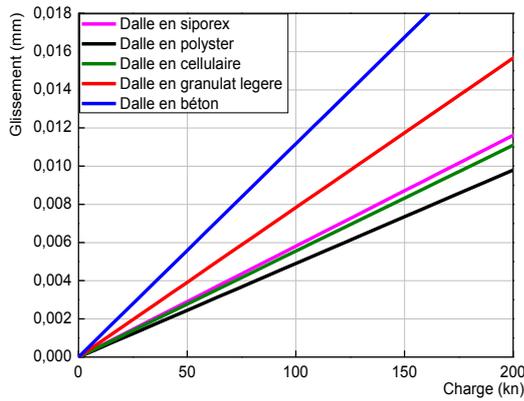
Cas de charge concentré



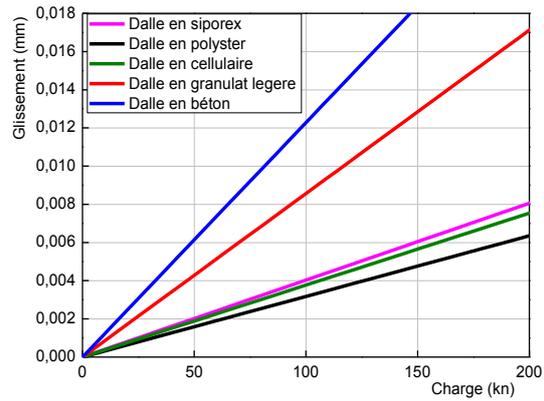
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.6 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la légèreté de la dalle cas du modèle 1.

b) IPE dissymétrique : cas du modèle 2 sans raidisseur.



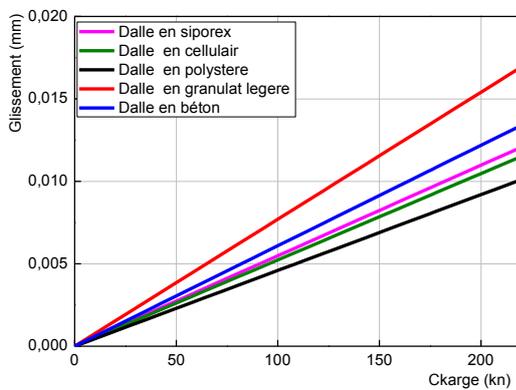
Cas de charge concentré



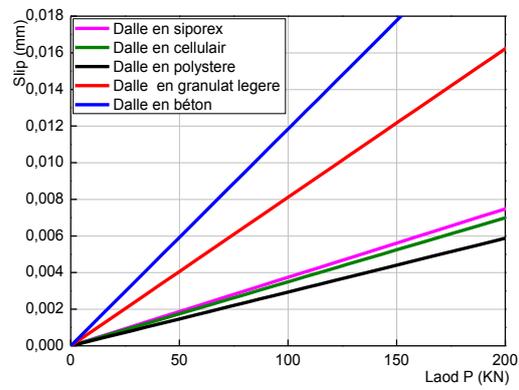
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.7 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la légèreté de la dalle cas du modèle 2 sans raidisseur.

c) IPE dissymétrique avec raidisseur : cas du modèle 2 avec raidisseur.



Cas de charge concentré



Cas de charge uniformément répartie

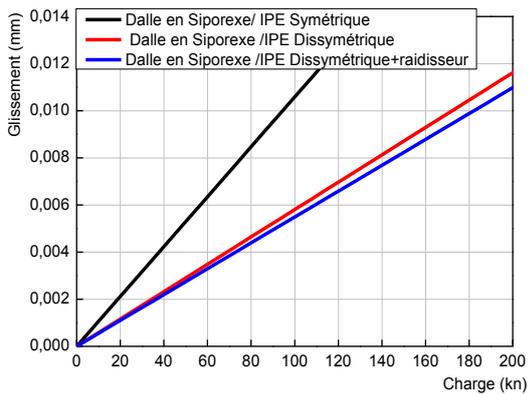
Figure V.8 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la légèreté de la dalle cas du modèle 2 avec raidisseur.

Les figures (V.6), (V.7) et (V.8) illustrent l’impact de la légèreté de la dalle sur le glissement d’une poutre acier-béton renforcée par une plaque CFRP collée. Plus la dalle est légère, plus le glissement est réduit. Cela s’explique par le poids moindre de la dalle en polystere par rapport à celle en béton armé, rendant le polystere plus efficace pour réduire le glissement.

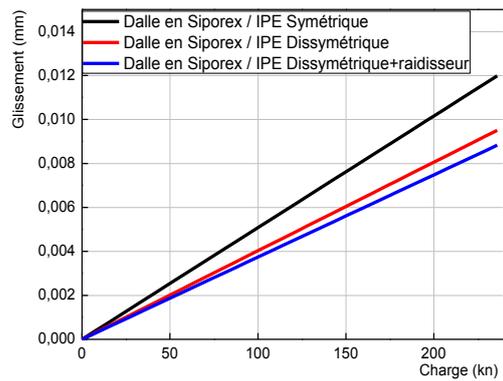
Toutefois, le type de chargement est crucial pour les deux types de dalles (granulat léger ou béton ordinaire). Sous une charge concentrée au milieu, le granulat léger présente un glissement maximum, tandis que sous une charge répartie, il affiche un faible glissement.

V.3.1.3.Effet de la rigidité de la poutre métallique :

a) Dalle en siporex :



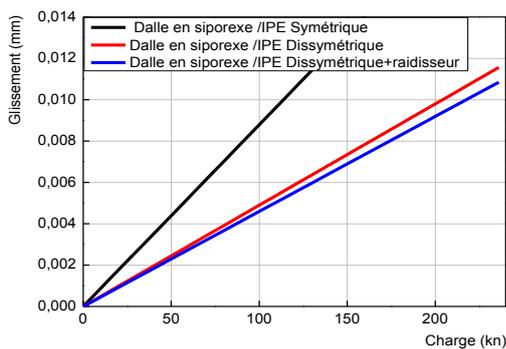
Cas de charge concentré



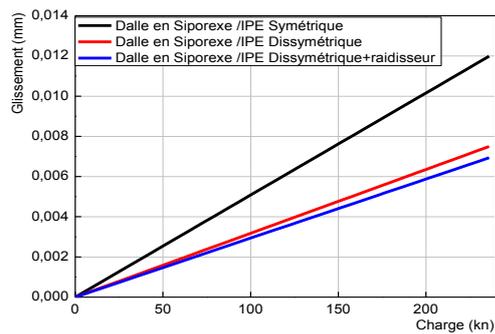
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.9 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la rigidité de la poutre métallique cas des modèles 1 et 2.

b) Dalle en polyester :



Cas de charge concentré



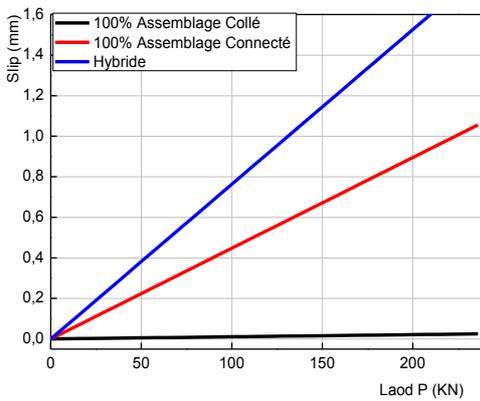
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.10 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la rigidité de la poutre métallique cas des modèles 1 et 2.

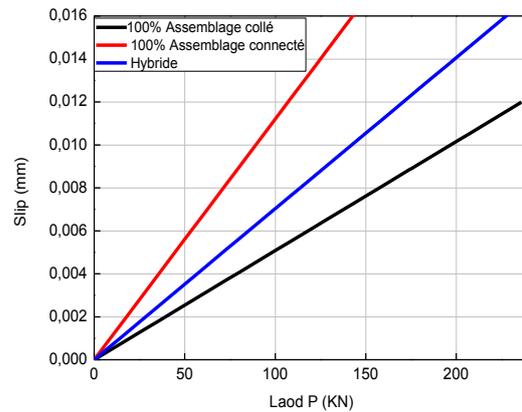
Les figures (V.9) et (V.10) démontrent l'impact de la rigidité de la poutre en acier sur le glissement dans les modèles 1 et 2. On a observé que les poutres dissymétriques avec raidisseur sont plus rigides que les poutres symétriques et dissymétriques sans raidisseur. Ainsi, il est conclu que la géométrie de la poutre est un paramètre crucial pour minimiser le glissement.

V.3.1.4 Effet de la liaison Acier-Béton (Dalle en siporex) :

a) **IPE symétrique : cas du modèle 1.**



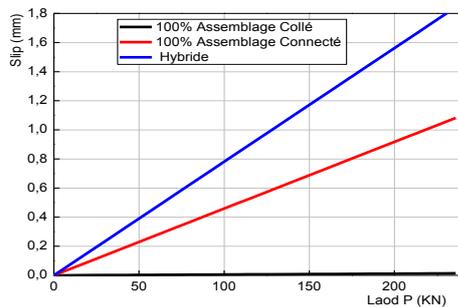
Cas de charge concentré



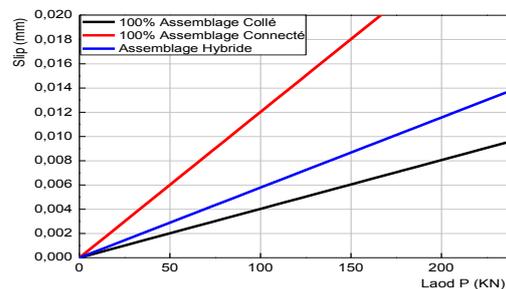
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.11 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la liaison Acier-Béton cas du modèle 1.

b) **IPE Dissymétrique : cas du modèle 2 sans raidisseur.**



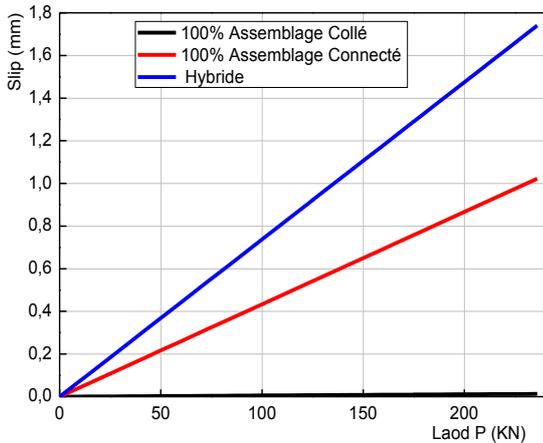
Cas de charge concentré



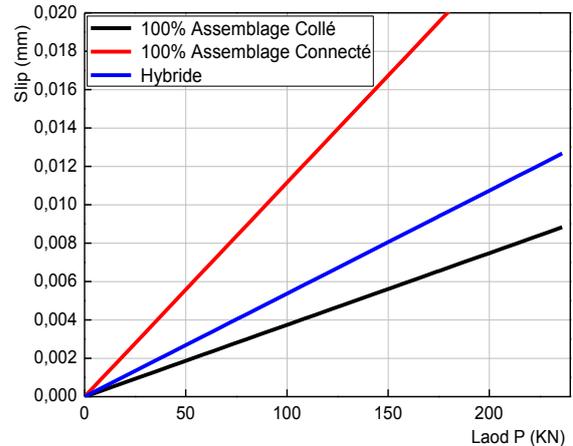
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.12: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la liaison Acier-Béton cas du modèle 2 sans raidisseur.

c) IPE Dissymétrique avec raidisseur : cas du modèle 2 avec raidisseur.



Cas de charge concentré



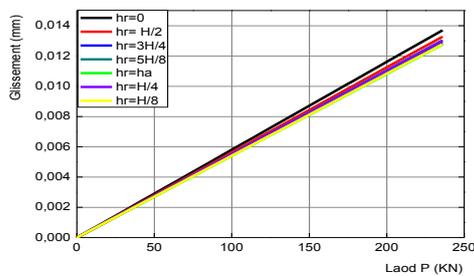
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.13 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la liaison Acier-Béton cas du modèle 2 avec raidisseur.

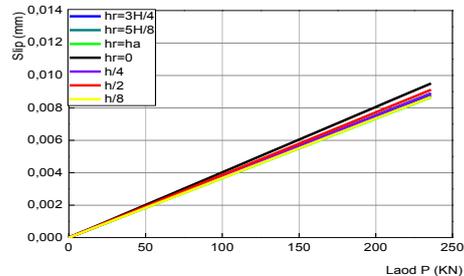
D’après les figures (V.11), (V.12) et (V.13), qui présentent l’effet de la liaison acier-béton pour les modèles 1 et 2 avec des charges uniformément réparties et concentrées au milieu, il est observé que l’utilisation d’une liaison hybride entraîne un glissement significatif pour les charges concentrées, tandis que l’assemblage 100% collé présente un faible glissement. En revanche, pour les charges uniformément réparties, un glissement important est enregistré dans l’assemblage 100% connecteur. Ainsi, il est conclu que l’assemblage 100% collé est une solution efficace pour prévenir le glissement.

V.3.1.5.Effet de la hauteur des raidisseurs IPE dissymétrique : cas du modèle 2 avec raidisseur.

a) Dalle en siporex :



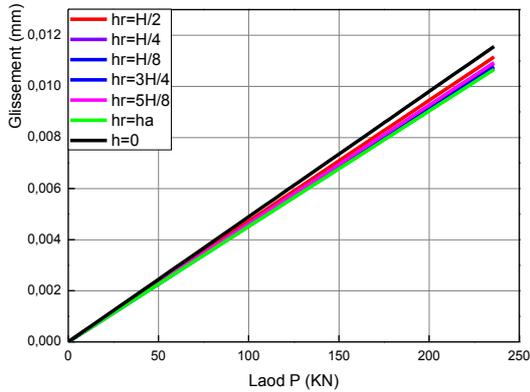
Cas de charge concentré



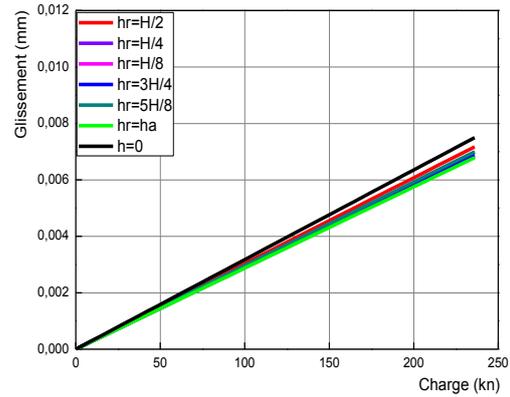
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.14 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la hauteur des raidisseurs cas du modèle 2 avec raidisseur.

b) dalle en polyester :



Cas de charge concentré



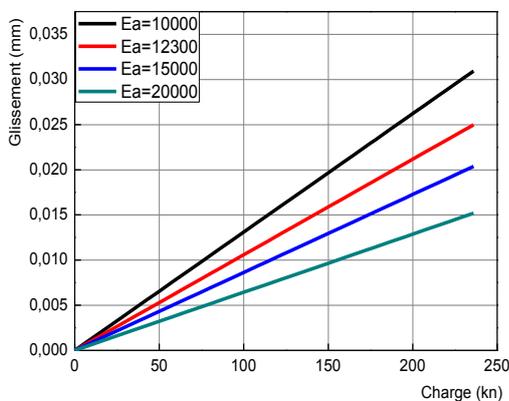
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.15 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton : Effet de la hauteur des raidisseurs cas du modèle 2 avec raidisseur.

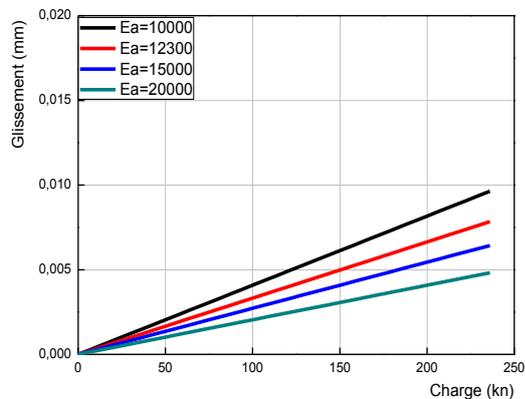
Il semble que les figures (V.14) et (V.15) représentent l'effet de la hauteur du raidisseur dans le modèle (2b) pour les dalles en siporex et en polyester. On a remarqué une valeur importante du glissement lorsque la hauteur du raidisseur est nulle ($hr = 0$), tandis que pour $hr = ha$, un faible glissement est enregistré. De plus, il y a une variation similaire du glissement pour les hauteurs $hr = 3H/4$, $hr = H/4$, $hr = 3H/8$ et $hr = H/8$.

V.3.1.6 Effet du module de Young de la colle E_a :

a) IPE symétrique dalle en siporex : cas du modèle 1.



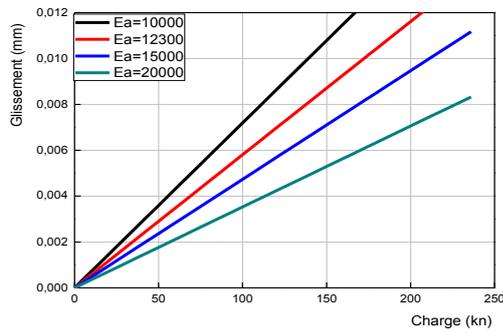
Cas de charge concentré



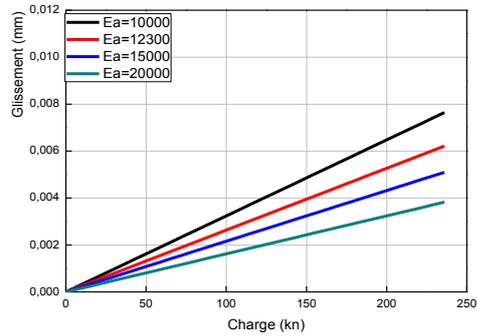
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.16 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton du module de Young de la colle E_a cas du modèle 1.

b) IPE Dissymétrique dalle en siporex : cas du modèle 2 sans raidisseur.



Cas de charge concentré



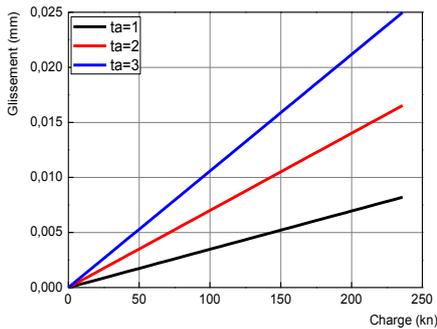
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.17 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton du module de Young de la colle E_a cas du modèle 2 sans raidisseur.

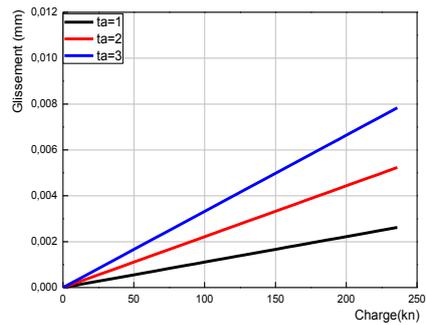
D'après les figures (V.16) et (V.17), elles illustrent l'influence du module de Young de l'adhésif sur le glissement de la poutre acier-béton pour chacun des modèles 1 et 2. Il est évident que lorsque la valeur du module de Young augmente élevé, le glissement devient plus faible.

V.3.1.7 Effet de l'épaisseur de la colle :

a) IPE symétrique dalle en siporex : cas du modèle 1.



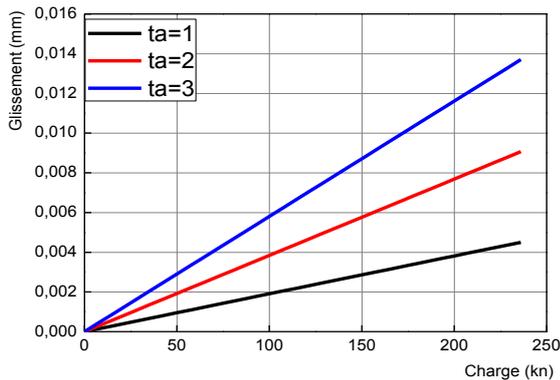
Cas de charge concentré



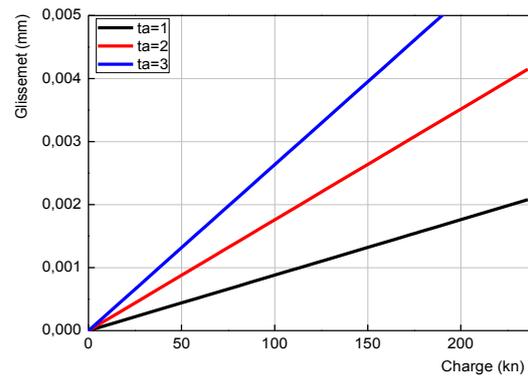
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.18 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton de l’Effet d’épaisseur de la colle cas du modèle 1.

b) IPE Dissymétrique dalle en siporex : cas du modèle 2 sans raidisseur



Cas de charge concentré



Cas de charge uniformément répartie

Figure V.19 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton de l’Effet d’épaisseur de la colle cas du modèle 2 sans raidisseur.

Il semble que les figures (V.18) et (V.19), montrent l'effet de l'épaisseur de la colle sur le glissement de la poutre acier-béton pour chacun des modèles 1 et 2. Vous avez observé qu'une augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne également une augmentation du glissement. Ainsi, il est fortement recommandé d'utiliser une couche mince d'adhésif pour prévenir le glissement entre la dalle et la poutre en acier.

V.3.2. Modèle 1 et 2 : Interface 2 :

V.3.2.1 Validation du modèle renforcé par collage des matériaux composites : cas du modèle 1 et 2 sans raidisseur.

La méthode actuelle a été validée en comparant les contraintes d'interface avec celles obtenues à partir de la méthode de Rabahi [2016]. Pour ce faire, une poutre en acier simplement appuyée renforcée par des plaques en matériaux composites de type CFRP a été analysée.

Tableau V.2 : Comparaison des contraintes d'interface pour une poutre métallique renforcée par une plaque en CFRP sous une charge uniformément répartie et une charge concentrée au milieu de la poutre.

Modèle	Contraintes	Profile symétrique		Profile dissymétrique	
		Charge Répartie	Charge concentré	Charge Répartie	Charge concentré
Ms Rabahi	Contraintes de cisaillement	6.10120	6.87373	7.06162	8.66760
	Contrainte Normale	3.44604	6.05396	3.92466	7.21205
Présente modèle	Contraintes de cisaillement	5.88459	6.63372	7.00470	8.60444
	Contrainte Normale	3.34114	5.91034	3.89797	7.17425

V. 3.2.2 Effet de longueur de la plaque de renforcé en CFRP : cas du modèle 1 et 2 sans raidisseur.

D'après le Tableau (V.3), on constate que plus la longueur non renforcée "a" augmente, plus les contraintes maximales (contraintes aux bords de la plaque) augmentent dans chacun des modèles 1 et 2a. Ce résultat démontre que, quel que soit le cas de renforcement, même celui qui se limite au renforcement de la zone centrale où le moment de flexion est maximum, il est préférable de prolonger la plaque de renforcement le plus possible aux appuis.

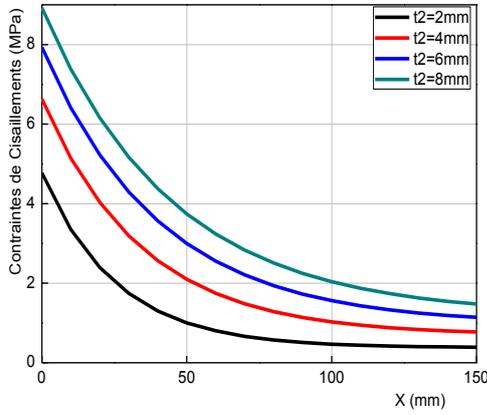
Tableau V.3 : effet de la longueur non renforcer « a ».

	Contraintes	IPE .symétrique		IPE. Dissymétrique	
		Charge Répartie	Charge Concentré	Charge Répartie	Charge Concentré
a =50	Contrainte de cisaillement	1.63072	1.68652	1.85888	2.64223
	Contrainte Normale	0.945441	1.33263	1.06141	1.91859
a =100	Contraintes de cisaillement	2.54744	2.67596	2.96753	3.83468
	Contrainte Normale	1.46178	2.24817	1.67262	2.96971
a =200	Contraintes de cisaillement	4.28195	4.65484	5.06559	6.21957
	Contrainte Normale	2.43867	4.07925	2.82919	5.07197
a = 300	Contraintes de cisaillement	5.88459	6.63372	7.00470	8.60444
	Contrainte Normale	3.34114	5.91034	3.89797	7.17425

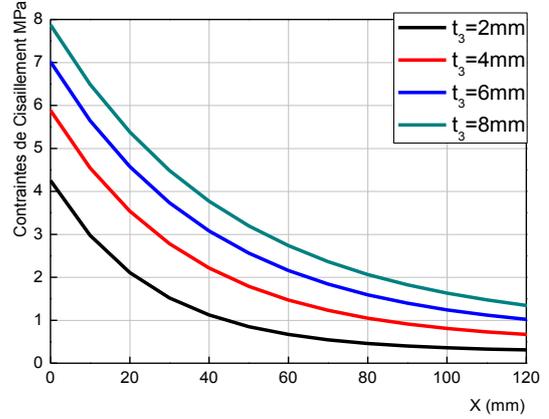
V. 3.2.3 Effet de la rigidité de la plaque renforcement :

V. 3.2.3.1 Effet de l'épaisseur de la plaque CFRP :

a) IPE symétrique : cas du modèle 1.

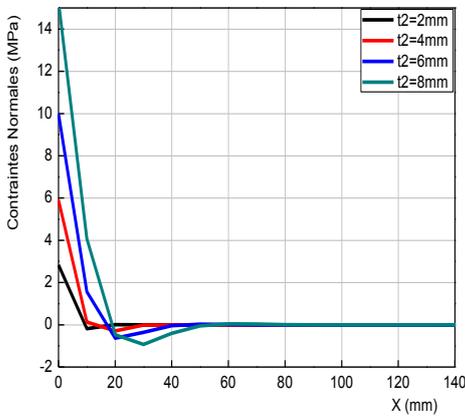


Cas de charge concentré

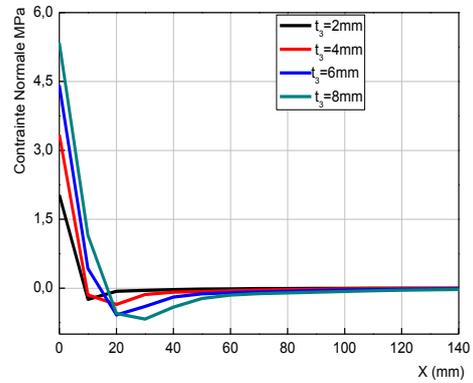


Cas de charge uniformément répartie

Figure V.20 : influence de l'épaisseur de la plaque CFRP sur la contrainte de cisaillement cas du modèle 1.



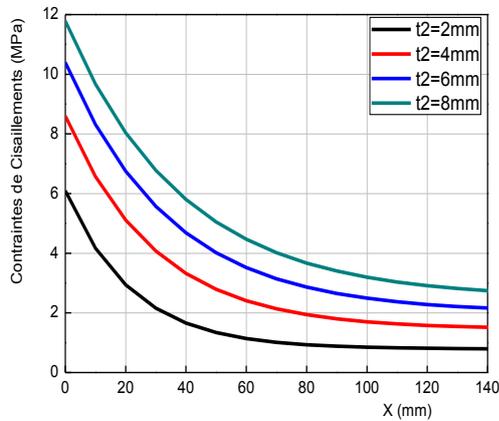
Cas de charge concentré



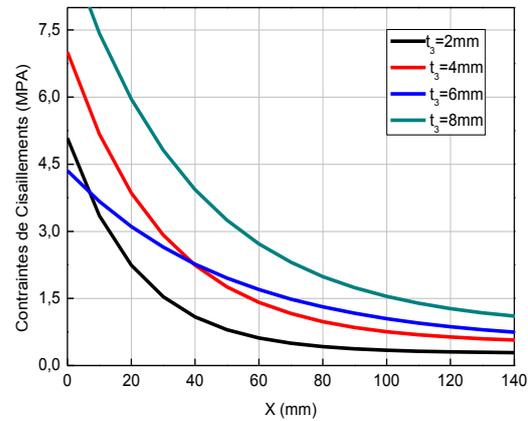
Cas de charge uniformément répartie

Figure V.21 : influence de l'épaisseur de la plaque CFRP sur la contrainte normale cas du modèle 1.

b) IPE dissymétrique : cas du modèle 2 sans raidisseur.

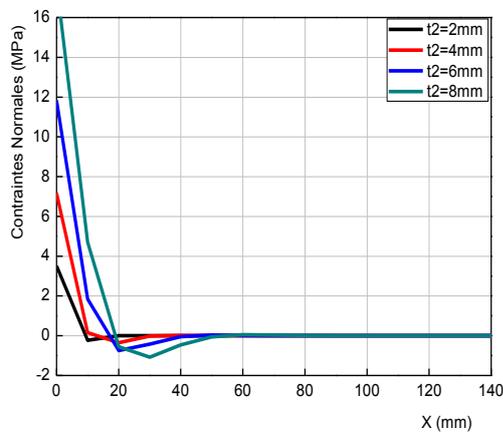


Cas de charge concentré

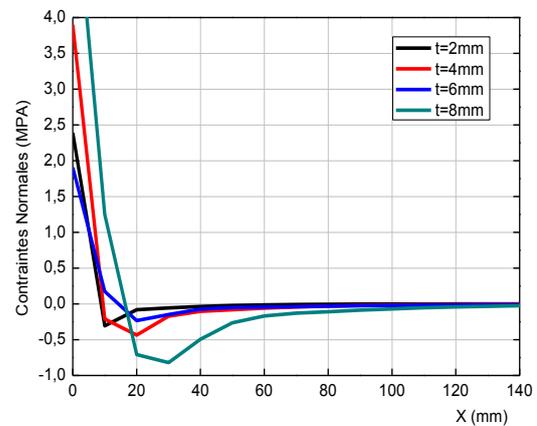


Cas de charge uniformément réparti

Figure V.22 : influence de l'épaisseur de la plaque CFRP sur la contrainte de cisaillement cas du modèle 2 sans raidisseur.



Cas de charge concentré



Cas de charge uniformément réparti

Figure V.23 : influence de l'épaisseur de la plaque CFRP sur la contrainte Normale cas du modèle 2 sans raidisseur.

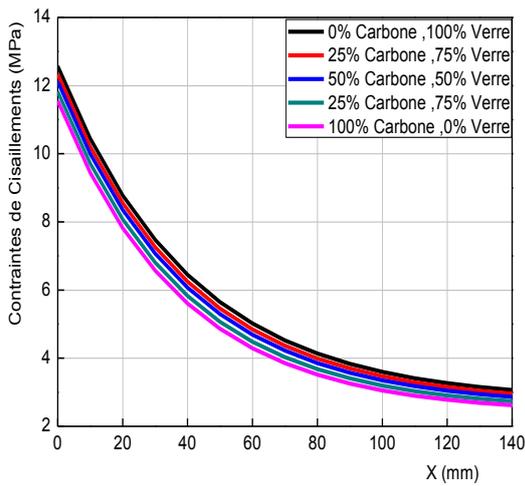
Dans les figures (V.20), (V.21), (V.22) et (V.23), nous exposons la variation des contraintes d'interface de cisaillement et normale en fonction de l'épaisseur de la plaque de renforcement. Il est observé que l'augmentation de cette épaisseur entraîne une augmentation des contraintes d'interface.

V.3.2.3.2 effet des composites hybrides (à 2 types de fibres) :

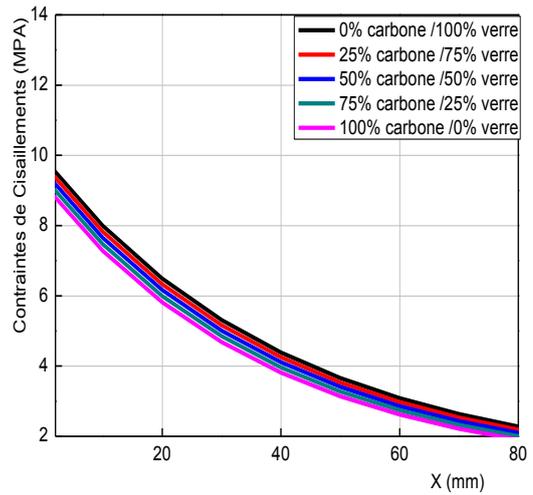
a) IPE Symétrique : cas du modèle 1.

Tableau V.4 : effet des composites hybrides dans le cas des charges uniformément répartie et concentré au milieu.

Les charges	0% Carbone /100% Verre	25% Carbone /75% Verre	50% Carbone /50% Verre	25% Carbone /75% Verre	100% Carbone /0% Verre
Cas de charge concentré	8.20994	8.05834	7.92350	7.74261	7.57786
Cas de charge uniformément répartie	3.93261	3.90452	3.87414	3.84140	3.80600



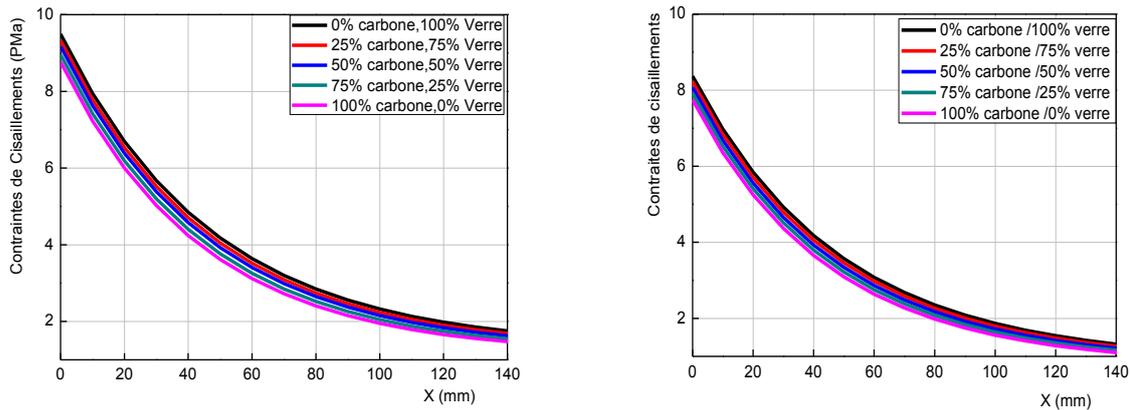
Cas de charge concentré



Cas de charge uniformément répartie

Figure V.24 : effet des composites hybrides sur la contrainte de cisaillement cas du modèle 1.

Dissymétrique : cas du modèle 2 sans raidisseur.



Cas de charge concentré

Cas de charge uniformément répartie

Figure V.25 : effet des composites hybrides sur la contrainte de cisaillement cas du modèle 2 sans raidisseur.

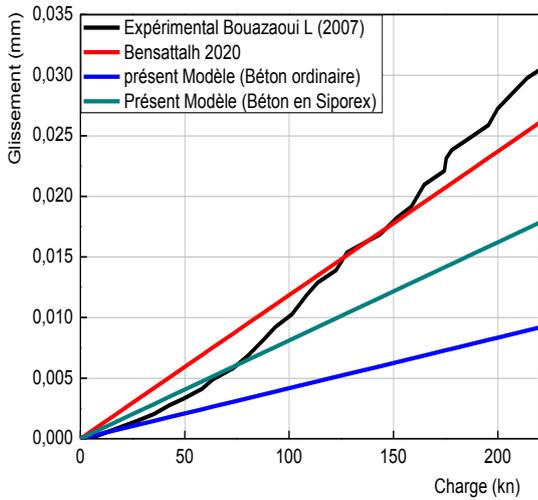
Tableau V.5 : effet des composites hybrides dans le cas des charges uniformément répartie et concentré au milieu

Les charges		0% Carbone /100% Verre	25% Carbone /75% Verre	50% Carbone /50% Verre	25% Carbone /75% Verre	100% Carbone /0% Verre
Contraintes normale	charge concentré	9.85595	9.68302	9.52882	9.32121	9.13137
	charge uniformément répartie	4.56483	4.53377	4.50013	4.46378	4.42425

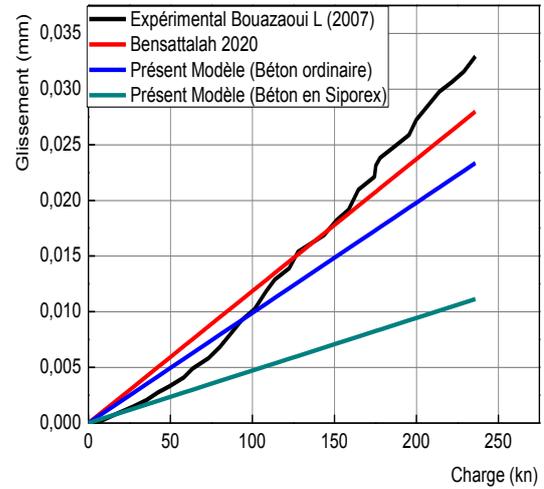
D'après les figures (V.24), (25) et les tableaux (V.4), (V.5) montrent l'effet des composites hybrides (constitués de 2 types de fibres) sur la contrainte de cisaillement et la contrainte normale, dans le cas du modèle 1, pour les charge uniformément répartie et concentrée, La contrainte de cisaillement diminue avec l'augmentation de la distance (X) pour tous les types de composites. - La décroissance de la contrainte est plus rapide au début (proche de l'origine) puis tend à se stabiliser.

V.3.2. Modèle 3 : interface 1 : Poutre en section Té.

V.3.2.1 Validation : cas du modèle 3.



Cas de charge concentré

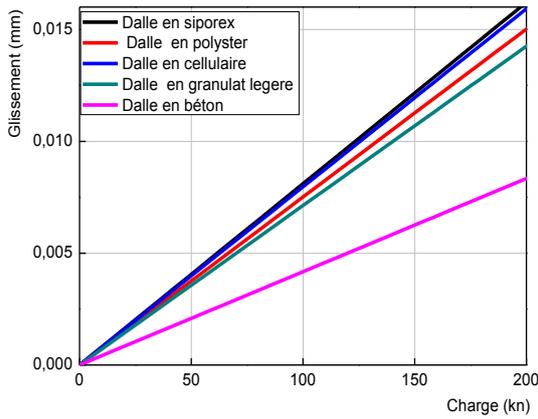


Cas de charge uniformément répartie

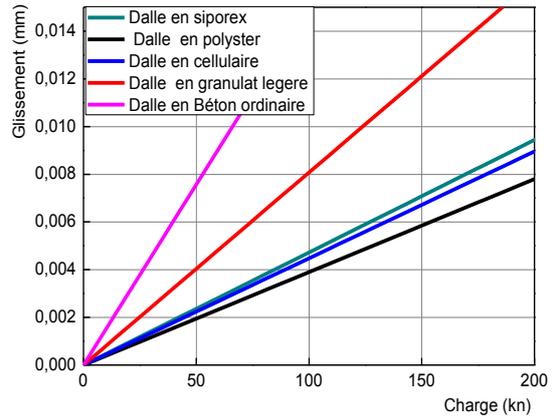
Figure V.26: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton cas du modèle 3

Pour valider par comparaison le glissement de la poutre acier-béton (béton en siporex) dans le modèle 3 renforcée par une plaque composite CFRP avec les résultats expérimentaux de Bouazaoui (2007) et les résultats analytiques de Bensatallah (2020), il est nécessaire d'analyser les méthodes analytiques utilisées dans le modèle 3 et les comparer aux approches expérimentales et analytiques de référence. On prend compte les matériaux utilisés, les conditions aux limites, les charges appliquées et les méthodes de mesure pour une comparaison précisée finalement on constate que le types de chargement est un paramètre influe sur le comportement de la poutre donc la dalle en béton ordinaire est à faible glissement dans la charge concentré au milieu et par contre dans la charge répartie.

V. 3.2.2.Effet de la légèreté de la dalle :



Cas de charge concentré

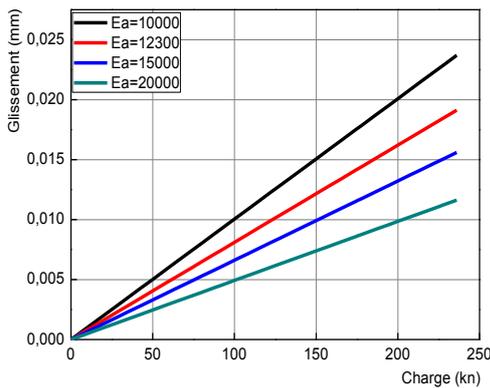


Cas de charge uniformément répartie

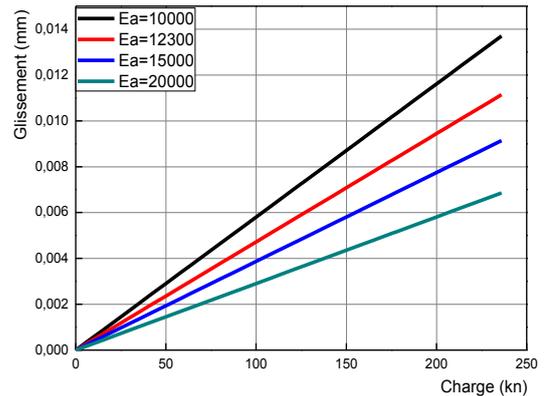
Figure V.27 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton effet de la légèreté de la dalle cas du modèle 3.

Les figures (V.27) montrent l'effet de la légèreté de la dalle sur le glissement de la poutre acier-béton renforcée par la plaque CFRP collée. On constate que dans le cas d'une charge concentrée au milieu la dalle en béton donne faible glissement par contre au charge uniformément répartie

V. 3.2.3.Effet des Modules de Young E_a : cas du modèle 3.



Cas de charge concentré

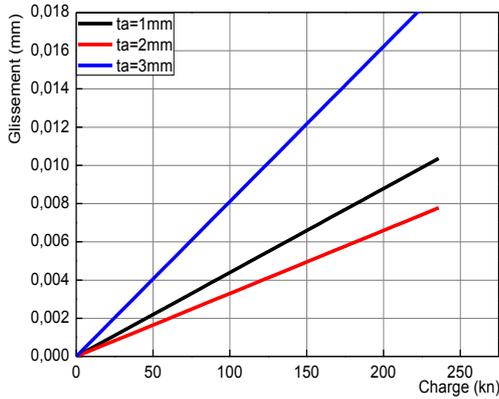


Cas de charge uniformément répartie

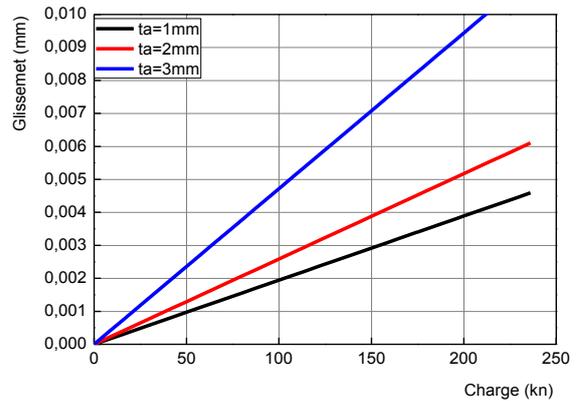
Figure V.28 : Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton Effet des Modules de Young E_a cas du modèle 3.

D'après la figure (V.28), qui représente l'influence du module de Young de l'adhésif sur le glissement de la poutre composite acier-béton dans le modèle 3, il est évident que plus la valeur du module de Young augmente, plus le glissement devient faible.

V.3.2.4 effet de l'épaisseur de la colle t_a : cas du modèle 3.



Cas de charge concentré

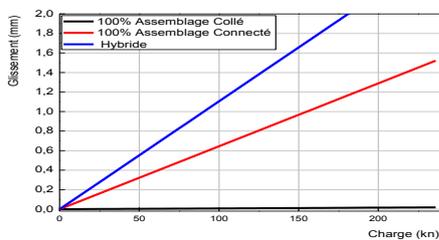


Cas de charge uniformément répartie

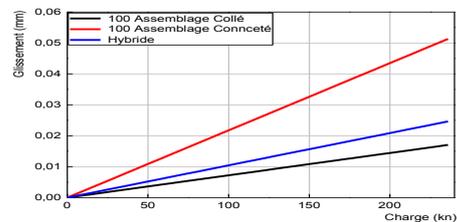
Figure V.29: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton effet de l’épaisseur de la colle t_a cas du modèle 3.

Selon la figure (V.29), qui présente l'effet de l'épaisseur de la colle sur le glissement de la poutre acier-béton dans le modèle 3, il est observé qu'une augmentation de l'épaisseur de l'adhésif entraîne également une augmentation du glissement. Par conséquent, il est fortement recommandé d'utiliser une couche mince d'adhésif pour prévenir le glissement entre la dalle et la poutre en acier.

V.3.2.5. Effet de la liaison acier-béton : cas du modèle 3



Cas de charge concentré



Cas de charge uniformément répartie

Figure V.30: Courbe charge –glissement d’une poutre mixte acier –béton effet de l’épaisseur de la colle t_a cas du modèle 3.

D'après les figures (V.30), il est clair que l'augmentation de l'épaisseur de la couche adhésive entraîne une augmentation du glissement de la poutre composite acier-béton dans chaque modèle 3. Par conséquent, il est fortement recommandé d'utiliser une couche adhésive mince pour minimiser le glissement entre la dalle et la poutre en acier.

Conclusion :

Pour conclure le chapitre 5, nous pouvons dire que plusieurs paramètres influent sur le comportement du glissement dans l'interface acier-béton. En particulier, l'augmentation du module de Young réduit le glissement. Par ailleurs, il est recommandé d'utiliser une fine couche de colle pour minimiser le glissement entre la dalle et la poutre en acier. Ne pas oublier de prendre en compte la géométrie de la poutre pour assurer une minimisation efficace du glissement, ainsi que la légèreté de la dalle, qui est un paramètre essentiel pour réduire le glissement. De plus, l'ajout de trous dans la section concave de la poutre peut également diminuer le glissement, selon les résultats obtenus. En passant à l'interface acier-composite CFRP, on constate que l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif réduit considérablement l'intensité des contraintes d'interface de cisaillement et normales, tandis que l'augmentation de l'épaisseur de la plaque de renforcement favorise l'accroissement des contraintes. Il est également recommandé de prolonger autant que possible la longueur de la plaque de renforcement afin de réduire l'intensité des concentrations de contraintes aux bords de la poutre.

Conclusions et perspectives

Dans cette étude, une théorie améliorée des poutres collées est proposée pour modéliser des structures composites acier-béton de type poutre renforcées par une plaque composite liée extérieurement. Une approche générale rigoureuse et systématique pour l'analyse des contraintes de glissement et d'interface dans les poutres composites acier-béton renforcées par des plaques composites liées extérieurement a été présentée. L'influence des propriétés adhésives sur les contraintes d'adhérence dans la poutre composite acier-béton renforcée avec des plaques CFRP a été étudiée à l'aide d'un modèle analytique amélioré. Les déformations de cisaillement adhérentes sont prises en compte en supposant une contrainte de cisaillement parabolique à travers l'épaisseur de la poutre composite acier-béton et de la plaque CFRP liée. Dans ces cas, l'effet des déformations de cisaillement devient significatif et doit être pris en compte lors de la conception ; l'avantage analytique de cette amélioration est possible pour déterminer la contrainte de cisaillement afin d'estimer la prédiction exacte de la contrainte d'interface de cisaillement le long de la portée entre la dalle en béton et la poutre en acier. En comparant avec les résultats analytiques, la présente solution fermée fournit des prédictions satisfaisantes du glissement et de la contrainte d'interface de cisaillement dans la poutre composite acier-béton. Les propriétés matérielles des poutres composites acier-béton-composite liées ont été prises en compte, qui sont données explicitement en termes de propriétés des fibres et de la matrice et du rapport fibre-volume. Une étude paramétrique est ensuite menée, évaluant l'effet de la déformation par cisaillement transversal sur les contraintes d'interfaces et le glissement avec différents paramètres de matériau et de géométrie de l'adhésif.

Les conclusions de cette recherche peuvent être résumées comme suit :

- Les contraintes d'interface maximales de glissement ont été analysées à l'aide d'adhésifs présentant diverses propriétés de module d'Young et de coefficient de Poisson, ainsi que les caractéristiques des plaques CFRP telles que la rigidité des plaques et la fraction volumique des fibres. En général, la contrainte d'interface

maximale augmente avec une augmentation du module d'adhésion de Young, mais ne semble pas changer de manière significative avec une augmentation du coefficient de Poisson.

- La poutre composite acier-béton développée renforcée avec un élément de plaque CFRP lié donne de bons résultats de glissement d'une poutre composite simplement supportée par rapport aux données analytiques et expérimentales publiées.
- Les contraintes d'interface de cisaillement diminuent avec la diminution de la fraction volumique des fibres. Cependant, presque aucun effet n'est observé sur la variation des contraintes d'interface normales.
- Les contraintes d'interface sont influencées par les paramètres géométriques tels que l'épaisseur de la couche adhésive et de la plaque CFRP dans une plage de différents degrés. Il est clair de montrer que les contraintes et les niveaux de bord augmentent évidemment avec l'augmentation de l'épaisseur de la plaque CFRP. Cependant, nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de la couche adhésive conduit à une réduction significative des contraintes d'interface maximales.
- Un autre résultat basé sur l'étude paramétrique indique que l'extension de la bande CFRP aussi près que possible du support réduit les contraintes au bord.

En perspectives, des études complémentaires peuvent être menées pour pouvoir compléter cette recherche nous pouvons citer entre autre :

1. Améliorer la connaissance concernant la conception des poutres mixte acier-béton-composite en tenant compte la non linéarité du comportement.
2. Améliorer la connaissance concernant la fiabilité et la durabilité des structures mixtes acier-béton-composite sous fluage et fatigue,
3. Améliorer la connaissance des structures acier-béton-composite sous chargement thermomécanique "cas de la réhabilitation des anciens bâtis".
4. Développer un code de calcul des poutres acier-béton-composite.

Références bibliographique :

- Alain D, (1996) "Introduction aux plastiques et composites en mécanique.
- Amiraoui A, (2004) "Caractérisation de la connexion acier béton dans les structures Mixtes " mémoire de magister, université mentouri Constantine.
- Andjami M, (2013)" Analyse du comportement mécanique des poutres métalliques renforcées par collage externe des plaques composites " mémoire de master université de Tiaret.
- Ben Henni M A, (2019) "Contribution a l'étude de la vibration des plaques en matériaux composites sous chargements mécanique et thermomécanique" thèse en co-tutelle, université de Tiaret-université de Reims.
- Bensatallah T, Hassaine Daouadji T, (2020) " Improved analytical solution for slip and interfacial stress in composite steel-concrete beam bonded with an adhesive" Advance in Materials Research, Vol.9. pp133153. , <https://doi.org/10.12989/amr.2020.9.2.133>.
- Belblidia S, (2018) "Contribution à l'étude du comportement des poutres métalliques des ouvrages d'art renforcées par différents types de composite" mémoire de master université de Tiaret.
- Belhenini S, (2023) "Matériaux composites note de cours" université de Ain Temouchent.
- Berthelot J.M, (2002),"Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures", édition Masson, 4ème édition, LeMans, France.
- Bujnak J, (2007)" Analyse globale de poutres mixtes (acier-béton) approche analytique et modélisation non linéaire", thèse de doctorat, université de Zilina slovaquie.
- Chataigner S, (2016)"Collage structural et matériaux composites pour les structures de génie civil: contributions théoriques et applications" mémoire de l'Habilitation `a Diriger des Recherches de l'Ecole Doctorale Sciences, Ingénierie, Environnement de l'université Paris.
- Camus G, Lorrette C, Pailller R, Rebillat F, Reignier B, Teyssandier F "Matériaux composites à matrice céramique et à renfort par fibres longues "volume 2,France .
- Castanié B, Bouvet C, Guerda D, (2013) "Structures en matériaux composites stratifiés"BM5080 volume 2, Génie industriel –conception et production.
- Hassaine Daouadji T., A. Rabahi, B. Abbes, B. Adim (2016) "Theoretical and finite element studies of interfacial stresses in reinforced concrete beams strengthened by externally FRP laminates plate", Journal of Adhesion Science and Technology, 2016, Volume 30, No 12, pages 1253–1280.
- HassaineDaouadji T', (2020) "Cours des matériaux composite" Université de Tiaret.

- Khattara O, Mousselmal Y, (2020)" Etude expérimentale du comportement des connecteurs en « I » dans les structures mixtes acier-béton" " mémoire de master académique université de Larbi Tébéssa – Tébéssa.
- Maqoi R, Debruyckere R, Demonceau F J, Pyl L" Construction mixte acier –béton "Guide de construction métallique, édition de :Infosteel ,ISBN 978-90-807595-74.
- Meaud C, (2012)"Analyse multi-échelle des connexions par collage : application aux éléments structuraux multi matériaux fléchis" Thèse de doctorat, université de Claude Bernard Lyon.
- Saadi M"Les constructions mixtes dans les bâtiments" cour de Structure Mixte, université de Batna 2.
- Setra, (2010)"Steel-concrete composite bridges, Sustainable design guide "SETRA.
- Schollmayer M, (2009) "Through-thickness performance of adhesive connections between FRP bridge decks and steel main girders" PhDthesis, EPFL.
- Si Larbi A, Ferrier, E, Jurkiewicz, B, Hamelin, P , (2007)"Static behaviour of steel concrete beam connected by bonding" Engineering structures, 29 :1034 -1042.
- Thomann M, (2005)"Connexion par adhérence pour les ponts mixtes acier-béton " PhD thesis, EPFL.
- Tout F, (2014) "Étude expérimentale des éléments structuraux multi-matériaux collés sollicités en flexion : effet du fluage, fatigue et durabilité" Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université de lyon.

Annexe

Canevas Modèle D'entreprise

1. Présentation du projet :

Emosense est un projet qui permet de moderniser les structures existantes par utilisation des techniques modernes et innovantes, il s'agit d'une reconstruction des planchers existants en gardant la structure porteuse, par collages des prédalles en matériaux légers sur les poutres en acier existantes, cette solution consiste à un soulagement des structures porteuses (de point de vue chargement), cette nouvelle conception offre l'avantage d'ajouter encore un plancher sur la structure existante, en conséquence cette approche peut rendre service au problème de crise de logement.

2. Problématique :

- Vu l'existence d'un tissu urbain depuis l'époque coloniale, (très ancien) qui nécessite une rénovation des bâtiments d'habitation.
- Vu la surpopulation de l'ancien centre-ville, ainsi que la crise de logement qu'a connue l'Algérie.
- La démolition des bâtiments légèrement dégradés devient une solution radicale et très coûteuse d'une part, et la perturbation des citoyens d'autre part.

3. Impacts socio-économique de ce projet

Parmi l'impact direct du nouveau concept, il est important de signaler ce qui suit:

1. Gain en économie, c'est-à-dire que la technique innovante de modernisation devient moins coûteuse par rapport à la démolition et construction de nouveau.
2. Comme cette nouvelle conception offre l'avantage d'ajouter encore un plancher autrement dit un étage sur la structure existante, qui sera occupé par descendant des

habitants, en conséquence notre solution peut offrir une solution à la crise actuelle de logement.

4. Comme les descendant sont hébergés près de leur famille; dans leur quartier de naissance, dans ce contexte; nous avons préservé les cultures familiales.

4. Solution proposée: Secteurs utilisateurs du ce solution

Nous citons comme secteur utilisateurs de ce nouveau matériau de construction:

1. l'Office Promotion et de Gestion Immobilière.
2. Direction des logements des wilayat.
3. Direction des équipements publics.
4. Secteurs publics d'une façon générale.

5. Perspective de ces travaux

Puisque la majorité des villes algérienne sont datée de l'époque colonial, dont nous rencontrons les mêmes tissu urbain, dans ce cadre nous souhaitons une généralisation de la solution proposé à l'échelle national.

6. Aspects novateurs

6.1. Relations avec les clients

<p>Comment gérez-vous vos relations avec les clients ?</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Étudier le plan des logements et calculer le coût de la réhabilitation et de l'ajout d'un étage ensemble. - Mettre en place des spécialistes qui veillent à surveiller le déroulement des projets
<p>Quels sont les principaux programmes sur lesquels vous allez vous appuyer pour gérer la relation avec le client ?</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Nous comptons sur l'ouverture d'ateliers pour promouvoir l'idée de réhabilitation et l'ajout d'un ou deux étages. -Nous établissons des partenariats avec les chaînes médiatiques et les stations de radio pour communiquer cette idée à la communauté. -Nous utilisons les réseaux sociaux. -Nous établissons des partenariats avec des bureaux d'études publics en cas de présence de logements coloniaux toujours appartenant à l'État.

6.2. La fiche technique du projet :

prénom et nom	SAFAR DjamilaTOUATI Saliha
intitulé de projet	Bureau d'études spécialisé dans la réhabilitation des logements coloniaux
numéro de téléphone	07.74.00.06.23
statut juridique	Enregistré comme bureau d'études spécialisé
adresse e-mail	sfrdjoumana@gmail.com
ville ou commune d'activité	Tiaret

6.3. Value Proposition

Quel est le problème que vous souhaitez résoudre ?	Le problème que nous voulons résoudre, c'est le problème de la crise du logement en centre-ville, notamment en réduisant le poids des logements, et tout cela en exploitant l'habitat colonial, en ajoutant un ou deux étages.
De quelles données disposez-vous qui indiquent que le problème spécifique existe ?	Dans l'État de Tiaret, l'urbanisation est devenue très limitée pour la population, donc la majorité des logements se sont retrouvés en dehors de la commune, et ainsi les logements coloniaux peuvent être exploités.
Quels autres projets ciblant le même problème ont été mis en œuvre ?	Il existe un projet, celui d'un hôtel au centre de la ville de Tiaret, mais il n'a pas été reconfiguré dans le but de réduire le poids et d'ajouter des étages.
Quels sont les objectifs de votre projet et/ou les résultats attendus ?	Fournir, c'est-à-dire que la technologie innovante de rénovation devient moins coûteuse par rapport à la démolition et à la nouvelle construction, puisque cette nouvelle conception offre l'avantage d'ajouter un autre étage, n'importe quel étage, au bâtiment existant, qui sera occupé par les descendants des résidents. , notre solution peut donc apporter une solution à la crise actuelle du logement, car les petits-enfants sont logés à proximité de leur famille ; Dans le quartier où ils sont nés, dans ce contexte ; Nous avons préservé les cultures familiales.

6.4. Value Proposition

Valeur innovante ou nouvelle	Ajouter un ou deux étages à un logement sans le démolir et le reconstruire à nouveau
Personnalisation de la valeur	La valeur ajoutée dans la spécialité est la réduction du poids du boîtier, et c'est un facteur très important pour l'ingénieur
Valeur au prix	Un prix très attractif par rapport au prix ou au coût de reconstruction
Valeur par conception	Il prend en considération toutes les situations possibles lors de la construction
Valeur avec haute performance	Cela signifie certainement réduire le poids du logement et ajouter un étage tout en préservant plusieurs caractéristiques liées à la société et à l'économie.
Valeur avec un service complet	Il préserve les logements coloniaux et les réhabilite de manière très économique.

6.5. Relation avec les clients

Comment gérez-vous vos relations avec les clients ?	<p>-Nous gérons la relation avec le client en : ouvrant un bureau d'études qui cherche à</p> <p>-Étudier le plan de logement et calculer ensemble le coût du réaménagement et de l'augmentation d'étage</p> <p>-Nous employons des spécialistes qui cherchent à suivre l'avancement des projets</p>
Quels sont les programmes les plus importants sur lesquels vous vous appuyez pour gérer la relation avec le client ?	<p>-Nous misons sur l'ouverture d'ateliers qui contribuent à diffuser l'idée de préparer et d'agrandir un ou deux étages</p> <p>-Nous nous appuyons sur le développement de</p>

	<p>partenariats avec les chaînes médiatiques et la radio pour communiquer l'idée à la communauté.</p> <p>-Sites de réseautage social</p> <p>-Nous misons sur le développement de partenariats avec les bureaux d'études de l'État au cas où il existerait des logements coloniaux qui appartiennent encore à l'État.</p>
--	--

6.6. Partenaires principaux

Partenaires	Informations sur les partenaires	La nature du partenariat
Premier partenaire	Le fournisseur de matériaux utilisés dans la restauration et le renforcement des logements	Le partenaire n'est pas un concurrent, mais plutôt un accord mutuellement avantageux
Deuxième partenaire	Usines de fabrication de carreaux légers	Nous avons un intérêt commun à développer de nouveaux produits
Troisième partenaire	Propriétaires de logements coloniaux	Une stratégie conçue pour réduire les risques pouvant être associés à la mise sur le marché d'un nouveau produit. Notre relation partenaire est une relation acheteur-fournisseur

7. plan financier**7.1. La structure de couts**

Matériel	1,500,000,000 da
Matériel de bureau	250,000,000 da
Stock de matières et produits	200,000,000 da
Trésorerie de depart	250,000,000 da
Totale	2,100,000,000 da

7.2. Les couts fixes

Assurances	50000.00 da /mois
Téléphone, internet	4000.00 da / mois
Carburant, transports	60000.00 da / mois
Frais de déplacement et hébergement	60000.00 da /mois
Eau, électricité, gaz	20000.00 da /3 mois
Fournituresdiverses	20000.00 da / mois
Budget publicité et communication	100000.00 da
Nettoyage des locaux	20000 .00 da /mois
Total	434000.00 da

7.3. Ressources de revenus :

Prêt N 1 (la banque) : 434000.00 da

7.4. chiffre d'affaires :

Notre chiffre d'affaire de la première année

1Mois	2
2Mois	0
3Mois	1
4Mois	0
5Mois	3
6Mois	0
7Mois	2
8Mois	2
9Mois	1
10Mois	2
11Mois	1
12Mois	1

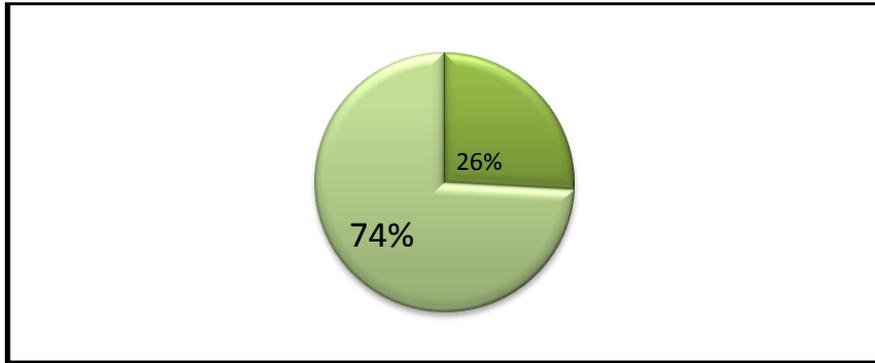
Notre chiffre d'affaire de la deuxième année

1Mois	2
2Mois	1
3Mois	3
4Mois	2
5Mois	3
6Mois	1
7Mois	4
8Mois	2
9Mois	2
10Mois	1
11Mois	2
12Mois	3

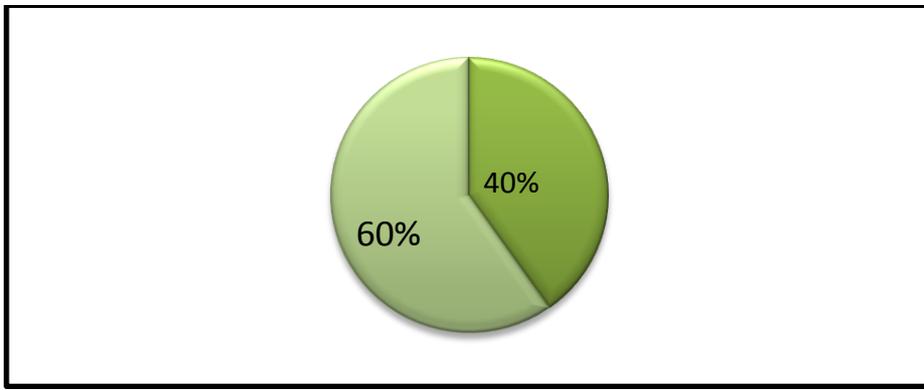
Notre chiffre d'affaire de la troisième année

1Mois	5
2Mois	2
3Mois	3
4Mois	4
5Mois	1
6Mois	2
7Mois	3
8Mois	6
9Mois	4
10Mois	2
11Mois	1
12Mois	2

Pourcentage d'augmentation du chiffre d'affaires entre 1^{ère} et 2^{ème} année :



Pourcentage d'augmentation du chiffre d'affaires entre 2^{ème} et 3^{ème} année :



Bisness model canvas				
Partenaires clés	Activité clés	Proposition de valeur	Relation avec les clients	Segments de clients
<ul style="list-style-type: none"> -des fournisseurs de matériaux adaptés à la réhabilitation. - les architectes spécialisés et des entreprises de construction métallique. - les usines des dalles légères, les plaques et les colles). - Les propriétaires de bâtiments coloniaux. 	<ul style="list-style-type: none"> -Réaliser des études de faisabilité pour chaque projet. -Concevoir des plans de renforcement et d'allègement des structures. -Exécuter les travaux de réhabilitation avec une attention particulière à la préservation historique. -Gérer le projet pour assurer la satisfaction du client. 	<ul style="list-style-type: none"> -Fournir une solution innovante pour renforcer les structures existantes tout en allégeant les planches mixtes. -Permettre l'ajout d'étages supplémentaires sans compromettre la sécurité et l'intégrité historique du bâtiment. 	<ul style="list-style-type: none"> -Offrir un service personnalisé pour répondre aux besoins spécifiques de chaque projet. -Maintenir un suivi régulier et une communication transparente tout au long du projet. -Fournir un support technique et des consultations continues. 	<ul style="list-style-type: none"> -Les architectes et ingénieurs spécialisés pour des projets complexes de réhabilitation. -Les investisseurs immobiliers intéressés par la valorisation de bâtiments historiques. -Office Promotion et de Gestion Immobilière -Direction des logements des wilayat -Direction de l'équipement public -Secteurs publics d'une façon générale.
	Ressources clés		Canaux	
	<ul style="list-style-type: none"> -Disposer d'une équipe spécialisée en ingénierie et en architecture. -Accéder à des matériaux de construction à la réhabilitation de structures anciennes. - un réseau de fournisseurs spécialisés dans les matériaux utilisés. 	<ul style="list-style-type: none"> -Utiliser des réseaux professionnels pour atteindre des clients potentiels. -Promouvoir les services via un site web et les réseaux sociaux. -Participer à des événements dédiés au patrimoine. 		
Structure des coûts		Flux de revenus		
<ul style="list-style-type: none"> -Prendre en compte les salaires de l'équipe spécialisée. -Prévoir les coûts des matériaux nécessaires pour la réhabilitation. -Investir dans des logiciels et outils spécialisés pour l'analyse et la conception. -Allouer un budget pour le marketing et la communication. 		<ul style="list-style-type: none"> -Générer des revenus via les honoraires de consultation initiale. -Obtenir des contrats de réhabilitation complets. -Facturer pour la conception, l'ingénierie et la gestion de projet 		