



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

BOUDJELAL Zineb Manal

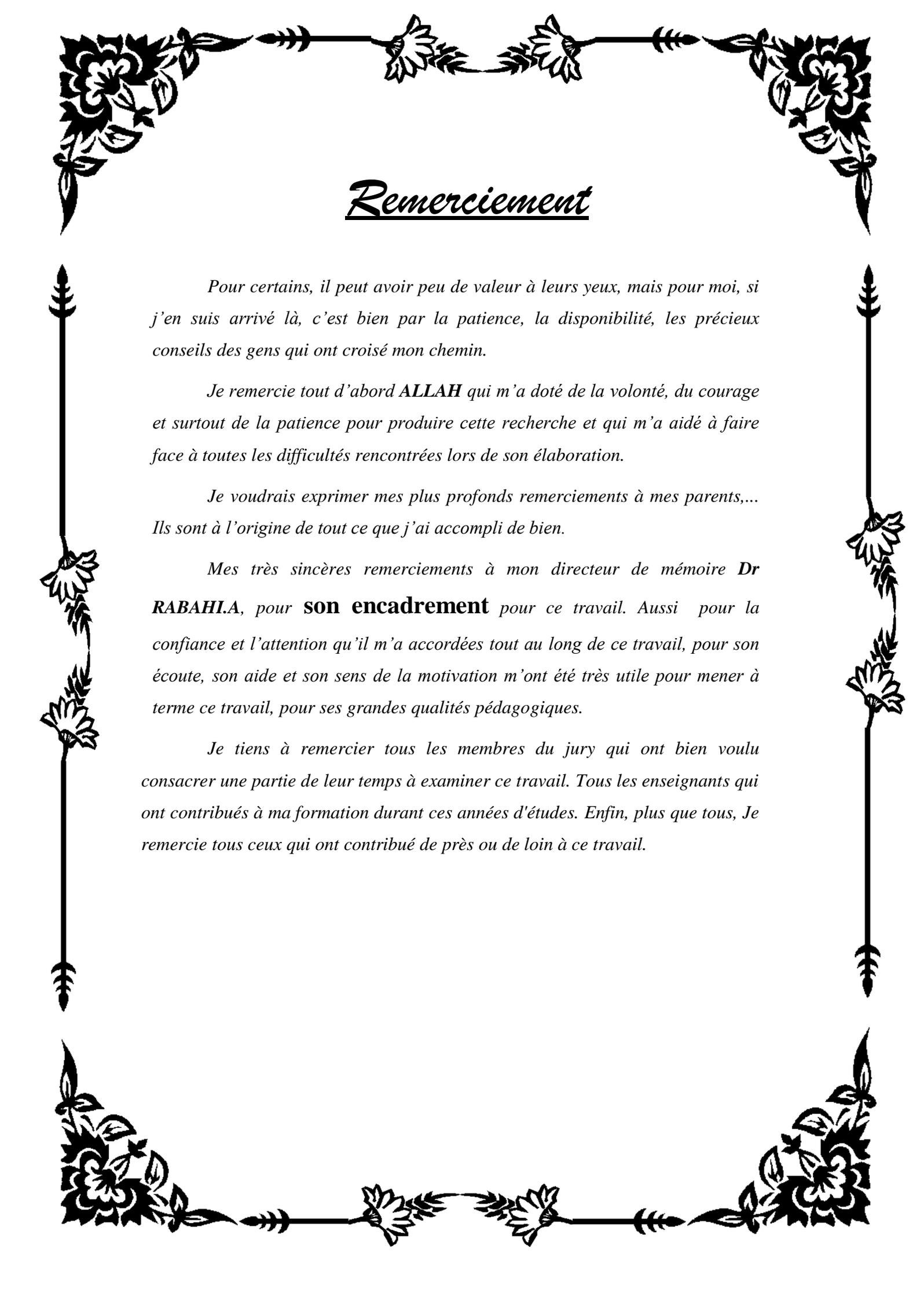
Sujet du mémoire

Contribution à l'étude de l'efficacité des poutres en béton armé renforcées par nid d'abeille sous l'effet du fluage

Soutenu publiquement le.../09/2020 devant le jury composé de :

Mr, KERROUM Nadir	Président
Mr, RABAHI Abderezak	Rapporteur
Mr, KRIM Abdellah	Examineur
Mr, DJEBLI Benyagoub	Examineur

2019/2020

A decorative border with floral motifs in the corners and along the sides, framing the text.

Remerciement

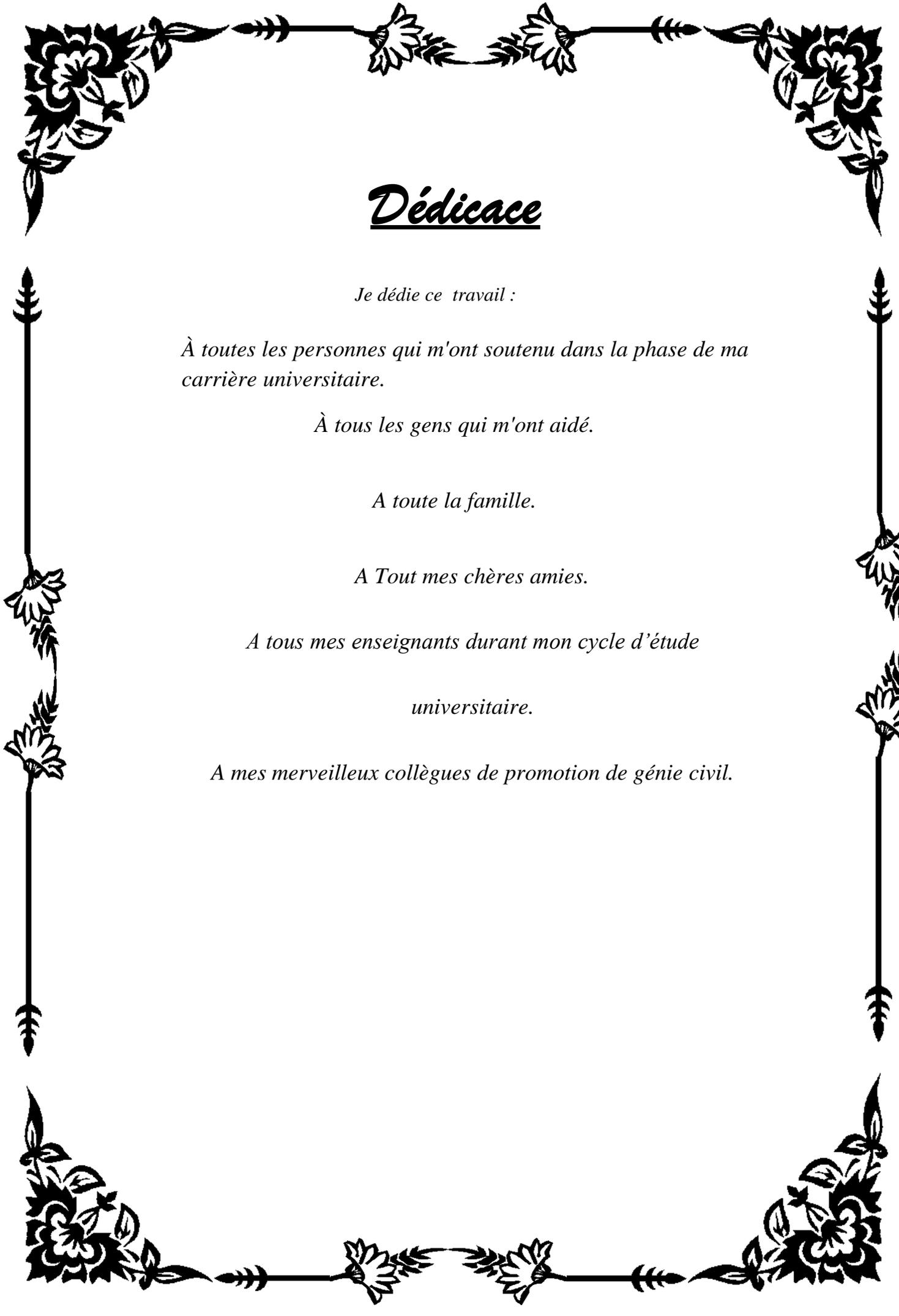
Pour certains, il peut avoir peu de valeur à leurs yeux, mais pour moi, si j'en suis arrivé là, c'est bien par la patience, la disponibilité, les précieux conseils des gens qui ont croisé mon chemin.

*Je remercie tout d'abord **ALLAH** qui m'a doté de la volonté, du courage et surtout de la patience pour produire cette recherche et qui m'a aidé à faire face à toutes les difficultés rencontrées lors de son élaboration.*

Je voudrais exprimer mes plus profonds remerciements à mes parents,... Ils sont à l'origine de tout ce que j'ai accompli de bien.

*Mes très sincères remerciements à mon directeur de mémoire **Dr RABAHA**, pour **son encadrement** pour ce travail. Aussi pour la confiance et l'attention qu'il m'a accordées tout au long de ce travail, pour son écoute, son aide et son sens de la motivation m'ont été très utile pour mener à terme ce travail, pour ses grandes qualités pédagogiques.*

Je tiens à remercier tous les membres du jury qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps à examiner ce travail. Tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant ces années d'études. Enfin, plus que tous, Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

A decorative border with floral motifs and leaves, framing the text. The border is composed of a central horizontal line with floral elements at the ends, and vertical lines with floral elements at the corners and midpoints.

Dédicace

Je dédie ce travail :

*À toutes les personnes qui m'ont soutenu dans la phase de ma
carrière universitaire.*

À tous les gens qui m'ont aidé.

A toute la famille.

A Tout mes chères amies.

*A tous mes enseignants durant mon cycle d'étude
universitaire.*

A mes merveilleux collègues de promotion de génie civil.

Sommaire

Résumé	X
Abstract	XI
ملخص.....	XII
Introduction générale.....	XIII
I.1.Introduction.....	1
I.2. Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages en béton armé.1	
I.2.1.Dégradations mécaniques.....	2
I.2.2. Dégradations Chimiques	2
I.2.2.1. Réactions Alcalis-Granulats (RAG)	2
I.2.2.2. Attaques Sulfatiques.....	3
I.2.2.3. Attaques Acides	4
I.2.3. Dégradations Physiques	5
I.2.3.1. Sels de déverglaçage.....	5
I.3.Types de risque des pathologies	6
I.3.1. Les pathologies à risque élevé.....	6
I.3.1.1. La carbonatation	6
I.3.1.2. La corrosion	7
I.3.1.3. La Fissure.....	11
I.3.2. Pathologies à risque moyen	12
I.3.2.1. Faiénçage	12
I.3.2.2. Epaufrure	12
I.3.2.3.Lichen.....	13
I.3.2.4. Le ressuage.....	13
I.4. Conclusion.....	14
II.1. Introduction.....	16

<i>II.2. Méthodes et technique de réhabilitation.....</i>	<i>16</i>
<i>II.2.1. Méthodes non-structurelles.....</i>	<i>17</i>
<i>II.2.1.1.Préparation de surface de béton.....</i>	<i>17</i>
<i>II.2.1.2. Protection des aciers.....</i>	<i>18</i>
<i>II.2.1.3. Réparation du béton dégradé par apports de matériaux.....</i>	<i>19</i>
<i>II.2.2. Méthodes structurelles.....</i>	<i>22</i>
<i>II.2.2.1. Réparation par béton projeté.....</i>	<i>22</i>
<i>II.2.2.2. Réparation par adjonction d'armature complémentaire.....</i>	<i>23</i>
<i>II.2.2.3. Réparation par précontrainte additionnelle.....</i>	<i>24</i>
<i>II.2.2.4. Renforcement par collage de plats métalliques.....</i>	<i>25</i>
<i>II.3. Réparation et renforcement par collage des matériaux composites.....</i>	<i>26</i>
<i>II.3.1. Utilisation des matériaux composites dans le génie civil.....</i>	<i>26</i>
<i>II.3.2. Choix des matériaux.....</i>	<i>27</i>
<i>II.3.3. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé.....</i>	<i>28</i>
<i>II.4. Conclusion.....</i>	<i>30</i>
<i>III.1. Introduction.....</i>	<i>31</i>
<i>III.2. Présentation générale des matériaux composites sandwich.....</i>	<i>31</i>
<i>III.3 Présentation des structures composites sandwiches en nid d'abeilles.....</i>	<i>35</i>
<i>III.3.1 Définition d'une plaque sandwich en nid d'abeilles.....</i>	<i>35</i>
<i>III.3.2. Historique du nid d'abeilles.....</i>	<i>36</i>
<i>III.3.3. Fabrication du nid d'abeilles.....</i>	<i>37</i>
<i>III.3.4.Géométrie d'une cellule de nid d'abeilles.....</i>	<i>39</i>
<i>III.3.5. Domaines d'application.....</i>	<i>40</i>
<i>III.4. Conclusion.....</i>	<i>42</i>
<i>IV.1. Introduction.....</i>	<i>46</i>
<i>IV.2. La formulation mathématique.....</i>	<i>47</i>

IV.3. Présentation du modèle proposé.....56

IV.4. Validation du modèle.....58

IV.5. Etude paramétrique.....59

IV.5.2 Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive ta60

IV.5.3. Effet de la rigidité de la colle E_a 62

IV.5.4. Effet de la hauteur de la poutre t_1 63

IV.5.5. Effet de la rigidité de la poutre EI64

IV.5.6. Effet de taux d'humidité RH65

IV.5.7. Effet de la caractéristique du béton f_{cm} 66

IV.6. Conclusion67

Conclusion générale69

Référence bibliographique

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Paramètres géométriques d'une cellule en nid d'abeilles.....40

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques et propriétés des matériaux utilisés.58

Liste des figures

<i>Figure I.1 : réactions alcalis-granulats.</i>	3
<i>Figure I.2: Attaques sulfatiques à une poutre en béton.</i>	4
<i>Figure I.3: Attaques acides à une carotte au béton.</i>	4
<i>Figure I.4: dégradation due aux sels de déverglaçage</i>	5
<i>Figure I.5: phénomène de la carbonatation.</i>	6
<i>Figure I.6: Phénomène de corrosion à une structure en béton armé.</i>	7
<i>Figure I.7: Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé.</i>	11
<i>Figure I.8 : Fissure à une poutre en béton</i>	11
<i>Figure I.9: Phénomène de faïençage.</i>	12
<i>Figure I.10: Epaufrement dans une construction.</i>	12
<i>Figure I.11: Lichen sur une structure.</i>	13
<i>Figure I.12: Phénomène de ressuage à une surface en béton.</i>	14
<i>Figure II.1: Préparation de la surface par une élimination de la rouille et de béton vieux par brossage</i>	18
<i>Figure II.2: une application d'un mortier anticorrosion pour la protection des armatures.</i>	19
<i>Figure II.3: Ragrée d'un béton avec un mortier de réparation</i>	20
<i>Figure II.4: un ragréage mural extérieur</i>	21
<i>Figure II.5: Traitement d'une fissure mur en béton.</i>	21
<i>Figure II.6 : Une projection de béton à une surface.</i>	22
<i>Figure II.7 : Projection par voie sèche</i>	23
<i>Figure II.8 : Projection par voie mouillée.</i>	23
<i>Figure II.9: renforcement d'une poutre au moyen de béton projeté</i>	23
<i>Figure II.10 : renforcement d'une poutre par chemisage.</i>	24
<i>Figure II.11 : Une réparation par une précontrainte .additionnelle</i>	24

Figure II.12 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle.....	25
Figure II.13: renforcement d'une poutre au moyen de matériaux composites.....	26
Figure II.14: schéma d'un composite.	28
Figure II.15: Mise en œuvre d'une réparation par stratification.....	29
Figure III.1: Schéma du panneau sandwich.	32
Figure III.2: Matériaux pour les peaux.....	32
Figure III.3: Evolution de la masse et de la rigidité en flexion en fonction de l'épaisseur d'âme d'une structure sandwich	33
Figure III.4: Eléments constitutifs d'un sandwich à âme pleine.....	33
Figure III.5: Eléments constitutifs d'un panneau sandwich à âme creuse.....	34
Figure III 6: Matériaux pour les âmes.....	34
Figure III 7: Les constituants d'un sandwich.	35
Figure III 8: Matériau d'âme nid d'abeille en aramide - nomex.....	36
Figure III 9: L'âme en nid d'abeilles en aluminium légère.....	36
Figure III 10:. Procédé de fabrication de l'âme en nid d'abeilles par le processus d'expansion.....	38
Figure III 11: Procédé de fabrication de l'âme en nid d'abeilles par le processus d'ondulation.	38
Figure III.12: Géométrie d'une cellule en nid d'abeilles.	39
Figure III.13 : Systèmes de cordonnées d'un nid d'abeilles.....	40
Figure III.14 : Domaines d'utilisation des matériaux sandwichs en nid d'abeilles.	41
Figure IV.1 : schématisation des déformations dans le cas de la théorie classique des stratifiés.	47
Figure IV.2: Poutre en béton simplement appuyée renforcée par collage d'une plaque composite.	57
Figure IV.3 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par collage de composite.	57

Figure IV.4 : Evolution des contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par un composite de Nid D'abeille en fonction du temps.58

Figure IV.5 : Effet de la longueur a non renforcée sur les contraintes d'interface.60

*Figure IV.6 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive sur les contraintes d'interface
.....61*

Figure IV.7 : Effet de la rigidité de la colle sur les contraintes normales d'interface.62

Figure IV.8 : Effet de la hauteur de la poutre sur les contraintes d'interface.63

Figure IV.9 : Effet la rigidité de la poutre $E1$ sur les contraintes d'interface.64

Figure IV.10 : Effet de taux d'humidité sur les contraintes d'interface.65

Figure IV.11 : Effet de la caractéristique du béton f_{cm} sur les contraintes d'interface. ...66

Liste des notations

$[A'] = [A^{-1}]$	Inverse de la matrice de membrane $[A]$.
$[D'] = [D^{-1}]$	Inverse de la matrice de flexion $[D]$.
a	Distance entre l'appui et le bord de la plaque de renforcement.
B_1 et B_2	Constantes d'intégration.
C_1 et C_2	Constantes d'intégration.
ε_b	Composante de déformation du béton au niveau de l'interface.
ε_f	Composante de déformation de la plaque de renforcement au niveau de l'interface.
u_b	Déplacement longitudinal à l'interface béton –adhésif.
u_f	Déplacement horizontal à la surface supérieure de la plaque de renforcement.
V_T	Effort tranchant total.
$V(x)$	Effort tranchant.
E_b	Module d'élasticité tangent du béton.
I_b	Moment d'inertie de la poutre.
α	Coefficient de dilation thermique.
$\sigma_n(x)$	Contrainte normale.
$\tau(x)$	Contrainte de cisaillement.
X	Distance comptée à partir du bord de la plaque de renforcement.
T_b	Température.
t_a	Épaisseur de la couche d'adhésif.
t_b	Hauteur de la poutre.
t_{bc}	Temps initial de chargement.
t_{bt}	Durée du chargement de la poutre.
t_f	Épaisseur de la plaque de renforcement.
ν	Coefficient de poisson.

$\varphi(t, t_b)$	Coefficient du fluage correspondant aux déformations élastiques à l'instant t_b .
L	Longueur de la poutre.
L_p	Longueur de la plaque de renforcement.
f_{cm}	Résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours en N/mm^2 .
h_o	Rayon d'un élément en mm.
q	Charge répartie.
RH	Humidité relative de l'environnement en %.
ϕ_{RH}	Facteur dépendant de l'humidité relative.
$\beta(f_{cm})$	Facteur dépendant de la rigidité du béton.
$\beta(t_b)$	Facteur dépendant de l'âge du chargement.
β_{cb}	Facteur définissant le développement du fluage avec le temps.
β_{sb}	Facteur définissant le développement du retrait avec le temps.
β_H	Coefficient dépendant de l'humidité relative.
β_{RH}	Facteur prenant en compte l'effet de l'humidité relative sur le coefficient du retrait
β_{sc}	Coefficient dépendant du type du ciment utilisé.
χ	Coefficient de vieillissement dépendant du développement de la déformation dans le temps.

Résumé

La construction en sandwich à une très haute rigidité-poids et haute flexion rapport résistance –poids. En conséquences que les composants en sandwich d’atteindre les mêmes performances que les matériaux classiques de construction avec beaucoup moins de poids.

Le matériau composite Nid d’abeille est d’une grande –rigidité de faible poids, ne corrode pas, et possède la qualité d’une excellente caractéristique d’isolation thermique.

Le but de cette recherche est d’étudier le comportement mécanique d’une poutre en béton armé renforcée par collement d’un composite sandwich de Nid d’abeille a été déjà soumise au fluage.

Dans ce travail, les déformations de cisaillement et de flexion ont été incluses dans la présente analyse théorique. En supposant des contraintes de cisaillement et normale à travers l’épaisseur et de la rigidité de la poutre renforcée. Les effets du temps de chargement, l’effet de la rigidité de la colle et de l’humidité relative du milieu ambiant sur le fluage a été considéré. Un modèle proposé a été mené afin de montrer l’influence des différents paramètres gouvernants le comportement des contraintes d’interface.

Cette étude s’est avérée très utile pour la compréhension du comportement mécanique de l’interface.

Mots clés : renforcement, poutre en béton armé, matériau composite, sandwich, Nid d’abeille, contrainte d’interface, fluage.

Abstract

The sandwich construction has a very high stiffness-to-weight and high flexural strength-to-weight ratio. As a result, sandwich components achieve the same performance as conventional building materials with much less weight.

The honeycomb composite material is of high stiffness, low weight, does not corrode, and has the quality of an excellent thermal insulation characteristic.

The aim of this contribution is to study the mechanical behavior of a reinforced concrete beam reinforced by gluing of a honeycomb sandwich composite has already been subjected to creep.

In this work, shear and bending strains have been included in the present theoretical analysis. Assuming shear and normal stresses through the thickness and stiffness of the reinforced beam. The effects of loading time, the effect of adhesive stiffness and the relative humidity of the surrounding environment on creep were considered. A proposed model was carried out in order to show the influence of the various parameters governing the behavior of the interface constraints.

This study has proven to be very useful for understanding the mechanical behavior of the interface.

Keywords: reinforcement, reinforced concrete beam, composite material, sandwich, honeycomb, interface stress, creep.

ملخص

ان المواد المركبة على شكل هيكل يتم فيه تداخل طبقة من مادة واحدة اما ان تكون ممتلئة او تحتوي على تجويفات و بنية فراغية ذات شكل هندسي محدد ملتصقة بدورها بين طبقتين من مادة أخرى تكون تتميز بصلابة عالية جداً ونسبة عالية من القوة مقارنة إلى وزنها. نتيجة لذلك، يحقق هذا الهيكل من المادة المركبة أداء بنفس أداء مواد المركبة التقليدية على شكل صفيحة بوزن أقل بكثير.

المواد المركبة على شكل قرص خلايا النحل تكون ذات صلابة عالية، ووزن منخفض، ولا تتآكل، كما تتميز بخاصية عزل حراري ممتازة.

الهدف من هذه الدراسة هو المساهمة في فهم السلوك الميكانيكي لرافدة من الخرسانة المسلحة التي تم تقويتها بالصاق هيكل مركب ذات شكل سداسي يشابه خلايا النحل بواسطة مادة لاصقة خاصة في اسفل الرافدة و تتم هذه العملية على رافدة معرضة لتأثير التمدد المستمر مع مرور الوقت حيث تعمل هذه الطريقة على تعزيز و تقوية الرافدة..

في هذا العمل، تم تضمين تشوهات ناجمة عن جهود القص والانحناء في التحليل النظري. كما يتم اعتبار تأثير سمك وصلابة الرافدة المجهد. تم الأخذ بعين الاعتبار تأثير زمن التحميل مع تأثير التمدد وتأثير صلابة المادة اللاصقة والرطوبة النسبية للبيئة الخارجية المحيطة. تم تنفيذ نموذج مقترح لإظهار تأثير العوامل المختلفة التي تتحكم في سلوك الاجهادات المطبقة على الرافدة.

أثبتت هذه الدراسة أنها مفيدة جداً لفهم السلوك الميكانيكي لاجهادات الروافد التي يتم العمل على تقويتها.

الكلمات المفتاحية: التقوية، رافدة خرسانة مسلحة، المواد المركبة، هيكل، مركب خلية النحل، إجهاد الواجهة، التمدد.

Introduction générale

Au cours du temps, les structures existantes vieillissent qu'elles soient en béton, béton armé, béton pré et post contraint. L'un des problèmes majeurs dans le domaine de la construction est la dégradation des structures. La plupart des structures présentent des signes de faiblesse et ne répondent ou ne répondront plus aux exigences pour lesquelles elles ont été conçues. Les causes sont multiples, on peut citer : des erreurs lors de l'étude ou de l'exécution, un accroissement des charges, un changement de l'exploitation de la structure, la corrosion des armatures, des actions accidentelles telles que les séismes ou les chocs...L'apparition de ces problèmes ne laisse que deux solutions : la reconstruction ou la réparation.

Dans la plupart des cas les frais de la reconstruction sont beaucoup plus importants que la réparation ou le renforcement, ce qui fait que celles-ci seront plus appropriées. Le renforcement des structures en génie civil a pour but de réparer et de mettre en conformité des structures existantes, soit pour des raisons de pertes de propriétés initiales, pour des raisons de remise à niveau liées à de nouveaux règlements ou de nouveaux usages, soit pour des raisons esthétiques.

De nombreuses techniques ont été développées pour le renforcement des structures en béton armé, dans les années précédentes, la technique la plus utilisée était le collage de plaques d'un matériau non corrosif, plus léger et de haute résistance dans les parties les plus sollicitées; ces matériaux composites offrent une alternative préférable.

Cette utilisation de plaques en matériaux composites augmente les performances des éléments renforcés. Comparativement aux autres techniques de renforcements les plaques composites en sandwich présentent les avantages suivants : légèreté, haute résistance, facilité de mise en œuvre, absence de corrosion. La jonction béton - composite, assurée par une couche d'adhésif pose problème et ce vu la concentration des contraintes qui tendent à séparer les deux parties et provoquent la rupture du renforcement.

Dans de tels ouvrages, le décollement de la plaque de composite est un mode de rupture prédominant. Dans ce contexte, la présente étude est consacrée à la modélisation des contraintes d'interface (décollement) dans les poutres endommagées, en béton armé simplement appuyée et chargée en flexion, renforcées par des plaques en matériaux composites type nid d'abeille.

Les structures en nids d'abeille hexagonales sont très utilisées en raison de leurs multiples avantages dont le très bon rapport rigidité/poids, des mécanismes d'absorption de l'énergie utile pour l'emballage et la protection, ainsi qu'une grande résistance par rapport à leurs homologues pleins. Elles sont utilisées industriellement (panneaux, pylônes, matériaux de remplissage) mais sont aussi pour des structures de haute performances tels que les ailes d'avions civil et militaire. Ces structures sont aussi trouvées dans la nature sous la forme de matériaux cellulaires macro et micro (mousses, bois,.... etc). La mise en œuvre de nid d'abeille composite est très aisée. C'est un matériau facile à découper allongeant ainsi la durée de vie des outils, les panneaux sont insensibles à l'eau et à la plupart des solvants et garantissent aucun pourrissement et gonflement de l'âme en cas de perforation de la peau. Ils garantissent une pérennité des réalisations contrairement au contreplaqué.

Les recherches ont été réalisées depuis les dernières années sur le renforcement des structures par des matériaux composites. À travers ces études, plusieurs systèmes de renforcement ont été testés et ont su démontrer que leur utilisation était bénéfique pour procurer un gain de résistance en cisaillement lors de la réhabilitation de structures déficientes. L'objectif principal de cette recherche est d'étudier le comportement en cisaillement des poutres de béton armé renforcées à l'aide des panneaux sandwich en composite en nid d'abeille est permis de déterminer certains paramètres d'influence (l'effet de rigidité de la poutre renforcée, effet de temps de chargement, l'effet l'humidité relative...) qui régissent aujourd'hui les différentes normes internationales de calcul sur l'amorçage et propagation de décollements entre béton et composite, L'amorçage du décollement est analysé par rapport à la distribution des contraintes à l'interface entre la poutre et le composite nid d'abeille.

Pour rencontrer les objectifs, la méthodologie utilisée renferme une partie théorique et une partie expérimentale, comme suit :

La partie théorique met en évidence l'état des connaissances à ce jour sur les différentes méthodes de renforcement à l'aide de matériau composite utilisé dans ce mémoire.

La partie analytique, quant à elle, permet d'observer l'influence des différents paramètres de béton et de composite aux contraintes d'interfaces.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le chapitre 1 : présente une revue de littérature sur les différentes pathologies des structures en béton armé basant des poutres en béton armé.

Cette revue traite des différentes dégradations Chimiques et physiques de béton. Types de risque des pathologies nécessitent un renforcement de collage d'une plaque de composite à l'étude dans ce mémoire;

Le chapitre 2 : présente les différentes techniques de renforcement et réparation des ouvrages en béton armé aspects théoriques en lien avec le renforcement en cisaillement à l'aide de matériaux composites. Il traite (a) Méthodes non-structurelles et structurelles de renforcement. (b) Réparation et renforcement par collage des matériaux composites ;

Le chapitre 3 : est consacré à la généralité sur les matériaux composites sandwich. Ce chapitre décrit ce type de matériaux composites et donne une présentation aux structures composites sandwiches en nid d'abeilles ;

Le chapitre 4 : présente les résultats analytiques obtenus suite aux calculs et une étude paramétrique qui rend une analyse détaillée des valeurs obtenues et des comportements observés ;

Pour terminer, une conclusion résume et explique les points importants observés suite aux l'analyses des graphiques réalisés et présente des recommandations pour l'utilisation et le choix des composites de structure sandwich en Nid d'abeille de renfort à préconiser selon certains paramètres.

CHAPITRE I

Pathologies des structures en béton armé

I.1.Introduction

Les structures en béton armé sont souvent affaiblies par les pathologies qui les affectent durant leur vie, ceci est dû à l'environnement qui n'a pas été pris en considération. La pathologie qui affecte le béton, et surtout, ceux qui sont classées dangereuses seront la cause de son effondrement si elles sont ignorées.

Pour ne pas arriver à ce stade on doit freiner sa progression ou la neutraliser le plus vite possible en prenant les mesures nécessaires qui s'imposent.

Dans ce chapitre nous parlerons de ces pathologies; comment sont détectées et leurs causes d'y être.

Le diagnostic est l'étape essentielle dans le processus d'entretien de la structure en béton armé, c'est pour cela on a donné une grande importance à cette phase. Parce que un bon diagnostic nous amène à la décision adéquate pour que la pathologie si elle existait sera soignée et empêchée de se répandre dans l'élément et structure restera résistante et saine. Le diagnostic prend plusieurs formes et passe par des étapes essentielles et bien connues.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux principales pathologies apparaissant dans les structures en béton armé. Ces pathologies ont des causes et conséquences variables. Elles sont décrites dans ce qui suit : dégradations mécaniques, chimiques, est physiques.

I.2. Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages en béton armé

Les principales causes de dégradation des poutres en bétons armé proviennent des attaques physiques mécaniques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent aussi provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons. Les facteurs et origines des désordres et dégradations du béton (béton et/ou acier des armatures), et peuvent être liés à l'environnement de l'ouvrage .C'est l'environnement dans lequel va se trouver le béton frais ou le béton durci tout au long de sa durée de vie. La notion d'environnement englobe l'ambiance climatique et atmosphérique, ou le milieu extérieur particulièrement agressif dans lequel va se trouver l'ouvrage Concerne surtout le béton frais au cours de son durcissement et le béton durci. Ainsi, la durabilité et les propriétés du béton

peuvent être grandement affectées par: la température ambiante, l'hygrométrie ambiante (humide ou sèche) et les cycles du gel/dégel, surtout si le gel est sévère. **[[Michael G), 2011]**

Les agents atmosphériques chimiques comme le : CO₂ : (provoque la carbonatation), eau de pluie et embruns marins. Ces données climatiques et atmosphériques doivent être considérées lors de l'élaboration et de la mise en œuvre du béton, au risque d'avoir des dégradations préjudiciables pour la durabilité du béton, dont quelques exemples: des variations dimensionnelles et retraits excessifs, qui peuvent engendrer des fissurations pénalisantes pour la durabilité du béton, surtout si elles sont précoces, causés par de grands écarts de température, par une ambiance sèche ou par le vent, par des cycles de température, des cycles d'humidité relative... la fissuration interne du béton durci, causée par le gel sévère due au l'utilisation de sels de déverglaçage (écaillage du béton, corrosion de l'acier des armatures).dessiccation et arrêt d'hydratation du béton frais en surface (c'est-à-dire de la peau du béton), couche très importante dans la protection de l'acier des armatures et du cœur du béton des agressions externes. Cette dessiccation peut être causée par un environnement sec, par une élévation de température... accélération de certains processus chimiques de dégradation. **[[Michael G), 2011]**

1.2.1.Dégradations mécaniques

Ces désordres se manifestent fréquemment par l'apparition de fissures, éventuellement aggravées par une déformation inacceptable de la structure. Lorsque des contraintes brusques, comme un impact ou une explosion, provoquent une dislocation plus ou moins importante du béton, le lien entre les dégâts et leur cause est généralement évident. Avant de procéder à des réparations, on s'assurera toutefois que d'autres mécanismes de dégradation actifs ne doivent pas être traités au cours des travaux.

Des désordres résultant d'une faible surcharge permanente ou d'un tassement des appuis sont en effet plus lents à se manifester, notamment en raison du fluage du béton. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge éventuelle. **[(W .De Caluwé & M .Le Begge) ,2007]**

1.2.2. Dégradations Chimiques

1.2.2.1. Réactions Alcalis-Granulats (RAG)

La réaction alcalis-granulats (RAG) résulte d'une interaction entre les alcalis du béton (provenant du ciment, des additions, des adjuvants, ...) et des granulats potentiellement

réactifs (c'est-à-dire sensibles aux alcalis). C'est la raison pour laquelle on parle également de réaction alcalis-silice.

La RAG entraîne la formation de produits expansifs et notamment d'un gel d'alcalis-silice capable d'attirer l'eau et donc de gonfler. Il en résulte des contraintes de traction internes au béton qui conduisent à une fissuration de ce dernier et, parfois, à la rupture des armatures. Pour qu'une réaction alcalis-granulats se produise, les conditions suivantes doivent être réunies :

- Présence de granulats potentiellement réactifs.
- La réaction se produit seulement si la teneur en réactifs se situe à l'intérieur d'un domaine critique dont les limites dépendent de la composition minéralogique des constituants.
- Humidification permanente ou régulière de la structure teneur élevée du béton en alcalis.

En l'absence d'examen complémentaire, le risque est grand d'attribuer la dégradation, à tort, à un phénomène de corrosion. Dans certains cas, le béton prend une teinte ocre et l'on constate la disparition de lichens et de mousses présents au préalable le long des fissures. [(W. De Caluwé, M. Le Begge), 2007]



Figure I.1 : réactions alcalis-granulats. [(Anne-Charlotte G), 2014]

1.2.2.2. Attaques Sulfatiques

Les sulfates en provenance de l'environnement (terres, milieu aqueux) peuvent réagir avec le béton pour former de l'ettringite (sel de Candlot). Cette cristallisation s'accompagne d'une expansion très importante et peut se produire aussi bien durant la phase plastique du durcissement (ettringite primaire) qu'après le durcissement (ettringite secondaire).

Seule l'ettringite secondaire est préjudiciable au béton, les contraintes internes causées par l'expansion entraînant la fissuration et la ruine de la structure. Toutefois, même en l'absence de source extérieure de sulfates, un échauffement excessif du béton en cours de durcissement peut également donner lieu à la formation d'ettringite, notamment lors d'un traitement thermique (destiné à accélérer le développement de la résistance du béton) ou lors du dégagement de la chaleur d'hydratation dans le béton de masse.

En décalcifiant les composés primaires de la prise présents dans le ciment durci (C-S-H), les sulfates peuvent aussi altérer la résistance mécanique du béton et donc affecter la stabilité de l'ouvrage. [(W. De Caluwé , M. Le Begge) ,2007]



Figure I.2: Attaques sulfatiques à une poutre en béton. [(Itmaizeh E) ,2016]

1.2.2.3. Attaques Acides

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé).

Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures. [(Itmaizeh E) , 2016]



Figure I.3: Attaques acides à une carotte au béton. [(Dossiers du CSTC) ,2004]

1.2.3. Dégradations Physiques

Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage .Les mécanismes de dégradation du béton sont liés à l’alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel. Le risque de désordres est d’autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C’est le cas notamment des parties d’ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux saturées en sel. Une formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton peuvent amplifier les dégradations.

Ce phénomène est aggravé, en surface, par l’application des sels de déverglaçage (ou fondants routiers), qui engendrent un accroissement des gradients de concentrations en sels, générant ainsi des pressions osmotiques plus élevées. Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :

- Une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne ;
- Un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l’effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage. Un gradient thermique important au voisinage de la surface, générée par l’application des sels à titre curatif sur un film de glace, amplifie la dégradation de surface.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, elles peuvent affecter la durabilité de la structure et en particulier la pérennité architecturale des ouvrages. *[(Itmaizeh E), 2016]*

1.2.3.1. Sels de déverglaçage

Par ailleurs, les ions chlore des sels de déverglaçage peuvent engendrer un risque de corrosion pour les armatures. *[(W. De Caluwé & M. Le Begge), 2007]*



Figure 1.4: dégradation due aux sels de déverglaçage. [(Itmaizeh E), 2016]

I.3.Types de risque des pathologies

Dans ce qui suit nous allons voir les différents types de pathologies que nous avons classées en deux grandes catégories à savoir Les pathologies à risque élevé et à risque moyen. *[(Itmaïzeh E), 2016]*

1.3.1. Les pathologies à risque élevé

1.3.1.1. La carbonatation

La carbonatation du béton est un phénomène indissociable de ce matériau de construction. Pendant la durée de vie de l'ouvrage, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau.

Le dioxyde de carbone peut alors réagir avec les produits résultant de l'hydratation du ciment. La carbonatation modifie progressivement la composition chimique et la microstructure interne du béton. Durant la vie de l'ouvrage, le béton piège ainsi du dioxyde de carbone à hauteur de 10 à 15 % du CO₂ émis lors de la décarbonatation du calcaire nécessaire à la fabrication du ciment.

Les ingénieurs ont, au cours du XX^e siècle, appris à maîtriser certaines conséquences problématiques du phénomène de carbonatation. À la fin de vie de l'ouvrage, la carbonatation peut, cette fois, être exploitée pour fixer du CO₂ dans la pâte de ciment durcie d'un béton de démolition. Des résultats récents montrent qu'il est alors possible de recevoir jusqu'à 50 à 60 % de CO₂ supplémentaire. Par ailleurs, cette carbonatation est particulièrement favorable à une amélioration de la qualité du granulats recyclés issu du béton de démolition, facilitant ainsi sa réutilisation. *[(Journées Techniques AFPC-AFREM),1997]*



Figure I.5: phénomène de la carbonatation. [(Dossiers du CSTC), 2007]

1.3.1.2. La corrosion

✚ Aspect physico-chimique de la corrosion

Avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée, parce qu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ($4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un pH élevé, de l'ordre de 13 qui permet d'assurer la protection de l'acier par passivation. Une telle protection disparaît si la teneur en chlorure dépasse un certain seuil ou si la profondeur de carbonatation dépasse l'enrobage. *[(Solutions béton),2013]*



Figure I.6: Phénomène de corrosion à une structure en béton armé. [(Per Loll),2017]

✚ Phases de la corrosion

La durée de vie d'un ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion des aciers est souvent décrite à travers les étapes suivantes:

- Phase d'initiation (ou d'incubation) : c'est le stade durant lequel les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou les chlorures (Cl^-), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton ;

- Phase de propagation : cette phase commence lorsque ces agents agressifs se trouvent à des concentrations fortes au niveau des armatures. Cette phase correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage. [(*Solutions béton*),2013]

Ainsi, pour décrire la corrosion des aciers dans les bétons, il convient de préciser, d'une part, la pénétration des agents agressifs dans le béton et, d'autre part, les conditions de dé passivation de ces armatures, puis la vitesse de dissolution du métal et la croissance de la rouille. L'observation de la dégradation d'un ouvrage en béton armé intervient souvent au cours de la phase de propagation, lorsque les destructions deviennent visibles, c'est-à-dire bien souvent tardivement. Il devient alors très lourd de réparer l'ouvrage et il convient donc de prévoir les effets à long terme de ces agressions. Cette prévision est fondée sur la définition des investigations à effectuer. Elle doit permettre en particulier d'ajuster une formulation adéquate du béton et de définir les paramètres d'exécution de l'ouvrage en fonction de son environnement. [(*Houmeur M et Lammari Y*),2018]

Formes de la corrosion

La dissolution (anodique) d'un métal se produit en des zones très variables et la localisation de celles-ci détermine l'aspect de la corrosion. Il en résulte que l'aspect d'un métal corrodé est de différents types :

- Corrosion généralisée : la corrosion a un aspect à peu près uniforme ; ce type a lieu si la zone de réaction cathodique est loin de celle de dissolution, ou si les zones cathodiques et anodiques sont très petites et à peu près régulièrement alternées;-
- Corrosion localisée : ce type de corrosion a lieu si les zones anodiques sont petites et se trouvent à des endroits fixes ; il apparaît alors de petites cuvettes ou piqûres de corrosion. Dans le cas où le matériau métallique a des constituants très différents, il peut apparaître une dissolution sélective mais ceci ne concerne pas les aciers placés dans le béton [(*Solutions béton*),2013]
- Corrosion sous contrainte : celle-ci est induite par l'action simultanée de la corrosion et d'une sollicitation mécanique .Si cette sollicitation est maintenue dans le temps, il s'agit de corrosion sous contrainte. Dans ce cas, une fissure peut se former, se développer au cours du temps et éventuellement provoquer la rupture du métal tendu. Si la sollicitation oscille, alors il s'agit de corrosion par fatigue. Dans ce cas aussi, des

fissures peuvent apparaître et se développer jusqu'à provoquer la rupture de l'élément sollicité mécaniquement. . [(*Houmeur M et Lammari Y*),2018]

✚ Facteurs influençant la corrosion des armatures

La corrosion dépend de plusieurs facteurs dont certains sont liés au milieu environnant et d'autres aux caractéristiques du béton. Une description des différents facteurs contribuant à la corrosion est présentée par [(*Raharinaivo et al*),1998]. On présente ci-dessous les facteurs prépondérants.

✚ Humidité relative

Les réactions de corrosion (dissolution métallique ou passivation) ne se produisent qu'en présence d'une solution qui est ici contenue dans les pores du béton durci. Cette solution peut s'évaporer puis rentrer dans le béton dans les zones proches de la surface. Par contre, a cœur (à une profondeur supérieure à 35 mm en général), le béton reste saturé d'eau. Par ailleurs, la composition de cette solution dépend fortement des agents qui ont pu entrer dans le béton et l'altérer. La pénétration des gaz est plus rapide si le béton n'est pas saturé de liquide. Ainsi l'humidité du béton influe de deux façons sur la corrosion ou la passivation des armatures. Lorsque l'humidité du béton est faible, la pénétration de certains gaz est facilitée ; par contre, la corrosion ne se produit qu'en présence de liquide. [(*Houmeur M et Lammari Y*), 2018].

✚ Enrobage

L'enrobage de béton autour des armatures a pour rôle principal d'assurer une transmission des forces par adhérence entre le béton et l'acier. En outre l'enrobage de béton protège les aciers de deux façons : par une protection physique, le béton constituant une barrière vis – à - vis des agents agressifs et par une protection chimique, grâce au pH élevé de la solution interstitielle du béton, lequel maintient stable la couche protectrice formée sur les aciers. [(*Houmeur M et Lammari Y*), 2018]

✚ Température

Les réactions chimiques sont accélérées avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, une élévation de température augmente la solubilité des gaz (oxygène, etc.) et des sels dans l'eau. [(*Houmeur M et Lammari Y*), 2018]

✚ Teneur en chlorure

Les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soit provenir du milieu environnant. Lorsque la teneur en chlorure atteint ou dépasse une valeur critique ou valeur seuil [(*Glass et al.*), 1997 ; (*Brime*), 2001;(*Petterson*), 1993], on dit qu'il y a dépassement de la couche protectrice de l'acier, l'enrobage ne peut plus protéger les armatures et la corrosion s'amorce si les quantités d'eau et d'oxygène sont suffisantes. [*Houmeur M et Lammari Y*), 2018]

Oxygène

L'oxygène dissous dans un liquide ou dans une phase aqueuse joue un rôle primordial dans la réaction, dite cathodique, de corrosion des aciers ($O_2 + 2H_2O + e^- \rightarrow 4OH^-$). Ainsi, plus la teneur en oxygène est élevée, plus grande est la vitesse de réaction de dissolution du métal.

Parallèlement, plus la teneur en oxygène est élevée, plus le potentiel mixte du métal se rapproche de la valeur correspondant à la réduction de l'oxygène. En d'autres termes, ce potentiel mixte se déplace vers les valeurs positives. [(*Houmeur M et Lammari Y*), 2018].

Agents agressifs autres que les chlorures

L'eau qui entoure le béton ou qui pénètre par intermittence dans celui-ci (pluie, etc.) peut contenir divers sels. Ceux-ci contribuent à la formation des produits de corrosion de l'acier enrobé. C'est ainsi, par exemple, que les sulfates réagissent comme les chlorures, au niveau qualitatif. Une rouille verte peut se former en l'absence d'oxygène. Celle-ci peut ensuite se transformer en produits classiques en relâchant des sulfates solubles. Mais, au niveau quantitatif, l'effet des sulfates reste négligeable. En pratique, sauf en cas de pollution d'origine industrielle, seuls les chlorures et le dioxyde de carbone sont les facteurs de dépassement des aciers dans le béton. [(*Houmeur M et Lammari Y*), 2018]

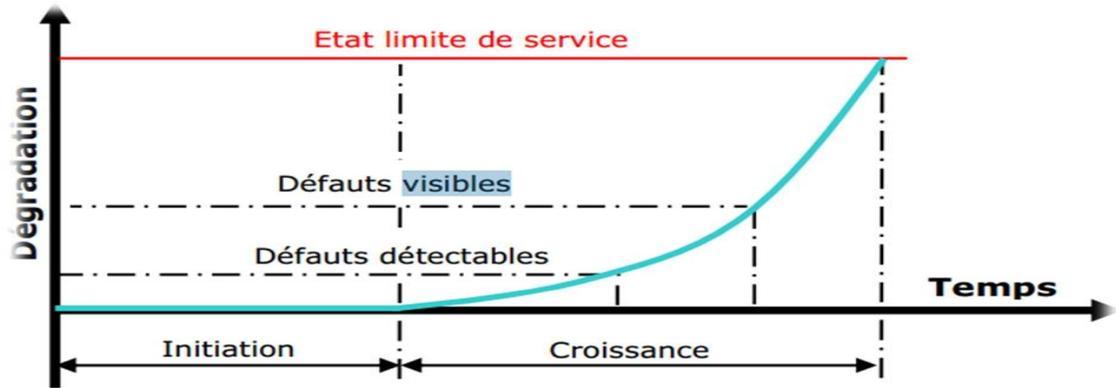


Figure I.7: Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé. [(Houmeur M et Lammari Y), 2018]

1.3.1.3. La Fissure

Fente visible affectant la surface d'une maçonnerie, d'un dallage, d'un appareil sanitaire, etc. Par convention, la fissure a entre 0.2 et 2mm de largeur; au-dessous il s'agit d'un faïençage ou d'un simple fil; au-dessus, la fissure est une lézarde.

Dans leur majorité, les fissures n'ont qu'un inconvénient esthétique: fissure de retrait, ou de mouvement différentiel à la jonction de deux matériaux.

Les fissures sont graves si elles portent atteinte à l'imperméabilité des parois (fissures Pénétrantes laissant passer l'eau de pluie à travers un mur exposé); plus graves encore sont les fissures traduisant un affaissement des fondations, ou des mouvements du sol. est important avant tout de souligner qu'il est impossible aujourd'hui d'éviter la fissuration du béton armé, que ce soit lors de la mise en œuvre, due par exemple au retrait de dessiccation ou sur le béton durci, dû au vieillissement du matériau. [(Nabila B), 2011]

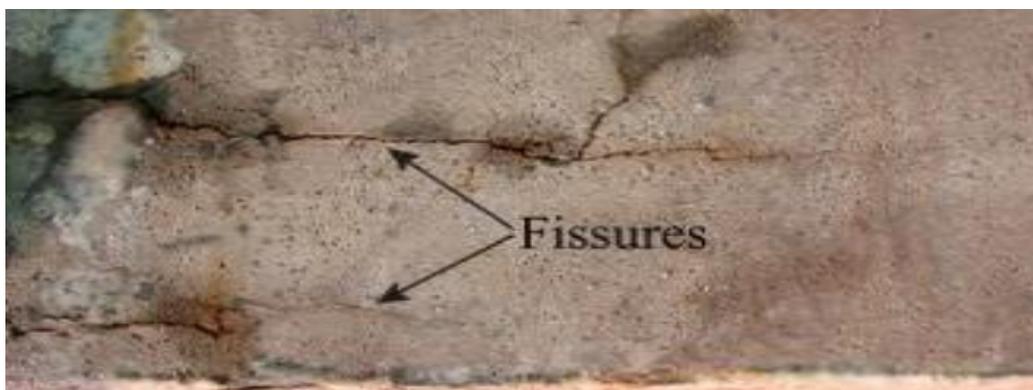


Figure I.8 : Fissure à une poutre en béton. [(Khobzi S), 2017]

1.3.2. Pathologies à risque moyen

1.3.2.1. Faiençage

Le phénomène de faiençage se manifeste à la surface du béton et affecte son apparence. Il est reconnaissable à la formation sur la dalle de fissures très minces, dont la dimension moyenne varie de 10 mm à 40 mm. Ces fissures se présentent en réseaux plus ou moins hexagonaux. Elles se développent rapidement, pouvant atteindre une profondeur de 3 mm, et apparaissent dans les jours suivant la finition du béton. Souvent, le faiençage est seulement visible lorsque la surface est mouillée et commence à sécher. Problème d'ordre esthétique, le faiençage affecte rarement la durabilité de la surface ou la résistance de la dalle de béton. **[(TECHNO BÉTON),2014]**



Figure I.9: Phénomène de faiençage. (Guide béton, 2020)

1.3.2.2. Epaufrure

Défaut de surface dû à un choc ou à des intempéries sur le parement ou l'arête d'un élément de béton durci ou d'un bloc de pierre, dans une construction. **[(Itmaizeh E,2016)]**



Figure I.10: Epaufrure dans une construction. [(Itmaizeh E,2016)]

1.3.2.3. Lichen

Lichen est un champignon qui grandit avec les algues et se propage sur la roche, des arbres, béton et autres surfaces solides pour créer une substance de la croûte comme. Lichen est plus fréquent dans les climats humides et à proximité des plans d'eau, comme les lacs, les rivières, les ruisseaux ou des étangs. Nettoyage lichen hors du béton peut être un défi, mais il est possible de supprimer certains articles de la quincaillerie jumelé avec un nettoyage agressif. *[(Itmaizeh E ,2016)].*



Figure I.11: Lichen sur une structure. [(Itmaizeh .E ,2016)]

1.3.2.4. Le ressuage

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.

Le ressuage est, avec la ségrégation, l'une des deux manifestations de la dégradation de l'homogénéité d'un béton frais. Dans le cas de la ségrégation, les grains présentent au cours du temps un mouvement relatif entre eux. Certains (les plus denses ou les plus volumineux) tombent alors que les autres (les fins ou ceux ayant une masse volumique réduite) remontent vers la surface. *[(Bétons hydrauliques).2002]*

Que le ressuage se présente sous sa forme normale ou localisée, une pellicule d'eau claire apparaît à la surface du matériau. Cette pellicule d'eau a, bien entendu, des conséquences sur la qualité du béton, qui peuvent être positives ou négatives selon la caractéristique considérée.

Dans une optique d'amélioration constante de la qualité des bétons, la connaissance des causes du ressuage ainsi que de ces effets est primordiale. [(*Bétons hydrauliques*).2002]



Figure I.12: Phénomène de ressuage à une surface en béton. [(DSG), 2016]

✚ Les raisons du ressuage des bétons

Pratiquement, tout béton fraîchement mis en place resse. Les bétons avec une teneur en eau élevée (rapport e/c) sont davantage sujets au ressuage que les bétons dont le rapport e/c est bas. Et plus le pourcentage de fines dans le béton est élevé, plus la tendance au ressuage diminue.

Pour que le béton puisse être aussi dense que possible, les particules fines du mélange doivent migrer dans les vides se trouvant entre les particules plus grosses, jusqu'à ce que ces vides soient remplis. Ce processus est déclenché par le malaxage, la vibration ou une autre méthode de compactage. [(*Bétons hydrauliques*). 2002]

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a fait la connaissance aux différents types de pathologies du béton qui est, dans la majorité des cas, la cause essentielle dans l'effondrement des structures. Nous avons tenté de mettre en évidence les principales causes de dégradation du béton. Comme on a vu les causes et les types (dangereuses et la moins dangereuses) de ces pathologies. Evidemment la dangereuse est prise en considération pour la neutraliser, par conséquent, la moins dangereuse, devient dangereuse, si elle n'est pas prise en compte pour des éventuelles réparations plus tard. Il existe de nombreux ouvrages qui en parlent ainsi que des sites internet sur lesquels on pourrait trouver de nombreuses informations sur les pathologies des structures en béton armé.

Chapitre II

*Les différentes techniques de
renforcement et réparation des
ouvrages en béton armé*

II.1. Introduction

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, des matériaux faibles utilisés, de sa réalisation ainsi que de diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de la réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondant à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres leurs évolutions. Augmenter faisant l'objet de structures dégradées endommagées ou faisant l'objet de défauts de conception ou d'éducation afin de prolonger leur durée d'utilisation.

La réparation ou le renforcement d'une structure ou des parties d'ouvrages en béton font appel à des techniques et procédures spécifiques qui nécessitent le recours à des entreprises spécialisées et à du personnel complémentaire.

Il est toujours plus simple et plus économique d'entretenir de manière préventive les ouvrages et donc de protéger un ouvrage d'une agression, d'anticiper des risques de désordres et des pathologies que d'en traiter les conséquences.

II.2. Méthodes et technique de réhabilitation

Généralement, les étapes clés pour la réhabilitation et le renforcement d'un ouvrage en béton sont : *[(les solutions techniques), 2011]*

- Auscultation et diagnostic précis de l'état de l'ouvrage (analyse des documents, observation visuelle).
- Mise en sécurité de l'ouvrage (si nécessaire).
- Détection, identification et constat des dégradations et de leurs causes (sondage tests, analyse en laboratoire, analyse situation et inspection visuelle).
- Estimation et pronostic de l'évaluation des dégradations (observations, modèles prédictifs).
- Détermination des objectifs de la réparation ou du renforcement.

- Sélection des méthodes et techniques les mieux adaptées.
- Mise en point du cahier des charges du projet de réparation ou de renforcement.
- Réhabilitation des travaux.
- Contrôle et réception des travaux.
- Suivi de l'efficacité de la réparation ou du renforcement, gestion surveillance et maintenance de l'ouvrage.

II.2.1. Méthodes non-structurelles

II.2.1.1. Préparation de surface de béton

Un substrat de béton doit être correctement préparé avant la mise en place d'un matériau de réparation, et ce afin de réaliser une réparation réussie qui rencontre la durée de vie de service attendue. *[(Rapport technique), 2017]*

✚ Méthodes de démolition du béton existant

Les méthodes de démolition utilisées pour une réparation donnée jouent un rôle majeur dans la réussite globale de la réparation et par conséquent dans la durée de vie de service de la structure ou de l'élément à réparer. Alors que certains matériaux appliqués sur un substrat de béton requièrent seulement un léger traitement de surface, les bétons de réparation demandent l'utilisation de méthodes de démolition plus agressives et une surface beaucoup plus rugueuse pour assurer une adhérence adéquate entre le béton de réparation et le substrat à réparer. L'adhérence entre le matériau de réparation et le substrat est cruciale pour une réparation réussie et durable. Afin d'obtenir une bonne rugosité de surface favorisant l'adhérence entre le béton de réparation et le substrat, avant la mise en place des Produits de construction comme matériaux de réparation. *[(Rapport technique), 2017].*

✚ Préparation de surface

Il est toujours recommandé de délimiter les surfaces de béton à réparer en choisissant un patron qui minimise les formes irrégulières et les angles afin de réduire le potentiel de fissures. Un patron de réparation utilisant des angles à 90° simplifie les opérations de découpage au trait de scie et limite les points de concentration de contrainte qui augmentent les risques de fissuration. En suivant le plan et le patron des zones à réparer, tout béton détaché ou délaminé doit être enlevé de la surface, en laissant un espace minimum de 25 mm (1 po) en arrière des barres d'armatures d'acier. Le périmètre de la réparation doit être découpé au trait de scie à une profondeur minimum de 6 mm (1/4 po) pour les réparations

superficielles utilisant un mortier de réparation (6 mm à 50 mm ou 1/4 po à 2 po), ou bien à un minimum de 20 mm (3/4 po) pour des réparations plus profondes utilisant du béton (38 mm ou 1/2 po jusqu'à la pleine épaisseur). *[(Rapport technique), 2017]*



Figure II.1: Préparation de la surface par une élimination de la rouille et de béton vieux par brosseage [(Weber), 2018]

II.2.1.2. Protection des aciers

La durabilité des constructions en béton armé dépend essentiellement de la tenue à la corrosion des armatures de celui-ci. Cette corrosion est actuellement suffisamment connue et maîtrisable et les connaissances acquises dans ce domaine, pour protéger ou réparer les structures. En cas d'apparition de la corrosion, il existe aujourd'hui plusieurs solutions de réhabilitation : *[J MAI-NHU, 2015]*

- La réparation traditionnelle qui consiste en la restauration du béton endommagé non adhérent, à son renforcement structural et à la restauration de la passivité par utilisation de mortier de réparation. La norme *NF EN 1504-3* définit les exigences d'identification, de performance et la sécurité des produits et systèmes utilisés pour la réparation structurale et la réparation non-structurale des structures en béton ;
- Les réparations électrochimiques de type déchloruration, protection cathodique ou ré alcalinisation d'armatures en acier inoxydable.
- Les autres méthodes de réparations telles que l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion ou le remplacement des aciers au carbone par des aciers galvanisés ou des aciers inoxydables. Normes. Des risques de corrosion des armatures dans le cas des bétons armés ou précontraints.

Le dioxyde de carbone pénètre dans le réseau poreux du béton 10 000 fois plus rapidement par l'intermédiaire de la phase gazeuse que par l'intermédiaire de la phase liquide. Selon l'état de saturation du béton, le dioxyde de carbone pourra donc pénétrer plus facilement à travers les pores du béton. [J MAI-NHU, 2015]



Figure II.2: une application d'un mortier anticorrosion pour la protection des armatures. [(Mapefer), 2005]

Des solutions préventives complémentaires existent également pour renforcer la durabilité des structures en béton. L'optimisation de la compacité du béton permet d'atteindre des performances élevées vis-à-vis des risques de corrosion. D'après le retour d'expérience, les méthodes de réparation traditionnelles peuvent conduire à un éclatement du béton environnant cinq à dix années après la réhabilitation. Un traitement de déchloruration par courant imposée de quelques semaines permettrait d'obtenir une extension de la durée de vie des ouvrages d'environ dix ans, voire beaucoup plus si la méthode permet la repassivation de l'acier [ANT 09]. D'un point de vue économique, la réhabilitation par utilisation d'inhibiteur de corrosion présente l'intérêt d'être une technique moins coûteuse que les réparations électrochimiques. Leur intérêt technique fait l'objet du présent rapport. [J MAI-NHU, 2015]

II.2.1.3. Réparation du béton dégradé par apports de matériaux

✚Ragréage des bétons

Après décoffrage, selon le soin apporté, le béton présente des petits défauts de surface : bullage, zones rugueuses, défauts de planéité. Avant d'appliquer une peinture, un enduit ou un revêtement, à l'intérieur ou à l'extérieur, il faut retrouver une surface uniforme et sans défaut en procédant à un ragréage des zones irrégulières avec des produits en pâte ou en poudre [G-Sika ,2020]



Figure II.3: Ragréage d'un béton avec un mortier de réparation. [(WATCO Fr) ,2014]

Le ragréage consiste en l'application d'une couche d'enduit permettant de corriger l'aspect d'une dalle de béton ou d'une chape de mortier de plus d'un mois, quel que soit son type : parking, allée de jardin, dalle d'abri de jardin, terrasse, balcon, toit terrasse... Le sol est nivelé : il retrouve sa linéarité et est sans imperfections. Cette opération s'effectue généralement par application d'un produit autolissant (ou autonivelant), sur une surface de béton peu abîmée. Le ragréage peut également se traduire par le coulage d'une chape de béton, dans le cas d'imperfections trop nombreuses ou trop profondes. Enfin, le ragréage peut être réalisé en intérieur comme en extérieur en sélectionnant un produit adapté (la composition de ces derniers varie du fait des caractéristiques de l'environnement). *[Amandine M , plateforme de commercialisation de béton]*

✚ Ragréage extérieur

Il existe trois catégories de produits de ragréage : il y a tout d'abord les systèmes d'enduit de lissage qui sont composés d'un primaire d'adhérence et d'un produit en poudre qui sera délayé. Il y a ensuite les produits bicomposants faits d'une poudre et d'une résine liquide à mélanger avec de l'eau. Enfin, il existe les produits monocomposants qui, eux, sont faits d'une seule poudre qui se dilue dans l'eau. Le ragréage peut également s'effectuer sur du parquet ou du carrelage. *[Fitura Science ,2020]*



Figure II.4: un ragréage mural extérieur. [(Mapefer), 2014]

✚ Traitement des fissures

Les fissures dans le béton peuvent entraîner des filtrations d'eau et d'éventuelles dégradations structurelles ; il faut donc les traiter. Ces fissures ou lézardes se classent selon la stabilité dimensionnelle ; de sorte que si elles sont stabilisées, on dira que ce sont des fissures passives et, par contre, si elles continuent d'évoluer, on dira que ce sont des fissures actives. Il faut d'abord évaluer le type de fissure que l'on va traiter [*Traitement de fissures, 2018*]:

- **Fissures passives ou internes** : ce sont celles qui ne sont soumises à aucun type d'évolution.
- **Fissures actives** : ce sont celles qui continuent d'être affectées par une évolution quelconque. Pour connaître le type et l'évolution, on se servira d'un témoin de plâtre sur la fissure. Lorsque ce témoin se fracture, on conclura qu'il s'agit d'une fissure active.



Figure II.5: Traitement d'une fissure mur en béton. [(A.bricoleur), 2016]

Les traitements sont alors effectués en surface pour rétablir l'étanchéité ou en masse pour reconstituer le monolithisme de la structure en assurant un remplissage complet de la fissure.

Le matériau introduit est de caractéristiques élevées et doit être adhérent afin de redonner à la structure sa capacité de fonctionnement initiale, la technique utilisée est celle de l'injection. *[Traitement de fissures, 2018]*

II.2.2. Méthodes structurelles

II.2.2.1. Réparation par béton projeté

La projection est une technique de mise en place des matériaux de construction et principalement des mortiers et des bétons qui consiste à malaxer, homogénéiser, transporter et à projeter plus ou moins violemment les matériaux sur les supports à revêtir. *[RECOS-STRRES N°18]*



Figure II.6 : Une projection de béton à une surface. [(ECOBATIS), 2018]

✚ Projection par voie sèche

Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateur de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur puis propulsé par de l'air comprimé vers la lance de projection. Cette lance est associée à une lance de projection d'eau (et éventuellement d'accélérateur de prise sous forme liquide. *[(Solutions béton), 2011]*

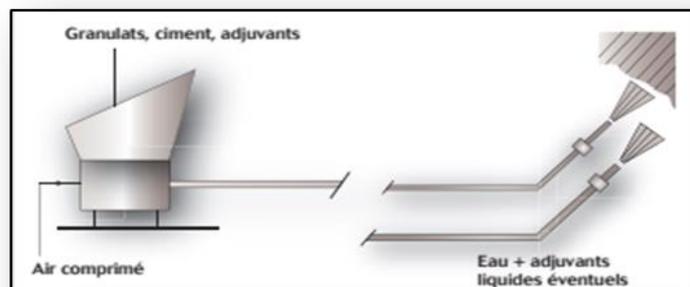
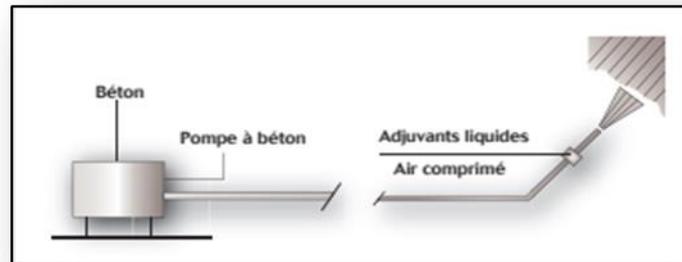
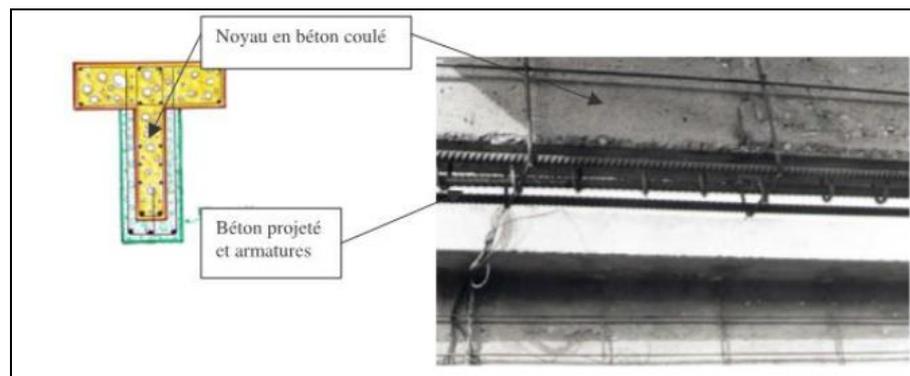


Figure II.7 : Projection par voie sèche [(Solutions béton), 2011]✚ *Projection par voie mouillée*

Le mélange comprenant l'eau est stocké après malaxage dans une trémie. Il est ensuite pompé jusqu'à la lance de projection et projeté grâce à l'air comprimé. [(Solutions béton), 2011]

*Figure II.8 : Projection par voie mouillée. [(Solutions béton), 2011]*✚ *Intérêt de la technique*

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur qui épousent le support et y adhèrent parfaitement. Elle est utilisée en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcements de structures...). [(Solutions béton), 2011]

*Figure II.9: renforcement d'une poutre au moyen de béton projeté. [(BOUKHEZAR), 2009]**II.2.2.2. Réparation par adjonction d'armature complémentaire*

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, soudure, ou des systèmes explicite de fixation (cheville, tiges collées, boulonnage), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs

d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celles-ci devront être effectuées, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée. *[(BOUKHEZAR), 2009]*

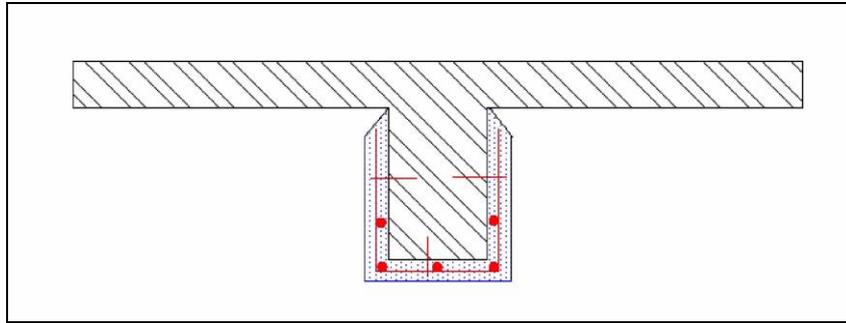


Figure II.10 : renforcement d'une poutre par chemisage. [(M BOUKHEZAR), 2009]

II.2.2.3. Réparation par précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation. Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compression, recomprimer les zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées. *[(Ouvrages d'art), 2011]*



Figure II.11 : Une réparation par une précontrainte .additionnelle [(Colloque Le Pont), 2017]

La technique de Réparation par précontrainte additionnelle permet : *[(Ouvrages d'art), 2011]*

- Soit d'améliorer la pérennité des ouvrages ;

- Soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement de prise en compte de lois de fluage mal adaptées) ;
- Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages (augmentation des charges ou des trafics, modification des fonctionnalités, passage de tramways ou de convois exceptionnels). Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint.

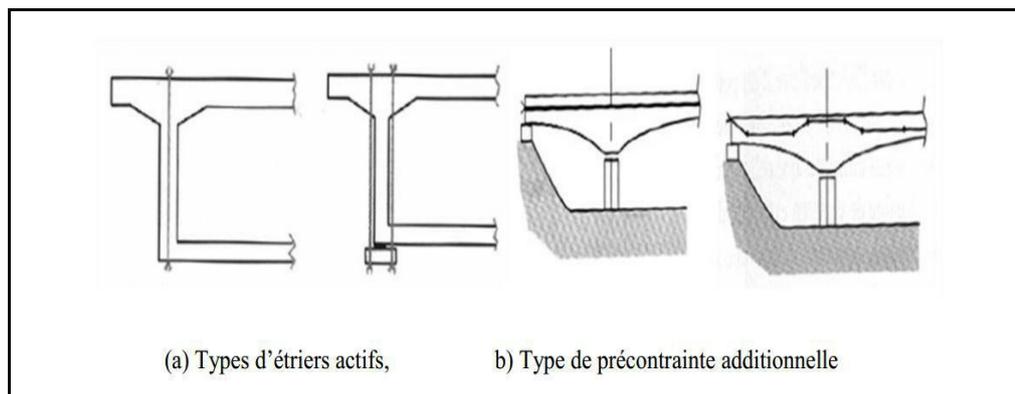


Figure II.12 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [Ait Ameur Meziane.M.2008]

II.2.2.4. Renforcement par collage de plats métalliques

Ce type de renforcement consiste à pallier les insuffisances locales ou globales des structures en béton par des tôles d'acier, collées en surface du béton. Cette surface de béton doit subir avant tout, une préparation soignée ayant pour objet d'éliminer de la surface toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible.

La technique des tôles collées très vite répandue dans le domaine du génie civil où dans bien des cas, elle a permis soit d'accroître la capacité portante d'une structure, présentant des insuffisances de résistance. L'utilisation de ce type de renforcement devrait voir son emploi augmenté avec des recherches menés sur d'autres matériaux nouveaux pour remplacer l'acier. *[(BOUKHEZAR) ,2009].*

II.3. Réparation et renforcement par collage des matériaux composites

Le risque de rupture d'un assemblage collé est toujours très difficile à évaluer. Dans le domaine de génie civil, un certain nombre d'ouvrage en béton armé renforcés par collage ont fait l'objet d'observations qui ne permettent pas a priori de définir la durée de vie du collage. *[T.Chaussadent, J.Luc Clément]*

Les fibres utilisées généralement dans le domaine du génie civil sont les fibres de carbone. Ces fibres sont obtenues par pyrolyse de fibres organiques, réticulées et orientées en atmosphère contrôlée. Elles s'utilisent essentiellement sous forme de matériaux composites pour conférer aux produits finis le meilleur des propriétés physiques, statiques et dynamiques. Ces matériaux présentent une contrainte de rupture très élevée pour une densité cinq fois moindre que celle de l'acier. Les composites issus de fibres de carbone bénéficient sans équivalent et de propriétés physiques très étendues. , Grande résistance en traction (avec haut module d'élasticité), Grande résistance à la fatigue. Légèreté, Grande résistance à l'usure, Absorption des vibrations et Grande résistance à la corrosion. *[(BOUKHEZAR), 2009].*



*Figure II.13: renforcement d'une poutre au moyen de matériaux composites.
[(BOUKHEZAR), 2009]*

II.3.1. Utilisation des matériaux composites dans le génie civil

Dans les années 60, le Professeur **L'HERMITE** procéda avec succès à des essais sur des poutrelles en béton non armé sur lesquelles étaient collées des plaques en acier ; les unes sur la face tendue pour la reprise des tractions dues à la flexion et les autres sur les faces latérales pour la reprise des cisaillements développés par l'effort tranchant. Dès le début des années 90, les matériaux composites collés ont rapidement remplacé les tôles minces acier collées. Malgré un prix de fourniture beaucoup plus élevé, l'utilisation de ces nouveaux matériaux a

été favorisée par leur plus grande facilité de mise en œuvre. Actuellement, les matériaux composites collés ont complètement supplanté les tôles collées. Les procédés de réparation ou de renforcement utilisent des fibres (de verre, de carbone ou d'aramide comme le Kevlar™) enrobées dans une matrice de polymères [*RECOS-STRRES N°17*]

Vus que les matériaux composites aient une grande flexibilité en s'adaptant aux formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés, et pour leur légèreté par rapport aux aciers, leur facilités de manutention, de transport et de mise en œuvre sur site, ainsi que leurs résistances mécaniques assez importantes que les autres moyens de renforcements. Ces multiples avantages, mécanique et physico-chimique permettent l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé, l'application de tissus ou lamelles en PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone) est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelles. C'est pour cette raison que le choix de renforcement à l'aide de matériaux composites (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) de l'élément à renforcer dont a fait l'objet de cette étude est jugé favorable. [(*BOUKHEZAR*), 2009].

- **Les matériaux composites sont utilisés pour :**

- Le renforcement de structures en bon état qui présentent une insuffisance :
 - De capacité portante vis-à-vis de nouvelles charges lors d'un changement d'affectation ou de modifications de la structure,
 - D'adaptations aux « normes actuelles » ;
- Le renforcement suite à des insuffisances liées aux règles de calculs utilisées à l'époque de la conception ;
- Les réparations structurales en complément de la réparation des désordres affectant les matériaux béton et armatures. [*RECOS-STRRES N°17*]

II.3.2. Choix des matériaux

Le type de matériau composite (plaque ou tissu) et la nature des fibres (verre, carbone) à utiliser vont dépendre au moins des six facteurs suivants :

- ✓ Les exigences du bureau d'études qui est chargé de dimensionner la réparation ou le renforcement. Ces exigences portent principalement sur la résistance (contrainte de rupture) et la déformabilité (module d'élasticité) du composite ;

- ✓ Les exigences relatives à la mise en œuvre, qui portent sur les conditions thermiques lors de l'encollage, la durée pratique d'utilisation de la colle (DPU) ;
- ✓ Les exigences sur la géométrie de la pièce (planéité, rayons de courbure) ;
- ✓ Les exigences de durabilité de la réparation et/ou du renforcement, qui portent sur les conditions d'environnement (en particulier thermiques) auxquelles peut être soumis le composite pendant la vie de l'ouvrage ;
- ✓ Les conditions de surveillance et d'entretien ;
- ✓ La prise en compte de la fatigue. [RECOs-STRRES N°17]

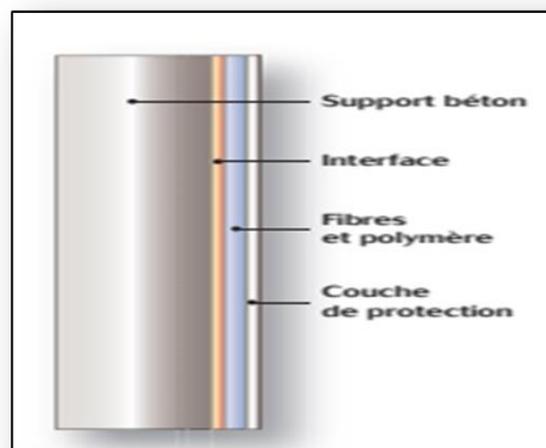


Figure II.14: schéma d'un composite. [(Solutions béton),2011]

II.3.3. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé

Les procédés de réparation ou de renforcement utilisent des fibres (de verre, de carbone ou d'aramide comme le Kevlar™) enrobées dans une matrice de polymères.

- Préparation du matériau composite

Les plans d'exécution doivent être basés sur un relevé de la géométrie de la structure à renforcer. Zones de collage sont implantées sur le support béton. Dans le cas de plaques, les plans donnent la longueur des différentes plaques. [RECOs-STRRES N°17]

- Préparation de l'adhésif

L'adhésif comporte deux composants (une base et un durcisseur) dont les pots doivent être entièrement vidés de leur contenu. La vitesse de rotation du malaxeur et la forme de l'hélice

doivent être adaptées pour permettre un mélange homogène et éviter l'inclusion d'air.
[RECOs-STRRES N°17]

- Mise en place

Les matériaux composites, compte tenu de la technicité nécessaire pour leur pose, doivent être mis en œuvre, soit directement par l'entreprise détentrice du système, soit par des entreprises autorisées par celle-ci. Il est souhaitable que le personnel ait suivi une formation pour cette activité qui nécessite précision, méthode, rigueur et propreté. [RECOs-STRRES N°17]



Figure II.15: Mise en œuvre d'une réparation par stratification. [Boulaziz.A.2014]

II.4. Conclusion

La réussite des travaux de réparation et de renforcement des ouvrages en béton nécessite un travail en commun d'experts et le respect de quelques principes clés de base. Les dégradations subies par les structures en béton armé sont liées dans tous les cas à la présence d'eau et, dans les environnements courants, à la corrosion des armatures, qui engendre gonflement de l'acier et épaufrures dans le béton. La prise en compte de l'environnement dans lequel l'ouvrage est construit est fondamentale, non seulement dans le cas de la construction neuve, mais aussi en situation de maintenance et de réparation. Le produit utilisé, en particulier pour la réparation des épaufrures, doit apporter une résistance supplémentaire par rapport à l'environnement extérieur, en même temps qu'une bonne compatibilité – essentiellement dimensionnelle – avec le support à réparer.

Chapitre III

Généralité sur les matériaux composites sandwich

III.1. Introduction

Les matériaux composites sont des matériaux qui répondent aux exigences de présenter des propriétés mécaniques élevées spécifiques à leur emploi, mais dont les masses volumiques soient faibles. En raison de leur faible densité, grande résistance, rigidité importante et de leur excellente durabilité. Parmi les matériaux composites les plus utilisés, on notera les matériaux sandwichs. Les structures sandwichs se distinguent des autres matériaux comme les métaux, les céramiques et les polymères par le fait qu'ils sont constitués :de deux semelles ou peaux, de faibles épaisseurs. Ces peaux sont constituées de matériaux à relativement haute résistance et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité.

Peaux et âmes sont séparables mécaniquement. On peut par conséquent modifier les propriétés de ces matériaux en variant les proportions de leurs constituants ou les propriétés des constituants eux- mêmes. Ces ajustements permettent donc d'atteindre les propriétés souhaitées pour répondre à des applications bien identifiées. L'usage des sandwichs se répand dans l'industrie du bâtiment, ce sont leurs excellentes caractéristiques d'isolation thermique qui sont prises en compte. Ces matériaux sandwichs peuvent être réalisés en éléments très divers : aluminium, acier, bois, plastique, résines renforcées de fibres organiques ou inorganiques (matériaux composites), ...pour les peaux ;

De nombreux paramètres structuraux influent sur le comportement mécanique de ces systèmes complexes : la nature des matériaux constitutifs (densité, propriétés mécaniques, propriétés physiques, propriétés chimiques), les séquences d'empilement et les épaisseurs relatives des différentes couches. Parmi les diverses familles de composites, on citera les matériaux composites qui résultent généralement de l'association de deux peaux et d'une âme.

III.2. Présentation générale des matériaux composites sandwich

Le sandwich se décompose en trois éléments fonctionnels (Figure III.1). Les peaux (revêtements) composites qui supportent les chargements de traction ou de compression appliqués aux sandwichs. Le matériau d'âme (cœur) collé aux peaux a pour fonction d'écarter les peaux et de transférer le cisaillement entre ces derniers. La liaison collée âme/peau doit supporter des tensions et transférer le cisaillement. [(Bruno Castanié), 2000].

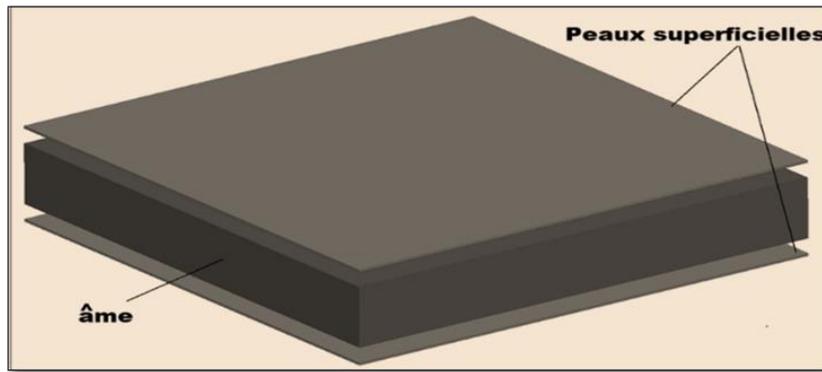


Figure III.1: Schéma du panneau sandwich. [Karthik R ,(2014)]

✚ Les peaux

Généralement planes, qui reprennent les efforts de flexion. Elles peuvent être de plusieurs natures : en métal, en stratifié, en bois (contreplaqué) ou encore en plaque thermoplastique. Le choix de la nature de la peau s'effectue principalement en fonction des performances mécaniques exigées. Mais en général, une rigidité élevée et une excellente résistance à la compression et à la tension sont les principales qualités recherchées [(Lachguer. A et Akyoud).2014].

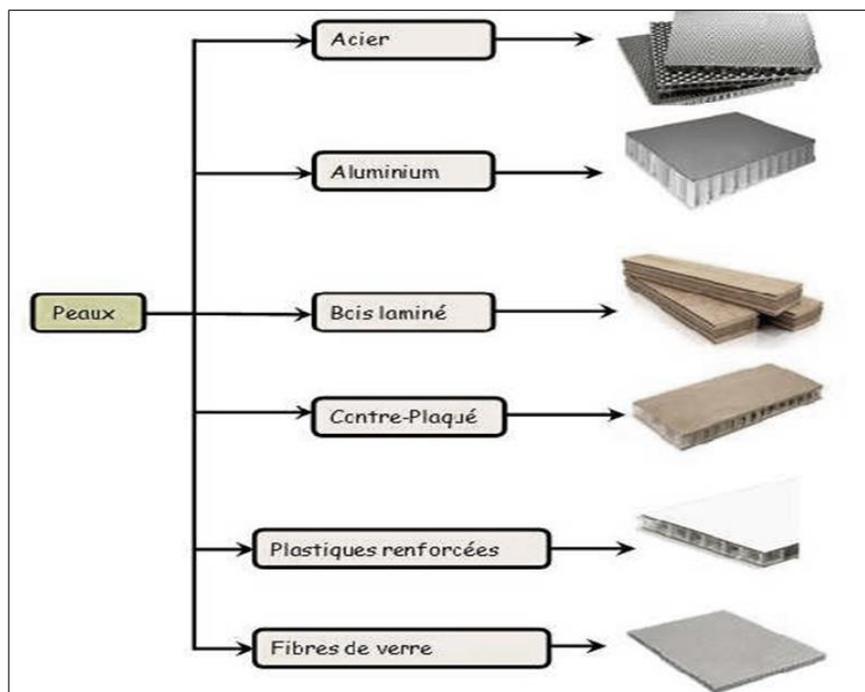


Figure III.2: Matériaux pour les peaux [Lachguer. A et Akyoud M, (2014)].

✚ L'âme:

C'est l'élément central d'une structure sandwich. Elle se caractérise par une faible masse et des faibles caractéristiques mécaniques. Son rôle principal est de supporter les efforts de

compression et de cisaillement engendrés suite au mouvement de glissement des peaux sous chargement, et de maintenir leur écartement. En effet, si l'épaisseur des panneaux n'est pas maintenue constante, il en résulte une diminution des capacités des peaux externes à résister à la flexion. L'épaisseur élevée de l'âme a pour but d'accroître le moment d'inertie du panneau sans augmenter la masse volumique. Comme le montre la figure, une structure sandwich d'épaisseur « $4.t$ » est 37 fois plus rigide que celle d'épaisseur « t », pour seulement une augmentation de 6% de son poids. Les types d'âmes les plus communs dans le secteur industriel sont : le bois de balsa, les nids d'abeilles et les mousses en polymères rigides. *[(AEROSPATIALE), 1986]*

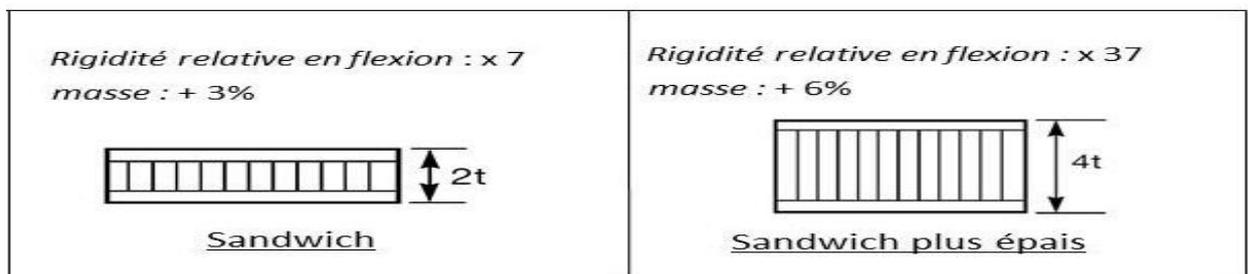


Figure III.3: Evolution de la masse et de la rigidité en flexion en fonction de l'épaisseur d'âme d'une structure sandwich [(Clément Audibert),2017]

Les types d'âmes les plus communs dans le secteur industriel sont : le bois de balsa, les nids d'abeilles et les mousses en polymères rigides *[(Mertani B - Med Bilel), 2011]*. L'âme se présente sous différentes formes (figures III.4, III.5)

- Âme plein, en mousses, bois...

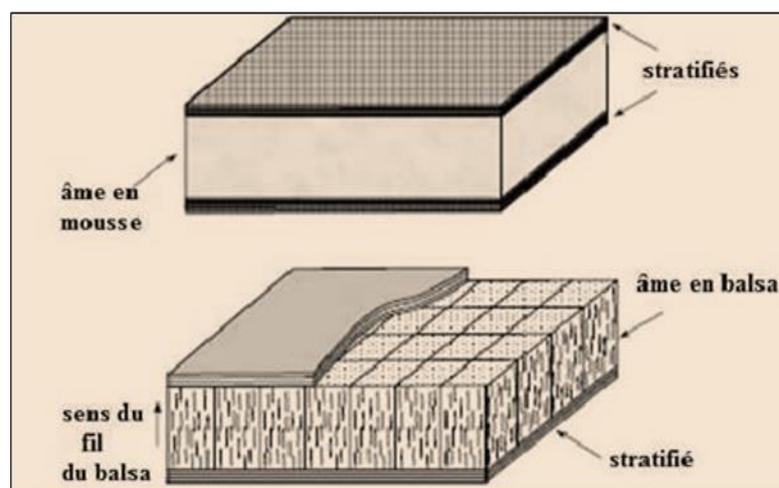


Figure III.4: Eléments constitutifs d'un sandwich à âme pleine [A. AIT SAID]

- Âme creuse

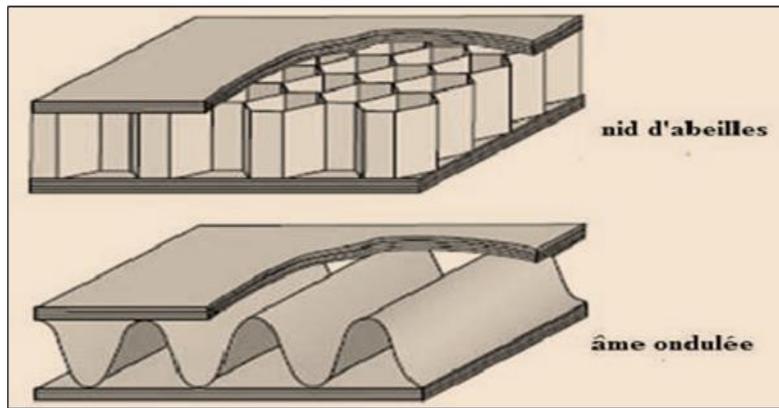


Figure III.5: Eléments constitutifs d'un panneau sandwich à âme creuse. [A. AIT SAID]

La figure (III.6) ci-dessous représente les matériaux de fabrication de ces types. Les structures sandwichs sont classées selon la nature de leurs âmes. Les âmes peuvent être classées en trois catégories principales, les mousses, les mousses renforcées et les parois minces.

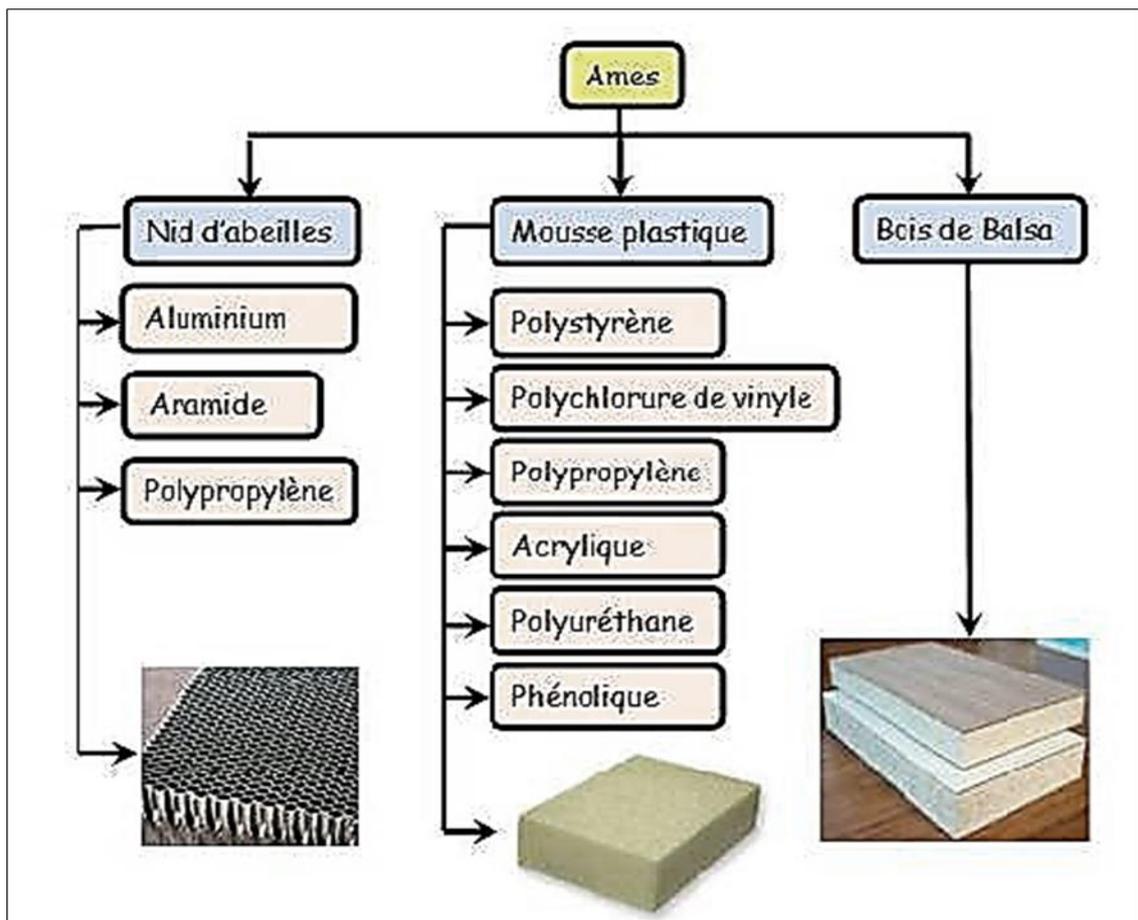


Figure III 6: Matériaux pour les âmes.[Lachguer. A et Akyoud, (2014)].

✚L'interface : (Adhésif)

Pour que les structures sandwich jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux, de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence. *[(Allen H. G), 1969]*

III.3 Présentation des structures composites sandwiches en nid d'abeilles

III.3.1 Définition d'une plaque sandwich en nid d'abeilles

Les structures nid d'abeilles, généralement appelées « NIDA », ont des âmes creuses employées pour la fabrication des matériaux sandwichs qui font partie de la grande famille des matériaux composites, (Figure III 7).

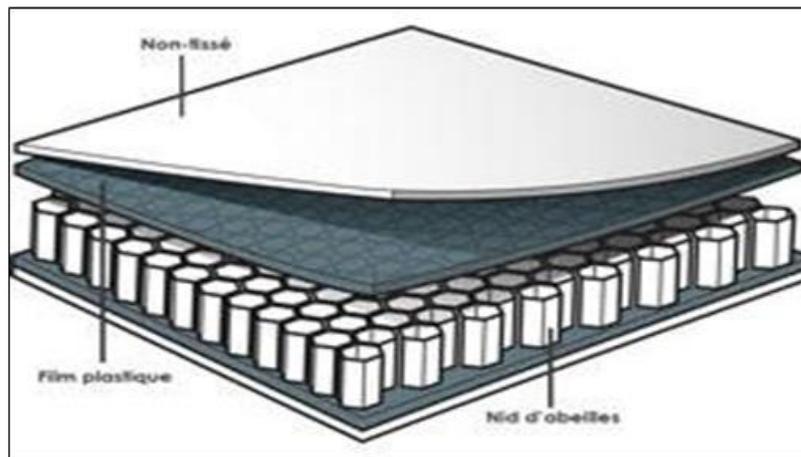


Figure III 7: Les constituants d'un sandwich. [(Nidaplast),2014]

Les structures en nid d'abeilles sont les matériaux d'âmes les plus utilisées dans les matériaux sandwichs destinés à la fabrication aéronautique. Ils se caractérisent par une géométrie alvéolaire, une faible densité et des parois fines ce qui implique une préparation minutieuse lors de leur utilisation. Les âmes en nid d'abeilles sont généralement fabriquées en métal, mais, l'utilisation du polymère et du composite est aussi courante. L'utilisation de ces matériaux a pour but l'allégement des structures sandwichs en bénéficiant de bonnes propriétés mécaniques. La nature du nid d'abeilles varie selon le domaine d'application. Il existe plusieurs gammes de nid d'abeilles et les plus utilisées sont les nids d'abeilles en aluminium et en Nomex. *[(R. Pinzelli), 1995].*

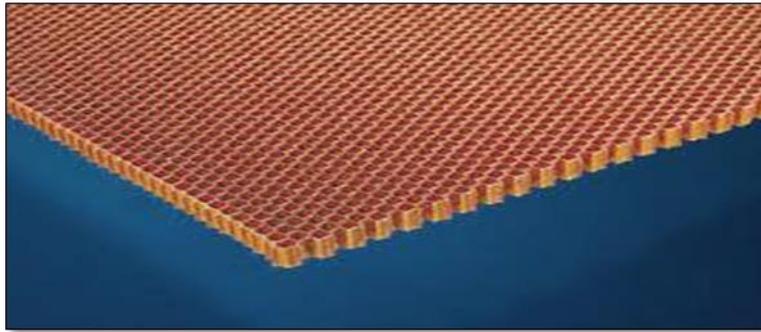


Figure III 8: Matériau d'âme nid d'abeille en aramide - nomex [(Plascore GmbH),2020]

Les alliages d'aluminium sont utilisés pour la conception des nids d'abeilles métalliques. La série 3003 des alliages d'aluminium est la variété destinée pour le domaine industriel. Par contre pour le domaine aéronautique, la série 5056 est la plus favorisée. D'autres nuances d'alliages d'aluminium sont également utilisées telles que les séries 2024 et 5052. Dans certains cas spécifiques, d'autres matériaux métalliques sont également utilisés pour former les nids d'abeilles, comme les aciers 17-7PH, PH15-7Mo, AM350, l'Inconel et les alliages de titane. [R. Pinzelli , 1995].

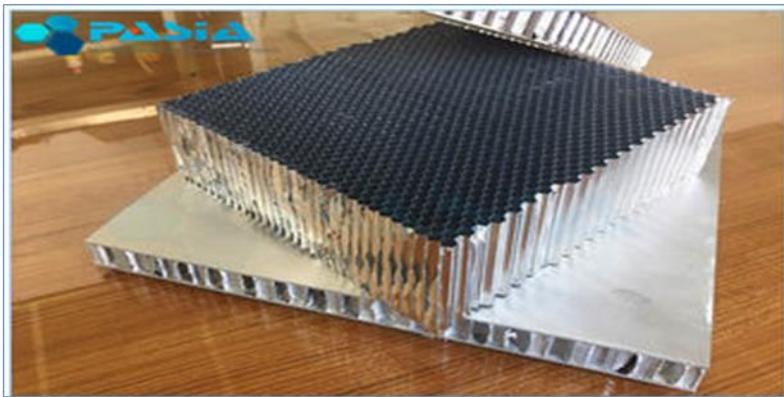


Figure III 9: L'âme en nid d'abeilles en aluminium légère. [Pasia, (2017)]

III.3.2. Historique du nid d'abeilles

Dans cette section, nous allons présenter l'historique du nid d'abeilles d'après. [(Tom Bitzer), 1997]. Le premier brevet d'âme en nid d'abeilles, couvrant un procédé de fabrication pour la production de papier kraft en nid d'abeilles, est probablement le celui de Budwig délivré en 1905 en Allemagne. L'une des premières structures sandwiches artificielles était un pont tubulaire de chemin de fer au pays de Galles construit en 1845. Il se composait d'un grand tube rectangulaire, dont le plancher soutient une voie ferrée, et à travers lequel circulent les trains. [(Minh Phuc HOANG), 2015].

En 1919, le premier panneau sandwich a été fabriqué en utilisant des parements minces en acajou liés à une âme de bois de balsa. Il a été utilisé comme structure primaire des pontons d'un hydravion. Plus tard, entre la première guerre mondiale et la seconde guerre mondiale, les peaux en contreplaqué collées à un noyau en bois de balsa ont été utilisées comme structure primaire des hydravions italiens. La fabrication de nids d'abeilles structurelles modernes a probablement commencé à la fin des années 1930, lorsque J.D. Lincoln a fabriqué le papier Kraft en nid d'abeilles pour une utilisation dans le mobilier construit par Lincoln Industries à Marion (Virginie, Etats Unis d'Amérique). *[(Minh Phuc HOANG), 2015].*

Les panneaux sandwichs se composaient de parements minces de bois liés à une tranche relativement épaisse de nid d'abeilles en papier. Durant la seconde guerre mondiale, le papier en nid d'abeilles a été utilisé par la Société Martin pour l'emballage des antennes de radar; mais l'âme formée de papier absorbait de l'humidité. Plus tard, Martin a développé un nid d'abeilles en tissu de toile de coton et produit ensuite les âmes alvéolaires en tissu de coton, en tissu de verre et en papier d'aluminium. Toujours à cette époque, la Société Havilland Air plane a conçu et construit le bombardier Mosquito, qui a utilisé des panneaux sandwichs dans certaines parties. *[(Minh Phuc HOANG), 2015].*

L'excellente performance affichée par cet avion a conduit à l'acceptation de nombreux concepteurs d'aéronefs, notamment en Angleterre, de la supériorité de base de la structure en sandwich comme un moyen de fabrication d'un avion performant plus efficace et plus avancé. En conséquence, beaucoup de groupes de conception d'avions ont commencé à rechercher la meilleure façon de faire des structures sandwichs et les meilleurs matériaux pour faire les âmes et les parements. Ce n'est qu'en 1945 que le premier panneau sandwich tout en aluminium a été produit. La véritable percée est venue avec le développement de meilleurs adhésifs pour la fixation des revêtements aux âmes. Certains adhésifs ont été mis au point pour avoir de bonnes propriétés rhéologiques pour l'utilisation sur les nids d'abeilles. *[(Minh Phuc HOANG), 2015]*

III.3.3. Fabrication du nid d'abeilles

Des structures comme le nid d'abeilles de la *peuvent être réalisées de quatre façons *[(Tom Bitzer), 1997]*: le collage, le soudage par résistance, le brasage, le soudage par diffusion et la fusion thermique. Ces méthodes sont basées sur la façon dont les nœuds sont attachés. La plus évidente est d'appuyer sur un matériau en feuille dans un profil demi-hexagonal et coller les plaques ondulées ensemble. De loin, le procédé de fabrication le plus

commun est la liaison adhésive : jusqu'à 95% des âmes en nid d'abeilles sont fabriquées de cette façon. Le soudage par résistance, le brasage ou le collage par diffusion ne sont utilisés que sur des âmes qui peuvent voir des températures élevées ou des conditions environnementales extrêmes. [(Minh Phuc HOANG), 2015].

Il existe deux techniques de base utilisées pour transformer la matière en feuille en nid d'abeilles : le processus d'expansion et le processus d'ondulation (Figure III 11). Le processus d'expansion est schématisé sur la Figure III 10. En général, la colle est posée en bandes parallèles sur des feuilles plates, et les feuilles sont empilées de sorte à les coller ensemble le long des bandes. L'empilage de feuilles est découpé à la dimension désirée et est ensuite étiré pour donner le nid d'abeilles. Pour les âmes métalliques, un revêtement résistant à la corrosion est appliqué sur les feuilles métalliques, et les lignes adhésives sont imprimées. Les feuilles sont coupées et empilées, et l'adhésif est durci sous pression à une température élevée. Ensuite, les tranches sont coupées à l'épaisseur requise puis étirées. [(Minh Phuc HOANG), 2015]

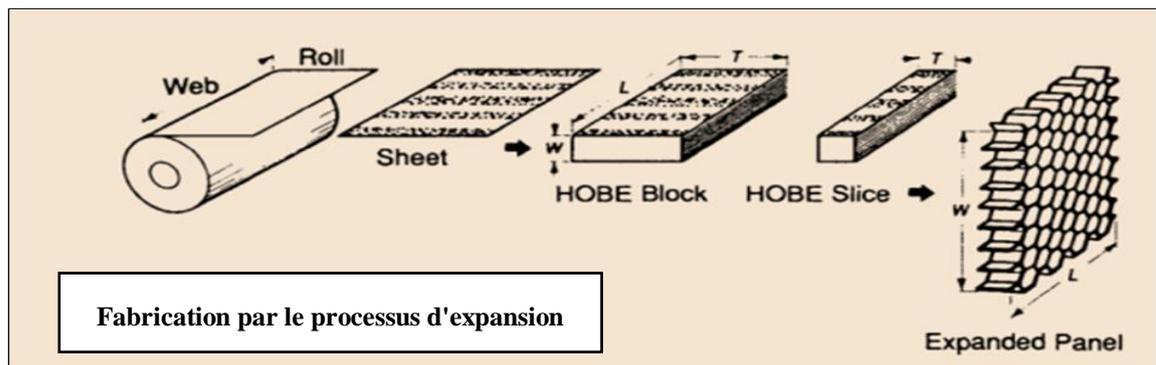


Figure III 10: Procédé de fabrication de l'âme en nid d'abeilles par le processus d'expansion. [(Minh Phuc HOANG), (2015)]

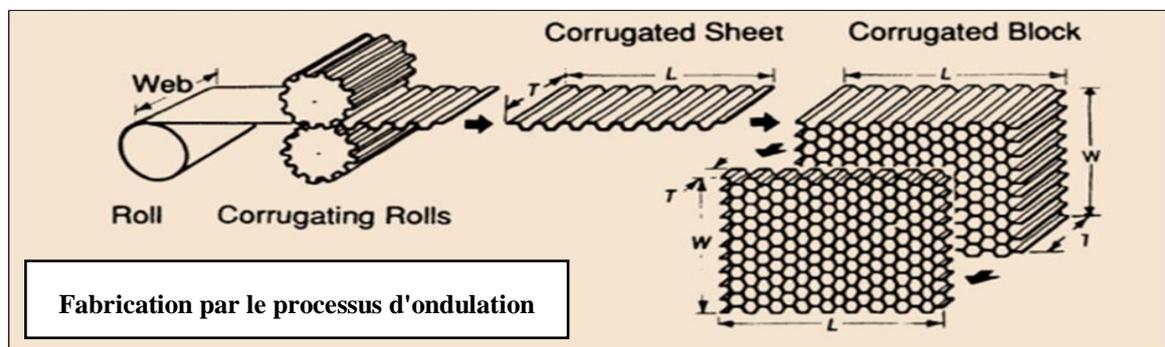


Figure III 11: Procédé de fabrication de l'âme en nid d'abeilles par le processus d'ondulation. [(Minh Phuc HOANG), (2015)]

Le processus d'ondulation, illustrée par la Figure III 11, est la technique d'origine utilisée pour fabriquer les âmes en nid d'abeilles. Cette méthode est encore utilisée pour la fabrication des âmes métalliques et certaines âmes non métalliques. Dans le procédé d'ondulation, les feuilles sont d'abord ondulées, ensuite un adhésif est appliqué sur les nœuds et les feuilles sont empilées puis durcis dans un four. [(D. Gay), 2005]

Les nids d'abeilles peuvent également être coulés dans un moule (nid d'abeilles en silicone), ou par extrusion (nids d'abeilles en céramique utilisés pour supporter des catalyseurs de gaz d'échappement automobiles) [(D. Gay), 2005]

III.3.4. Géométrie d'une cellule de nid d'abeilles.

La géométrie d'une cellule de nid d'abeilles est illustrée dans les Figure III 12 et Figure III 13 Cette géométrie est définie par différents paramètres : longueurs des parois verticale et inclinée (h et l), épaisseurs de ces parois (t' et t), angle d'inclinaison des parois inclinées (θ).

Ces paramètres sont résumés dans le tableau. III 1 et Figure III 12 Géométrie d'une cellule en nid d'abeilles.

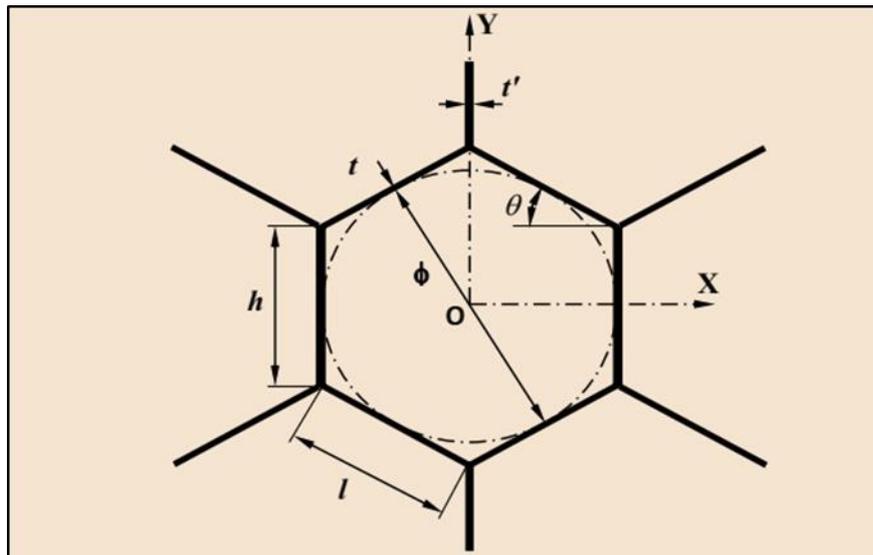


Figure III.12: Géométrie d'une cellule en nid d'abeilles. [Minh Phuc HOANG, (2015)]

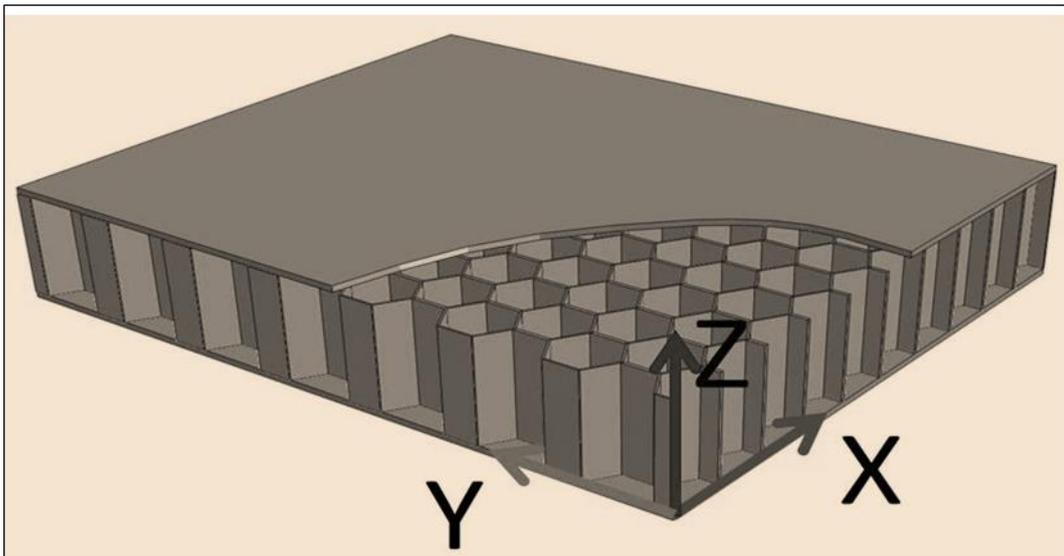


Figure III.13 : Systèmes de coordonnées d'un nid d'abeilles. [Minh Phuc HOANG, (2015)]

Les propriétés mécaniques d'une âme en nid d'abeilles sont directement liées aux paramètres géométriques des cellules de la structure, ainsi qu'à sa densité (raison principale du choix de l'utilisation de ces matériaux). Cette dernière dépend elle-même des paramètres géométriques et de la densité intrinsèque du matériau de fabrication du nid d'abeilles. [(J Mohamed), 2018]

Tableau III.1 : Paramètres géométriques d'une cellule en nid d'abeilles. [Minh Phuc HOANG, (2015)]

Paramètres	Définition
θ	Angle d'inclinaison des parois inclinées
Φ	Diamètre de la cellule (si hexagone régulier)
l	Longueur de la paroi inclinée
h	Longueur de la paroi verticale
t	Épaisseur de la paroi inclinée
t'	Épaisseur de la paroi verticale (souvent $t'=2t$)
b	Hauteur de l'écarteur en nid d'abeilles

III.3.5. Domaines d'application

Les panneaux sandwich en nid d'abeilles sont largement utilisés dans différents domaines industriels :

- Industries aéronautique et aérospatiale : panneaux intérieurs d'avions (planchers, parois latérales, plafonds, cuisines et toilettes), panneaux extérieurs 20 d'avions (bords avant et arrière, volets, ailerons, radômes, carénages, pales d'hélicoptère, panneaux et portes d'accès; capots des moteurs ...)
- Industries automobile et ferroviaire : panneaux sandwichs en nid d'abeilles pour la construction de camions, d'autobus, métro et tramways ...
- Industries des sports et loisirs : planches de surf, zones d'accostage de séparation, cabines et coques de bateaux de haute performance et navires.
- Industrie de la construction : panneaux sandwich pour les murs, planchers, plafonds, portes, cloisons, façades, surfaces pour machines automatiques et pour toutes les structures qui nécessitent d'atteindre un rapport rigidité/poids optimal ...



Figure III.14 : Domaines d'utilisation des matériaux sandwichs en nid d'abeilles. [(J Med), 2018]

III.4. Conclusion

Les sandwichs à âme en nid d'abeille sont de nouveaux matériaux particulièrement utilisés dans plusieurs domaines et en bâtiments. Leurs avantages résident principalement dans la forte rigidité en flexion, l'excellente résistance à la fatigue, l'isolation thermique et le faible poids. Ces derniers ont poussé d'autres industries telle que l'automobile et le ferroviaire à s'y intéresser. Le seul problème est leur mode de rupture ou de ruines qui reste imprévisible :

- Indentation du cœur,
- Cisaillement du cœur,
- Rupture des peaux,
- Dégradation de l'adhésive.

Chapitre IV

*Analyse des contraintes d'interface
d'une poutre en béton armé
renforcée par sandwich nid
d'abeille: Effet de fluage.*

IV.1. Introduction

Le renforcement des poutres à l'aide des plaques en nid d'abeille représente une récente technologie dans le domaine du génie civil. Cette technique a été un important sujet de recherches et les chercheurs ont montré qu'elle pourrait être une méthode très efficace dans les structures génie civil.

Il est largement admis que, dans une telle poutre renforcée, l'un des modes de défaillance importants est le décollement de la plaque collée de la poutre en béton, qui dépend largement à la concentration des contraintes d'interface normale et de cisaillement aux extrémités de la plaque. [(Teng), 2002]

De nombreux travaux analytiques et numériques sont développés les littératures scientifiques de prédire les contraintes d'interface, comme l'analyse approche de la contrainte de cisaillement élastique par [(Mukhopadhyaya et Swamy), 2001]; approche de shear-lag par [(Triantafillou et Deskovic), 1991], [(Ye), 2001] et l'approche d'analyse par étapes c'est le chemin emprunté par [(Roberts),1989], [(Roberts et Hajji-Kazemi), 1989] et l'approche basée sur des considérations directes de compatibilité de déformation, utilisée par [(Vilnay), 1988], [(Taljsten), 1997], [(Malek et al.),1998], [(Maalej et Bian), 2001], [(Smith et Teng), 2001], [(Teng et al.),2002], [(Tounsi et Benyoucef),2007], [(Cai et al), 2007], [(Benachour et al), 2008], [(Tounsi), 2006], [(Tounsi et al),2009], et [(Guenaneche et al), 2014].

Dans ce chapitre, un modèle analytique était proposé pour prédire les distributions de contraintes d'adhésives dans une poutre renforcée sous l'effet de fluage de prendre en considérant l'effet déformations de cisaillement. L'influence de la déformation de cisaillement dans la contrainte de cisaillement de l'interface est introduite par la supposition que la contrainte de cisaillement varie de manière parabolique à travers l'épaisseur de la poutre et la plaque.

Pour déterminer la solution de contrainte normale d'interface, la déformation de cisaillement dans les adhérents est comptée par l'utilisation de la théorie des poutres classique de stratifié. La théorie classique des stratifiés utilise un schéma de déformation du premier degré (Figure IV.1). Une vérification de la présente méthode analytique avec d'autres solutions théoriques s'effectue à travers des exemples pour prouver l'effet de déformation de cisaillement. L'effet du matériau en nid d'abeille et des paramètres géométriques des adhérents et l'adhésif sur le présent procédé est également présenté par une étude paramétrique.

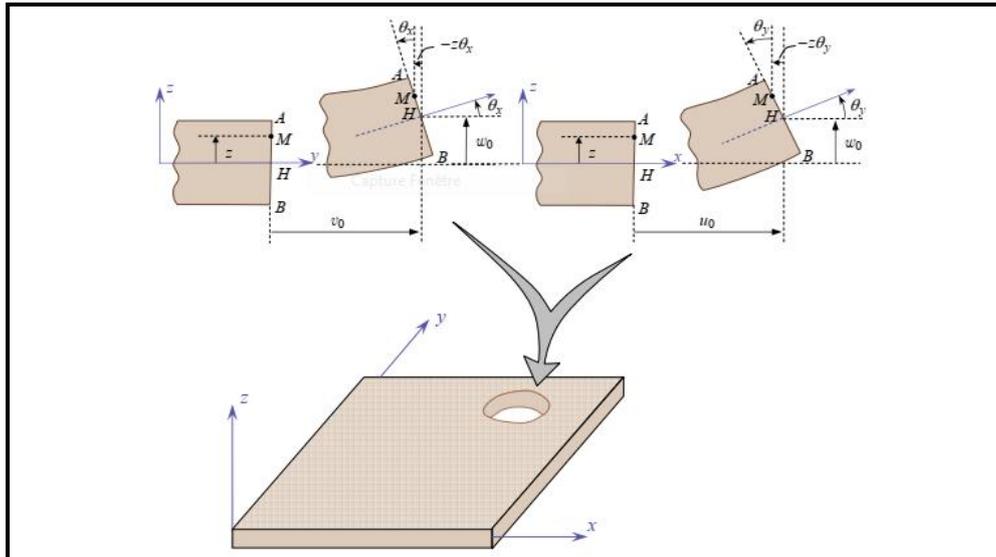


Figure IV.1 : schématisation des déformations dans le cas de la théorie classique des stratifiés. [Jean-Marie B, 2012]

IV.2. La formulation mathématique.

Notons que les méthodes actuelles sont élaborées en tenant compte particulièrement des hypothèses suivantes :

- Les matériaux sont élastiques et linéaires.
- Les contraintes normales et de cisaillement demeurent constants à travers l'épaisseur de l'adhésif.
- Le transfert des contraintes de l'interface entre la poutre et la plaque sandwich EN nid d'abeille est à travers l'adhésif.
- Aucun glissement n'est permis à l'interface de la liaison (c'est à dire, il existe un lien parfait entre les interfaces (poutre-adhésif et adhésif-plaque sandwich en Nid d'Abeille).

IV.2.1. Equations de base de l'élasticité

La déformation du béton à l'interface est donnée par :

$$\varepsilon_b(x) = \frac{du_b(x)}{dx} = \frac{e M_b(x)}{E_b I_b} - \frac{N_b(x)}{E_b I_b} + \alpha T_b \quad (\text{IV.1})$$

Où $u_b(x)$ est le déplacement horizontal de la poutre en béton à l'interface, $M_b(x)$ et N_b sont respectivement le moment de flexion et l'effort normal appliqué à la poutre, I_b et le moment d'inertie de la poutre, e la distance comptée à partir de l'axe neutre à la fibre

inférieure de la poutre en béton. $E_b = E_b(t)$ est le module d'élasticité tangent du béton en fonction du temps qui est donné par l'expression suivante [(Benyoucef S), 2007]:

$$E_b(t) = \frac{E_{bl}}{1 + \chi\varphi(t, t_b)} \quad (\text{IV.2})$$

Où E_{bl} est le module d'élasticité tangent de la poutre à un âge t_{bl} , χ est un coefficient de vieillissement dépendant du développement de la déformation dans le temps (dans notre étude il est pris égale à 0.8. Cette simplification convient aux cas de pure relaxation des effets d'une déformation permanente imposée, mais s'applique également aux cas pour les quels seuls les effets à long termes sont considérés [(EUROCODE 2), 1992], $t_b = t_{bl} - t_{bc}$ (t_{bc} est la durée du chargement de la poutre et est le temps du début de chargement (temps initial), t_b est l'âge du béton en jour lors de la mise en charge), $\varphi(t, t_b)$ est le coefficient du fluage correspondant au fluage entre les instantes t_b et t qui est défini comme suit [(EUROCODE 2), 1992]:

$$\varphi(t, t_b) = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_b) \beta(t - t_b) \quad (\text{IV.3})$$

$\phi_{RH} \beta(f_{cm})$ et $\beta(t_b)$ sont des facteurs dépendants de l'humidité relative, la rigidité du béton et l'âge du chargement de la poutre respectivement et qui sont définis par les expressions suivantes :

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{(1 - RH / 100)}{(0.10^3 \sqrt{h_0})} \quad (\text{IV.4})$$

ϕ_{RH} : Facteur prenant en compte l'effet de sur le coefficient de fluage.

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (\text{IV.5})$$

$\beta(f_{cm})$: Facteur prenant en compte l'effet de la résistance du béton sur le coefficient fluage.

$$\beta(t_p) = \frac{1}{(0.1 + t_p^{0.20})} \quad (\text{IV.6})$$

RH : Humidité relative ambiante de l'environnement en %.

$$h_0 = \frac{2A_p}{P_b} \quad (\text{IV.7})$$

- ✚ h_0 : Le rayon d'un élément en mm .
- ✚ A_p : Aire de la section transversale d'élément du béton ;
- ✚ P_b : Périmètre de la section du béton en contact avec l'atmosphère ;
- ✚ f_{cm} : Résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours en N / mm^2 .

En plus, $\beta_{cp}(t - t_p)$ dans l'équation. (IV.3) est un coefficient définissant le développement du fluage avec le temps donné par :

$$\beta_{cp}(t - t_p) = \left[\frac{(t - t_p)}{\beta_H + t - t_p} \right]^{0.30} \quad (\text{IV.8})$$

Avec β_H un coefficient dépendant de l'humidité relative RH , il est donné par :

$$\beta_H = 1.5 \left[1 + (0.012RH)^{0.18} \right] h_0 + 250 \leq 1500 \quad (\text{IV.9})$$

En supposant que le fluage est indépendant, la température dans l'équation. (IV.1) est donnée par [(Benyoucef S), 2007], [(Fleming C.J), 1967].

$$T_b = \frac{\varepsilon_{sb}(t - t_{bc})}{\alpha} \quad (\text{IV.10})$$

Où :

α est un coefficient linéaire de l'expansion thermique et $\varepsilon_{sb}(t - t_{bc})$ est la déformation due au retrait calculée à partir de :

$$\varepsilon_{sb}(t - t_{bc}) = \varepsilon_{sb}(f_{cm}) \beta_{RH} \beta_{sb}(t - t_{bc}) \quad (\text{IV.11})$$

$$\varepsilon_{sb}(f_{cm}) = [160 + \beta_{sc}(90 - f_{cm})] 10^{-6} \quad (\text{IV.12})$$

✚ $\varepsilon_{sb}(f_{cm})$ est un facteur prenant en compte l'influence de la résistance du béton sur le retrait :

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \left(1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right), & \text{pour } 40 \% \leq RH \leq 99 \% \quad \text{au contact de l'air;} \\ +0.25 \left(1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right); & \text{pour } RH \geq 99 \% \quad \text{immersion dans l'eau} \end{cases} \quad \text{(IV.13)}$$

✚ β_{RH} : Facteur prenant en compte l'effet de RH sur le coefficient du retrait.

✚ β_{sc} : est un coefficient dépendant du type de ciment utilisé.

$$\beta_{sc} = \begin{cases} 4 & \text{pour des ciments à prise lentes,} \\ 5 & \text{pour des ciments à prise normale ou rapide, NR,} \\ 8 & \text{pour des ciments à prise rapide et haute résistances.} \end{cases}$$

Notant que, $\beta_{sb}(t - t_{bc})$ dans l'équation. (IV.10) est un coefficient du développement du retrait du béton avec le temps qui est évalué à partir de l'équation suivante :

$$\beta_{sb}(t - t_{bc}) = \left[\frac{t - t_{bc}}{0035h_0^2 + t - t_{bc}} \right]^{0.5} \quad \text{(IV.14)}$$

En se servant de la théorie des stratifiés et des équations de l'élasticité, l'expression de la déformation de la plaque de renforcement peut être avancée comme suit :

$$\varepsilon_f(x) = \frac{du_f}{dx} = -D'_{11} \frac{t_f}{2b_f} M_f(x) + A'_{11} \frac{N_f(x)}{b_f} \quad \text{(IV.15)}$$

$[A'] = [A^{-1}]$ Est l'inverse de la matrice de membrane $[A']$;

$[D'] = [D^{-1}]$ Est l'inverse de la matrice de flexion $[D']$;

b_f Et la largeur de la plaque de renforcement.

Par l'application des conditions d'équilibre de la poutre en béton, nous avons :

Dans la direction x :

$$\frac{dN_b(x)}{dx} = b_f \tau(x) \quad \text{(IV.16)}$$

Dans la direction y :

$$\frac{dV_b(x)}{dx} = -[\sigma_n(x)b_f + q] \quad \text{(IV.17)}$$

$V_b(x)$: est l'effort tranchant appliqué à la poutre en béton ;

q : la charge uniformément répartie appliquée à la poutre en béton.

L'équilibre des moments permet d'écrire :

$$\frac{dM_b}{dx} = V_b(x) - \tau(x)b_f e \quad (\text{IV.18})$$

L'équilibre de la plaque de renforcement dans les directions x et y consent :

Dans la direction x :

$$\frac{dN_f(x)}{dx} = b_f \tau(x) \quad (\text{IV.19})$$

Dans la direction y :

$$\frac{dV_b(x)}{dx} = b_f \sigma(x) \quad (\text{IV.20})$$

L'équilibre des moments :

$$\frac{dM_f(x)}{dx} = V_f(x) - \tau(x)b_f \frac{t_f}{2} \quad (\text{IV.21})$$

$V_f(x)$ est l'effort tranchant appliqué à la plaque de renforcement.

IV.2.2. Distribution des contraintes de cisaillement le long de l'interface béton – composite Nid D'abeille

L'expression de la contrainte de cisaillement au niveau de la couche de l'adhésif est formulée de la manière suivante :

$$\tau(x) = \frac{G_a}{t_a} \Delta u(x) = \frac{G_a}{t_a} [u_f(x) - u_b(x)] \quad (\text{IV.22})$$

$\Delta u(x)$ est le déplacement horizontal relatif au niveau de l'interface et G_a représente le module de cisaillement de cette même couche.

En dérivant l'équation. (IV.22) et en se servant des éqs. (IV.1) et (IV.15), nous obtenons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_a} \left[A_{11} \frac{N_f(x)}{b_f} - D_{11} \frac{t_f}{2b_f} M_f(x) - \frac{e}{E_b I_b} M_b(x) + \frac{N_b(x)}{E_b A_b} - \alpha T_b \right] \quad (\text{IV.23})$$

En supposant que la poutre et la plaque de renforcement ont la même courbure, la relation entre les moments dans les deux adhérents peut être exprimée comme suit :

$$M_b(x) = RM_f(x) \quad (\text{IV.24})$$

Avec :

$$R = \frac{E_b I_b D_{11}'}{b_f} \quad (\text{IV.25})$$

Le moment total d'équilibre de l'élément différentiel de la Figure (IV.2) est donné par :

$$M_T(x) = M_b(x) + M_f(x) + N(x) \left[e + \frac{t_f}{2} + t_a \right] \quad (\text{IV.26})$$

Où : $M_T(x)$ est le moment total appliqué et avec les éqs (V.16) et (V.19)

$$N_b(x) = N_f(x) = N(x) = b_f \int_0^x \tau(x) dx \quad (\text{IV.27})$$

Le moment de flexion de chaque élément (poutre et plaque) est exprimé comme une fonction du moment total appliqué et de la contrainte de cisaillement d'interface :

$$M_b(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_f \int_0^x \tau(x) \left(e + \frac{t_f}{2} + t_a \right) dx \right] \quad (\text{IV.28})$$

Et :

$$M_f(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_f \int_0^x \tau(x) \left(e + \frac{t_f}{2} + t_a \right) dx \right] \quad (\text{IV.29})$$

La première dérivée des expressions ci-dessus est :

$$\frac{dM_b(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} \left[V_T(x) - b_f \tau(x) \left(e + \frac{t_f}{2} + t_a \right) \right] \quad (\text{IV.30})$$

Et

$$\frac{dM_f(x)}{dx} = \frac{1}{R+1} \left[V_T(x) - b_f \tau(x) \left(e + \frac{t_f}{2} + t_a \right) \right] \quad (\text{IV.31})$$

La première dérivée de l'équation (IV.23)

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = \frac{G_a}{t_a} \left(\frac{-t_f}{2b_f} D_{11}' \frac{dM_f}{dx} + \frac{A_{11}'}{b_f} \frac{dN_f(x)}{dx} - \frac{e}{E_b I_b} \frac{dM_b(x)}{dx} + \frac{1}{E_b A_b} \frac{dN_b(x)}{dx} \right) \quad (\text{IV.32})$$

La substitution de l'effort tranchant l'équation (IV.30) et l'éq (IV.31) et l'effort normal l'éq (IV.27) dans l'éq (IV.32) nous permet d'obtenir l'équation différentielle des contraintes d'interface de cisaillement :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - \frac{G_a}{t_a} \left[A_{11} + \frac{b_f}{E_b A_b} + \frac{\left(e + \frac{t_f}{2}\right) \left(e + \frac{t_f}{2} + t_a\right)}{E_b I_b D_{11} + b_f} b_f D_{11}' \right] \tau(x) + \frac{G_a}{t_a} \left(\frac{e + \frac{t_f}{2}}{E_b I_b D_{11} + b_f} D_{11}' \right) V_T(x) = 0 \quad \text{IV.33)}$$

La solution présentée ci-dessus est limitée pour un chargement uniformément réparti pour lequel $d^2V_T(x)/dx^2 = 0$, et la solution générale de l'équation (IV.33) est donnée par :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad \text{IV.34)}$$

Où :

$$\lambda^2 = \frac{G_a}{t_a} \left(A_{11} + \frac{b_f}{E_b A_b} + \frac{\left(e + \frac{t_f}{2}\right) \left(e + \frac{t_2}{2} + t_a\right)}{E_b I_b D_{11} + b_f} b_f D_{11}' \right) \quad \text{IV.35)}$$

Et :

$$m_1 = \frac{G_a}{t_a \lambda^2} \left(\frac{e + \frac{t_2}{2}}{E_b I_b D_{11} + b_f} D_{11}' \right) \quad \text{IV.36)}$$

B_1 et B_2 sont des constantes d'intégration déterminées à partir des conditions aux limites adéquates.

La première condition aux limites :

$$x = 0 \Rightarrow M_f(0) = 0 \text{ et } [N_b(0) = N_f(0)]$$

Par conséquent, le moment dans cette section ($x = 0$) est repris par la poutre seule et son expression est la suivante :

$$M_b(0) = M_t(0) = \frac{qa}{2}(L - a) \quad \text{IV.37)}$$

En appliquant la condition à la limite ci-dessus à la première dérivée des contraintes de cisaillement, nous aurons :

$$\frac{d\tau(x=0)}{dx} = -m_2 M_T(0) \text{ Avec } m_2 = \frac{G_a}{t_a} \left(\frac{e}{E_b I_b} + \frac{\alpha T_b}{M_T(0)} \right) \quad (\text{IV.38})$$

Par la substitution de l'éq. (V.34) dans l'éq. (V.38), B_2 peut être déterminée :

$$B_2 = -\frac{q a m_2}{2\lambda} (L-a) + \frac{m_1}{\lambda} q \quad (\text{IV.39})$$

La seconde condition aux limites requière des contraintes de cisaillement nulles à mi travée dues à la symétrie du chargement. B_1 Peut-être donc déterminé comme suit :

$$B_1 = \frac{a q m_2}{2\lambda} (L-a) \tanh \left(\frac{\lambda L_p}{2} \right) - \frac{q m_1}{\lambda} \tanh \left(\frac{\lambda L_p}{2} \right) \quad (\text{IV.40})$$

Dans les cas pratiques $\frac{\lambda L_p}{2} \succ 10$, ceci implique que $\left(\frac{\lambda L_p}{2} \right) \approx 1$,

D'où l'expression de B_1 peut être réduite à:

$$B_1 = \frac{a q m_2}{2\lambda} (L-a) - \frac{q m_1}{\lambda} = -B_2 \quad (\text{IV.41})$$

Remplaçons les expressions de B_1 et B_2 dans l'équation (IV.34), celle-ci nous donne la valeur de la contrainte de cisaillement à n'importe quel point au niveau de l'interface entre la poutre et la plaque de renforcement.

$$\tau(x) = \left[\frac{m_2 a}{2} (L-a) - m_1 \right] \frac{q e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{IV.42})$$

IV.2.3. Distribution des contraintes normales le long de l'interface béton – composite de Nid D'abeille

La contrainte normale au niveau de la couche d'adhésive peut être exprimée comme suit :

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_f(x) - w_b(x)] \quad (\text{IV.43})$$

K_n est la rigidité normale de la couche d'adhésive par unité de longueur, donnée par :

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)/t_a} \left(\frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{IV.44})$$

$w_b(x)$ et $w_f(x)$ sont respectivement les déplacements verticaux de la poutre et la plaque de renforcement.

En différentiant l'équation (IV.43) deux fois, nous aurons :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2 w_f(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_b(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.45})$$

En écrivant l'équation de la ligne élastique pour la poutre à renforcée et pour la plaque de renforcement, nous aurons:

$$\frac{d^2 w_b(x)}{dx^2} = -\frac{M_b(x)}{E_b I_b}, \quad \frac{d^2 w_f(x)}{dx^2} = -\frac{D_{11} M_f(x)}{b_f} \quad (\text{IV.46})$$

En se basant sur les équations d'équilibre (IV.16), (IV.20), les équations différentielles d'équilibre des adhérents 1 et 2 exprimées en fonction des contraintes de cisaillement et des contraintes normales sont données comme suit :

$$\text{Adhérent 1 : } \frac{d^4 w_b(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_b I_b} b_f \sigma_n(x) + \frac{e}{E_b I_b} b_f \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_b I_b} \quad (\text{IV.47})$$

$$\text{Adhérent 2 : } \frac{d^4 w_f(x)}{dx^4} = -D_{11}' \sigma(x) + D_{11} \frac{t_f}{2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad \text{IV.48})$$

En substituant les équations (IV.47) et (IV.48) dans la quatrième dérivée des contraintes normales d'interface obtenues à partir de l'équation (IV.43), nous aurons l'équation différentielle des contraintes normales d'interface :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + K_n \left(D_{11}' + \frac{b_f}{E_b I_b} \right) \sigma_n(x) - K_n \left(D_{11} \frac{t_f}{2} - \frac{e b_f}{E_b I_b} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q K_n}{E_b I_b} = 0 \quad (\text{IV.49})$$

La solution de cette équation différentielle est donnée par:

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.50})$$

Pour des grandes valeurs de « x », il est supposé que les contraintes normales deviennent nulles, et par conséquent $C_3 = C_4 = 0$ d'où la solution générale prendra la forme :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.51})$$

Où:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{4} \left(\frac{b_f}{E_b I_b} + D_{11}' \right)} \quad (\text{IV.52})$$

$$n_1 = \left(\frac{e b_f - D_{11}' E_b I_b \frac{t_f}{2}}{D_{11}' E_b I_b + b_f} \right) \quad (\text{IV.53})$$

Et

$$n_2 = \frac{1}{D_{11}' E_b I_b + b_f} \quad (\text{IV.54})$$

C_1 et C_2 sont des constantes d'intégration déterminées à partir des conditions aux limites adéquates et elles sont données par :

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_b I_b} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (\text{IV.55})$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_b I_b} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (\text{IV.56})$$

Où :

$$n_3 = b_f K_n \left(\frac{e}{E_b I_b} - \frac{D_{11}' t_f}{2b_f} \right) \quad (\text{IV.57})$$

IV.3. Présentation du modèle proposé

Considérons un modèle d'une poutre en béton armé simplement appuyée renforcée en plaque sandwich en nid d'abeille d'une longueur L_p et d'une hauteur t_p . L'ensemble est soumis à une charge d'intensité q égale. Pour étudier le comportement en fluage de l'interface. Dans notre modèle analytique, la poutre en béton est modélisée comme un matériau où ses coefficients de fluage dépendent du temps et de la durée du chargement.

Notre modèle prédit les contraintes de cisaillement dans les trois zones : élastique, adoucissante et décollement près de la fissure en fonction du temps.

Une illustration schématique de la poutre en béton armé renforcée par une plaque en sandwich de composite en nid d'abeille est montrée sur la Figure IV.2.

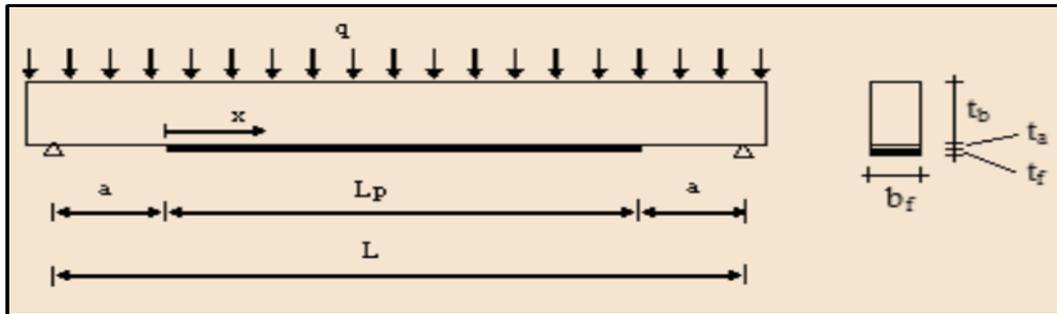


Figure IV.2: Poutre en béton simplement appuyée renforcée par collage d'une plaque composite. [(Tounsi et al),2009],

Dans la présente analyse, un comportement élastique linéaire est supposé pour les trois matériaux (béton, l'adhésif et la plaque composite). La couche d'adhésive est supposée jouer un rôle de transfert des contraintes du béton à la plaque composite avec des contraintes constantes à travers toute son épaisseur. et aucun glissement n'est permis à l'interface de la liaison (c'est à dire, il existe un lien parfait entre les interfaces (poutre-adhésif et adhésif-plaque sandwich en nid d'abeille).

La poutre, ayant une travée de 3000 mm, est simplement appuyée et soumise à une charge uniformément répartie d'une valeur de 50 KN/m. La distance de l'appui au bord de la plaque de renforcement est de (a=300 mm).

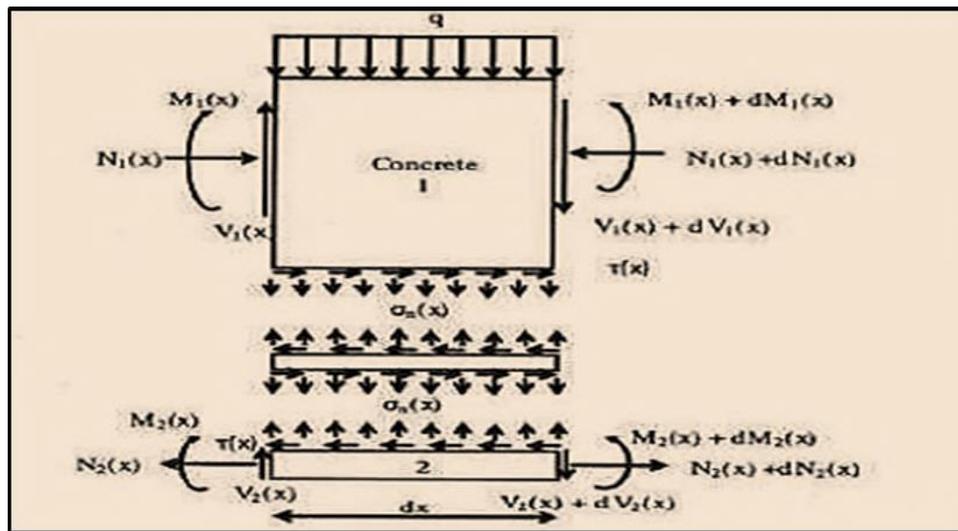


Figure IV.3 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par collage de composite. [(Tounsi et al),2009].

Les caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques des matériaux utilisés sont rapportées au tableau (IV.1).

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques et propriétés des matériaux utilisés.

Matériaux	Largeur	Hauteur	Module de Young
Poutre en béton	$b_1 = 200$ mm	$t_1 = 300$ mm	$E_1 = 30\,000$ MPa
Plaque sandwich en nid d'abeille	$b_2 = 100$ mm	$t_2 = 4$ mm	$E_{2(\text{peau})} = 140\,000$ MPa $E_{2(\text{ame})} = 50$ MPa
Adhésif	$b_a = 100$ mm	$t_a = 2$ mm	$E_a = 3\,000$ MPa

IV.4. Validation du modèle

Le comportement de l'interface composite en nid d'abeille – béton en fonction du temps est exposé dans cet étude.

Sur la base du présent modèle analytique, un programme a été élaboré ont été étudié pour démontrer l'effet de fluage sur les contraintes d'interface. Une étude paramétrique est dévoilée pour exhiber les effets des différents paramètres sur la distribution des contraintes à l'interface composite en nid d'abeille – béton

Les données suivantes ont été utilisées :

$$f_{cm} = 25 \text{ N/mm}^2, RH = 40\%, t_b = 28 \text{ jours}, E_{bl} = E_{c28} = 30\,000 \text{ MPa}, \beta_{sc} = 5.$$

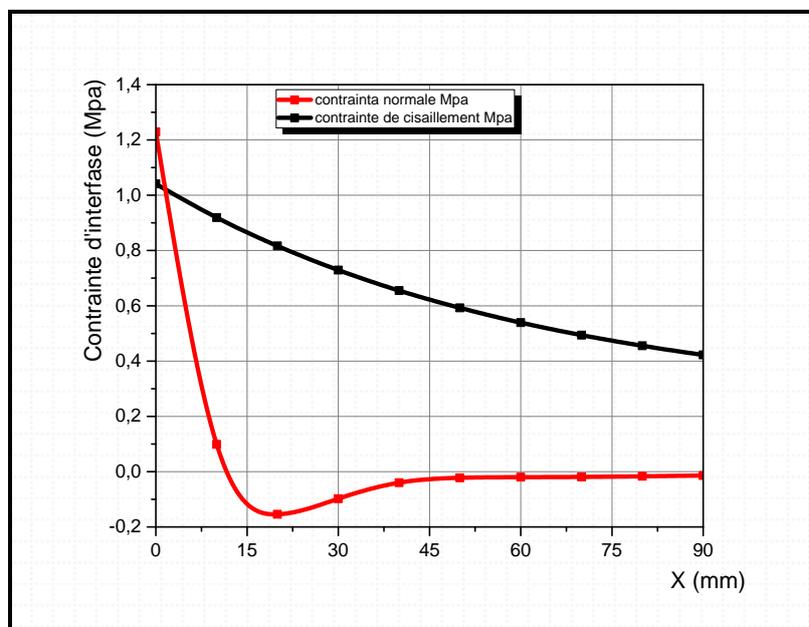


Figure IV.4 : Evolution des contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par un composite de Nid D'abeille en fonction du temps.

Dans la figure (IV.4), Le maximum des contraintes d'interface (pic) est observé au bord de la plaque puis diminuent, rapidement (brusquement) dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, pour atteindre toutes les deux la valeur zéro à mi travée.

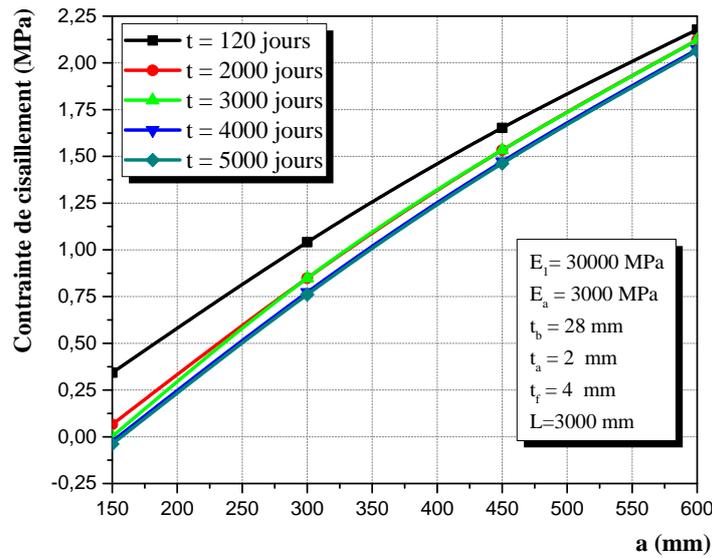
IV.5. Etude paramétrique

Dans ce paragraphe, nous présentons des résultats de la présente méthode afin d'examiner l'effet des différents paramètres qui gouvernent la distribution des contraintes au niveau de l'interface béton – plaque de composite en Nid D'abeille.

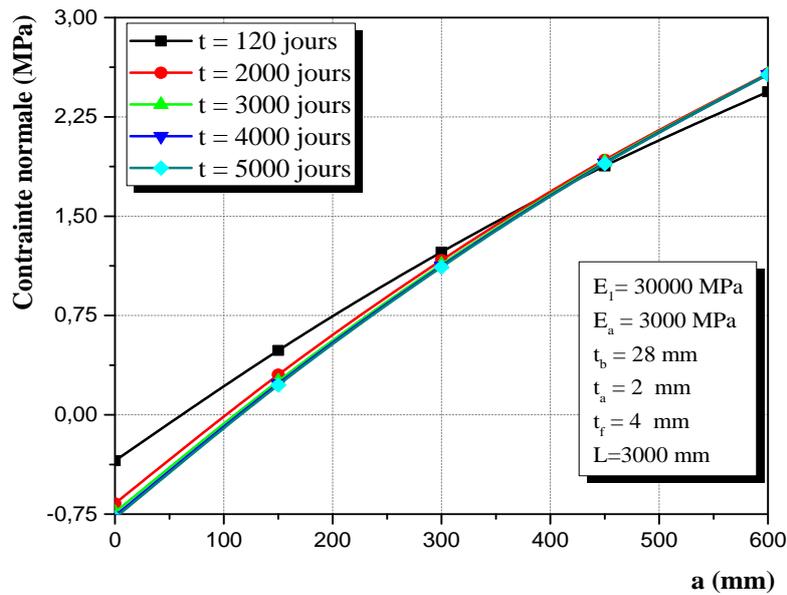
A cette section, une validation suivie d'une étude paramétrique seront présentées afin de mettre en valeur l'efficacité et la sensibilité de notre modèle. La réponse en fluage de la poutre en béton et tracée et discuté selon l'évolution du temps. Après cela, le comportement de l'interface Nid d'Abeille -béton en fonction du temps a été étudié.

IV.5.1. Effet de la longueur non renforcée a

L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur la variation des contraintes d'interface est représenté sur la figure (IV.5). On constate que, plus la longueur « a » augmente (c.à.d. la longueur de la plaque L_p diminue) plus les contraintes d'interface maximales (contraintes au bord de la plaque en sandwich de composite Nida) s'accroissent d'une façon significative. Ces résultats démontrent que, quel que soit le cas de renforcement, y compris le cas où le renforcement se limite aux bords de la poutre renforcée, il est recommandé de prolonger la plaque sandwich en nid d'abeille de renforcement le plus possible aux appuis.



A) Les contraintes de cisaillement.



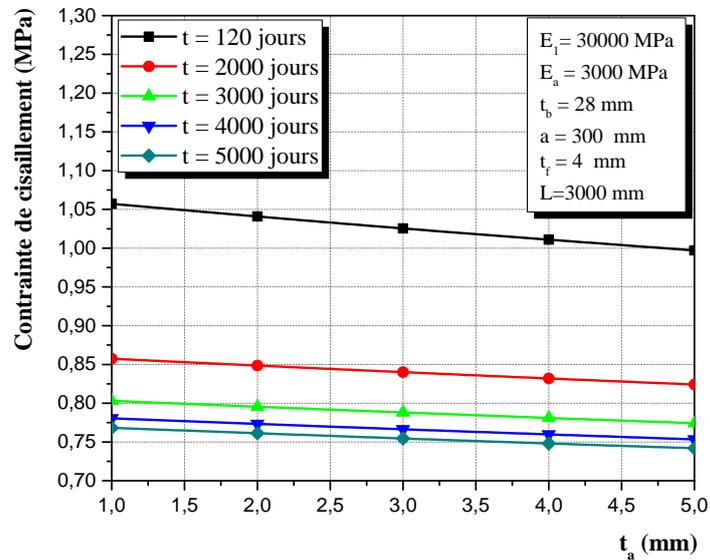
B) Les contraintes normales.

Figure IV.5 : Effet de la longueur a non renforcée sur les contraintes d'interface.

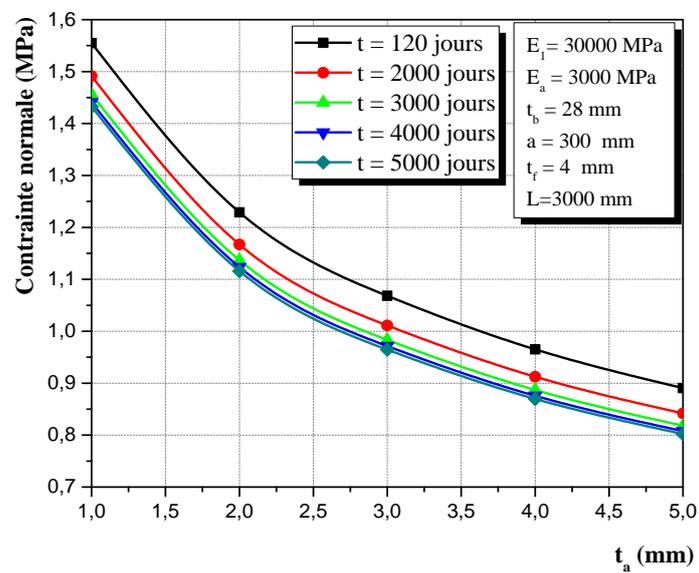
IV.5.2 Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive t_a

La variation des contraintes d'interface en fonction de l'épaisseur de la couche d'adhésif est représentée dans la figure IV.6. L'accroissement de l'épaisseur de la couche d'adhésif conduit à une réduction significative de la concentration des contraintes de l'interface. C'est

pourquoi, il est fortement recommandé d'utiliser une couche d'adhésif plus épaisse aux voisinages des bords.



A) Les contraintes de cisaillement.

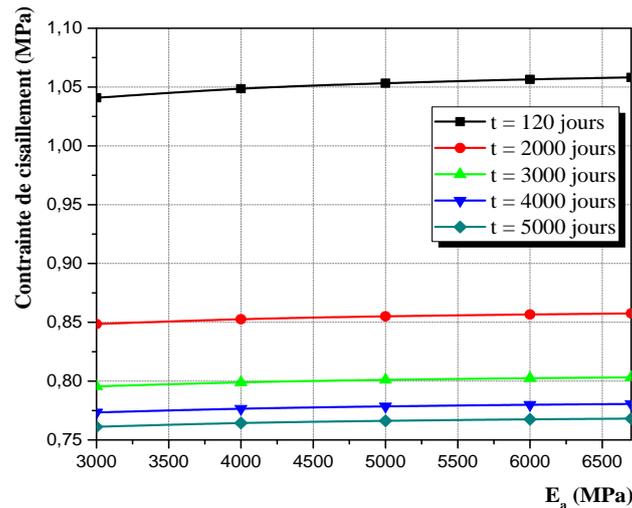


B) Les contraintes de cisaillement.

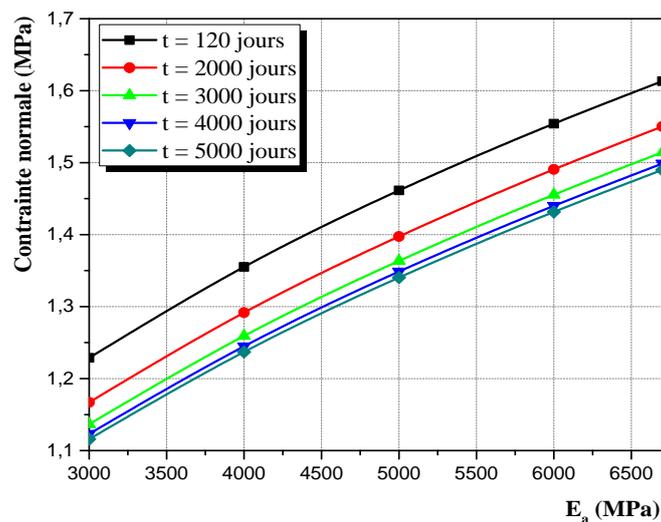
Figure IV.6 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive sur les contraintes d'interface.

IV.5.3. Effet de la rigidité de la colle E_a

La figure (IV.7) montre l'influence de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par composite en nid d'abeille. Les contraintes d'interface augmentent avec l'augmentation de la rigidité de la colle. Plus la rigidité de la colle augmente s'accroissent d'une façon significative et dans le cas d'un chargement de fluage à long terme.



A) Les contraintes de cisaillement.

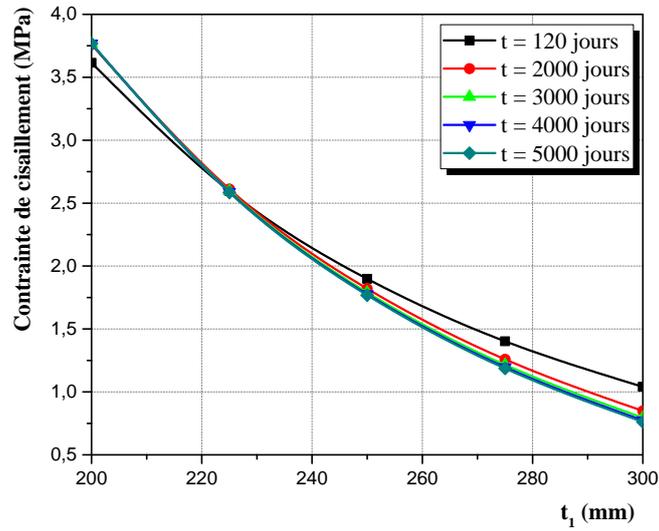


B) Les contraintes normale.

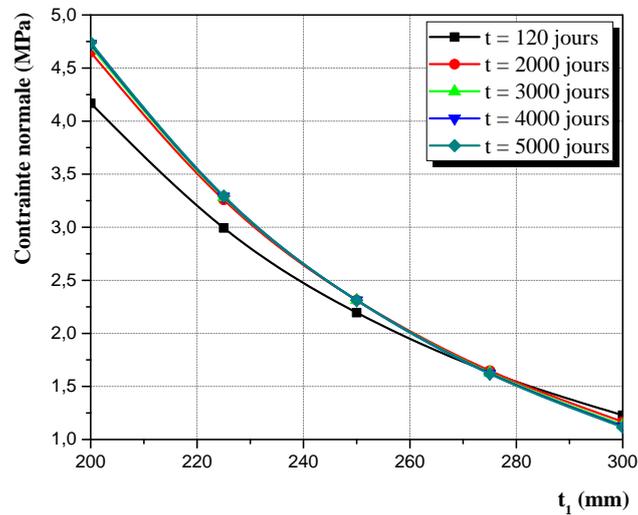
Figure IV.7 : Effet de la rigidité de la colle sur les contraintes normales d'interface.

IV.5.4. Effet de la hauteur de la poutre t_1

La variation des contraintes d'interface en fonction de la hauteur de la poutre représentée dans la figure (IV.8). L'accroissement de la hauteur de la poutre conduit à une réduction significative de la concentration des contraintes de l'interface.



A) Les contraintes de cisaillement.

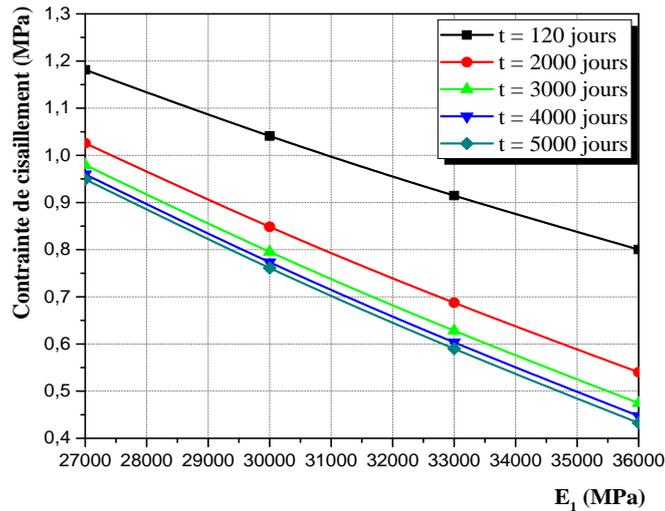


B) Les contraintes normales.

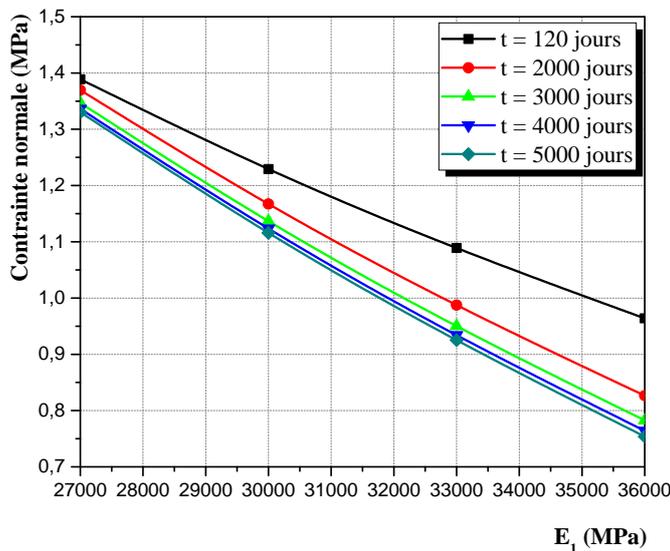
Figure IV.8 : Effet de la hauteur de la poutre sur les contraintes d'interface.

IV.5.5. Effet de la rigidité de la poutre EI

Dans la Figure (IV.9), nous présentons l'effet de la rigidité de la poutre EI . On remarque que la rigidité de la poutre joue un rôle très important dans la diminution des contraintes d'interfaces au bord de la plaque c'est-à-dire si en augmentant la rigidité de la poutre on a une réduction dans les contraintes normales et cisaillement.



A) Les contraintes de cisaillement.

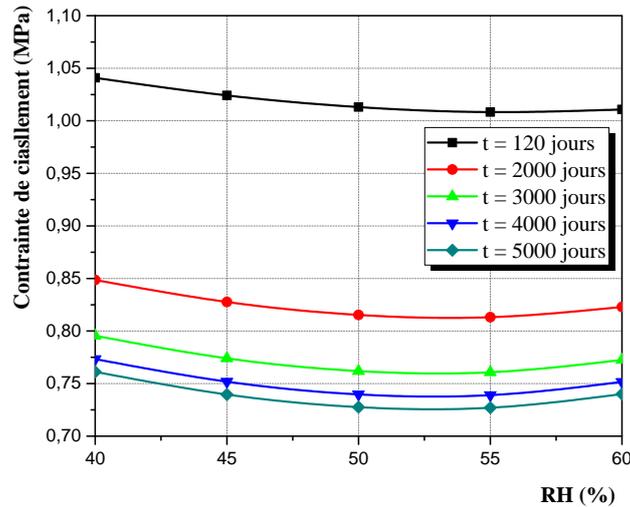


B) Les contraintes normales

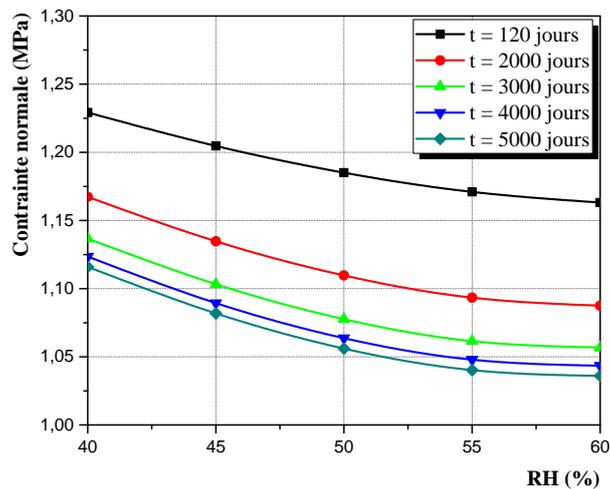
Figure IV.9 : Effet la rigidité de la poutre EI sur les contraintes d'interface.

IV.5.6. Effet de taux d'humidité RH

La Figure.(IV.10) montre l'effet de l'humidité relative, sur l'évolution de la contrainte de cisaillement et la contrainte normale pour des temps de fluage importante égale 120, 1000, 2000, 3000 et 4000 jours. Il est à noter que les contraintes de cisaillement et normales sont faiblement affectées par des variations de l'humidité relative.



A) Les contraintes de cisaillement.

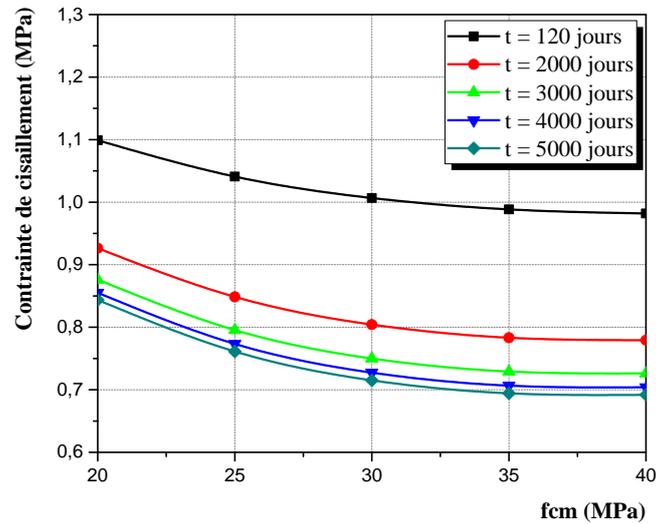


B) Les contraintes normales.

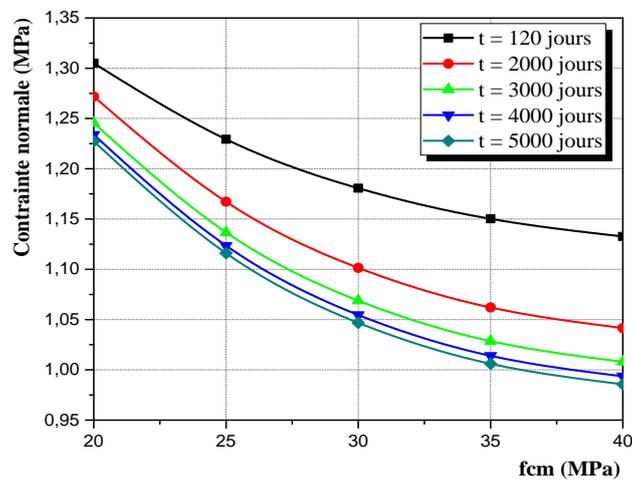
Figure IV.10 : Effet de taux d'humidité sur les contraintes d'interface.

IV.5.7. Effet de la caractéristique du béton f_{cm}

La figure (IV.11) montre l'influence de la caractéristique du béton f_{cm} sur l'évolution des contraintes d'interface. L'accroissement de f_{cm} conduit à une réduction significative de la concentration des contraintes de cisaillement et normales.



A) Les contraintes de cisaillement.



B) Les contraintes normales.

Figure IV.11 : Effet de la caractéristique du béton f_{cm} sur les contraintes d'interface.

IV.6. Conclusion

L'évaluation de ces contraintes est la base de compréhension du phénomène de décollement est le mode de rupture fréquent chez les systèmes renforcés. Une méthode simple, pour le calcul des contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par un sandwich de composite en nid d'abeille sous l'effet du fluage pour un chargement uniformément répartie a été présentée dans ce chapitre.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir de cette investigation :

- ✓ Le maximum des contraintes d'interface (pic) est observé au bord de la plaque puis diminuent, rapidement (brusquement) dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, pour atteindre toutes les deux la valeur zéro à mi travée.
- ✓ La solution présentée permet l'étude des systèmes hybrides poutres en béton – plaque composite sous l'effet combiné du fluage et du retrait.
- ✓ Prolonger le plus possible la longueur de la plaque composite de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur de la colle d'adhésif conduit à une réduction significative des contraintes de cisaillement et normales.
- ✓ Les contraintes d'interface augmentent avec l'augmentation de la rigidité de la colle.
- ✓ L'augmentation de la hauteur de la poutre en béton (t_1) et sa rigidité (E_1) mènent à une réduction des contraintes d'interface maximales.
- ✓ L'influence de taux d'humidité relative et la variation de caractéristique de béton jouent un rôle sur la diminution des contraintes d'interface maximale.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objectif principal d'étudier le comportement de l'interface collées béton/systèmes de renforcement composite en nid d'abeille soumise à une sollicitation de fluage. Dans une première étape, l'étude bibliographique a rappelé le contexte du renforcement d'ouvrage par matériaux composites en sandwich.

La nécessité de développer des méthodes de renforcement qui sont très efficaces et qui exigent un court temps pour se réaliser sur place, pour cela des études et des recherches ont conduit à la découverte de nouvelles techniques de renforcements. Parmi ces techniques est le renforcement par matériaux composites dont elle est très prometteuse. Plusieurs sont les recherches qui ont démontré le potentiel de cette technique par le renforcement des poutres en béton armé.

Cette étude de recherche, est porté sur l'évaluation du comportement des poutres en béton armés, avec une section rectangulaire, renforcée avec une plaque en sandwich de composite à type nid d'abeille. Les objectifs de cette étude de recherche étaient de faire une évaluation des paramètres qui ont une influence sur la performance et le comportement des poutres coulées avec des plaques de renforcement et en plus une évaluation des équations prédictives de la résistance en cisaillement et en flexion et la déformation ultime avant rupture des poutres renforcées.

Les résultats obtenus d'après l'évaluation des paramètres influant sur le renforcement par le composite nid d'abeille sont les suivants, l'augmentation du l'épaisseur de la couche d'adhésive est suivi par une augmentation dans la résistance à les deux efforts tranchant et l'effort normal, la géométrie de la section de béton coulée avec la plaque sandwich a joué un rôle dans l'efficacité et la performance de cette technique et d'après les résultats le gain de résistance à le cisaillement et l'effort normal de traction est plus important pour des petits longueurs non renforcés à la poutre autant que pour ceux de grande longueur non renforcée.

Par rapport aux poutres rectangulaires, l'augmentation de la hauteur de cette poutre conduit encore à une augmentation dans la résistance au cisaillement et l'effort normal. Pour l'effet de la résistance à la contrainte normal et de cisaillement initiale des poutres avec d'une faible rigidité renforcées a été remarquable faible, que pour une rigidité élevée des poutres.

L'effet des paramètres liés à la géométrie de la plaque de renforcement (Longueur, épaisseur et largeur) et l'épaisseur de la couche d'adhésif a été mis en évidence. Afin de

compléter les résultats obtenus et de mieux cerner le comportement mécanique des poutres en béton armé endommagées réparé, nous envisageons les perspectives suivantes pour la suite de notre recherche:

- Effectuer des études numériques par des logiciels de modélisations et confronter les résultats qui seront trouvés avec ceux calculés par les modèles analytiquement établis;
- Utiliser d'autres types de renfort avec d'autres matériaux composites et voir leur impact sur l'intégrité de l'interface.
- Sur le plan pratique, il y a un manque de codes et de critères de dimensionnement qui limitent l'utilisation pratique des matériaux composites pour la réparation ou le renforcement des structures en béton armé. En plus, il est important de préparer une génération des ingénieurs qui sont capables à utiliser les potentialités des matériaux composites.

Référence bibliographique

[(A.bricoleur ,2016) : Bricoleur de Dimanche., **Traitement fissure mur béton** ; Apprenti bricoleur Message(s)

[AEROSPATIALE, 1986] : AEROSPATIALE, Matériaux composites : dans la grande mutation des structures. Plaquette interne. **1986**.

[Ait Ameer Meziane M.2008] Ait Ameer Meziane M. Modélisation du décollement des structures hybrides CompositeBéton. Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes,Thèse de Doctorat,**2008**

[Allen H. G, 1969]: Allen H. G, “Analysis And Design of Structural Sandwich Panels”, Pergamon Press, Oxford. 1969.

[Amandine M] : Amandine Mioulet est ingénieur de l'Ecole Centrale de Nantes. Elle est à l'origine de la plateforme de commercialisation de béton au particulier allobeton.com

[Anne-Charlott, 2014] : Anne-Charlotte GASSER, Principales agressions et attaques du béton, Nantes Métropole, Ex-Dter IdF CEREMA, ENPC Marne-la-Vallée – 23 octobre **2014**.

[ANT 09] : Pierre BOULANGER, Théophil LUTZ, Gilles PINGANAUD et Guy TACHÉ Anticorrosion et Durabilité dans le bâtiment, le génie civil et les ouvrages industriels, chapitre 22 : les inhibiteurs de corrosion dans le béton armé 2009

[Benachour et al, 2008]: “Interfacial stress analysis of steel beams reinforced with bonded prestressed FRP plate”, Engineering Structures, 30, 3305–3315.

[Benyoucef S, 2007]: **Benyoucef S, Tounsi A, Meftah S.A and Adda Bedia E.A.** Creep and shrinkage effect on adhesive stresses in RC beams strengthened with composite laminates, Composites Science and Technology 67 933–942.2007

[Bétons hydrauliques ; 2002] : [HAL] Ressuage des bétons hydrauliques (Laurent Josserand. Ressuage des bétons hydrauliques. Mechanics. Ecole des Ponts paristech. French.).

[Boulaziz A.2014], Analyse des contraintes d’interfaces dans les poutres en béton armé renforcées par des stratifiés en fibre de carbone : Effet de fluage. Université Ibn Khaldoun Tiaret.

[Bruno Castanié, 2000] : Bruno Castanié, "Contribution à l'étude des structures sandwichs dissymétrique" Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace de Toulouse, France.

[Cai et al, 2007]: “Interface slip effect on bonded plate repairs of concrete beams”, Engineering Structures, 29, 1084–1095.

[Clément Audibert, (2017)]: Clément Audibert. Contribution à la caractérisation des mécanismes dissipatifs sous sollicitation d’impact de structures composites sandwichs intégrant des fibres naturelles. Proposition d’une zone d’absorption pour siège pilote. Autre. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d’Aérotechnique - Poitiers

[Colloque Le Pont, 2017] Colloque Le Pont, Guide d’application de l’instruction Technique (ITSEOA) n°32 Ponts en béton précontraint **Laurent Labourie** Colloque Le Pont 2017 – Mise à jour Guide n°32 de l’ITSEOA2-page 6

[D. Gay, 2005]: D. Gay, Matériaux composites, 5e éd., Paris: Lavoisier, 2005.

[Dossiers du CSTC, 2004] article d’une étude réalisée by Vinciane Dieryck, ir. conseiller technologique (*), chef de projet, laboratoire Technologie du béton, CSTC Jan Desmyter, ir., conseiller technologique (*), chef de la division Technologie et Environnement, CSTC Attaque chimique des bétons ,une étude sur ,Les Dossiers du CSTC – Cahier n° 9 – 4e trimestre 2004 – page 1.

[DSG, 2016]:« How Concrete Surface Failure takes place and the best way to avoid it? », DSG Distribution serves the west Region of the U.S; web: gdistribution.com.

[ECOBATIS ,2018]: Béton projetée, **ECOBATIS.S A R L**, le site web : www.ecobatis-travaux.fr.

[EUROCODE 2, 1992]: Calcul des structures en béton et document d’application nationale. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. ENV 1992.

[Futura Science ,2020]: Définition classé sous : Maison, Parement en béton, La ragréage permet de combler les trous et de masquer les imperfections du béton, Groupe Made in futura,

[Fleming C.J, 1967]: **Fleming C.J, King G.E.M.** The development of structural adhesives for three original uses in South Africa.Proceedings of RILEM international symposium on synthetic resins in building construction.p75-92.Paris 1967.

[Glass et al , 1997]: Research of Nitrate Reduction with Halomonas Campisalis Kinetics Denitrification at PH 9 and 12.5% NaCl , Research Note, Center for Multiphase Environmental Research, Department of Chemical Engineering, Washington State University, Pullman, WA 99164-2710, USA and 2Department of Biological Sciences, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO 65409-1120, USA, accepted in revised form 1 November 2000.

[G-Sika ,2020]:SOLUTIONS ET PRODUITS > Marchés de la Construction > Béton sur chantier > Produits et systèmes > **Ragréage des bétons** Groupe Sika,2020.

[Guenaneche et al, 2014]:Guenaneche, B, Tounsi, A, Adda Bedia, E.A,2 014, “Effect of shear deformation on interfacial stress analysis in plated beams under arbitrary loading”, International Journal of Adhesion and Adhesives, 48, 1–13.

[Guide béton, 2020] : Brice Canteneur – ESTP, Issu de l'ESTP en spécialité bâtiment, Brice est passionné par le domaine de la construction et plus particulièrement par l'architecture et la beauté des bâtiments.

[Houmeur M et Lammari Y,2018] :[10, 11,12,13,14,15,16,17]_ Houmeur Mouaadh Et-Tayib Lammari ions d'épuration sous l'influence des eaux agressive, Yacine , recherche bibliographique sur les pathologies des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressive,Université 08 mai 1945 de Guelm,2018.

[Itmaizeh E, 2016] :Itmaizeh Ehab Pathologie desstructures en béton armé,projet de fin d'étude,Université de Larbi Tébessi Faculté des Sciences et de la Technologie, le 24-05-2016.

[J MAI-NHU, 2015] : Jonathan MAI-NHU, Corrosion des armatures: intérêt des inhibiteurs de corrosion et méthodologies pour le suivi durant la vie de l'ouvrage, développement durable durabilité 276.

[J Med, (2018)] : Mohamed Jaafar. Étude expérimentale et simulation numérique de l'usinage des matériaux en nids d'abeilles : application au fraisage des structures Nomex® et Aluminium. Matériaux. Université de Lorraine, 2018. Français. ffNNT : 2018LORR0303ff. fftel-02110350ff

[Jean-Marie Berthelot, 2012]: Matériaux composites Comportement mécanique et analyse des structures par Jean-Marie Berthelot ; 5e édition© 2012, Lavoisier, Paris ISBN : 978-2-7430-1450-6 ; page 284

[Journées Techniques AFPC-AFREM ,1997] :Compte-rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM - Durabilité des bétons — Toulouse – Laboratoire Matériaux de Durabilité des Construction - Institut national des sciences appliquées – Université Paul Sabatier à Toulouse -Décembre 1997.

[K.Hadjazi1, 2015] ; K.Hadjazi1, Z. Sereir1, H. R. E. Houachine2, M. L. Bennagadil ; Effet du Fluage sur les Contraintes d'Interface des Poutres Fissurée Réhabilitées par Plaque

en Composite ; Journal of Materials, Processes and Environment December edition. Vol.3. No2.;2015.

[**Karthik R, (2014)**]: TY - JOUR AU - **Ramakrishnan, Karthik Ram** (SP -T1 - Impact behaviour of sandwich structures with nanoparticle reinforced composite face sheets PY

[**Khobzi S, 2017**] : recherche bibliographiques sur la réhabilitation des structures en béton armé projet de fin d'étude, l'Université 08 Mai 1945 de Guelma, en Juin **2017**.

[**Lachguer. A et Akyoud.2014**] : M "Les matériaux sandwich et les risques d'instabilités géométriques locales", Etude bibliographique, ECOLE DES MINES DE DOUAI, France, page **9**.

[**Les Dossiers du CSTC, 2007**] :un article analyse sur la Corrosion des armatures induite par la carbonatation du béton : comment s'en prémunir, par V. Pollet , ir., conseiller technologique (2), chef de la division Béton et Chimie du bâtiment, CSTC B. Dooms , ir, chercheur au laboratoire Technologie du béton, CSTC G. Mosselmans, dr. ir., chef de projet,CRIC (1), Les Dossiers du CSTC – N° 3/2007 – Cahier n° 2 – Projets – études -page1.

[**Les solutions techniques, 2011**] les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton, 2011.

[**M BOUKHEZAR, 2009**] : Mohcene BOUKHEZAR, REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POUTRES AU MOYEN DES MATERIAUX COMPOSITES, **2009**

[**Maalej ET Bian, 2001**]: “Interfacial shear stress concentration in FRP strengthened beams”, Composite Structures, 54(4), 417–426.

[**Malek et al., 1998**]: Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end”, ACI Structural Journal, 95(1), 142–152.

[**Mapefer ,2005**] : Produits anticorrosion ,Mortier anticorrosion pour la protection des armatures | **Mapefer**

[**Mapefer ,2014**] : Découvrez notre newsletter gratuite Bâtiment - Gros œuvre Mapei, spécialiste des adhésifs et produits chimiques pour le bâtiment, lance un nouveau ragréage mural polyvalent en poudre allégé et à haut rendement.

[**Mertani B - Med Bilel, (2011)**] : Boubekour Med Bilel., Modélisation numérique et expérimentale du comportement des panneaux sandwichs a âme en nids d'abeilles",mémoire magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF .UFAS (ALGERIE),

[**Michael G., 2011**] Michael G. Grantham, Concrete Repair: A Practical Guide CRCr Press Taylo & Franis Group,LLC en 05.11.2011.

[**Minh Phuc HOANG, 2015**] : **Homogénéisation** analytique de structures en nid d'abeilles pour des plaques composites sandwich, parMinh Phuc HOANG THÈSE pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE–ARDENNE UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE–ARDENNE le 3 Juillet 2015.

[**Mukhopadhyaya et Swamy, 2001**]:“Interfacial shear stress: a new design criteria for plate debonding”, J Compos Constr, 5, 35–43.

[**Nabila B ,2011**] : Nabila Boualla,une recherche bibliographique sur la Réhabilitation des ouvrages en béton armé ,Université'Oran ,license **2011**.

[**Nidaplast, (2014)**] : **Le nidaplast 8HP** est un nid d'abeille en polypropylène destiné à servir d'âme pour les panneaux sandwichs structuraux. , Nidaplast rue Paul Vaillant Couturier 59224 Thiant, France, **2014**

[**Pasia, (2017)**] : **L'âme en nid d'abeilles en aluminium légère, chemin de fer forme la structure en nid d'abeilles en aluminium, nom de produit Pasia ; Certification : ISO9001-2008 ; Numéro de modèle : CFNHC3, 2017 - 2020** honeycombcompositepanels.com.All rights reserved.

[**Per Loll, 2017**]: credit; with permission by Per Loll, news about Move Over, Superman! NIST 'Spectral Fingerprinting' Sees Through Concrete to Detect Early Corrosion, National Institue of Standareds and Technology « NIST »U.S, rleased April, 2017-Update July 6, 2018.

[**Plascore GmbH & Co.KG, 2020**] : La construction navale > Matériaux et peintures > Matériau d'âme nid d'abeille >**Plascore GmbH & Co.KG** Matériau d'âme nid d'abeille en aramide - nomex® PN2

[**R. Pinzelli, 1995**] : R. Pinzelli, Fibres aramides pour matériaux composites, Tech. L'ingénieur. Matériaux Fonct. (1995).

[**Raharinaivo et al., 1998**]: Radionuclide SourceTerm for HLW Glass,Spent Nuclear Fuel and Compacted Hulls and END(CSD-C Waste) Karlsruhe Institute of Technology Kit SCIENTIFIC Reports 7624,BY Bernard Kienzler, Marcus Altmaier, Cheistine Bule and Volker Mertz ,report-Nr-KT SR 7624,KIT SCIENTIFIC PUBLISHING

[**RAPPORT TECHNIQUE, 2017**] : RAPPORT TECHNIQUE « PRÉPARATION DE SURFACE POUR RÉPARATION DE BÉTON», 2017.

[Researchgate, 2020]: Etude et analyse des contraintes d'interface dans les poutres hybrides sous l'effet des déformations différées - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Poutre-simplement-appuyee-appuyee-renforcee-par-une-plaque-FRP-Les-contraintes_fig1_261724483, accessed 19 Aug, 2020.

[Roberts, 1989]: "Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams", Structure Engineering; 67(12), 229–233.

[Roberts et Hajji-Kazemi, 1989]: "Theoretical study of the behavior of reinforced concrete beams strengthened by externally bonded steel plates", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 87(2), 39–55.

[Smith et Teng, 2001]: Interfacial stresses in plated beams", Engineering Structures, 23(7), 857–871.

[Solutions béton, 2013]: http://doc.lerm.fr/wp-content/uploads/2013/08/carbonatation_carde.pdf (La carbonatation) [Solutions béton - Hors-série]

[T.Chaussadent, J.Luc Clément] : bilan de deux opérations de recherche du LCPC, Renforcement des ouvrages en béton par collage de composites.

[T.HASSAINE DAOUADJI ,2013] : Analyse des contraintes d'interface dans les poutres en béton armé endommagées renforcées par collage de plaque en matériau composite, Algérie Equipment.

[Taljsten, 1997]: Strengthening of beams by plate bonding", J Mater Civil Eng ASCE, 9(4), 206–212.

[TECHNO BÉTON, 2014]: TECHNOBÉTON3 LE FAÏENÇAGE

[Teng et al., 2002]: "FRP-strengthened RC. Structures", West Sussex: Wiley; 2002

[Tom Bitzer, 1997].: T. Bitzer, Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing, Springer, 1997.

[Tounsi A, 2006]: Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate", International Journal of Solids and Structures.

[Tounsi et al, 2009]:A. Tounsi, T. Hassaine Daouadji, S. Benyoucef, E.A. Adda Bedia; Interfacial stresses in FRP-plated RC beams: Effect of adherent shear deformations; International Journal of Adhesion and Adhesives.

[Tounsi et Benyoucef, 2007]: “Interfacial stresses in externally FRP plated concrete beams”, International Journal of Adhesion and Adhesives, 27, 207–215.

[Triantafillou ET Deskovic, 1991]: Triantafillou, T.C., Deskovic, N. (1991), “Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior”, J Eng Mech ASCE, 117(7), 1652–1672.

[Vilnay, 1988]: The analysis of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates”, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 10(2), 73–78

[W. De Caluwé & M. Le Begge ,2007] : (Réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)) Note d’information technique 231(CSTC).Page 7

[WATCO Fr ,2014] : **Béton rapide** .Comment réparer rapidement les sols et trous béton. Pose d’un mortier de réparation époxy .**WATCO France** Mise en ligne : 6

[Weber ,2018] : Réparer les bétons dégradés, Adoptez la solution Weber, La solution Weber détaillée et illustrée pas-à-pas et tous les produits utilisés. La préparation du support, **Saint-Gobain**

[Ye, 2001]: “Interfacial shear transfer of RC beams strengthened by bonded composite plates”, Cement Concrete Compos, 2001 ; 23, 411–417.