

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique

جامعة البليدة 1

Université de BLIDA 1/S.R.C.C



قسم الهندسة المدنية

Département de Génie Civil

Thème:

**Les Nano-composites dans le domaine
Génie Civil**

Applications et Objectifs

Encadré par :

- Dr Mouloud Abdessemed

Elaboré par :

- Melle Senhadji Linda

Master II Promotion

2014-2015

ملخص:

هذه الأطروحة تتطرق لدراسة مركبات النانو لتدعيم مختلف الإنشآت المتواجدة في مجال الهندسة المدنية، حيث أنها تتميز بخصائص جيدة وآليات فعالة مقارنة بالمواد المركبة الكلاسيكية.

مركبات النانو تتكون من توزيع مركبات دقيقة بوحدة أبعاد النانو في قالب من البوليمير، ذلك ينعكس إيجابيا في زيادة الخصائص الميكانيكية وبالتالي يجعل منها مواد مهمة ومميزة للتدعيم والتقوية، ويوسع مجالات استعمالها الميكانيكية والبلاستيكية وغيرها....

وعلى هذا الأساس قمنا بدراسة رقمية باستخدام برنامج "ANSYS 15.0" لتحديد سلوك الروافد قبل وبعد التدعيم، بتعريضها لحمل انعطاف أربع نقاط بالإضافة للتحميل وشروط التثبيت، وعليه أظهرت النتائج تطابق مع الأعمال المنجزة سابقا وتؤكد أن إصاق ألياف الكربون بصفة مثالية على الروافد الخرسانية يعطي مقاومة أفضل لمنع تدهور البنية.

الكلمات المفتاحية: مركبات النانو ، مواد مركبة ، قالب ، التدعيم ، الخصائص الميكانيكية، الراتنج.

Résumé :

Ce travail de recherche consiste à étudier des matériaux innovants « Nano-composites » pour le renforcement des structures en génie civil, tout en référant au rapport poids / performance étant donné meilleur que celui des matériaux composites classiques.

Les nano-composites sont des matériaux constitués d'une matrice polymère dans laquelle sont dispersées des particules inorganiques de taille nanométrique, de natures et formes variées, qui vont jouer le rôle de renfort et vont permettre d'améliorer les propriétés mécaniques de la matrice dans laquelle elles sont incorporées, ce qui en fait des matériaux intéressants et utilisables dans diverses applications industrielles comme le pneumatique ou les plastiques dont l'amélioration des propriétés mécaniques est capitale .

Dans ce contexte, une analyse numérique par modélisation des éléments finis a été établie par le biais du logiciel commercial Ansys version 15.0, afin de déterminer le comportement des poutres avant et après renforcement sous flexion quatre points, sous chargement et conditions d'appuis. Les résultats obtenus montrent leur conformité avec les travaux de la littérature et confirment que le collage parfait des composites (FRP) sur les poutres donne une meilleure résistance vis-à-vis à la dégradation de la structure.

Mots clés : Nano-composite, composite, matrice, renforcement, propriétés mécaniques, résine.

Abstract :

This research focuses on the study of Nano-composite materials for strengthening buildings in civil engineering field, because they offer better mechanical properties than fiber reinforced polymer (FRP).

Nano-composite are given by insertion of Nano order particles in polymer matrix, for this reason mechanical properties increase well and become very important, strong, also interesting for use in several applications and industry like pneumatic, plastic...

In this way, our purpose is to do analysis by business software "Ansys 15,0" and study the behavior of concrete beams before and after strengthening in four points flexion, with including conditions support and loading, so results given are following works doing and confirm resistance fiber reinforced polymer (FRP) on beam without resin.

Keywords: Nano-composite, fiber reinforced polymer, matrix, strengthening, mechanical properties ,resin.

Dédicaces

À mes très chers parents.

Ma mère qui m'a soutenu tout au long de ma vie.

Mon père qui m'a tout donné.

À mes chères sœurs Lamia, Fadhila, Manel, Asma , Hadjer.

Et mes chers frères Fethi et Aimen.

Remerciements

Toute ma gratitude et mes remerciements vont à ALLAH le tout puissant et miséricordieux de m'avoir donné la force, la santé et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Un grand remerciement à mon encadreur et Chef de Département Génie Civil à l'université de Blida1 Dr ABDESSEMED Mouloud, pour leur dévouement, conseils, soutien moral et pour tous les efforts et patience qu'il a fournis afin de me faciliter et m'aider à accomplir ce travail, car sans leur présence et enrichissement de connaissances, ce travail n'aurait pas être mené à bien.

Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail et ont bien voulu me faire l'honneur d'assister à ma soutenance.

Sans oublier de remercie aussi l'ensemble des enseignants du département Génie Civil de l'université de Blida qui ont participé à ma formation en graduation et en post-graduation, ainsi que tout l'encadrement administratif pour leur collaboration et aide.

Finalement je remercie tous mes amis et proches et tous ceux qui ont contribués de près et de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Table des Matières

Résumé.....	i
Dédicaces.....	ii
Remerciements	iii
Tables des matières.....	iv
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des symboles et abréviations	ix
Chapitre I : Introduction générale	01
Chapitre II : Etude bibliographique.....	02
II.1- Renforcement des structures en génie civil.....	02
II.2- Méthodes et techniques de renforcement par collage de composites.....	24
II.3-Types de ruptures de renforcement par composites.....	44
II.4- Résines époxydiques appliquées pour le renfort des structures.....	55
II.5-Applications en ALGERIE et avis techniques.....	59
Chapitre III : Nano-composites dans le domaine de renfort.....	63
III.1- Introduction.....	63
III.2- Définition d'un Nano-composite.....	63
III.3- Classification des Nano-composites.....	64
III.4- Effet de taille : du micro au nano.....	68
III.5- Historique et applications.....	71
III.6- Données économiques et production mondiale des nano-composites.....	77
III.7- Avantages et limites des nano-composites.....	79
III.8- Dispersion et distribution des nano-charges.....	79
Chapitre IV : Analyse numérique.....	81
IV.1- Introduction.....	81
IV.2- Aperçu sur le logiciel ANSYS.....	81
IV.3- Modélisation par ANSYS.....	83
IV.4-Modélisation numérique d'un élément structural renforcé par nano- composites.....	92

Chapitre V : Résultats et discussions.....	99
V.1- Introduction.....	99
V.2- Charge-déplacement.....	99
V.3- Charge-déformation	102
V.4- Calibrage du modelé numérique.....	104
V.5- Comparaison et commentaires	104
Chapitre VI: Approche avec d'autres recherches.....	105
VI.1- Etudes comparatives avec les résultats d'autres chercheurs	105
VI.2- Commentaire des études comparatives.....	111
Chapitre VII: Conclusions et recommandations.....	112
Références bibliographiques.....	113

Liste des Figures

Figure II.1 : Carbonatation du béton+ corrosion des aciers	03
Figure II.2 : Agression par les sulfates.....	04
Figure II.3 : Présence de sels de déverglaçage.....	05
Figure II.4 : Principe de la réaction alcali-granulats résultant en des fissures dans toutes les directions.....	05
Figure II.5 : Exemple d'un poteau court.....	06
Figure II.6 : Renversement de bâtiments sous l'action sismique	07
Figure II.7 : Réfection des bétons et protection des armatures.....	09
Figure II.8 : Renforcement de poteau au moyen de profilés métallique.....	10
Figure II.9.1: Projection par voie sèche	12
Figure II.9.2 : Projection par voie humide	12
Figure II.10: Renforcement au moyen de béton projeté.....	13
Figure II.11 : Renforcement d'un viaduc par tôles collées	15
Figure II.12.1:Un tracé rectiligne d'une précontrainte	17
Figure II.12.2: Tracé polygonal d'une précontrainte.....	17
Figure II.13: Injection de résine polyuréthane	18
Figure II.14: exemple de renforcement par TFC.....	23
Figure II.15 : Répartition renfort- matrice.....	25
Figure II.16 : Les unidirectionnels.....	32
Figure II.17 : Toile ou taffetas	32
Figure II.18 : serge	32
Figure II.19 : satin.....	32
Figure II.20 : Tissu multiaxial -Tissu 3D ou tresse	33
Figure II.21 : Tissu hybride carbone - aramide	33
Figure II.22 : Température de transition vitreuse	34
Figure II.23 : Influence de la température sur la contrainte de traction d'une résine	35
Figure II.24 : Influence de l'humidité sur la contrainte de traction d'une résine	35
Figure II.25 : Influence de la durée du feu sur le comportement du composite.....	36
Figure II.26 : Mise en œuvre de bandes de renforts sur un pont	37
Figure II.27 : Renforcement d'une cheminée par des bandes	37
Figure II.28 : Mise en œuvre de bandes de renfort en sous face d'une dalle et sur des poutres	37
Figure II.29 : Différentes possibilités de placements des renforts sur une poutre	38
Figure II.30 : Bandes de renforts en sous face d'une dalle	38
Figure II.31 : Bandes de renforts autour d'une trémie	38
Figure II. 32 : Types de disposition des renforts sur un poteau.....	39
Figure II. 33 : Pont blanc d'El Harrach (Alger) avec dégradation au niveau de la pile	43
Figure II.34: comparaison de comportement entre différent matériaux	44
Figure II.35: Comportement structural d'une poutre renforcée	44
Figure II.36: Efforts repris dans une tranche de poutre renforcée	45
Figure II.37: délaminage de l'enrobage typique de décollement de l'extrémité de la plaque	46
Figure II.38: décollement à mi porté initié par fissure de flexion et/ou effort tranchant.....	46
Figure II.37: définition des paramètres	50
Figure II.38: Application de la colle structurale sur l'interface.....	61
Figure II.39: Application de la résine d'injection	62
Figure III.1 : Définition morphologique de nano-composites	63
Figure III.2 : Géométrie 9de différents types de renforts	66
Figure III.3 : Représentation schématique des différentes morphologies des nano-composites polymère/argile.....	67

Figure III.4: Tortuosité du chemin de diffusion.....	74
Figure III.5 : Propriétés d'inflammabilité	76
Figure III.6.1 : Production mondiale (en tonnes) de nano-composites polymères.....	78
Figure III.6.2 : Production mondiale (montant en millions de dollars) de nano-composites polymères.....	78
Figure III.7. Concept de dispersion et distribution dans les nano-composites.....	80
Figure IV.1: Elément Solid 65 à 3D.....	84
Figure IV.2 Comportement typique du béton sous un chargement uniaxial	84
Figure IV.3 Diagramme contrainte-déformation simplifié du béton en compression.....	86
Figure IV.4: Elément Link180 à 3D spar	86
Figure IV.5 Diagramme contrainte – déformation de l'acier	87
Figure IV.6: les différentes approches pour la modélisation de l'acier du béton armé	88
Figure IV.7: Solid 185 – 3-D layered structural solid	89
Figure IV.8: Courbe contrainte – déformation du composite CFRP	89
Figure IV.9: INTER 205 – Cohesive structural	91
Figure IV.10: Schéma statique de la poutre d'essai	92
Figure IV.11: Modèle E.F choisi pour géométrie de la poutre	93
Figure IV.12: Connectivité d'éléments, (a) connections de l'élément béton et l'acier, (b) connections de l'élément béton et la couche de FRP.....	93
Figure IV.13: Chargement et conditions aux appuis pour le modèle par éléments finis.....	95
Figure IV.14.a: Distribution des contraintes dans la poutre teste	96
Figure IV.14.b: Distribution des contraintes dans la poutre renforcée	96
Figure IV.15.a: Distribution des déformations dans la poutre teste.....	97
Figure IV.15.b: Distribution des déformations dans la poutre renforcée.....	97
Figure IV.16a : Poutre teste	98
Figure IV.16b : Poutre RA1.....	98
Figure IV.16c : Poutre RA2	98
Figure IV.16d : Poutre RA3.....	98
Figures V.1 (a, b, c): Progression de la flèche pour la poutre de référence.....	100
Figures V.2: Progression de la flèche pour la poutre renforcée.....	101
Figures V.3 : Coubre flèche- déformation poutres renforcées PT et RA1	101
Figures V. 4a : Distribution des déformations pour la poutre teste PT (non renforcée).....	102
Figures V. 4b : Evolution des déformations pour la poutre teste PT (non renforcée).....	102
Figures V5a : Distribution des déformations pour la poutre renforcée RA1.....	103
Figures V5b : Evolution des déformations pour la poutre renforcée RA1.....	103
Figure VI.1: Montage de la poutre F01 et F11	105
Figure VI.2: Montage de la poutre renforcée par une plaque de CFRP (S6-PRE3)	105
Figure VI.3: Modélisation numérique de la poutre F01.....	106
Figure VI.4: Modélisation numérique de la poutre F11.....	106
Figure VI.5: Modélisation numérique de la poutre S6-PRE3.....	106
Figure VI.6: Dimensions de la poutre d'essai	108
Figure VI.7: Renforcement poutre par Lamelle Sika Carbodur	109
Figure VI.8: Renforcement poutre par Sika Carbodur et sika wrap	109
Figure VI.9: Double renforcement aux faces latérales et face inférieure	109
Figure VI.10: Renforcement en bandes aux faces latérales et lamelle en face inférieure	110

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : avantages et inconvénients de divers produits.....	20
Tableau II.2: les différents types de composites	27
Tableau II.3: caractéristiques de divers types de fibres de verre pour matériaux composites	28
Tableau II.4: caractéristiques de divers types de fibres polymères pour matériaux composites	29
Tableau II.5 caractéristiques de divers types de fibres de carbone pour matériaux composites.....	30
Tableau II.6: Comparaison qualitative entre fibres	31
Tableau II.7 : les résultats expérimentaux des études	52
Tableau II.8 : influence de la quantité de tissu sur la résistance ultime et le mode de rupture.....	53
Tableau III.1: Quelques exemples de nano- charges.....	68
Tableau III.2.Comparaison des caractéristiques géométriques de différents renforts microniques et Nanométriques.....	69
Tableau III.3 : Propriétés mécaniques du Polyamide 12 en fonction de la structure.....	73
Tableau IV.1: Processeurs disponibles dans le logiciel ANSYS 15	83
Tableau IV.2: Propriétés du béton.....	86
Tableau IV.3: Propriétés de l'acier.....	87
Tableau IV.4: Caractéristiques mécaniques des composites.....	90
Tableau IV.5 : Propriétés de la résine structurale.....	91
Tableau IV.6 : Propriétés de la résine amélioré ou nano-résine.....	91
Tableau IV.6 : Eléments du maillage de la poutre non renforcée.....	94
Tableau VI.1 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques	101
Tableau VII.1 : Résultats expérimentaux et numériques obtenus	104
Tableau VII.2Comparaison des résultats expérimentaux et numériques	107

Liste des symboles et des abréviations

CFRP : Carbon fibers reinforcement polymer

MEF : Méthode des éléments finis

TFC : Tissus de fibre de carbone

E : module de Young (en Mpa).

FRP : Fibers reinforcement polymer

f_b : Limite élastique du béton (en Mpa)

A_s : Section des armatures tendues (cm²)

A_s' ; Section des aciers comprimées (cm²)

f_e : Limite élastique de l'acier HA (en Mpa)

s : Section des aciers (cm²)

E_p : Module d'élasticité du composite (en Mpa)

f_{pu} : Limite élastique du composite (en Mpa)

f_p : Limite élastique de verre (en Mpa)

G_s : Module de cisaillement de l'acier (en Mpa)

G_p : Module de cisaillement du composite (en Mpa)

G_{xy} , G_{yz} et G_{xz} : Modules de cisaillement du composite de FRP dans les plans (xy, yz et xz)

ν_{xy} , ν_{yz} et ν_{xz} : Coefficients de poisson major pour les trois plans

E_x , E_y , et E_z : Modules d'élasticité du composite de FRP dans les directions (x, y et z) (Mpa)

h : Hauteur face latérale de la poutre (m)

L : Portée de la poutre (m)

PT : Poutre test

RA1 : Poutre renforcée 1

E_c : Module Young concrete (béton) (Mpa)

f'_c : Contrainte Béton à la compression (Mpa)

f'_t : Contrainte Béton à la traction (Mpa)

Chapitre I :

Introduction Générale

Chapitre I : Introduction Générale

Considérées comme l'un des moteurs de la prochaine révolution industrielle, les nanotechnologies présentent un potentiel de développements et d'applications considérables, notamment dans les domaines des biotechnologies, des matériaux, et des technologies de l'information et de la communication. Les nanotechnologies traitent aussi bien de la manipulation des atomes et molécules (dont la dimension typique est le nanomètre (10⁻⁹ m), de la miniaturisation des structures et de l'exploitation des nouvelles propriétés, phénomènes et procédés spécifiques à l'échelle nanométrique. Elles ouvrent des voies tout à fait nouvelles et leur développement nécessite souvent des compétences pluridisciplinaires. Déjà utilisées dans plusieurs secteurs industriels – construction, électronique, transport, pharmacie et cosmétique – ces technologies représenteront un marché mondial de l'ordre de 1000 milliards d'euros en 2010. La plupart des pays ne s'y trompent pas en soutenant massivement et durablement leur développement.

Dans le domaine de recherche sur les matériaux, l'élaboration de nano-composites polymères se révèle comme une activité de recherche multidisciplinaire dont les résultats pourraient élargir le champ d'application des polymères. Par rapport aux composites conventionnels, ces nano-composites présentent des améliorations quant à leurs propriétés mécaniques, thermiques, électrique, optiques et à effet de barrière. En outre, ils peuvent réduire de manière importante le niveau de flamabilité. Des contenus en charge de 2 à 5 % en masse peuvent se traduire par des propriétés mécaniques semblables à celles de composites conventionnels ayant des taux de renfort de 30 à 40%. Différents types de charge peuvent être utilisées, à titre d'exemple : le carbonate de calcium, le noir du carbone, le graphite, les particules métalliques et les charges minérales. Parmi ces nano-composites, ceux à base d'argile ont connus un développement assez intéressant.

Dans notre thème d'étude ; « les nano-composites dans le domaine génie civil, applications et objectifs », s'est déroulé selon les axes suivants :

Le premier chapitre et le deuxième présentera respectivement une introduction générale et une étude bibliographique qui portera sur les causes des désordres des structures en béton, les techniques de réparation et renforcement traditionnels, de même innovantes par collage de composites, les différents types de ruptures d'une poutre renforcée, pour en arriver au procédé de décollement de la résine, et étude de cette dernière avec ses applications en Algérie.

Le troisième chapitre présentera les Nano-composites dans le domaine de renfort des composites, en offrant une meilleure rigidité et caractéristiques mécaniques élevés à la résine époxydique à l'échelle nanométrique.

Le quatrième chapitre présentera le protocole numérique en utilisant le logiciel ANSYS version 15, qui traitera 04 variantes de poutres (poutre test en béton armé, poutre en béton armé renforcée avec collage de composite et interface compacte, poutre en BA renforcé avec composite+résine, et la dernière poutre en BA sera en composite+résine avec des caractéristiques améliorés).

Les derniers chapitres constitueront les résultats et discussions de l'analyse numérique, approche avec d'autres recherches, en fin de compte conclusions et recommandations.

Chapitre II :
Etude Bibliographique

Chapitre II : Etude Bibliographique

II.1-Renforcement des Structures en Génie Civil

II.1.1- Introduction

La détermination des causes de dégradations et de défaillances des structures en génie civil est essentielle pour réussir les interventions en termes de qualité, durabilité, sécurité et rentabilité. Le diagnostic des ouvrages de nos temps s'avère une étape très importante dans le choix des méthodes et techniques de réparation ou/ de renforcement à employer, de même dans la manière à introduire ou à utiliser des produits innovant et leurs efficacités pour répondre aux déficiences causés par l'endommagement de l'ouvrage.

II.1.2- Causes des désordres des structures en béton

Avant, pendant et après la prise du béton, de multiples phénomènes interviennent et les conditions de leur déroulement influencent directement la durabilité du béton.

Le système chimique qui caractérise le béton se traduit par un milieu fortement basique dont le pH varie de 12.5 à 13.5. Ce système est en déséquilibre avec le milieu environnant dont le pH est généralement très inférieur. Ce déséquilibre favorise de multiples formes d'agressions chimiques. L'eau est le premier vecteur d'agression: pluie, neige, eaux souterraines, eau de mer. Cette eau chargée de substances chimiques agressives (chlorures, sulfates, dioxyde de carbone...) pénètre dans le béton par les réseaux de fins capillaires qui le parcourent dans sa masse, ou par des fissures.

Il existe donc un paramètre qui joue de façon majeure sur la durabilité: il s'agit de la porosité capillaire du béton durci. Plus le béton est poreux, plus il est exposé aux agressions extérieures, synonymes d'altération et donc d'atteinte à la durabilité.

Mais le béton possède aussi des mécanismes de défense, par ses couches protectrices, s'il est suffisamment dosé et de forte compacité, les risques d'altération sont relativement faibles [01].

Il y a plusieurs origines des dégradations :

- Dégradation d'origine chimique.
- Dégradation d'origine mécanique.
- Dégradation d'origine physique.

II.1.2.1- Les dégradations dues aux attaques chimiques.

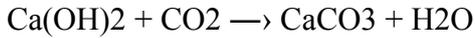
La dégradation peut provenir d'une attaque chimique par un agent se trouvant :

- sous forme de gaz d'origine naturelle ou industrielle.
- sous forme liquide.
- sous forme solide du sol ou résidu industriel.

Elle peut aussi être d'origine interne [01]:

a) Carbonatation du béton

Lors de la prise du béton, il se produit une réaction chimique complexe qui se traduit notamment par la formation d'hydroxyde de chaux Ca(OH)_2 . Cette chaux libérée est présente dans toute la masse du béton. De ce fait, le pH initial du béton est de l'ordre de 12.5; dans le temps, le béton perd environ 50% de l'eau de gâchage qu'il contenait lors de la prise. Cette perte d'eau crée un réseau capillaire à l'intérieur du béton qui favorise la pénétration du dioxyde de carbone CO_2 présent dans l'air et alimenter une réaction chimique appelée: carbonatation



Cette réaction est irréversible précipite l'hydroxyde de calcium sous forme de sel insoluble. Le béton se carbonate et son pH diminue pour atteindre une valeur de 9.

Pour protéger le béton contre la carbonatation il faut le confectionner à faible rapport E/C pour réduire la porosité du béton, et assurer un enrobage suffisant (qui peut être complété par enduit).

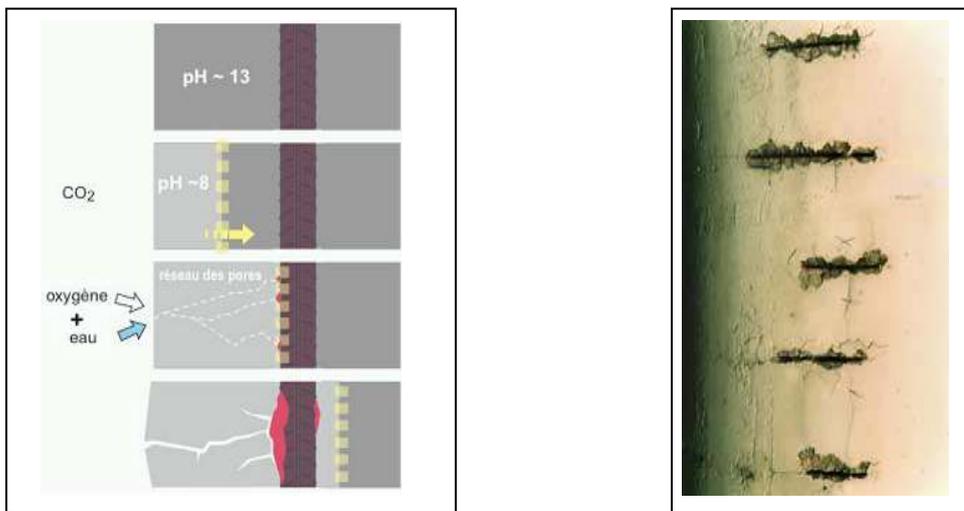


Figure II.1 : Carbonatation du béton+ corrosion des aciers [02]

b) Corrosion des armatures

La corrosion des aciers d'armatures dans le béton est issue d'un processus chimique. Pour que l'acier dans le béton se corrode (formation de rouille), il se trouve dans un milieu favorable :

- un électrolyte avec une forte conductibilité (ionique).
- une zone riche en oxygène.

La vitesse de corrosion des barres d'armatures est plus grande en présence de chlorures (l'eau de mer, sel,...)

Les chlorures ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

- ils diminuent la résistivité de l'électrolyte (le couvert de béton), ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre.
- ils permettent l'amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle (dissolution de la couche passive ou migration des chlorures à travers le film d'oxyde).

c) Attaque par les sulfates

Les sulfates sont généralement retrouvés dans:

- les eaux de mer.
- les eaux souterraines.
- les sols.
- les milieux agricoles.
- les eaux usées (domestiques et industrielles).
- Certaines industries.

Les produits les plus sensibles à l'attaque des sulfates sont : l'aluminat et la portlandite il y aura formation de sels expansifs d'ettringite (jusqu'à 400% de pouvoir d'expansion).

Les facteurs influençant l'attaque par le sulfate :

- la teneur en C3A et C4AF (qui peut réagir avec les sulfates).
- la teneur en Ca (OH) 2.
- la nature du ciment.
- la perméabilité du béton.
- la concentration des sulfates.
- la température de l'eau : la chaleur accélère la cinétique des réactions
- la cure.
- la fluctuation de l'attaque.
- la présence de l'eau (qui favorise la formation de solution agressive).
- l'abrasion.

Les moyens préventifs:

- utiliser des ciments avec faible teneur en C3A .
- utiliser un fort dosage en ciment.
- Utiliser la fumée de silice.
- faible rapport E/C.

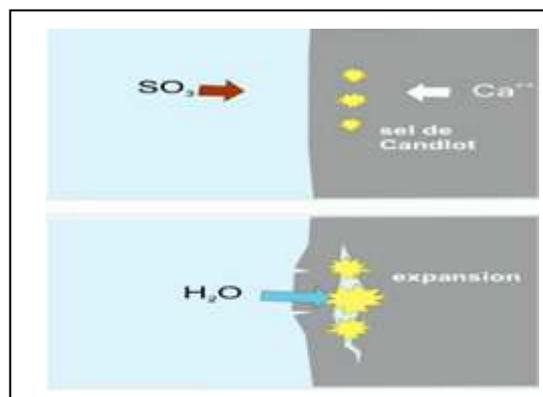


Figure II.2 : Agression par les sulfates [02]

d) Attaque par des acides

Les acides (pH<7) attaquant le béton par dissolution de la portlandite en premier et la C-S-H:

- Il y a possibilité d'attaque si pH <6.5
- Attaque sévère si pH< 5.5.
- Attaque très sévère si pH< 4.5

Il y a deux types des acides agressifs :

- Inorganiques: carbonique, chlorhydrique, fluorhydrique, nitrique, phosphorique, sulfurique

- Organiques: acétique, citrique, formique, humique, lactique, tannique.

.ACIDE + BASE => SEL + EAU

Les moyens préventifs contre ces attaques sont:

- Diminuer la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du béton par l'utilisation de:
 - Un ciment aux laitiers.
 - Un ciment alumineux ou pouzzolanique.
- Diminuer la perméabilité par:
 - Un mûrissement approprié.
 - La diminution du rapport E/C.
 - L'utilisation de la fumée de silice.

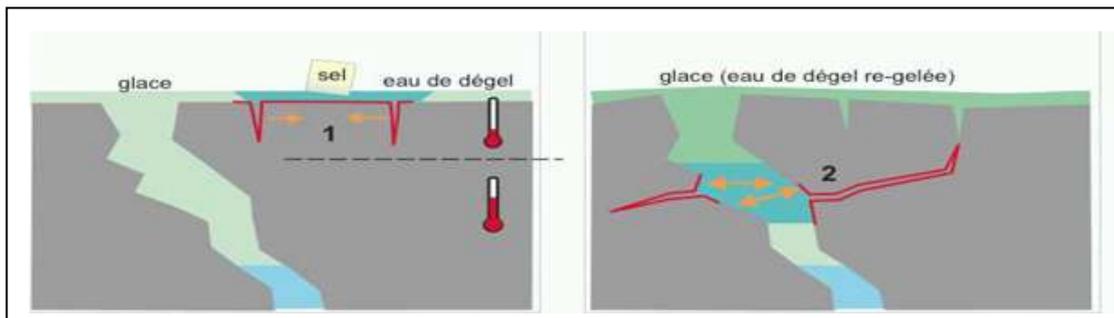


Figure II.3 : Présence de sels de déverglage [02]

e) Alkali-réaction

L'alkali-réaction est une dégradation interne du béton. L'alkali-réaction est une réaction très lente allant d'un an jusqu'à dix ans (1 à 10 ans).

Il y a trois conditions simultanées pour que l'alkali-réaction apparaisse :

- la présence d'un granulats potentiellement réactif .
- une concentration élevée des alcalins dans le ciment .
- une ambiance présentant une humidité relative > 80 % .

Donc pour avoir un béton durable il faut que les conditions suivantes soient respectées:

- un béton le moins perméable possible (une bonne formulation du béton et un faible rapport : E/C).
- un ciment à faible teneur en C_3A et alcalins.
- limiter ou fixer la portlandite : utiliser la fumée de silice ou des ciment CLK ou CHF (résistent mieux aux milieux acides surtout si le pH est <4.5).



Figure II.4 : Principe de la réaction alcali-granulats résultant en des fissures dans toutes les directions [03].

II.1-2-2 Les dégradations d'origine mécanique

a) Erreurs de conception et d'exploitation

Les différentes erreurs de conception peuvent être résumées comme suit [01] :

- un tassement.
- une poussée à vide dans les escaliers.
- une surcharge que la structure ne peut subir.
- un manque de joints.
- un manque d'armatures.

b) Défauts d'exécution

Les défauts d'exécution sont dus généralement à :

- une mauvaise position des armatures d'aciers.
- une mauvaise mise en oeuvre du béton.
- un mauvais coffrage.
- une mauvaise formulation du béton.
- un recouvrement insuffisant des armatures d'aciers.

c) Les chocs

Le phénomène de choc peut provenir de :

- les chocs des véhicules sur ponts.
- les chocs de bateaux sur piles.
- la mauvaise manutention d'éléments préfabriqués.

d) L'abrasion

Le phénomène d'abrasion est due généralement à :

- une circulation intense de l'eau (barrages),
- les charges mécaniques répétées (chaussées, dallage industriel),
- l'action du courant d'eau sur corps immergés ou flottants (piles de ponts, plate forme, etc.).

e) Les fissures

Les différents type de fissures sont :

- les fissures mécaniques (due à la compression, à la traction, à la flexion ou au cisaillement).
- les fissures dues au retrait (un retrait plastique, un retrait thermique, etc.).
- les fissures dues au gel.
- les fissures dues à la corrosion.



Figure II.5 : Exemple d'un poteau court [03].

II.1-2-3 Les dégradations d'origine physique

a) **Séisme**

Se référer aux codes de calcul dans les zones sismique, limiter le degré d'endommagement par des mesures constructives.

b) **Incendie**

Le béton a une résistance au feu convenable en cas d'incendie:

- En 1h la température est de 350°C à une profondeur de 3 cm vis-à-vis de la couche superficielle du béton, et à une profondeur de 7.5 cm elle est de 100°C.
- A 570°C : fissuration des granulats quartzeux.
- A 800°C décarbonatation du CaCO_3 .
- La vaporisation brutale de l'eau implique un éclatement du béton [01].



Figure II.6 : Renversement de bâtiments sous l'action sismique [03].

II.1.3- Techniques de réparation et renforcement des structures en béton

Avant de s'engager dans une réparation ou un renforcement de structures ou d'élément de structure, présentant des dégradations de béton ou d'armatures, il est indispensable de procéder à un diagnostic déjà cité précédemment et à la détermination des causes.

Le choix de la méthode de réparation ou de renforcement, et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, et en tenant compte des critères économiques de matériaux de construction et des techniques choisies.

Dans la grande majorité des cas, les structures en béton présentent une excellente durabilité, elles méritent donc en général d'être conservées, même si la destination ou les exigences fonctionnelles des ouvrages sont appelées à évoluer avec le temps. De plus, et bien qu'elles soient souvent massives, les constructions en béton présentent des aptitudes indéniables à la transformation et les solutions de renforcement sont nombreuses.

Le renforcement des structures, liées à un état futur projeté, sont appelées à supporter des sollicitations plus élevées que celles prévues à l'origine [01].

II.1.3.1- Le chemisage

C'est une technique classique dont l'efficacité a été largement vérifiée par l'expérience, consiste à chemiser l'élément en augmentant sa section par mise en œuvre d'une épaisseur de béton sur tout le périmètre de l'élément primitif. L'utilisation d'un micro-béton, autocompactable, pour remplir les interstices sans mode de vibration, peut s'avérer essentielle.

La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy.

S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage.

Lorsqu'il n'est pas possible de faire un chemisage complet des éléments pour le cas des façades, il faut recourir à d'autres procédés : renforcement par plaques métalliques ou bien l'épaississement de l'élément en béton sur deux faces opposées.

Les éléments de renfort doivent être ancrés dans le béton primitif : soit par boulonnage pour le cas des platines métalliques, soit par ancrage pour le cas de béton additif [04].

a-Mise en place des armatures complémentaires

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple).

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, ou des systèmes explicites de fixation (cheville, tiges collées), 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, celle-ci devra être effectuée, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée [04].

b-Protection des armatures:

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées: un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements, pour un environnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement.

On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation [04].

c-Adhérence entre les deux bétons

L'adhérence représente la résistance au cisaillement, en l'absence d'un effort de compression normal sur cette interface et d'une armature de couture qui la traverserait.

Cette adhérence est due essentiellement à une liaison chimique entre le béton existant et le nouveau béton. La valeur maximale de l'adhérence est atteinte pour des valeurs de glissement d'environ 0,01 à 0,02 mm et est maintenue pratiquement constante jusqu'à des valeurs de glissement de l'ordre de 0,05mm [04].

d-Réfection des bétons:

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre d'un mortier riche. Ce dernier doit respecter les critères :

- De la tenue d'aplomb de l'élément.
- D'une résistance mécanique supérieure ou égale au béton support.
- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support,
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs,
- D'un coefficient de dilatation thermique équivalent au béton support.
- D'une bonne protection d'aciers.

Ces critères sont assurés par l'utilisation de mortiers à base de résine pour améliorer les propriétés de l'apport, surtout lorsqu'il réagit dans la partie de l'interface où il y a plusieurs phénomènes tels que: l'influence du retrait en terme de glissement sur l'interface du béton initial et le béton nouveau [04].



Figure II.7 : Réfection des bétons et protection des armatures [04].

d- Avantages et inconvénients de la méthode :

Ce type de réparation demande généralement pour être efficace, une augmentation assez importante de dimensions des éléments structuraux et l'emploi d'un volume relativement consistant de matériaux, ce qui influe directement sur la masse de la structure comparativement aux autres moyens de renforcement qui se caractérisent par leur légèreté relative, en plus le chemisage est considérée comme une méthode non économique et non esthétique (fig II.7). (vu les sections ajoutés et les matériaux utilisés), qui souffre des difficultés d'exécutions et qui demande une main d'œuvre bien qualifiée, ainsi il faut assurer une liaison monolithique avec les structures existantes(adhérence ancien-nouveau béton, zone de recouvrement et d'ancrage d'acier),respecter la résistance du béton et le coulage avec vibration. En opposé le chemisage offre une meilleure rigidité et bien recherché pour l'ensemble de la structure.

II.1.3.2- Profils Métalliques

L'association des profils métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. La réalisation ainsi d'une structure mixte acier-béton dont il faut assurer la compatibilité entre ces deux matériaux est indispensable et nécessaire.

Cette compatibilité entre les deux matériaux est liée directement à la qualité de l'interface (acier-béton) pour bien transmettre les efforts internes.

L'intérêt de cette méthode est la rapidité de réalisation in-situ, les pièces métalliques sont préfabriquées en atelier, et leur montage s'effectue à l'aide de cheville ou tiges ancrées.

L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur transport et mise en place.

L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis se positionnent correctement au montage. Il est recommandé d'envisager des possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux constructions métalliques nouvelles [04].



Figure II.8 : Renforcement de poteau au moyen de profils métallique [04].

II.1.3.3- Le béton projeté

La technique du béton projeté est assez ancienne. Les premières applications remontent en effet à 1907, aux Etats Unis. D'où elle est largement répandue, tant sur un plan de renforcement des structures ou éléments structurels insuffisantes, que sur un plan de réparation des structures ou éléments structurels défaillantes, et exigeant une mise en œuvre soignée. Le béton projeté peut éventuellement être associé avec un autre mode de réparation, qui est le rajout d'armatures d'aciers. Cette méthode de projection de béton peut être réalisée, soit par voie sèche ou bien par voie humide.

Le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car cette voie permet de recueillir un béton très compact.

Cette projection est effectuée à grande vitesse de lancement, assurant ainsi :

- une pénétration en grande profondeur dans les pores du support à renforcer.
- une bonne adhérence de l'interface.

Si les dégradations sont profondes, on procède au préalable à un repiquage ou une démolition des surfaces de béton, sinon on fait appel au procédé de sablage pour le cas des dégradations superficielles. La qualité des matériaux d'adjonction ou de rajouts, doit être au moins égale à celles des matériaux d'origine des ouvrages.

Dans la mesure du possible, la lance de projection doit être tenue perpendiculairement à la surface à traiter, et à une distance moyenne de 1.2m.

En faisant un nombre de passes aussi faible que possible, il faut chercher à réaliser un enrobage régulier, et obtenir ainsi une couche compacte. La projection verticale vers le bas n'est pas recommandée, ainsi qu'un talochage n'est pas souhaité [03] et [04].

a-Description des deux méthodes

• Projection par voie sèche

La vitesse des éléments du mélange à la sortie de la lance est de l'ordre de 100m/s. elle décroît plus rapidement pour les éléments de faible masse (eau- fines -ciment) que pour les gros granulats. Il se forme alors sur la surface d'application une fine couche de pâte formée par l'eau et le ciment, qui retient instantanément les granulats fins, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaissement, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir, ce qui donne :

- un serrage énergétique dû à la grande vitesse de projection.
- une bonne adhérence due à la richesse en ciment dans la zone au contact de la surface d'application.

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité. Toutefois les normes préconisent un dosage pas moins de 280 kg/m³ de ciment ayant une résistance à la compression supérieure à 25 MPa [04].

• Projection par voie mouillée

La vitesse de transport et de projection est inférieure à 1m/s, nettement plus faible que dans le cas d'une projection à voie sèche. Le mélange ayant sa composition définitive au passage de la lance, il n'y a pas de surdosage dans la zone de contact avec la surface d'application.

Pour obtenir des performances mécaniques équivalentes à celles d'un béton projeté par voie sèche, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment. L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir la maniabilité désirée, avec un dosage en eau aussi faible que possible, une telle consistance du béton exigera un affaissement au cône correspondant, de l'ordre de 12 cm [04].

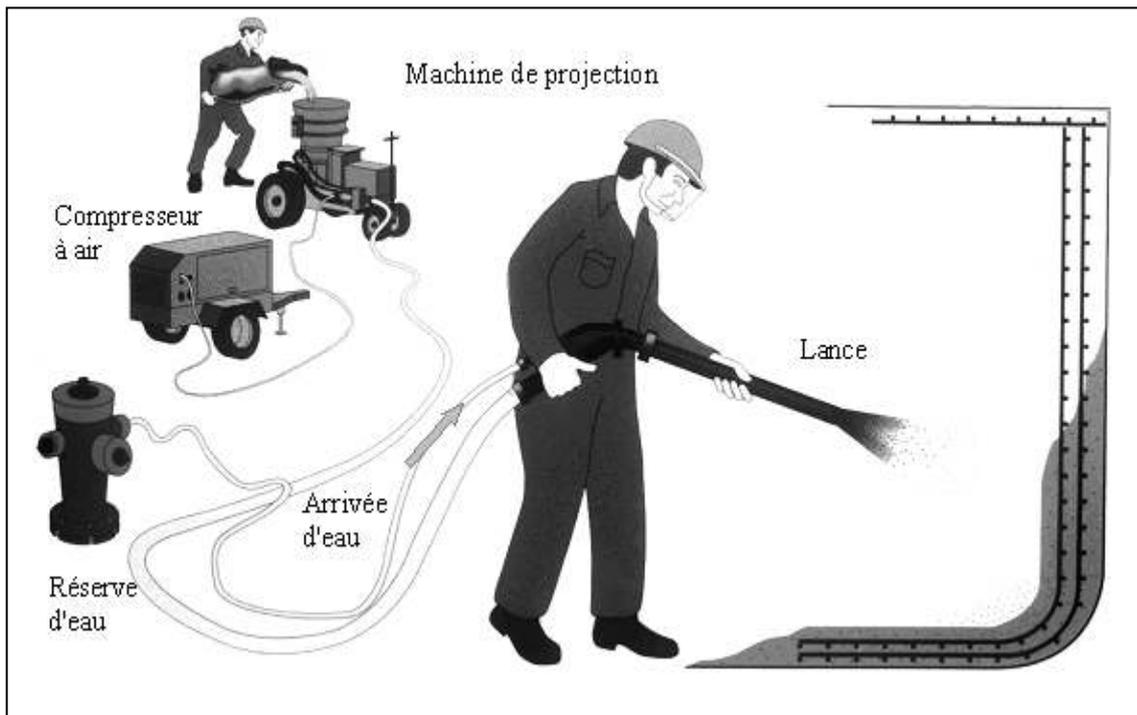


Figure II.9.1: Projection par voie sèche [05].

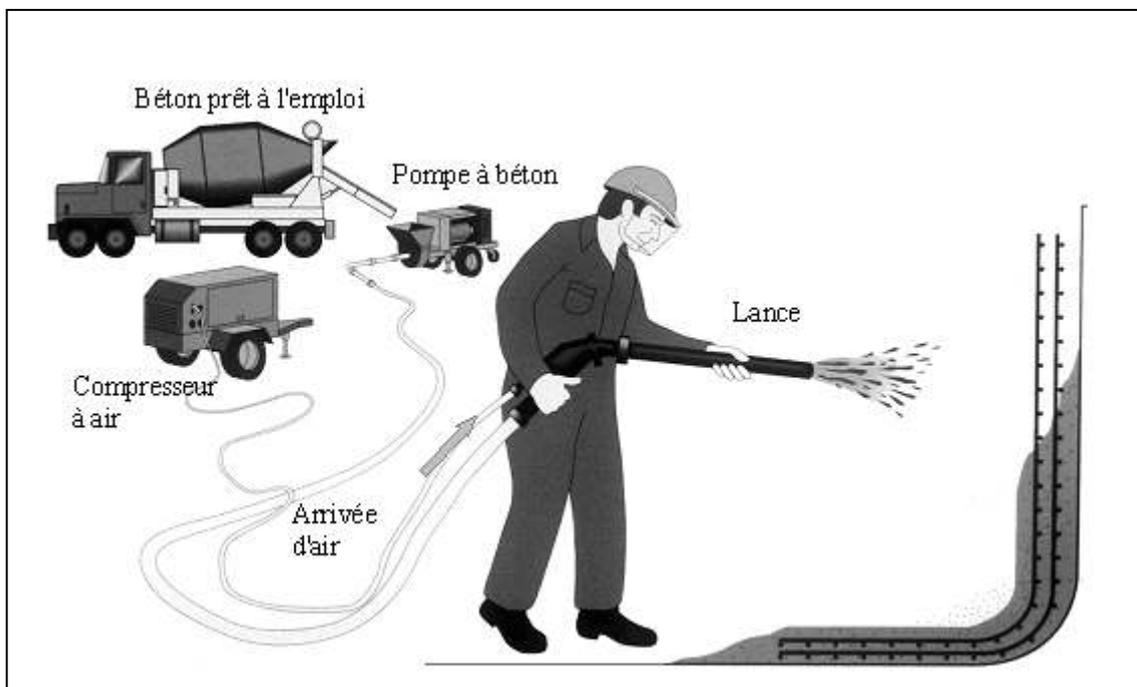


Figure II.9.2 : Projection par voie humide [05].

• **Avantages de chaque méthode**

1- Par voie sèche :

- possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm)
- Un dosage relativement faible en ciment.
- Un faible rapport E/C.
- Un compactage énergique
- Une bonne adhérence sur le support.
- Une pénétration en grande profondeur dans les pores.
- Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise

2- Par voie mouillée :

- Composition uniforme de la couche projetée
- Pas de rebondissement violent.
- Pas de production de poussières [04].

• **Inconvénients de chaque méthode**

1- Par voie sèche :

- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement.
- Production de poussières.

2- Par voie mouillée :

- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire.
- Compactage faible.
- Nécessité d'accélérateurs de prise [04].



Figure II.10: Renforcement au moyen de béton projeté [04].

En prenant en compte le matériel et les matériaux utilisés, le béton projeté est considéré comme une méthode non économique, en plus de la mauvaise adhérence entre le béton injecté et le support dans plusieurs cas(en absence d'une résine époxydique) et le rebondissement des matériaux pendant la mise, des recherches sont orientés vers une autre technique plus efficace qui est la technique des Tôles Collées.

II.1.3.4- Les Tôles Collés

La technique du collage acier-béton s'est développée au début des années soixante suite à l'apparition sur le marché de colles de type époxydiques possédant des caractéristiques d'adhésion élevée et susceptibles de transmettre des efforts non négligeables. C'est dès 1962 que Lerchenthal a proposé de remplacer les armatures conventionnelles par des plaques d'acier collées en sous face. Mais c'est à Durban (Afrique du sud) que le premier cas d'utilisation de cette technique, suite à l'omission accidentelle des aciers des poutres, est répertorié en 1964. En France, cette technique a été étudiée par l'Hermite(1967) et Bresson(1971) afin d'assurer la réparation et le renforcement de structures en béton armé présentant des insuffisances à la flexion. Ils ont étudié le phénomène parallèlement en laboratoire et in situ. C'est entre 1970 et 1976 que cette technique connut un certain succès. En effet, plusieurs ouvrages en béton armé et en béton précontraint furent alors renforcés [06].

La technique des tôles collées, consiste à coller des tôles en acier sur les faces horizontales tendues des structures à l'aide d'une résine époxydique. Pour augmenter leur capacité à absorber les moments fléchissant plus importants et à coller également des tôles sur les faces verticales pour augmenter leur capacité à absorber des efforts tranchants supplémentaires [07].

a- Les matériaux utilisés

1- La colle

C'est une résine époxy choisie pour ses propriétés d'adhérence sur acier ainsi que sur le béton. Le film résiduel de la colle doit être de faible épaisseur et d'une rigidité suffisante pour transmettre intégralement par adhérence les efforts à la tôle. Cette rigidité étant réduite par une augmentation de température, des précautions spéciales doivent être prises dans le cas de structures soumises à des températures élevées.

La colle n'apporte pas de résistance mécanique, mais elle doit transmettre les efforts [04].

2- La tôle

Les tôles d'aciers sont généralement de qualité courante, leur épaisseur est limitée à 3mm de façon à leur permettre de suivre les courbures du support.

Si des sections d'acier plus importantes sont nécessaires, il est préférable de superposer des tôles plutôt que d'augmenter l'épaisseur. Dans le but d'épouser l'allure de la déformée de la section de béton renforcé [04].

b-La mise en œuvre des Tôles collés

Les tôles destinées à être collées doivent être traitées par sablage pour donner à la surface une rugosité supérieure. Après l'étape qui suit le sablage, les tôles doivent être revêtues d'un produit de protection, soit un type de véris, soit un primaire époxy de même nature que la colle, capable d'assurer la protection temporaire de la tôle et son adhérence ultérieure à la structure (compatibilité avec les colles envisagées).

Le sablage est une opération difficile à réaliser puisqu'il est conditionné par les facteurs atmosphériques.

Les tôles doivent être transportées avec soin de façon à ne pas entraîner de défauts de planéité, de rayure ou de choc.

La préparation du support exige les deux actions d'éliminer les parties dégradées et de rendre le support plan. La reprise de la planéité du support nécessite un ragréage au mortier de résine ; les produits de ragréage doivent être compatibles avec les produits d'encollage.

D'une façon générale les surfaces à ragréer ne doivent pas représenter plus de 20% de la surface à encoller.

La colle doit être préparée en respectant le mode d'emploi du produit défini par le fournisseur.

L'encollage exige une couche de colle sur le plat d'acier et sur la paroi du béton. Le meilleur outil pour étaler régulièrement la colle et assurer l'épaisseur moyenne requise est la spatule crantée.

Pour un collage efficace, il est indispensable de maintenir la colle sous pression pendant la durée de prise, le temps pendant lequel l'effort de serrage est maintenu doit être fonction de la viscosité de la colle et de la largeur des plats d'acier (Serre-joint, barres filetées, les étais).

Pendant la prise de la résine de collage, il est recommandé d'éviter tout effet vibratoire, en particulier tout mouvement issu de trafic répété, ou d'effets dynamique de machines.

Les plats doivent être protégés en fin des travaux contre la corrosion avec une peinture de type époxy compatible avec le primaire de protection provisoire [04].



Figure II.11 : Renforcement d'un viaduc par tôles collées [08]

c-Avantages de la méthode

- La mise en œuvre ne nécessite pas d'intervention lourde sur la structure existante.
- Faible encombrement des renforts [07].

d-Inconvénients

Cette technique efficace a montré ces limites :

- L'acier est l'objet de la corrosion, il demande une maintenance et une protection coûteuse.
- La collage demande une surface de traitement spéciale et une pression constante jusqu'à le collage totale de l'acier.
- Les plaques d'acier sont lourdes et trop raides.
- Elles ne peuvent pas être collées dans des surfaces concaves.
- Dans les plaques c'est très difficile d'éviter les bulles d'aires entre les tôles et le support, ce qui implique une mauvaise adhérence [07].

II.1.3.5- la 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 comprimés. Cette technique permet :

- 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 de l'ouvrage (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.

La précontrainte extérieure est le plus souvent constituée de câbles fixés à des bossages ancrés à la structure par des barres de précontrainte. Les câbles sont protégés par une gaine en polyéthylène injectée à la cire pétrolière. la technique des torons graissés est beaucoup plus simple d'utilisation car elle permet la mise en tension toron par toron à l'aide de petits vérins. [09].

a-Conduits

Les conduits dans lesquels sont placés les armatures peuvent être des tubes en acier protégés contre la corrosion, de gaines souples en matériau plastique ou des passages forés dans la structure [03].

b-Application aux poutres

Pour l'application aux poutres, le béton existant qui reçoivent localement des efforts concentrés importants doivent faire l'objet d'une investigation préalable permettant d'en vérifier la qualité. Une vérification de la structure au flambement général sous l'effet de la précontrainte doit être faite. Les armatures de précontrainte extérieure sont en général placées dans des conduites de protection peuvent être des tubes en acier protégés contre la corrosion, des gaines souples en matériau plastique ou des passages forés dans la structure. Leurs tracés sont soit rectilignes, soit polygonaux [03].

Pour les tracés des armatures de précontrainte additionnelle peuvent être rectilignes ou polygonaux [04].

- Le tracé rectiligne simple et facile à mettre en œuvre, améliore peu la résistance au cisaillement.

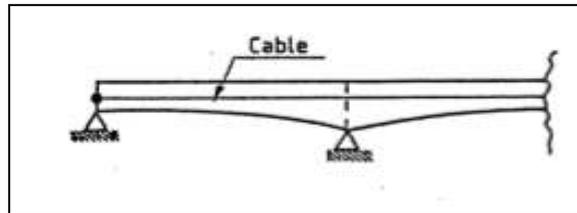


Figure II.12.1: Un tracé rectiligne d'une précontrainte [04].

- Le tracé polygonal est plus efficace que le tracé précédent, mais il exige la construction de déviateurs qui ont l'inconvénient d'augmenter les pertes par frottement lors de la mise en tension des câbles.

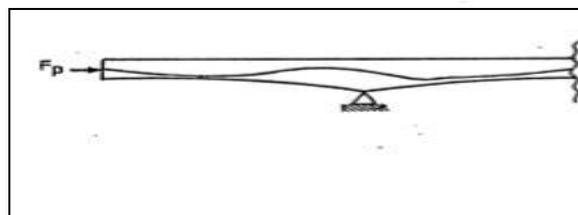


Figure II.12.2: Tracé polygonal d'une précontrainte. [04].

c-Avantages de la méthode

- Applicable même pendant le fonctionnement.
- Aucune corrosion.
- Transmission de la force concentrée au bout des barres.
- Bande et ancrage n'occupent que peu de place.
- Facilité d'adaptation.
- Excellente tenue à la fatigue.
- Maniement simple, même en conditions défavorables.
- Grand allongement des bandes.
- Perte minimale de tension.
- Petits rayons de déviation.
- Utilisable également de façon combinée [04].

d-Inconvénients

La précontrainte additionnelle bien que elle est très efficace mais présente quelque difficultés de mise en œuvre d'après Cousin(1992).en effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement des ancrages et de déterminer le chemin approprié des câbles. Ainsi, des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. Ces forages doivent être exécutés sans toucher aux différentes armatures existantes. En fin, il faut prendre toutes les dispositions pour contrôler que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurés.vu que les câbles additionnelles étant le plus souvent situés à l'extérieur du béton, peut y avoir un risque d'instabilité d'ensemble : le flambement d'où il est plus judicieux de prévoir des fixations transversales qui s'opposent à une mise en vibration de ces derniers [06].

II.1.3.6- Traitement de surface

C'est une opération qui consiste à faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes [03].

a- Cas d'emploi :

Les éléments en béton armé, isolés ou en réseau, endommagés dont les fissures sont stables et qui ont une largeur comprise entre 0.2mm et 2mm peuvent être réparés par la technique d'injection de résine. Il est bien entendu que le béton des zones fissurées n'est ni disloqué ni écrasé [03].

Les éléments dont les fissures dépassent 2mm de large peuvent être réparés par injection de mortier époxydique.

Les travaux d'injection se font en deux étapes :

- Préparation des fissures.
- Injection proprement dite.



Figure II.13: Injection de résine polyuréthane [03].

b-Préparation des fissures :

On ignore souvent l'état interne des fissures. Pour cela il est absolument nécessaire de procéder à leur nettoyage, avant toute injection, à l'air comprimé ou à l'eau sous pression. S'il y a des traces de graisses ou d'huile, on peut utiliser des détergents à la condition d'effectuer par la suite une neutralisation [03].

c-Choix des produits :

Les principales caractéristiques qui doivent guider dans le choix du produit le plus approprié au travail seront [03] :

- Viscosité et injectabilité.
- Durée pratique d'utilisation.
- Vitesse de prise.
- Propriétés mécaniques (résistance, élasticité).
- Adhérence.
- Compatibilité ou non avec humidité.
- Facilité de mise en œuvre.
- Comportement du produit appliqué :
 - au vieillissement.
 - aux ultra-violets.
 - au gel dégel.
 - à la température.
 - aux agents agressifs.

d-Produits d'injection :

La sélection des produits se fait sur la base de critères suivants [03]:

- Géométrie des fissures (largeur, profondeur, tracé...).
- Etat des supports.
- Présence d'eau.
- Contraintes imposées à l'ouvrage.
- Elle est surtout fonction des facteurs suivants :
 - Accessibilité à la fissure.
 - Environnement climatique.
 - Délai de remise en service.
 - Capacité de l'entrepreneur.
- Caractéristiques des produits existants sur le marché

Les avantages et les inconvénients des différents produits d'injections sont consignés dans le tableau II.1 :

Tableau II.1 : avantages et inconvénients de divers produits [03].

Produits	Avantages	Inconvénients
Coulis de ciment	-Faible cout -Possibilité de mise en œuvre par des moyens simples	-Retrait -Ségrégation -Ressuage (produit hétérogène) -Utilisation délicate dans les fissures fines
Silicates	-Long temps d'injectabilité -Viscosité réglable par addition d'eau -Injection des fissures $\geq 0.2\text{mm}$	-Retrait en milieu asséché -Emploi délicat -Injection de vides importants déconseillée
Résines époxydiques	-pas de retrait -Excellence adhérence -Faible viscosité : injection des fissures $\geq 0.2\text{mm}$ - Propriétés mécaniques élevées -Bon comportement en présence d'humidité -Prise et durcissement rapides -Bon comportement aux agents agressifs	-Emploi délicat -Coût élevé
Résines polyester	-Propriétés mécaniques élevées -Faible viscosité - Injection des fissures $\geq 0.2\text{mm}$	-Produit inflammable -Retrait -Faible résistance à l'alcali du béton -Adhérence sujette à caution -Coût relativement élevé - Emploi délicat
Résines polyuréthannes	-Blocage provisoire de venues d'eau par formation de mousse -En milieu sec possibilité d'injecter des fissures actives avec des polyuréthannes « souples » - Fissures $\geq 0.2\text{mm}$ - Faible viscosité	-Léger retrait -Sensibilité à l'eau -Emploi délicat
Résines acryliques	- Faible viscosité réglable - Fissures $\geq 0.2\text{mm}$ Sous forme de gel : -Gonflement en présence d'eau Sous forme de résines : -Résistances chimiques élevées -Résistances mécaniques élevées	Sous forme de gel : -Nécessité pour éviter le retrait d'une présence d'eau permanente -Adhérence faible -Propriétés mécaniques faibles Sous forme de résines : -Retrait -Coût relativement élevé.

II.1.3.7- Tissu de fibres de carbone (TFC)

a-Définition du système TFC

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structurel par collage d'armatures additionnelles à base de fibres de carbone.

Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances de fonctionnement. Le procédé TFC a essentiellement un rôle de renforcement structurel aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants.

Le TFC est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliqué à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour former le complément d'armature de renforcement désiré. Le composite ainsi obtenu rivalise par ses caractéristiques mécaniques avec les meilleurs aciers sans avoir les inconvénients des effets de la corrosion.

Les avantages de fabriquer le composite directement sur le support sont de pouvoir mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier de plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite.

Par sa simplicité de mise en œuvre, l'absence de pression à exercer durant la pose et le durcissement de la colle, fait du TFC est un système de renforcement économique [03].

b-Domaine d'application

L'emploi de lamelles composites en fibres de carbone s'applique à toute structure en béton armé ou précontraint, neuve ou ancienne et pour laquelle une augmentation de la capacité portante est recherchée [03].

Les motifs d'emploi sont les suivants :

- Accroître la résistance.
- Réparation d'ouvrages endommagés :
 - Corrosion avec réduction des sections d'aciers.
 - Renforcement difficile d'accès.
 - Ferrailage insuffisant.
 - Défaut de positionnement.
 - Dommages accidentels.
 - Réduction de la flèche, de fissuration...

c-Préparatif des supports

On désigne par support la surface de matériau apte à recevoir le système de renforcement TFC. Le support doit répondre à certains critères de réception géométriques mécaniques et physico-chimiques.

Les caractéristiques des matériaux du support doivent être en adéquation avec les efforts d'entraînement engendrés par le renfort et s'appliquant sur l'interface de collage, soit une contrainte de cisaillement admissible avoisinant 2 Mpa.

Les états de surface du support et les défauts géométriques locaux doivent être traités avant l'application.

Le TFC peut être appliqué sur différents supports (béton, pierre, bois, acier) préparés. Les supports doivent être dépoussiérés avant application. Le TFC est peu sensible à l'humidité et peut être appliqué sur un support légèrement humide mais non ruisselant [03].

d-Composite TFC

On appelle composite TFC, l'ensemble du tissu matricé dans la résine de synthèse.

Le composite obtenu par fabrication in situ est constitué d'environ 40% de tissu et 60% de résine. Ces proportions peuvent varier à l'exécution dans une fourchette de plus ou moins 7% selon les conditions d'application sur le chantier (température ambiante, surface spécifique du support etc.).

e-Pose de TFC-cas général

- Conditions climatiques :

La pose du TFC doit être réalisée sur un support dont la température est supérieure à 5°C, et à température ambiante comprise entre 5°C et 45°C. Si le support est chauffé, on devra assurer le maintien de la température pendant la durée de polymérisation du composite

Le taux d'hydrométrie n'est pas un facteur rédhibitoire. On s'assure qu'il n'y a pas de ruissellement d'eau sur le support.

- Conditions de réception du support :

On doit s'assurer de la résistance mécanique du support.

Le support doit être préparé selon les règles de l'art.

- Conditions de réalisation :

Le tissu doit toujours être appliqué sur une couche de résine humide. La pose du tissu sur la couche humide se fait en partant d'une extrémité vers l'autre par placage du revers de main sur la résine de collage à l'avancement. Pendant cette opération de pose, on vérifie à l'avancement le

parallélisme d'un des bords extérieurs du lit par rapport à une trajectoire tracée sur le support, ou par rapport au lit précédant dans le cas de bandes juxtaposées.

Le lit de tissu doit être posé sans pli, et sans étirement excessif sur un support préalablement reprofilé. Après la pose le tissu doit être fermement plaqué sur le support par un marouflage permettant l'imprégnation de la colle dans la fibre et l'élimination des bulles d'air éventuelles. Le marouflage est réalisé au moyen d'un rouleau en élastomère souple ou d'un rouleau de peintre à poils ras muni de son tube de protection en polyéthylène.

Après l'opération de marouflage le tissu doit avoir un léger poisseux au toucher bien que la présence de résine ne soit pas perceptible en tous points.

Une deuxième couche de résine (dite couche de fermeture) est destinée à donner l'apport de matière époxydique permettant d'achever l'imprégnation du tissu. Cette deuxième couche est appliquée immédiatement après la pose du tissu : en aucun cas cette couche ne peut être appliquée après polymérisation de la première couche.

L'application de la couche de fermeture est faite au moyen d'un couteau à enduire passé dans le sens des fibres sans excès de pression. La quantité de mise en œuvre sur cette couche est de $700\text{gr/m}^2 \pm 50\text{gr}$ [03].

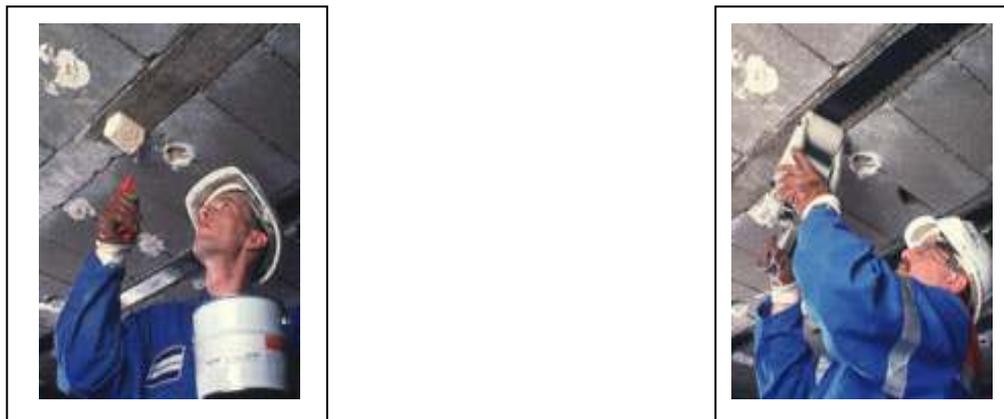


Figure II.14: Exemple de renforcement par TFC [03].

f-Avantages du TFC

- Facilité de transports et de manipulation.
- Facilité de coupure et de la mise en œuvre dans les surfaces non développées.
- Adaptation aux supports.
- Possibilité d'application à multicouche.
- Facilité de contrôle.
- Immunité contre la corrosion.
- Une légèreté 5 fois plus que l'acier.
- Une résistance 10 fois plus que les platines.
- Une grande flexibilité avec une faible épaisseur [07].

j-Inconvénients

- Coût relativement élevé du produit de base jusqu'à 10 fois le coût de l'acier, pour une masse identique).
- Connaissances limitées sur leurs propriétés à long terme, notamment en ce qui concerne l'adhérence à l'interface béton composite.
- Le TFC ne résiste pas au feu.
- Manque de ductilité [07].

II.1.4. - Conclusion

Vu 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 résistance mécanique assez importante que les autres moyens de renforcements.

Ces multiples avantages, mécanique et physico-chimique permet l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé, l'application de tissus ou lamelles en polymère renforcé en fibre de carbone (PRFC) est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelle.

C'est pour cette raison que le choix de renforcement à l'aide de matériaux composites de l'élément à renforcer, paraît intéressant et favorable comme étude.

II.2- Méthodes et Techniques de Renforcement par Collage de composites

II.2.1-Définition d'un Matériau Composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément, il est constitué dans le cas le plus général d'une ou de plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Un composite est formé d'un élément appelé Renfort qui assure la tenue mécanique et un autre élément appelée Matrice qui est généralement une matrice plastique (Résine thermoplastique ou Thermodurcissable) et qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort. Les renforts possèdent des propriétés mécaniques supérieures favorisant la résistance du matériau composite final [10].

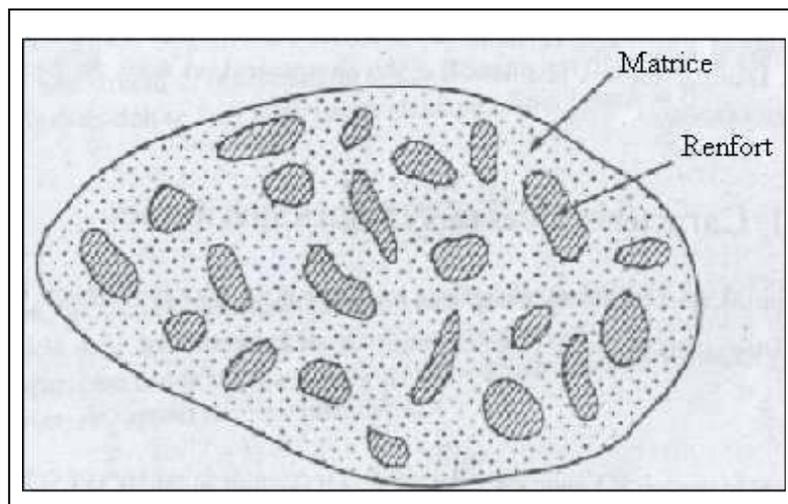


Figure II.15 : Répartition renfort- matrice [08]

Les propriétés des matériaux composites résultent principalement :

- Des propriétés des matériaux constituants ;
- De leur distribution géométrique ;
- De leurs interactions ;

Ainsi pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- La nature de constituants et leurs propriétés ;
- La géométrie du renfort, sa distribution ;
- La nature de l'interface matrice-renfort ;

1- La Matrice

La matrice a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi la protection du renfort vis-à-vis des diverses conditions environnementales (abrasion, intempéries, eau, lumière, produits chimiques, chocs, perforations, etc.). Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices [10].

1-a) Matrice Organique

Les résines utilisées dans les composites à matrice organique sont des polymères modifiés par différents adjuvants et additifs comme des agents de démoulage, des stabilisants, des pigments, etc. Sous l'action de la chaleur ou de la lumière, des liaisons se forment entre les chaînes de pré-polymères pour constituer un polymère suivant une structure tridimensionnelle. Deux grandes familles de résines polymères existent : les Résines Thermoplastiques et les Résines Thermodurcissables. Ces deux types de résines possèdent la faculté de pouvoir être

moulés ou mis en forme, pour donner soit un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée. Les résines thermoplastiques présentent plusieurs avantages par rapport aux résines thermodurcissables :

- La durée de traitement des thermoplastiques est plus courte, ce qui a comme conséquence un plus grand volume de production ;
- Les thermoplastiques sont réformables et soudables : toutes les pièces en thermoplastiques peuvent être remodelées et ainsi de nouveaux produits peuvent être fabriqués à partir des anciens ;
- Les procédés de fabrication thermoplastique ne nuisent pas à l'environnement.
- Aucun gaz toxique n'est produit pendant le procédé ni durant la vie de thermoplastique.
- Les thermoplastiques sont plus résistants à l'impact, à la fatigue et à la corrosion, particulièrement à basses températures.

Malgré tous ces avantages, les matériaux thermoplastiques présentent des applications limitées par leur manque de rigidité par rapport aux matériaux thermodurcissables. Cette caractéristique peut cependant être bénéfique dans quelques applications, comme dans les glissières de sécurité (garde-fou) des routes ou la flexibilité de la barrière diminue l'effet de l'impact et par conséquent les dégâts matériels et corporels.

1-b) Matrice Métallique

Les composites à matrice métallique se présentent sous forme d'alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane, etc. Avec des fibres minérales (le carbone, le carbure de silicium(SiC), avec des fibres métalliques (le bore) ou avec des fibres métallo-minérales (fibres de bore revêtues de carbure de silicium(BorSiC)).

Étant donné leur prix très élevé, les composites à matrice métallique sont réservés au domaine de l'aérospatial civil et militaire, au matériel médical et orthopédique.

1-c) Matrice Minérale

Les composites à matrice minérale sont constitués d'une base de céramique mélangée avec des fibres métalliques (bore), avec des particules métalliques (cermets) ou avec des particules minérales (carbures, nitrures, etc.).

Tableau II.2: Les différents types de composites [10]

Type de Composites	Constituants	Domaine d'Application
1/Composites à matrices organiques : -Papier, carton -Panneaux de particules -Panneaux de fibres -Toiles enduits -Matériaux d'étanchéités -Pneumatiques -Stratifiés -Plastiques renforcés	-Résine/charges/fibres cellulosiques -Résine/copeaux de bois -Résine/fibre de bois -Résines souples/tissus -Elastomères/bitume/textiles -Caoutchouc/toile/acier -Résine/charge/fibres de verre, de carbone, etc -Résines/microsphères	-Imprimerie, emballage -Menuiserie -Bâtiment -Sports, Bâtiments -Toiture, Terrasse, etc -Automobile -Domaines multiples
2/Composites à matrice métallique	-Aluminium/fibres de bore -Aluminium/fibres de carbone	Espace
3/Composites à matrices minérale : -Béton -Composite carbone-carbone -Composite Céramique	-Ciment/sable/granulats -Carbone/fibres de carbone -Céramique/fibres céramiques	-Génie Civil -Aviation, espace, sports, biomédecine -Pièces thermomécaniques

A noter que les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans un domaine de température ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux composites à matrice métallique ou minérale sont utilisés de 600 à 1000°C.

2- Le Renfort

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Il peut se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles) en fonction de l'application envisagée. Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une faible résistance à la compression. Les différents renforts disponibles et selon leurs nature, sont présentés comme suit :

2-a) Renfort à Fibres de Verre

Les fibres de verre de diverses sont de loin les renforts les plus courants. Leur procédé d'élaboration par filage du verre en fusion permet d'obtenir des fibres de 5 à 15 μ m de diamètre. Leur résistance à la rupture en traction ou flexion est d'autant plus élevée que leur diamètre est faible. Un diamètre de quelques microns autorise un rayon de courbure de quelques dixièmes de millimètres [11].

Principaux avantages :

- Bonne résistance thermique et électrique ;
- Bonne résistance aux agents chimiques et à l'humidité ;
- Bonne compatibilité avec les matrices organiques ;
- Faible cout ;

Principales limitations:

- Caractéristiques mécaniques moyennes, notamment la rigidité élastique ;
- Tenue au choc médiocre ;

Tableau II.3: caractéristiques de divers types de fibres de verre pour matériaux composites [11].

Fibres	Verre E	Verre R et S	Verre D	Verre C
Caractéristiques Principales	Qualité courante	Hautes performances mécaniques et thermiques	Rigidité diélectrique	Bonne tenue chimique
Masse Volumique (Mg/m ³)	2.6	2.53	2.14	2.5
Résistance à la Traction R _m (Mpa)	2 400	3 600	2 500	2 800
Module de Young E(GPa)	73	86	55	70
Allongement à la Rupture A(%)	4.5	5.2	4.8	4
Température Maximale d'utilisation (°C)	500	650	450	450
Coefficient de Dilatation thermique (10 ⁻⁶ /K)	5	4	3.5	8.5
Applications	Composites de grande diffusion	Armement aéronautique, spatial	Radomes, capots perméables aux ondes électromagnétiques	Réacteurs chimiques, renforcement du béton, panneaux de façades

2-b) Renfort à Fibres polymères

Malgré leur faible masse volumique, peu de polymères permettent d'obtenir des fibres de module suffisant pour présenter un intérêt comme renfort de composites. Les fibres d'aramides (Kevlar), en particulier, présentent d'excellentes caractéristiques de rigidité et de résistance en traction, une bonne tenue à la fatigue et à l'impact, mais un comportement médiocre en compression et cisaillement (donc en flexion). Elles sont plus souvent utilisées en association avec des fibres de verre ou de carbone. Toutes les fibres organiques sont pénalisées par leur sensibilité à l'humidité et à la température et paradoxalement, par une médiocre compatibilité avec les matrices organiques [11].

Tableau II.4: Caractéristiques de divers types de fibres polymères pour matériaux composites [11].

Fibres	Polyamides aromatiques : aramides (Kevlar)		Polyesters saturés	Polyéthylène à haut module (PEHM)
	Kevlar29	Kevlar49		
Caractéristiques principales	Résistance en traction, au choc et à la fatigue	Résistance en traction, au choc et à la fatigue, haut module	Faible cout	Résistance en traction et au choc, rigidité
Masse Volumique (Mg/m ³)	1,44	1,45	1,3	0,97
Résistance à la Traction R _m (Mpa)	3 000	3 600	1 200	3 000
Module de Young E (GPa)	60	134	14	100
Allongement à la Rupture A (%)	7	3,5	12	5
Température Maximale d'utilisation (°C)	200	200	100	100
Applications	Câbles, pneumatiques	Composites à hautes performances, voiles		Blindages, casques coques de bateaux

2-c) Renfort à Fibres de Carbone

Elles sont élaborées par pyrolyse en atmosphère contrôlée de fibres de polymère précurseur, ce qui permet d'obtenir sous diverses variantes un squelette d'atomes de carbone à structure graphitique à haut module et haute résistance malgré de nombreuses imperfections [11].

Principaux avantages :

- Grande résistance à la traction et grande rigidité longitudinales ;
- Très bonne tenue en température sa chute de propriétés (jusqu'à 1500°C en atmosphère non oxydante) ;
- Inertie à la corrosion et aux agents chimiques ;
- Coefficient de dilatation longitudinal très faible, voire nul ;

Principales limitations:

- Fragilité au choc ;
- Fragilité à la courbure ou au pliage ;
- Cout élevé.

On doit également tenir compte dans leur utilisation du fait qu'elles sont conductrices électriques et thermiques. Elles sont employées sous formes de nappes unidirectionnelles ou de tissus pré-imprégnés pour la fabrication de matériel industriel ou sportif et sous forme de tissage 2D ou 3D dans l'industrie aéronautique et spatiale.

Tableau II.5: Caractéristiques de divers types de fibres de carbone pour matériaux composites [11].

Fibres	Carbone à haute résistance HR	Carbone à bas module BM	Carbone à haut module HM	Carbone à Très haut module THM
Masse Volumique (Mg/m ³)	1.85	1.70	1.90	1.95
Résistance à la Traction R _m (Mpa)	3 500 à 4 900	1 800	2 800 à 4 400	2 300
Module de Young E(GPa)	200 à 250	180	400 à 600	750 à 820
Allongement à la Rupture A(%)	1,3 à 2,1	2	0,7 à 1,2	0,3

2-d) Autres types de fibres et renforts

Il existe d'autres types de fibres métalliques continues (bore, tungstène, acier..)ou de renforts minéraux (Al_2O_3 , B_4C , SiC , Si_3N_4 , BeO , TiO_2 , TiC ..) sous formes de filaments ou des particules. Ils sont compatibles avec des matrices métalliques imprégnées par fusion. Malgré leur résistance et leur rigidité, le diamètre élevé des fibres (la centaine de microns) les rend sensibles à la flexion et surtout, leur cout élevé restreint leur utilisation à quelques applications de haute technologie [11].

Tableau II.6: Comparaison qualitative entre fibres [04].

Critères	Fibres de carbone	Fibres d'aramide	Fibres de verre
Résistance à la Traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Résistance à la Compression	Très bonne	Inadéquate	Bonne
Module d'Elasticité	Très Bon	Bon	Adéquat
Comportement à long terme	Très Bon	Bon	Adéquat
Comportement à la Fatigue	Excellent	Bon	Adéquat
Densité	Bonne	Excellente	Adéquate
Résistance Alcaline	Très bonne	Bonne	Inadéquate
Prix	Adéquat	Adéquat	Très Bon

II.2.2-Classification des Matériaux Composites selon l'architecture de renforts

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

Il existe différentes géométries et textures de renforts [12] :

- **Les unidirectionnels (UD)** : Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entres eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

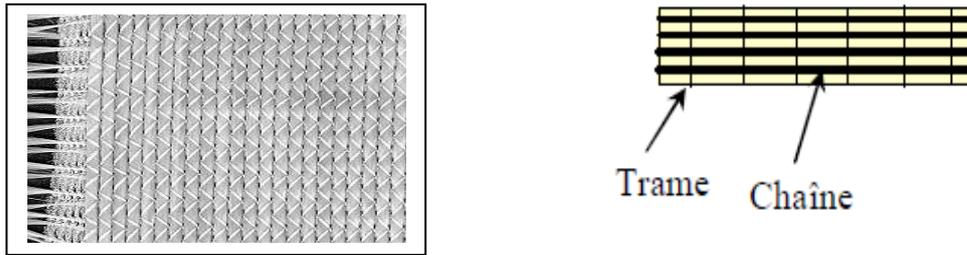


Figure II.16 : Les unidirectionnels [12].

• **Toile ou taffetas** : Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

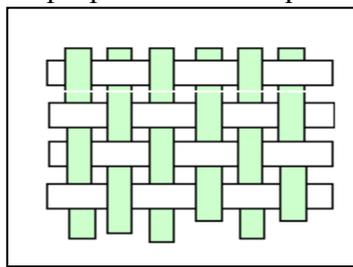


Figure II.17 : Toile ou taffetas [12].

• **Serge** : Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils.

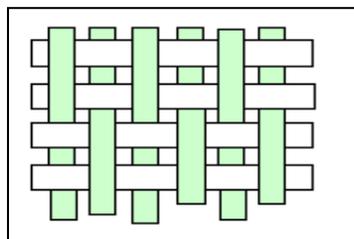


Figure II.18 : Serge [12].

• **Satin** : Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.

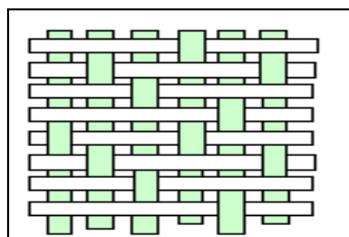


Figure II.19 : Satin [12].

Comme un tissu est difficilement déformable sur une surface gauche, on réalise également pour des utilisations spécifiques des armures bi ou tridimensionnelles

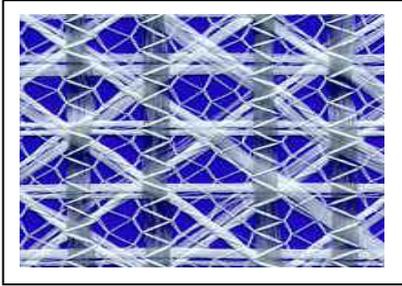
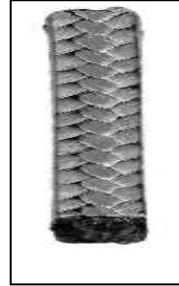


Figure II.20 : Tissu multiaxial



Tissu 3D ou tresse[12].

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes.

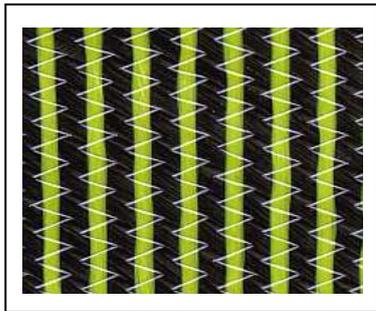


Figure II.21 : Tissu hybride carbone - aramide [12].

II.2.3-Durabilité des Matériaux Composites

Plusieurs facteurs affectent la durabilité des composites, d'où on peut citer ce qui suit :

II.2.3.1- Vieillessement physique de matrice du polymère

La matrice a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi la protection du renfort vis-à-vis des diverses conditions environnementales (abrasion, intempéries, eau, lumière, produits chimiques, chocs, perforations, etc.). Il est évident que tous les polymères subissent au cours de leur vie des changements, chimiques moléculaires, extrêmement lent dans leur structure. Ces changements sont dus à l'influence de l'environnement et principalement la température et humidité, ce qui induit au vieillissement de la matrice, vu le déséquilibre thermodynamique instantané subit [13].

II.2.3.2- Température

Vis-à-vis de la température, les performances des matériaux composites sont principalement conditionnées par l'adhésif. En revanche, pour une température basse, les performances sont conditionnées par la matrice.

Le point le plus important concerne la température est la température de transition vitreuse T_g . Les propriétés mécaniques diminuent à la proche de ce seuil de température. Pour éviter une rupture issue de l'adoucissement de l'adhésif ou de la résine, la température maximale de service doit être inférieure à T_g .

La température de transition vitreuse est de l'ordre de 30°C à 80°C pour les époxys polymérisant à froid. Suivant les conditions de mise en œuvre et la nature du durcisseur, la température de transition vitreuse peut atteindre 170°C pour un système renforcé et recuit. La polymérisation à température ambiante est lente diminution de T_g . Pour une structure sensée résister à une température élevée (mais inférieure à T_g), deux choix sont possibles : utiliser soit une résine avec une cure en froid mais ayant une haute T_g initiale, soit une résine ayant une T_g améliorée après une post-cure.

En cas d'incendie, le renforcement par collage extérieur par matériaux composite doit être protégé par une technique d'isolation [13].

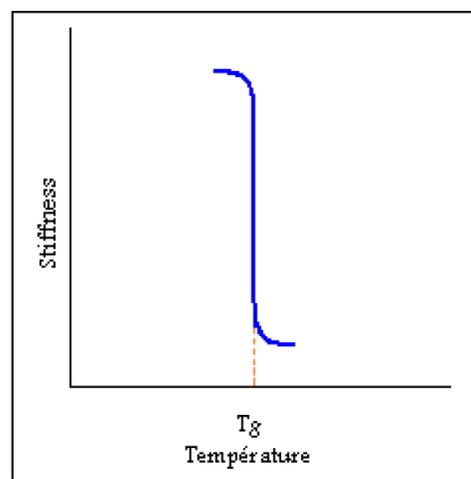


Figure II.22 : Température de transition vitreuse [13]

II.2.3.3- Humidité

Les matériaux composites absorbent de l'eau par le biais de la résine immergeant dans la matrice. La quantité d'eau absorbée dépend de la nature de la résine et de la température de l'eau. Les deux conséquences immédiates en sont la réduction de la température de transition vitreuse T_g et l'adoucissement de la résine. Dans le cas d'une résine époxy, ces deux phénomènes sont partiellement réversibles lors du séchage (de point de vue de structure chimique, l'époxy n'a pas de lien ester, les chaînes de polymères ne sont pas facilement hydrolysables). L'absorption maximale d'eau par une résine époxy est environ de 3% en poids.

La combinaison de la température et de l'humidité influence sur les caractéristiques mécaniques d'une résine époxy polymérisée à froid. En effet, la contrainte à la traction diminue progressivement avec l'augmentation à la température d'une manière pointue lorsqu'il s'agit d'une résine mouillée et avec souplesse dans le cas d'une résine sec (Figures II.23 et II.24). A titre indicatif, à une température ambiante de 20°C , la contrainte augmente "paraboliquement", jusqu'à une limite, en fonction de la déformation de la résine, avec un certain avantage pour la résine sec (moins humide) [13].

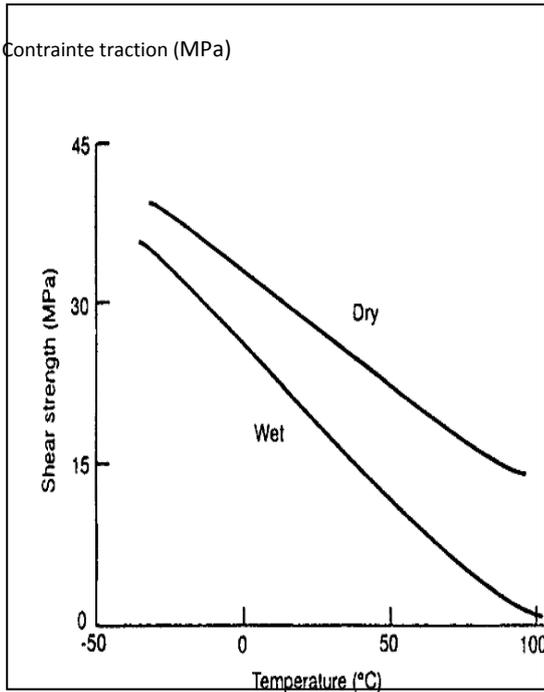


Figure II.23: Influence de la température sur la contrainte de traction d'une résine [13]

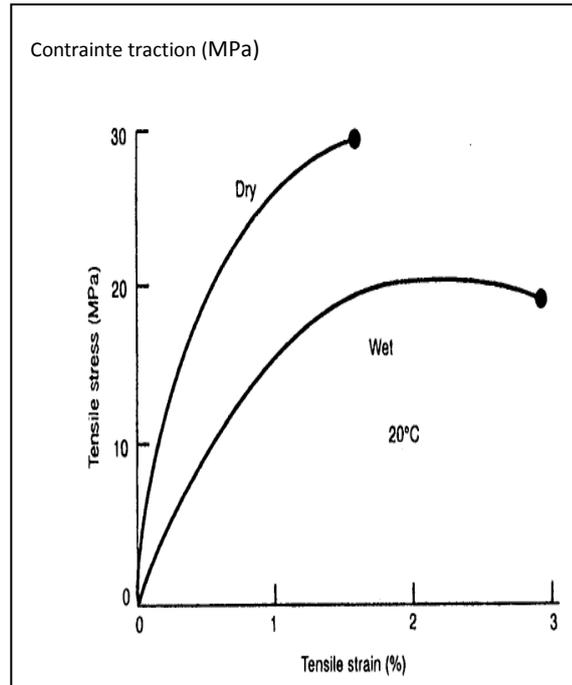


Figure II.24 : Influence de l'humidité sur la contrainte de traction d'une résine [13]

II.2.3.4- Influence des ultraviolets

Les ultraviolets peuvent produire une réduction de la transmissibilité des rayons lumineux : la couleur du composite peut changer. Ce changement de couleur ou décoloration est dû à l'influence des rayons ultraviolets sur la résine de la matrice, n'implique aucune dégradation structurale ou physique. Les fibres de carbone ne sont pas affectées par les rayons ultraviolets. Les caractéristiques mécaniques des matériaux composites sont très légèrement influencées par les rayons ultraviolets [13].

II.2.3.5- Fluage, corrosion sous contrainte

Le fluage des composites à fibres de carbone n'est pas un facteur déterminant pour le dimensionnement du renforcement d'éléments structuraux, car les structures renforcées ont généralement déjà subi leur propre fluage.

L'atmosphère ou l'environnement ambiant en est généralement insuffisant pour causer une corrosion du composite. Néanmoins, il peut y avoir corrosion lorsque le composite est soumis à un certain niveau de contrainte : c'est la corrosion sous contrainte. Ce phénomène est dépendant du temps, du niveau de contrainte, du type de matrice et de fibres. Les fibres de carbone n'en sont que très légèrement affectées, lorsque le niveau de contrainte reste inférieur à 80% de la résistance ultime : les niveaux de sollicitation réel des composites en place sont tels que les risques sont très limités [13].

II.2.3.6- Résistance au feu et incendie

La résistance des tissus de fibres de carbone à la chaleur (à une température très élevée) est assez bonne. En fonction du type du feu observé et la température ambiante de l'incendie, le composite a une durée déterminée (Figure II.25). En effet, la durée de résistance au feu peut atteindre les neuf heures avec une température de 200°C. Cependant, la température peut atteindre les 1000°C pour un feu type (feu spectaculaire) [13]. Cependant, peu d'études ont été réalisées sur la performance des structures renforcées par CFRP au feu.

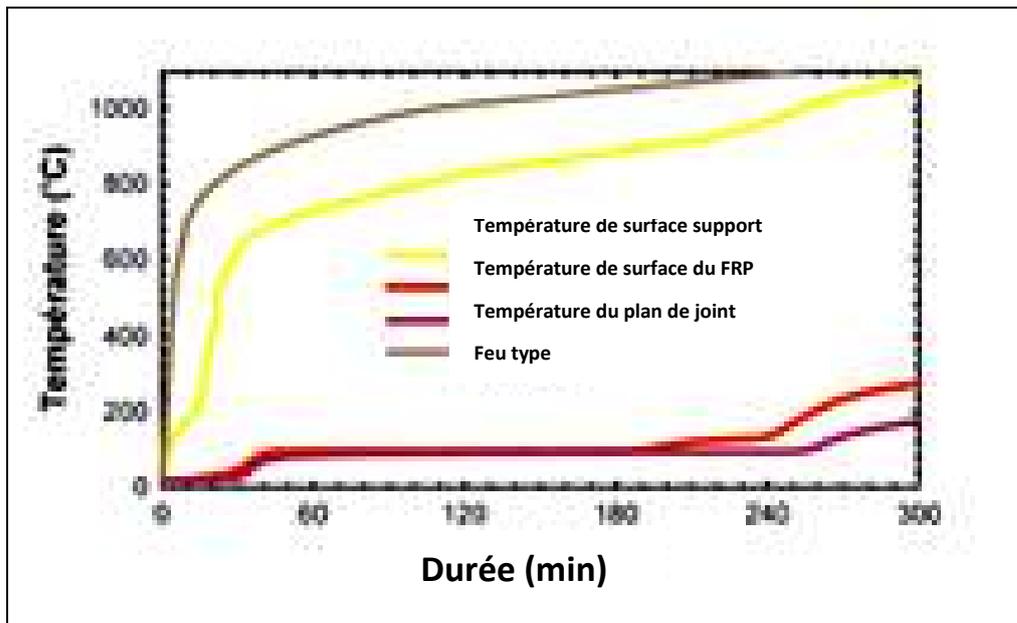


Figure II.25: Influence de la durée du feu sur le comportement du composite [13]

II.2.4-Applications des Matériaux Composites

En réponse à la nécessité croissante de réparation ou de remplacement des structures en béton armé dans le monde, une nouvelle technologie de renforcement structural a émergé.

Le développement continu de techniques de production plus rentables comme les polymères de fibres de carbone a progressé. La réduction des coûts de production, l'augmentation de l'efficacité des produits et l'amélioration des techniques de mises en œuvre permet une démocratisation de son utilisation.

Il existe deux techniques de renforcement de structures en béton avec des fibres. La première est le renfort de structures avec des éléments constitués de fibres, par exemple des plaques ou des poutres. La seconde méthode est le collage de bandes de renforts à la structure en béton. De nos jours, la seconde est la plus utilisée dans le Génie Civil.

La mise en œuvre du collage de bandes de renfort nécessite une méthodologie rigoureuse, le respect de conditions climatiques adaptées (travaux à l'abri de la pluie, pas d'ensoleillement direct, température extérieure comprise entre 10 et 25° C, humidité relative limitée...), des Conditions d'emploi des différents matériaux (durée d'utilisation des résines ...), des critères de sécurité et de grandes précautions lors de la préparation des supports [14].



Figure II.26 : Mise en oeuvre de bandes de renforts sur un pont [14]



Figure II.27 : Renforcement d'une Cheminée par des bandes [14]

II.2.4.1-Renforcement de poutres

Le renforcement de poutres peut se présenter de deux manières :

- Reprise des efforts de flexion
- Reprise des efforts tranchant

a-Reprise des efforts de flexion

Deux techniques de renforcement sont utilisées pour reprendre les efforts de flexion : le collage de plaques ou le collage de bandes.

Le collage de plaques sur les zones de béton tendues est la plus ancienne des méthodes, elle souffre d'un gros désavantage : son manque d'adaptabilité. Elle présente donc une difficulté de mise en œuvre, en effet l'adhérence entre la plaque et l'élément renforcé doivent coïncider parfaitement, ce système constructif soumet donc problème de mise en œuvre.

La technique de collage de bandes est apparue à la fin des années 1980. Elle est similaire à l'autre méthode, à la seule différence que l'élément collé est ajustable à la structure renforcée.

La photographie ci-dessous montre des bandes de renforts collées en sous face d'une dalle et sur une poutre [14].



Figure II.28 : Mise en œuvre de bandes de renfort en sous face d'une dalle et sur des poutres [14]

b-Reprise des efforts tranchants

La reprise des efforts tranchants se fait à l'aide de renforts disposés transversalement à l'axe poutre pour renforcer le treillis de Ritter Mörsch qui peut modéliser le fonctionnement d'une poutre de la en béton armé soumise à de la flexion.

Encore une fois, les renforts peuvent se présenter sous forme de bandes ou de plaques mais la méthode prédominante est celle du collage de bandes. Les PRF (plastique renforcé de fibres) sont constitués de fibres placées dans une seule direction. Il faut donc veiller à placer les renforts dans la bonne direction de façon à reprendre les efforts [14].

Il y a trois différentes dispositions des renforts reprenant les efforts tranchant d'une poutre :

- Le collage des renforts sur les quatre faces de la poutre (a)
- Le collage sur trois faces de la poutre, en « U » (b)
- Le collage sur les deux faces de l'âme de la poutre (c)

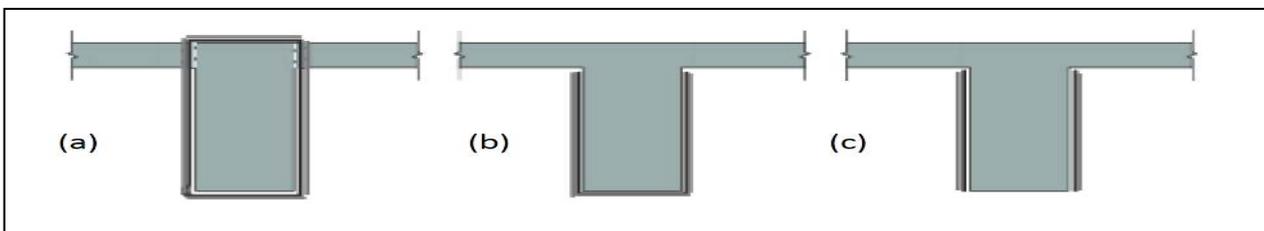


Figure II.29 : Différentes possibilités de placements des renforts sur une poutre [14].

II.2.4.2-Renforcement de dalles

Le procédé de renforcement de dalle consiste à coller, à la surface des zones de béton tendues, des plaques ou des bandes de renfort. De nos jours, seules sont appliquées des bandes de renforts.

Pour des raisons évidentes de mises en œuvre, on préfère coller les bandes de renfort en sous face de la dalle. Dans le cas d'une mise en œuvre à la surface d'une dalle, il faut prendre en compte des problèmes de remise à niveau du plancher traité.

Les techniques sont similaires à celles utilisées pour renforcer les poutres pour reprendre les efforts de flexion. On rencontre donc le collage de plaques ou de bandes sur les dalles. Encore une fois, lors de ces dernières années la méthode de mise en œuvre de bandes s'est imposée plutôt que l'installation de plaques [14].



Figure II.30 : Bandes de renforts en sous face d'une dalle Figure II.31 : Bandes de renforts autour d'une trémie [14]

II.2.4.3-Renforcement des poteaux

Les premières études de renforcement de porteurs verticaux ont débutées après le tremblement de terre de Loma Prieta dans la baie de San Francisco en Californie en 1989. Ce type de renforcement est obtenu par confinement des éléments en béton armé par des bandes de renfort. Lorsque le renfort est appliqué autour d'un poteau, sa résistance apparente en compression et sa ductilité sont améliorés. L'amélioration de la résistance en compression du béton apparait seulement après l'apparition de fissures et le début de la dilation. L'enveloppement de poteaux avec des renforts permet donc de reprendre des efforts de compression supplémentaires. Ainsi, lorsqu'un chargement axial est appliqué au poteau, le béton se dilate latéralement, notamment du fait de l'effet Poisson, créant des contraintes de traction dans le renfort qui s'oppose à l'augmentation de section. L'enveloppe de renfort confine alors la section du poteau. Il en résulte une augmentation de la capacité portante et de la ductilité de la structure. Le fonctionnement du renforcement de ce type d'éléments est différent du renforcement des éléments horizontaux comme les dalles et les poutres. En effet, pour les dalles et les poutres, les renforts doivent augmenter les propriétés déjà fournies par les armatures. Les propriétés des aciers et du béton ne sont pas modifiées. Dans le cas des renforts des poteaux, les renforts font changer les caractéristiques apparentes du béton. Les bandes de renforts sont imprégnées de résine et sont enroulées autour des poteaux. Pour augmenter la résistance à la compression des éléments, les bandes de FRP sont mises en oeuvre dans la direction des cadres [14].

Trois méthodes existent :

- Le renfort d'un poteau complet(a)
- Le renfort partiel par enroulage continu en spiral(b)
- Le renfort partiel par enroulage en anneaux(c)

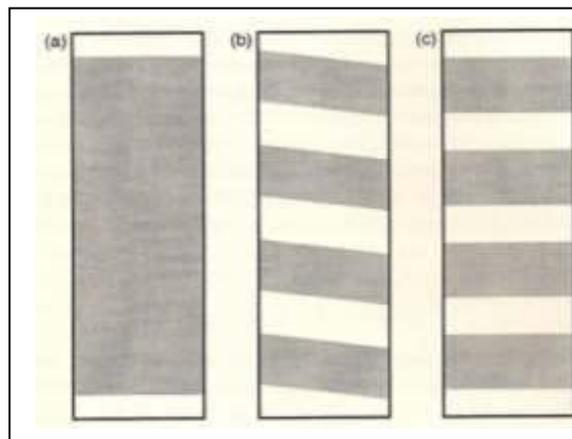


Figure II.32 : Type de disposition des renforts sur un poteau [14]

II.2.5-Utilisations des Composites dans Différent Pays

i) Au Japon

Le premier pays avoir utilisé les composites dans le génie civil est le Japon. Ce pays est connu par une région particulièrement touchée par les tremblements de terre et regroupe plus de 1000 îles ainsi que les phénomènes de corrosion saline souvent observés.

Les pouvoirs publics Japonais ont décidé de donner un intérêt particulier au développement des composites à base de fibre de carbone pour le renforcement des structures (ouvrages d'art en particulier). De nombreux ponts en béton précontraint ont dû être renforcés extérieurement en raison de la corrosion de aciers, en appliquant ces renforcements sur les piles ou sur les faces inférieures des tabliers et en utilisant des pré-imprégnés à base de fibres de carbone comme renfort.

Parmi les applications, on peut citer les renforcements sur le pont Fujimi (Tokyo) en 1993, et le pont Johetsu Shikansen (Nugata), le pont Yonava, le pont Sanahara (Yamanashi), et le pont Yogai (Saitama) en 1994. À partir de 1995, le nombre des réalisations a fortement augmenté avec d'autres applications dans tous les domaines industriels, tels que des renforcements extérieurs de cheminées, de tunnels routiers, ferroviaires ou de métro, de sites de stockages naturels de pétrole ou de gaz, et mur de bâtiments. Des treillis en fibres de carbone sont utilisés dans des murs de bâtiments de banques non seulement pour leurs propriétés mécaniques mais aussi en tant que conducteur électrique et sont reliés aux systèmes d'alarme. En mars 1998, la structure métallique d'un bâtiment a été remplacée par une structure à base d'un composite de carbone.

Un programme national de mise en conformité parasismique des bâtiments et des ouvrages d'art a été élaboré dans ce pays (premier consommateur de fibres de carbone) dans les secteurs du bâtiment et des ouvrages d'art. La consommation de fibres de carbone au Japon pour l'ensemble des secteurs BTP était supérieure à 300 t en 1996 et à 500 t en 1997 [13].

ii) Aux Etats-Unis

C'est au début des années 1930 que commençait l'idée d'insertion des composites à base de fibres de polymères dans la composition du béton avec l'introduction des fibres de verre. Cependant, les recherches ont été élaborées dans le sens d'application de polymères à base de fibres de carbone, sur des éléments structuraux, juste après la deuxième guerre mondiale à la fin des années 1940. La première application fut en décembre 1996 sur la structure du pont à Russell (Kansas), puis sur le pont d'autoroute à Butler (Ohio) à la même année et le pont Foulk à Delaware (Californie) en 1997. Vu la consistance du patrimoine des ouvrages d'art dans ce pays (615718 ponts recensés en 2003) dont 26.3% structurellement défectueux ou fonctionnellement obsolète, les pouvoirs publics, dans ce pays ont lancé un défi pour sauvegarder ce patrimoine en les réparant par application des CFRP [13].

. iii) Au Canada

Au Canada, des études ont été menées pour renforcer extérieurement des ponts anciens corrodés ou ne pouvant supporter l'augmentation des surcharges de calcul. Le procédé l'Hermitte devient peu applicable dans ce pays, du fait de la très forte corrosion saline liée aux énormes quantités de sels répandues sur l'ensemble du réseau routier pendant la longue période hivernale.

A partir du début des années 1990, de nombreuses universités (Alberta, Laval, Manitoba, Royal Military College, Sherbrooke, Queen's, Waterloo.) commencèrent à travailler sur les renforcements et le fretage des piles de ponts et des colonnes de bâtiments.

L'utilisation des fibres de carbone en génie civil a été d'environ 50 tonnes en 1997 au Canada et aux Etats-Unis. Parmi les chantiers expérimentaux on peut citer :

- Le renforcement du pont de Calgary (Alberta) par des câbles de 6 m de long. En 1993.

- La réhabilitation du pont Clearwater Creek (Alberta) à partir de bandes de tissus de fibres de carbone préimprégnées en 1996.
- Le renforcement des bases de ponts Jaques Cartier et Champlain qui enjambent le Saint-Laurent à Montréal en 1996.
- Le renforcement d'un pont autoroutier, traversant l'Assiniboine River à Headingley (Manitoba) à l'aide de tissus et de câbles en fibres de carbone en 1997.
- Le renforcement par frettage à l'aide de tissus préimprégnés de plusieurs colonnes de bâtiments dans l'enceinte de l'université Sherbrooke en 1995.
- Le renforcement d'un garage en sous-sols d'un parking, en utilisant des produits pultrudés en 1996.
- Le renforcement d'une structure de toiture dans le centre de Winnipeg (Manitoba) en 1997 [13].

iv) En Australie

Durant les douze dernières années, les chercheurs Australiens ont poursuivi activement le développement industriel des nouvelles fibres à base de polymères (FRP) et leur utilisation dans la réalisation de nouvelles infrastructures et la réhabilitation des ouvrages détériorés ou présentant des anomalies, tels que les ponts, bâtiments ou constructions industrielles. L'Australie compte quelque 40.000 ponts routiers dont la longueur est supérieure à 7 m. Leurs pouvoirs publics ont alloué un montant avoisinant les dix billions de dollars U.S (\$10 billion) pour la réhabilitation de ouvrages les plus détériorés et stratégiques et qui dépassent les 60ans. La première application dans le domaine de réhabilitation des ouvrages d'art fut effectuée en 2001 sur un pont réalisé en 1960, avec une longueur de 650 m de longueur et 8 voies de circulation, se trouvant à Melbourne (Victoria). Il s'agit de la plus grande application à cette époque[13].

v). En Europe

En Europe, de nombreuses universités ont travaillé sur les renforcements à base de matériaux composites. Un projet appelé projet « Brite » a réuni plusieurs pays sur ce sujet. Parmi les cas d'utilisation des fibres de carbone en génie civil on cite

- La construction d'un pont, au début des années 1990, avec des câbles de précontraint à base de composite en fibres de carbone, où passent toujours des dizaines de camions de livraison par jour dans l'usine de BASF à Ludwigshafen en Allemagne.
- Le remplacement de deux haubans en acier par deux câbles de fibres de carbone sur le pont de Winterthur (Suisse) en 1996. Chaque câble est constitué de 241 joncs de 5 mm de diamètre. La charge de rupture de chaque câble installé est supérieure à 1300 t.
- La construction d'une passerelle (longueur 80 m, largeur 3,5m) munie de haubans et de torons de précontrainte, le tout en composite époxyde-fibres de carbone en 1998 au Danemark.
- Fin 1997, plus d'une centaine de ponts ont été renforcés en utilisant le principe de renforcement par plats pultrudés et de tissus, dont le premier pont anglais, à Dales town of Skipton, au nord du Yorkshire, en octobre 1997.
- Fin 1996, le marché des BTP représentait en Europe un peu plus de 25 t de fibres de carbone et 50 t en 1997 avec un taux de croissance estimé à 30% par an.

En France, mis à part la fourniture de renforcement des structures en béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait :

- D'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (1,9 fois le prix de l'acier et presque 6 fois le prix du bois) ;
- D'une relative méconnaissance des ingénieurs et concepteurs (BET) vis-à-vis des composites ;
- D'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).

Sous l'impulsion de la société Soficar et du LCPC, une étude démarra fin 1994, soutenue par le " Plan génie civil 1995" du Ministère de l'Équipement, du Tourisme et du Transport (METT) et la DRAST (Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques), d'un système de renforcement à base de tissus secs imprégnés in situ. Les résultats de cette collaboration ont donné naissance d'un produit appelé TFC (tissus de fibres de carbone), marque déposée par Freyssinet International. En 1996, Freyssinet renforçait, avec succès, le premier pont autoroutier français en remplacement les plats collés métalliques classiques par des tissus secs et imprégnés sur place par un adhésif spécifique à base de résine époxydique (TFC). Après ce premier succès et dès l'année 1997, l'application devenait industrielle, avec l'application de centaine de ponts et de bâtiments avec le procédé TFC [13].

v) En Afrique

La littérature montre que l'Afrique du sud a été le premier pays à avoir appliqué le renforcement des éléments structuraux par le principe de collage extérieur de plaques métalliques (procédé de l'Hermite) en 1960 sur un pont dégradé. Les recherches se sont, dans un très peu de temps, accentuées notamment dans le domaine des renforcement et/ou réparation des poutres et dalles, ou confinement des poteaux. Parmi les autres pays qui ont lancés des recherches, l'Algérie, la Tunisie, l'Égypte, le Maroc, le Sénégal, etc.

Plusieurs ponts ont été soit réparés, soit renforcée par application des tissus de fibres de carbone bidirectionnels, des lamelles de fibres de carbone ou des tissus de fibres de carbone unidirectionnels.

En Algérie, pays considérée parmi les premiers, en Afrique, avoir appliqué ce type de renforcement. Les composites CFRP ont fait leur apparition sur le marché en 1997. La première application fut en 1998 sur l'ancien pont voûté de Sidi Rached à Constantine, où des bandes du TFC furent posées sur la poutraison du tablier de ce pont .

Un grand nombre d'ouvrages d'art et éléments structuraux de bâtiments ont été renforcés, par la suite, par des composites de fibres de carbone (lamelles et tissus de fibre de carbone). En effet, après la première expérience en 1998, un deuxième pont fut réparé, il s'agit de l'ouvrage rail PK 459 sur oued Bill Braguettz dans la même ville, avec le partenariat SAPTA-Freyssinet-France (fourniture et pose de TFC) d'une part, et la sous-traitance avec SIKA-Outre-mer d'autre part avec l'application des produits de colmatage et d'injection des fissures sur la maçonnerie et le béton d'autre part.

En 2000, le Pont Blanc d'EL Harrach, fut aussi réparé et renforcé par le procédé (TFC). L'ouvrage, en question, permet le franchissement au niveau du centre ville, de l'oued El Harrach, construit au début des années 1900 (figure II.33) [13]. Des dégradations ont été observées sur les différentes parties de l'ouvrage. L'analyse des désordres a montré que les causes sont d'origine atmosphérique, de vétusté de la structure, d'attaque de l'eau due au défaut de l'étanchéité du tablier et la perte d'importantes sections d'acier.

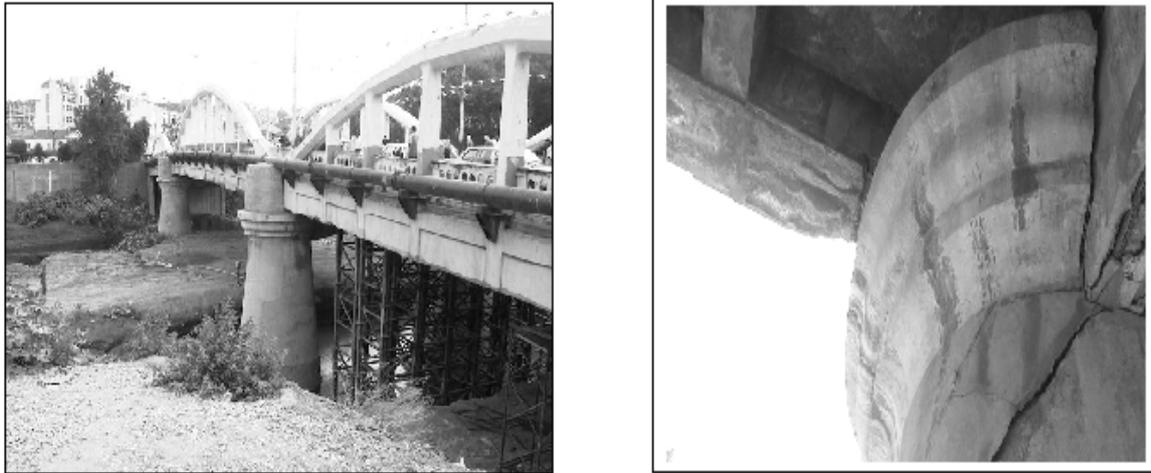


Figure II.33: Pont blanc d'El Harrach (Alger) avec dégradation au niveau de la pile [13]

Cette technique s'est propagée, après, pour la réhabilitation de plusieurs ouvrages d'art sur le territoire Algérien, avec d'autres sociétés de pose et de fourniture (Sika, Travomed, Enros, etc,...). Comme exemple d'application on peut citer : le pont sur oued Messaad à Laghouat en 2005, qui se situe sur l'axe de la route reliant Laghouat à Aflou. Cet ouvrage est constitué de trois travées identiques de 15.5 m chacune, avec un tablier composé de poutres en béton armé (quatre à chaque travée), et d'une dalle en béton armé de 20 cm d'épaisseur.

Cet axe routier devenu stratégique est très fréquenté par les poids lourds et les convois exceptionnels à causes des nouvelles installations pétrolières réalisées dans cette zone. Cette nouvelle sur-exploitation et l'étanchéité défectueuse de l'ouvrage ont engendré des désordres sur toute la structure parmi lesquelles: la fissuration au niveau de la dalle, la fissuration des poutres, la corrosion avancée des armatures et l'éclatement des bétons. Des réparations ont été effectuées avec un phasage dont le mode opératoire est le suivant [13]:

- Dépose de toutes les parties non adhérentes des bétons et des enduits ;
- Sablage de toute la structure (poteaux, poutres, dalle) et de toutes les armatures corrodées ;
- Injection des fissures par une résine époxydique (Sikadur 52 Injection) afin de reconstituer le monolithisme des éléments ;
- Protection des armatures sablées par un inhibiteur (Sika Monotop 61P AC) de corrosion ;
- Réparation et profilage des bétons par un mortier (Sikatop SF 126) de réparation à haute performance et avec fumée de silice ;
- Renforcement des poutres soumises aux efforts de la flexion par les lamelles "Sika Carbodur 540 ml" ;
- Renforcement des poutres soumises aux efforts tranchants par les tissus Sika Wrap HEX 230C[®] :120 m² ;
- Protection des bétons par un revêtement (SikaGard 680S) méthacrylates contre les agressions atmosphériques.

D'autres applications pour renforcements de ponts par le tissu en fibres de carbone (TFC) ont été effectuées, suite aux conséquences du séisme de Boumerdes, de Mai 2003. Durant les dernières années, la technique de renforcement par CFRP (TFC) avec les produits Sika et Freyssinet

devenait de plus en plus maîtrisable par les techniciens et personnels de terrain des entreprises Algériens. La réhabilitation des ponts comme celui d'Oued Oumazer à Cherchell (Tipaza) en 2006 fait preuve, et la pose parfaite du composite sur les parties détériorées du tablier de l'ouvrage a permis de constater l'effet du renforcement par ce type de composite sur le comportement global du pont.

II.3-Types de ruptures de renforcement par composites

Le matériau composite est un matériau élastique dont le comportement diffère de celui du béton et de l'acier (figure II.34) [13] et [15].

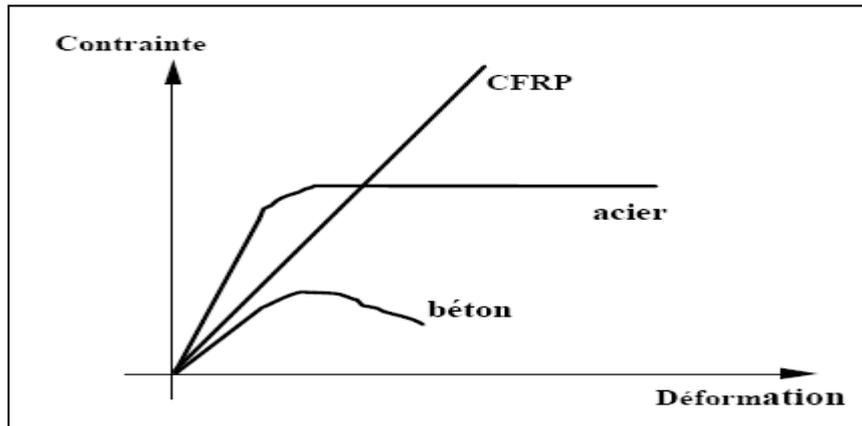


Figure II.34: comparaison de comportement entre différent matériaux [15].

L'adhésion des tissu de FRP sur des surface en béton armée provoque une modification de comportement structuraux comparativement à ceux des structures en béton armée non renforcées, par exemple la relation entre la charge et la flèche ou les modes de rupture voir figure (II.35) .

D'où : F_a : force reprise par les aciers ; dF_a : variation de l'effort repris par les aciers ; F_c : force reprise par le composite ; dF_c : variation de l'effort repris par le composite ; τ : contrainte de cisaillement dans le joint de colle.

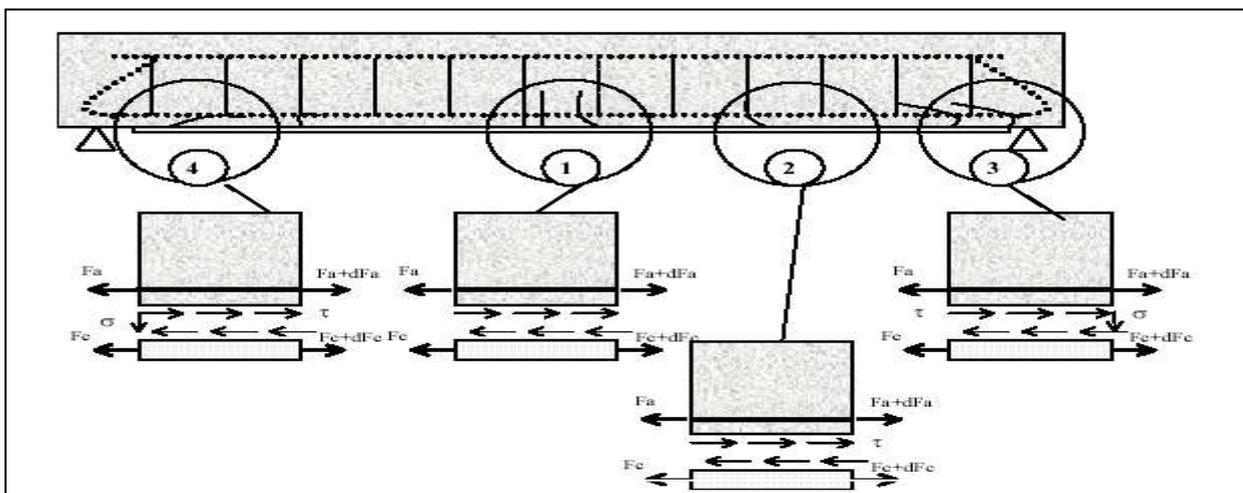


Figure II.35: Comportement structural d'une poutre renforcée [15].

On va décrire plus en détail le comportement mécanique de chaque section :

• **La section centrale (1) :**

Son équilibre dépend des longueurs d'ancrage. Dans cette zone l'adhérence entre le béton et le renfort est parfaite, et le film de colle ne reprend que des contraintes de cisaillement.

• **La section intermédiaire (2) :**

Dans cette section, les contraintes de cisaillement ne sont pas nulles. Deux paramètres peuvent alors modifier l'équilibre de la section : les caractéristiques mécaniques et géométriques du joint de colle (module et épaisseur) et l'intensité des contraintes.

Pour la section, les conséquences des interactions de chacun des paramètres sont une perte d'efforts dans le composite. Cette perte d'effort implique alors une redistribution des efforts dans la section vers les aciers (figure 2-4).

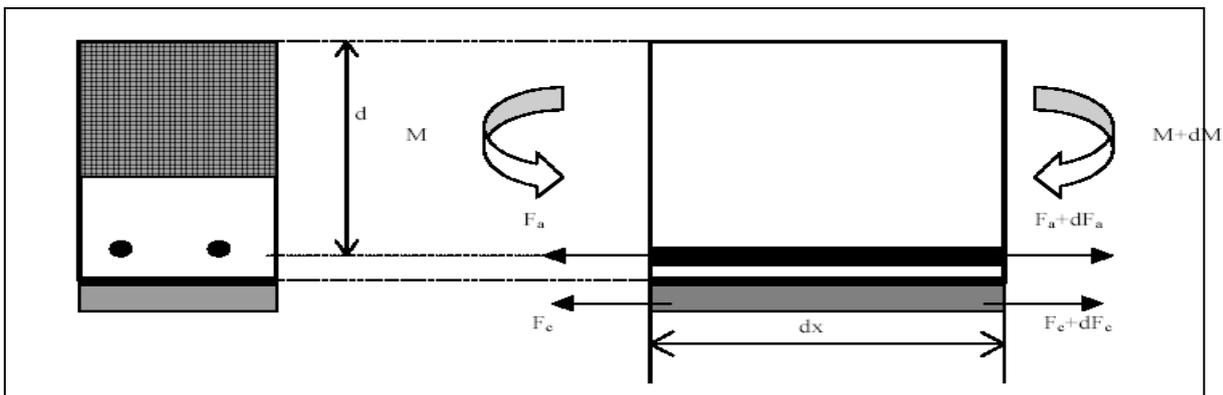


Figure II.36 : Efforts repris dans une tranche de poutre renforcée [15].

• **La section d'extrémité (3 et 4) :**

Cette section est soumise à un couple d'efforts défini par de nombreux auteurs dont qui ont mis en évidence la présence de surcontraintes d'extrémité et l'existence de sur contraintes normale localisée en extrémité de la plaque. La présence de ces surcontraintes localisées influence notamment le mode de rupture.

II.3.1 : Mécanismes de rupture des poutres renforcées :

Les principaux modes de rupture susceptibles d'être observés dans les poutres en béton armé, et renforcées extérieurement par plaque de matériaux composites, sont les suivants :

1. écrasement du béton avant la plastification des aciers
2. plastification des aciers suivait par l'écrasement du béton (avant la rupture de CFRP)
3. plastification d'acier suivait par la rupture d CFRP
4. délamination de l'enrobage du béton (le long de renforcement interne)
5. décollement de CFRP à l'interface béton/CFRP

La rupture à l'effort tranchant se produit quant la capacité de la poutre à la flexion augmente par l'addition des CFRP. Lorsque la résistance à l'effort tranchant des poutres sans renforcement sont insuffisante [13] et [15].

Le premier mode résulte lorsque les pourcentages d'armature et de composite sont élevés, le béton atteint sa résistance en compression avant la plastification des armatures. Par analogie au béton armé conventionnel, on qualifie ces poutres de surarmées.

Le deuxième et le troisième mode de rupture cités précédemment résultent de:

Si la quantité de renforcement d'acier est assez faible pour permettre la plastification, les forces vont continuer à s'emmagasiner dans le composite et le béton. Il peut alors s'en suivre une rupture en tension du composite ou une rupture par compression du béton.

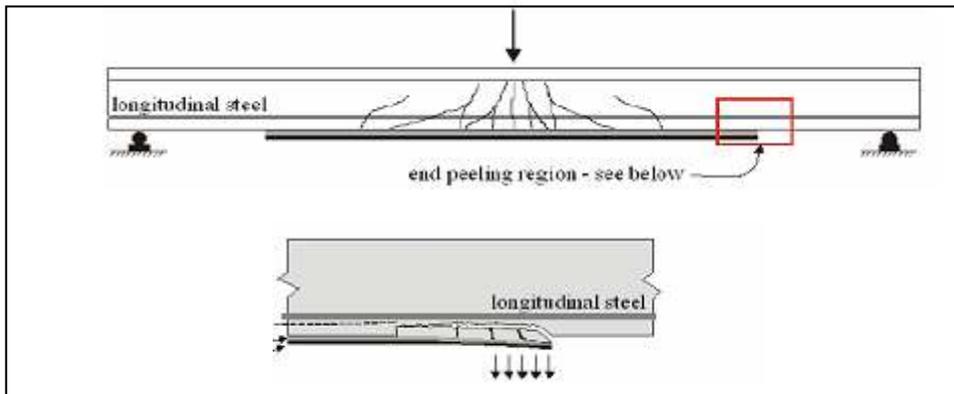


Figure II.37 : délamination de l'enrobage typique de décollement de l'extrémité de la plaque [15].

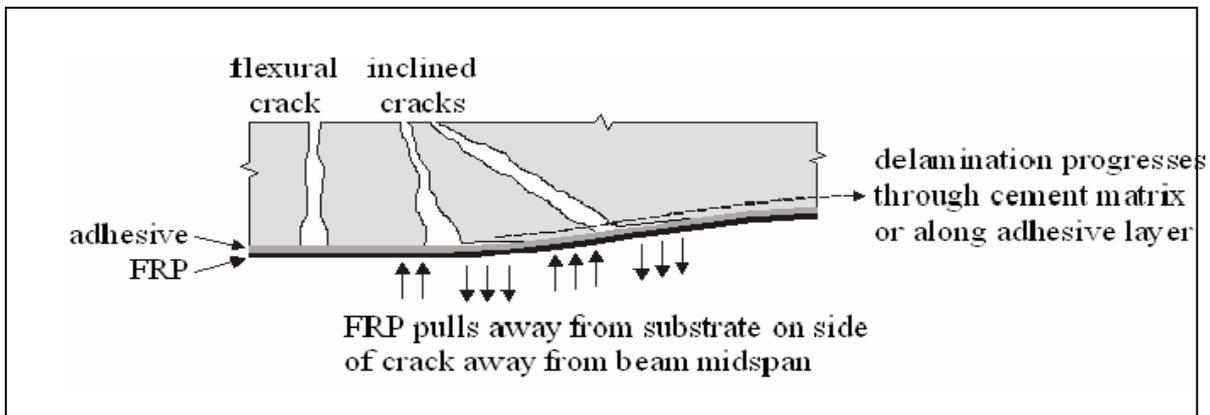


Figure II.38 : décollement à mi porté initié par fissure de flexion et/ou effort tranchant [15].

II.3.1.1-Rupture en tension de la plaque de composite :

Ce mode de rupture se produit lorsque le pourcentage d'armature passive et le pourcentage de composite sont tous deux faibles. La plastification des armatures est dans ces cas suivie d'une rupture de la plaque de composite en tension et ce, avant la rupture du béton en compression. La capacité du béton n'est alors pas utilisée au maximum. Cette rupture est fragile et n'est pas suggérée en pratique.

II.3.1.2-Rupture classique suivi par compression du béton :

Si le pourcentage d'acier est assez faible et la quantité de composite ajoutée en renfort assez grande pour utiliser toute la capacité en compression du béton, nous aurons la rupture du béton lorsque les déformations des fibres extrêmes en compression auront atteint leur limite. Ce mode est semblable au mode de rupture habituel des poutres en béton armé.

Le décollement des CFRP et l'enrobage du béton sont des modes de rupture indésirable car ils se produisent avant que l'élément renforcé atteigne sa pleine capacité.

II.3.1.3-Décollement de la plaque :

De nombreuses études expérimentales ont étudiés le décollement du composite (Teng 2002, Sébastien 2001, Nguyen 2001, Kotynia et Henris 2006.....). Le décollement peut avoir lieu dans le renforcement CFRP ou le système de renforcement. Il peut se produire dans le béton le long du plan de flexion (au niveau de renforcement interne) ou le long d'une couche mince (appelée enrobage). Comme il peut se produire aussi à l'interface béton / adhésif, adhésif / CFRP ou dans l'adhésif lui-même. Mais comme le CFRP est un matériau composite la rupture peut se produire aussi à travers le CFRP entre la résine et les fibres. Bien que nous n'ayons pas observé toutes ces causes lors de notre programme expérimental, nous les présentons ici.

•Surface non plane

Lorsque la surface du béton n'est pas plane, le collage de plaques rigides devient difficile et la plaque va décoller lentement à mesure que se produit le chargement. Le cas étudié de tissus imprégnés directement sur la surface ne nécessite pas nécessairement une surface parfaitement plane puisque le tissu épousera les formes de la poutre.

II.3.1.4-Rupture de cohésion dans la colle

La colle doit avoir une rigidité et une résistance suffisantes pour transférer la force de cisaillement entre le composite et le béton, et une dureté assez élevée pour prévenir la rupture fragile de la colle causée par la fissuration du béton. Avec les développements des résines au cours des dernières années, ce problème a été résolu. Plusieurs types de colle ayant les propriétés nécessaires sont aujourd'hui disponibles.

•Décollement à une extrémité de la plaque :

Quelques études ont noté un décollement à l'extrémité de la plaque de renfort. Ce mode de rupture s'initie à l'extrémité de la plaque et se propage vers le milieu (figure II-37). Il est causé par une haute concentration d'efforts de cisaillement et normaux à l'extrémité de la pièce. La combinaison de ces efforts fait ouvrir une fissure diagonale à l'extrémité de la pièce. Ces décollements peuvent être caractérisés comme un décollement interfaciale ou un délaminage de l'enrobage du béton.

Selon Sébastien le décollement aux extrémités du tissu se produit habituellement lorsque trois conditions sont remplies :

1. une faible portée de l'effort tranchant, ce qui produit un cisaillement important et un décollement entre le tissu et la poutre, situé proche des appuis
2. les extrémités du tissu sont éloignées des appuis
3. l'application de tissu raide empêchant la flèche et produisant une contrainte de cisaillement élevée près des extrémités du tissu.

•Décollement interfaciale

Le décollement interfaciale se produit à l'interface entre la surface de béton et le composite. Ceci est causé par la haute concentration des contraintes normales qui se produit à l'extrémité de la plaque et qui causera une rupture de tension dans le système de renforcement de détache avec la

bande de FRP qui indique que le lien adhésif-béton est plus fort que la capacité de tension du béton.

II.3.1.5-Enrobage du béton :

Le délaminage de l'enrobage s'initie par des fissures formées dans le béton, sur la surface de la poutre, à l'extrémité de la bande de CFRP. Ces fissures se forment à cause de la terminaison soudaine de la bande de composite qui cause des hautes contraintes normales et de cisaillement dans la partie tendue de la poutre en flexion.

•Décollement à mi porté :

Il se produit dans la portée de cisaillement de la poutre. Il s'initie à des endroits de haut rapport des moments de cisaillement et se propage dans la direction des moments décroissants (figure II.35).

Selon Sébastien (2001) le décollement à mi porté se produit sous les conditions suivantes :

1. une portée importante de l'effort tranchant, un moment de flexion élevé qui se produit proche de la mi-portée
2. les extrémités du tissu sont très proches des appuis
3. l'application de tissu mince

Dans la partie de cisaillement des poutres et proche du moment maximum, des fissures diagonales ou fissures de flexion – cisaillement se forment dans la surface du béton. Le décollement à mi porté peut s'initier au bout de ces fissures.

Les fissures dans le béton causent des variations des contraintes axiales dans la région du béton non fissurée et par conséquent dans le lien avec le FRP (plus haute contrainte au niveau des fissures, avec contrainte diminuée loin de fissures).

Il est rapporté aussi par Sébastien que le décollement à mi porté est catégorisé dans deux pas :

1. initiation
2. propagation

Pendant l'initiation, au bout des fissures de flexion de la poutre les fissures inclinées commencent à apparaître à travers l'enrobage du béton. Plus la poutre continue à fléchir sous un chargement croissant, plus l'ouverture des fissures ne devient importante. Cette ouverture ne se fait pas de façon symétrique de part et d'autre de la fissure. Ainsi, les deux faces d'une fissure ne sont pas au même niveau. Lorsqu'une plaque lie les deux côtés d'une fissure, la rigidité de la plaque faite que le côté le plus bas tire sur la partie de la plaque située de l'autre côté, la faisant décoller.

La fissure se propagera relativement et régulièrement, avec une augmentation régulière de la charge. Depuis que les ruptures initiées nécessitent la plus grande énergie de propagation, le décollement peut être arrêté quand la contrainte diminue. Donc avec l'augmentation de la charge la propagation du décollement paraît peu intermittente. Finalement une condition critique est atteinte et les fissures se propagent le long de la longueur de la section. Le CFRP se décolle complètement de la poutre et prend avec lui une mince couche du béton et même des cales du béton [15].

II.3.2 : Méthode d'ancrage :

Pour éviter le mode de rupture prématuré due au décollement, les plaques de CFRP doivent être ancrées adéquatement. Donc il est nécessaire de chercher des moyens techniques pour optimiser l'ancrage et pour que l'utilisation des matériaux composites soit économique.

L'ancrage peut être réalisé de plusieurs façons : par des verrous, des plats ou des pinces d'acier, par des mèche de carbone par collage du tissu cintrant la section ou en forme de U, ou bien par ancrage réalisé par un tissu longitudinal plus long que la portée (ancrage d'appui).

Chicoine (1997) a effectué des essais sur quatre poutres en béton armé de trois mètres de portée construites et renforcées avec des plaques en composite de carbone. Trois poutres ont été ancrées avec les bandes en U de composite verre époxy collé sur les faces verticales selon diverses configurations. Les résultats montrent que l'utilisation de bandes d'ancrages en U, équidistantes sur toute la longueur de la poutre, permet d'empêcher une rupture par le délaminage de la plaque aux extrémités, ainsi qu'une rupture par le décollement de la partie centrale de la plaque causé par l'apparition de nombreuses fissures de flexion. Enfin, pour la configuration testée, la rupture s'est produite en flexion avec un gain de résistance de 46 % par rapport à la poutre renforcée sans bandes d'ancrage.

Hollaway et Leeming, (2001) dans le projet RBUST ont étudiés des poutres précontraintes de 18 mètre de longueur renforcée de tissu de CFRP. La longueur de tissu de carbone est de 6 mètre ($a_l/a_v=0.2$), et des verrous métalliques ont été employés. La charge ultime et la ductilité structurale sont améliorées.

Banjamin. Z, (2005) : a étudié neuf poutres en béton armé de (15.2 x 25.4) cm de section et de 473 cm de portée. Huit ont été renforcées dans leur partie tendue par le collage de tissu en fibres de carbone avec deux différents types d'adhésif. Les plaques de composite sont étendues jusqu'aux appuis. Bajamin a trouvé que ce mode d'ancrage empêche le décollement de tissu et le délaminage d'enrobage. Dans ce sens les études de Kotynia et Henris (2006), montrent qu'après la révision du comportement de décollement et l'étude expérimentale qu'ils ont effectuée, que un bas rapport de a_v/h est un moyen efficace pour éviter le décollement à l'extrémité même. Ils ont recommandés de négliger le renforcement latéral de CFR, et d'utiliser l'ancrage d'appui avec un rapport de a_v/h égal à 2.7 [15].

II.3.3 : Paramètres influençant la poutre renforcée par composite :

Parmi les paramètres influençant le comportement des poutres renforcées on trouve :

1. préparation de surface :

Yoshizawa et al, 1996 : ont entrepris une étude sur l'effet du type de préparation extérieure de la surface du béton. Les spécimens utilisés dans cet essai sont des prismes en béton renforcé avec des plaques de CFRP, appliquées sur les deux faces opposés. Les surfaces du béton des spécimens sont préparées par l'injection d'eau et avec le sablage. Les résultats montrent que les éprouvettes préparées par l'injection d'eau ont doublés la capacité des spécimens en comparaison avec celles préparées avec le sablage, ainsi que les longueurs d'ancrage des feuilles de CFRP portent un grand effet sur la charge ultime des spécimens. [13] et [15].

Horiguchi et Saeki, 1997 : ont étudiés l'effet des méthodes de test et la qualité du béton sur l'efficacité des plaques de CFRP. Trois méthodes sont utilisées : essai de cisaillement, flexion et l'essai de traction direct. Trois modes de rupture sont observés :

Cisaillement du béton, délaminage et rupture de CFRP.

Quant la résistance à la compression du béton est inférieure à 25.3 MPa la rupture se produit dans le béton. Le délaminage s'est produit quand la résistance à la compression était élevée ou quand on effectue l'essai de cisaillement.

La rupture de FRP a été observée dans les essais de flexion avec une résistance de béton plus élevée.

2. Influence du rapport de la distance entre la charge et l'appui par rapport à la hauteur de la section (a_v / h) :

Selon Hollaway et Leeming 2001, le rapport de la distance entre la charge et l'appui à la hauteur de section (a_v / h) (figure 2-7) est un paramètre important vis-à-vis du mode de rupture des poutres renforcées. Une petite valeur de a_v/h provoque souvent une rupture brutale par effort tranchant.

Pour des poutres en béton armé, un rapport a_v/h supérieur à 6 conduit normalement à une rupture de flexion, un rapport a_v/h entre 2.5 et 6 conduit à une rupture par combinaison du moment de flexion et de l'effort tranchant.

Dans leur projet Hollaway et Leeming ont étudié des poutres en béton armé renforcé par des matériaux composites ayant des rapports variables :

$a_v/h = 3, 3.4$ et 4 à 7.72 .

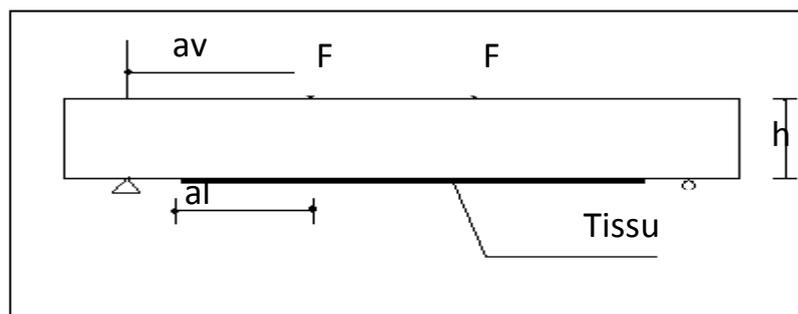


Figure II.39 : définition des paramètres [13] et [15].

Il a été constaté que plus les valeurs du rapport a_v/h sont élevées, plus les moments de flexion ultimes sont élevés, mais lorsque ce rapport a_v/h est supérieure à 6, l'influence sur la résistance ultime est quasiment nulle.

Aussi afin d'éviter une rupture prématurée, provenant du décollement du tissu, ancrer le tissu aux extrémités s'avère un moyen très efficace. Mais pour des poutres ayant un rapport a_v/h élevé (supérieur à 6), ce type d'ancrage ne modifie que très peu la résistance ultime de la poutre.

Enfin, le mode de rupture des poutres renforcées dépend de la valeur du rapport a_v/h

$a_v/h = 3$ un décollement, provenant de fissure d'effort tranchant se produit aux extrémités du tissu.

$a_v/h = 3.4$ rupture par cisaillement à l'interface des poutres et du tissu, due aux fissures d'effort tranchant.

$a_v/h = 4 - 7.72$ rupture par cisaillement à l'interface des poutres et du tissu. Cette rupture provient de la combinaison du moment de flexion et de l'effort tranchant.

3. Influence du taux de renforcement des armatures tendues :

Pour les poutres renforcées par matériaux composites, le mode de rupture et le gain de résistance ultime apportée par le composite sont conditionnés par le taux de renforcement des armatures tendues.

SAADATMANESH et EHSANI (1991) [15] ont effectué des recherches sur des poutres en béton armé renforcées par des plaques en fibres de verre imbibées de résine d'époxy.

Dans le cadre d'une étude sur l'effet du pourcentage de l'armature passive sur le renforcement par collage externe, divers rapports acier- béton ont été utilisés pour cette série d'essais.

Cinq poutres rectangulaires ($\rho_s = 1,8 \%$, $1,2 \%$ et $0,3 \%$) et une poutre en T ($\rho_s = 0,8 \%$) de 4.5 m de portée ont été renforcées à l'aide de plaques en fibres de verre collées sur la face en tension. Deux des cinq poutres rectangulaires ont été cambrées avant le collage des plaques. Ceci a permis d'observer les effets d'une prétention des lamelles.

Ils ont également observé que le gain de résistance en flexion est plus important avec des poutres faiblement armées en flexion. De plus, le renforcement avec des composites permet d'améliorer la rigidité et de réduire la largeur des fissures des poutres.

Enfin, l'effet de la cambrure préalable des poutres n'a augmenté que très faiblement la résistance en flexion, tout en diminuant sa ductilité de façon significative.

NGUYEN et AL, 2001 [15] ont étudié des poutres $120 \times 150 \times 1500$ cm³ dont les taux de renforcement sont respectivement égaux à 0.39% et 4.36%. La rupture de la poutre faiblement armée renforcée par CFRP est déterminée par une fissure d'effort tranchant près de l'extrémité du tissu. En revanche, la rupture de la poutre fortement armée provient de la rupture d'enrobage vers la mi-portée de la poutre.

RAHIMI et HUTCHINSON, 2001 [15] ont effectué une étude similaire sur des poutres $200 \times 150 \times 2300$ cm³ renforcées par CFRP, dont le taux de renforcement des armatures est $\rho_s = 0.65\%$ et 1.68% (voir figure 2-8). Ils ont constaté que l'augmentation de la résistance ultime des poutres ou $\rho_s = 1.68\%$ (poutre type C, suffisamment armée à l'effort tranchant), est beaucoup plus limitée comparativement à celles ou $\rho_s = 0.65\%$ (poutre type A, faiblement armée à l'effort tranchant). Les ruptures des poutres de type C proviennent de la ruine du béton comprimé associé au décollement du tissu.

Ainsi, dans le cas d'une poutre renforcée fortement armée en partie tendue et suffisamment armée à l'effort tranchant, la rupture provient de la ruine du béton comprimé et la résistance des armatures est loin d'être atteinte. C'est une rupture brutale et prématurée.

Pour des poutres faiblement ou moyennement armées, le renforcement par composite est efficace en terme de résistance ultime, d'où leur domaine d'application.

Dans le cas des poutres sans ferrailage en partie tendue on trouve dans la recherche de (Saadatmanesh et Ehsani 1991), qu'avec une poutre sans armature tendue et renforcée d'un tissu de verre (GFRP), la charge ultime mesurée est très inférieure à la valeur de calcul. La rupture prématurée de cette poutre provient de fissures très ouvertes dues au moment fléchissant. Le tissu dans la zone fissurée se décolle, une quantité minimale d'armature est ainsi nécessaire afin de limiter la largeur des fissures de flexion, et donc, éviter la rupture prématurée due au décollement du tissu.

4. Influence de la longueur du tissu :

Afin d'étudier l'influence de longueur de tissu Fanning et Kelly, 2001 [15] ont réalisé des essais en flexion quatre points sur des poutres renforcées du tissu de CFRP en utilisant différentes longueurs de tissu et en faisant varier le rapport de la longueur du tissu par rapport à la distance entre la charge et l'appui (a_l/a_v) (fig 2-7). Les poutres avec $a_l/a_v = 1$ (extrémité du tissu au niveau des appuis) se sont rompues du fait des fissures d'effort tranchant, situées au niveau du point de chargement, qui provoquent une rupture d'enrobage. En revanche, la rupture des poutres

renforcées ayant une valeur de a_l/a_v plus petite (0.5, 0.58 et 0.65) provient d'une rupture d'enrobage près des extrémités du tissu.

L'influence de la longueur de tissu sur la résistance a été également étudiée par Quantrill et al (1996) sur des poutres ayant une valeur a_l/a_v relativement petite (environ 3). Pour les poutres renforcées avec un tissu ou $a_l/a_v > 1$, les appuis fonctionnent comme des ancrage d'extrémités du tissu, qui empêchent le décollement, et augmentent considérablement la résistance ultime. Les études réalisées sur des poutres réelles de 18 mètre de longueur dans le projet de (Hollaway et Leeming, 2001) montre que, quelle que soit la longueur de tissu, la rupture des poutres renforcées provient du décollement local de tissu.

Le tableau II.7 : Les résultats expérimentaux des études [15].

Etude	Portée de la poutre (cm)	Aciers tendus	a_v/h	A_l/a_v	Charge ultime (KN)	Mode de rupture
Fanning et al, 2001 [15]	280	3HA12 P= 1.04%	4.58	1	115	Rupture d'enrobage et décollement du tissu
				0.65	102	Séparation de tissu et l'enrobage à l'extrémité du tissu
				0.58	81	
				0.5	72	
Quantrill et al, 1996 [15]	90	3ø6 P= 1.2%	3	0.93	40.8	Séparation de tissu et l'enrobage à l'extrémité du tissu
				>1	63.5	Ruine du béton comprimé
Hollaway et Leeming (2001) [15]	1800	précontrainte	10.6	0.85	72	Décollement local du tissu
				0.63	77	
				0.2	60	

Tableau (2-1) : influence de la longueur du renforcement sur la résistance ultime et le mode de rupture

De ce tableau on constate que :

- pour $av/h < 3$ (poutre courte), la longueur du renforcement inférieur ($al/av < 1$) n'a que peu d'influence sur la valeur de résistance ultime
- pour $av/h = 4.58$ la longueur du tissu influe sur la résistance de la poutre renforcée
- pour $av/h = 10.6$ (poutre longue), la longueur du renforcement ($al/av < 1$) influe peu sur la valeur de la résistance ultime.

5) influence de la quantité de tissu :

L'influence de la quantité de tissu longitudinal, sur la résistance ultime des poutres renforcées a été étudiée par plusieurs auteurs.

Ainsi Djelal et Coll 1996 ont effectués des recherches sur cinq poutres en béton armé de 3 m de porté avec un rapport d'armature en partie tendue $\rho_s = 0.7\%$ deux de ces poutres sont gardées comme des poutres témoin (sans renforcement extérieur). Les trois renforcées ont été endommagé avec une charge qui correspondait à 93% de la charge ultime d'une poutre témoin. Deux ont été réhabilité avec des plaques en fibre de verre de 3 mm d'épaisseur et ont enregistré un gain de résistance de 12%, alors que la poutre réparée avec une plaque de 6 mm a affichée un gain de 30% par rapport à une poutre témoin.

Dans les études de Rahimi et Hutchinson, (2001), le tissu de carbone de différentes épaisseurs a été appliqué au renforcement des poutres faiblement armées ou normalement armées à l'effort tranchant (voir tableau II.8).

Poutre	Section de tissu (mm ²)	Ps	Charge ultime (KN)	Mode de rupture
Poutre faiblement armée à l'effort tranchant (0.13 -0.19%)	120	0.65%	63	Séparation d'enrobage et d'écoulement de tissu provenant de l'effort tranchant
	180	0.65%	65	
Poutre fortement armée à l'effort tranchant (0.38%)	60	0.65%	54	Séparation d'enrobage et décollement du tissu
	180	0.65%	70	
	60	1.68%	76	Ruine du béton comprimé et décollement du tissu
	180	1.68%	102	

Tableau II.8 : influence de la quantité de tissu sur la résistance ultime et le mode de rupture [15].

Rahimi a constaté que l'augmentation de la section droite du tissu n'améliore pas la résistance ultime des poutres faiblement armées à l'effort tranchant, quel que soit le taux de renforcement longitudinal d'armatures. Les ruptures observées sont principalement provoquées par les fissures d'effort tranchant, le tissu longitudinal n'améliore quasiment pas la résistance à l'effort tranchant.

En revanche, l'augmentation de la section droite du tissu améliore efficacement la résistance ultime des poutres fortement armées à l'effort tranchant quel que soit le taux de renforcement longitudinal, la rupture provient soit du décollement du tissu, soit d'une fissure locale très ouverte due à la combinaison de l'effort tranchant et du moment fléchissant.

II.3.4 : Conclusion

Plusieurs points peuvent être tirés concernant le renforcement des poutres en béton armé en utilisant des matériaux composites :

- Des applications pratiques ont été réalisées en grand nombre, principalement en Europe. En Amérique du Nord, l'utilisation des composites connaît une croissance remarquable en génie civil, principalement dans le domaine de la réhabilitation des structures.
- Une augmentation de résistance à la flexion peut être obtenue en collant des matériaux composites sur la face tendue des poutres.
- Des nouveaux modes de rupture produits sur les poutres doivent être pris en considération lors du dimensionnement. On doit notamment prévoir une possibilité de délaminage du au décollement du tissu et utiliser l'ancrage pour l'empêcher.
- L'efficacité de renforcement pour une poutre en béton armé est limitée par la quantité d'armature déjà présente dans la section de la poutre (les gains de moment résistant est enregistré avec les poutres faiblement armées). L'efficacité a été également limitée par la préparation de surface, la méthode de collage de tissu, la résistance du béton et les paramètres géométriques des poutres.
- Le décollement aux extrémités du renforcement ou celui proche du mi porté de la poutre est la raison principale provoquant la rupture prématurée. Le décollement de tissu est dû à la concentration des contraintes près d'une fissure très ouverte due au moment fléchissant.

II.4- Résines époxydiques appliquées pour le renfort des structures.

II.4.1- Introduction

L'assemblage par collage est pratiqué depuis l'Antiquité. Les Égyptiens utilisaient la colle de pâte pour agglomérer les fibres de papyrus (les premiers papyrus connus remontent au XVIIIe s. avant notre ère). Ils connaissaient également le bitume, la poix et la cire d'abeille. Au Moyen Âge, on utilisait le blanc d'œuf pour coller les feuilles d'or des manuscrits enluminés, la colle de poisson pour assembler les objets de bois, la caséine...

Cependant, le développement technique des méthodes de collage date du XXe siècle et est dû principalement à l'apparition des résines synthétiques. Les premières applications de celles-ci ont été réalisées dans le domaine de l'aéronautique. Les connaissances ainsi acquises ont permis une transposition dans le secteur industriel. Le développement rapide auquel on a assisté a pour origine principale l'apparition de nouvelles résines, grâce aux progrès de la chimie macromoléculaire.

Il n'est pas besoin de démontrer l'importance prise par l'assemblage par collage dans la vie moderne ; actuellement, tous les secteurs de l'activité humaine font appel, directement ou non, à des adhésifs. On peut dire qu'une véritable science s'est substituée à l'empirisme dans le domaine du collage.

Les adhésifs structuraux sont aujourd'hui largement utilisés, notamment lorsque le recours aux conceptions multi-matériaux est nécessaire. Ils offrent de nombreux avantages et permettent en particulier d'assurer une liaison continue en distribuant plus uniformément les contraintes dans l'assemblage.

Indépendamment des avantages reconnus de ces nouveaux produits, leur développement nécessite de pouvoir identifier les mécanismes à l'origine de leur comportement mécanique. Malgré plusieurs décennies d'utilisation des colles structurales, certains phénomènes comme les effets d'épaisseur restent en partie inexplicables. L'analyse de différents travaux menés sur le collage structural a pu en effet mettre en évidence que certains adhésifs peuvent se comporter différemment suivant l'épaisseur du joint de colle. Pour la plupart des adhésifs étudiés, les études concluent que les caractéristiques des adhésifs à l'état massique sont peu différentes de celles d'un film d'adhésif dans un assemblage. Comment expliquer que certains adhésifs ne répondent pas à cette propriété ? De plus, si une certaine équivalence peut être retrouvée pour la plupart des joints épais, la question reste posée pour les joints d'épaisseurs faibles, soit quelques centaines de micromètres.

II.4.2- les Résines époxydes

Les résines époxydes permettent d'obtenir des assemblages résistant aux efforts mécaniques entre de nombreux matériaux minéraux, métalliques ou organiques. Ces résines sont liquides ou solides à la température ordinaire, suivant la longueur de leur chaîne moléculaire. Elles réagissent avec les corps polyfonctionnels acides ou basiques appelés « durcisseurs » pour donner des produits durs et infusibles. On distingue deux types de résines : celles qui durcissent déjà à froid, et celles qui durcissent à chaud, c'est-à-dire au-dessus de 120 °C.

Les colles « à froid » sont liquides, pâteuses ou en solution ; avant collage, on leur incorpore la quantité nécessaire d'un durcisseur liquide ou en solution. Ces colles permettent le collage du verre, de la pierre, du béton, du papier, des tissus, des résines thermodurcissables moulées et des polyesters, et même de certaines matières thermoplastiques telles que les polyamides et le polyméthylméthacrylate.

Les colles « à chaud » sont solides à température ordinaire ; le durcisseur est ajouté par le fabricant. Ce mélange est stable pendant plusieurs années. L'application de celles-ci se fait par un préchauffage des parties à encoller, suivi d'une application de la colle ; on assemble les différentes parties lorsque la colle est encore liquide. On porte ensuite à l'étuve pour effectuer le durcissement [16].

II.4.3- Caractéristiques des assemblages collés

De nombreux paramètres déterminent les caractéristiques des assemblages collés. Deux théories de l'adhésivité sont en présence. La première concerne l'édification d'une adhésivité spécifique, c'est-à-dire une action chimique de la colle sur les matières à assembler. Les forces de liaison dans un composé macromoléculaire peuvent être classées en deux catégories : les liaisons primaires (liaisons covalentes, liaisons ioniques) n'entrent généralement pas en jeu dans les phénomènes d'adhérence ; les liaisons secondaires sont celles qui peuvent intervenir dans la réalisation d'un joint adhésif. Souvent faibles, elles sont regroupées sous le nom de forces de Van der Waals et de liaison hydrogène (mouillage) intra et intermoléculaires. Dans les liaisons secondaires, on distingue : les forces de Keesom, qui existent entre les molécules possédant un moment dipolaire, les forces de dispersion de London, d'origine quantique, et les forces d'induction de Debyes, qui résultent de l'interaction d'un dipôle permanent fort avec une molécule facilement polarisable.

La seconde concerne l'adhésivité mécanique, qui fait appel à l'accrochage purement mécanique des colles dans les pores des surfaces assemblées ; dans le cas de surfaces très lisses, elle semble en défaut, et des expériences précises ont montré ses insuffisances.

Pour rendre compte avec le plus d'exactitude de tous les phénomènes rencontrés, il faut faire une synthèse des deux théories en présence.

Lorsque la colle commence à devenir solide ou pseudo solide, il se produit une contraction en volume, ou retrait, qui crée des contraintes dans le joint. La valeur de ces contraintes dépend des modules et du fluage de la colle et du support, suivant la forme et l'épaisseur du joint. Le rapport entre les coefficients de dilatation thermique joue un rôle important dans la solidification des colles qui durcissent à chaud et dans les variations de température de service.

Beaucoup de colles et certains supports manifestent des changements de structure moléculaire par hygroscopicité, par vieillissement, par actions conjuguées de plastifiants et de solvants, ce qui provoque non seulement des variations de volume, de module de plasticité, mais aussi de résistance au collage.

Les irrégularités géométriques, telles que les changements brusques du contour – creux ou rayures de la surface –, sont génératrices de tensions.

Les efforts extérieurs que peut supporter un collage avant la rupture dépendent de la résistance inhérente au joint, des caractéristiques de fluage et des modules de la colle, de la conception et de l'épaisseur du joint ainsi que de l'état de surface du support.

De faibles valeurs de la résistance de l'assemblage sont obtenues lorsque les modules de la colle et du support sont faibles. Deux matériaux assemblés, de module élevé, présentent également une faible résistance.

La résistance la plus élevée est obtenue lorsque les assemblages comportent au moins un matériau de module moyen. Dans les assemblages où l'un des matériaux, colle ou support, est de faible module, les contraintes se répercutent dans le joint entre le matériau à fort allongement et celui qui est à faible allongement.

Si la colle et le support, au contraire, présentent un module élevé, l'écoulement de la matière est insuffisant pendant les dernières phases du durcissement pour annihiler les contraintes mises en jeu [16].

II.4.4- principes de collage

La mauvaise conception des joints est la principale cause de rupture des assemblages. Tout d'abord la nature et les dimensions des pièces à encoller doivent être choisies de façon à éviter les ruptures, et la surface d'encollage doit être suffisante. Ensuite, l'assemblage doit supporter des forces de cisaillement plutôt que de traction (on constate que la résistance d'un collage décroît lorsqu'on passe d'un effort en cisaillement à un effort en traction, puis à un effort d'arrachement ou de clivage). Il est à noter que l'augmentation de la longueur d'un joint ne correspond pas forcément à un accroissement proportionnel de la résistance.

D'autre part, la couche de colle doit être uniforme, car les irrégularités sont génératrices de tensions localisées, et aussi mince que possible pour présenter les plus fortes résistances à la traction et au cisaillement.

Généralement, un accroissement de l'épaisseur de la couche de colle provoque une meilleure résistance aux chocs pour une colle à faible module ; si le module de la colle est élevé, l'épaisseur de la couche utilisée semble n'avoir que peu d'effet. On doit utiliser assez de colle pour que l'enduction des substrats soit suffisante.

Enfin, les conditions de service et les matériaux à assembler sont les critères de choix pour une colle. Les assemblages de différents matériaux doivent être conçus de façon que les contraintes dues aux coefficients de dilatation thermique soient réduites au minimum. Les colles à solvants volatils donnent de meilleurs joints avec des surfaces lisses et imperméables [16].

II.4.5- mise en œuvre

Lors de la conception d'une pièce, avec ses exigences mécaniques et thermiques, on définit la nature des matériaux à utiliser, la géométrie de l'assemblage, la colle à utiliser, l'épaisseur du joint et la méthode pour l'obtenir.

La géométrie de l'assemblage est déterminée par les contraintes que celui-ci devra subir. Les assemblages réalisés par collage doivent travailler en cisaillement, et la conception du joint doit être telle que les efforts soient repris suivant ce mode de sollicitation. Pour les assemblages de révolution, les parties coniques à angle faible sont préférables à un emmanchement cylindrique.

Le choix de la colle est dicté par plusieurs impératifs dont les principaux sont la nature des supports, les caractéristiques souhaitées pour l'assemblage et les possibilités de mise en œuvre [16].

II.4.6- Avantages et inconvénient d'application des résines époxydes

a)- Avantages

- Excellente adhérence sur la plupart des substrats.
- Excellente résistance à la traction et au cisaillement
- Excellentes propriétés mécaniques
- Bonne résistance thermomécanique
- Excellente durabilité (tenue à la fatigue)
- Bonne inertie chimique (résistance aux huiles et aux solvants)
- Bonne résistance aux variations de température
- Faible retrait
- Indice de réfraction proche de celui du verre (joint de colle "invisible")
- Réversibilité du collage possible (critère important dans le cas d'une restauration par exemple).
- Bonne résistance à la chaleur humide
- Réaction de réticulation indépendante du substrat
- Fluage faible
- Faible odeur [17].

b)- Inconvénients

- Absence de souplesse
- Vieillit mal aux UV
- Prix possiblement élevé en fonction de la formulation
- Jaunit légèrement avec le temps
- Phénomènes de rétractation pendant la polymérisation pouvant générer des contraintes [17].

II.4.7- Avantages et inconvénient de la résine de collage (interface)

a)- Avantages

- Répartition plus régulière des contraintes.
- Possibilité d'assembler des matériaux de nature et d'épaisseur différente.
- Peu d'altération des matériaux au niveau du joint.
- Elasticité des joints collés.
- Etanchéité des joints collés et isolation électrique, électromagnétique, phonique....
- Allègement des structures.
- Amélioration de l'esthétique de l'assemblage [18].

b)- Inconvénients

- Résistance à la chaleur souvent limitée.
- Durabilité en milieux sévères parfois moyennes.
- Traitement de la surface avant collage.
- Faible résistance au pelage.
- Démontage facile.
- Temps de prise parfois long [18].

II.5- Applications en ALGERIE et avis techniques

II.5.1-Préambule

Les adhésifs structuraux sont aujourd’hui largement utilisés, notamment lorsque le recours aux conceptions multi matériaux est nécessaires. Ils offrent de nombreux avantages et permettent en particulier d’assurer une liaison continue en distribuant plus uniformément les contraintes dans l’assemblage. Indépendamment des avantages reconnus de ces nouveaux matériaux ; on distingue deux types de procédés qui sont destinés soit par collage (résine de colle de l’interface) ou d’injection des fissures éventuelle dans l’élément structural. Et ces derniers sont largement réponsus et utilisés dans le domaine du renfort des structures en génie civil, soit à l’échelle mondiale ou Algérien.

II.5.2- Résine époxydique structurale de colle de l’interface

C’est une colle structurale à 2 composants, à base de résine époxydique, peu sensible à l’humidité, utilisable dans une plage de températures comprises entre +10°C et +30°C, tel que SIKA DUR 32LP et SIKA DUR 31CF, qui possèdent les caractéristique mécaniques et physiques suivantes [19] :

- SIKA Dur 32LP
 - Densité : composant A : 1.4, composant B : 2
 - Coefficient de dilatation thermique : 65×10^{-6} par °C (temps entre -20°C - +60°C).
 - Température transition vitreuses-Tg : 68°C
 - Retrait : < 0.1%
 - Résistance en compression : 80MPa.
 - Module d’élasticité en compression : 7800MPa.

Produit de collage structural	
Adhérence	conforme
Résistance au cisaillement	$\geq 6\text{MPa}$
Résistance en compression	$\geq 30\text{MPa}$
Retrait/dilatation	$\leq 0,1\%$
Ouvrabilité(DPU)	110mn à 30°C
Sensibilité à l’eau	conforme
Module d’élasticité	$\geq 2000\text{MPa}$
Coefficient de dilatation thermique	$\leq 100.10^{-6}$
Température de transition vitreuse	$\geq 40^\circ\text{C}$
Durabilité	conforme
Substances dangereuses	Conformes au 5.4

- SIKA Dur 31CF
 - Densité : 1.9 (mélange A+B, à +23°C).
 - Epaisseur de couche : 30mm max.
 - Aptitude de mise en place : aptitude à la mise en place sur surfaces verticales ;
Aucun affaissement jusqu’as 15mm d’épaisseur.

- Retrait : durcit sans retrait
- Coefficient de dilatation thermique : $5,9 \times 10^{-5}$ par °C (température de +23°C à +60°C)
- Température transition vitreuse (Tg) : HDT=+49°C (7 Jours à +23°C).
- Module d'élasticité : traction 5000 MPa (14 jours à +23°C),
Compression 4600 MPa (14 jours à +23°C).
- Elongement à rupture : $0.40 \pm 1\%$ (7 jours à +23°C).
- Résistance en compression :

Temps de durcissement	Température de durcissement		
	+10°C	+23°C	+30°C
1 jours	25-35 MPa	45-55 MPa	50-60 MPa
3 jours	40-60 MPa	55-65 MPa	60-70 MPa
7 jours	50-60 MPa	60-70 MPa	60-70 MPa

-Résistance en flexion :

Temps de durcissement	Température de durcissement		
	+10°C	+23°C	+30°C
1 jours	11-17 MPa	20-30 MPa	20-30 MPa
3 jours	20-30 MPa	25-35 MPa	25-35 MPa
7 jours	25-35 MPa	30-40 MPa	30-40 MPa

-Résistance en traction :

Temps de durcissement	Température de durcissement		
	+10°C	+23°C	+30°C
1 jours	2 - 6 MPa	6 -10 MPa	9 -15 MPa
3 jours	9 -15 MPa	17-23 MPa	17-23 MPa
7 jours	14 -20 MPa	18- 24 MPa	19 - 25 MPa

-Adhérence :

Age	température	support	adhérence
1 jours	+10°C	Béton sec	4 MPa
1 jours	+10°C	Béton humide	4 MPa
1 jours	+10°C	acier	6-10 MPa
7 jours	+10°C	acier	10-14 MPa
7 jours	+23°C	acier	11-15 MPa
7 jours	+30°C	acier	13-17 MPa

Dans le même contexte de la colle époxydique structurale, il existe une colle thixotrope à deux composants, mélange de résine époxydique et fillers spéciaux, conçue pour une utilisation à une température comprises +8°C et +35°C, tel que SIKA DUR 30, qui possède les caractéristiques mécaniques et physiques suivantes [19] :

• SIKA Dur 30

- Densité : $1.65 \text{ kg/l} \pm 0.1 \text{ kg/l}$ (mélange A+B, à +23°C).

- Epaisseur de couche : 30mm max.
- Aptitude de mise en place : aptitude à la mise en place sur surfaces verticales ;
Aucun affaissement jusqu'au 3-5mm d'épaisseur à 35°C.
- Retrait : 0,04%
- Coefficient de dilatation thermique : $2,5 \times 10^{-5}$ par °C (température de +20°C à +40°C)
- Température transition vitreuse (Tg) : HDT=+49°C (7 Jours à +23°C).
- Module d'élasticité : traction 11200 MPa (à +23°C),
Compression 9600 MPa (à +23°C).
- Adhérence : sur béton > 4MPa, sur acier > 21MPa.

- Résistance en compression :

Temps de durcissement	Température de durcissement	
	+10°C	+35°C
12H	-	80-90 MPa
1jours	50-60 MPa	85-95 MPa
3jours	65-75 MPa	85-95 MPa
7jours	70-80 MPa	85-95 MPa

-Résistance en flexion :

Temps de durcissement	Température de durcissement	
	+15°C	+35°C
1jours	3-5 MPa	15-18 MPa
3jours	13-16 MPa	16-19 MPa
7jours	14-17 MPa	16-19MPa

-Résistance en traction :

Temps de durcissement	Température de durcissement	
	+15°C	+35°C
1jours	18-21 MPa	23-28 MPa
3jours	21-24 MPa	25-30 MPa
7jours	24-27 MPa	26-31MPa



Figure II.40 : Application de la colle structurale sur l'interface [19].

II.5.3- - Résine époxydique structurale d'injection

C'est une Résine d'injection époxy sans solvant à faible viscosité, utilisé pour le remplissage, l'obturation ou le jointoiment de fissures ou de cavité ; là où un collage structural est nécessaire afin de restaurer l'intégrité de l'ouvrage, qui convient pour l'injection sur des supports humides ou secs, tel que SIKA injection451 et SIKAdur 52 injection, qui possèdent les caractéristique mécaniques et physiques suivantes [19] :

- SIKA injection451

- Densité : composant A : 1.14 kg/l, composant B : 0.87 kg/l à 20°C
- Viscosité: du mélange A + 8°C : ~ 350 mPa·s
A + 15°C : ~ 180 mPa·s
A + 23°C : ~ 100 mPa·s
A + 35°C : ~ 70 mPa·s
- Résistance en compression : 70 -80 N/mm².
- Module d'élasticité en compression : ~50 N/mm²
- Adhérence : Sur support béton saturé en eau, Après 5 jours en immersion dans l'eau : 2.6 N/mm² (rupture dans le béton)

- SIKAdur 52 injection

- Masse volumique : composant A+ B : 1,1 kg/l à 20°C
- Viscosité: du mélange A+ B , A + 10°C : ~ 1200 mPa·s
A + 20°C : ~ 430 mPa·s
A + 30°C : ~ 220 mPa·s
- Coefficient de dilatation thermique : 8,9. 10⁻⁵ par °C (de -20°C à +40°C)
- Résistance en compression : ~ 52 MPa (après 7 jours à +23°C)
- Résistance en flexion : ~ 61 MPa (après 7 jours à +23°C)
- Résistance en traction : 37 MPa (après 7 jours à +23°C)
- Module d'élasticité en flexion : 1800 MPa (après 7 jours à +23°C)
- Adhérence par traction directe: ≥ 4 MPa (après 7 jours à +23°C, rupture dans le béton)

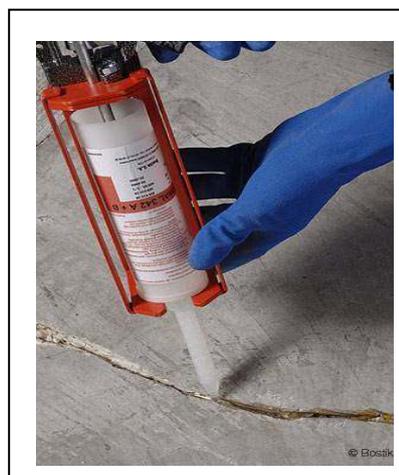


Figure II.41: Application de la résine d'injection [19].

Chapitre III :

Les Nano-composites dans le domaine de renfort

Chapitre III : Les Nano-composites dans le domaine de renfort

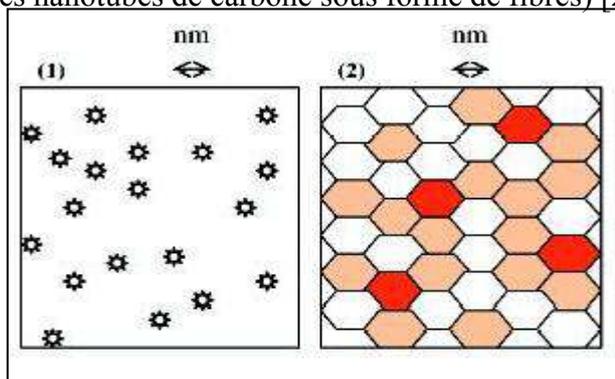
III.1- Introduction

Les nano-composites correspondent à des matériaux pour lesquels l'un des constituants, au moins, présente une dimension linéique inférieure à 100 nm. Ce domaine a mobilisé l'attention et l'imagination des communautés scientifiques et industrielles au cours des dernières années au delà de l'impulsion engendrée par les nano-composites. Nombreuses opportunités ont été entrevues pour surmonter la limitation des micro-composites traditionnels. La recherche, dans ce domaine, a littéralement explosé en raison de l'attrait intellectuel provoqué par l'organisation à l'échelle de nanomètre et en raison des innovations techniques. Ces dernières permettraient la conception des nouvelles structures présentant des flexibilités sans précédent, des améliorations des propriétés physiques et occasionneraient un impact industriel important.

III.2- Définition d'un Nano-composite

Un nano-composite est un matériau solide multiphasé dont une des phases a ou moins une dimension inférieure à 100 nanomètres. Un nano-composite est généralement la combinaison d'une matrice massive avec une phase de renfort nanométrique de propriétés différentes résultantes de différences structurales et chimiques. Les propriétés mécaniques des nano-composites sont différentes de celles des matériaux composites traditionnels à cause d'un rapport surface/volume élevé, et de son facteur de forme important. Le renfort peut être sous forme de particules (minéraux), de feuillets (argiles exfoliées) ou de fibres (nanotubes de carbone). L'interface matrice-renfort présente une grande surface qui est typiquement un ordre de grandeur plus grand que celle dans le cas d'un matériau composite traditionnel. Cette interface implique qu'une faible quantité de renfort nanométrique peut avoir un effet observable sur les propriétés macroscopiques du composite. Par exemple, l'ajout de nanotubes de carbone améliore les conductivités électrique et thermique d'un matériau composite. D'autres types de nanoparticules peuvent conduire à l'amélioration des propriétés optiques, diélectriques, la résistance au feu, ou des propriétés mécaniques.

En général, le renfort nanométrique est dispersé dans la matrice lors de l'élaboration du composite. Le taux massique de nanoparticules introduits est souvent très faible (entre 0,5% et 5%) à cause du seuil de percolation faible. Ceci est typiquement le cas pour les nanoparticules non-sphériques avec un facteur de forme élevé (par exemple, les argiles sous forme feuillets, ou les nanotubes de carbone sous forme de fibres) [20].



(1) Composite dans lequel les renforts ont une dimension inférieure ou égale au nanomètre

(2) Matériaux résultant de mélanges multiphasés, dont la répartition en tailles caractéristiques est voisine de la centaine de nanomètres, voire inférieure

Figure III.1 : Définition morphologique de nano-composites [20].

Les composites avec des renforts micrométriques ont montré certaines de leurs limites. Leurs propriétés résultent de compromis : l'amélioration de la résistance, par exemple, se fait au détriment de la plasticité ou de la transparence optique. Les nano-composites peuvent pallier à certaines de ces limites et présentent des avantages face aux composites classiques à renforts micrométriques :

- Une amélioration significative des propriétés mécaniques notamment de la résistance sans compromettre la ductilité du matériau car la faible taille des particules ne crée pas de larges concentrations de contraintes.

- Une augmentation de la conductivité thermique et de diverses propriétés notamment optiques qui ne s'expliquent pas par les approches classiques des composants. Les nanoparticules, ayant des dimensions en deçà des longueurs d'onde de la lumière visible (380-780 nm), permettent au matériau de conserver ses propriétés optiques de départ ainsi qu'un bon état de surface.

La diminution de la taille des renforts que l'on insère dans la matrice conduit à une très importante augmentation de la surface des interfaces dans le composite. Or, c'est précisément cette interface qui contrôle l'interaction entre la matrice et les renforts, expliquant une partie des propriétés singulières des nano-composites. A noter que l'ajout de particules nanométriques améliore, de manière notable, certaines propriétés avec des fractions volumiques beaucoup plus faibles que pour les particules micrométriques.

On obtient ainsi à performances égales, un gain de poids important ainsi qu'une diminution des coûts puisque l'on utilise moins de matières premières (sans tenir compte du surcoût des nano-renforts), une meilleure résistance pour des dimensions structurales similaires et une augmentation des propriétés barrières pour une épaisseur donnée [21].

III.3- Classification des Nano-composites

III.3.1- Classification des Nano-composites suivant la matrice

Classiquement les nano-composites sont classés suivant la nature de la matrice et l'ordre croissant de la température d'utilisation [22].

a-Nano-composite à matrice organique

Aussi appelés nano-composites à matrice polymère, ils sont sûrement les plus développés du fait de l'importance commerciale de ses derniers et de la matrice (cout et savoir-faire) .De nombreux processus de fabrication.les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans un domaine de température ne dépassant pas 200 à 300°C.

La matrice organique se subdivise en deux groupes :

- Les matrices thermoplastiques
- Les matrices thermodurcissables

a-1 Les matrices thermoplastiques

La famille des matrices thermoplastiques (on parle de "plastique") est très vaste et peut être séparée en plastique de grande diffusion et en plastique technique.

Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc.

Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection. Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS), le polyamide (PA), le polycarbonate (PC), etc. L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication. Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Cependant, ils possèdent la propriété de pouvoir être mis en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement successifs. Ils peuvent donc être récupérés et facilement recyclés.

a-2 Les matrices thermodurcissables

Contrairement aux matrices thermoplastiques, les matrices thermodurcissables (ou résines thermodurcissables) ne peuvent être mises en forme qu'une fois. En effet, après polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, ces résines conduisent à un réseau très réticulé qui ne peut être détruit que par un apport important de chaleur. Ainsi, les matrices thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques et thermiques plus élevées que les matrices thermoplastiques. Les principales résines thermodurcissables sont :

- Les résines polyesters insaturées
- Les résines de condensation
- Les résines époxydes

b-Nano-composite à matrice métallique

Un domaine de température allant, jusqu'à 600 degrés dont certains procédés de fabrication, s'inspirent de la métallurgie des poudres. Les particules de seconde phase peuvent être des oxydes, borures, carbures, nitrures. Les composites à matrice métallique encore appelés MMCs pour metal-matrix composite se sont développés grâce à la facilité et à la maîtrise des procédés de fabrication ainsi qu'à leur faible coût.

c-Nano-composite à matrice céramique

Pour des applications à plus haute température (1000 degrés) comme les oxydes, les carbures ou les nitrures. L'utilisation des céramiques est limitée notamment par leur ténacité à la rupture, leur résistance à la fatigue et aux chocs thermiques.

III.3.2- Classification des Nano-composites suivant les différents types de renforts ou charges :

Les renforts ont au moins une de leurs dimensions morphologiques inférieure à 100 nm et peuvent être classés en fonction de leur géométrie [21].

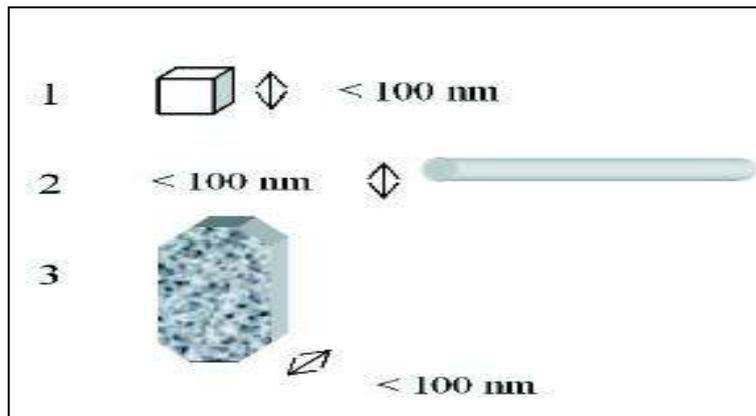


Figure III.2 : Géométrie de différents types de renforts [21].

a-Les nanoparticules

Les premières nanoparticules ont été utilisées il y a plus de cent ans (nanoparticules métalliques dans les peintures mayas, noir de carbone dans les pneus). Les améliorations et nouvelles méthodes visent à obtenir un meilleur contrôle de leur taille, de leur morphologie et de leurs propriétés de surface. On distingue les méthodes utilisant la condensation d'une phase gazeuse (pyrolyse, plasma, CVD,...) et la voie chimique (wet chemistry) à partir de précurseurs placés en solution.

b-Les nanotubes et nanofibres

Les nanotubes et nanofibres ont un diamètre inférieur à 100 nm et un rapport longueur/diamètre d'au moins 100. Les nanofibres traditionnelles ont fait l'objet de nombreuses études. Une avancée plus récente est venue des nanotubes de carbone avec leurs exceptionnelles propriétés mécaniques et électriques. Ils peuvent être utilisés avec une grande variété de matrices polymères (polyamide, polyester, polycarbonate, polystyrène, PPS, PEI, PEEK). La dispersion des nanotubes dans le polymère est essentielle pour obtenir les propriétés désirées. L'ajout de ces derniers dans la matrice peut augmenter la viscosité du polymère mais l'effet est moins prononcé que celui observé avec des fibres conventionnelles.

c-Les plaques, lamelles et feuillets

Ce sont des matériaux constitués de couches d'épaisseur de l'ordre du nanomètre et avec un rapport de forme dans les deux autres dimensions d'au moins 25. Parmi ce type de matériaux, les argiles sont peut-être les plus connues car elles sont naturelles donc faciles à extraire. Leur structure a été étudiée et déterminée il y a de nombreuses années. Chaque couche est constituée de deux feuilles de silice chargées négativement et d'un gap entre celles-ci appelé "*gallery*" qui contient des cations inorganiques pour équilibrer les charges et maintenir les couches de silice ensemble. Pour que ces structures soient utilisées pour des nanocomposites, il faut séparer les différentes couches. Le récent regain d'intérêt est le résultat de leurs propriétés exceptionnelles pour les nanocomposites. Ces dernières dépendent du type d'argile, du choix de prétraitement de celle-ci, du polymère et de la méthode pour incorporer les feuillets d'argile dans le polymère.

Trois types de nanocomposites peuvent être obtenus avec des argiles dans une matrice polymère dépendant de la nature des constituants utilisés, y compris la matrice, les cations inorganiques et l'argile:

(1) Microcomposite : le polymère n'est pas intercalé entre les couches de silice. Les phases sont séparées et on retrouve les propriétés des microcomposites.

(2) Nanocomposite intercalé : une (ou parfois plusieurs) chaîne polymère est intercalée entre les couches de silice. Le résultat est une structure relativement ordonnée avec une alternance de couches polymères et inorganiques.

(3) Nanocomposite exfolié : ce sont des structures délaminées où les couches de silice sont complètement et uniformément réparties dans la matrice polymère. La délamination a pour effet de maximiser les interactions polymère/argile augmentant considérablement la surface de contact et créant les propriétés spécifiques de ce type de nanocomposites.

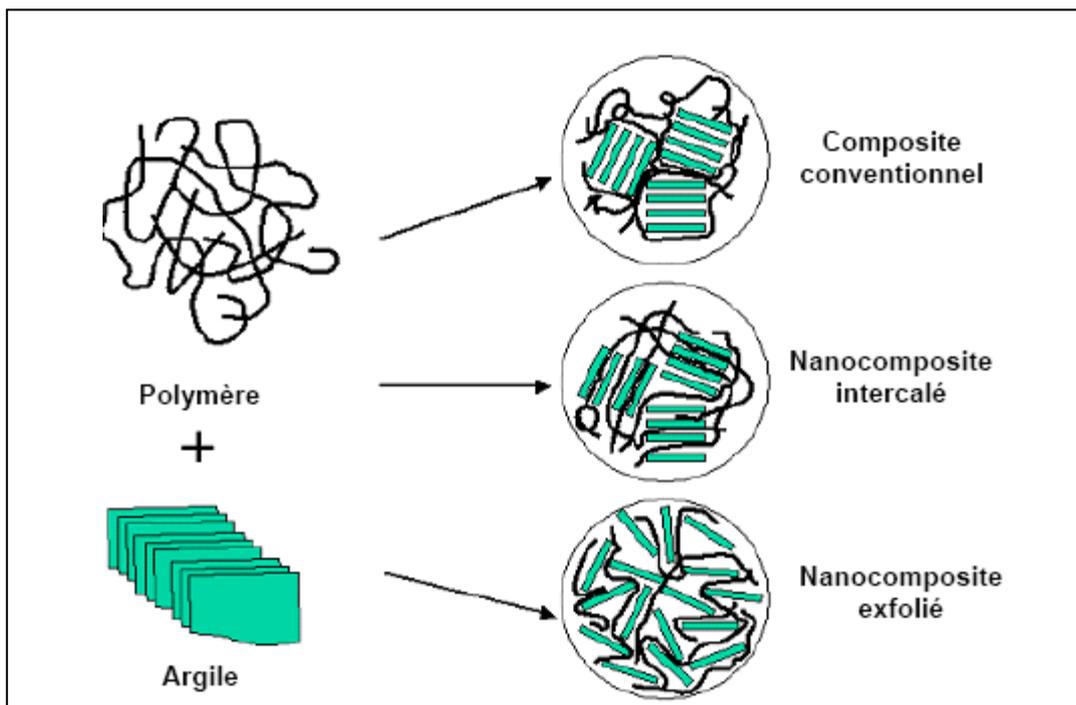


Figure III.3 : Représentation schématique des différentes morphologies des nano-composites polymère/argile [21].

De nombreux nano-composites sont élaborés à partir d'un polymère dans lequel sont dispersées des nanoparticules. En effet, l'incorporation des nano-charges au sein des matériaux polymères permet de profondément modifier leurs propriétés telles que mécaniques, thermiques, électriques, ou magnétiques, et ainsi d'élargir leur domaines d'applications.

Les propriétés intrinsèques d'un objet (micrométrique ou nanométrique) peuvent permettre de conférer au matériau des propriétés spécifiques telles que magnétiques ou électriques et/ou modifier ses propriétés thermiques, mécaniques ou électriques. Mais pourquoi introduire un objet de dimension nanométrique plutôt qu'un objet micrométrique ? En cela, deux raisons essentiellement :

- L'interface polymère / charge est décuplée dans le cas d'un nano-composite
- Le nano-objet peut se structurer à plusieurs échelles au sein du matériau.

L'enjeu de la mise en oeuvre de ces nouveaux matériaux est d'obtenir la dispersion la plus fine possible des charges, c'est-à-dire de développer suffisamment d'interactions et de surface entre la matrice et les feuillets, afin de les exfolier dans des directions aléatoires.

Les propriétés des nanocomposites sont fondamentalement différentes de celles des solides à microstructure classique. Trois phénomènes y concourent : l'effet de confinement, lié à la faible taille des entités élémentaires, l'augmentation des surfaces et interfaces, ainsi que la mobilité atomique qui en découle, et enfin l'intensification des interactions entre les différents éléments [23].

Le Tableau III.1 répertorie en fonction de leur nature et de leur forme diverses nano-charges utilisées comme renforts de polymères.

Tableau III.1: Quelques exemples de nano- charges [23].

Nature de nanoparticule	Géométrie	Exemples
inorganique	Particulaire	Silice, carbonate de calcium
	Fibrillaire	Sépiolite
	Plaquettaire	Argile (Silicates lamellaires)
métallique	Particulaire	Magnétite
organique	Particulaire	Noir de carbone
	Fibrillaire	Nanotube de carbone
	Plaquettaire	Graphite

III.4- Effet de taille : du micro au nano

L'introduction de particules de taille nanométrique dans une matrice polymère présente plusieurs avantages directs comparés aux charges microniques classiques.

Tout d'abord, du fait du faible prix au kg des nano-renforts et d'un procédé de fabrication très peu modifié, le coût global revient d'un nano-composite diffère très peu en général de celui de la matrice et ce, pour des améliorations de propriétés potentiellement importantes.

Ensuite, la taille du renfort rend l'utilisation des nano-composites intéressante pour de nombreuses applications qui nécessitent la transparence du matériau, un bon aspect de surface et une bonne tenue en température, comme par exemple dans l'optoélectronique et dans l'emballage alimentaire.

L'utilisation de nanocharges permet également la combinaison d'un faible poids avec de hautes performances.

En effet, les grandes surfaces développées par les nanocharges (Tableau III.2) confèrent aux nano-composites un rapport poids/performance meilleur que celui des matériaux composites classiques. Par exemple, Fornes [24] montre qu'il faut deux fois moins d'argile que de renforts à fibres de verre, pour un même module élastique (Figure III.4). Lors de l'ajout de renfort dans une matrice polymère, de nombreux paramètres géométriques (taille, distribution du renfort, ...), moléculaires (longueur des chaînes, motif de constitution, ...), ou encore d'interactions entre le renfort et la matrice, jouent un rôle sur le comportement macroscopique du composite [24].

Tableau III.2. Comparaison des caractéristiques géométriques de différents renforts microniques et Nanométriques [24].

Géométrie	Renfort	Dimensions caractéristiques	Facteur de forme (L/φ, L/e)	Surface spécifique (m ² /g)
Sphérique	Noir de carbone Silice pyrogénée	250 nm φ=5-40 nm	1	7-12 50-400
Tubulaire	Nanotube de carbone	φ=1-50 nm L=10-100μm	>1000	100-400
Lamellaire	Talc Montmorillonite	L=1-20μm L=0.6-1μm	5-20 600-1000	2-35 700-800

Pour les renforts de taille micronique, la matrice apparaît comme une phase homogène et continue. Ainsi, seule la géométrie du renfort et les affinités qu'il aura avec la matrice influenceront les propriétés du microcomposite. Au contraire, il sera difficile de faire abstraction des paramètres moléculaires de la matrice dans le cas de renforts nanométriques. En effet, la longueur des chaînes, leur mobilité au voisinage du nanorenfort, vont devenir des éléments importants dans la compréhension des propriétés des nanocomposites. De même que, pour une fraction volumique donnée de renfort, les interactions interparticules seront plus nombreuses et les particules plus proches quand la taille des particules est plus petite.

De plus, la diminution de la taille des particules conduit à une augmentation de leur surface spécifique (Tableau III.2). Par exemple, à pourcentage volumique de renfort introduit dans la matrice, 20 fois plus de surface est développée par un renfort nanométrique comme l'argile que par un renfort micronique classique comme le talc. De fait, les interactions qui vont avoir lieu entre les nano-charges et les chaînes macromoléculaires vont être exacerbées par le biais de ces grandes surfaces spécifiques développées. Elles pourront entre autres :

- être réactives vis-à-vis de la matrice, et ainsi participer à sa polymérisation, comme par exemple lors de la vulcanisation d'élastomères chargés par des particules de noir de carbone.
- Avoir un effet nucléant et favoriser la croissance préférentielle de phase cristalline dans le cas de matrices semi-cristallines.
- Provoquer la formation de liaisons covalentes à l'interface. Par exemple, Sun et col [24] ont montré que des nanotubes fonctionnalisés par des esters avaient la possibilité de former des groupements amides avec des milieux aminés comme les protéines.

Aussi, les grandes surfaces interfaciales proposées par les nano-renforts, peuvent conduire à la formation d'une troisième phase dans le composite entre le renfort et la matrice, appelée interphase. Par la suite, une description plus précise de l'impact de cette troisième phase sur les propriétés macroscopiques des nano-composites sera donnée. Néanmoins, de nombreux travaux mettent en évidence de nettes améliorations des propriétés des nano-composites pour des taux de charge très faibles (<5%). Des travaux ont été faits pour étudier les paramètres microstructuraux qui sont à l'origine de ces améliorations.

Pour certains nano-renforts, à grande surface spécifique, le volume de l'interphase va très vite devenir non négligeable par rapport à celui de la matrice. Par exemple, dans le cas d'une matrice élastomère renforcée avec 12,5% en poids de noir de carbone ($\phi = 30\text{nm}$), Wong et col [24] évaluent le volume de l'interphase à 30% en poids de la matrice. Par conséquent, dans l'hypothèse de la formation d'une interphase continue, ou non, les propriétés macroscopiques du nano-composite devraient être rapidement contrôlées par les propriétés de cette dernière. En pratique, deux synergies extrêmes entre les nano-charges et la matrice ont été identifiées et sont utilisées pour expliquer le comportement de certains nano-composites:

– **Faible synergie ou interphase molle.** De nombreux travaux ont décrit ce type d'interphase lorsqu'il y a sorption sélective par le renfort inorganique des composants minoritaires de la matrice au voisinage du renfort, ou encore création de faibles liaisons avec le renfort du fait d'une réorientation locale des chaînes dans l'interphase (proportion plus importante d'interactions Van der Waals). Ces phénomènes peuvent entraîner une plastification facile de l'interphase.

– **Forte synergie ou interphase rigide.** L'hypothèse de la formation d'une interphase rigide est basée sur la fixation de chaînes macromoléculaires à la surface du renfort qui induit un confinement local plus important. Ce confinement se traduit par une diminution de la mobilité au voisinage des charges et par conséquent par une modification des propriétés de la matrice dans l'interphase. Ainsi, de nombreux travaux ont montré une relation entre la diminution de la mobilité locale des chaînes macromoléculaires au voisinage de la charge et une augmentation de la résistance thermique des nanocomposites.

Enfin, les propriétés variées des renforts (module élastique, stabilité thermique, etc...) et leur géométrie (plaquette, tubulaire, sphérique) permettent le développement de matériaux multifonctionnels promettant des combinaisons infinies des propriétés. Par exemple, l'insertion de particules rigides dans une matrice ductile peut améliorer la stabilité thermique de la matrice afin par exemple de minimiser le retrait de la matrice. À l'inverse, des particules molles dans une matrice rigide permettent d'obtenir un système plus ductile tout en gardant une bonne rigidité (ex : amélioration des propriétés choc).

De même, le facteur de forme élevé de certains renforts permet également d'améliorer les propriétés barrière aux gaz de films (O_2 , CO_2) et représente une alternative aux emballages multicouches. Ainsi, dans l'industrie alimentaire, l'extrusion multicouche de matériaux barrière est remplacée par de l'extrusion monocouche, procédé économe en matières premières et plus écologique car les matériaux obtenus sont plus facilement recyclables.

III.5- Historique et applications

III.5.1- Historique

Le mot ‘nano-composite’ est un terme récent mais le concept n’est pas nouveau et les paragraphes suivant permettent de resituer son origine [25].

a. Les nano-composites naturels :

Une large variété de nanostructures et nano-composites existe déjà dans la nature comme les os, les toiles d’araignée ; certaines bactéries parviennent également à fabriquer des nanostructures.

Les nanobiocomposites naturels ont une structure à l’échelle du nanomètre, à l’image de celle de certains coquillages, dite de brique constituée de protéines organiques et de particules de carbonate de calcium. Ces structures naturelles sont constituées de blocs élémentaires nanométriques de nature différente et entrent, de ce fait, dans la classification de nanocomposites.

La plupart des nanocomposites organiques/inorganiques naturels s’auto-assemble suivant deux types de mécanismes :

- formation préalable de la structure organique puis nucléation et croissance de la phase minérale. Ce mécanisme s’applique à la plupart des composites biologiques. La matrice organique peut cependant se restructurer et se réorganiser pendant la formation de la phase minérale, se rapprochant ainsi du second mécanisme.

- assemblage simultané des matériaux organiques et inorganiques. Certains matériaux entièrement organiques ou inorganiques (comme les dents) peuvent faire intervenir, lors de leur synthèse, divers types de matériaux qui ne se retrouvent pas dans leur structure finale. Les exemples les plus simples de nano-composites naturels sont des composants biologiques qui fabriquent des nanoparticules au sein même de leur structure cellulaire. Certaines graminées provoquent la précipitation/condensation de nanoparticules de SiO₂ sous différentes formes (bâtonnets, feuillets).

Les organismes biologiques peuvent fabriquer des nanostructures (épines d’oursin, os, coquillages,...) qui présentent un degré de complexité supérieur à celui des nanoparticules mentionnées précédemment. Les chimistes essaient par biomimétisme de reproduire en laboratoire ces organisations naturelles complexes et souvent très hiérarchisées. Certaines bactéries provoquent la précipitation de minéraux dont la structure est guidée par des protéines à la surface de ces dernières.

b. Des nano-composites synthétiques historiques :

L’idée d’améliorer les propriétés des matériaux en combinant deux phases aux propriétés différentes n’est pas nouvelle, même au niveau nanométrique. On retrouve à travers l’histoire des exemples de matériaux très anciens que l’on peut considérer comme des nanocomposites même si cette approche n’a bien évidemment pas été voulue initialement. Par exemple certaines colorations de peintures mayas sont dues aux inclusions de nanoparticules métalliques et d’oxyde dans un substrat de silicate amorphe, ou bien encore le lustre de certaines poteries de la renaissance italienne est imputable à la présence de nanoparticules métalliques de cuivre et d’argent de 5 à 100 nm obtenues par un processus de réduction. Plus récemment, en 1917, le noir de carbone a été introduit dans la composition des pneumatiques

dont la durée d'utilisation a été ainsi multipliée par cinq. Cette poudre de carbone fabriquée par pyrolyse contrôlée d'hydrocarbures en phase vapeur est constituée de particules de 0,01 à 0,4 micromètres tandis que le diamètre moyen des agrégats varie de 0,1 à 0,8 microns. Le noir de carbone est utilisé comme agent de renforcement dans les produits à base de caoutchouc tels que les pneus, boyaux, bandes transporteuses, câbles ou encore de pigments noirs dans des encres, peintures, enduits, céramiques, plastiques. Il sert également à la fabrication de matériaux isolants résistants aux hautes températures ou à des produits antistatiques.

Depuis une vingtaine d'années, des nano-composites polymères/argile connaissent un fort développement suite aux recherches menés par Okada et al. [22] Cette équipe de recherche du laboratoire Toyota a montré pour la première fois l'intérêt de disperser la montmorillonite dans le polyamide-6, en présentant des améliorations par rapport à la matrice vierge, et ce pour un faible taux d'incorporation de ces charges. Depuis les études se sont multipliées avec des matrices aussi bien thermoplastiques que thermodurcissables. L'utilisation de la montmorillonite pour valoriser ces polymères se fait de plus en plus courante [22].

III.5.2- Applications

Les nano-composites sont de plus en plus présents au niveau de la recherche et certaines applications (Automobile, emballage ou tenue au feu) sont déjà viables commercialement. La plupart de ces applications concernent les matériaux à matrice polymère puisque les procédés de fabrication sont largement maîtrisés et de ce fait à faible coût.

Par ailleurs, les argiles naturelles sont actuellement plus utilisées que les synthétiques car elles sont accessibles facilement dans la nature et sont déjà incorporées dans divers produits comme les peintures, cosmétiques et produits pharmaceutiques. Elles sont, par conséquent, déjà approuvées par l'U.S. Food and Drug Administration (FDA). De plus, les faibles quantités de particules d'argile (1 à 10% en masse) nécessaires dans les nano-composites n'impliquent pas ou peu de changement de fabrication du composite à base de polymères.

Les paragraphes suivants décrivent quelques propriétés des matériaux nano-composites à base d'argile [23].

a- Propriétés structurales

Les nano-composites ont montré un intérêt particulier dans l'amélioration des propriétés mécaniques face aux composites traditionnels. Le principal avantage est l'obtention de résultats comparables pour des concentrations plus faibles permettant de diminuer considérablement le poids total. On observe principalement en présence de charges lamellaires une augmentation du module d'Young et de limite élastique. Les travaux montrent qu'il est préférable d'avoir un système exfolié, ce qui permet d'avoir une plus grande interface et d'optimiser l'effet du facteur de forme. L'adhésion interrassiale semble être aussi un élément essentiel à prendre en compte [27].

Toyota est l'un des pionniers pour les nano-composites notamment pour des applications structurales dans l'automobile. L'ajout de 5% en masse de feuillettes d'argile permet d'obtenir, voire d'améliorer, des propriétés qui sont généralement celles de matrices chargées à plus de

30% en masse de talc ou de fibres de verre. La problématique principale est d'avoir un matériau combinant à la fois rigidité et propriétés mécaniques tout en étant plus léger. Les matériaux nano-composites répondent à ce cahier de charges et participent à la diminution de la masse du véhicule, à propriétés équivalentes, donc à la diminution de sa consommation, mais aussi à la limitation des quantités de matières utilisées et ainsi permettent d'obtenir un impact positif sur le recyclage.

General Motors Corporation (GM) a franchi le pas de la recherche à la production et poursuit son effort pour intégrer des nano-composites dans des produits de grande série. La première application commerciale a été introduite dans des marches-pieds pour les modèles 2002 des vans GMC Safari et Chevrolet Astro: En effet, le nano-composite à base d'argile et d'oléfine thermoplastique (TPO) est à la fois plus léger et rigide, moins fragile à basse température et plus recyclable (car il y a moins d'additifs dans le plastique). Grâce au volume de production, le coût du nano-composite, plus cher initialement, est équivalent à celui des composites TPO traditionnels car la quantité de matériaux utilisés est plus faible et qu'aucun nouvel outil n'est requis pour mouler les pièces. Cette première tentative a été le fruit d'une coopération entre le centre de R&D GM (Warren, Michigan) qui a contribué à la partie recherche, Basell, fournisseur de résines plastiques, qui a développé la technologie nécessaire à l'industrialisation, Southern Clay Products (Texas) fournisseur de l'argile pure (smectite) et Blackhawk Automotive Plastics (Ohio) qui a moulé les marches-pieds. Cette première application de pièces automobiles a ouvert la voie à d'autres applications plus ambitieuses en terme de quantité. GM a utilisé des nano-composites sur les baguettes de protection latérale de l'une de ses voitures les plus vendues (Chevrolet Impala modèle 2004). Ces dernières sont 7% plus légères et présentent un meilleur état de surface, tout en étant plus facilement recyclables. Au total, GM consomme 245 tonnes de nano-composites par an notamment à base d'oléfine [23].

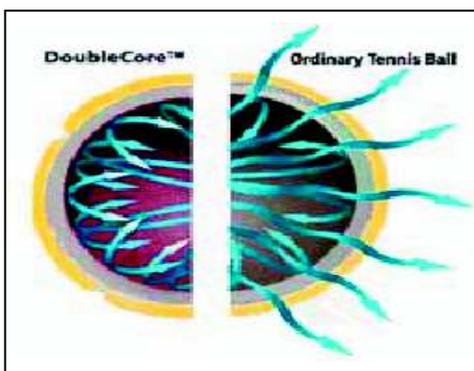
Tableau III.3 : Propriétés mécaniques du Polyamide 12 en fonction de la structure [23].

Type	Inter layer Distance (nm)	Additive Content (%)	E - Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PA 12		0	1600	200
Composite	1,2	2	2000	10
Nanocomposite	2,1	2	2700	100

b- Propriétés de barrière

L'incorporation de petites quantités d'argile augmente les propriétés de barrière vis-à-vis de l'eau et des gaz. En effet, les lamelles de silicate que l'on retrouve dans la structure des argiles sont imperméables à l'eau et aux gaz. Ainsi, elles augmentent la distance à parcourir pour les molécules qui diffusent (tortuosité du chemin de diffusion, Figure III.4). La quantité d'argile incorporée dans les polymères et le rapport de forme des renforts contribue à l'amélioration des propriétés de barrière.

La perméabilité au dioxyde de carbone a été mesurée dans le cas de polyimides partiellement exfoliés préparés par Lan et al. [23] Le rapport de la perméabilité du nanocomposite à la perméabilité de la matrice pure diminue de manière importante dès que le taux de charge augmente, pour des valeurs faibles, inférieures à 2 % en masse. L'effet sur la perméabilité à l'eau, dans le cas de polyimides, est similaire à celui discuté précédemment. L'utilisation d'argiles modifiées, à facteurs de forme (rapport entre la longueur et l'épaisseur d'un feuillet d'argile) variables, permet d'obtenir des systèmes ayant une dispersion plus ou moins fine pour un taux de charge de 2 % en masse. Les résultats montrent que meilleure est la dispersion, meilleure sera l'imperméabilité.



Le revêtement nanocomposite empêche l'air de s'échapper de la balle de tennis, qui conserve plus longtemps sa pression intérieure initiale et ses qualités de rebond.

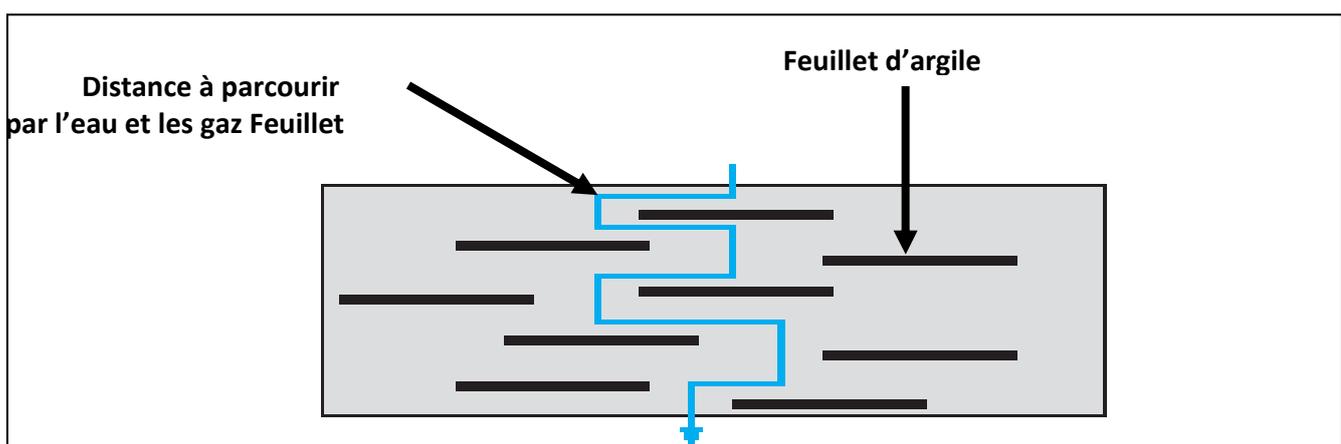


Figure III.4: Tortuosité du chemin de diffusion[23].

Honeywell (Virginie, Caroline du Sud) [23] a développé des nano-composites à base de polyamide ayant des propriétés de barrière passive et active vis-à-vis de l'oxygène.

La barrière passive résulte de la présence de particules d'argile incorporées qui ralentissent le processus de diffusion de l'oxygène dans le composite et force les molécules à migrer vers des zones où l'oxygène est piégé (barrière active). L'incorporation d'argile limite de 15 à 20% la valeur initiale de la transmission d'oxygène dans le polymère seul.

Triton Systems (Chelmsford, Massachusetts) et l'US Army développent des emballages non réfrigérés capables de garantir une durée de conservation de la nourriture beaucoup plus grande. La société InMat Incorporation (New Jersey) a développé plusieurs applications de barrière pour des revêtements nanocomposites notamment dans des balles de tennis pour conserver une pression interne sur une plus grande durée. Cette société a également étendu le concept de barrière aux liquides et hydrocarbures et collabore avec l'*U.S. Army Soldier Systems Center* (Natick, Massachusetts) pour développer, à partir de nanocomposites élastomères, des gants de protection présentant une meilleure résistance aux flammes et aux hydrocarbures.

La capacité de réduire la transmission de solvant à travers les polymères comme les polyamides peut être utilisée dans des réservoirs à combustible et à carburant (De Bievre and Nakamura of UBE Industries). On peut ainsi diminuer les émissions d'hydrocarbures des réservoirs. Cette même société a également trouvé une application concrète plutôt insolite dans la dispersion d'herbicide dans les systèmes souterrains d'irrigation: grâce à l'ajout d'argile, l'herbicide qui est contenu à l'intérieur même des tuyaux plastiques et qui empêche les racines de s'accrocher, est diffusé beaucoup plus lentement, augmentant ainsi la durée d'utilisation du dispositif.

Une autre application est le remplacement de la couche EVOH (éthylène alcool vinylique) utilisé généralement dans les flacons de Ketchup. Le nouveau polymère utilisé est le polyamide MXD6 associé à des argiles organophiles. Grâce aux nanocharges, la barrière à l'oxygène est améliorée de 80% comparée à celle du MXD6.

c- Réduction de l'inflammabilité

La réduction de l'inflammabilité est un paramètre clé dans l'application des polymères techniques et de commodité dans de nombreuses applications, plus particulièrement dans le domaine du bâtiment et dans le transport. L'addition de produits anti-feu classiques halogénés représente un surcoût important et ne répond plus aux normes internationales environnementales. C'est pourquoi, depuis qu'il a été prouvé que les matrices polymères à renfort de feuillets d'argile présentaient une amélioration non négligeable de la résistance au feu, de nombreux programmes de recherche ont été initiés.

Des consortiums de recherche pour explorer le potentiel des nanocomposites pour réduire l'inflammabilité des thermoplastiques se sont formés comme par exemple au National Institute of Standards et Technology (NIST, Gaithersburg) et regroupent des scientifiques du gouvernement et de l'industrie.

Les propriétés de résistance au feu sont généralement évaluées par la méthode du calorimètre à cône. Les paramètres mesurés sont le taux de chaleur libérée (HRR : Heat Rate Release), la chaleur de combustion (Hc), la production de monoxyde de carbone et de fumée (*SEA* : Specific Extinction Area). Le taux de chaleur libérée, et plus particulièrement son maximum, est le paramètre significatif de la résistance au feu.

Le caractère ignifuge des polymères est classiquement amélioré de deux façons :

- utilisation d'un polymère ignifuge intrinsèque comme le PVC (Polychlorure de vinyle) ou les fluoropolymères;

- utilisation de produits ignifuges comme le trihydrate d'aluminium, l'hydroxyde de magnésium ou des composants organiques bromés. Certains de ces produits nécessitent de forts taux de charge, jusqu'à 60% en masse, impliquant une forte densité du composite, une mauvaise flexibilité, des difficultés de mise en forme, de faibles propriétés mécaniques. Par ailleurs, l'utilisation de composés bromés devient très limitée du fait de leur toxicité.

Le fabricant de polymères Gitto et d'argile Nanocor ont développé un programme d'incorporation de nanoparticules d'argile améliorant l'inflammabilité de divers plastiques notamment les polyoléfines largement utilisés dans des applications industrielles

Dans le domaine de recherche sur les matériaux, l'élaboration de nano-composites polymères se révèle être une activité de recherche multidisciplinaire dont les résultats pourraient élargir le champ d'application des polymères.

Par rapport aux composites conventionnels, ces nano-composites présentent des améliorations quant à leurs propriétés mécaniques, thermiques, électriques et barrières. En outre, ils peuvent réduire de manière importante le niveau d'inflammabilité et conserver la transparence de la matrice polymère.



Figure III.5 : Propriétés d'inflammabilité [26].

L'introduction de nanoparticules dans une matrice polymère retarde sa dégradation et simultanément permet la formation d'une couche superficielle carbonisée.

Cette couche ne se fracture pas (à la différence du composite classique) et croît pour aboutir à la formation d'une nanostructure multicouche jouant le rôle d'un excellent isolant qui diminue la libération de produits volatils issus de la combustion du polymère. Même expérience avec le nylon : 5% d'argile entraîne une réduction de 63% [26].

d- Amélioration de la conductivité

Les nanotubes de carbone peuvent servir de renforts conducteurs pour dissiper l'électricité statique dans des équipements de fabrication de disques durs ou de semi-conducteurs. Ils peuvent également être insérés dans des pièces automobiles plastiques pour les rendre conductrices et permettre de les peindre en utilisant leurs propriétés électrostatiques. Les nanotubes ont l'avantage sur le graphite d'être efficaces à de très faibles taux de chargement et de minimiser la détérioration des propriétés mécaniques du polymère [21].

e- Propriétés optiques

La faible taille des particules permet d'obtenir dans le cas d'une bonne dispersion une très faible influence de leur présence sur l'absorption ou l'absorption de la lumière visible. Strawhercher et al montrent que la transmission des ondes UV peut être atténuée tandis que celles du visible ne le sont pas [27].

Ces caractéristiques intéressantes laissent déjà entrevoir plusieurs applications industrielles prometteuses pour les nano-composites polymères:

- Automobile (réservoirs d'essence, pare-chocs et panneaux intérieurs et extérieurs);
- Construction (sections d'édifices et panneaux structurels);
- Aérospatial (panneaux ignifuges et composants haute performance);
- Électricité et électronique (composantes électriques et cartes de circuits imprimés);
- Emballage alimentaire (contenants et pellicules), etc....

III.6- Données économiques et production mondiale des nano-composites

Les nano-composites ont montrés un intérêt croissant de la recherche : domaine d'étude dynamique et en perpétuelle évolution, branche très active de la R&D qui commence à déboucher sur des applications industrielles et commerciales. Matériaux qui ne concernent actuellement que les marchés de niche où l'amélioration des propriétés justifie leur utilisation en dépit de leur surcoût [28].

D'après un rapport de la Business Communication Co. Inc., le marché mondial total pour les nano-composites polymères, en 2003, a atteint 11 123 tonnes pour une valeur de 90,8 millions de dollars. Avec une croissance annuelle estimée à 18,4%, en 2008, a atteint 36 000 tonnes soit une valeur de 211 millions de dollars. Même si les productions des thermodurcissables et thermoplastiques sont sensiblement les mêmes en volume actuellement, la valeur totale des thermoplastiques est 3,5 fois plus importante. En 2008, les thermoplastiques ont représentés 77 % de la production en volume et 85% en valeur. Concernant le marché de l'emballage pour les nano-composites, BRG Townsend Inc. a prévoyait, en 2002, que la consommation a atteint 2 200 tonnes par an jusqu'au 2007 et 45 000 tonnes en 2011 [21].

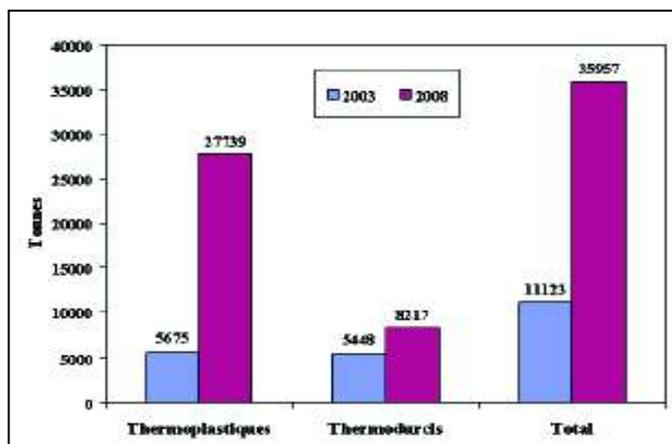


Figure III.6.1 : Production mondiale (en tonnes) de nano-composites polymères [21].

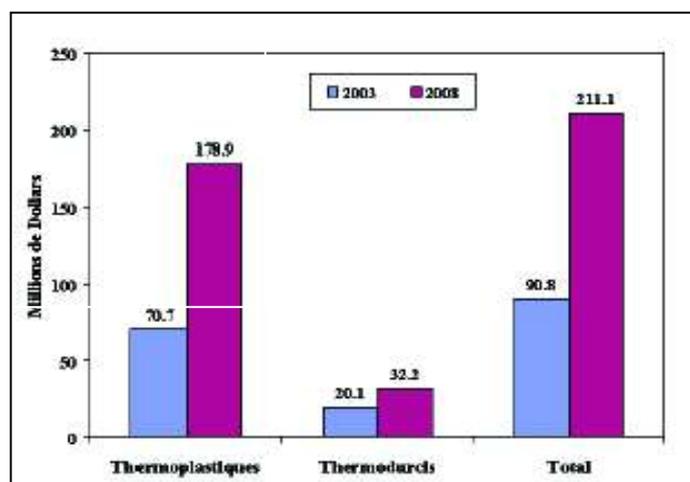


Figure III.6.2 Production mondiale (montant en millions de dollars) de nano-composites polymères [21].

Les argiles naturelles sont les plus utilisées (approuvées par l’U.S. Food and Drug Administration) les principaux fournisseurs sont Nanocor et Southern Clay Products. Les matrices polymères et à renforts d’argiles font figures de leaders mais malgré leur énorme potentiel, leur commercialisation est retardée en raison des difficultés rencontrées (incompatibilité, intercalation). Une nouvelle génération de nanomatériaux synthétiques à base de nanotubes et de nano-fibres céramiques laissent entrevoir de larges perspectives dans le futur [10].

Actuellement, la production annuelle de ces nano-composites est estimée à seulement quelques milliers de tonnes, principalement pour la câblerie et l’emballage. La production a cependant atteint, en 2010, 500 000 tonnes/an. des marchés de niche pour ces matériaux ont été identifiés, notamment dans l’ingénierie et la haute technologie. Le profil de propriétés de ces composites permettent une conception différente des pièces, avec par exemple une diminution des épaisseurs. Cependant, l’élaboration des nano-composites, au niveau industriel, semble assez difficile. Il y a peu de techniques qui permettent une synthèse à grande échelle, notamment pour des taux de charges importants. Le procédé d’avenir semble être l’élaboration in situ par voie directe au milieu fondu [29].

III.7- Avantages et limites des nano-composites

a)- Avantages

- amélioration des propriétés mécaniques (résistance) sans détérioration de la ductilité du matériau car la faible taille des particules ne crée pas de larges concentrations de contraintes (+ léger, + rigide, -fragile à basses températures)
- augmentation de la conductivité thermique
- bonnes propriétés optiques (transparence car taille des nanoparticules $< 380-780$ nm λ visible) et propriétés de surface
- caractère ignifuge (réduction de l'inflammabilité)
- propriétés barrières (eau, gaz, arômes)
- environnemental : remplace certains additifs chimiques et permet de conserver le caractère biodégradable de certaines matrices (ex : biopolymères)
- amélioration des propriétés avec des fractions volumiques inférieures à performances égales: gain de poids et diminution des coûts de MP (meilleure résistance pour des dimensions structurales similaires & augmentation des propriétés barrière pour une épaisseur donnée)

b)- Limites

- **Limites techniques** : Nécessité de développer de nouvelles techniques et procédés pour atteindre la phase d'industrialisation et surmonter les incompatibilités des méthodes antérieures.
- **Limites liées à leur coût** : Nécessité du passage à une production de masse pour baisser les coûts et ne pas rester cantonné à des marchés de niche (ex aéronautique).
- **Limite liée à la capacité de production des Nanotubes de carbone** produits en très faibles quantités (ex: Carbon nano Technologies Inc. Commercialise des nanotubes de carbone à 500\$ le gramme).
- **Limite liée au prétraitement des argiles** qui entraîne une forte augmentation de leur prix de revient (le prix passe de 0,08-0,13 cents/g à 0,66-0,88 cents/g).
- **Limite environnementale** liée à la taille des particules qui pourraient se révéler très dangereuses en pénétrant dans le corps humain (circulation sanguine, poumon) à l'image de l'amiante. Toutefois, un occidental ingérerait entre 1012 et 1014 nano ou micro particules/Jour...

III.8- Dispersion et distribution des nano-charges

Les nano-composites ont leurs propres limites intrinsèques notamment techniques mais sont également confrontés au problème de leur coût.

Le premier facteur à contrôler est la taille, la distribution et la répartition homogène des nanoparticules dans la matrice qui confèrent au matériau ses propriétés spécifiques. Il faut développer de nouvelles techniques et procédés pour atteindre la phase d'industrialisation et surmonter les incompatibilités des méthodes antérieures vis-à-vis de la taille nanométrique. Sans ce passage à une production de masse et une baisse des coûts, les nano-composites se cantonneront à des marchés de niche, comme dans le secteur de l'aéronautique pouvant accepter

un surcoût au profit de la performance, ou à des applications beaucoup plus ciblées qui ne peuvent être obtenues que grâce aux propriétés uniques des nano-composites [21].

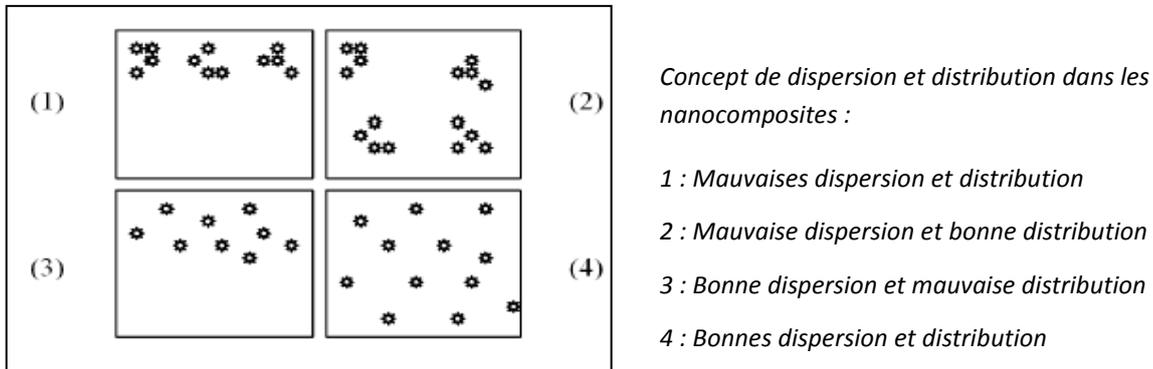


Figure III.7. Concept de dispersion et distribution dans les nano-composites [21].

Le second problème est celui de l’approvisionnement des nano-composants à l’image de la production en masse de nanotubes de carbone qui, malgré leurs nombreux avantages, ne sont pas encore produits en quantité suffisante. Le prix des nanotubes de carbone monofeuillets (SWNTs) est de 500 dollars par gramme et rend improbable toute application de composites à grande échelle, malgré des propriétés exceptionnelles. Pour les nano-composites argile/polymère, l’essentiel du coût vient du traitement de l’argile et de sa dispersion dans le polymère, deux étapes qui font passer le prix de l’argile de 0,08-0,13 cents par gramme à 0,66-0,88 cents par gramme, soit plusieurs milliers de fois moins cher que pour les nanotubes de carbone.

Chapitre IV :
Analyse Numérique

Chapitre IV: Analyse Numérique

IV.1 - Introduction

Les ouvrages réalisés en béton ,tels que les ponts, barrage, tunnels, bâtiments, centrales nucléaires...étant de plus en plus ambitieux, il est nécessaire d'assurer leur sécurité et de prédire de façon fiable leur tenue, une défaillance pouvant avoir des conséquences humaines et économiques graves.de nombreuses recherches ont été effectuées, notamment des trente dernières années, en vue de modéliser le béton de façon la plus réaliste possible. En effet, une modélisation précise permet non seulement d'évaluer le risque de ruine mais d'acquérir une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu.

Cependant, de part sa nature hétérogène, le béton présente un comportement mécanique très complexe et la formation de fissures dans le matériau est indéniablement, le phénomène qui gouverne la réponse d'une structure en béton. Nombreux modèles sont donc proposés dans la littérature mais bien souvent ces modèles ont été développés pour être appliqués à une étude de cas précise. La méthode des éléments finis est un outil de résolution numérique approchée des problèmes de structures, plus généralement, des problèmes physiques régis par des équations différentielles. En général, un logiciel d'analyse se compose de trois modules essentiels : préprocesseur, calcul et post-processeur ; qui présente l'ANSYS version 15.0 pris en considération lors de notre étude.

IV.2- Aperçu sur le logiciel ANSYS 15.0

L'ANSYS, version 15 est un programme de simulation basé sur la méthode des éléments finis. C'est un logiciel multi-physique conçu pour couvrir différentes disciplines de technologie. Ce logiciel a beaucoup de possibilités d'analyse que ce soit statique, dynamique, linéaire, non linéaire. Le programme ANSYS est capable de prendre en compte la non-linéarité ainsi que la plasticité, la grande déformation, l'hyper-élasticité, le retrait, le contact et l'anisotropie du matériau [13].

La famille de produits d'ANSYS [30], Inc. inclut :

- **ANSYS Structural** : ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures, ses principales capacités sont l'analyse statique, l'analyse modale, l'analyse harmonique (réponse forcée), l'analyse temporelle, la gestion de différentes situations (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations
- **ANSYS Mechanical** : ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.
- **ANSYS CFX et Fluent** : ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Fluent est un solveur : il ne

comporte pas de mailleur (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage GAMBIT. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, peuvent faire face à divers aspects de la mécanique des fluides.

- **Gambit** : un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006, ce mailleur permet de créer sa propre géométrie avec un grand degré de liberté et une grande précision, ou d'importer celle-ci depuis le fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un mailleur de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.
- **ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA** : ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.
- **ANSYS Electromagnetics et Ansoft** : ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.
- **ANSYS Multiphysics** : ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

ANSYS Classique: Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classique est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

ANSYS Workbench: Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle

éléments finis générés restent néanmoins manipulables en insérant des commandes propres au code ANSYS.

Tableau IV.1: Processeurs disponibles dans le logiciel ANSYS 15 [31].

Processeur	Fonction	Chemin GUI	Commande
<i>PRER7</i>	Création du modèle (géométrie, matériaux...)	Main Menu> Preprocessor	/PREP7
<i>Solution</i>	Application du chargement et obtention de la solution.	Main Menu> Solution	/SOLU
<i>Post1</i>	Revue des résultats du modèle entier à un temps spécifié.	Main Menu> General Post proc	/Post1
<i>Post26</i>	Revue des résultats à des points spécifiques du modèle fonction du temps.	Main Menu> Time Hist Post proc	/Post26
<i>OPT</i>	Conception initiale	Main Menu>design opt	/OPT
<i>AUX 2</i>	Transformation des fichiers binaires en forme exploitable.	Utility>Menu>File>List> BinarFiles	/AUX2
<i>AUX 12</i>	Spécifique aux analyses thermiques (calcul et génération de la matrice de radiation)	Main Menu>Radiation Matrix	/AUX12
<i>AUX 15</i>	Translation des fichiers CAD	Utility Menu>File>import	/AUX15
<i>RUNSTAT</i>	Statistiques	Main Menu>Run-time stats.	/RUNS

IV. 3- Modélisation par ANSYS

IV.3.1- Béton armé

❖ Introduction de l'élément dans l'ANSYS

L'élément "**Solide 65**" est utilisé pour modéliser le béton. Cet élément ayant huit nœuds, et chaque nœud contient trois degrés de liberté, des translations dans les trois directions nodales. L'élément est capable de subir une déformation plastique et de se fissurer dans les trois directions [31]. La géométrie et la position des nœuds de ce type d'élément sont indiquées dans la Figure IV.2.

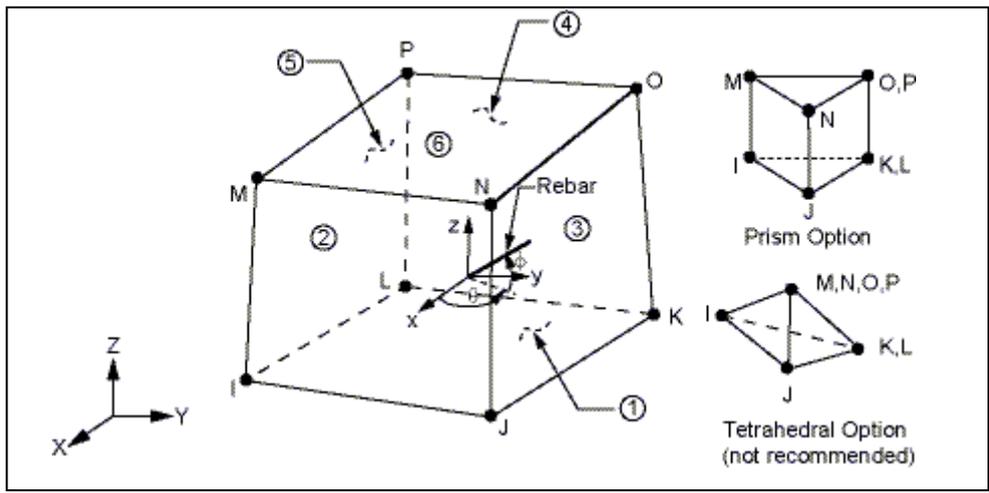


Figure IV.1: Elément Solid 65 à 3D [31].

❖ Propriétés de l'élément

La courbe contrainte - déformation du béton, utilisée dans la modélisation, est présentée dans la figure IV.3. En compression, la courbe contrainte-déformation est linéairement élastique jusqu'à environ 30% de la contrainte maximale à la compression. Au-dessus de ce point, la contrainte augmente graduellement jusqu'à la contrainte maximale à la compression (σ_{cu}). Après ce point la courbe descend, et se produit l'écrasement et la rupture à une déformation ultime ϵ_{cu} . En traction, la courbe contrainte-déformation est approximativement linéaire et élastique jusqu'à la contrainte maximale à la traction, puis la résistance diminue graduellement à zéro [31].

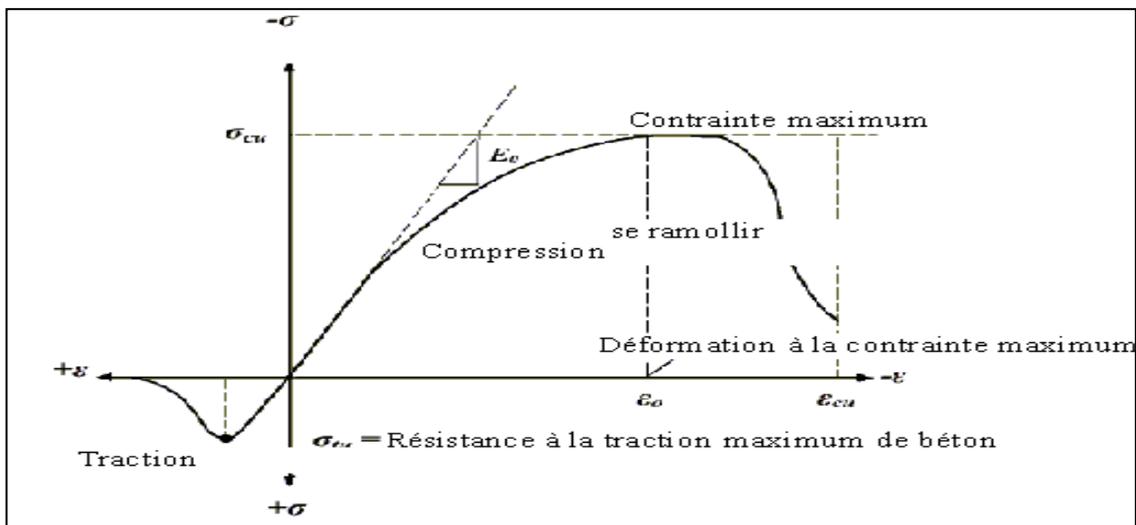


Figure IV.2 : Comportement typique du béton sous un chargement uniaxial [31].

Les propriétés linéaires isotropiques et multilinéaires isotropiques pour le béton, sont données à partir des caractéristiques suivantes :

- Module d'élasticité (E_c) ;
- Résistance à la compression ultime (f'_c) ;
- Résistance à la traction ultime (f'_t) ;
- Coefficient de poisson (ν) ;
- Coefficient de transfert de cisaillement (β_t) ;
- La relation contrainte-déformation en compression uniaxiale ;

Les résistances ultimes du béton à la compression et à la traction sont données par les équations (1), et (2), respectivement [33]:

$$f'_c = \left(\frac{E_c}{4730} \right)^2 \quad (1)$$

$$f'_t = \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

Avec : E_c , f'_c et f'_t en MPa.

Le coefficient de poisson pour le béton est assumé égal à 0.2. Le coefficient transfert de cisaillement β_t , varie entre 0.05 et 0.25 [32]. Il est pris égal à 0.2 dans nos calculs.

Le programme d'ANSYS, utilise la relation contrainte-déformation pour le béton dans la compression uniaxial. Les équations suivantes ont été utilisées pour calculer la courbe multilinéaire isotopique du béton.

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + (\varepsilon/\varepsilon_0)^2}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c}$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon}$$

Avec:

f : Contrainte du béton en MPa.

ε : déformation pour la contrainte f .

ε_0 : Déformation à la résistance ultime de compression f_{uc} .

La courbe contrainte-déformation multilinéaire isotrope mise en application exige que le premier point de la courbe soit défini par l'utilisateur. Elle doit satisfaire la loi de Hooke.

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (6)$$

La figure IV.4, illustre la courbe contrainte –déformation simplifiée du béton sous un chargement uniaxial.

Cette courbe contient six points reliés par lignes droites, le premier point, définis par $0.3 f_c$ qui est calculé par l'équation (5), les points intermédiaires sont obtenus à partir l'équation (3), et ϵ_0 calculé par l'équation (4), le dernier point est défini par f_c et ϵ_0 , après ce point un comportement parfaitement plastique est supposé.

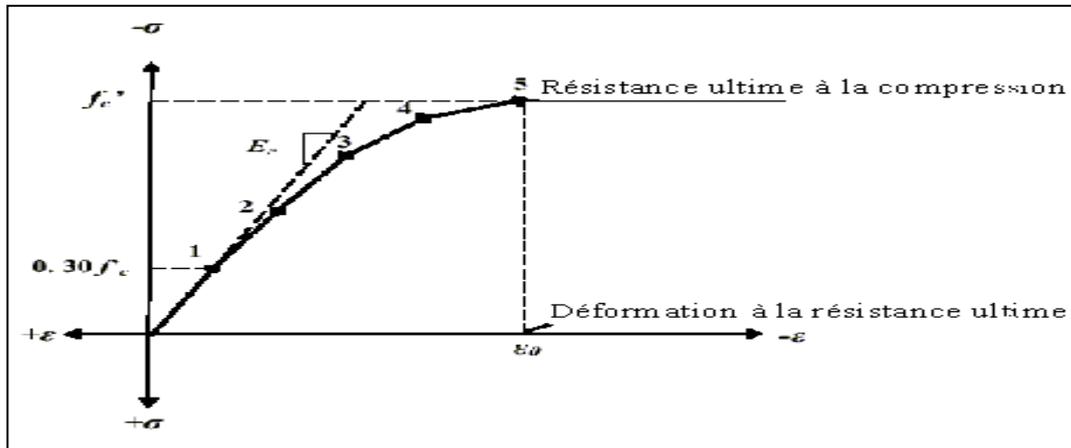


Figure IV.3 : Diagramme contrainte-déformation simplifié du béton en compression

Le Tableau suivant récapitule les différentes propriétés du béton utilisées dans cette étude :

Tableau IV.2: Propriétés du béton.

Prescription du matériau	Type d'élément	Propriétés du Béton	
1	Béton solid65	Linéaire isotropique	
		E_c (MPa)	20000
		PRXY= ν	0.2

IV.3.2- Acier

❖ Introduction de l'élément dans l'ANSYS

L'élément "Link 180, 3D Spar" est utilisé pour la modélisation de l'acier. Cet élément ayant deux nœuds, chaque nœud contient trois degrés de liberté et trois déplacements dans les directions X, Y, Z.

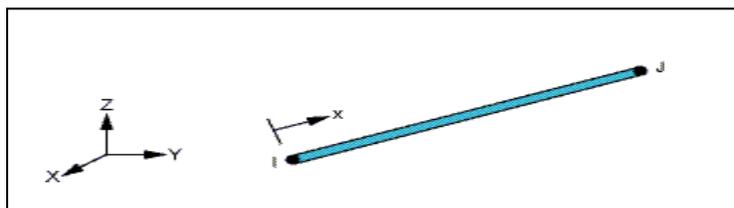


Figure IV.4: Élément Link180 à 3D spar [31].

❖ Propriétés de l'élément

Le comportement de l'acier est supposé élastoplastique parfait et identique en traction et en compression. La Figure IV.6 montre la courbe contrainte-déformation pour l'acier de ferrailage employé

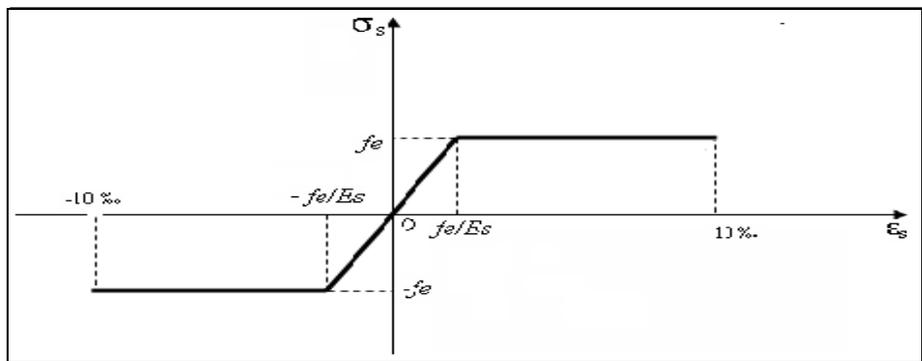


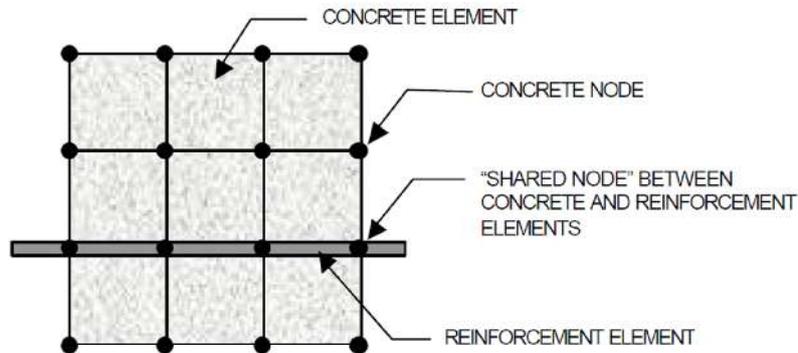
Figure IV.5 : Diagramme contrainte – déformation de l'acier [32].

Les propriétés de l'acier introduit dans L'ANSYS sont résumées dans le Tableau IV.3

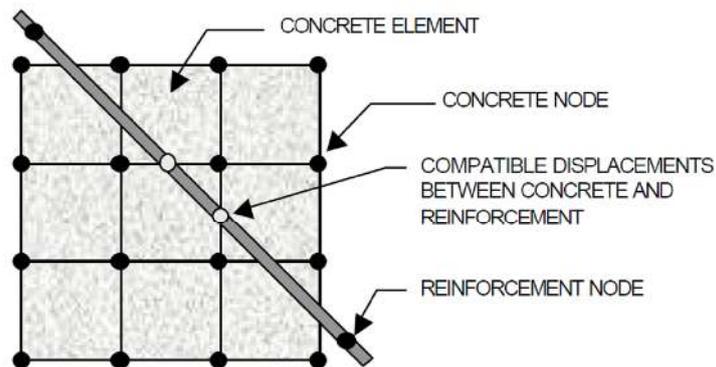
Tableau IV.3: Propriétés de l'acier.

Numéro du matériau	Typed'élément	Propriétés du matériau	
2	L'acier du béton armé (link 180)	Linéaire isotropique	
		Ex (MPa) =Es	200000
		PRXY=v	0.3
		Diamètre	
		Φ (mm)	12
3	L'acier du béton armé (link 180)	Linéaire isotropique	
		Ex (MPa) =Es	200000
		PRXY=v	0.3
		Diamètre	
		Φ (mm)	10
4	L'acier du béton armé (link 180)	Linéaire isotropique	
		Ex (MPa) =Es	200000
		PRXY=v	0.3
		Diamètre	
		Φ (mm)	6

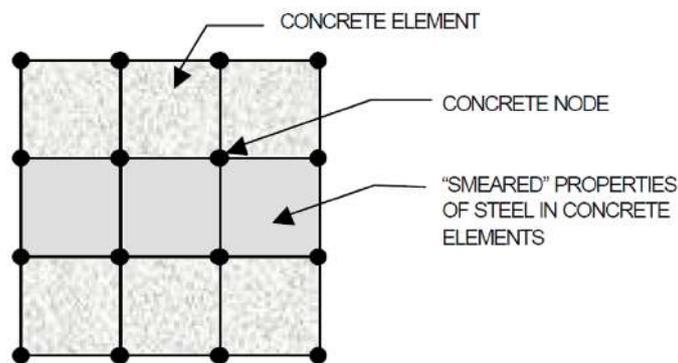
L'acier du béton armé peut être modélisé dans un modèle EF par trois méthodes : discrete model, embedded model, and smeared model (Figure IV.7) [34], l'acier est connecté avec les éléments du béton par des nœuds. L'inconvénient principal du modèle discret se présente dans la discrétisation des éléments du béton, cette dernière est limitée par la position et le volume de l'acier de renforcement.



(a) Discrete model



(b) Embedded model



(c) Smeared model

Figure IV.6 : les différentes approches pour la modélisation de l'acier du béton armé [34].

IV.3.3- Composite CFRP

❖ Introduction de l'élément dans l'ANSYS

L'élément "Solid 185", est un élément solide utilisé pour modéliser le comportement des matériaux composites. L'élément peut avoir plusieurs couches pour différentes orientations avec ses propriétés ortho-tropiques dans chaque couche, trois degrés de libertés pour chaque nœud et un déplacement pour chacune des trois directions (Figure IV.8).

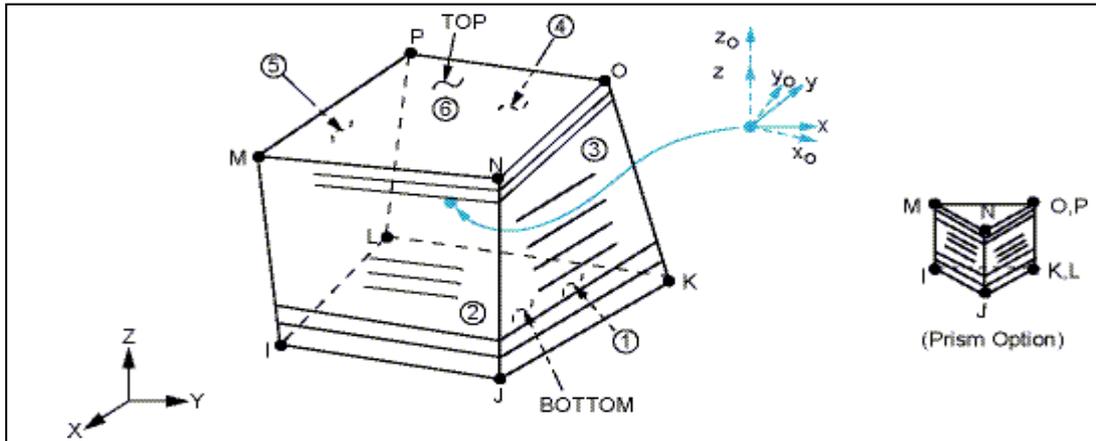


Figure IV.7: Solid 185 – 3-D layered structural solid [31].

❖ Propriétés de l'élément

Les matériaux composites à base de fibre de carbone (CFRP), sont des matériaux anisotropes car leurs propriétés ne sont pas les mêmes dans toutes les directions.

Le comportement élastique- fragile des matériaux composites est illustré par la figure IV.8. La courbe montre que la partie élastique est caractérisée par une contrainte de traction élevée avec une déformation avoisinant les 1.5%

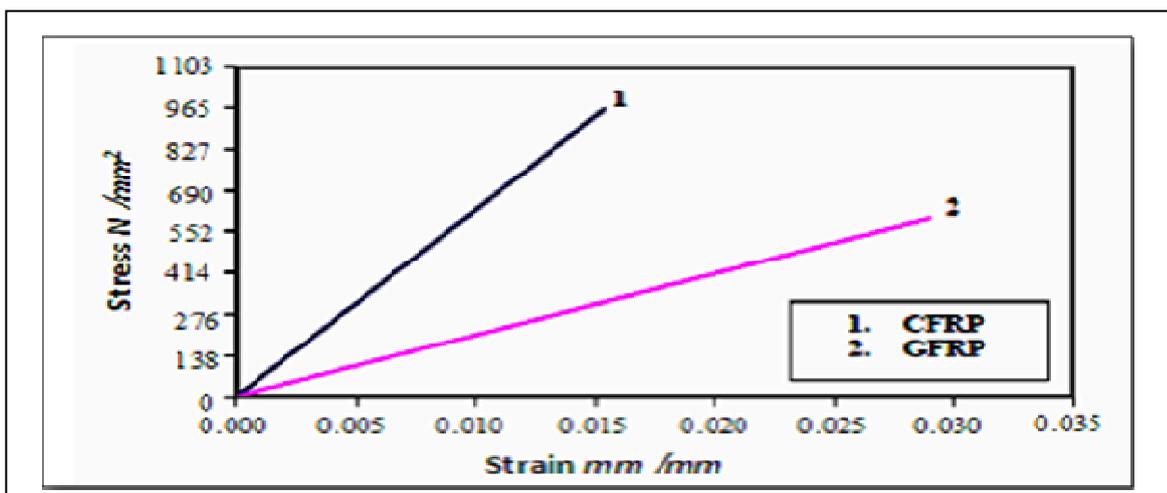


Figure IV.8: Courbe contrainte – déformation du composite CFRP [35].

Les données d'entrée nécessaires pour les composites de FRP dans les modèles d'élément finis sont comme suit [36]:

- Nombre de couches ;
- L'épaisseur de chaque couche ;
- L'orientation de la direction de fibre pour chaque couche (θ) ;
- Module d'élasticité du composite de FRP dans les trois directions (E_x , E_y , et E_z) ;
- Coefficient de poisson major pour les trois plans (ν_{xy} , ν_{yz} et ν_{xz}).
- Module de cisaillement du composite de FRP dans les trois plans (G_{xy} , G_{yz} et G_{xz}) ;

Le tableau ci-après résume les différentes caractéristiques mécaniques des matériaux composites utilisées dans la modélisation.

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x + E_y + 2E_x \nu_{xy}} \quad (7)$$

Tableau IV.4: Caractéristiques mécaniques des composites

Caractéristiques mécaniques Composite	Module d'élasticité (Mpa)	Coefficient de poisson Major	Module de cisaillement (MPa)	Epaisseur (mm)
CFRP	$E_x = 62000$ $E_y = 4800$ $E_z = 4800$	$\nu_{xy} = 0.2$ $\nu_{yz} = 0.2$ $\nu_{xz} = 0.3$	$G_{xy} = 3270$ $G_{yz} = 3270$ $G_{xz} = 1860$	0.43

IV.3.4- Résine structurale

❖ Introduction de l'élément dans l'ANSYS

L'élément INTER 205 est un cohésif structural utilisé pour coller l'interface des éléments structuraux comme le Solid 185, afin d'assurer une continuité et un collage compact. Cet élément a huit nœuds et chaque nœud contient trois degrés de liberté, translations dans les trois directions nodales. (Figure IV.10).

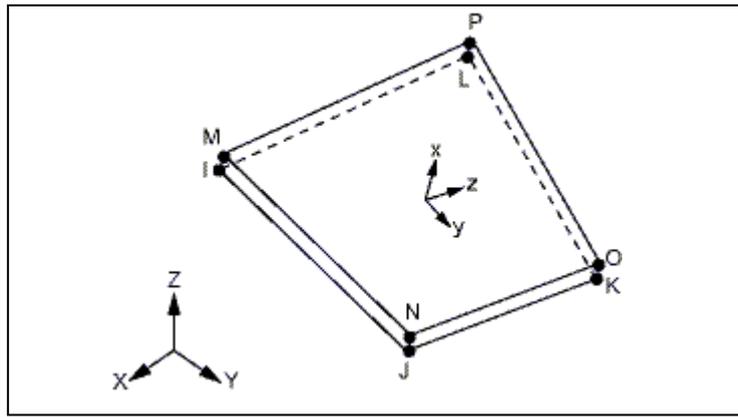


Figure IV.9: INTER 205 – Cohesive structural [31].

❖ Propriétés de l'élément

Les propriétés de la résine structurale introduit dans L' ANSYS sont résumées dans le Tableau IV.5 [37]:

Tableau IV.5 : Propriétés de la résine structurale.

Numéro du matériau	Typed'élément	Linéaire isotropique		Epaisseur (mm)
		Ex (MPa) =Es		
5	INTER 205 (cohésif structural)	2300		1.00
		PRXY=ν	0.38	

Afin d'améliorer au mieux les caractéristiques mécaniques de la résine époxydique conventionnelle, et donner un renfort au celle-ci, de même booster une meilleur utilisation, fiabilité, durabilité et résistance ; on a procédé alors à une majoration de 40% de ces propriétés, comme le présente le tableau suivant:

Tableau IV.6 : Propriétés de la résine amélioré ou nano-résine.

Numéro du matériau	Typed'élément	Linéaire isotropique		Epaisseur (mm)
		Ex (MPa) =Es		
5	INTER 205 (cohésif structural amélioré)	3200		1.00
		PRXY=ν	0.38	

IV.5- Modélisation numérique d'un élément structural renforcé par nano- composites.

IV.5.1-Shéma statique

Afin d'analyser le renforcement des poutres par composites, et par conséquent trouver un modèle numérique proche à la réalité expérimentale, on présentera dans cette partie une modélisation numérique, par le biais du logiciel ANSYS des poutres avec des sections rectangulaires soumises à une flexion quatre points, possédant une longueur totale de 1700 mm, et d'une section transversale de (160X180mm²). La figure IV.10 donne une illustration du schéma statique équivalent des poutres d'essai.

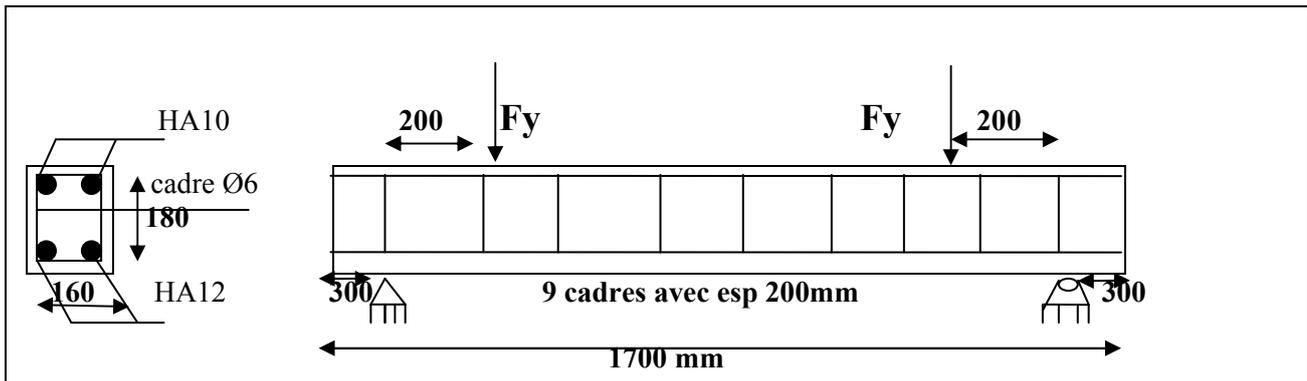


Figure IV.10: Schéma statique de la poutre d'essai

Pour la géométrie choisie, on a pris comme modèle les éléments déjà cités et afin d'établir la bonne distribution de la charge d'une part, et pour garantir la meilleure connectivité entre les différents éléments discrétisés, d'autres parts, ces éléments sont connectés avec le béton nœud par nœud (Figure IV.11).

IV.5.2-Introduction des éléments

L'analyse par éléments finis nécessite, tout d'abord, un maillage du modèle (discrétisation). En d'autres termes, le modèle est divisé en un certain nombre de petits éléments, délimités par des nœuds. L'objectif est de déterminer les contraintes et les déformations aux points d'intégration de ces petits éléments, après application des charges et identification des conditions aux limites.

Pour chaque poutre d'essai, la formulation de la géométrie du matériau béton (Solid 65), qui est considéré comme un élément de volume (block) dont le nombre total de mailles, de cet élément, est subdivisé en 1050 nœuds globalement.

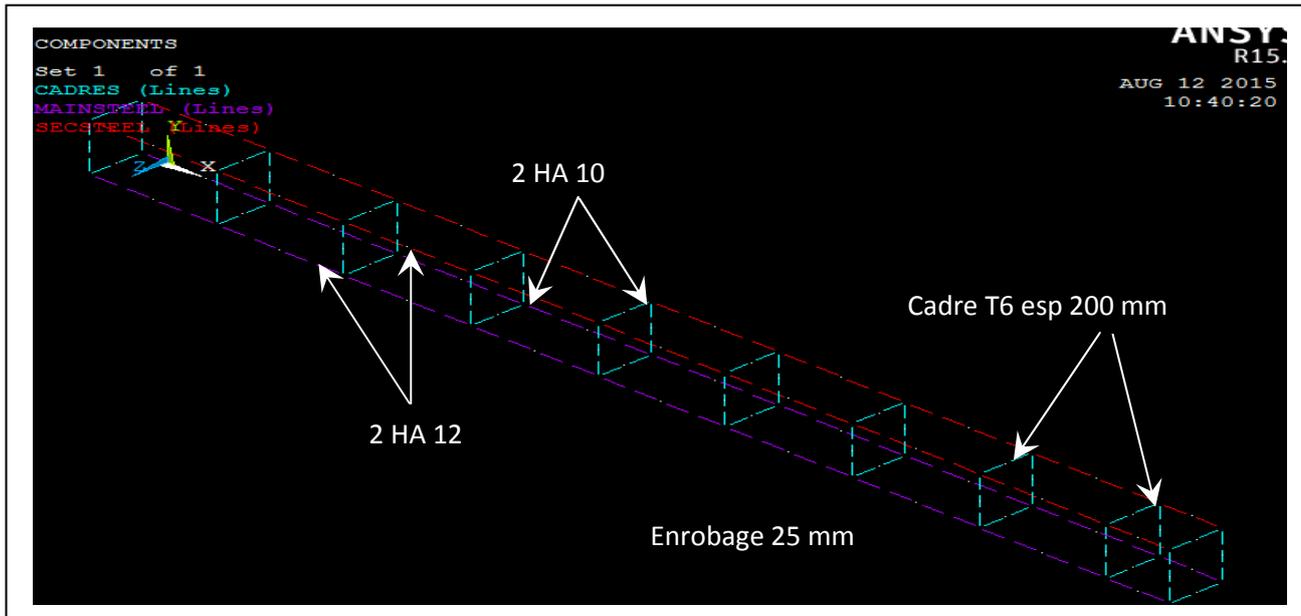


Figure IV.11: Modèle E.F choisi pour géométrie de la poutre

Le deuxième matériau est l'acier (link 180), qui est considéré comme un élément barre. Il est discrétisé par des éléments barres connectés nœud par nœud dans le béton, pour assurer la connectivité nodale. Le ferrailage contient des barres longitudinales de haute adhérence qui sont divisées en 36 éléments et des armatures transversales qui sont devisées en 40 éléments.

Enfin, les nœuds de l'élément de couche du composite FRP (solid185) et les pièces discrétisées de l'élément de l'acier (link 180) sont reliés aux nœuds des éléments béton (solide65) adjacents afin de fournir le lien parfait (glue) entre les deux matériaux. La figure IV.12 illustre la connectivité des éléments. Au premier lieu, la liaison (interface) est supposée parfaite entre des matériaux (armature- béton, béton- colle et colle- tissu CFRP). Pour fournir le lien parfait, l'élément de liaison pour l'acier d'armature (link 180) était relié entre les nœuds de chaque élément en béton (solide65) adjacent, si les deux matériaux partagent les mêmes nœuds. La même approche a été adoptée pour les matériaux composites CPRF (solid185). En deuxième lieu, la liaison (interface) est prise en considération, et elle est modélisée en tant que cohésif structural (Inter 205) de 1.00 mm, pour relier le béton et le composite.

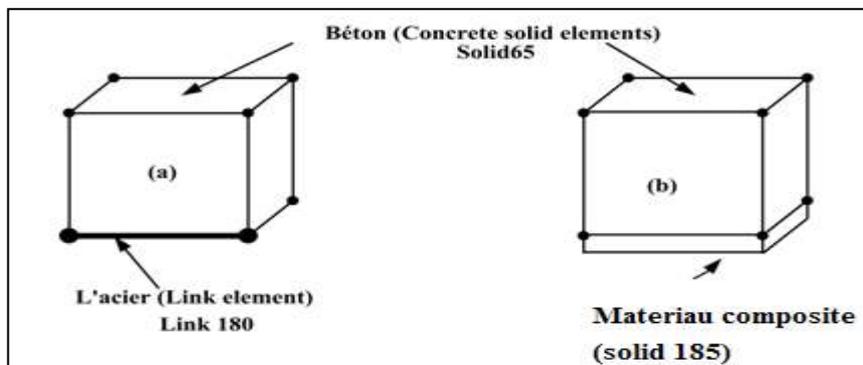


Figure IV.12: Connectivité d'éléments, (a) connections de l'élément béton et l'acier, (b) connections de l'élément béton et la couche de FRP.

Pour le maillage (discrétisation de l'élément), le "Mesh 200 Tool" a été choisi dans l'étape de création des mailles (éléments finis) qui ne prend pas part à la solution. On a procédé de former un maillage sur certaines lignes choisies (longueur, largeur et hauteur) de la poutre et gérer ainsi la densité du maillage dans les différentes régions de la structure.

Pour l'élément solid65, la maille a été mise en place pour la création d'éléments rectangulaires. Les divisions choisies des lignes sont notés et le modèle adopté a été maillé en utilisant des éléments en ligne afin que les nœuds des éléments en ligne soient exactement sur le nœud des éléments solides et sont ensuite fusionnées de sorte que les deux éléments barres (armatures) et les éléments en béton partagent les mêmes nœuds. Ce maillage adopté a donné un nombre total de nœuds de 1290 (poutre de référence) et 1372 nœuds pour la poutre la plus défavorable renforcée (Tableau IV.6).

Tableau IV.6 : Eléments du maillage de la poutre non renforcée.

Modèle	Nombre des Nœuds			
	Solid65	Link180	Solid185	Total
Poutre non renforcée	1050	240	/	1290
Poutre renforcée (avec composite et interface compacte)	1050	240	82	1372

IV.5.3-Chargement et conditions d'appuis

Le chargement adopté et les conditions aux limites choisies pour la poutre de référence, et pour les trois poutres renforcées sont données dans la figure IV.13. Le modèle est chargé avec les mêmes conditions que l'essai expérimental.

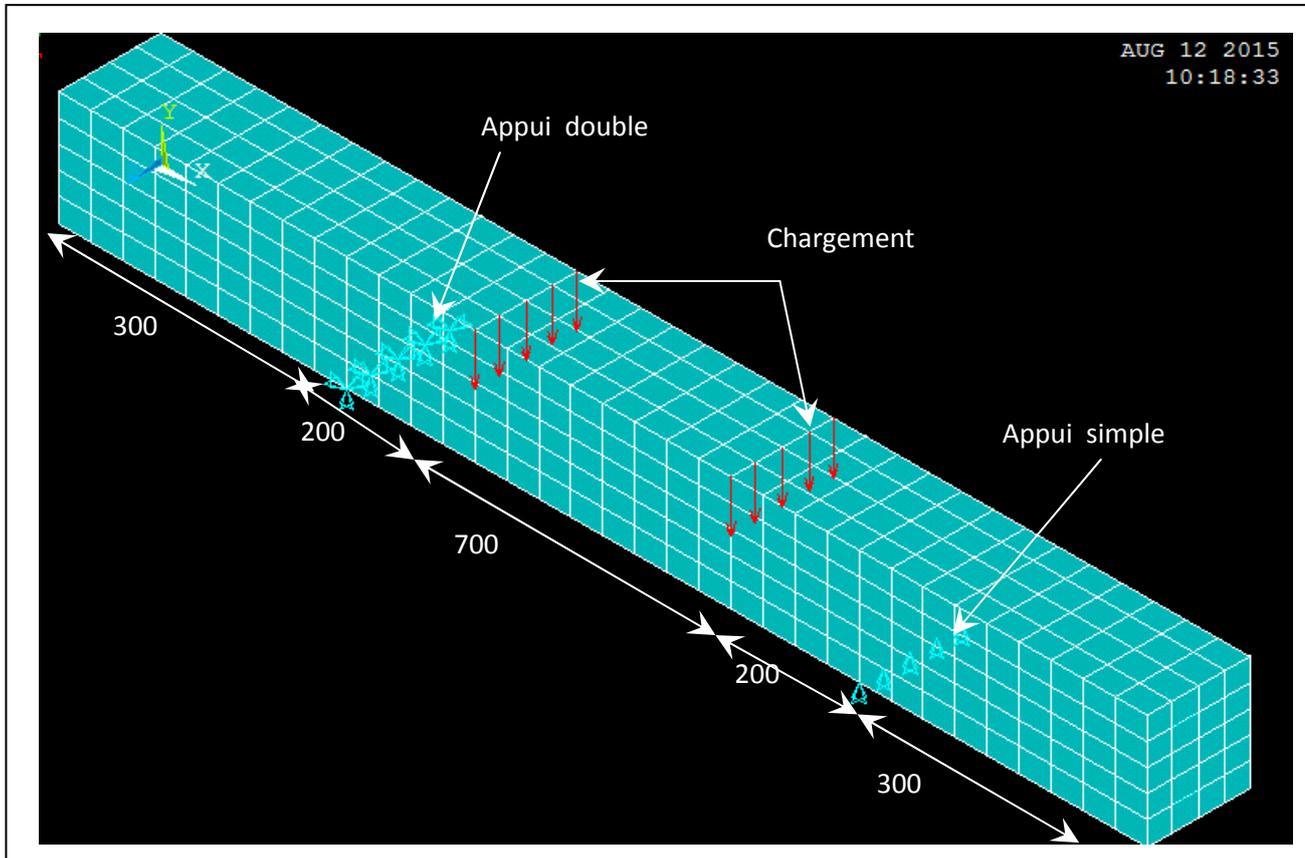


Figure IV.13: Chargement et conditions aux appuis pour le modèle par éléments finis.

IV.5.4- Lancement du calcul de modélisation

A partir des caractéristiques mécaniques et géométriques de chaque matériau, les contraintes (stress), les déformations (strain) et les déplacements (diplacements) sont calculés. Le calcul se fait dans le post processor solution, où on peut calculer la solution du LS (load step), ainsi. On peut avoir les résultats graphiquement (contraintes - déformations), ou par listes (déplacements, contraintes et déformations).

Les figures (IV.14 a)et (IV.14 b) , présentent respectivement la distribution de la contrainte dans la poutre test et la poutre renforcée. Sous l'effet du chargement extérieur et vu la symétrie du problème, les contraintes présentent une symétrie axiale. Les deux contraintes observées dans cette figure sont : la contrainte de compression qui apparaît sur la partie supérieure de la poutre et surtout près de l'application de chargement, et une contrainte de traction sur la partie tendue de la poutre, dont sa valeur est maximale à mi-travée.

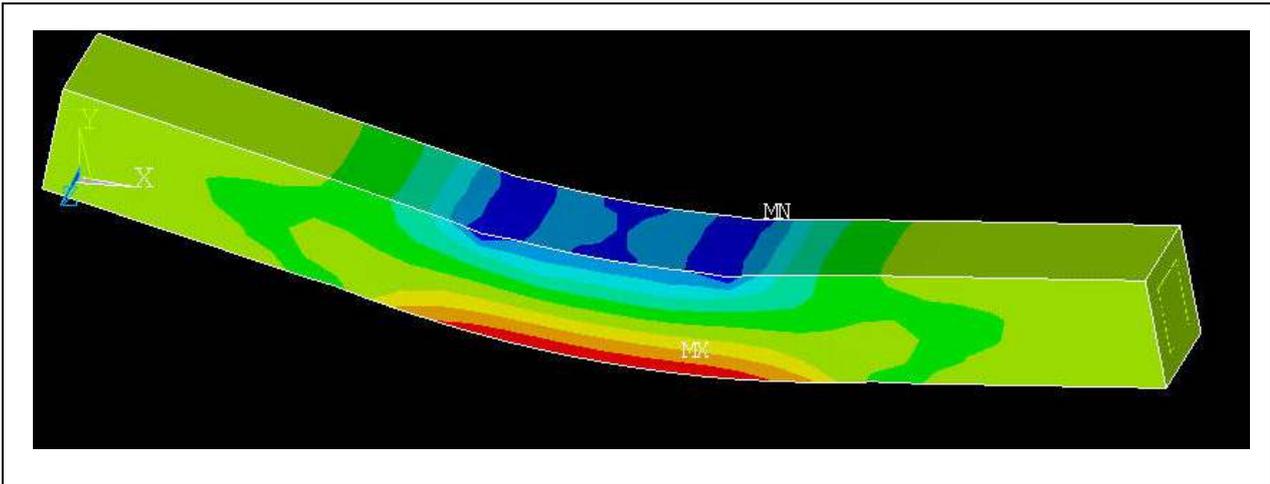


Figure IV.14 a: Distribution des contraintes dans la poutre test (non renforcée).

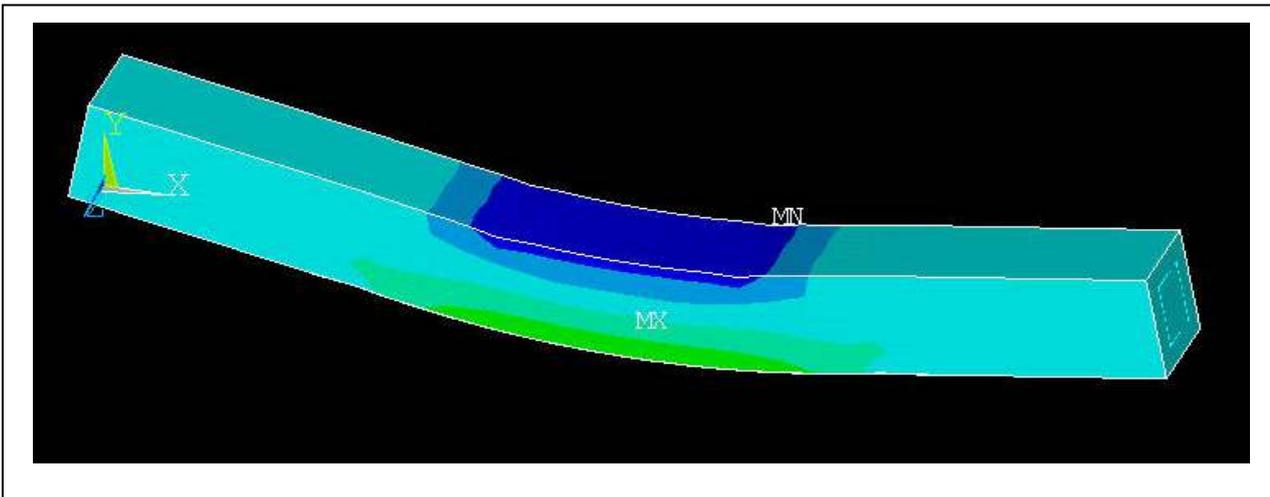


Figure IV.14 b: Distribution des contraintes dans la poutre renforcée.

Les déformations, ont représentées par figures (IV.15 a)et (IV.15 b) et vu la symétrie de la géométrie de la poutre, les déformations sont aussi symétriques. On remarque, aussi, que la partie inférieure de la poutre représentée par la couleur rouge est la partie la plus sollicitée.

Ces déformations sont dues à la traction du béton et de l'acier, où la déformation est maximale au milieu de la poutre. La partie représentée par la couleur bleu est due aux contraintes de compression, avec une compression plus importante du béton (la concentration des deux charges).

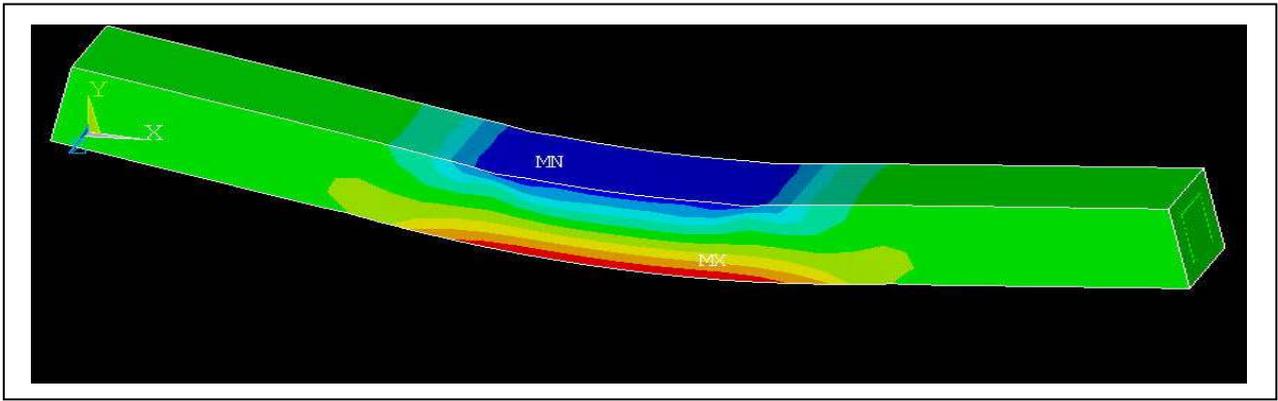


Figure IV.15a: Distribution des déformations dans la poutre test (non renforcée).

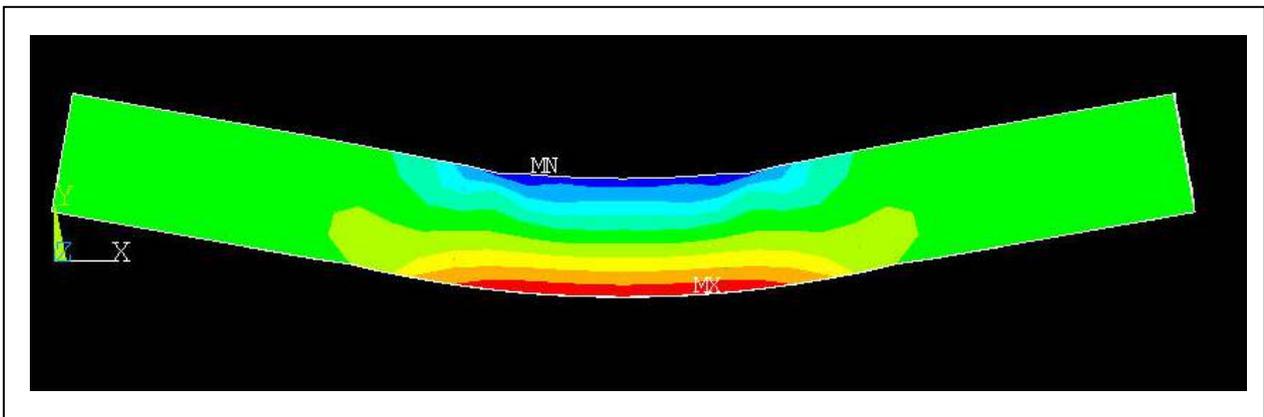


Figure IV.15b: Distribution des déformations dans la poutre renforcée.

Les résultats obtenus sont donnés dans chaque nœud. L'objectif est de connaître les nœuds les plus sollicités et les plus déformables sous ce type de chargement. A ce point, on tire toute la liste des déplacements et des déformations pour chaque pas de chargement (load step) et pour chaque nœud, puis on extrait les résultats les plus défavorables.

Les figures IV.16a et IV.16b représentent la discrétisation en petits éléments pour la poutre teste (PT) et la poutre renforcée (RA1). Le béton est considéré comme un élément volume. Le nombre des éléments (béton, aciers), reste le même. Les éléments du composite CFRP ajoutés sont représentés comme élément bloc (Solid185) de 0,43 mm d'épaisseur et de dimensions (1100x160) mm.

Les figures IV.16c et IV.16d représentent la discrétisation en petits éléments pour la poutre renforcée (RA2) et (RA3) ,d'ou on garde la même géométrie du béton et composite tout en ajoutant un cohésif structural de 1mm d'épaisseur de dimensions (1100x160) mm mais avec des caractéristiques variés, Les mêmes conditions d'appuis que l'exemple précédent sont conservées.

Les résultats des déplacements et des déformations obtenus pour les différentes modélisations des poutres renforcées seront discutés dans le chapitre suivant.

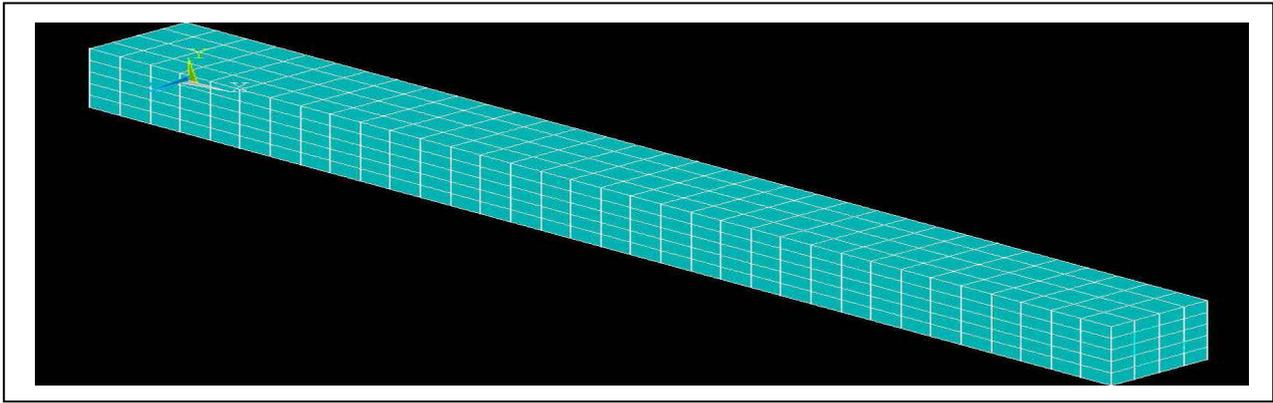


Figure IV.16a : Poutre test en béton armé (non renforcée)

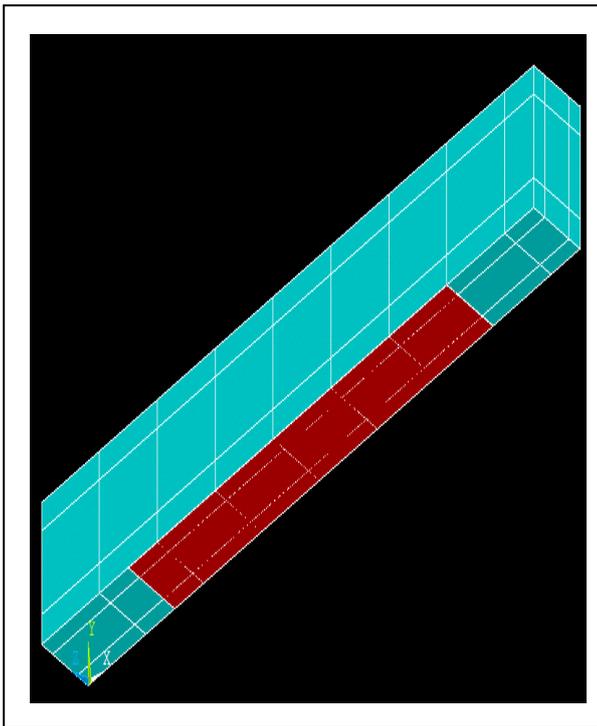


Figure IV.16b : Poutre RA1

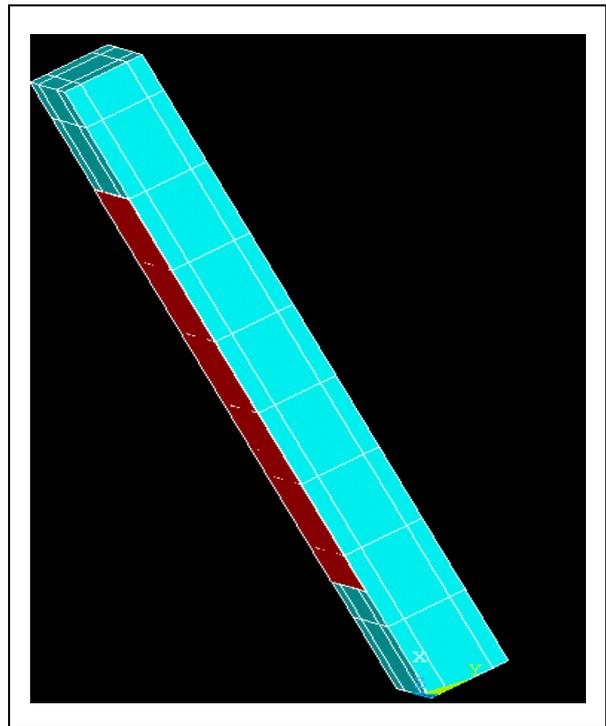


Figure IV.16c : Poutre RA2

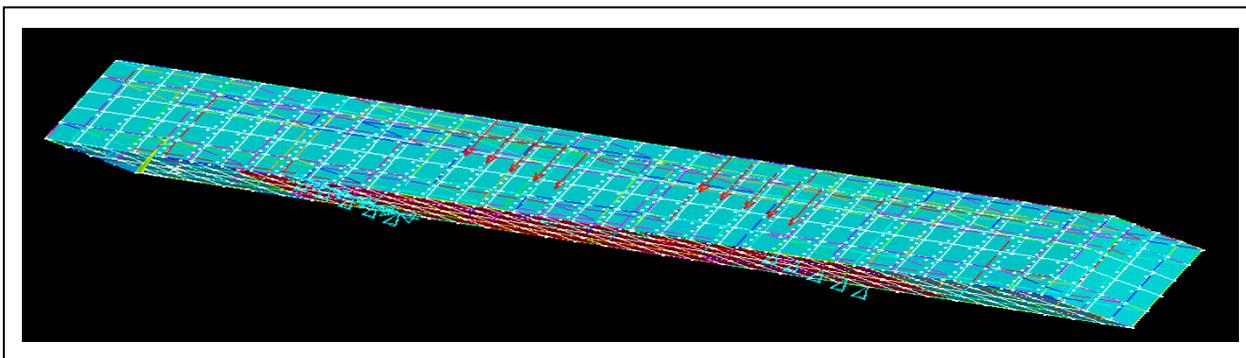


Figure IV.16d : Poutre RA3.

Chapitre V :
Résultats et discussions

Chapitre V: Résultats et discussions

V.1 - Introduction

On a procédé à analyser quatre poutres isostatiques soumises à une flexion quatre points pour un comportement linéaire, d'où on a obtenu les résultats prescrits dans le paragraphe suivant.

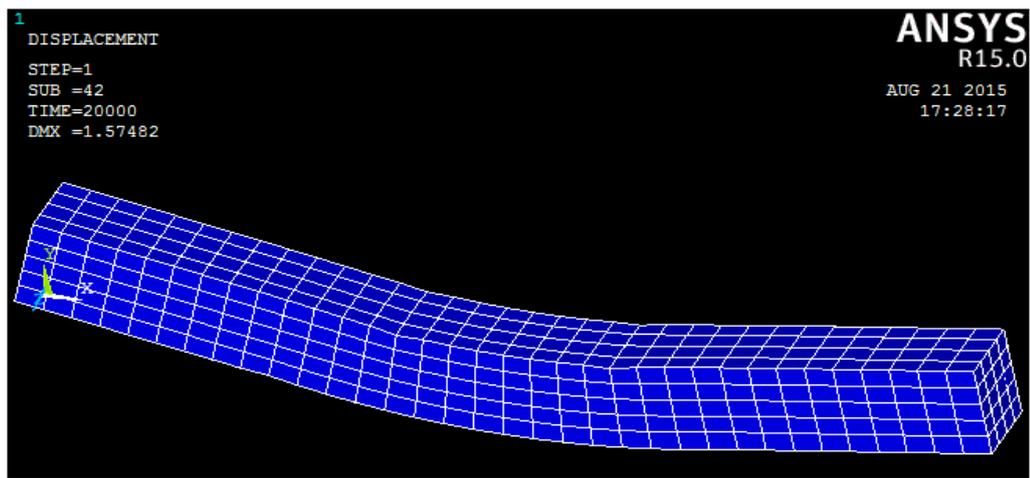
A noter, qu'on a pris les variantes suivantes d'études :

- **PT** : c'est la poutre test en béton armé (non renforcée).
- **RA1**: c'est la poutre renforcée avec collage de lamelle sur la face inférieure, et interface parfait de liaison.
- **RA2**: c'est la poutre renforcée avec composite et joint colle conventionnel.
- **RA3**: c'est la poutre renforcée avec composite et joint colle améliorée avec (nano-composite).

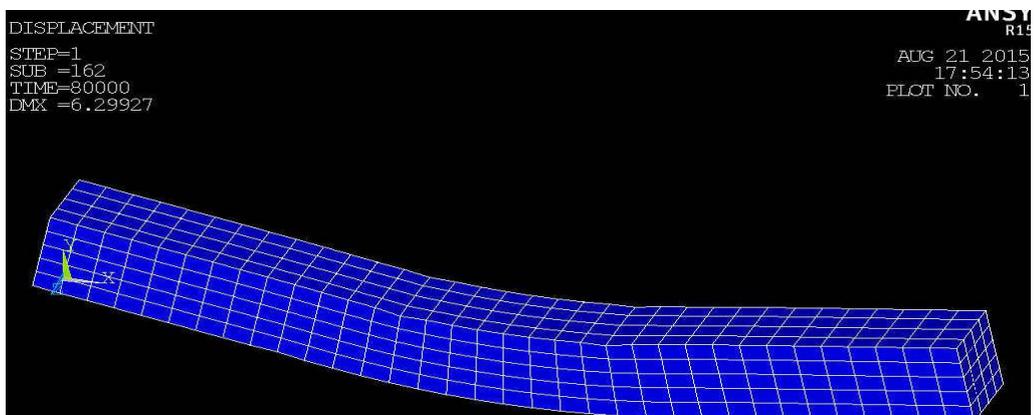
V.2- Charge-déplacement

Le comportement de la poutre de référence se caractérise par trois régimes différents (Figures V.1 a, b et c) :

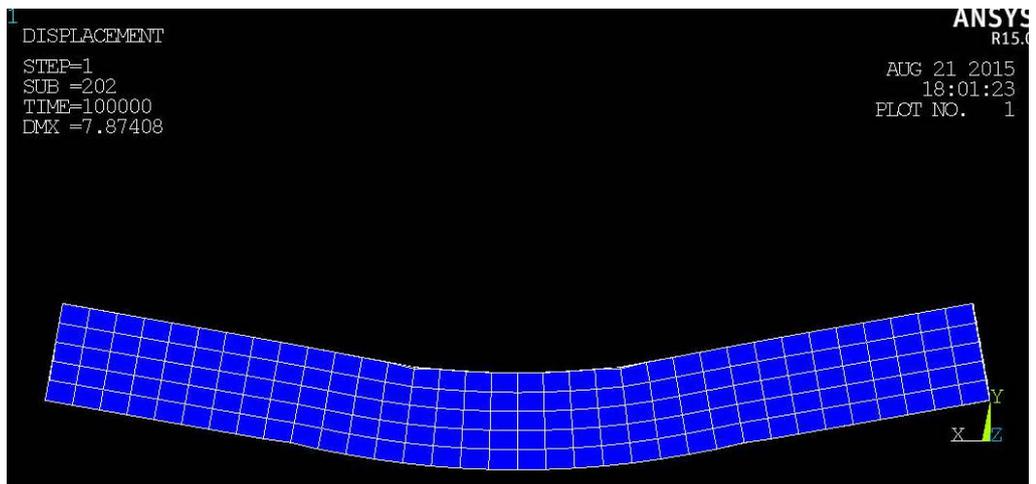
- Une augmentation considérable de la flèche jusqu'à une charge de 20 KN, correspondant expérimentalement à une phase de béton armé non fissuré, où la flèche croît linéairement avec la charge ; la flèche atteinte est d'environ 1.57mm avec l'apparition des premières fissures verticales ascendantes (Figure V.1 a).
- Une augmentation rapide de la flèche allant jusqu'à 6.30mm pour un chargement de 80 KN, correspondant expérimentalement à une phase de béton armé fissuré, due à la propagation des fissures ; on peut constater l'apparition des premières fissures inclinées (Figure V.1b).
- Un régime béton armé fissuré plastique après la plastification des aciers de flexion, avec une flèche de 7.87mm et une charge maximale de 100 KN (Figure V.1c).



a-Premier régime de la poutre de référence à 20KN



b-Deuxième régime de la poutre de référence à 80KN

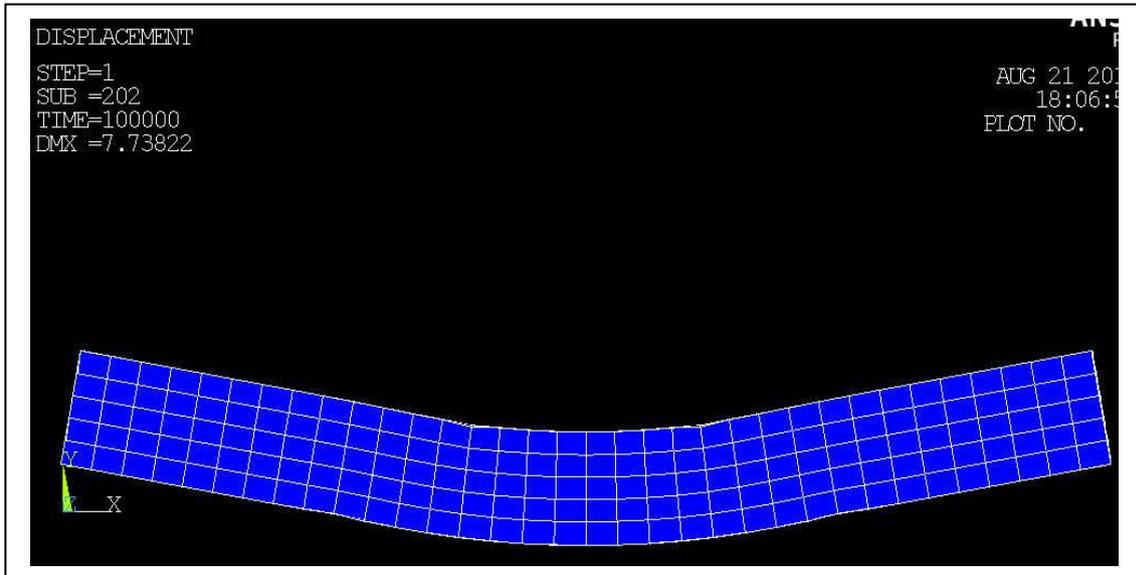


c-Troisième régime de la poutre de référence à 100KN

Figures V.1 (a, b, c): Progression de la flèche pour la poutre de référence.

Les trois phases (régimes) sont également observées pour la poutre RA1, avec collage de lamelle sur la face inférieure. En effet, et avec l'influence du composite, on a remarqué que la pente de la courbe force- flèche a augmentée, ce qui explique l'amélioration du module d'élasticité, donc augmentation de la rigidité (EI). La charge de la rupture observée pour la poutre renforcée est de 100KN correspondant à une flèche de 7.73mm.

La courbe force-flèche, montre clairement que les renforcements améliorent la portance de la poutre et même la flèche à mi travée (Figure V. 3).



Figures V.2 : Progression de la flèche pour la poutre renforcée à 100KN.

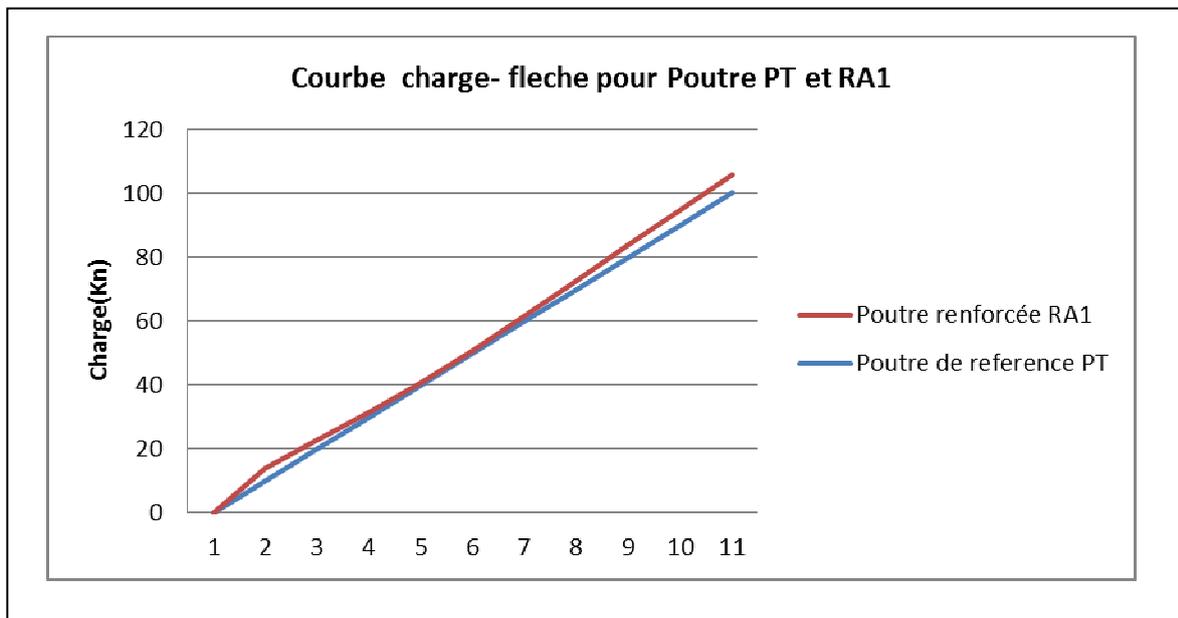


Figure V. 3 : Coubre flèche- déformation poutres renforcées PT et RA1

Pour la poutre renforcée en ajoutant le joint colle conventionnel (RA2) et la poutre renforcée en ajoutant le joint colle amélioré (nano-composite) (RA 3), le lancement d'analyse a exprimé respectivement une charge de rupture de 105KN pour une flèche de 8.10mm, et autre de 118 KN correspondant à une flèche de 9.12mm.

V.3- Charge-déformation

Les déformations sont mesurées à mi-distance à la fibre supérieure de la poutre d'essai. La lecture du listing des résultats permet de déterminer pour le nœud le plus sollicité la déformation en fonction de la charge appliquée.

Les figures (V.4a et V.4b) expriment la distribution des déformations dans le béton, de même l'évolution de la déformation de la poutre test (non renforcée) en fonction de la charge.

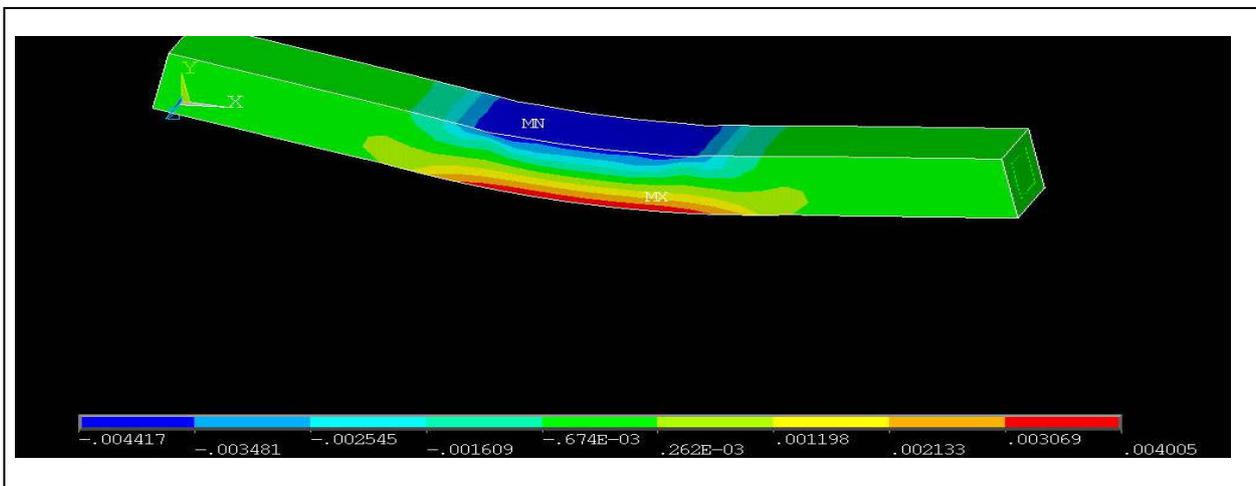


Figure V. 4a : Distribution des déformations pour la poutre teste PT (non renforcée)

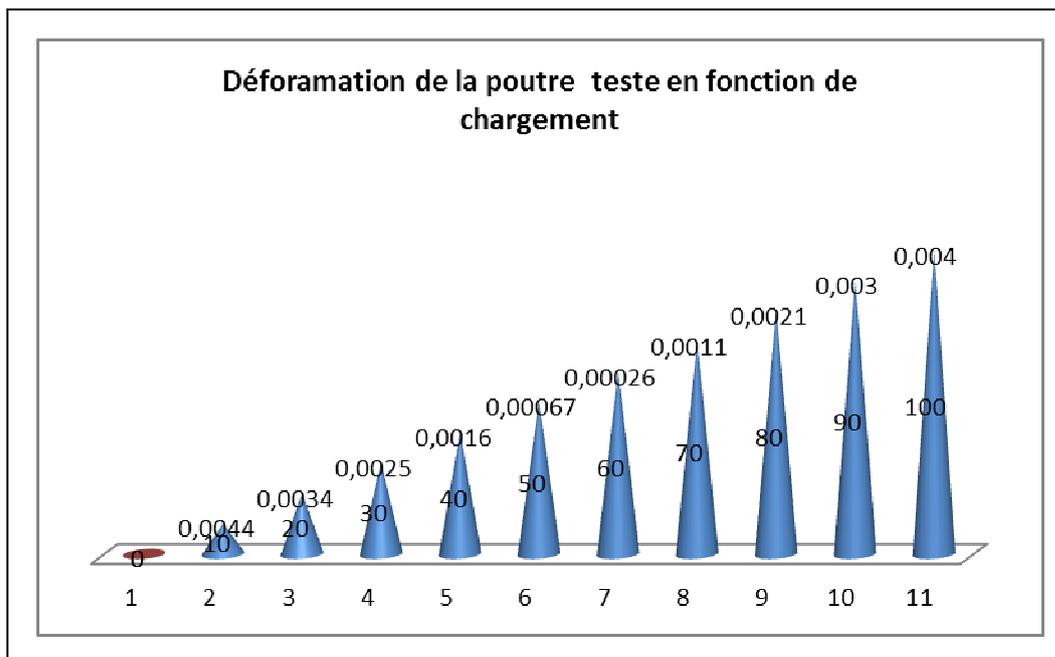


Figure V. 4b : Evolution des déformations pour la poutre test PT (non renforcée)

Les figures (V.5a et V.5b) expriment la distribution des déformations dans le béton, de même l'évolution de la déformation de la poutre renforcée RA1 en fonction du chargement.

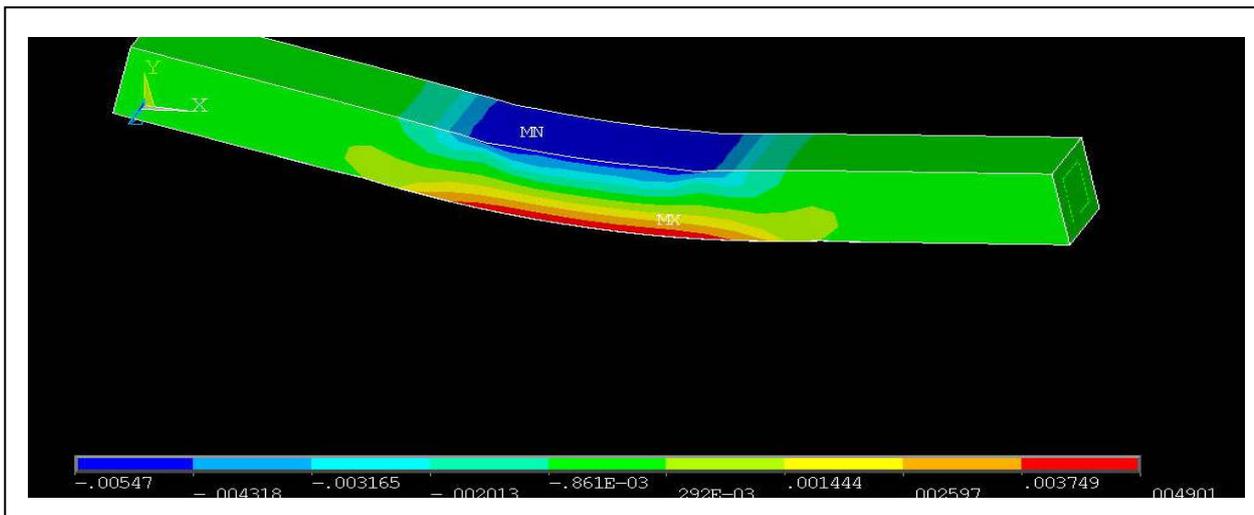


Figure V. 5a : Distribution des déformations pour la poutre renforcée RA1.

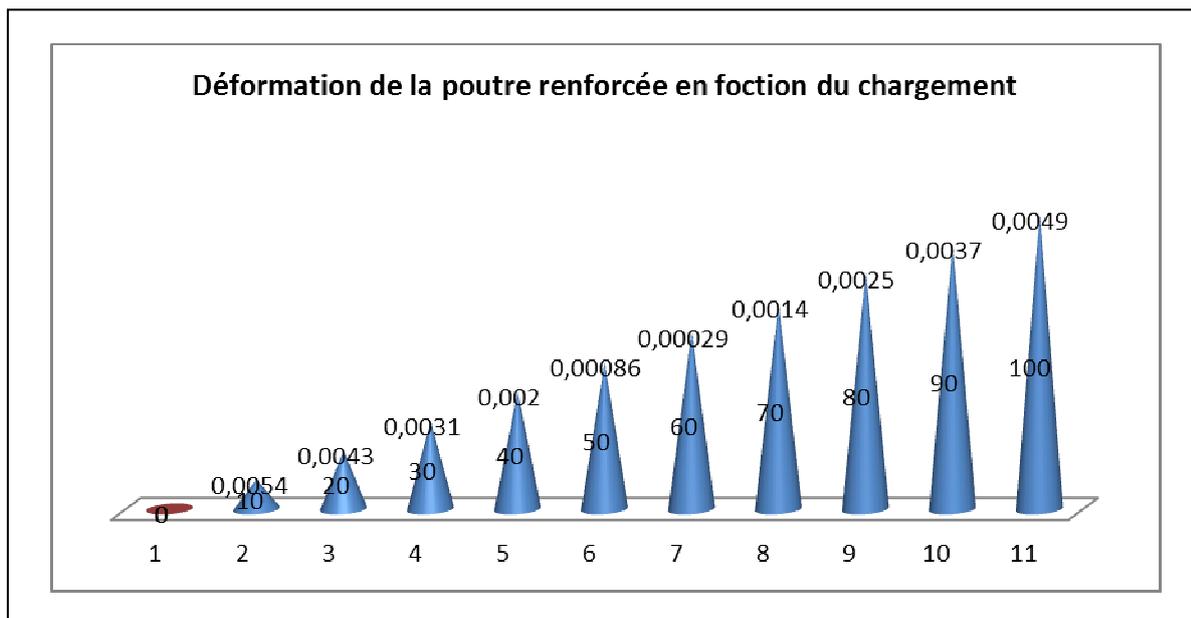


Figure V. 5b : Evolution des déformations pour la poutre renforcée RA1.

V. 4- Calibrage du modèle numérique

Le calibrage exact n'est pas facile, dans le sens où les vraies valeurs des caractéristiques mécaniques du béton, des aciers HA et doux, des composites, ainsi que le collage au niveau du support (adhérence) ne sont pas fiablement connus. Donc les valeurs prises comme données pour le calcul numérique, par ANSYS, sont probablement approchées par rapport aux valeurs réelles. Pour arriver au modèle calé d'éléments finis, plusieurs tentatives d'approximations ont été faites. Ces approximations tenaient compte des propriétés des matériaux introduits, l'influence des matériaux composites et le mode de leur application sur les poutres, sans oublier le modèle choisi pour appuis et le chargement imposé. Les éléments finis que le calibrage modèle ait choisi ont permis d'ajuster les paramètres sélectionnés jusqu'à ce que des valeurs raisonnables dans la charge, flèche, déformations ont été observés.

V. 5- Comparaison et commentaires

Le tableau VI.1 présente une comparaison sommaire des valeurs numériques et expérimentales de la portance, la flèche et la déformation du béton des différentes poutres testées. Les résultats expérimentaux sont issus par les essais effectués au laboratoire de Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger par Abdessem M. [13], dans le but de suivre de près le comportement statique des poutres isostatique renforcées par composites, pour confronter et vérifier les résultats des études théoriques menées.

Tableau V.1 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

N° Poutre	Portance (N)			Flèche (mm)		
	Expér.	Num.	Ecart %	Expér.	Num.	Ecart %
Poutre réf. PT	88	80	9.10	8.55	6.30	26.30
Poutre RA1	118	100	15.25	9.60	7.73	19.47
Poutre RA2	125	105	16.00	10.55	8.10	23.25
Poutre RA3	-	118	-	-	9.12	-

L'écart entre la portance expérimentale et celle obtenue par le modèle choisi varie entre 09 et 16%, pour la portance qui donne la rupture à la poutre, tandis que pour la flèche maximale, la réduction est de moyenne de 7.5%. Ce qui montre le choix géométrique du modèle, les caractéristiques des matériaux 'linéaire' et l'adhérence parfaite choisie pour le support (béton – composite) sont plus ou moins acceptables. On note aussi, une nette amélioration des valeurs trouvées pour le renforcement et une nette augmentation de la force maximale (portante) lorsque la résine époxydique est améliorée par l'insertion des nano composites, soit un gain de 13%. vis-à-vis au renforcement par composites) et 18% par rapport au renforcement par seulement la résine époxy.

Chapitre VI :

Approche avec d'autres recherches

Chapitre VI : Approche avec d'autres recherches

VI.1 Études comparatives avec les résultats d'autres chercheurs

Plusieurs chercheurs ont étudié le comportement des poutres renforcées par additifs d'aciers ou de fibres de carbone (CFRP), avec modélisation par la méthode des éléments finis. Parmi ces recherches similaires à notre cas on peut citer :

H. Bellakehal et al [38] ont étudié numériquement une série de poutres isostatiques en béton armé soumise à des essais de flexion quatre points. Trois types de poutres (F01, F11 et S6-PRE3) ont été modélisés par le logiciel ANSYS :

- F01 : poutre en béton armé non renforcée (référence).
- F11 : poutre renforcée par une plaque d'acier (Figure VI.1).
- S6-PRE3 : poutre en béton armé renforcée par une plaque en CFRP (Figure VI.2).

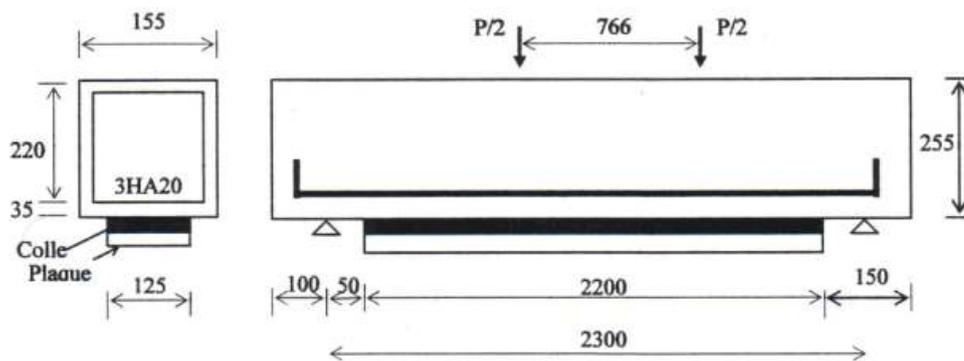


Figure VI.1: Montage de la poutre F01 et F11 [38]

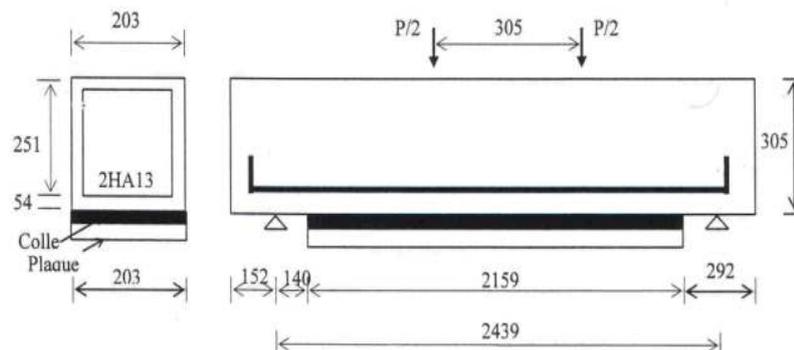


Figure VI.2: Montage de la poutre renforcée par une plaque de CFRP (S6-PRE3) [38]

Les poutres étant symétriques, seule une moitié a été modélisée (Figures IV.21, IV.22 et IV.23). Pour éviter les problèmes numériques liés à la concentration des contraintes, la force a été appliquée sous forme d'une pression (charge répartie sur une surface). Le modèle utilise deux types d'éléments : élément solide à huit nœuds (solid65) représentant le béton, et élément de barre à deux nœuds (link8) représentant l'acier d'armature. Le maillage adopté

pour la poutre renforcée par la plaque d'acier est identique à celui de la poutre de référence, avec l'addition des éléments de la plaque. Cette dernière est représentée par des éléments solides à huit nœuds (solid 45). Les liaisons entre les différents éléments sont considérées comme rigides.

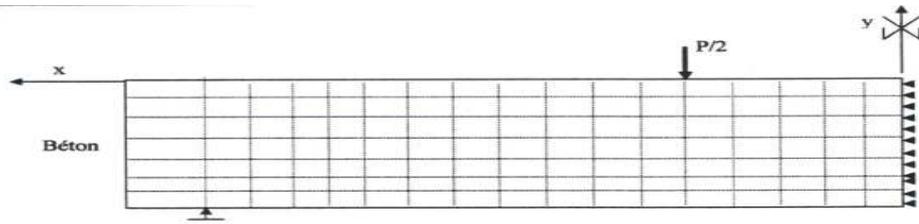


Figure VI.3: Modélisation numérique de la poutre F01 [38].

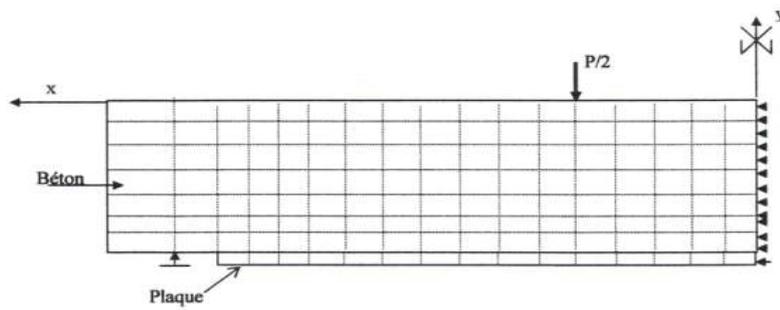


Figure VI.4: Modélisation numérique de la poutre F11 [38]

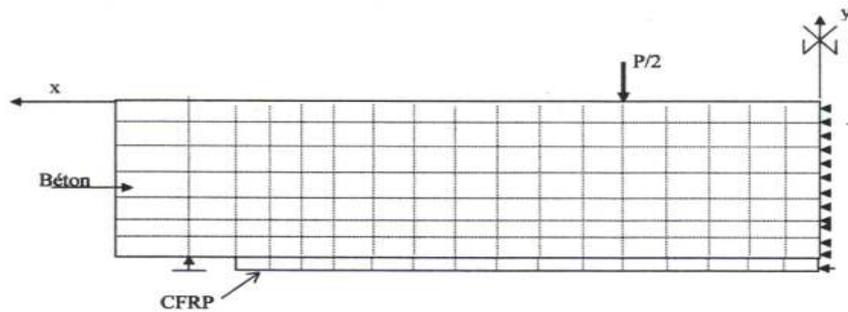


Figure VI.5: Modélisation numérique de la poutre S6-PRE3 [38]

Les résultats numériques par éléments finis sont confrontés aux valeurs expérimentales pour cette étude. Le tableau VI.1 présente l'ensemble des résultats numériques et expérimentaux obtenus à mi-travée des poutres testées [38].

Tableau VI.1 : Résultats expérimentaux et numériques obtenus [38].

Poutres		Charge à la rupture (kN)	Flèche à la rupture (mm)	Déformation béton à l'ELU(‰)	Déformation composite à l'ELU(‰)
Expérimentale	F01	210	21.1	4.57	/
	F11	239	21.8	4.31	7
	S6-PRE3	97.47	24.8	2.7	10.08
Numérique	F01	201.37	19.91	5.1	/
	F11	241.8	20.02	6	20
	S6-PRE3	97.28	26.8	2	18.7

La lecture de ce tableau montre que les résultats numériques sont dans l'ensemble plus proches des résultats expérimentaux. Cependant, un écart plus ou moins important entre les résultats des modèles numériques et ceux du modèle expérimental est constaté pour la poutre renforcée par la plaque en CFRP. Ceci est peut être dû aux modèles de matériaux intégrés dans l'ANSYS qui ne prennent pas en charge la dégradation graduelle du béton suite à la fissuration [39]. Et les microfissures produites par rétrécissement de séchage dans les poutres expérimentales. En plus, l'adhérence entre les matériaux (acier, béton, composites) est assumée parfait dans les modèles, mais cette hypothèse n'est pas vérifiée pour les poutres expérimentales.

Kachlakev et al. [40] ont étudiés les effets du renforcement au cisaillement des poutres en béton armé (sans les étriers) renforcées extérieurement sur les deux côtés par des fibres de verre (GFRP) et des fibres de carbone (CFRP) pour le renforcement à la flexion. Les poutres ont été soumises à un essai de flexion quatre points. Les résultats du modèle d'éléments finis tridimensionnels d'ANSYS ont calés les résultats expérimentaux obtenus [39-42].

Les résultats du modèle numérique et expérimental étudié par Kachlakev sont comparés aux résultats de notre modèle d'éléments finis d'ANSYS. Les dispersions sont avérées plus ou moins importantes

D'autres travaux de recherches, récentes dans ce domaine, ont été élaborés. On peut citer ceux de Guido Camata en 2007 [41], qui a pris des poutres en béton armé de (200× 300× 3250) mm, renforcées en traction par plaques de fibres de carbone et tissus de fibres de verre, sous flexion (Figure VI.6).

L'analyse numérique, dans le but de caler les résultats expérimentaux, a été faite par l'application d'un programme numérique par la méthode des éléments finis, développée par l'Université de Colorado [41].

La simulation numérique a montré que la poutre renforcée par plaque CFRP a cédé par delamination à 115 kN, avec une flèche verticale de 20.8 mm, alors que la charge de rupture de celle renforcée par plaque GFRP avait une valeur de 147 kN, correspondant à une flèche de 45.0 mm. Le tissu de fibre de carbone semble se comporter mieux. En plus, les résultats de la simulation numérique ont parfaitement calé les résultats de la campagne expérimentale [41].

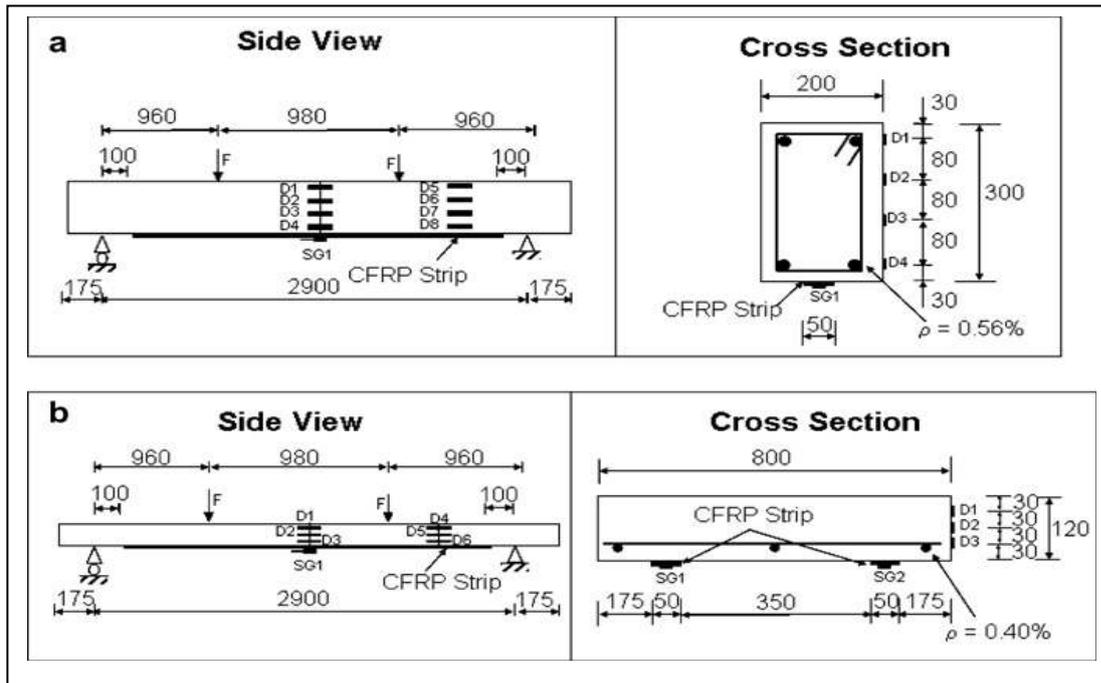


Figure VI.6: Dimensions de la poutre d'essai [41]

Abdessemed et al. [13] a étudié le comportement statique, sous chargement, des poutres en béton armé simplement appuyées et soumises à la flexion, quatre points, renforcées par matériaux composites : unidirectionnel (tissu Sikawrap) ou/et lamelles stratifiés (SikaCarbodur).

Les poutres renforcées sont représentés comme suit :

- **1^{er} cas : Poutre RA1**

Le premier renforcement de la poutre est par une lamelle de fibre de carbone (Sikacarbodur) afin de voir les fissures qui apparaissent avec le chargement (éventuellement rupture par fissure horizontale au droit des armatures longitudinales de traction appelée "peeling-off").

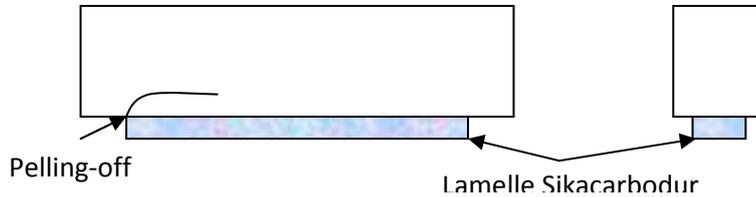


Figure VI.7: Renforcement poutre par Lamelle Sika Carbodur [13]

- **2^{ème} cas : Poutre RA2**

Le deuxième cas de renforcement de la poutre est par une lamelle de fibre de carbone (sikacarbodur) + tissu Sika Wrap à 1/3 de la hauteur, par bandes isolées, afin de pouvoir annuler (ou réduire) la rupture par peeling-off.

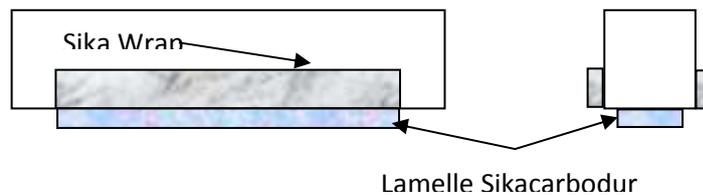


Figure VI.8: Renforcement poutre par Sika Carbodur et sika wrap [13]

- **3^{ème} cas : Poutre RA3**

Le troisième renforcement, consiste à coller 1/3 hauteur des faces latérales la poutre par tissus Sika wrap en forme de "U" et la face inférieure par des lamelles de fibre de carbone (Sikacarbodur).

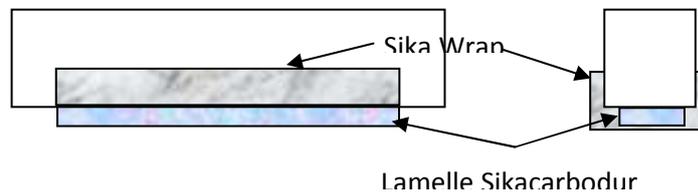


Figure VI.9: Double renforcement aux faces latérales et face inférieure [13]

- 4^{ème} cas : Poutre RA4

Ce mode consiste à appliquer, sur les faces latérales, des bandes verticales en tissu sika wrap espacées d'une manière équidistante, et une lamelle de sika carbodur collée sur la face inférieure. C'est le mode appliqué en pratique pour le renforcement des poutres de ponts en béton armé.

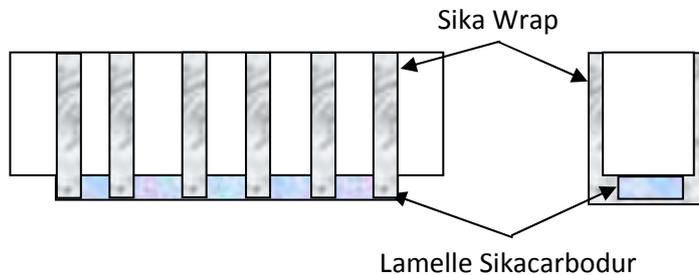


Figure VI.10: Renforcement en bandes aux faces latérales et lamelle en face inférieure[13]

Le tableau VI.2 présente une comparaison sommaire des valeurs numériques et expérimentales de la portance, la flèche et la déformation du béton des différentes poutres testées.

Tableau VI.2 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

N° Poutre	Portance (N)			Flèche (mm)			Déformation béton (µm/m)		
	Expér.	Num.	Ecart %	Expér.	Num.	Ecart %	Expér.	Num.	Ecart %
Poutre réf. PT	88	69.83	- 20.6	10.55	17.7	67.79	832.5	1253	50.5
Poutre RA1	100	78.24	-21.2	6.6	16.1	-	902	868.7	-3.7
Poutre RA2	115	84.48	-26.5	6.8	12.0	76.47	962	987.5	2.7
Poutre RA3	105	115.56	10.0	4	11.2	-	791.8	893.8	12.9
Poutre RA4	130	148.67	14.4	5.3	7.8	47.92	1305.2	839.7	-35.7

L'écart entre la portance expérimentale et celle obtenue par le modèle ne dépasse pas les 27%, montrant ainsi que le choix géométrique du modèle, les caractéristiques des matériaux et l'adhérence parfaite choisie pour le support (béton – composite) sont acceptables. Cependant, l'écart pour les flèches et un degré moins les déformations est très important. Cela est dû probablement au maillage choisi qui n'a pas coïncidé avec les nœuds "les plus sollicités" donnant les résultats les plus défavorables.

VI.2 Commentaire des études comparatives

L'analyse des résultats numériques nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- Il y a peu (voire rare) d'étude du comportement des poutres renforcées par composites avec insertion des nano composites ;
- Les poutres renforcées par les composites CFRP donnent des déformations réduites, comparativement à la poutre de référence, mais avec des charges de rupture plus importantes ;
- Des gains négligeables dans les déformations du béton en compression pour les poutres renforcées en comparaison à la poutre de référence sont observés ;
- Les composites de renforcement réduit l'apparition des fissures dans les modèles ;
- Les résultats numériques obtenu, par la prise en compte du comportement linéaire des matériaux porteurs (aciers, béton, composite), montrent globalement une concordance plus ou moins raisonnablement bonne avec les résultats d'essais expérimentaux, et confirment clairement l'effet bénéfique du renforcement sur le comportement des poutres, qui se traduit notamment par la réduction des flèches et des déformations, et l'augmentation des charges de rupture et de fissuration.

Chapitre VII :

Conclusions et recommandations

Chapitre VII : Conclusions et recommandations

Les problèmes liés à l'utilisation des tôles en acier (corrosion au niveau de l'interface acier/adhésif, poids, etc.) ont conduit les chercheurs à utiliser aujourd'hui les matériaux composites dans le domaine du renforcement et de la réparation des structures en béton. Cependant, depuis près de quarante ans, le collage de ces composites constitue une technique efficace de réparation ou de renforcement. Des milliers de collages ont été effectués à ce jour, apportant ainsi la preuve de la fiabilité et de la durabilité de la technique du collage. Depuis plusieurs années des équipes de recherche dans plusieurs pays s'intéressent aux problèmes de l'adhésivité des matériaux collés et du comportement de l'assemblage collé.

Nous avons essayé, par le biais de cette étude, à comprendre les nano composites, comme technique augmentant les performances mécaniques de l'adhésivité (résiné d'adhésion). Pour cela, des modèles numériques avec un comportement linéaire ont été élaborés. Les conclusions à tirer de cette étude se résument à :

- Les nano composites, appliquées dans la résine époxy, améliorent les performances mécaniques de la résine et par conséquent augmentent la portance et la déformation de la poutre testée.
- La modélisation d'une poutre renforcée, par application de la MEF à l'aide du logiciel ANSYS 15.0 a été effectuée, et ce malgré quelques difficultés du choix du modèle (convergence de la solution) ;
- Le renforcement, par composites CFRP joue un rôle bénéfique dans l'augmentation de la portance, de la flèche et la réduction des déformations de l'acier, du béton et sur la résistance ultime des poutres.
- Le renforcement des poutres en béton armé empêche ou retarde les différents types de fissures.
- Les résultats numériques obtenus montrent globalement une bonne concordance avec les résultats d'essais expérimentaux au laboratoire.

Nous recommandons, pour les travaux de recherche futurs :

- De contribuer à la compréhension plus poussée des nano-composites, par des essais expérimentaux et des choix de modèles numériques ;
- Les matériaux innovants prometteurs dans divers domaines, sont recommandés pour la sauvegarde du patrimoine de structures existant ;
- Améliorer le modèle de calcul, avec un comportement non linéaire des matériaux utilisés ;
- Prendre d'autres cas d'études d'éléments structuraux tels que les nœuds (jonction poteau-poutre), les voiles (en béton armé, béton précontraint, mixte, ou en acier).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] Mohcene BOUKHEZAR « Réhabilitation et Renforcement des poutres au moyen des matériaux composites », Thèse de magister 2009, Université Mentouri, Constantine.
- [02] Dr Ir P. Boerhaave « cours de béton armé : choisir et commander un béton », 2006.
- [03] LAIB ABDELGHANI « Réparation et Renforcement des structures en béton armé », Thèse de magister 2006, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
- [04] Hicham BELHANNACHI « Réhabilitation et Renforcement des Poteaux en Béton Armé », Thèse de magister 2009, Université Mentouri, Constantine.
- [05] RABAH OUMAZIZ « cours sur le béton projeté », 2008.
- [06] Article Tiré d'INTERNET « méthodes et principaux généraux de renforcements ».
- [07] BENAÏSSA MED ABDELAZIZ et MENASRI LYES « Renforcement de la salle de conférence de l'université de BOUMERDES avec des Matériaux composites T.F.C » Mémoire de fin d'études 2007, Ecole Nationale des Travaux Publics E.N.T.P – Kouba. Alger
- [08] Abdelkrim BELKACEM et Keltoum BEN HELIMA « calcul numérique des poutres en béton armé renforcées par les matériaux composites C.F.R.P » Mémoire de fin d'études 2007, Ecole Nationale des Travaux Publics E.N.T.P – Kouba. Alger.
- [09] PATRICK GUIRAUD « les solutions techniques par la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton », construction moderne/Annuel ouvrage d'art 2011.
- [10] Article Tiré d'INTERNET « les matériaux composites ».
- [11] MICHEL DUPEUX « aide-mémoire science des matériaux », professeur de l'université JOSEPH FOURIER de GRONOBLE.
- [12] Glossaire des matériaux composites, centre d'animation régional matériaux avancés, actualisation decembre 2004.
- [13] Mouloud ABDESSEMED « Etude expérimentale et modélisation du comportement des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites sous flexion-cas des ponts », thèse de doctorat 2011, Ecole nationale polytechnique.
- [14] PIERRE ALEXAANDRE BRIEL « calcul numérique du renforcement de structures en béton armé par des renforts en fibres végétales et comparaison au renforcement par des fibres de carbone » Mémoire de fin d'études 2013, INSA de Strasbourg.
- [15] SIHEM KERMICHE « Analyse expérimentale du comportement mécanique de poutres en béton armé pré- fissurées renforcées de matériaux composites de type textile polymère en toile de fibre de carbone » Thèse de Magister 2007, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.
- [16] Article Tiré d'INTERNET « colles et adhésifs ».
- [17] Article Tiré d'INTERNET « Epoxydes : points forts et faibles ».

- [18] Article Tiré d'INTERNET « les colles en génie civil».
- [19] Article Tiré d'INTERNET «Notices techniques des produits SIKA».
- [20] Article Tiré d'INTERNET « définition d'un nano-composite ».
- [21] Article Tiré d'INTERNET «Les nano-composites à matrice organique», ELBAZ Mikael, Master technologie, 2004/2005.
- [22] Djamila Belhadji« Synthèse et caractérisations de composites polyethylenedioxyde thiophene/mMaghnite- » Thèse de Magister 2010, UNIVERSITE ES-SENIA-ORAN.
- [23] Article Tiré d'INTERNET « Chapitre I/Les nano- composites argiles-polymères»
- [24] Saliha Chaoui «Elaboration et caractérisation de nano-composite à matrice polymère : approche expérimentale» Thèse de Doctorat en sciences Génie polymères, UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF
- [25] Abdallah Illaik « Synthèse et caractérisation de nano-composites polymères /hydroxydes doubles lamellaires(HDL)» archives ouvertes HAL, UNIVERSITE Blaise Pascal-Clermont Ferrand II ,2008.
- [26] Fornes T.D. Paul D.R, Modeling properties of nylon 6/clay nano-composites using composite. theories, Polymer, 44: 4993–5013, (2003).
- [27] Anthony Loiseau« Elaboration et caractérisation de nano-composites modèles laponite /Plyoxyde d'éthylène» Thèse de Doctorat en chimie et physico-chimie des polymères, UNIVERSITE du MAINE, en2006.
- [28] Article Tiré d'INTERNET «Les matériaux nano-composites ».
- [29] Article Tiré d'INTERNET «Nano-composites à charges lamellaires et matrice polymère», Compte rendu d'un atelier de prospective sur le sujet.de Christelle Gallet, Jean Claude Prevot,Jean Claude Daniel .
- [30] Article Tiré d'INTERNET «Wikipédia ANSYS ».
- [31] Tutorial of ANSYS, version 15.
- [32] Robbert J., Identification des modèles structuraux en dynamique non linéaire, thèse de doctorat, Toulouse, France 2005.
- [33] ANSYS Basic, "Analysis Practice Guide", 2nd edition, SAS IP, Inc.
- [34] F. A. Tavarez, Simulation of behavior of composite grid reinforced concrete beams using explicit finite element methods, MSc Thesis, University of Wisconsin, 2001.
- [35] Catbas F.N., Grimmelman K.A, Static and Dynamic testing of a concrete T-Beam Bridge before and after CFRP retrofit, Journal TBR, issue volume 1976/2006, page 77-87, February 28, 2007.

- [36] Kheyroddin A. and Naderpour H., "*Nonlinear finite element analysis of composite RC shear walls*" Shiraz University Dept. of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. of Iran, Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 32, No. B2, pp 79-89 Printed in the Islamic Republic of Iran, 2008.
- [37] Cheikhana Diagana, Alex Li, Loubna Bouzaoui et Yves Delmas, Article session II sur la réparation et nouveaux renforts : «renforcement des poutres en béton armé par collage de bondes TFC ».
- [38] Bellakehal H., « Modélisation non linéaire par éléments finis des poutres en BA renforcées par des plaques », Thèse de Magister sous la direction du Professeur M. Bouhicha, Université Amar Thelidji, Laghouat, 2006.
- [39] Hadouche F., Analyse numérique du comportement des poutres en béton renforcées par matériaux composites, Thèse de Magister, Université de Blida, Département de Génie Civil, Avril 2008.
- [40] Kachlakev D., Miller T., Yim S., Chansawat K. and Potisuk T., Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates, Civil and Environmental Engineering et Civil, Construction and Environmental Engineering, Oregon Department of Transportation, May 2001, pp.1-113.
- [41] Camata G., Spacone E. and Zarnic R., Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams strengthened with FRP plates, Composites Journal, Part B 38 (2007) 277–288
- [42] Laichaoui A., Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites, Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Avril 2006.

