



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil & Architecture



N° d'ordre: ...../GCA/2022

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière :** Génie Civil  
**Spécialité :** Structure

### *Thème*

**<< RENFORCEMENT DES STRUCTURES EN BETON  
ARME PAR COLLAGE DE COMPOSITES:  
MODELISATION NUMERIQUE DU MECANISME  
D'INTERACTION >>**

**Présenté par :**

1. MEDJAHDI KHEIRA
2. HANNOUCHE SAMIRA

➤ **Soutenu le : 12 / 07 / 2022 devant le jury composé de :**

**Président : Mr. ZELMAT YASSINE**

**Examineur : Mr. REZIGUA AHMED**

**Encadreur : Mr. AYAD TAYEB**

**Année Universitaire : 2021 / 2022**

## *Remerciement:*

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidés vers le bon chemin du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre encadreur **Mr.AYAD Tayeb**, qui nous a témoigné de sa confiance et de son aide scientifique et par expérience et sa compétence.

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, Mes vifs remerciements sont adressés aux membres de jury, de m'avoir honoré de leur présence et d'avoir voulu évaluer ce travail.

## *Dédicace*

Ici s'achève ma carrière universitaire. Grâce à **Dieu**. Tout d'abord, je dédie mon diplôme à celui qui m'a soutenu tout au long de ma vie et qui m'a attendu ces moments pour partager mes joies , C'est l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir et **c'est mon cher père ( Medjahdi KHELIFA )**, que Dieu ait pitié de lui .

اللهم ارحم ابي برحمتك الواسعة واغفر له واجعل قبره روضة من رياض الجنة

Je dédié aussi ce modeste travail :

A celle qu'elle a veillée sur moi pendant toujours, ma chère mère

A toute ma famille,

Mes frères, mes sœurs,

A tous mes amis : Badra , Ahlem , Amina , Meryem , Fatima

Et Mon cher binôme HANNOUCHE SAMIRA

A tous les enseignants du département de génie civil.

## *Dédicace*

Dédicace Grace à « Dieu » qui m'a tracé le chemin et m'a donné le pouvoir et le courage de continuer jusqu'à la fin,

J'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie : A mes chers parents qui m'ont toujours supporté dans toute ma vie pour atteindre mes objectifs, plus spécialement à ma mère qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études.

A ma grande famille HANNOUCHE. Mes frères et mes sœurs.

A tous mes amis sans exception, plus particulièrement Meryem, Amina, Soumia, Amina .

Enfin à mon cher binôme MEDJAHDI KHEIRA

A tous les enseignants du département de génie civil et à toute ma promotion 2021/2022.

## **Résumé :**

Les structures en béton armé ont une durabilité inférieure à d'autres matériaux utilisés dans la construction et cela est dû aux caractéristiques mécaniques du béton lui-même qui n'est pas homogène dans sa composition (différents constituants), la dégradation des structures en béton armé commence par des petites fissures au niveau des parties plus sollicitées ou bien plus faibles que d'autres, pour cela, le renforcement des éléments dégradés (fissurés) est indispensable après l'auscultation des ouvrages.

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur la réparation des structures endommagées, en utilisant des matériaux de renforcement tels que l'acier et les matériaux composites. Généralement, on utilise des plaques de réparations au niveau inférieur d'une poutre fissurée par exemple.

Le travail développé dans cette thèse a pour but de présenter une étude comparative entre deux travaux théoriques d'une part et faire une comparaison des résultats analytiques avec ceux que nous avons développés par modélisation numérique en utilisant un logiciel de calcul des structures, sachant que notre travail s'intéresse sur le contact entre la poutre en béton armé et la plaque de réparation c'est-à-dire l'interface « béton/adhésif/renfort ».

Finalement une étude paramétrique a été établie pour voir les effets de variation des propriétés géométriques et mécaniques de la plaque de réparation et spécialement le CFRP.

**Mots clés :** Composites, fissure, dégradation, fibre de carbone, éléments finis, cisaillement, renforcement

## **Abstract:**

Reinforced concrete structures have a lower durability than other materials used in construction and this is due to the mechanical characteristics of the concrete itself which is not homogeneous in its composition (different constituent), the degradation of concrete structures reinforced begins with small cracks at the level of the parts that are more stressed or much weaker than others, for this, the reinforcement of the degraded (cracked) elements is essential after examination of the structures.

Several researchers have worked on repairing damaged structures, using reinforcing materials such as steel and composite materials. Generally, repair plates are used at the lower level of a cracked beam, for example.

The work developed in this thesis aims to present a comparative study between two theoretical works on the one hand and to make a comparison of the analytical results with those that we have developed by numerical modeling using structural calculation software, knowing that our This work focuses on the contact between the reinforced concrete beam and the repair plate, i.e. the "concrete/reinforcement adhesive" interface.

Finally a parametric study was established to see the effects of variation of the geometric and mechanical properties of the repair plate and especially the CFRP.

**Key words:** Composites, crack, degradation, carbon fiber, finite elements, shear, reinforcement

## ملخص :

تمتع الهياكل الخرسانية المسلحة بمتانة أقل من المواد الأخرى المستخدمة في البناء وهذا يرجع إلى الخصائص الميكانيكية للخرسانة نفسها غير المتجانسة في تكوينها (مكونات مختلفة) ، يبدأ تدهور الهياكل الخرسانية المقواة بشقوق صغيرة على المستوى من الأجزاء التي تكون أكثر توتراً أو أضعف بكثير من غيرها ، لذلك ، فإن تعزيز العناصر المتدهورة (المتصدعة) ضروري بعد فحص الهياكل .

عمل العديد من الباحثين على إصلاح الهياكل التالفة باستخدام مواد تقوية مثل الفولاذ والمواد المركبة. بشكل عام ، يتم استخدام لوحات الإصلاح في المستوى السفلي من الحزمة المتصدعة ، على سبيل المثال.

يهدف العمل الذي تم تطويره في هذه الأطروحة إلى تقديم دراسة مقارنة بين عمليتين نظريتين من جهة وإجراء مقارنة بين النتائج التحليلية مع تلك التي طورناها عن طريق النمذجة العددية باستخدام برنامج الحساب الهيكلي ، مع العلم أن هذا العمل يركز على الاتصال بين عارضة الخرسانة المسلحة ولوحة الإصلاح ، أي واجهة "الاصق الخرسانة / التعزيز ."

أخيراً تم إنشاء دراسة بارامترية لمعرفة آثار تباين الخواص الهندسية والميكانيكية للوحة الإصلاح وخاصة الياف الكربون.

**الكلمات الرئيسية:** المركبات ، تشقق ، التدهور ، ألياف الكربون ، العناصر المحدودة ، القص ، تعزيز

## SOMMAIRE:

LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	

<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES</b> .....	<b>1</b>
<b>I -1 : INTRODUCTION :</b> .....	<b>2</b>
<b>I -2 : DEFINITION :</b> .....	<b>2</b>
I-2-1 : AVANTAGES : .....	2
I-2-2 : INCONVENIENTS:.....	3
<b>I -3 : DIFFERENTS TYPES DE MATERIAUX COMPOSITES :</b> .....	<b>3</b>
<b>I -4 : CLASSIFICATION DES MATERIAUX COMPOSITES :</b> .....	<b>3</b>
I -4-1 : CLASSIFICATION DES MATERIAUX COMPOSITES SUIVANT LA FORME DES CONSTITUANTS : .....	3
I -4-1-1: COMPOSITE A PARTICULES.....	3
I -4-1-2 : COMPOSITES A FIBRES : .....	3
I -4-2 : CLASSIFICATION DES MATERIAUX COMPOSITES SUIVANT LA NATURE DES CONSTITUANTS : .....	4
<b>I -5 : CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES :</b> .....	<b>4</b>
I -5-1 : LE RENFORT:.....	5
I -5-1-1 : DEFINITION ET CLASSEMENT DE RENFORT : .....	5
I -5-1-2 : DIFFERENTES NATURES DE RENFORT:.....	5
I -5-1-3 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES FIBRES DE BASE : .....	11
I -5-2 : LA MATRICE:.....	12
I -5-2-1 : DEFINITION ET ROLE DE LA MATRICE:.....	12
I -5-2-2 : DIFFERENTES NATURES DE LA MATRICE : .....	12
I -5-2-3 : LES RESINES:.....	13
I -5-2-4:PRINCIPALES PROPRIETES DES MATRICES THERMODURCISSABLES ET THERMOPLASTIQUES:.....	16
I -5-3 : LES CHARGES ET LES ADDITIFS : .....	17
I -5-3-1 : LES CHARGES : .....	17
I -5-3-2 : LES ADDITIFS : .....	17
I -5-4 : L'INTERFACE : .....	17
<b>I -6 : TYPES DE COMPOSITES POUR LE RENFORCEMENT :</b> .....	<b>17</b>
<b>I -7 : TECHNIQUES DE FABRICATION DES COMPOSITES :</b> .....	<b>18</b>
I -7-1 : PULTRUSION:.....	19
I -7-2 : MOULAGE MANUEL :.....	19
I -7-2-1: MOULAGE AU CONTACT: .....	19
I -7-2-2: MOULAGE PAR PROJECTION SIMULTANEE: .....	20
I -7-2-3: ENROULEMENT FILAMENTAIRE (OU BOBINAGE): .....	21

<b>I -8 : MISE OUVRE :</b> .....	<b>23</b>
I -8-1 : PREPARATION DE LA SURFACE DU BETON:.....	23
I -8-2 : ADHESIF :.....	24
I -8-3 : PREPARATION DE LA SURFACE DU RENFORT : .....	25
<b>I -9 : COMPORTEMENT MECANIQUE DES COMPOSITES:</b> .....	<b>27</b>
I -9-1 : CARACTERISATIONS MECANQUES D'ARMATURES EN PRF:.....	27
I-9-1-1 : RESISTANCE EN TRACTION ET MODULE ELASTIQUE: .....	27
I-9-1-2 : RESISTANCE AU CISAILLEMENT INTER LAMINAIRE : .....	28
I-9-2 : DURABILITE DES ARMATURES EN PRF SOUS SOLlicitATIONS ENVIRONNEMENTALES ET MECANQUES :.....	29
I-9-2-1 : EFFETS DE L'HUMIDITE : .....	29
I-9-2-2 : FATIGUE : .....	29
<b>I -10 : CONCLUSION :</b> .....	<b>31</b>
<b>CHAPITRE II: DEGRADATION DES STRUCTURES EN BETON ARME (FISSURATION DU BETON)</b> .....	<b>32</b>
<b>II -1 : INTRODUCTION :</b> .....	<b>33</b>
<b>II -2 : DEFINITION :</b> .....	<b>33</b>
<b>II -3 : LES DIFFERENTES DEGRADATIONS DU BETON:</b> .....	<b>34</b>
II -3-1: LES DEGRADATIONS MECANQUES.....	34
II -3-2 : LES DEGRADATIONS PAR AGRESSION CHIMIQUE .....	34
II -3-3 : LES DEGRADATIONS PHYSIQUES:.....	34
<b>II -4 : POURQUOI DES FISSURES SE FORMENT DANS LA STRUCTURE EN BETON ? :</b> .....	<b>34</b>
II-4-1 : À L'ETAT NORMAL LE BETON EST FISSURE : .....	35
II-4-2 : APPARITION DE LA FISSURATION : DE MULTIPLES CAUSES : .....	35
II-4-3 : MAITRISE DE LA FISSURATION LORS DU DIMENSIONNEMENT : .....	36
II-4-4 : PRINCIPES DE BASE DE LA FISSURATION : .....	36
<b>II -5 : TYPES ET CAUSES DE DETERIORATION DU BETON:</b> .....	<b>37</b>
II-5-1 : CORROSION DES METAUX INTEGRES : .....	39
II-5-1-1 : LE BETON ET LA COUCHE PASSIVANT:.....	40
II -5-1-2 : LE ROLE DE CHLORURE:.....	41
II-5-1-3: CARBONATATION: .....	42
II-5-2 : DETERIORATION PAR LE GEL-DEGEL : .....	43
II-5-3 : ATTAQUE CHIMIQUE : .....	43
II-5-3-1 : SELS ET ALCALIS: .....	43
II-5-3-2 : PRODUITS CHIMIQUES QUI DETERIORENT LE BETON: .....	44
II-5-3-3 : ATTAQUE DE SULFATE : .....	44
II-5-4 : REACTIVITE ALCALIS-AGRÉGATS : .....	44
II-5-4-1 : REACTIVITE ALCALI-SILICE: .....	44

II-5-4-2 : REACTIVITE ALCALI-CARBONATE :	45
II-5-5 : ABRASION/ÉROSION :	45
II-5-6 : FEU/CHALEUR:	46
II-5-7 : RETENUE AUX CHANGEMENTS DE VOLUME.....	46
II-5-7-1 : FISSURATION PAR RETRAIT DU PLASTIQUE: .....	46
II-5-7-2 : FISSURATION DES TASSEMENTS PLASTIQUES: .....	47
II-5-7-3 : SECHAGE RETRAIT FISSURATION: .....	47
II-5-7-4: FISSURATION THERMIQUE : .....	48
II-5-8: MAUVAISES PRATIQUES DE CONSTRUCTION: .....	49
II-5-9: SURCHARGES DE CONSTRUCTION : .....	49
II-5-10: ERREURS DE CONCEPTION ET DE DETAIL : .....	50
II-5-11: CHARGES APPLIQUEES A L'EXTERIEUR :.....	50
<b>II-6 : CONCLUSION :</b> .....	<b>50</b>

### **CHAPITRE III :PRESENTATION D'UN MODELE ANALYTIQUE DE L'INTERFACE BETON/PLAQUE DE REPARATION..... 51**

#### **III-1 : MODEL ANALYTIQUE: (TOUNSI ABDELOUAHED, 2005)..... 52**

#### **III-2 : REPARTITION DES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT LE LONG DE L'INTERFACE FRP-BETON: (TOUNSI ABDELOUAHED, 2005)..... 53**

#### **III -3 : REPARTITION NORMALE DES CONTRAINTES LE LONG DE L'INTERFACE FRP-BETON:..... 58**

#### **III-4 : APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES..... 60**

III-4-1:CONTRAINTE DE CISAILLEMENT L'INTERFACE POUR UNE CHARGE  
UNIFORMEMENT REPARTIE : .....

III-4-2 : CONTRAINTE DE CISAILLEMENT L'INTERFACE POUR UNE CHARGE  
PONCTUELLE: .....

III-4-3 : CONTRAINTE DE CISAILLEMENT L'INTERFACE POUR DEUX CHARGES  
PONCTUELLES:.....

III-4-4 : CONTRAINTE NORMALE L'INTERFACE : EXPRESSION GENERALE POUR LES  
TROIS CAS DE CHARGE : .....

### **CHAPITRE IV 63MODELISATION NUMERIQUE DE L'INTERFACE BETON/RENFORT ..... 63**

#### **IV-1 : INTRODUCTION:..... 64**

#### **IV-2 : MODELISATION EN ELEMENT FINIS :..... 64**

IV-2-1: DEFINITION :.....

IV-2-2 : AVANTAGE DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS : .....

IV-2-3 : POURQUOI CHOISIR LA MEF ? :.....

IV-2-4 : IDEE DE BASE DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS:.....

IV-2-5 : PROCEDURES DE BASE DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS :.....

IV-2-5-1 : CHOIX DU TYPE D'ELEMENT ET DISCRETISATION :	66
IV-2-5-2 : TYPE D'ELEMENT :	66
IV-2-5-3 : TAILLE DE L'ELEMENT :	67
IV-2-6 : DOMAINES D'APPLICATION DE LA MEF :	68
IV-2-7 : LES GRANDES LIGNES DE LA METHODE:	69
IV-2-8 : LES DIFFERENTES FORMULATIONS DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS:	71
IV-2-8-1 : FORMULATION EN DEPLACEMENT:	71
IV-2-8-2 : FORMULATION EQUILIBRE:	71
IV-2-8-3 : FORMULATION HYBRIDE:	71
IV-2-8-4 : FORMULATION MIXTE:	71
IV-2-8-5 : FORMULATION EN DEFORMATION:	72
IV-2-9 : SUPPORT INFORMATIQUE ET LOGICIELS INCORPORANT LA MEF:	72
<b>IV-3 : LOGICIEL ANSYS :</b>	<b>73</b>
IV-3-1 : PRESENTATION DU LOGICIEL :	73
IV-3-2 : ENVIRONNEMENTS LOGICIELS:	74
IV-3-3 : INTERFACE UTILISATEUR :	74
IV-3-4 : PREPROCESSEUR :	75
IV-3-5 : SOLVEUR :	75
IV-3-5-1 : LES METHODES DE RESOLUTION DIRECTES :	75
IV-3-5-2 : LES METHODES ITERATIVES :	76
IV-3-6 : PROCEDURE GENERALE ANSYS:	77
IV-3-7 : LA PRISE EN COMPTE DE LA FISSURATION DANS LES CALCULS :	78
IV-3-8 : MODELE ELEMENT FINIS :	78
IV-3-9 : SOLIDE EN BETON ARME 3D:	79
IV-3-9-1 : DESCRIPTION DE L'ELEMENT SOLID65:	79
IV-3-9-2 :LINK180 ÉLEMENT DESCRIPTION:	79
IV-3-9-3 :LINK33 ÉLEMENT DESCRIPTION:	80
IV-3-9-4 : SOLID 45: MODELE STRUCTURE:	80
IV-3-9-5 : MODELE SOLID 46 :	81
IV-3-10 :TYPE D'ELEMENTS STRUCTURAUX UTILISES DANS ANSYS:	82
<b>IV-4:LES DONNEES D'EXECUTION:</b>	<b>84</b>
IV-4-1: LA GEOMETRIE:	84
IV-4-2: CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES MATERIAUX UTILISEES:	84
IV-4-3: CONDITIONS AUX LIMITES:	85
IV-4-4: CHARGEMENT:	85
IV-4-5: MAILLAGE:	85
<b>IV-5: CONCLUSION:</b>	<b>87</b>
<b>CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>88</b>
<b>V -1: INTRODUCTION:</b>	<b>89</b>
<b>V -2:RESULTATS NUMERIQUES ET CONCLUSIONS :</b>	<b>89</b>

<b>V -3:COMPARAISONS NUMERIQUES :</b> .....	<b>92</b>
<b>V -4 : EFFET DU MATERIAU DE LA PLAQUE SUR LA VARIATION DE LA CONTRAINTTE DE L'INTERFACE POUTRE EN BA/PLAQUE:</b> .....	<b>93</b>
<b>V -5:CONTRAINTES L'INTERFACE POUR DIFFERENTS PARAMETRES:</b> .....	<b>94</b>
V -5-1 : EFFET DE LA LONGUEUR DE LA PLAQUE DE REPARATION SUR LA VARIATION DE LA CONTRAINTTE DE L'INTERFACE POUTRE EN BA/PLAQUE:.....	94
V -5-2 : EFFET DE L'EPaisseur DE LA PLAQUE DE REPARATION SUR LA VARIATION DE LA CONTRAINTTE DE L'INTERFACE POUTRE EN BA/PLAQUE:.....	95
V -5-3 : EFFET DE L'EPaisseur DE LA COUCHE ADHESIVE SUR LA VARIATION DE LA CONTRAINTTE DE L'INTERFACE POUTRE EN BA/PLAQUE: .....	96
<b>V -5:CONCLUSION :</b> .....	<b>97</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>99</b>

## **BIBLIOGRAPHIE**

## LISTE DES FIGURES :

<b>FIGURE I-1:</b> SCHEMA ILLUSTRATIF D'UN MATERIAU COMPOSITE .....	4
<b>FIGURE I-2:</b> DIFFERENTS CONSTITUANTS D'UN MATERIAU COMPOSITE.....	4
<b>FIGURE I-3:</b> DIFFERENTES FAMILLES DU RENFORT.....	6
<b>FIGURE I-4:</b> FIBRE EN CARBONE .....	7
<b>FIGURE I-5 :</b> FIBRE EN VERRE .....	8
<b>FIGURE I-6:</b> FIBRE D'ARAMIDE.....	9
<b>FIGURE I-7:</b> DIFFERENTS TYPES DE FIBRES D'ARAMIDE .....	9
<b>FIGURE I-8:</b> DEFERENTES FAMILLES DE MATRICE .....	12
<b>FIGURE I-9:</b> SCHEMA DE PRINCIPE DU PROCEDE DE PULTRUSION .....	19
<b>FIGURE I-10:</b> MOULAGE PAR CONTACT .....	20
<b>FIGURE I-11:</b> PROJECTION SIMULTANEE .....	21
<b>FIGURE I-12:</b> ENROULEMENT FILAMENTAIRE (OU BOBINAGE) .....	21
<b>FIGURE I-13:</b> INJECTION THERMODURCISSABLE BMC .....	22
<b>FIGURE I-14:</b> COMPRESSION THERMODURCISSABLE SMC .....	22
<b>FIGURE I-15:</b> PREPARATION DU SUPPORT.....	23
<b>FIGURE I-16:</b> NETTOYAGE ET BROSSAGE DES SURFACES QUI PEUVENT ETRE HUMIDES.....	24
<b>FIGURE I-17:</b> PREPARATION DES FISSURES PAR INJECTION DE LA RESINE DE REPARATION .....	24
<b>FIGURE I-18:</b> PREPARATION DE LA COLLE.....	24
<b>FIGURE I-19:</b> ENCOLLAGE .....	25
<b>FIGURE I-20:</b> PREPARATION DE LA SURFACE DU RENFORT.....	25
<b>FIGURE I-21:</b> DECOUPE DU TISSU.....	25
<b>FIGURE I-22:</b> MISE EN PLACE D'UNE COUCHE DE RESINE D'ACCROCHAGE SUR LA SURFACE A RENFORCER.....	26
<b>FIGURE I-23:</b> MISE EN PLACE DE LA BANDE OU DU TISSU .....	26
<b>FIGURE I-24:</b> MISE EN PLACE D'UNE COUCHE DE RESINE D'ACCROCHAGE SUR LA SURFACE EXTERIEURE .....	26
<b>FIGURE I-25:</b> PROPOSITIONS D'ANCRAGES POUR ESSAIS DE TRACTIONS SUR ARMATURES PRF.....	28
<b>FIGURE I-26:</b> EXEMPLES DE DISPOSITIFS D'ESSAIS SHORT-BEAM .....	28
<b>FIGURE II-1:</b> LA CORROSION DE L'ACIER D'ARMATURE .....	39

<b>FIGURE II-2:</b> LA DILATATION DE L'ACIER CORRODE CREE DES CONTRAINTES DE TRACTION DANS LE BETON, CE QUI PEUT PROVOQUER DES FISSURES, UN DELAMINAGE ET UN ECAILLAGE .....	<b>39</b>
<b>FIGURE II-3:</b> LORSQUE L'ACIER D'ARMATURE SE CORRODE, LES ELECTRONS TRAVERSENT LA BARRE ET LES IONS TRAVERSENT LE BETON.....	<b>40</b>
<b>FIGURE II-4:</b> LES SELS DE DEGLAÇAGE SONT UNE CAUSE MAJEURE DE CORROSION DE L'ACIER D'ARMATURE DANS LE BETON.....	<b>41</b>
<b>FIGURE II-5:</b> LA CORROSION INDUITE PAR LA CARBONATATION SE PRODUIT SOUVENT SUR LES FAÇADES DES BATIMENTS AVEC UNE COUVERTURE EN BETON PEU PROFONDE.....	<b>42</b>
<b>FIGURE II-6:</b> LES CYCLES DE GEL-DEGEL PEUVENT CAUSER L'ENTARTRAGE DES SURFACES EN BETON .....	<b>43</b>
<b>FIGURE II-7:</b> LES INDICATEURS TYPIQUES DE LA REACTIVITE ALCALI-SILICE SONT LA FISSURATION CARTOGRAPHIQUE ET, DANS LES CAS AVANCES, LES JOINTS FERMES ET LES SURFACES DE BETON ECAILLEES .....	<b>45</b>
<b>FIGURE II-8:</b> CARTOGRAPHIEZ LE SCHEMA DE FISSURATION CAUSE PAR LA REACTIVITE ALCALI-CARBONATE.....	<b>45</b>
<b>FIGURE II-9:</b> DES FISSURES DE RETRAIT DU PLASTIQUE PEUVENT SE PRODUIRE LORSQUE L'EAU S'EVAPORE DE LA SURFACE PLUS RAPIDEMENT QU'ELLE N'EST REMPLACEE PAR L'EAU DE PURGE.....	<b>46</b>
<b>FIGURE II-10:</b> REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA FORMATION DE FISSURE DE TASSEMENT PLASTIQUE.....	<b>47</b>
<b>FIGURE II-11:</b> LA RESTRICTION AU RETRAIT DE SECHAGE EST LA CAUSE LA PLUS FREQUENTE DE FISSURATION DU BETON.....	<b>48</b>
<b>FIGURE III-1:</b> POUTRE SIMPLEMENT APPUYEE ET RENFORCEE PAR UNE PLAQUE COLLEE.....	<b>52</b>
<b>FIGURE III-2:</b> SEGMENT DIFFERENTIEL D'UNE POUTRE REVETUE DE SOFFITE .....	<b>52</b>
<b>FIGURE III 3:</b> CAS DE CHARGE .....	<b>60</b>
<b>FIGURE IV-1:</b> METHODES D'APPROXIMATIONS .....	<b>64</b>
<b>FIGURE IV-2:</b> ETAPES GENERALES DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS.....	<b>69</b>
<b>FIGURE IV-3:</b> CYCLE DE CONCEPTION.....	<b>73</b>
<b>FIGURE IV-4:</b> SCHEMA D'UTILISATION CLASSIQUE D'ANSYS.....	<b>77</b>
<b>FIGURE IV-5:</b> EXEMPLE DE LA MODELISATION D'UNE PLAQUE EN TRACTION .....	<b>77</b>
<b>FIGURE IV-6:</b> GEOMETRIE SOLID65 .....	<b>79</b>
<b>FIGURE IV-7:</b> GEOMETRIE LINK180.....	<b>80</b>

<b>FIGURE IV-8: GEOMETRIE LINK33.....</b>	<b>80</b>
<b>FIGURE IV-9:GEOMETRIE DE L'ELEMENT SOLIDE (SOLID45).....</b>	<b>81</b>
<b>FIGURE IV-10: GEOMETRIE SOLIDE A 46 ELEMENTS EN COUCHES .....</b>	<b>81</b>
<b>FIGURE IV-11:GEOMETRIE DE LA POUTRE REPAREE .....</b>	<b>84</b>
<b>FIGURE IV-12:FERRAILLAGE DE LA POUTRE .....</b>	<b>84</b>
<b>FIGURE IV-13:POUTRE SIMPLEMENT APPUYEE .....</b>	<b>85</b>
<b>FIGURE IV-14:LA CHARGE APPLIQUEE SUR LA POUTRE.....</b>	<b>85</b>
<b>FIGURE IV-15:MAILLAGE DE LA POUTRE REPAREE.....</b>	<b>86</b>
<b>FIGURE V-1: POUTRE BA RENFORCE PAR UNE PLAQUE D'ACIER.....</b>	<b>89</b>
<b>FIGURE V-2:COMPARAISON DES RESULTATS THEORIQUES AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX POUR POUTRE F31.....</b>	<b>90</b>
<b>FIGURE V-3:COMPARAISON DES CONTRAINTES L'INTERFACE DE CISAILLEMENT POUR UNE POUTRE BA AVEC UNE PLAQUE DE REPARATION COLLEE EN CFRP SOUMIS A UN UDL.....</b>	<b>91</b>
<b>FIGURE V-4:COMPARAISON DES CONTRAINTES L'INTERFACE DE CISAILLEMENT POUR UNE POUTRE BA AVEC UNE PLAQUE DE REPARATION COLLEE EN CFRP SOUMIS A FORCE CONCENTREE .....</b>	<b>91</b>
<b>FIGURE V-5: VARIATION DE LA CONTRAINTE DE L'INTERFACE POUTRE EN BA/PLAQUE EN FONCTION DU MATERIAU DE LA PLAQUE .....</b>	<b>93</b>
<b>FIGURE V-6: VARIATION DE LA CONTRAINTE DE L'INTERFACE POUTRE EN BA/PLAQUE, EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LA PLAQUE DE REPARATION .....</b>	<b>94</b>
<b>FIGURE V-7:VARIATION DE LA CONTRAINTE DE L'INTERFACE POUTRE EN BA/PLAQUE, EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE LA PLAQUE DE REPARATION .....</b>	<b>95</b>
<b>FIGURE V-8: VARIATION DE LA CONTRAINTE DE L'INTERFACE POUTRE EN BA/PLAQUE, EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE LA COUCHE ADHESIVE.....</b>	<b>96</b>
<b>FIGURE V-9: CONTRAINTE DE CISAILLEMENT LE LONG DE LA COUCHE D'ADHESIF .....</b>	<b>97</b>

## **LISTE DES TABLEAUX :**

<b>TABLEAU I-1:</b> CARACTERISTIQUE MECANIQUE DES FIBRES DE CARBONE.....	<b>7</b>
<b>TABLEAU I-2 :</b> CARACTERISTIQUES MECANIQUE DES FIBRES DE VERRE .....	<b>8</b>
<b>TABLEAU I-3:</b> PROPRIETES MECANIQUE DES FIBRES.....	<b>11</b>
<b>TABLEAU I-4:</b> PRINCIPALES DIFFERENCES ENTRE MATRICES TP ET TD .....	<b>13</b>
<b>TABLEAU I-5:</b> CARACTERISTIQUES DES RESINES THERMODURCISSABLES .....	<b>14</b>
<b>TABLEAU I-6:</b> LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE POLYESTERS INSATURES .....	<b>14</b>
<b>TABLEAU I-7:</b> LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS D'EPOXYDES.....	<b>15</b>
<b>TABLEAU I-8:</b> CARACTERISTIQUES DES RESINES THERMOPLASTIQUES .....	<b>16</b>
<b>TABLEAU I-9:</b> COMPARAISON DES MATRICES TD ET TP .....	<b>16</b>
<b>TABLEAU I-10:</b> EXEMPLES DE MATERIAUX COMPOSITES .....	<b>18</b>
<b>TABLEAU II-1:</b> TYPE DE FISSURES ET LEURS CAUSES.....	<b>39</b>
<b>TABLEAU II-2:</b> TENEUR MAXIMALE EN IONS CHLORURE DU BETON .....	<b>41</b>
<b>TABLEAU II-3:</b> MAUVAISES PRATIQUES DE CONSTRUCTION .....	<b>49</b>
<b>TABLEAU IV-1:</b> RESUME CES TYPES D'APPLICATIONS MEF.....	<b>68</b>
<b>TABLEAU IV-2:</b> TYPE D'ELEMENTS STRUCTURAUX UTILISES DANS ANSYS .....	<b>83</b>
<b>TABLEAU V-1:</b> DIMENSION ET PROPRIETES DES MATERIAUX (ROBERTS KTM) .....	<b>89</b>
<b>TABLEAU V-2:</b> PROPRIETES GEOMETRIQUES ET MATERIELLES .....	<b>90</b>
<b>TABLEAU V-3:</b> COMPARAISON DES RESULTATS MAXIMUMS DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT : UDL.....	<b>92</b>
<b>TABLEAU V-4:</b> COMPARAISON DES RESULTATS MAXIMUMS DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT : CHARGE CONCENTREE AU MILIEU .....	<b>92</b>

## Nomenclature :

- a:** La distance entre appui et la plaque de réparation
- A<sub>i</sub>:** La section transversale de la poutre en BA et plaque de réparation
- b:** La distance entre appui et la charge
- b:** La largeur de la plaque de réparation
- b<sub>2</sub>:** La largeur de la plaque de réparation
- E :** Le module d'élasticité
- E<sub>a</sub>:** Le module d'élasticité de l'adhésif
- E<sub>i</sub>:** Le module d'élasticité de la poutre en BA et plaque de réparation
- G<sub>a</sub>:** Le module de cisaillement de la couche adhésive
- G<sub>i</sub>:** les modules de cisaillement transverse de la poutre en BA et plaque de réparation
- I:** le second moment de l'aire et  $\alpha$  le multiplicateur de l'aire de cisaillement effective
- K<sub>1</sub>:** La rigidité de cisaillement de l'adhésive
- L:** la longueur de la poutre
- L<sub>p</sub>:** La longueur de la plaque de réparation
- m<sub>i</sub>:** La déformation de cisaillement des poutre en BA/Plaque de réparation
- M<sub>T</sub>(x) :** Le moment de flexion appliqué total
- N<sub>i</sub>:** La force résultante longitudinale pour la poutre en BA et plaque de réparation
- P:** la charge concentrée
- q:** est la charge uniformément répartie
- t<sub>1</sub>:** L'épaisseur de la poutre BA
- t<sub>2</sub>:** L'épaisseur de la Plaque de réparation
- T<sub>a</sub> :** L'épaisseur de la couche adhésive
- t<sub>a</sub>:** L'épaisseur de la couche adhésive
- u(x,y):** Déplacement horizontaux
- U<sub>i</sub>(x,y) :** Le déplacements longitudinaux dans la partie de la poutre en BA et plaque de réparation induits par les efforts longitudinaux
- V(x):** L'effort tranchant
- v(x,y):** Déplacement verticaux
- W<sub>i</sub>:** Le déplacement transversal en la poutre en BA et plaque de réparation induit par les efforts longitudinaux
- y<sub>1</sub> :** Distances du bas de poutre en BA
- y<sub>2</sub>:** Distances du haut de plaque réparation

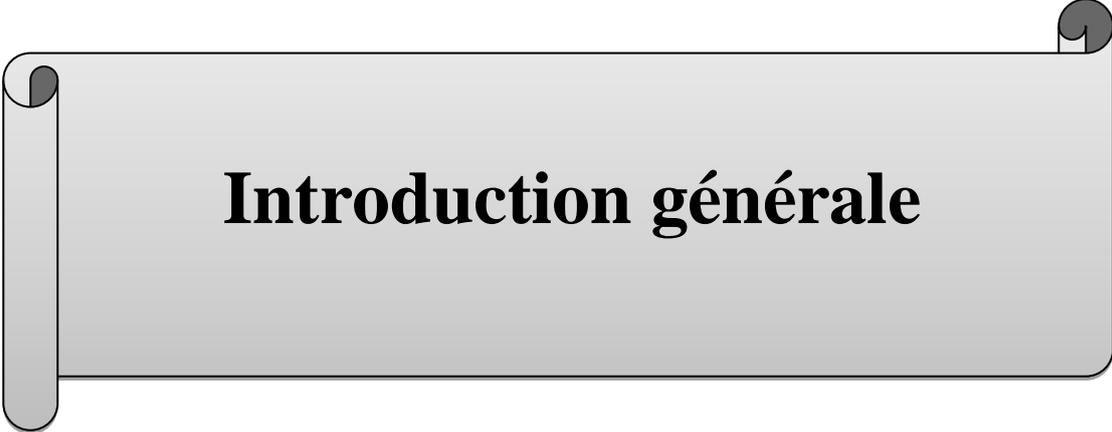
$\varepsilon_1$ : Déformation à la base de poutre en BA

$\varepsilon_2$ : Déformation au sommet de plaque de réparation

$\sigma$ : Contrainte normale l'interface

$\tau$ : La contrainte de cisaillement l'interface

$EI$ : Rigidité à la flexion



# **Introduction générale**

## Introduction générale

### **Introduction générale:**

Un ouvrage de génie civil est dimensionné pour une durée de vie de cent ans en moyenne. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle et aujourd'hui, un ouvrage sur trois nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers.

L'un des problèmes majeurs dans le domaine de la construction est la dégradation des structures. La plupart des structures présentent des signes de faiblesse et ne répondent ou ne répondront plus aux exigences pour lesquelles elles ont été conçues. Les causes sont multiples, on peut citer : des erreurs lors de l'étude ou de l'exécution, un accroissement des charges, un changement de l'exploitation de la structure, la corrosion des armatures, des actions accidentelles telles que les séismes ou les chocs...

Dans le domaine du génie civil, les matériaux composites sont utilisés pour le renforcement et la réhabilitation d'éléments structuraux en béton armé, tels que les poutres, les dalles, les colonnes et les murs.

Depuis une dizaine d'année, une alternative est proposée : il s'agit de renforcer ou de réparer les ouvrages en béton par des matériaux composites à matrice organique collés extérieurement sur des structures dégradées. Les matériaux composites, en particulier à base de fibres de carbone, de part leur rigidité spécifique, présentent un grand intérêt pour la réparation. De plus, malgré leur prix élevé, ils présentent un avantage économique car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures par moulage au contact, procédé appelé aussi polymérisation in-situ ou stratification directe. Ceci permet de réduire considérablement les coûts liés à la manipulation des matériaux ainsi que les problèmes liés aux interruptions des activités des ouvrages réparés.

Ce travail de mémoire a pour objectif d'étudier le renforcement des structures en béton par des plaques composites et l'étude de sa contribution pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques de celles-ci expérimentalement et numériquement.

Au premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les matériaux composites. Une description des différents constituants des matériaux composites ainsi que leurs propriétés mécaniques relatives ont été aussi présenté avec détails. Par la suite, nous avons donné une idée pour les matériaux composites utilisés pour le renforcement des structures en béton armé.

Le deuxième chapitre a été consacré à la présentation de la dégradation des structures en béton armé (fissuration du béton), citer les différentes et les types de dégradations du béton.

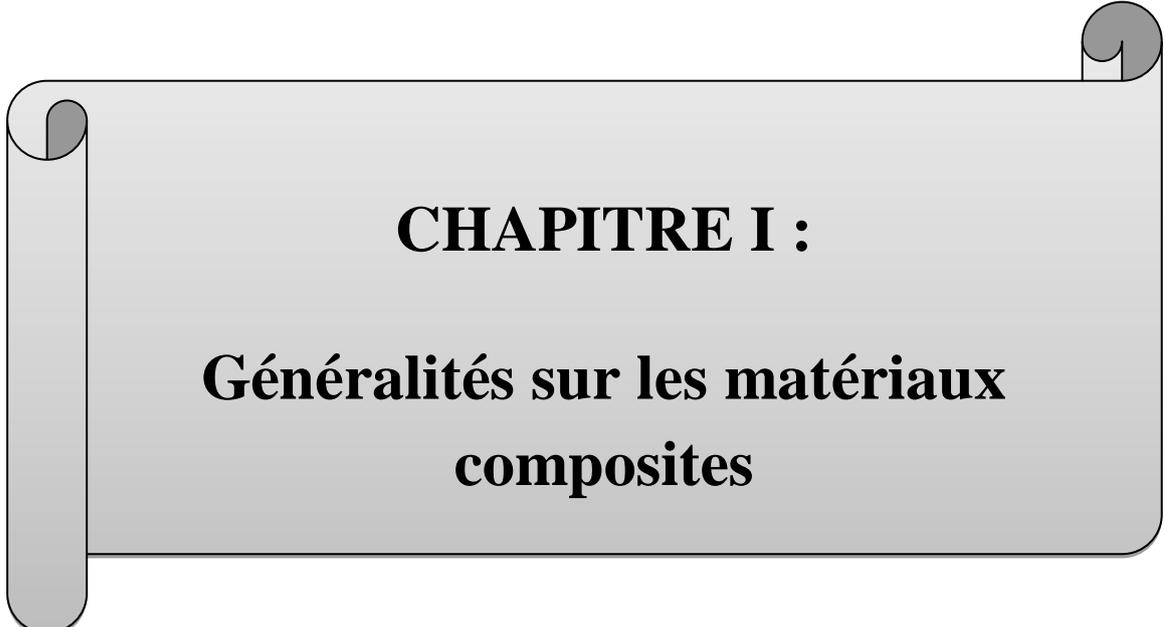
## **Introduction générale**

Dans ce troisième chapitre nous avons procédé à la modélisation analytique de l'interface béton/composite où il y a une exposition des travaux théoriques de deux chercheurs (Tounsi Abdelouahed, 2005) et (S.T. Smith et J.G. Teng, 2001).

Le chapitre suivant, nous avons défini quelques notions sur la méthode des éléments finis, l'importance de cette méthode et l'utilisation vaste dans les logiciels de calcul des structures. En passant par la discrétisation du domaine, le maillage, la définition de l'élément représentant le matériau utilisé dans cette modélisation numérique qui utilise ANSYS WB, la taille de l'élément utilisé, la méthode de calcul etc.

Dans le dernier chapitre, nous avons comparé les résultats analytiques entre eux d'une part, et ceux obtenus par la modélisation numérique à partir du logiciel Ansys Workbench avec les résultats de références fournis par (Tounsi Abdelouahed, 2005) et (S.T. Smith et J.G. Teng, 2001), par la suite, une étude paramétrique a été faite pour voir l'effet des différents paramètres de la plaque de réparation.

Finalement, nous avons clôturé notre mémoire par une conclusion générale qui regroupe les principaux résultats.



**CHAPITRE I :**  
**Généralités sur les matériaux  
composites**

**I -1 : Introduction :**

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. L'amatrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. (Généralités sur les matériaux composites)

**I -2 : Définition :**

Le matériau composite par définition, est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité, se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie.

**I-2-1 : Avantages :**

L'utilisation des matériaux composites apporte de nombreux avantages en termes de propriétés des matériaux. En effet, le but de leur fabrication est de profiter des bonnes propriétés de chaque constituant afin d'en former un qui sera mieux adapté à certaines applications.

Voici un bref résumé des avantages et des inconvénients liés à l'utilisation des composites comme matériaux de construction :

- Rapport résistance- poids très élevé.
- Très grande rigidité.
- Résistance à la fatigue acceptable.
- Résistance à la corrosion.
- Facilité de mise en place.
- Possibilité d'optimisation (choix de renforcement, direction).
- Multifonctionnalité (résistance mécanique, résistance à l'eau et à la corrosion, etc.).

**I-2-2 : 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 -Manque de ductilité.
  - Absence de normes de design. (Paradis, 2004) (Lomothe, 1999) (Paradis, 2004)

**I -3 : Différents types de matériaux composites :**

- Les composites de **grande diffusion (GD)**, peu coûteux, occupent une large part de marché,
- Les composites **hautes performances (HP)**, assez onéreux, avec un marché encore réduit. (jaquinet, 1991)

**Les matériaux composites structuraux sont principalement constitués de deux phases :**

○ **Le renfort:** son rôle est d'assurer la fonction mécanique. Il se présente généralement sous la forme de fibres dont l'orientation au sein du composite dépend de la sollicitation mécanique qu'elle doit supporter.

○ **La matrice:** son but est de réaliser la liaison entre les renforts, leurs protections vis-à-vis des agents agressifs et la prévention contre une rupture catastrophique. (OUZAA.KH, 2004)

**I -4 : Classification des matériaux composites :**

Le classement des matériaux composites est fait suivant la forme et la nature des constituants.

**I -4-1 : Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants :**

**I -4-1-1: composite à particules :** le renfort se trouve sous forme de particules.

**I -4-1-2 : composites à fibres :** le renfort se trouve sous forme de fibres, qui à leurs tour se divisent en :

**Composites à fibres longues :** Représentés par un ensemble de fibres continues alignées et immergées dans une matrice qui assure leur cohésion.

**Composites à fibres courtes :** Le renfort se trouve sous forme de fibres discontinues disposées de façon aléatoire non orientée.

**Composites à renfort tissu :** Un tissu est constitué de fils tissés dans deux directions perpendiculaires, qui sont la direction de chaîne (associée à la direction longitudinale de la couche composite) et la direction de trame (associée à la direction transversale de la couche composite). Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés et par le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame.

**I -4-2 : Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants :**

En se référant à la matrice, on trouve des matériaux composites à :

- Matrice organique.
- Matrice métallique.
- Matrice de carbone.
- Matrice céramique. (Berthelot J. M., 2005)

**I -5 : Constituants des matériaux composites :**

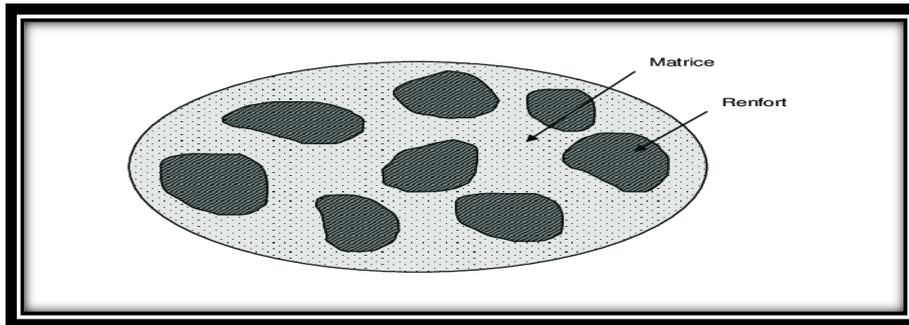


Figure I-1: Schéma illustratif d'un matériau composite

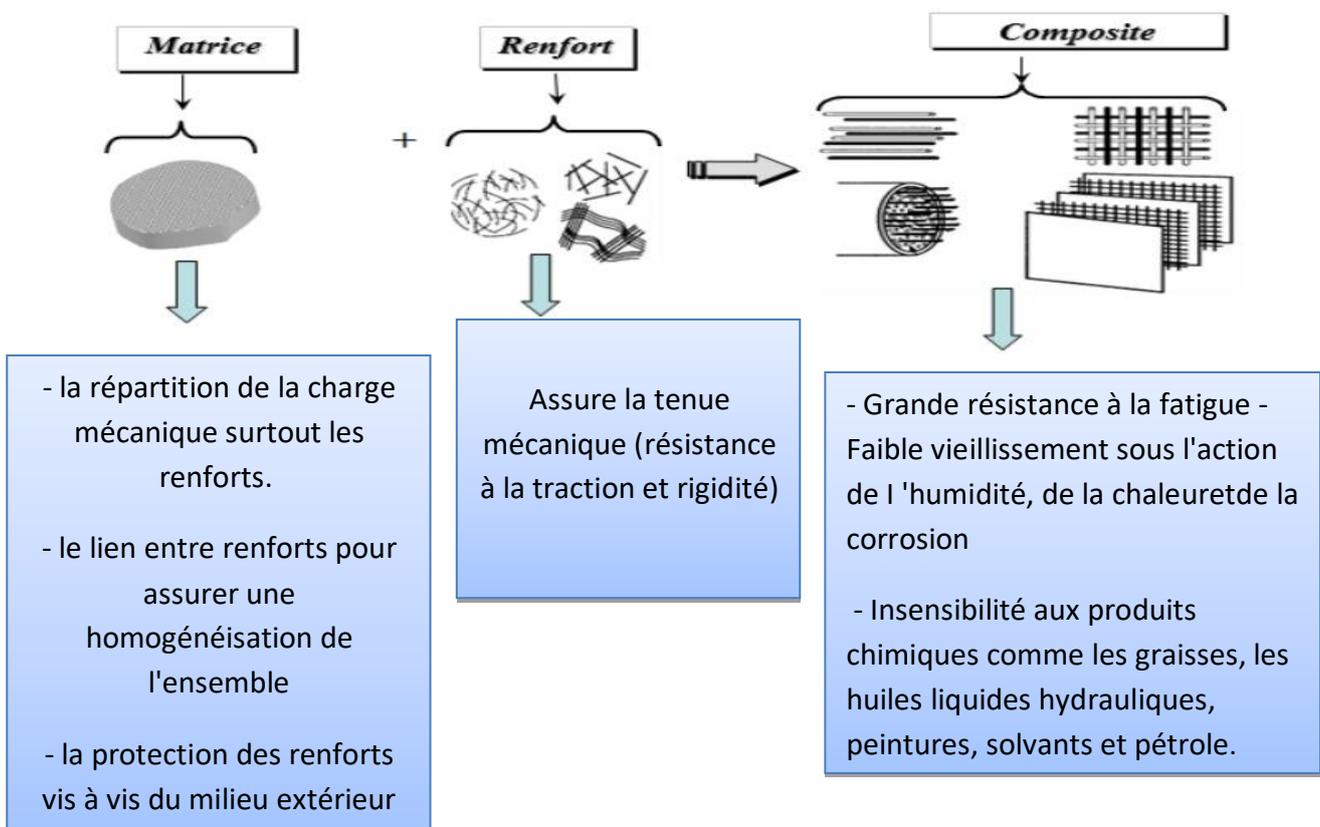


Figure I-2: Différents constituants d'un matériau composite (Berthelot J. , 2005)

**I -5-1 : Le renfort:****I -5-1-1 : Définition et classement de renfort :**

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamenteuse (des fibres organiques ou inorganiques).(Youcef, 2004)

Les renforts peuvent être classés selon :

**Leur composition** : métal, verre, polymère, etc. ;

**Leur forme** :

**Fibres** : courtes (0,1 - 1 mm), longues (1 - 50 mm) ou continues (> 50 mm).

**Charges renforçantes** : gravier (additionné au ciment pour fabriquer le béton), sable, billes de verre, etc.

**Leur disposition** : mat (nappe de fibres en vrac non tissées) ou tissé.

Les principales fibres utilisées pour la fabrication des armatures en PRF sont les fibres de verre, de carbone, d'aramide, ou encore de basalte. Avec des diamètres de l'ordre de la dizaine de  $\mu\text{m}$ , leur structure moléculaire est orientée dans le sens longitudinal et présente généralement moins de défauts microstructuraux que le matériau massif, ce qui leur confère de bonnes performances mécaniques. Au cours du processus de fabrication, la fibre reçoit généralement un traitement de surface (dépôt d'ensimage, oxydation,...) afin d'améliorer les caractéristiques générales du renfort et d'optimiser la compatibilité et l'adhérence ultérieure avec la matrice polymère. Nous présentons par la suite les principales fibres permettant de fabriquer les armatures en PRF utilisées en génie civil. (BERTHELOT, 2002)

**I -5-1-2 : Différentes natures de renfort:**

Les renforts peuvent être de natures différentes, comme illustré sur (**Figure I-3**) qui récapitule les diverses origines des matériaux constituant les renforts.

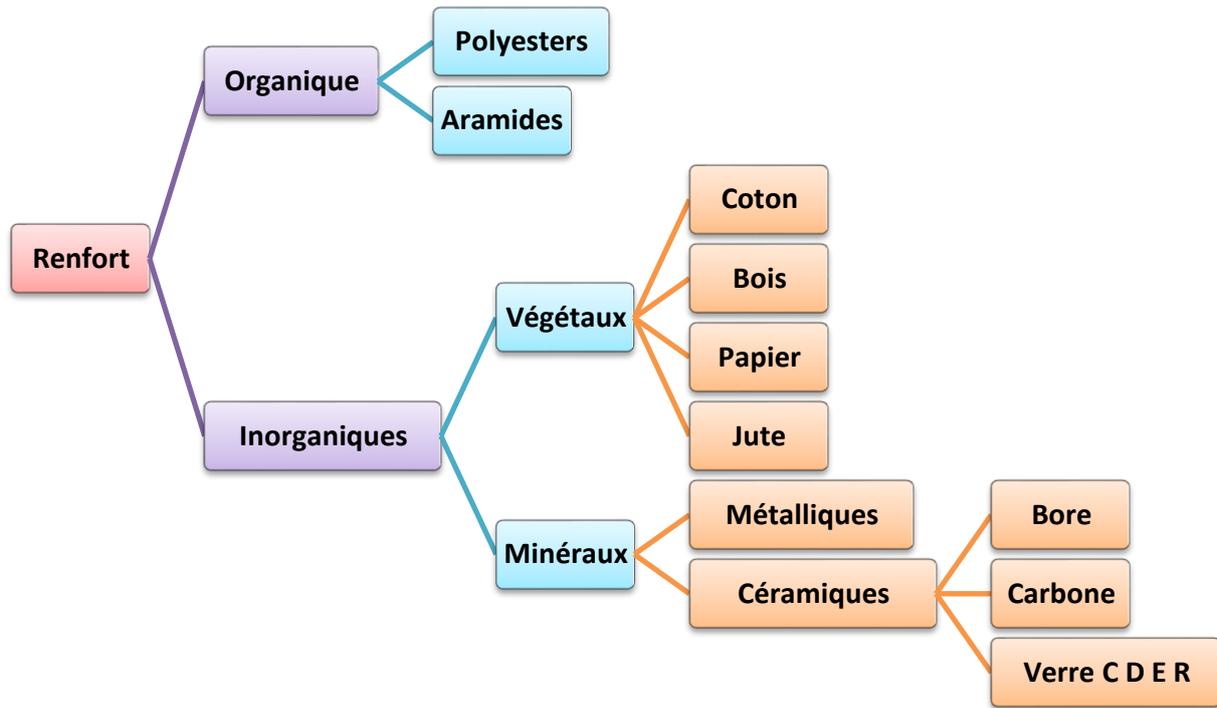


Figure I-2: Différentes familles du renfort (Berthelot J. M., 2005)

La forme la plus utilisée pour les renforts est la forme fibreuse dont les fibres de verre et de Carbone, grâce à leurs propriétés, ont connues une très grande exploitation dans l'industrie.

#### ➤ I -5-1-2-a : Fibres de carbone :

Suivant les conditions de fabrication, il existe toute une variété de fibres de carbone que l'on peut actuellement classer selon trois types:

- Les fibres à haute résistance **HR**.
- Les fibres à module intermédiaire **IM**.
- Les fibres à haut module **HM**.

Utilisées pour des applications structurelles visant à obtenir une plus grande légèreté et une meilleure rigidité qu'avec la fibre de verre. Elles sont obtenues par la pyrolyse d'un précurseur organique ou non sous atmosphère contrôlée. Le prix de ces fibres reste relativement élevé mais il n'a cessé de diminuer avec l'augmentation des volumes de production. On les retrouve dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, le spatial ainsi que les sports et loisirs de compétitions.

Leur production repose sur la maîtrise de la production des fibres

acryliques, précurseurs traditionnels des fibres de carbone, de formule générique  $(\text{CH}_2\text{-CHCN})_n\text{-}(\text{CH}_2\text{-CXY})_n'$  (acrylonitrile + comonomère) par la voie classique du solvant, dite PAN. On opère par carbonisation de la fibre de poly acrylonitrile (PAN) sous atmosphère neutre d'azote dans des fours à pyrolyse de façon à ne conserver que la chaîne carbonée. (Chatain, 2001)

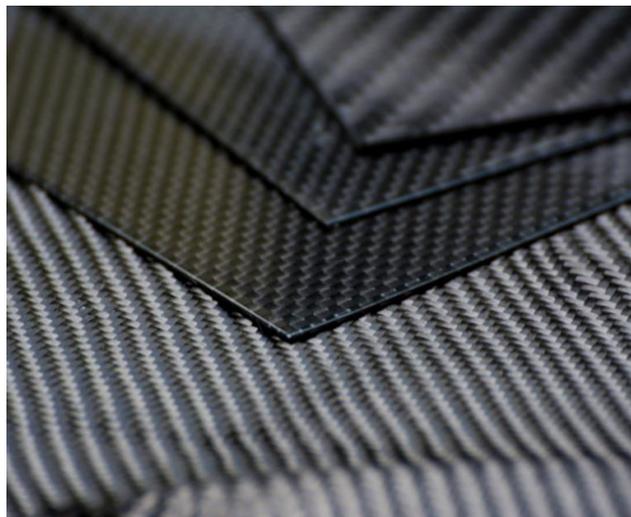
Ses caractérisés de type fibre carbone dans ce tableau :

Caractéristique	Carbone HM	Carbone HR
Masse volumique (Kg/m <sup>2</sup> )	1800	1750
Module d'Young E <sub>f</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	390 000	230 000
Contrainte à la rupture (N/mm <sup>2</sup> )	2 500	3 200
Allongement à la rupture (0%)	0.6	1.3

**Tableau I-1:** Caractéristique mécaniques des fibres de carbone

Globalement, les fibres de carbone sont caractérisées par leur faible densité, une rigidité bien plus élevée que celle des fibres de verre, une résistance élevée à la traction, une bonne tenue en température (à plus de 2500 °C en milieu inerte), une bonne conductivité électrique et thermique, un faible coefficient de dilatation thermique, et une inertie chimique notamment vis-à-vis de l'humidité et des bases (en milieu non oxydant). Les principales propriétés physiques et mécaniques des fibres HR et HM sont répertoriées dans le Tableau I-1. En raison de leur orientation et de la structure carbonée sous forme de feuillets, ces fibres présentent une forte anisotropie, avec des propriétés très différentes dans les directions longitudinales et transverses.

La surface des fibres de carbone étant chimiquement peu réactive, elles présentent naturellement une faible compatibilité avec les résines thermodurcissables usuelles. (MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)



**Figure I-3:** Fibre en carbone

➤ **I -5-1-2-b : Fibres de verre:**

Qui sont utilisées dans le bâtiment, le nautisme et diverses applications structurelles peu chargées. Le coût de production de ces fibres est peu élevé ce qui en fait l'une des fibres les plus utilisées à l'heure actuelle.

Fibre de verre elles sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1.250°C à travers une filière en platine-rhodium ; après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues. Suivant les applications auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en **trois qualités** :

**Fibres E** pour les composites grandes diffusions (GD).

**Fibres D** pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés).

**Fibres R** pour les composites hautes performances (HP).

L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par un vieillissement accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de T° élevées. (Mémoire de Magister, 2005)

Caractéristique	Verre type E	Verre type R
Masse volumique (Kg/m <sup>2</sup> )	2600	2550
Module d'Young E <sub>f</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	74000	86000
Contrainte à la rupture (N/mm <sup>2</sup> )	2500	3200
Allongement à la rupture (0%)	3.5	4

**Tableau I-2** :Caractéristiques mécaniques des fibres de verre

(MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)



**Figure I-4** : Fibre en verre

➤ I-5-1-2-c : Fibres d'aramide:( Ou Kevlar qui est une dénomination commerciale)

Utilisées dans les protections balistiques comme les gilets pare-balles ainsi que dans les réservoirs souples.

Elles sont issues de la chimie organique des polyamides aromatiques (ou poly aramide) par synthèse chimique à basse température; ses propriétés diffèrent des polyamides aliphatiques classiques. Les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (Jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) mais souffrent :

D'une adhérence moyenne entre matrice et fibre

D'un prix encore trop élevé. (Mémoire de Magister, 2005)

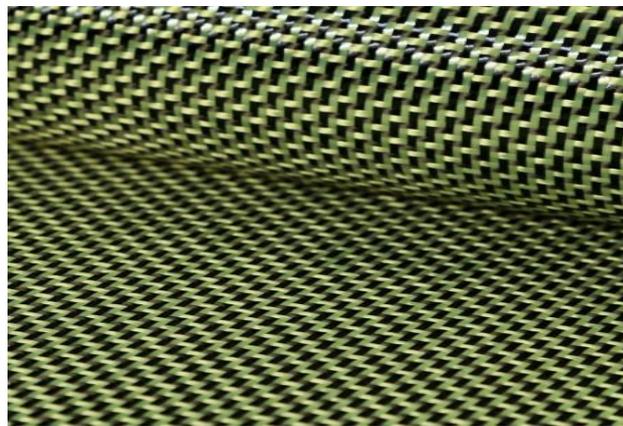


Figure I-5: Fibre d'aramide

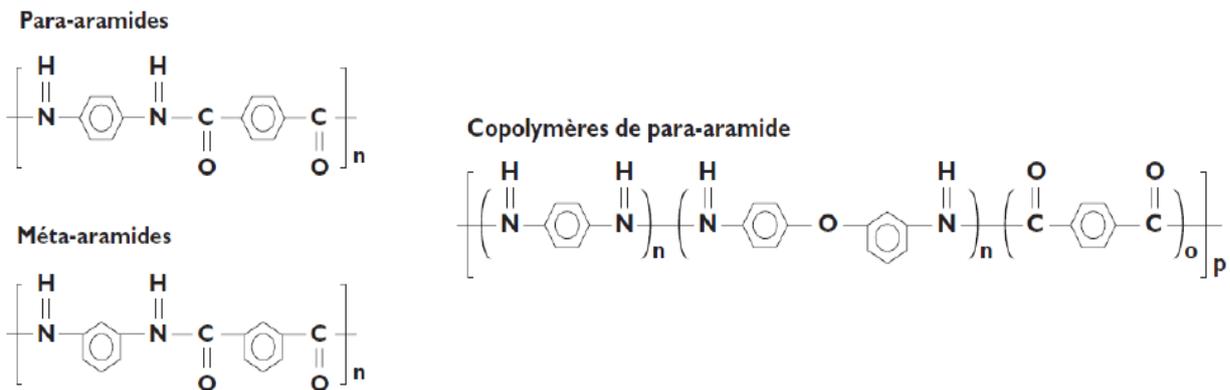


Figure I-6: Différents types de fibres d'aramide

En ce qui concerne les **para-aramides** et **copolymères**, le procédé de fabrication de base conduit à l'obtention de fibres à bas. Une étape supplémentaire d'étirage à chaud permet d'orienter fortement la structure cristalline et d'obtenir des fibres à haut module. Ce sont essentiellement ces fibres haut-module qui sont utilisées pour le renforcement de matériaux composites, les autres étant plutôt destinées à des applications textiles, câble ou pour la protection balistique.

Les principales propriétés des fibres para-aramides de haut module. Ces fibres sont caractérisées par une faible densité, une bonne résistance en traction, une rigidité intermédiaire à celle des fibres de verre et de carbone, une résistance en température jusqu'à 300 °C, un comportement auto-extinguible, et des coefficients de dilatation thermique très différents dans les sens longitudinal et transversal.

Leurs principaux inconvénients résident dans leur sensibilité au rayonnement UV, leur reprise d'humidité importante (pouvant atteindre 3 % en masse dans les conditions standard), leurs performances médiocre en compression, et une difficulté pour la découpe et l'usinage. En outre, ces fibres aramides, particulièrement résistantes à l'abrasion, peuvent présenter de mauvaises propriétés d'adhérence avec certaines matrices polymères malgré l'utilisation d'ensimages. (MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)

➤ **I -5-1-2-d : Fibres de naturelles :**

Elles pourront constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur plus grande facilité de recyclage lorsque leurs propriétés physiques seront mieux appréhendées. Actuellement, elles présentent plusieurs verrous techniques majeurs pour une utilisation massive dans les matériaux composites. (Mémoire de Magister, 2005)

## I -5-1-3 : Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base :

fibre	densité	$\sigma_r$ (MPa ) en traction	Allongement à la rupture en %	EL (MPa) Longitudinal	Diamètre du filament élémentaire $\mu\text{m}$
Verre E	2.54	3400	4.8	73000	3-30
Verre R	2.48	4400	5.4	86000	3-30
Aramide BM	1.45	3100	2	70000	12
Aramide HM	1.45	3100	1	130000	12
Kevlar	-	2900	2.3	130000	1.45
Aluminium	-	1380	0.7	380000	3.9
Carbone HT	1.78	2800	0.5	200000	8
Carbone HM	1.80	2200	-	400000	8
Bore	2.63	3500	0.8	400000	100-200

Tableau I-3: Propriétés mécaniques des fibres

(Luyckx, 1999)(Phalippou, 2001)(Guillon, 1995)

**I -5-2 : La matrice:**

**I -5-2-1 : Définition et rôle de la matrice:**

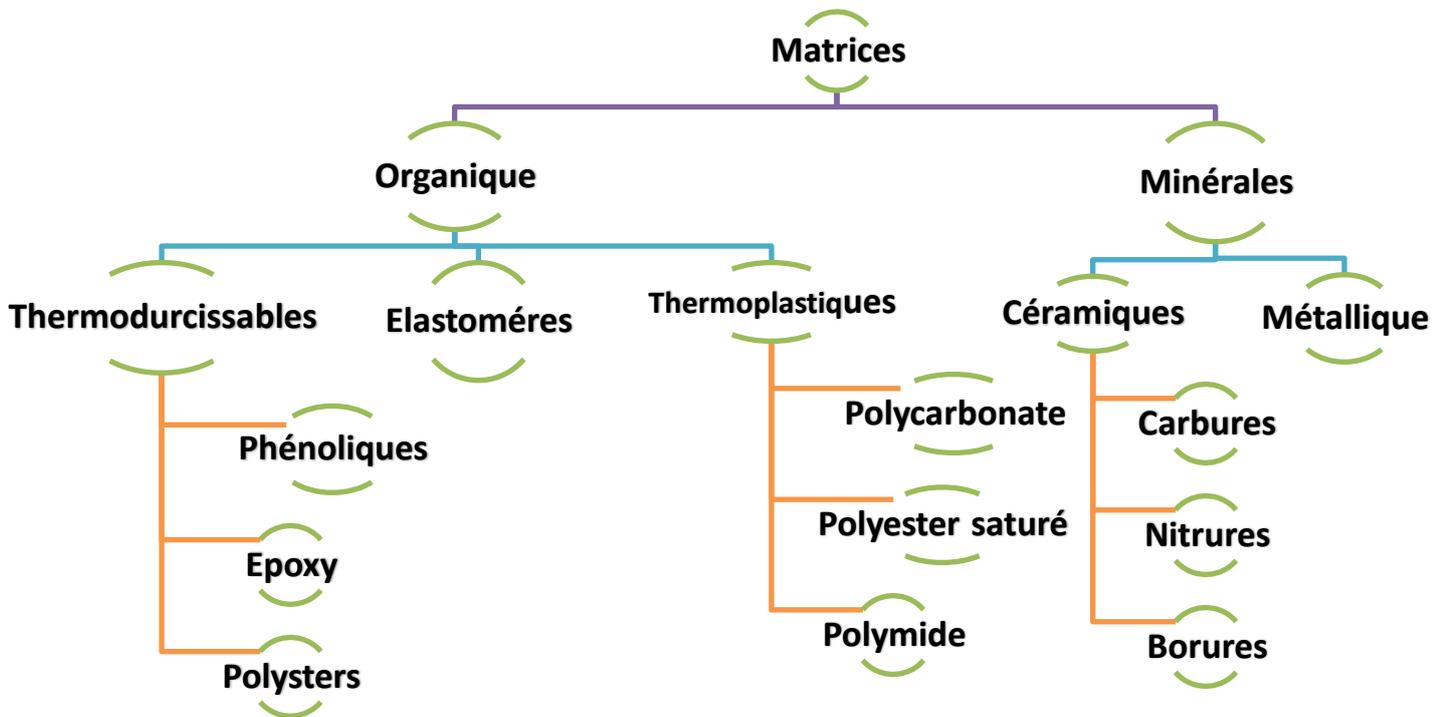
La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres. (Généralité sur les matériaux composites)

**La matrice a pour rôle de :**

- lier les fibres de renforts.
- répartir les contraintes.
- apporter la tenue chimique de la structure.
- donner la forme désirée au produit final. (Mémoire de Magister, 2005)

**I -5-2-2 : Différentes natures de la matrice :**

Sur **Figure I-9** nous résumons l'essentiel de ces matrices:



**Figure I-8:** Différentes familles de matrice

(Généralité sur les matériaux composites)

Les deux types de résines qui sont, actuellement, utilisées présentent des propriétés foncièrement différentes :

**Les résines thermodurcissables (TD)** qui sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se pont (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée.

**L'emploi des polymères thermoplastiques (TP)**, renforcés avec des fibres courtes (et, prochainement, avec des fibres longues) se développe fortement. Les **polymères thermoplastiques** ont une structure linéaire ; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent). (Daniel Gay, 2009)

<b>Matrices</b>	<b>TD</b>	<b>TP</b>
<b>Etat de base</b>	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
<b>Stockage</b>	Réduit	Illimité
<b>Mouillabilité des renforts</b>	Aisée	Difficile
<b>Moulage</b>	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
<b>Cycle</b>	Long (polymérisation)	Court
<b>Tenue au choc</b>	Limitée	Assez bonne
<b>Tenue thermique</b>	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
<b>Chutes et déchets</b>	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
<b>Conditions de travail</b>	Emanations de solvants	Propreté

**Tableau I-4:** Principales différences entre matrices TP et TD

### **I -5-2-3 : Les résines:**

Les résines sont des polymères modifiés par différents additifs et adjuvants. Les résines sont livrées sous formes de solutions, sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules pré polymérisées. Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes de pré polymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle. (MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)

#### **➤ I -5-2-3-1 : Résines thermodurcissables (TD) :**

Les résines thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. En effet après polymérisation par apport de chaleur, ces résines développent une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport très important d'énergie d'où leur propriétés mécaniques et thermomécaniques très élevées par rapport aux résines thermoplastiques. (Mémoire de Magister, 2005)

Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau **I-5**

Résines	Tf (°C)	P (kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_{r t}$ (%)	$\sigma_{r t}$ (MPa)	$\sigma_{r c}$ (MPa)	E (GPa)
<b>Polyesters</b>	65 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2.8 à 3.6
<b>Phénoliques</b>	120	1200	2.5	40	250	3 à 5
<b>Epoxydes</b>	290	1100 à 1500	2 à 2.5	60 à 80	250	3 à 5

**Tableau I-5:** Caractéristiques des résines thermodurcissables

(MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)

**I -5-2-3-1-1 : Les principales résines thermodurcissables:**

Utilisées dans la composition des matériaux composites sont :

**a) : Les polyesters insaturés:** ce sont les résines les plus utilisées dans les applications GD.

Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker.

C'est la résine la plus utilisée dans les composites de grande application. Elles passent successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état solide infusible. La réaction du durcissement dépend de la réactivité de la résine, et de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.).

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classés en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en oeuvre des matériaux composites sont de type rigide.

**Les avantages et les inconvénients de Polyesters insaturés :**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une bonne stabilité dimensionnelle.</li> <li>- Une facilité de mise en oeuvre.</li> <li>- Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevée.</li> <li>- Une bonne résistante chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.).</li> <li>- Une bonne tenue chimique.</li> <li>- Un faible coût de production.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inflammabilité.</li> <li>- Une mauvaise tenue à la vapeur.</li> <li>- Emission d'éléments polluants</li> <li>- Une dégradation à la lumière par des rayons ultraviolets.</li> </ul>

**Tableau I-6:** Les avantages et les inconvénients de Polyesters insaturés

**b) : Les résines époxy (ou époxydes):** Constituent la résine type des composites HP.

Ce sont les plus utilisés après les résines polyesters insaturées, du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, ces résines époxydes sont généralement utilisés sans charges ou additifs, ce sont des matrices de composites à haute performance (la construction aérospatial, missiles, etc....).

Toutefois pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuisons très longues, correspondants à des températures relativement élevées de l'ordre de 100°C.

**Les avantages et les inconvénients d'Epoxydes :**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une bonne propriété mécanique (en traction, flexion, compression, choc, et fluage, etc.), supérieure à celles des polyesters.</li> <li>- Une bonne tenue thermique, chimique et à la fatigue.</li> <li>- Une adhérence parfaite sur les fibres.</li> <li>- Une mise en oeuvre facile, sans apport de solvant.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé.</li> <li>- Temps de polymérisation long.</li> <li>- Vieillessement sous température.</li> <li>- Sensibilité à l'humidité et aux rayons ultra -violet.</li> <li>- Nécessite de prendre des précautions lors de la mise en oeuvre.</li> </ul>

**Tableau I-7:** Les avantages et les inconvénients d'Epoxydes

**c) : Les vinylesters:** Ce sont des variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique.

Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles.

**d) : Les résines phénoliques :** Sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en oeuvre.

**e) : Les polyuréthannes :** Ont une faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule. (MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)

➤ **I -5-2-3-2 : Résines thermoplastiques (TP) :**

Les thermoplastiques (TP) présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle.

Les résines thermoplastiques possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement successifs, elles peuvent donc être récupérées et facilement recyclées.

La structure de ces résines à la forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour mettre en forme (les chaînes se plient) et les refroidir pour les fixer.

Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont :

**Les polyamides (PA) :** une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.

**Les poly téréphtalates éthylénique (PET) et butylique (PBT) :** bonne rigidité.

**Le polycarbonate (PC):** une bonne tenue au choc.

**Les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE):** une résistance à l'hydrolyse.

**Les polyoxyméthylène (POM):** une bonne tenue à la fatigue.

**Le polypropylène (PP):** est un polymère semi-technique, peu onéreux, assez stable en température, mais combustible.

D'autres résines TP commencent à être utilisées pour leurs propriétés de thermo-stabilité (tenue thermique supérieure à 200°C) et de bonne tenue mécanique :

- Les polyamide-imide (PAI).
- Le polyéther-imide (PEI).
- Le polyéther-sulfone (PES).
- Le polyéther-éther-cétone (PEEK).

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau I.8

Résines	Tf (°C)	P (kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_r t$ (%)	$\sigma_r t$ (MPa)	$\sigma_r c$ (MPa)	E (GPa)
<b>Polyamide</b>	65 à 100	1140		60 à 85		1.2 à 2.5
<b>Polypropylène</b>	900	1200		20 à 35		1.1 à 1.4

**Tableau I-8:** Caractéristiques des résines thermoplastiques

(MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)

**I -5-2-4:Principales propriétés des matrices Thermodurcissables et Thermoplastiques:**

TD (thermodurcissables)	TP (thermoplastiques)	Matrices
Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi	Etat de base
Réduit	Illimité	Stockage
Aisée	Difficile	Mouillabilité des Renforts
Chauffage continue	Chauffage + refroidissement	Moulage
Long (polymérisation)	Court	Cycle
Limitée	Asses bonne	Tenue au choc
Meilleure	Réduite	Tenue thermique
Perdus ou utilisés en charges	Recyclables	Chutes et déchets
Emanations de solvants	Propreté	Conditions de travail

**Tableau I-9:** Comparaison des matrices TD et TP

(«Glossaire des matériaux composites», 2006)

**I -5-3 : Les charges et les additifs :****I -5-3-1 : Les charges :**

L'objet de la charge renforçant est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines. En générales ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre).

**Les principales charges utilisées sont :**

- Microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc.
- Des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc. ...)
- Des particules de carbone (noir de carbone)

**I -5-3-2 : Les additifs :**

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés.

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage.
- pigments et colorants.
- agents anti-retraits.
- agents anti-ultraviolets.
- accélérateur.
- Catalyseur. (Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot, 2000)

**I -5-4 : L'interface :**

En plus de ces fibres et la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine. Des produits chimiques entre aussi dans la composition du composite, l'interphase etc... qui peut jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. (Généralités sur les matériaux composites)

**I -6 : Types de composites pour le renforcement :**

Dans un sens plus restrictif, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort et une matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison.

Le renfort assure la résistance et la rigidité du matériau, la matrice maintient les éléments de renfort dans leurs dispositions, assure le transfert des charges au renfort et donne au matériau sa forme désirée.

Le renfort peut être sous forme de fibres ou de particules, on ne traitera dans ce travail que ce qui concerne les matériaux à base de fibres.

Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice. (MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)

**Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau I.10**

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
<b>1/Composites matrice organique</b> - papier - carton	-Résine/fibre cellulosique -Résine /copeaux -Résine / tissus -Elastomère	-Imprimerie -bâtiment -toitures -Automobile
<b>2/composites à matrice minérale</b> -bidon -Composite -carbone	Ciment /sable /granulats Carbone / fibres	-Génie civil -aviation -espace
<b>3/Composites à matrice métallique</b>	Aluminium /fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	-aérospatial

**Tableau I-10:Exemples de matériaux composites**

**I -7 : Techniques de fabrication des composites :**

La mise en œuvre des matériaux composites généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir:

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système :
  - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables.
  - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

La possibilité d'utiliser plusieurs procédés de fabrication ainsi que divers matériaux fait que les FRP sont des produits polyvalents et faciles à produire. On présente dans cette section un survol des différentes méthodes de fabrication;

**Les procédés les plus importants sont:**

- pultrusion
- Moulage par contact
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC
- Compression thermodurcissable SMC
- Enroulement filamentaire (ou bobinage) (Généralités sur les matériaux composites)

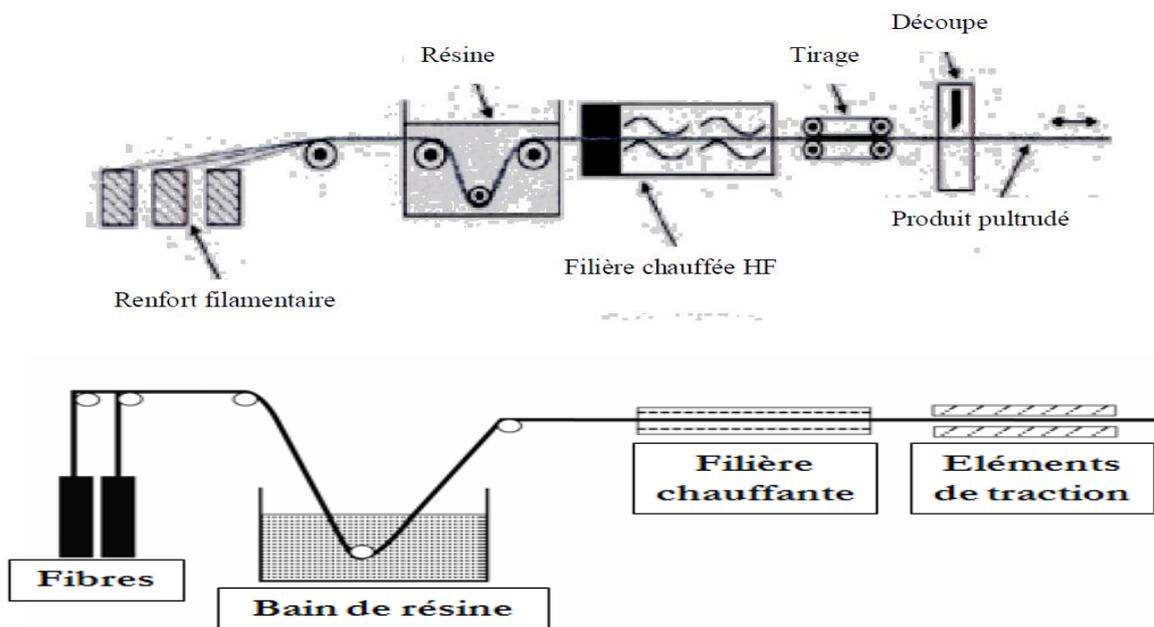
**I -7-1 : Pultrusion:**

Les principales applications des matériaux composites réalisés par la pultrusion concernent des profilés destinés à :

- La construction électrique : isolant électriques.
- La **construction civile et industrielle** : plates-formes de ponts, signalisation, échelles ;
- Les **sports et loisirs** : cannes, clubs, perches.

En particulier dans les domaines suivants:

- la construction civile (poutres pultrudées), pour le renforcement de structures existantes.
- la construction industrielle (plates-formes).
- l'automobile (sols isolants de camions).



**Figure I-7:** Schéma de principe du procédé de pultrusion

(MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)

**I -7-2 : Moulage manuel :****I -7-2-1: Moulage au contact:**

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable.

Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible.

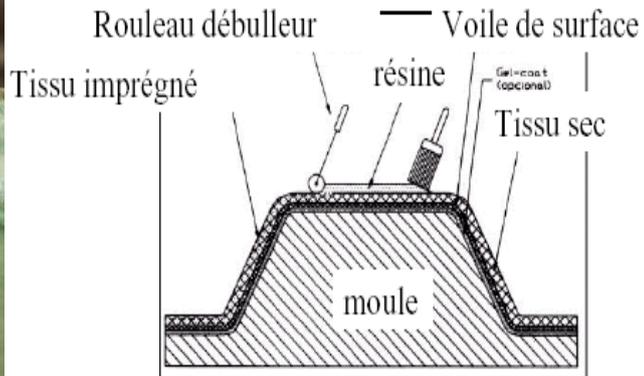
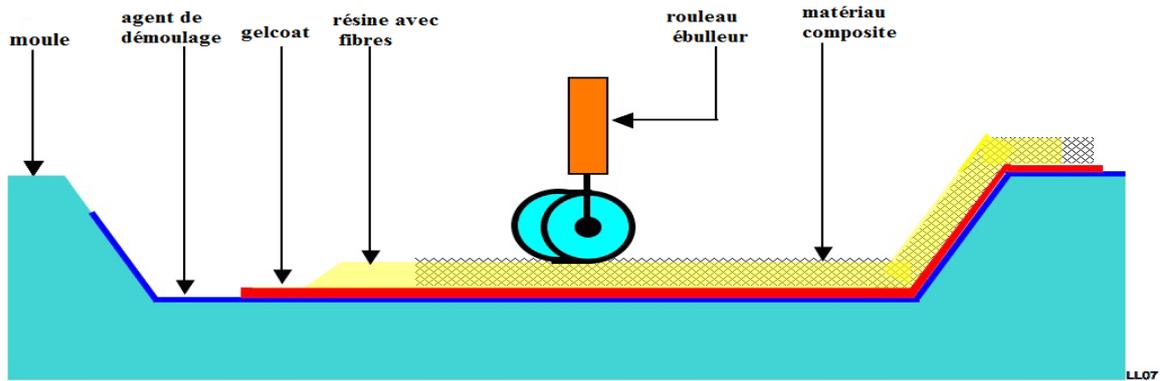


Figure I-8: Moulage par contact

**Matières premières:**

- **Renforts** : mats, tissus de fibre de verre, de carbone ou d'aramide (taux de renfort volumique allant jusqu'à 35 % dans le cas du verre).
  - **Résines** : polyesters, époxy, phénoliques, vinylites.
  - **Divers** : catalyseur, accélérateur, charges, pigments, agent de démoulage, acétone.
- (Maurice Reyne, 1990)

**I -7-2-2: Moulage par projection simultanée:**

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifile et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et ébullée au rouleau cannelé.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient.

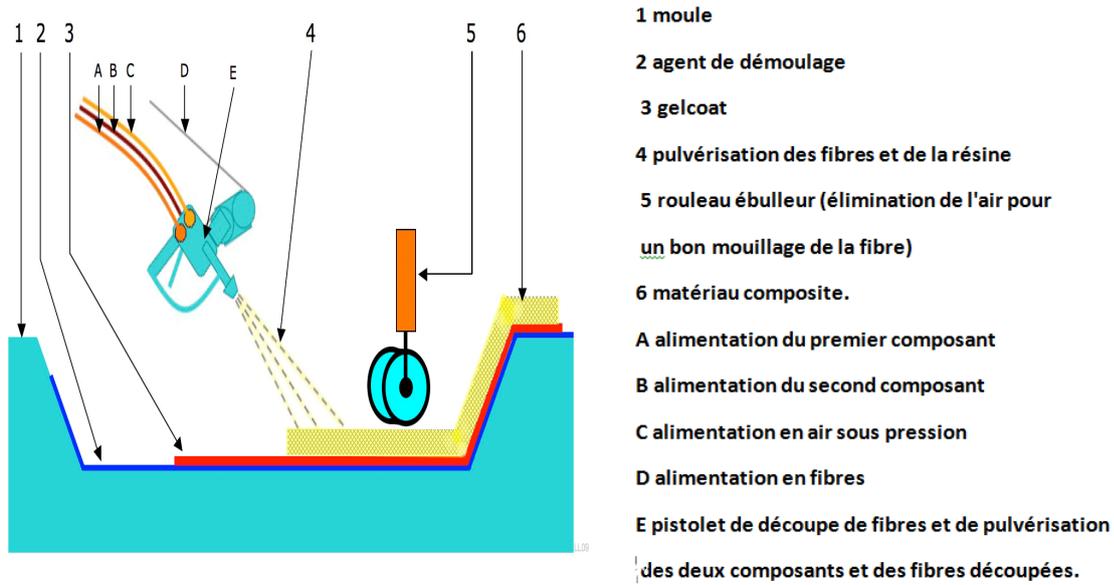


Figure I-9: Projection simultanée

**Matières premières**

- **Renfort** : fibre de verre sous forme de roving assemblés, taux de renfort de 25 à 35 % en volume.
- **Résines** : principalement polyesters mais aussi phénoliques ou hybrides
- **Divers** : catalyseurs, accélérateur, pigments, charges, agent de démoulage, solvant (Maurice Reyne, 1990)

**I -7-2-3: Enroulement filamentaire (ou bobinage):**

Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant.

Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses.

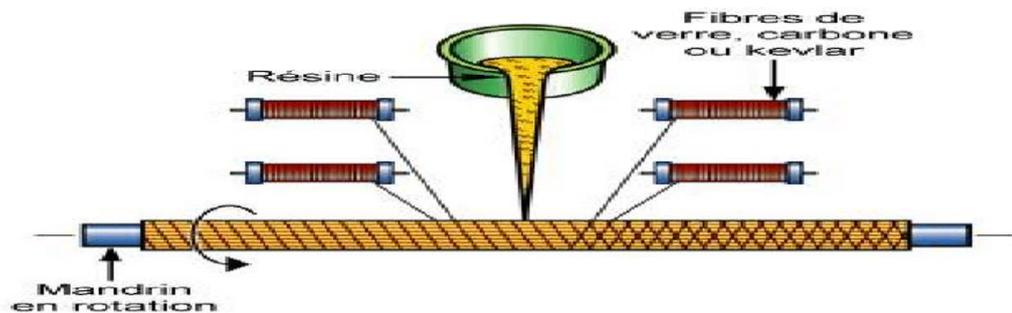


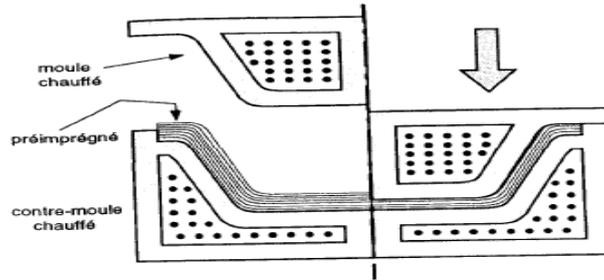
Figure I-10: Enroulement filamentaire (ou bobinage)

**I -7-2-3-a: Injection thermodurcissable BMC:** (Bulk Molding Compound).

Le moulage du compound est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 à 170°C sous une pression de 50 à 100 bars.

**Les avantages :** réalisation de grandes séries, peu de finition.

**Le compound :** c'est de la résine, du fibre coupé et de la charge



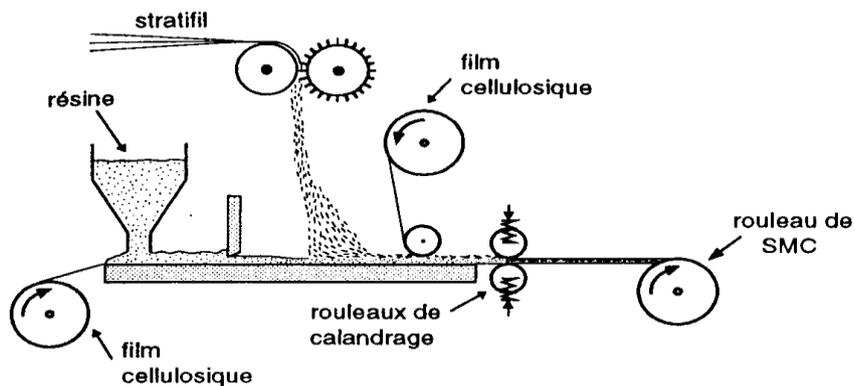
**Figure I-11:** Injection thermodurcissable BMC

(Jean Marie Berthelot, 2010)

**I -7-2-3-b: Compression thermodurcissable SMC:** (Sheet Molding Compound)

Le principe consiste à déposer des feuilles de préimprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce.

Les avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition. (Jean Marie Berthelot, 2010)



**Figure I-12:** Compression thermodurcissable SMC

**I -8 : Mise ouvre :**

Le TFC peut être appliqué sur tous les matériaux de constructions usuels : béton armé ou précontraint, charpente métallique, bois maçonnerie. Cependant, afin d'éviter une délamination prématurée, il convient de s'assurer de la résistance mécanique du support: le béton, par exemple, doit présenter une résistance à la compression au moins égale à 20 MPa. La surface de support doit être convenablement nettoyée, dégraissée, et débarrassée de toute particule non adhérente ou susceptible d'amoinrir la résistance du collage; c'est le cas pour la rouille de l'acier, pour la laitance du béton, qu'il convient d'éliminer par sablage. Une première couche de résine est appliquée à la brosse ou au rouleau à raison de 700 gr/m<sup>2</sup> environ. Puis le tissu est appliqué sur le support et marouflé au rouleau de façon à obtenir par imprégnation un contact intime entre les fibres du tissu et la résine, qui doit ressuer sur toute la surface du renfort. La pose est effectuée par application d'un tissu sec sur une couche de résine humide. Ce procédé permet d'éviter la formation de poches d'air occlus dans le plan de collage car l'air s'échappe à travers les mailles du tissu. Après le marouflage, une couche de fermeture de la même résine est appliquée à la spatule sur le tissu à raison de 700 gr/m<sup>2</sup> environ. Pour certaines finitions et en particulier dans le cas où l'isolation thermique est demandée, il est possible de projeter sur la résine encore humide un sable fin ou autre matériau susceptible de créer un interface support du revêtement final. (Lacroix R, 1999)

Dans le cas de renfort en lamelle de fibre de carbone, en général on applique l'adhésif époxy en couche de 1mm sur la surface déjà préparée ainsi que sur la face supérieure des lamelles, préalablement traitées en usine pour avoir la rugosité adéquate, et qui doivent également être propres. Dans le délai du temps d'application de la résine époxy, les lamelles seront posées à l'aide d'un rouleau pour exercer une pression. L'excédent de résine doit être nettoyé. Il est recommandé d'ancrer les lamelles dans un béton sain et de disposer de la longueur nécessaire.

**I -8-1 : Préparation de la surface du béton:**

La surface du béton doit être bien préparée afin d'éviter la rupture à l'interface résine béton par suivre un procédé adéquat. Une bonne préparation extérieure du béton exige une importante maintenance, est que les surfaces de béton irrégulier sont réglés. (Meier, 1995)

**Préparation du support :**

- Décapage
- Elle consiste au sablage



**Figure I-13:**Préparation du support



**Figure I-14:**Nettoyage et brossage des surfaces qui peuvent être humides



**Figure I-15:**Préparation des fissures par injection de la résine de réparation

### **I -8-2 : Adhésif :**

Les adhésifs forts sont disponibles pour le collage de la plaque de PRF, et leur force excède généralement sur le béton, donc la rupture dans l'adhésif est rare. Cependant, si des adhésifs faibles sont employés ou si les adhésifs sont incorrectement appliquée, la rupture adhésive peut se produire dans la couche adhésive, sur les faces superposé de PRF . (Meier, 1995) (Karbhari, 1998) (Leeming, 1999)



**Figure I-18:**Préparation de la colle



Figure I-19: Encollage

### I -8-3 : Préparation de la surface du renfort :

Pour les plaques de composites, la rupture peut se produire aussi à l'interface de composite-résine si la surface de la plaque de carbone n'est pas correctement préparé (par exemple déplacement inadéquat, des impuretés comme par exemple : graisse sur la surface).



Figure I-20: Préparation de la surface du renfort

Pour les tissus



Figure I-21: Découpe du tissu

**Application au rouleau:**

**Figure I-22:**Mise en place d'une couche de résine d'accrochage sur la surface à renforcer



**Figure I-16:**Mise en place de la bande ou du tissu



**Figure I-17:**Mise en place d'une couche de résine d'accrochage sur la surface extérieure

- renfort éventuel de la fixation des extrémités par mise en œuvre de chevilles TFC ;
- passage de la bande dans l'imprégnateur
- passage rouleau du maroufleur imprégnateur

**I -9 : Comportement mécanique des composites:**

Les composites, mélanges de matériaux aux propriétés souvent très différentes, permettent de réaliser de remarquables compromis entre les propriétés de matériaux rigides mais fragiles et de matériaux ductiles mais trop souples.

L'adhérence entre l'armature et le béton est un point clé dans le comportement mécanique d'une structure en béton armé. Les propriétés d'interface jouent un rôle critique dans le transfert de charge entre le béton et son renfort. Ces caractéristiques se répercutent à l'échelle de la structure, notamment sur les déformations en service (flèches), ainsi par exemple que sur la fissuration du béton d'enrobage. Le transfert de charges entre la barre en PRF et le béton est la résultante de plusieurs mécanismes:

L'adhésion chimique entre la barre et le béton

le confinement de la barre induit par le retrait du béton

Les forces de friction dues aux rugosités de l'interface et au glissement relatif entre la barre et le béton environnant

L'effet d'engrènement mécanique lié à la présence de reliefs entre la barre et le béton.

Il est difficile de déterminer les contributions de ces différents mécanismes sur le comportement mécanique global de l'interface. C'est donc ce dernier qui est en général étudié.

(MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, 2019-2020)

**I -9-1 : Caractérisations mécaniques d'armatures en PRF:****I-9-1-1 : Résistance en traction et module élastique:**

Les ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus.

Les essais de traction sur armatures composites sont décrits par les normes D 7205/D 7205M . La principale spécificité réside dans le dispositif d'ancrage des éprouvettes. Il n'est pas possible dans le cas d'armatures en PRF d'utiliser le même type d'ancrage que pour des armatures en acier. En effet, les armatures en PRF nécessitent un dispositif d'ancrage spécifique, généralement constitué d'un tube en acier scellé autour de chaque extrémité de la barre, au moyen d'une résine de scellement ou d'un mortier expansif.

Ces ancrages permettent de répartir de manière plus uniforme les contraintes radiales dans l'armature et ainsi d'éviter une rupture prématurée par compression au niveau des zones de serrage. Un exemple d'ancrage pour PRF est illustré sur la Figure I.12. (ACI, 1996)

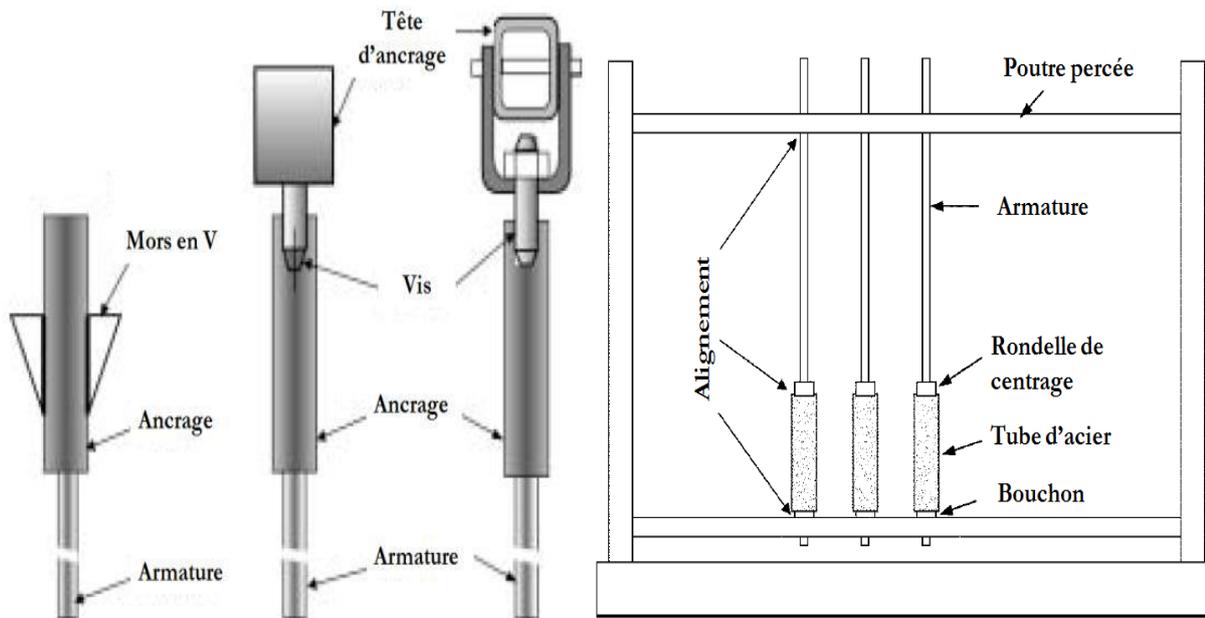


Figure I-18: Propositions d’ancrages pour essais de tractions sur armatures PRF

I-9-1-2 : Résistance au cisaillement inter laminaire :

La norme ASTM D4475 définit un essai de flexion trois points avec appuis rapprochés, appelé essai Short-beam, afin d’évaluer la résistance au cisaillement inter-laminaire de l’interface fibre/matrice. Cette configuration de flexion trois points avec appuis rapprochés (portée égale à quelques diamètres d’armature) induit un effort tranchant prédominant sur le moment de flexion. Le cisaillement est ici dit inter-laminaire car l’effort tranchant est appliqué perpendiculairement à l’interface fibre/matrice. La norme spécifie l’utilisation d’appuis spécifiques qui permettent de mieux répartir les efforts sur la barre. (ASTM, 2002)

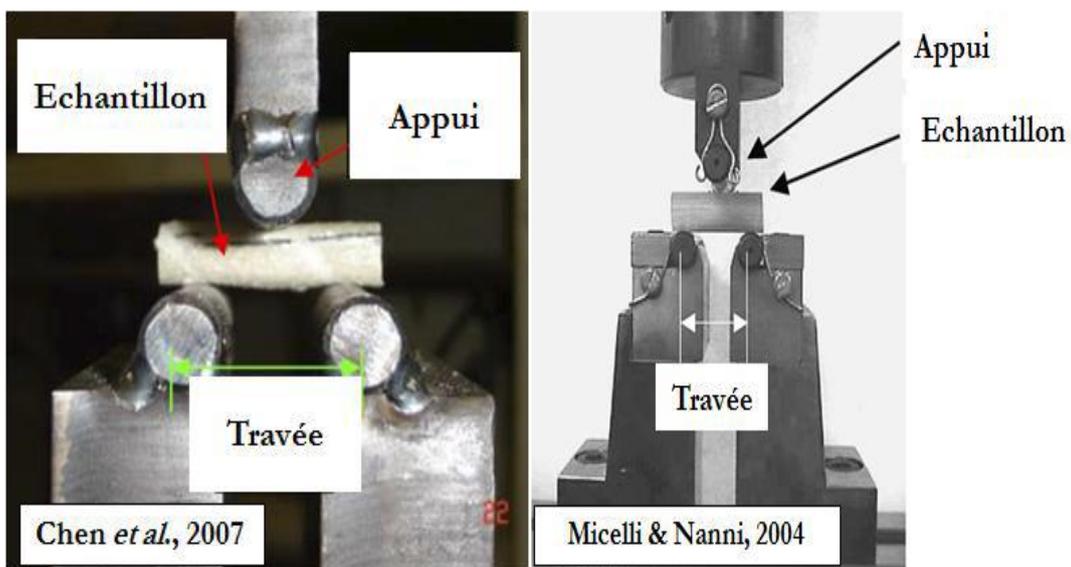


Figure I-19: Exemples de dispositifs d’essais Short-beam

**I-9-2 : Durabilité des armatures en PRF sous sollicitations environnementales et mécaniques :**

De manière générale, les matériaux PRF peuvent subir des vieillissements sous l'action d'agents agressifs extérieurs. Ces vieillissements physiques ou chimiques sont susceptibles d'altérer la microstructure de la matrice, des fibres et de l'interface fibre/matrice, et de conduire ainsi à des pertes de performances mécaniques significatives. De la même manière, les sollicitations mécaniques (fluage, fatigue) peuvent conduire à des endommagements et impacter la durabilité des PRF.

**I-9-2-1 : Effets de l'humidité :****➤ Action de l'eau sur la matrice polymère et l'interface fibres/matrice**

La matrice va absorber une certaine quantité d'eau en fonction la polarité des monomères utilisés. Cette humidité présente au sein du réseau polymère peut altérer la microstructure par le biais de plusieurs mécanismes physiques ou chimiques.

Au niveau de l'interface fibres/matrice, les principaux mécanismes d'action de l'eau sont les :

- Diminution des propriétés cohésives de l'interface par hydrolyse ou condensation de l'agent de couplage (silanes) de l'ensimage.

- Création de microfissures et décohésions l'interface sous l'effet des gonflements différentiels ou de la pression osmotique (Verdu, 2000)

**➤ Vieillessement humide des fibres**

Suite à un éventuel endommagement de l'interface, les fibres peuvent être exposées à l'humidité.

Dans le cas des fibres de verre, l'absorption d'eau à la surface de la fibre se caractérise par l'hydratation des oxydes alcalins initialement présents à la surface du verre : il y a alors diffusion d'ions alcalins (Na<sup>+</sup>) depuis la surface du verre vers le milieu aqueux environnant (phénomène de lixiviation). Les groupes hydroxyles libres (OH<sup>-</sup>) qui

se forment peuvent ensuite potentiellement entrainer une hydrolyse des ponts siloxane et dégrader le réseau silicique). Les mécanismes fondamentaux de l'altération du verre sont donc l'échange ionique (lixiviation) et l'hydrolyse des ponts siloxane.

Les fibres d'aramide présentent une reprise d'humidité plus importante que les fibres de verre et de carbone. En absorbant l'humidité, elles tendent à gonfler. Ce phénomène peut entraîner une fissuration de la matrice. Dans le cas où l'humidité est une préoccupation majeure, il conviendra donc d'éviter d'utiliser des armatures à fibres d'aramides. (Ishai, 1975) (Chen, 2007)

**I-9-2-2 : Fatigue :**

Toute structure du génie civil est soumise au cours de sa vie à une part de sollicitation dite cyclique ou de fatigue, pouvant résulter du trafic, de vibrations (action du vent par exemple), ou encore de cycles thermiques ou hygrométriques. Les armatures en PRF, comme tout matériau peuvent donc

subir des dégradations induites par la fatigue. Comparativement aux métaux, les PRF démontrent généralement une faible sensibilité à l'effet d'entaille sous sollicitation de traction cyclique. Leur performance vis-à-vis des cycles de compression est par contre souvent jugée inférieure à celle des métaux.

Le comportement en fatigue d'armatures en PRF peut dépendre des performances des fibres, de la matrice des interactions fibres/matrices, ainsi que d'effets environnementaux comme la température ou des environnements agressifs. On considère généralement que les matrices vinylesters et époxy présentent de bonnes performances vis-à-vis de la fatigue. Les PRF à base de fibres de carbone démontrent une résistance à la fatigue remarquable qui est attribuée au haut module d'élasticité des fibres. En effet, plus la fibre s'allonge, plus la matrice, obligée de suivre, se déforme en générant des décohésions aux interfaces. (Renard, 2010)

En pratique, les tests de fatigue sur barres en PRF sont réalisés sous sollicitations cycliques en configuration de traction directe. (JSCE, 1995)

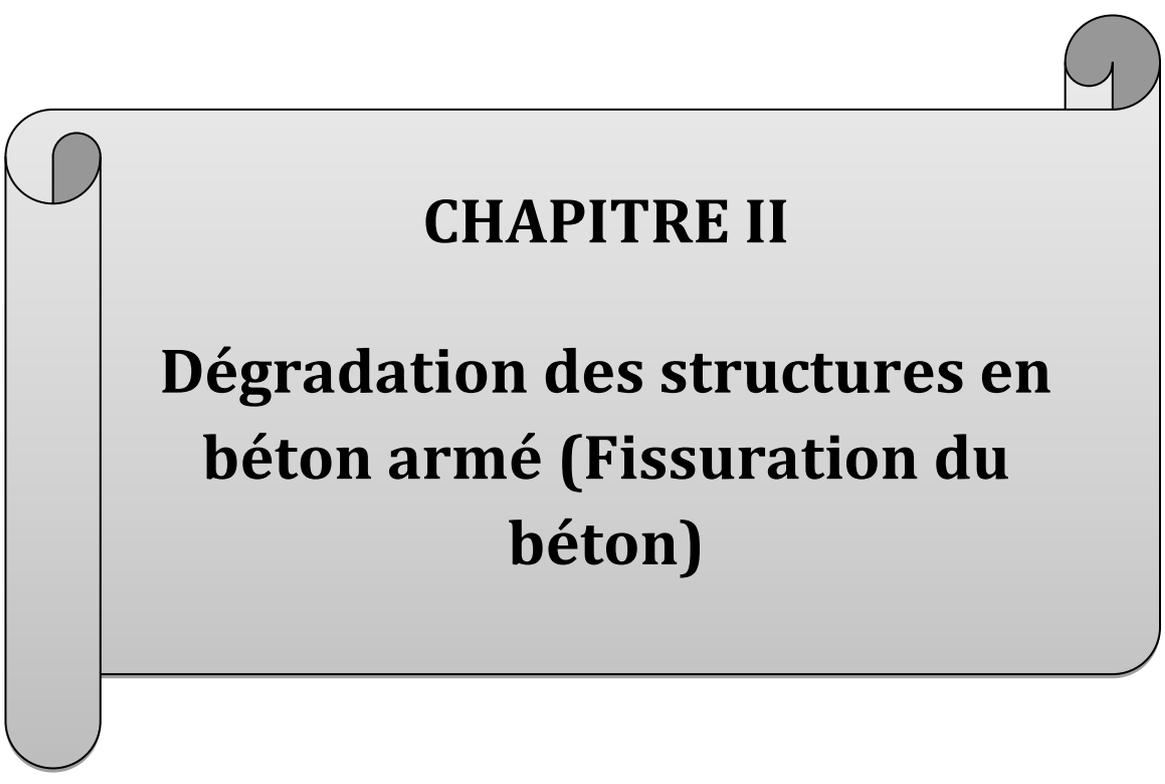
**I -10 : Conclusion :**

Les matériaux composites suscitent depuis plusieurs années un intérêt grandissant qui dépasse largement le stade de la simple curiosité technique et qui est attesté par la multiplication de réalisations industrielles.

Nous avons vu dans ce chapitre une bibliographie générale sur les matériaux composites.

Dans un premier temps, nous avons présenté le classement des matériaux composites et leurs constitutions, les différents modes d'architecture et les méthodes de fabrication ainsi que les propriétés mécaniques des composites et leur performances pour le renforcement des structures.

Dans le domaine du génie civil, les matériaux composites unidirectionnels sont les plus utilisés. En fait, on appelle de façon courante matériau composite unidirectionnel des arrangements parallèles des fibres continues ou non d'un matériau résistant appelé « le renfort » qui est noyé dans une matrice « résine » dont la résistance est beaucoup plus faible.



## **CHAPITRE II**

### **Dégradation des structures en béton armé (Fissuration du béton)**

**II -1 : Introduction :**

Le béton est un matériau assez cassant dès qu'il est soumis à une force de traction. Ainsi, les éventuelles contraintes de traction provoquent des traces de fissures directement observables à la surface du béton. Le béton armé, finit presque toujours par avoir des **fissures** à mesure que le temps passe.

La modélisation de la détérioration des structures en béton armé est généralement basée sur des observations de la détérioration des structures existantes et sur des expériences complètes en laboratoire. Par de telles observations, le soi-disant profil de détérioration (détérioration, fiabilité ou capacité en fonction du temps) peut être estimé. Dans le passé, un grand nombre de ces profils basés sur l'observation ont été estimés par ajustement de courbe.

L'estimation de la détérioration est basée sur une compréhension détaillée des processus chimiques et physiques qui ont lieu pendant la détérioration. La corrosion des armatures est l'une des principales causes de détérioration des structures en béton armé. (Thoft-Christensen, P. (2008))

**II -2 : Définition :**

D'une façon générale, le béton est un matériau durable lorsqu'il est bien formulé et bien mis en œuvre. Toutefois, même durci de longue date il est loin d'être un matériau inerte, il travaille et subit l'épreuve du temps dans le milieu plus ou moins agressif qui l'entoure. La durabilité du béton dépend de plusieurs facteurs liés à l'environnement (nature, concentration et renouvellement des agents agressifs ; contact avec l'eau ou taux d'humidité élevé, ...), mais aussi au béton lui-même (nature et dosage des constituants, conditions de fabrication et de mise en œuvre, ...) (La dégradation des structures en béton par réaction sulfatique interne (RSI)) .

Les dégradations sont :

- d'ordre mécanique à la suite de chocs, de vibration, d'affaissement géotechnique ... Ces dégâts se traduisent souvent par l'apparition de fissures ou d'éclats qu'il convient de repérer et d'identifier.
- exposés à des environnements chimiquement agressifs (sels de déneigement, industrie, carbonatation, etc.) ou biologiquement agressifs (épuration des eaux). Parfois la dégradation chimique peut résulter d'une inadéquation de la composition (réaction alcali-granulats ...).
- soumis à l'érosion et l'usure, les principales causes de détérioration des bétons et armatures sont les dégâts mécaniques, les agressions chimiques, les dégradations physiques, les dégradations des armatures et les réparations inappropriées (Dominique Boussuge)

**II -3 : Les différentes dégradations du béton:****II -3-1: Les dégradations mécaniques**

Les bétons peuvent subir des agressions de type mécaniques. Celles-ci peuvent à tout moment survenir à la suite de L'abrasion, de choc, de déplacement y compris les tassements de sol, d'explosion, de fatigue en surcharges ou de vibrations.

**II -3-2 : Les dégradations par agression chimique**

Les bétons peuvent être confrontés à des environnements chimiquement agressifs du fait de l'activité biologique (algues, bactéries, etc.), d'agents corrosifs, de la réaction alcali-granulats ou cancer du béton.

Les bétons peuvent aussi manifester d'autres pathologies chimiques telles que la carbonatation, la réaction sulfatique, la formation de gel ou de cristallisation d'étringite secondaire, etc.

La durabilité des armatures est nettement conditionnée par les conditions chimiques dans lesquelles elles se trouvent. Les armatures se corrodent lorsque le béton est acidifié. L'acidification sera surtout conditionnée par les conditions initiales de mise en oeuvre par la nature du ciment et du rapport Eau/Ciment, les conditions de cure, l'exposition météorologique ou la porosité.

Les armatures peuvent aussi se corroder en présence de chlorures (environnement marin, sels de déverglaçage) ou encore de courants parasites.

**II -3-3 : Les dégradations physiques:**

Par dégradations physiques, on entend l'ensemble des causes qui peuvent provoquer l'éclatement du béton comme, par exemple la cristallisation saline, l'érosion, l'exposition répétée à des cycles gel-dégel, le retrait, l'usure, les phénomènes thermiques, y compris les incendies. (Dominique Boussuge)

**II -4 : Pourquoi des fissures se forment dans la structure en béton ? :**

Le béton confère aux structures résistance, rigidité et résistance à la déformation. Ces caractéristiques, cependant, font que les structures en béton manquent de flexibilité pour se déplacer en réponse aux changements environnementaux ou de volume. La fissuration est généralement le premier signe de détresse dans le béton. Il est cependant possible qu'il y ait détérioration avant que les fissures n'apparaissent. La fissuration peut se produire à la fois dans le béton durci et frais, ou plastique, à la suite de changements de volume et de charges répétées.

Cela implique que des contraintes de traction sont chargées sur le béton, les fissures se produisant lorsque la force dépasse sa résistance à la traction maximale. Il est important de comprendre les raisons pour lesquelles la fissuration se produit, le type de fissure formée et les effets des fissures sur la stabilité structurelle. Une fois que vous avez compris ces points, vous pouvez prendre les mesures appropriées. Cela peut signifier laisser la fissure seule, injecter dans la fissure un matériau approprié ou appliquer d'autres méthodes de réparation appropriées. (Bluey Technologies :Evaluating Cracking in Concrete, 2014)

**II-4-1 : À l'état normal le béton est fissuré :**

La fissuration est inéluctable, en particulier sous les charges de service (l'allongement des armatures et le jeu de l'adhérence béton-armature génèrent des contraintes dans le béton, très supérieures à sa résistance en traction).

Les fissures sont logiques, inévitables et nécessaires au fonctionnement mécanique des structures en béton armé. Mais elles sont contrôlables, car elles apparaissent aux endroits où les contraintes dépassent la résistance en traction du béton.

Il convient de les maîtriser, d'une part pour des raisons esthétiques et d'autre part pour des problématiques de durabilité de l'ouvrage.

En particulier, il faut contrôler l'ouverture des fissures car au-delà d'un certain seuil, la protection des armatures vis-à-vis de la corrosion n'est plus correctement assurée. La fissuration favorise les transferts liquides, gazeux et ioniques et donc l'entrée dans le béton d'agents agressifs générant l'oxydation et la corrosion des armatures et des pathologies du béton (gonflement, éclatement...). (Fissuration des ouvrages en béton armé - Généralités).

**II-4-2 : Apparition de la fissuration : de multiples causes :**

Les principales causes potentielles de fissuration sont :

- le fonctionnement du béton armé (solicitation de flexion, d'effort tranchant, de torsion ou de traction générées par les chargements et les surcharges d'exploitation)
- les déformations générées ou imposées (tassements différentiels, tassements d'appui...)
- les défauts de conception
- les phénomènes de retrait thermique et hydrique
- les réactions physico-chimique ( fluage, refroidissement de pièces massives, réactions chimiques internes...)
- les agressions environnementales qui peuvent générer des pathologies (corrosion des armatures, ...) ou les réactions chimiques expansives internes au béton durci (alcali-réaction, Réaction Sulfatique Interne) qui créent des gonflements au sein du béton
- les causes accidentelles (incendie, explosion, choc...) et les séismes
- les défauts de mise en œuvre du béton (non prise en compte des conditions climatiques lors du chantier, non-respect des règles de l'art, non-qualité des matériaux, absence, manque ou excès de vibration, absence de cure...).

La fissuration du béton est rarement le résultat d'une cause unique ; et si les causes potentielles de fissuration ne sont pas toutes pathologiques, leur cumul peut générer des pathologies.

**On distingue, Deux types de fissures :**

- **Les fissures à caractère esthétique** qui ne nuisent pas à la durabilité de l'ouvrage, qui sont en général dues à des erreurs de formulation des bétons et des défauts de mise en œuvre ;

- **Les fissures structurelles** préjudiciables à la sécurité des usagers et/ou à la durabilité de la structure et/ou à la stabilité de l'ouvrage qui traduisent en général une erreur de conception de l'ouvrage ou des causes accidentelles.

**NOTA** : il est possible d'identifier l'origine de la fissuration en observant la forme, la position et l'orientation des fissures, ainsi que leurs situations dans l'ouvrage par rapport au schéma de fonctionnement de la structure. (Fissuration des ouvrages en béton armé - Généralités)

### **II-4-3 : Maitrise de la fissuration lors du dimensionnement :**

Le béton armé est dimensionné en faisant l'hypothèse qu'il est fissuré. Les armatures permettent ainsi de maîtriser les fissures du béton armé.

Les différents codes de calcul et normes de dimensionnement ont évolué progressivement afin de prendre en compte de manière précise les mécanismes de fissuration et d'optimiser les armatures (adhérence à la surface, diamètres et espacements des armatures, contraintes de l'acier...).

Les méthodes de calcul du béton armé sont ainsi fondées sur le respect d'une ouverture maximale de fissure en fonction des agressions (traduites par les classes d'exposition) auxquelles sont soumis les bétons.

### **II-4-4 : Principes de base de la fissuration :**

Les retours d'expérience sur de nombreux ouvrages et les résultats d'essais en laboratoire depuis plusieurs décennies ont confirmé :

- que des fissures de 0.2 à 0.3 mm correspondent à un fonctionnement normal du béton armé.
- qu'en atmosphère non-agressive, une fissuration fine de faible ouverture et uniformément répartie, ne compromet pas la durabilité de l'ouvrage.

Seules les fissures très ouvertes (largeur supérieures à 0.3 mm) peuvent générer des pathologies. La valeur de l'ouverture de la fissure est ainsi un paramètre clé de la durabilité. Avec des fissures fines, les forces de tension superficielle sont supérieures aux forces de gravitation, ce qui empêche tout mouvement d'eau, soit par capillarité, soit par condensation et donc toute pénétration d'agents agressifs.

De même, retours d'expérience et résultats d'essais confirment également que

- pour assurer la durabilité d'une structure en béton armé, il est indispensable de protéger les armatures des agents agressifs par une couche de béton d'enrobage compact, dont l'épaisseur est déterminée en fonction des agressions potentielles (classes d'exposition) et de la durée d'utilisation de l'ouvrage (50 ou 100 ans).
- pour un ouvrage bien dimensionné, réalisé dans les règles de l'art et utilisant un béton de performances adaptées, les fissures n'altèrent pas la durabilité de l'ouvrage.
- le réseau de microfissures (non visible à l'œil nu) contrôlé par les armatures confère au béton la souplesse qui lui permet de garder son intégrité sous l'effet des charges. (Fissuration des ouvrages en béton armé - Généralités)

**II -5 : Types et causes de détérioration du béton:**

Le béton peut se détériorer pour diverses raisons, et les dommages au béton sont souvent le résultat d'une combinaison de facteurs. Le résumé suivant traite des causes potentielles de détérioration du béton et des facteurs qui les influencent. (Association)

Le type de fissuration fournit des informations utiles pour aider à comprendre les effets d'une fissure sur la stabilité structurelle.( Tableau 1 ) présente un résumé des différents types de fissures dans le béton et leurs causes possibles. Le statut d'une fissure est extrêmement important. Les fissures actives peuvent nécessiter des procédures de réparation plus complexes qui peuvent inclure l'élimination de la cause réelle de la fissuration afin d'assurer une réparation réussie à long terme. Si la cause sous-jacente n'est pas traitée, la réparation de la fissure peut être de courte durée, ce qui oblige à répéter le même processus. Les fissures dormantes sont celles qui ne menacent pas la stabilité d'un ouvrage. Les conditions environnementales d'une fissure influencent la mesure dans laquelle elle affecte l'intégrité de sa structure. Une plus grande exposition à des conditions agressives augmente la possibilité d'instabilité structurelle. La taille des fissures varie de microfissures qui exposent le béton à l'offlorescence, à des fissures plus grandes causées par des conditions de chargement externes. Noter la taille, la forme et l'emplacement des fissures peut aider à déterminer leurs causes initiales. (Bluey Technologies :Evaluating Cracking in Concrete, 2014)

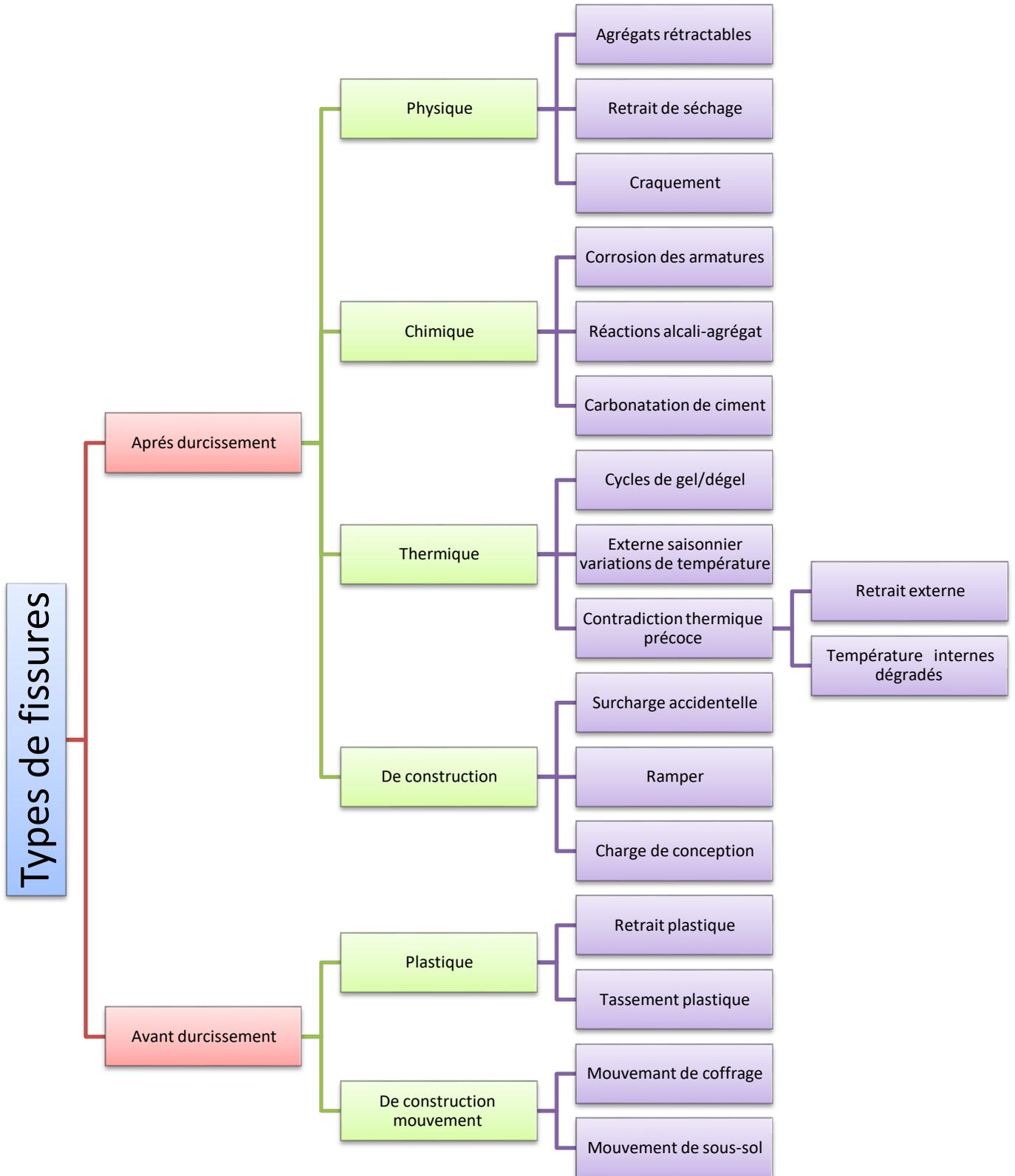
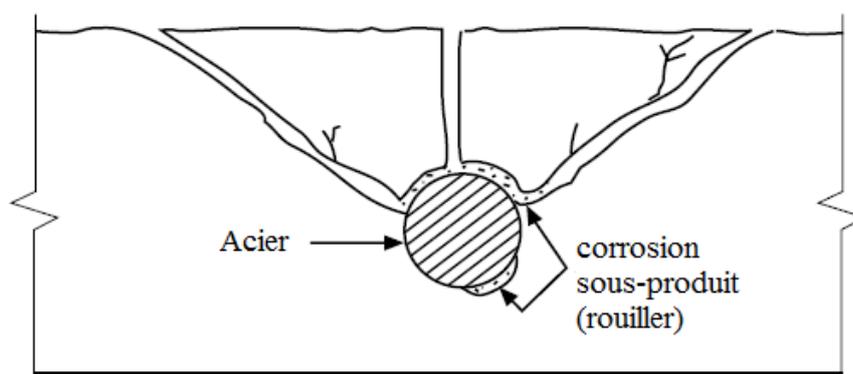


Tableau II-1: Type de fissures et leurs causes

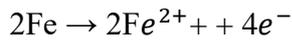
**II-5-1 : Corrosion des métaux intégrés :**

La corrosion de l'acier d'armature et d'autres métaux intégrés est la principale cause de détérioration du béton. Lorsque l'acier se corrode, la rouille qui en résulte occupe un volume plus important que l'acier. Cette dilatation crée des contraintes de traction dans le béton, qui peuvent éventuellement provoquer des fissures, des délaminages et des écaillages (Figures 1 et 2)

**Figure II-1:** La corrosion de l'acier d'armature**Figure II-2:** La dilatation de l'acier corrodé crée des contraintes de traction dans le béton, ce qui peut provoquer des fissures, un délaminage et un écaillage

Pour que la corrosion se produise, quatre éléments doivent être présents : Il doit y avoir au moins deux métaux (ou deux emplacements sur un même métal) à différents niveaux d'énergie, un électrolyte et une connexion métallique. Dans béton armé, la barre d'armature peut avoir de nombreuses zones distinctes à différents niveaux d'énergie. Le béton agit comme électrolyte et la connexion métallique est assurée par des attaches métalliques, des supports de chaise ou la barre d'armature elle-même.

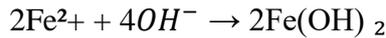
La corrosion est un processus électrochimique impliquant le flux de charges (électrons et ions). (La figure 3) montre une barre d'acier corrodée noyée dans du béton. Aux sites actifs de la barre, appelés anodes, les atomes de fer perdent des électrons et se déplacent. Dans le béton environnant sous forme d'ions ferreux. Ce processus est appelé une demi-cellule réaction d'oxydation, ou la réaction anodique, et est représenté comme :



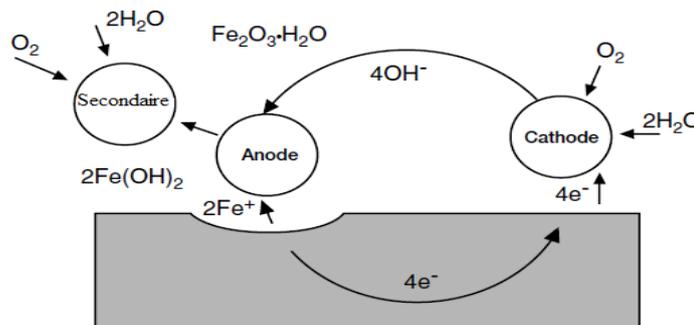
Les électrons restent dans la barre et s'écoulent vers des sites appelés cathodes, où ils se combinent avec l'eau et l'oxygène dans le béton. La réaction à la cathode est appelée réaction de réduction. Une réaction de réduction courante est :



Pour maintenir la neutralité électrique, les ions ferreux migrent à travers l'eau interstitielle du béton vers ces sites cathodiques où ils se combinent pour former des hydroxydes de fer, ou rouille :



Cet hydroxyde précipité initial a tendance à réagir davantage avec l'oxygène pour former des oxydes supérieurs. Les augmentations de volume à mesure que les produits de réaction réagissent davantage avec l'oxygène dissous entraînent une contrainte interne dans le béton qui peut être suffisante pour provoquer une fissuration et un écaillage de la couverture de béton.



**Figure II-3:** Lorsque l'acier d'armature se corrode, les électrons traversent la barre et les ions traversent le béton

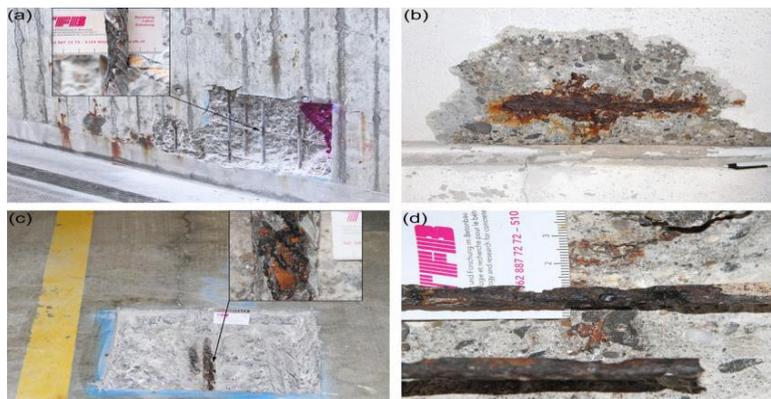
**II-5-1-1 : Le béton et la couche passivant:**

Bien que la tendance naturelle de l'acier soit de subir des réactions de corrosion, l'environnement alcalin du béton (pH de 12 à 13) confère à l'acier une protection contre la corrosion. Au pH élevé, une fine couche d'oxyde se forme sur l'acier et empêche les atomes métalliques de se dissoudre. Ce film passif n'arrête pas réellement la corrosion ; il réduit le taux de corrosion à un niveau insignifiant. Pour l'acier dans le béton, le taux de corrosion passive est typiquement de 0,1 µm par an.

En raison de la protection inhérente du béton, l'acier d'armature ne se corrode pas dans la majorité des éléments et des structures en béton. Cependant, la corrosion peut se produire lorsque la couche de passivation est détruite. La destruction de la couche de passivation se produit lorsque l'alcalinité du béton est réduite ou lorsque la concentration de chlorure dans le béton est augmentée jusqu'à un certain niveau. (Association)

**II -5-1-2 : Le rôle de chlorure:**

L'exposition du béton armé aux ions chlorure est la principale cause de corrosion prématurée des armatures en acier. L'intrusion d'ions chlorure, présents dans les sels de déglçage et l'eau de mer, dans le béton armé peut provoquer la corrosion de l'acier si l'oxygène et l'humidité sont également disponibles pour entretenir la réaction. Les chlorures dissous dans l'eau peuvent s'infiltrer à travers le béton sain ou atteindre l'acier à travers les fissures. Les adjuvants contenant du chlorure peuvent également provoquer de la corrosion.



**Figure II-4:** Les sels de déglçage sont une cause majeure de corrosion de l'acier d'armature dans le béton

Le risque de corrosion augmente à mesure que la teneur en chlorure du béton augmente. Lorsque la teneur en chlorure à la surface de l'acier dépasse une certaine limite, appelée valeur seuil, la corrosion se produira si l'eau et l'oxygène sont également disponibles. Seuls les chlorures solubles dans l'eau favorisent la corrosion ; certains chlorures solubles dans l'acide peuvent être liés dans les agrégats et, par conséquent, indisponibles pour favoriser la corrosion. Le (tableau II-2) indique l'eau maximale admissible teneur en ions chlorure solubles du béton armé dans diverses conditions d'exposition

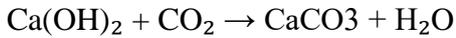
Bien que les chlorures soient directement responsables de l'amorçage de la corrosion, ils semblent ne jouer qu'un rôle indirect dans la vitesse de corrosion après amorçage. Les principaux facteurs de contrôle du débit sont la disponibilité de l'oxygène, la résistivité électrique et l'humidité relative du béton, ainsi que le pH et la température. (Association)

Type de membre	Maximum Cl-*
Béton précontraint	0.06
Béton armé exposé aux chlorures en service	0.015
Béton armé qui sera sec ou protégé de l'humidité en service	1.00
Autre construction en béton armé	0.30

**Tableau II-2:** Teneur maximale en ions chlorure du béton

**II-5-1-3: Carbonatation:**

La carbonatation se produit lorsque le dioxyde de carbone de l'air pénètre dans le béton et réagit avec les hydroxydes, tels que l'hydroxyde de calcium, pour former des carbonates. Lors de la réaction avec l'hydroxyde de calcium, du carbonate de calcium se forme :



Cette réaction réduit le pH de la solution interstitielle jusqu'à 8,5, niveau auquel le film passif sur l'acier n'est pas stable. La carbonatation est généralement un processus lent. Dans le béton de haute qualité, on a estimé que la carbonatation se poursuivra à un rythme pouvant atteindre 1,0 mm (0,04 po) par an. La quantité de carbonatation est considérablement augmentée dans le béton avec un rapport eau/ciment élevé, une faible teneur en ciment, une courte période de durcissement, une faible résistance et une pâte hautement perméable ou poreuse. La carbonatation dépend fortement de l'humidité relative du béton. Les taux de carbonatation les plus élevés se produisent lorsque l'humidité relative est maintenue entre 50 % et 75 %. En dessous de 25 % d'humidité relative, le degré de carbonatation qui se produit est considéré comme insignifiant. Au-dessus de 75 % d'humidité relative, l'humidité dans les pores limite la pénétration du CO<sub>2</sub> , La corrosion induite par la carbonatation se produit souvent sur les zones des façades de bâtiments qui sont exposées à la pluie, à l'abri du soleil et qui ont une faible couverture de béton sur l'acier d'armature ( figure II-5). (Association)



**Figure II-5:** La corrosion induite par la carbonatation se produit souvent sur les façades des bâtiments avec une couverture en béton peu profonde

➤ **Les conséquences de la carbonatation du béton :**

La carbonatation du béton est un phénomène qui dégrade les bétons armés. Elle est notamment responsable de la mise à nu de leurs armatures en acier.

La carbonatation entraîne des problèmes sur la durée de vie et sur la résistance des structures en béton. Les barres d'acier gonflent sous l'effet de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage. Les aciers sont alors mis à nu et continuent à se corroder. (La carbonatation du béton)

### **II-5-2 : Détérioration par le gel-dégel :**

Lorsque l'eau gèle, elle se dilate d'environ 9 %. Lorsque l'eau du béton humide gèle, elle produit une pression dans les capillaires et les pores du béton. Si la pression dépasse la résistance à la traction du béton, la cavité se dilate et se rompt. L'effet cumulatif des cycles successifs de gel-dégel et la rupture de la pâte et des granulats peuvent éventuellement provoquer une expansion et une fissuration, un écaillage et un effritement importants du béton (Figure II-6). (Association)



**Figure II-6:** Les cycles de gel-dégel peuvent causer l'entartrage des surfaces en béton

### **II-5-3 : ATTAQUE CHIMIQUE :**

Le béton se comporte bien lorsqu'il est exposé à diverses conditions atmosphériques, à l'eau, au sol et à de nombreuses autres expositions chimiques. Cependant, certains environnements chimiques peuvent détériorer même le béton de haute qualité.

Le béton est rarement, voire jamais, attaqué par des produits chimiques solides et secs. Pour produire une attaque significative sur le béton, des produits chimiques agressifs doit être en solution et au-dessus d'une certaine concentration minimale.(Association)

#### **II-5-3-1 : Sels et alcalis:**

Les chlorures et les nitrates d'ammonium, de magnésium, d'aluminium et de fer détériorent tous le béton, ceux d'ammonium produisant le plus de dégâts. La plupart des sels d'ammonium sont destructeurs car, dans l'environnement alcalin du béton, ils libèrent du gaz ammoniac et des ions hydrogène. Ceux-ci sont remplacés par la dissolution de l'hydroxyde de calcium du béton. Le résultat est une action de lessivage, un peu comme une attaque acide, les alcalis forts à plus de 20 % peuvent également provoquer la désintégration du béton. (Association)

**II-5-3-2 : Produits chimiques qui détériorent le béton:**

Favorise la détérioration rapide du béton :

- chlorure d'aluminium
- Bisulfite de Calcium
- Acide chlorhydrique (toutes concentrations)
- Acide fluorhydrique (toutes concentrations)
- Acide nitrique (toutes concentrations)
- Acide sulfurique, 10 à 80 %
- Acide sulfureux

**II-5-3-3 : Attaque de sulfate :**

Les sulfates naturels de sodium, de potassium, de calcium ou de magnésium sont parfois présents dans le sol ou dissous dans les eaux souterraines. Les sulfates peuvent attaquer le béton en réagissant avec les composés hydratés du ciment durci. Ces réactions peuvent induire une pression suffisante pour rompre la pâte de ciment, entraînant une perte de cohésion et de résistance. Le sulfate de calcium attaque l'hydrate d'aluminate de calcium et forme de l'ettringite. Le sulfate de sodium réagit avec l'hydroxyde de calcium et l'hydrate d'aluminate de calcium pour former de l'ettringite et du gypse. Le sulfate de magnésium attaque de la même manière que le sulfate de sodium et forme de l'ettringite, du gypse et de la brucite (hydroxyde de magnésium). La brucite se forme principalement à la surface du béton, consomme de l'hydroxyde de calcium, abaisse le pH de la solution interstitielle, puis décompose les hydrates de silicate de calcium. (Association)

**II-5-4 : Réactivité ALCALIS-AGRÉGATS :**

Dans la plupart des bétons, les granulats sont plus ou moins chimiquement inertes. Cependant, certains agrégats réagissent avec les hydroxydes alcalins du béton, provoquant une expansion et une fissuration sur une période de plusieurs années. Cette réactivité alcali-agrégat a deux formes: réaction alcali-silice (ASR) et réaction alcali-carbonate (ACR). L'ASR est plus préoccupant que l'ACR car les agrégats contenant des matériaux de silice réactive sont plus courants. (Association)

**II-5-4-1 : Réactivité alcali-silice:**

Les agrégats contenant certaines formes de silice réagissent avec l'hydroxyde alcalin dans le béton pour former un gel qui gonfle lorsqu'il puise l'eau de la pâte de ciment environnante ou de l'environnement. En absorbant l'eau, ces gels peuvent gonfler et induire une pression expansive suffisante pour endommager le béton :

1. Alcalis + Silice réactive → produit de réaction de gel
2. Produit de réaction de gel + humidité → expansion

Les indicateurs typiques de la réactivité alcali-silice sont la fissuration cartographique (motif aléatoire) et, dans les cas avancés, les joints fermés et les surfaces de béton écaillées (Figure II-7). La fissuration apparaît généralement dans les zones avec un apport fréquent d'humidité, comme près de la ligne de flottaison dans les piles, du sol derrière les murs de soutènement, près des joints et des bords

libres dans les chaussées, ou dans les piles ou les colonnes soumises à l'action de la mèche. (Association)



**Figure II-7:** Les indicateurs typiques de la réactivité alcali-silice sont la fissuration cartographique et, dans les cas avancés, les joints fermés et les surfaces de béton écaillées

#### **II-5-4-2 : Réactivité alcali-carbonate :**

Les réactions observées avec certaines roches dolomitiques sont associées à la réaction alcali-carbonate (ACR). La dédolomitisation, ou la décomposition de la dolomite, est normalement associée à une réactivité expansive des carbonates alcalins. Cette réaction et la cristallisation subséquente de la brucite peuvent provoquer une expansion considérable. La détérioration causée par la réaction alcali-carbonate est similaire à celle causée par la réaction alcali-silice (Figure II-8); cependant, la réaction du carbonate alcalin est relativement rare car les agrégats sensibles à cette réaction sont moins courants et ne conviennent généralement pas à une utilisation dans le béton pour d'autres raisons, telles que le potentiel de résistance. (Association)



**Figure II-8:** Cartographiez le schéma de fissuration causé par la réactivité alcali-carbonate

#### **II-5-5 : ABRASION/ÉROSION :**

Les dommages dus à l'abrasion se produisent lorsque la surface du béton est incapable de résister à l'usure causée par le frottement et la friction. Au fur et à mesure que la pâte extérieure du béton s'use, les granulats fins et grossiers sont exposés et l'abrasion et l'impact entraîneront une dégradation supplémentaire liée à la force de liaison granulats-pâte et à la dureté de l'agrégat. Bien que les particules transportées par le vent puissent provoquer l'abrasion du béton, les deux formes d'abrasion les plus

dommageables se produisent sur les surfaces de circulation des véhicules et dans les structures hydrauliques, telles que les barrages, les déversoirs et les tunnels. (Association)

### **II-5-6 : FEU/CHALEUR:**

Le béton se comporte exceptionnellement bien aux températures rencontrées dans presque toutes les applications. Mais lorsqu'il est exposé au feu ou à des températures anormalement élevées, le béton peut perdre sa résistance et sa rigidité. (Association)

### **II-5-7 : RETENUE AUX CHANGEMENTS DE VOLUME**

Le béton change légèrement de volume pour diverses raisons, les causes les plus courantes étant les fluctuations de la teneur en humidité et de la température. La contrainte aux changements de volume, en particulier la contraction, peut provoquer des fissures si les contraintes de traction qui se développent dépassent la résistance à la traction du béton.

#### **II-5-7-1 : Fissuration par retrait du plastique:**

Lorsque les particules plus lourdes du béton se déposent en raison de la gravité, elles poussent l'eau et les particules plus légères vers la surface. C'est ce qu'on appelle un saignement. Si vous ne surveillez pas correctement les conditions de température, de vent et d'humidité, le taux d'évaporation de l'eau de surface peut dépasser le taux de ressuage, asséchant la couche superficielle du béton et donc la rétrécissant par déshydratation. Le béton sous la couche de surface est cependant encore bien hydraté et conserve son volume. Ceci s'applique à opposer des efforts de traction à la partie inférieure du béton en train de sécher en surface, provoquant un profil de béton fissuré. (Figure II-9)

Ces fissures de retrait plastique sont généralement peu profondes et généralement de 1 à 2 mm de largeur, ce qui signifie que vous ne pouvez pas les réparer avec la méthode d'injection. Ils peuvent cependant s'auto-guérir par l'hydratation continue du ciment ou par la précipitation du carbonate de calcium du béton.

Si les fissures ont une largeur supérieure à 2 mm et ne se cicatrisent pas d'elles-mêmes, il est important de les réparer avec un enduit ou un produit d'injection approprié pour les empêcher de pénétrer sur toute la profondeur de la dalle de béton. S'ils deviennent actifs, leur réaction aux contraintes peut entraîner une fissuration supplémentaire qui affaiblit la structure soit directement, soit en exposant son acier d'armature à des contaminants qui, avec le temps, le corroderont. (Association)



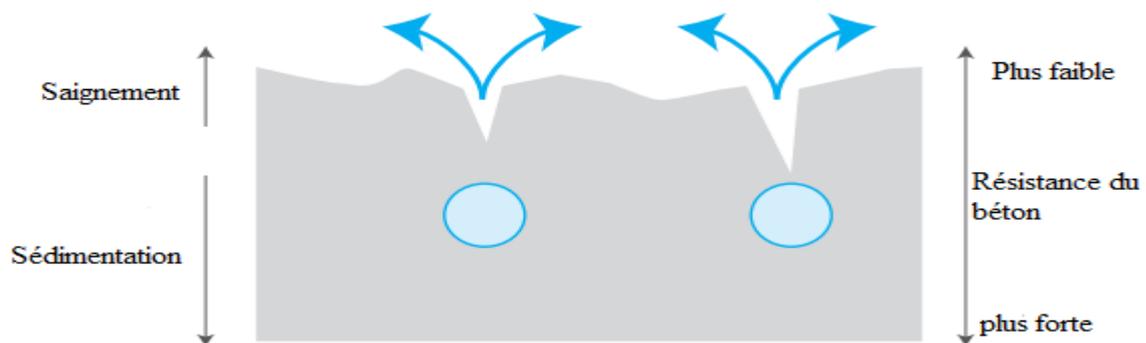
**Figure II-9:** Des fissures de retrait du plastique peuvent se produire lorsque l'eau s'évapore de la surface plus rapidement qu'elle n'est remplacée par l'eau de purge

### II-5-7-2 : Fissuration des tassements plastiques:

Le processus de tassement est un facteur majeur dans le développement de la résistance du béton. (La figure II-10) illustre la formation de fissures de tassement plastiques. Au fur et à mesure que le béton saigne, l'eau remonte à la surface. La sédimentation se produit alors lorsque l'agrégat et le ciment se déplacent vers le bas sous l'effet de la gravité. Cette séparation forme une couche plus faible du béton près de la surface. Si les barres d'armature en acier sont proches de la surface et insuffisamment recouvertes de béton, le béton se replie autour de la retenue et se fissure au sommet. Des sections de béton plus profondes entraînent une plus grande séparation entre les sédiments et l'eau, il est donc important de s'assurer que vous couvrez adéquatement toutes les contraintes superficielles pour réduire la quantité de fissures.

Des fissures de tassement plastiques peuvent également se produire dans des formes impliquant un changement soudain de la profondeur du béton, car il se dépose davantage dans les sections profondes que dans les sections peu profondes, forçant la fissuration au point de changement. Un bon exemple de ceci est les bacs à gaufres, dans lesquels la profondeur change constamment sur toute la longueur du moule. (Bluey Technologies :Evaluating Cracking in Concrete, 2014)

#### DEFORMATION PROVOQUEE PAR DES CONTRAINTES DE TRACTION SUR UNE RETENUE



**Figure II-10:** Représentation schématique de la formation de fissure de tassement plastique

### II-5-7-3 : Séchage Retrait Fissuration:

Parce que presque tout le béton est mélangé avec plus d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, une grande partie de l'eau restante s'évapore, provoquant le rétrécissement du béton. La retenue au retrait, fournie par le sol de fondation, le renforcement ou une autre partie de la structure, provoque le développement de contraintes de traction dans le béton durci. La restriction au retrait de séchage est la cause la plus fréquente de fissuration du béton (Figure II-11).

Dans de nombreuses applications, la fissuration par retrait de séchage est inévitable. Par conséquent, des joints de contrôle sont placés dans le béton pour déterminer à l'avance l'emplacement des fissures de retrait de séchage. Le retrait de séchage peut être limité en maintenant la teneur en eau du béton aussi basse que possible et en maximisant la teneur en granulats grossiers. (Association)



**Figure II-11:** La restriction au retrait de séchage est la cause la plus fréquente de fissuration du béton

#### **II-5-7-4: Fissuration thermique :**

Le béton se dilate lorsqu'il est chauffé et se contracte lorsqu'il est refroidi. Une valeur moyenne pour la dilatation thermique du béton est d'environ 10 millionièmes par degré Celsius (5,5 millionièmes par degré Fahrenheit). Cela équivaut à un changement de longueur de 5 mm pour 10 m de béton (po pour 100 pi de béton) soumis à une hausse ou une baisse de 50 °C (90 °F).

La dilatation et la contraction thermiques du béton varient en fonction de facteurs tels que le type d'agrégat, la teneur en ciment, le rapport eau-ciment, la plage de température, l'âge du béton et l'humidité relative. Parmi ceux-ci, le type d'agrégat a la plus grande influence.

Les concepteurs doivent accorder une attention particulière aux structures dans lesquelles certaines parties de la structure sont exposées à des changements de température, tandis que d'autres parties sont partiellement ou complètement protégées. Permettre le mouvement en utilisant des joints de dilatation ou d'isolation correctement conçus et des détails corrects aidera à minimiser les effets des variations de température. (Association)

**II-5-8: Mauvaises pratiques de construction:**

De nombreuses mauvaises pratiques de construction peuvent déclencher des fissures dans les structures en béton. Le tableau suivant présente ces erreurs possibles. (Bluey Technologies :Evaluating Cracking in Concrete, 2014)

<b>MAUVAISE PRATIQUE</b>	<b>EFFET DE LA PRATIQUE</b>	<b>FACTEUR PROVOQUANT LA FISSURATION</b>
Ajouter de l'eau au béton pour augmenter sa maniabilité	Réduit la résistance du béton Augmente le tassement	Augmentation du retrait de séchage et de la fissuration de tassement plastique
Augmenter la teneur en ciment pour compenser une diminution de la résistance due à l'ajout d'eau	Augmente le différentiel de température entre les sections intérieures et extérieures de la structure Augmente le volume de la pâte de ciment	Augmentation du retrait à sec Contraintes thermiques
Durcissement inadéquat	Manque d'hydratation du béton Diminue la force	Augmentation du retrait à un moment où le béton est à faible force
Manque de formes de support, consolidation inadéquate et placement incorrect des joints de construction	Augmente le tassement Support insuffisant pour le réglage béton Articulations ouvertes aux points de forte contrainte	Le béton se fissure sous sa charge avant qu'il n'ait développé suffisamment de résistance pour se soutenir

**Tableau II-3: Mauvaises pratiques de construction**

**II-5-9: Surcharges de construction :**

Il est important de porter une attention particulière à la manière dont vous chargez, transportez et déchargez le béton préfabriqué et à la manière dont vous le fixez en place. A chacune de ces étapes, les modules préfabriqués en béton peuvent être soumis à des contraintes qui surchargent la structure. Si ces contraintes se produisent dans les premiers âges du béton, elles peuvent entraîner des fissures permanentes. Vous devez utiliser des procédures de levage qui répartissent la charge sur la structure afin de réduire le risque de contraintes de surcharge.

Les poutres précontraintes peuvent présenter des problèmes de fissuration au moment du relâchement des contraintes, en particulier dans les poutres qui ont moins d'un jour.

Vous devez porter une attention particulière au stockage des matériaux et des équipements opérationnels pendant la phase de construction, car ceux-ci peuvent générer des charges supérieures à celles pour lesquelles la structure a été conçue. (Bluey Technologies :Evaluating Cracking in Concrete, 2014)

**II-5-10: Erreurs de conception et de détail :**

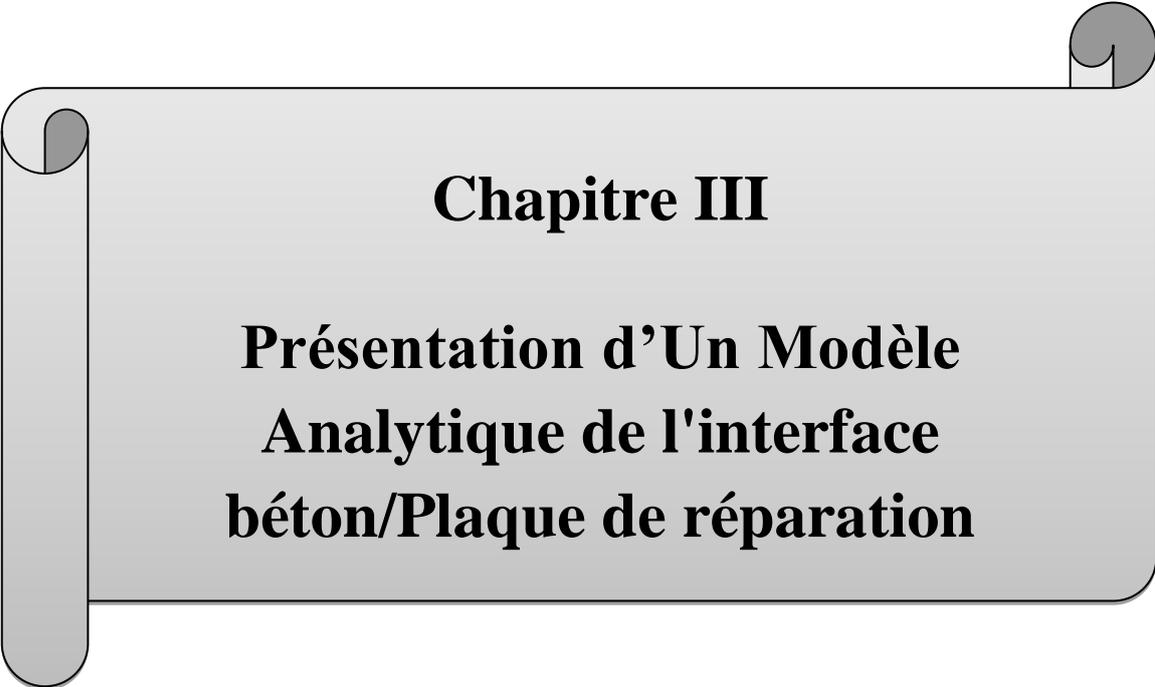
De nombreux problèmes peuvent survenir en raison d'une conception et de détails incorrects, notamment des concentrations accrues de contraintes dues à des coins rentrants mal conçus, des fissures dues à un renforcement inadéquat et un mouvement différentiel excessif dû à une mauvaise conception des fondations. Il est donc important de s'assurer que la conception et les détails sont spécifiques à la structure particulière et aux charges auxquelles elle sera exposée. Négliger ces points peut entraîner des fissures, causant un problème majeur d'entretien. (Bluey Technologies :Evaluating Cracking in Concrete, 2014)

**II-5-11: Charges appliquées à l'extérieur :**

La plupart des structures en béton sont sensibles aux charges externes qui induisent des contraintes de traction à travers leurs éléments en béton. Il est important de gérer ces charges de la manière la plus efficace possible, essayez donc de répartir la charge uniformément sur les éléments individuels pour réduire le risque de fissuration incontrôlée. Les facteurs qui peuvent réduire la largeur des fissures sont une quantité accrue d'armatures en acier et des sections de béton plus grandes pour répartir les charges plus uniformément. (Bluey Technologies :Evaluating Cracking in Concrete, 2014)

**II-6 : Conclusion :**

Enfin, le béton est un matériau qui se fissure sous l'effet des contraintes de traction. La dégradation de béton armé peut se produire pour un certain nombre de raisons. Les processus physiques et chimiques peuvent avoir un impact sur la durabilité et les performances structurelles du béton. Les défauts de conception, de matériaux, de fabrication, de durcissement et d'entretien peuvent tous avoir un impact sur la durée de vie, la sécurité et la fiabilité d'un élément.

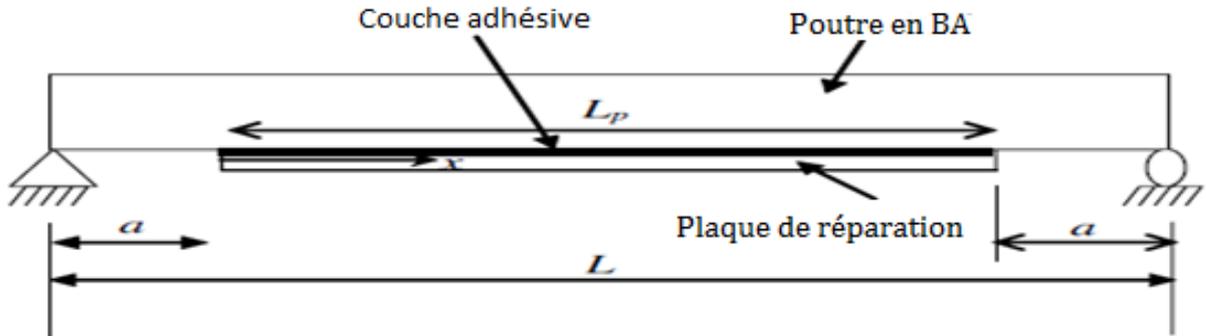


## **Chapitre III**

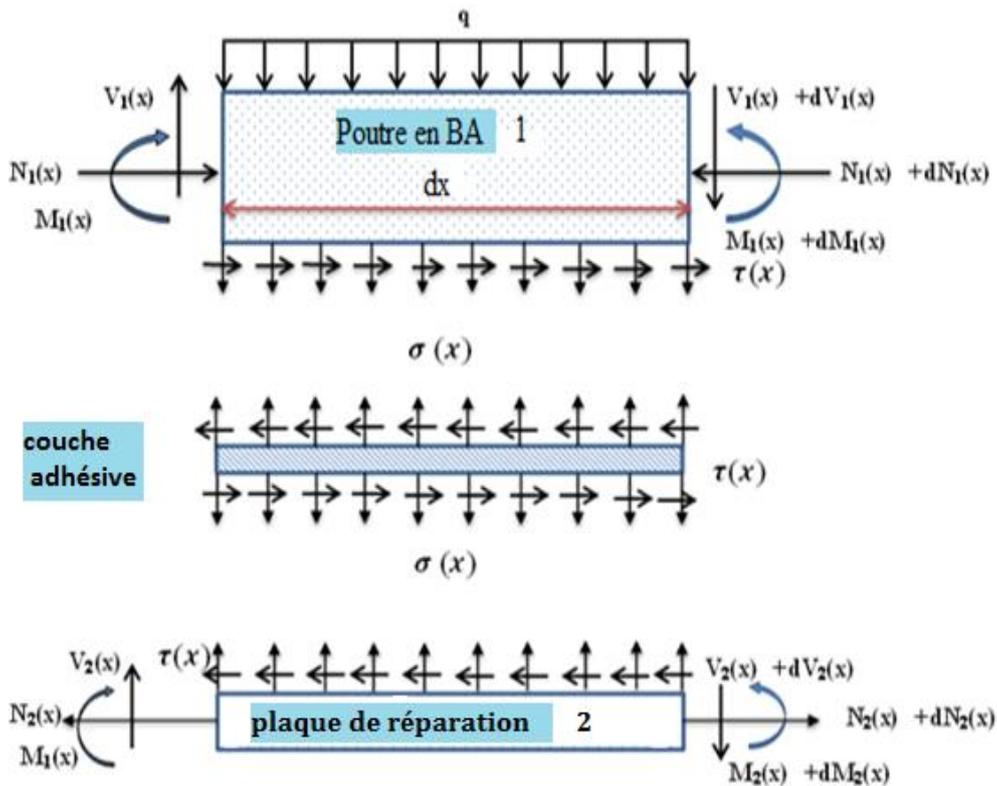
### **Présentation d'Un Modèle Analytique de l'interface béton/Plaque de réparation**

**III-1 : Model analytique: (Tounsi Abdelouahed, 2005)**

Une section différentielle  $dx$  peut être découpée dans la poutre en béton armé FRP (Figure III-1) comme illustré à (la Figure III-2). La poutre composite est constituée de trois matériaux : béton (ou béton BA), couche adhésive et armature FRP. Dans la présente analyse, le comportement élastique linéaire est considéré comme s'appliquant à tous les matériaux ; l'adhésif est supposé jouer uniquement un rôle dans le transfert des contraintes du béton à l'armature en PRF et les contraintes dans la couche adhésive ne changent pas dans le sens de l'épaisseur. (Tounsi Abdelouahed, 2005)



**Figure III-1:** Poutre simplement appuyée et renforcée par une plaque collée



**Figure III-2:** Segment différentiel d'une poutre revêtue de soffite

**III-2 : Répartition des contraintes de cisaillement le long de l'interface FRP-béton: (Tounsi Abdelouahed, 2005)**

Les déformations dans le béton près de l'interface adhésive et de l'armature extérieure en FRP peuvent être exprimées respectivement comme :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \varepsilon_1^M(x) + \varepsilon_1^N(x) \quad (1)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \varepsilon_2^M(x) + \varepsilon_2^N(x) \quad (2)$$

Où  $u_1(x)$  et  $u_2(x)$  sont les déplacements longitudinaux à la base de la poutre en BA et au sommet de la plaque de réparation, respectivement.  $\varepsilon_1^M(x)$  Et  $\varepsilon_2^M(x)$  sont les déformations induites par le moment de flexion aux points de la poutre en BA/plaque de réparation, respectivement et elles s'écrivent comme suit :

$$\varepsilon_1^M(x) = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) \text{ Et } \varepsilon_2^M(x) = \frac{-y_2}{E_2 I_2} M_2(x) \quad (3)$$

Où  $E$  est le module d'élasticité et  $I$  le second moment d'aire. Les indices 1 et 2 désignent respectivement de la poutre en BA et de la plaque de réparation.  $M(x)$  est le moment de flexion tandis que  $y_1$  et  $y_2$  sont les distances entre le bas de l'extrémité adhésive 1 et le haut de l'extrémité de la plaque de réparation à leur centroïde respectif.

$\varepsilon_1^N(x)$  Et  $\varepsilon_2^N(x)$  sont les déformations longitudinales inconnues du béton et de l'armature FRP, respectivement, à l'interface adhésive et elles sont dues aux efforts longitudinaux. Ces souches sont données comme suit :

$$\varepsilon_1^N(x) = \frac{du_1^N(x)}{dx} \quad ; \quad \varepsilon_2^N(x) = \frac{du_2^N(x)}{dx} \quad (4)$$

Où  $u_1^N(u_2^N)$  représente le déplacement adhésif induit par la force longitudinale à l'interface entre la poutre en BA/plaque de réparation supérieure (inférieure) et l'adhésif.

Pour déterminer les déformations longitudinales inconnues  $\varepsilon_1^N(x)$  et  $\varepsilon_2^N(x)$ , les déformations de cisaillement des surfaces adhérentes sont intégrés dans cette analyse. Il est raisonnable de supposer que les contraintes de cisaillement, qui se développent dans l'adhésif, sont continuées à travers l'interface adhésif-adhérent.

De plus, l'équilibre nécessite que la contrainte de cisaillement soit nulle à la surface libre. En utilisant la même méthodologie développée par (Tsai, 1998), cet effet est pris en compte. Une variation parabolique des déplacements longitudinaux  $U_1^N(x,y)$  et  $U_2^N(x,y)$  dans les deux parties de la poutre en BA et de la plaque de réparation est supposée:

$$U_1^N(x,y) = A_1(x)y^2 + B_1(x)y + C_1(x) \quad (5)$$

$$U_2^N(x,y) = A_2(x)y'^2 + B_2(x)y' + C_2(x) \quad (6)$$

### **Chapitre III Présentation d'un modèle analytique de l'interface béton/plaque de réparation**

Où  $\mathbf{y}(\mathbf{y}')$  est un système de coordonnées local avec l'origine à la surface supérieure de l'adhérence supérieure (inférieure) (Figure III 2)

Les contraintes de cisaillement dans les deux la poutre en BA et la plaque de réparation sont données par:

$$\sigma_{xy(1)} = G_1 \gamma_{xy(1)} \quad (7)$$

$$\sigma_{xy'(2)} = G_2 \gamma_{xy'(2)} \quad (8)$$

Avec

$$\gamma_{xy(i)} = \frac{\partial U_i^N}{\partial y} + \frac{\partial W_i^N}{\partial x} ; i = 1, 2 \quad (9)$$

$G_1$  et  $G_2$  sont les modules de cisaillement transverse des surfaces de la poutre en BA/ de la plaque de réparation respectivement. Négligeant les variations de déplacement transversal  $W_i^N$  (induit par les efforts longitudinaux) avec la coordonnée longitudinale  $x$ .

$$\gamma_{xy(i)} \approx \frac{\partial U_i^N}{\partial y} \quad (10)$$

Et les contraintes de cisaillement sont exprimées comme:

$$\sigma_{xy(1)} = G_1 (2A_1 y + B_1) \quad (11)$$

$$\sigma_{xy'(2)} = G_2 (2A_2 y' + B_2) \quad (12)$$

Les contraintes de cisaillement doivent satisfaire aux conditions suivantes :

$$\sigma_{xy(1)}(x, t_1) = \sigma_{xy'(2)}(x, 0) = \tau(x) = \tau_a \quad (13)$$

$$\sigma_{xy(1)}(x, 0) = 0 \quad , \quad \sigma_{xy'(2)}(x, t_2) = 0 \quad (14)$$

$t_1, t_2$  sont l'épaisseur de l'adhésif 1 et 2, respectivement.

La condition (13) découle de la continuité et de l'hypothèse des contraintes de cisaillement uniformes ( $\tau(x) = \tau_a$ ) à travers l'épaisseur de l'adhésif. La condition (14) indique qu'il n'y a pas de contraintes de cisaillement à la surface supérieure de la poutre en BA (c'est-à-dire à  $y = 0$ ) et à la surface inférieure de la plaque de réparation (c'est-à-dire à  $y' = t_2$ ). Ces conditions donnent :

$$\sigma_{xy(1)} = \frac{\tau(x)}{t_1} y \quad (15)$$

$$\sigma_{xy'(2)} = (1 - \frac{y'}{t_2}) \tau(x) \quad (16)$$

Ensuite, avec une relation constitutive de matériau linéaire, la déformation de cisaillement  $\gamma_1$  pour poutre en BA et  $\gamma_2$  pour la plaque de réparation. S'écrit :

$$\gamma_{xy(1)} = \gamma_1 = \frac{\tau_a}{G_1 t_1} y \quad (17)$$

### **Chapitre III Présentation d'un modèle analytique de l'interface béton/plaque de réparation**

$$\gamma_{xy'(2)} = \gamma_2 = \frac{\tau_a}{G_2} \left(1 - \frac{y'}{t_2}\right) \quad (18)$$

Les fonctions de déplacement longitudinal  $U_1^N$  pour la poutre en BA en supérieure et  $U_2^N$  pour la plaque de réparation en inférieure, dues aux efforts longitudinaux, sont données par :

$$U_1^N(y) = U_1^N(0) + \int_0^y \gamma_1(y) dy = U_1^N(0) + \frac{\tau_a}{2G_1 t_1} y^2 \quad (19)$$

$$U_2^N(y') = U_2^N + \int_0^{y'} \gamma_2(y') dy' = U_2^N + \frac{\tau_a}{G_2} \left(y' - \frac{y'^2}{2t_2}\right) \quad (20)$$

Où  $U_1^N(0)$  représente le déplacement à la surface supérieure de l'adhérence supérieure (due aux forces longitudinales) et  $U_2^N$  est le déplacement adhésif induit par la force longitudinale à l'interface entre l'adhésif et l'adhérence inférieure.

A noter qu'en raison de la parfaite adhérence des joints, les déplacements sont continus aux interfaces entre l'adhésif et la poutre en BA/de la plaque de réparation. En conséquence,  $U_2^N$  doit être équivalent au déplacement de l'adhésif inférieur à l'interface et  $U_1^N$  (le déplacement de l'adhésif à l'interface entre l'adhésif et la poutre en BA supérieur) doit être le même que le déplacement de la plaque de réparation supérieur à l'interface. Basé sur l'éq(19) le  $U_1^N$  peut être exprimé comme :

$$U_1^N = U_1^N(y = t_1) = U_1^N(0) + \frac{\tau_a t_1}{2G_1} \quad (21)$$

En utilisant l'éq. (21), Éq. (19) peut être réécrit comme :

$$U_1^N(y) = U_1^N + \frac{\tau_a}{2G_1 t_1} y^2 - \frac{\tau_a t_1}{2G_1} \quad (22)$$

Les forces longitudinales résultantes,  $N_1$  et  $N_2$  pour les surfaces de la poutre en BA et de la plaque de réparation supérieures et inférieure, respectivement, sont :

$$N_1 = b_1 \int_0^{t_1} \sigma_1^N(y) dy \quad (23)$$

Et

$$N_2 = b_2 \int_0^{t_2} \sigma_2^N(y') dy' \quad (24)$$

Où  $\sigma_1^N$  et  $\sigma_2^N$  sont les contraintes normales longitudinales pour les parties de la poutre en BA et de la plaque de réparation supérieure et inférieure, respectivement. En changeant ces contraintes en fonctions des déplacements et en remplaçant les Eqs. (20) et (22) dans les déplacements, Eqs. (23) et (24) peuvent être réécrits comme :

$$N_1 = E_1 b_1 \int_0^{t_1} \frac{dU_1^N}{dx} dy = E_1 A_1 \left( \frac{dU_1^N}{dx} - \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \quad (25)$$

Et

$$N_2 = E_2 b_2 \int_0^{t_2} \frac{dU_2^N}{dx} dy' = E_2 A_2 \left( \frac{dU_2^N}{dx} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \quad (26)$$

### Chapitre III Présentation d'un modèle analytique de l'interface béton/plaque de réparation

Ainsi, les déformations longitudinales induites par les efforts longitudinaux Eq(4) peut être exprimé comme:

$$\varepsilon_1^N(x) = \frac{dU_1^N(x)}{dx} = \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (27)$$

$$\varepsilon_2^N(x) = \frac{dU_2^N(x)}{dx} = \frac{N_2}{E_2 A_2} + \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (28)$$

Substitution d'éqs(27). (28) et (3) dans les équations (1) et (2), respectivement, ces dernières deviennent :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (29)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \frac{-y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (30)$$

Où  $\mathbf{N}(x)$  sont les forces axiales dans chaque la poutre en BA et de la plaque de réparation,  $A$  l'aire de la section transversale. La contrainte de cisaillement dans l'adhésif peut être exprimée comme suit :

$$\tau_a = \tau(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (31)$$

Où  $K_s = \frac{G_a}{t_a}$  est la rigidité de cisaillement de l'adhésif,  $G_a$  et  $t_a$  sont le module de cisaillement et l'épaisseur de l'adhésif, respectivement,  $u_1(x)$  et  $u_2(x)$  sont les déplacements longitudinaux à la base de la poutre en BA et au sommet de la plaque de réparation. En différenciant l'expression ci-dessus, nous obtenons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \cdot \left( \frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right) \quad (32)$$

La considération de l'équilibre horizontal donne :

$$\frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2 \tau(x) \quad (33)$$

$$\frac{dN_2(x)}{dx} = b_2 \tau(x) \quad (34)$$

Où

$$N_2(x) = N(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) \quad (35)$$

Et

$$N_1(x) = -N(x) = -b_2 \int_0^x \tau(x) \quad (36)$$

$b_2$  Est la largeur de la plaque de réparation

En supposant une courbure égale dans la poutre et la plaque de réparation, la relation entre les moments dans les deux poutres en BA/plaque de réparation peut être exprimée comme suit:

### **Chapitre III Présentation d'un modèle analytique de l'interface béton/plaque de réparation**

$$M_1(x) = R M_2(x) \quad (37)$$

Avec

$$R = \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \quad (38)$$

L'équilibre des moments du segment différentiel de la poutre plaquée de la (**Figure III 3**) donne :

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (39)$$

Où  $M_T(x)$  est le moment total appliqué.

Le moment de flexion dans chaque pièce de la poutre en BA et de la plaque de réparation, exprimé en fonction du moment total appliqué et de la contrainte de cisaillement l'interface, est donné par:

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[ M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (40)$$

Et

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[ M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (41)$$

La dérivée première du moment de flexion dans chaque de la poutre en BA et de la plaque de réparation donne :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} \left[ V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) \right] \quad (42)$$

Et

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{1}{R+1} \left[ V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) \right] \quad (43)$$

Substitution d'éqs(29) et (30) dans l'équation(32) et différencier une fois l'équation résultante donne :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = K_s \left( \frac{-y_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} \cdot \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{dM_1(x)}{dx} - \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \cdot \frac{dN_1(x)}{dx} \right) - K_s \left( \frac{t_2}{3G_2} + \frac{t_1}{3G_1} \right) \frac{d^2\tau(x)}{dx^2} \quad (44)$$

Substitution des forces de cisaillement (Eqs. (42) et (43)) et des forces axiales (Eqs(35) et (36)) dans l'Eq (44) donne:

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - K_1 b_2 \left( \frac{(y_1+y_2)(y_1+y_2+t_a)}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} \right) \tau(x) + K_1 \left( \frac{(y_1+y_2)}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} \right) V_T(x) = 0 \quad (45)$$

Où

Dans l'éq (46 a) la méthode de (Tounsi Abdelouahed, 2005) et l'éq (46 b) de (S.T. Smith, 2001) pour calculer  $K_1$ .

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{3G_1} + \frac{t_2}{3G_2}\right)} \quad (46 \text{ a})$$

$$K_1 = \frac{G_a}{t_a} \quad (46 \text{ b})$$

Pour des raisons de simplicité, les solutions générales présentées ci-dessous sont limitées à des chargements qui sont soit concentrés, soit uniformément répartis sur une partie ou sur toute la portée de la poutre, ou les deux. Pour un tel chargement,  $\frac{d^2V_T(x)}{dx^2} = 0$ , et la solution générale de l'Eq. (45) est donné par:

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (47)$$

Ou

$$\lambda^2 = K_1 b_2 \left( \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \quad (48)$$

Et

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left( \frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (49)$$

$B_1$  et  $B_2$  sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites.

### **III -3 : Répartition normale des contraintes le long de l'interface FRP-béton: (Tounsi Abdelouahed, 2005)**

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

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [W_2(x) - W_1(x)] \quad (50)$$

Où  $K_n$  est la rigidité normale de l'adhésif par unité de longueur et peut être déduit comme:

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\frac{\Delta w(x)}{t_a}} \left( \frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (51)$$

$W_1(x)$  et  $W_2(x)$  sont les déplacements verticaux de la poutre en BA et de la plaque de réparation, respectivement. Différenciation Eq. (50) aboutit deux fois à:

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[ \frac{d^2 W_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 W_1(x)}{dx^2} \right] \quad (52)$$

Considérant les relations moment-courbure pour la poutre à renforcer et l'armature extérieure, respectivement :

$$\frac{d^2 W_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1}, \quad \frac{d^2 W_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (53)$$

### **Chapitre III Présentation d'un modèle analytique de l'interface béton/plaque de réparation**

L'équilibre de la poutre en BA et de la plaque de réparation a conduit aux relations suivantes :

**Poutre en BA :**

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = v_1(x) - b_2 \cdot y_1 \cdot \tau(x) \text{ et } \frac{dv_1(x)}{dx} = -b_2 \sigma_n(x) - q \quad (54)$$

**Plaque de réparation:**

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = v_2(x) - b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(x) \text{ Et } \frac{dv_2(x)}{dx} = b_2 \sigma_n(x) \quad (55)$$

Sur la base des équations d'équilibre ci-dessus, les équations différentielles déterminantes pour la déflexion des extrémités poutre en BA/plaque de réparation, exprimées en termes de cisaillement l'interface et de contraintes normales, sont données comme suit :

**Poutre en BA :**

$$\frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 \cdot I_1} b_2 \sigma(x) + \frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 \cdot I_1} \quad (56)$$

**Plaque de réparation:**

$$\frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -\frac{1}{E_2 \cdot I_2} \cdot b_2 \cdot \sigma(x) + \frac{y_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot b_2 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (57)$$

Substitution des éqs(56) et (57) dans la quatrième dérivation de la contrainte normale l'interface obtenue à partir de l'Eq(50) donne l'équation différentielle directrice suivante pour la contrainte normale l'interface :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{E_a \cdot b_2}{t_a} \left( \frac{1}{E_1 \cdot I_1} + \frac{1}{E_2 \cdot I_2} \right) \sigma_n(x) + \frac{E_a \cdot b_2}{t_a} \cdot \left( \frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} - \frac{y_2}{E_2 \cdot I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q E_a}{t_a E_1 \cdot I_1} = 0 \quad (58)$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} (C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)) + e^{\beta x} (C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)) - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (59)$$

Pour de grandes valeurs de  $x$ , on suppose que la contrainte normale se rapproche de zéro, et par conséquent  $C_3 = C_4 = 0$ . La solution générale devient donc:

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} (C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)) - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (60)$$

Ou

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a \cdot b_2}{4 t_a} \left( \frac{1}{E_1 \cdot I_1} + \frac{1}{E_2 \cdot I_2} \right)} \quad (61)$$

$$n_1 = \left( \frac{y_1 E_2 \cdot I_2 - y_2 E_1 \cdot I_1}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} \right) \quad (62)$$

Et

**Chapitre III Présentation d'un modèle analytique de l'interface béton/plaque de réparation**

$$n_2 = \frac{E_2.I_2}{b_2(E_1.I_1 + E_2.I_2)} \quad (63)$$

$C_1$  et  $C_2$  sont des coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites.

**III-4 : Application des conditions aux limites:**(Tounsi Abdelouahed, 2005)

Les mêmes cas de charge utilisés par (S.T. Smith, 2001) sont considérés dans la présente méthode.

Une poutre simplement appuyée est étudiée et soumise à une charge uniformément répartie et à une charge ponctuelle positionnée arbitrairement, comme illustré à la (Figure III -3). Cette section dérive les expressions du cisaillement interfacial et des contraintes normales pour chaque cas de charge en appliquant des conditions aux limites appropriées.

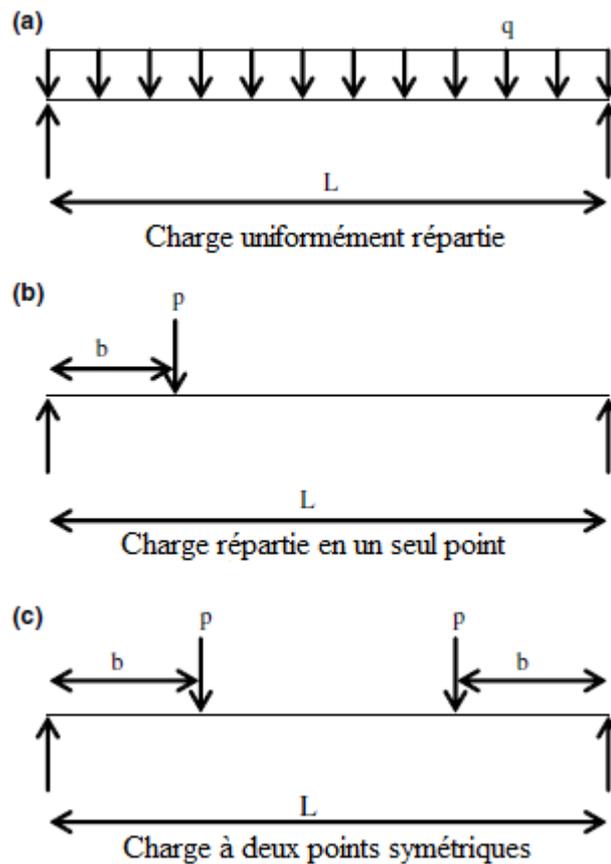


Figure III 3: Cas de charge

**III-4-1: Contrainte de cisaillement l'interface pour une charge uniformément répartie :**

Comme décrit par (S.T. Smith, 2001), la contrainte de cisaillement l'interface pour ce cas de charge en tout point est écrite comme :

$$\tau(x) = \left[ \frac{m_2 a}{2} (L - a) - m_1 \right] \frac{q \cdot e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 \cdot q \left( \frac{L}{2} - a - x \right) \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (64)$$

### **Chapitre III Présentation d'un modèle analytique de l'interface béton/plaque de réparation**

Où  $q$  est la charge uniformément répartie et  $x$ ,  $a$ ,  $L$  et  $L_p$  sont définis à la Figure.

$$m_2 = \frac{K_1 y_1}{E_1 I_1} \quad (65)$$

#### **III-4-2 : Contrainte de cisaillement l'interface pour une charge ponctuelle:**

La solution générale pour la contrainte de cisaillement l'interface pour ce cas de charge est :(S.T. Smith, 2001)

**a<b:**

$$\tau(x) \begin{cases} \frac{m_2}{\lambda} P. a \left(1 - \frac{b}{L}\right) . e^{-\lambda x} + m_1. p \left(1 - \frac{b}{L}\right) - m_1. P. \cosh(\lambda. x). e^{-k} & 0 \leq x \leq (b - a) \\ \frac{m_2}{\lambda} P. a \left(1 - \frac{b}{L}\right) . e^{-\lambda x} - m_1. \frac{Pb}{L} + m_1. P. \sinh(k). e^{-\lambda x} & (b - a) \leq x \leq L_p \end{cases} \quad (66)$$

**a>b:**

$$\tau(x) = \frac{m_2}{\lambda} Pb \left(1 - \frac{a}{L}\right) . e^{-\lambda x} - m_1. P \frac{b}{L} \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (67)$$

Où  $P$  est la charge concentrée et  $k=\lambda(b-a)$ . L'expression de  $m_1$ ,  $m_2$  et prend en considération la déformation de cisaillement des Poutre en BA/ plaque de réparation, qui est négligée par (S.T. Smith, 2001)

#### **III-4-3 : Contrainte de cisaillement l'interface pour deux charges ponctuelles:**

La solution générale pour la contrainte de cisaillement l'interface pour ce cas de charge est :(S.T. Smith, 2001)

**a<b:**

$$\tau(x) \begin{cases} \frac{m_2}{\lambda} P. a . e^{-\lambda x} + m_1. p - m_1. P. \cosh(\lambda. x). e^{-k} & 0 \leq x \leq (b - a) \\ \frac{m_2}{\lambda} P. a . e^{-\lambda x} + m_1. P. \sinh(k). e^{-\lambda x} & (b - a) \leq x \leq \frac{L_p}{2} \end{cases} \quad (68)$$

**a>b:**

$$\tau(x) = \frac{m_2}{\lambda} P b e^{-\lambda x} \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (69)$$

#### **III-4-4 : Contrainte normale l'interface : expression générale pour les trois cas de charge :**

Comme décrit par(S.T. Smith, 2001), les constantes  $C_1$  et  $C_2$  dans l'Eq (60) sont déterminés en utilisant les conditions aux limites appropriées et ils s'écrivent comme suit :

$$C_1 = \frac{E_a}{2. \beta^3. t_a. E_1. I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3}\right) \quad (70)$$

$$C_2 = -\frac{E_a}{2. \beta^3. t_a. E_1. I_1} . M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (71)$$

Ou

### **Chapitre III Présentation d'un modèle analytique de l'interface béton/plaque de réparation**

$$n_3 = \frac{E_a \cdot b_2}{t_a} \left( \frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} - \frac{y_2}{E_2 \cdot I_2} \right) \quad (72)$$

Les expressions ci-dessus pour les constantes  $C_1$  et  $C_2$  ont été laissées en termes de moment de flexion  $M_T(\mathbf{0})$  et d'effort tranchant  $V_T(\mathbf{0})$  à l'extrémité de la plaque de réparation. Avec les constantes  $C_1$  et  $C_2$  déterminées, la contrainte normale l'interface peut alors être trouvée en utilisant Eq (60) pour les trois cas de charge.



## **Chapitre IV**

### **Modélisation Numérique de l'interface Béton/Renfort**

### IV-1 : Introduction:

Des problèmes, qui dans un passé récent ont été considérés comme insolubles par les méthodes analytiques classiques, sont maintenant aisément résolus par les méthodes numériques dont la plus utilisée est la Méthode des Eléments Finis ou 'MEF'. De ce fait, la complexité des calculs n'est plus d'actualité scientifique, surtout par l'avènement de l'ordinateur qui a amené les sciences de l'ingénieur au summum jamais atteint auparavant.

### IV-2 : Modélisation en élément finis :

#### IV-2-1: Définition :

La méthode des éléments finis a pour but de remplacer un problème mathématique défini dans un milieu continu et sous la forme d'équations différentielles ou d'intégrales, par un problème discret sous forme matricielle qu'il est possible de résoudre numériquement.

Les méthodes d'éléments finis sont d'un emploi courant pour la conception, le calcul et la vérification des ouvrages de génie civil. La validité des résultats obtenus dépend de la pertinence des choix réalisés lors de la modélisation.

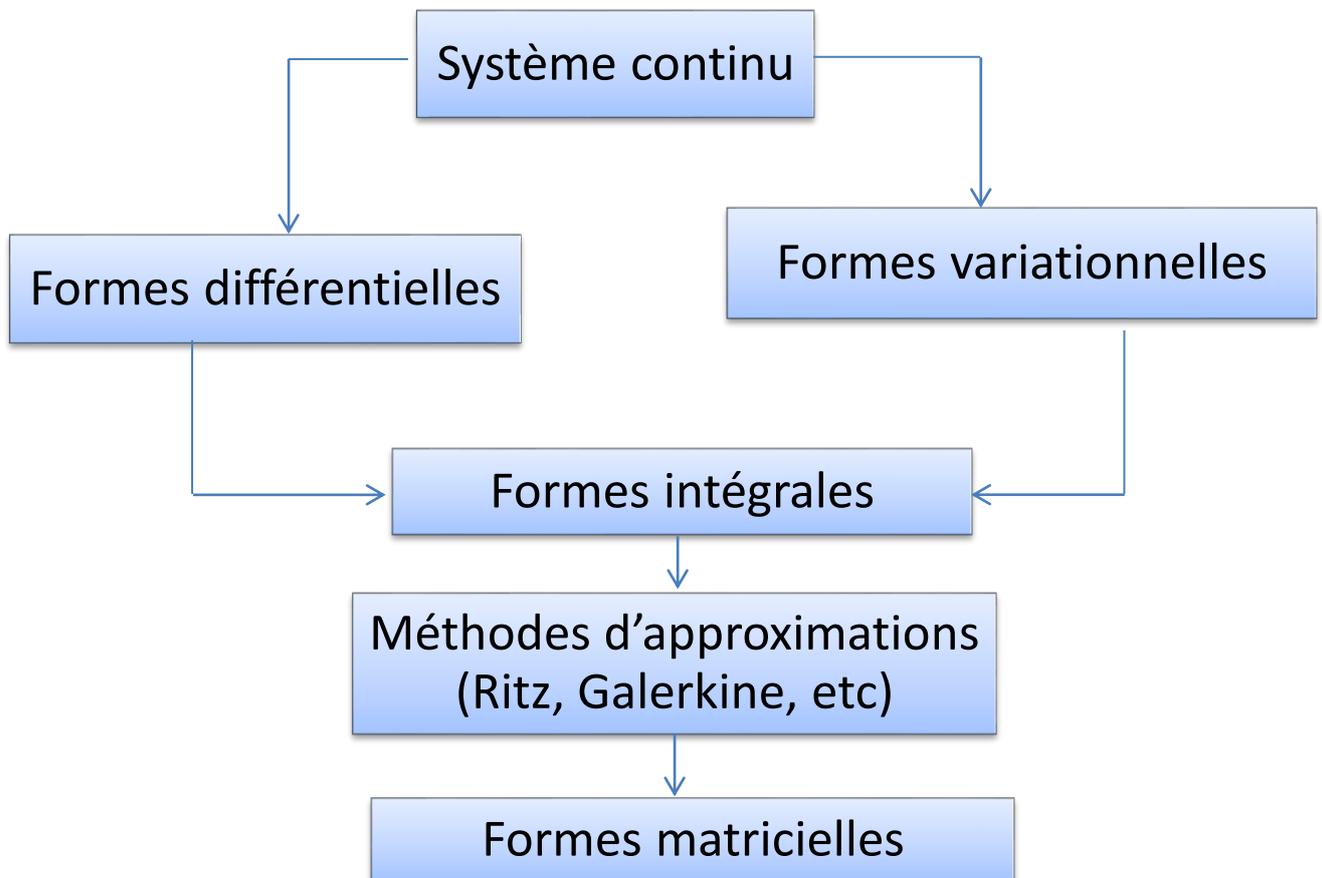


Figure IV-1: Méthodes d'approximations

La **Figure IV-1** permet de distinguer un certain nombre de méthodes (résidus pondérés ou méthodes variationnelles) utilisées afin d'obtenir la forme intégrale du problème mathématique initial. Un système physique peut être formulé de façon équivalente par une formulation variationnelle ou par un système d'équations différentielles. La transformation puis la discrétisation de cette forme intégrale conduit à une équation matricielle qui sera résolue numériquement.

#### **IV-2-2 : Avantage de la méthode des éléments finis :**

La MEF étant versatile, elle présente des avantages par rapport aux autres méthodes numériques :

- Elle est applicable à tout type de problème dit de champs, d'analyses de contraintes, de transfert thermique, etc,
- Elle n'impose aucune restriction géométrique, le corps ou le domaine à modéliser peut avoir une forme quelconque,
- Elle n'impose aucune restriction sur les conditions aux limites et le type de chargement,
- Elle n'impose aucune restriction sur les propriétés du matériau. Ces propriétés ne sont donc pas réduites à l'isotropie, et peuvent changer d'un élément à un autre,
- Les éléments possédant différents comportements (modèles mathématiques) peuvent être combinées (ex : voile-portique dans une structure 3D), donc un seul modèle d'élément fini (EF) peut contenir des barres, des poutres, des plaques, etc.
- La structure modélisée par les éléments finis représente le possible à la structure réelle ou au domaine à analyser.
- L'approximation peut être facilement améliorée en développant la taille du maillage en augmentant le nombre d'éléments.

#### **IV-2-3 : Pourquoi choisir la MEF ? :**

Les procédés de conception de calcul et d'analyse reposent sur le calcul à la main, l'expérience ou le calcul automatique et la simulation par ordinateur.

- La MEF c'est la méthode de simulation par ordinateur la plus utilisée par les ingénieurs. C'est une technique essentiellement numérique à partir de laquelle les équations gouvernantes (systèmes d'équations différentielles), sont représentées sous une forme matricielle très adaptée à une solution automatique par ordinateur.
- Elle est intégrée dans toutes les applications de logiciels commerciaux de calcul des structures à interface graphique (GUI).

**IV-2-4 : Idée de base de la Méthode des Eléments Finis:**

On apprend comme ingénieur débutant à calculer les surfaces et volumes de corps de forme quelconque en les décomposant en un ensemble de corps élémentaires de formes connues pour ensuite l'appliquer au calcul de moments d'inertie ou de centres de gravité. Ce mode de pensée a conduit à la Méthode des Eléments Finis (MEF), ou analyse par élément finis (AEF), qui est basée sur l'idée de construire un objet compliqué avec des blocks simples, c'est à dire diviser l'objet compliqué en un petit nombre de pièces facilement manipulables.

On peut rencontrer l'application de cette idée simple aussi bien dans la vie de tous les jours qu'en technologie et pour tous les problèmes de l'ingénieur.

**IV-2-5 : Procédures de base de la méthode des éléments finis :**

Les différentes étapes pour l'application de la méthode des éléments finis seront décrites d'une manière générale.

**IV-2-5-1 : Choix du type d'élément et discrétisation :**

La première étape consiste à choisir le type d'élément le plus adapté au problème donné , ensuite on discrétise le milieu continu en un certain nombre d'éléments. En général, les points suivants sont à prendre en considération dans la sélection du type d'élément.

**IV-2-5-2 : Type d'élément :**

➤ La sélection de l'élément sera fonction du type de problème à résoudre, généralement : ils sont groupés en quatre classes :

1. les contraintes planes ; les déformations planes ; axisymétriques (problème à deux dimensions).
2. la flexion des plaques.
3. les coques.
4. l'analyse des solides tridimensionnels.

➤ On distingue plusieurs classes d'éléments finis suivant leur géométrie :

- **Les éléments unidimensionnels (1D)** : sont utilisés de façon individuelle ou associée des plaques pour modéliser les raidisseurs. Exemple : barre, poutre rectiligne ou courbe-
- **Les éléments bidimensionnels (2D)**: Élasticité plane : (déformation ou contrainte plane). Exemple : plaque en flexion, coques courbes, de forme triangulaire ou quadrangulaire.
- **Les éléments tridimensionnels (3D)**: élément de volume, ou coques épaisses. Les éléments axisymétriques : qui constituent une classe bien particulière.

➤ Dans chaque groupe des différents niveaux de précision peuvent être atteints. Ceci dépend du nombre de degrés de liberté associé avec le type d'élément. Les points nodaux se trouvent généralement sur les frontières des éléments bien que des nœuds internes peuvent aussi être inclus dans certains éléments pour augmenter leur efficacité. Généralement, avec l'augmentation de l'ordre de l'élément, celui-ci devient plus précis et plus coûteux. Cependant certaines conditions doivent être satisfaites dans la sélection du type d'élément pour assurer une bonne convergence (Convergence vers la solution exacte). Ces conditions sont :

- le champ des déplacements à l'intérieur de l'élément doit être continu.
- Le modèle du déplacement doit inclure un état de déformation constante

(L'élément doit être capable de reproduire un champ de déformation constant, si les déplacements nodaux le requièrent).

➤ L'élément doit être capable de reproduire un mouvement de corps rigide : par exemple quand les degrés de liberté nodaux correspondent à un mouvement de corps rigide, l'élément doit avoir une déformation égale à zéro et des forces nodales nulles. Ceci est un cas particulier du critère de la déformation constante.

➤ L'élément doit être compatible, il ne doit pas y avoir de vide entre deux éléments. L'élément qui ne remplit pas cette condition est dit incompatible ou non conforme.

Cependant un élément incompatible peut être valide et sa convergence maintenue si

Les incompatibilités disparaissent en augmentant le maillage et si l'élément se rapproche d'un état de déformation constante.

➤ L'élément n'a pas une direction privilégiée, c'est-à-dire que l'élément doit être géométriquement invariant et donne les mêmes résultats pour n'importe quelle orientation de l'élément.

#### **IV-2-5-3 : Taille de l'élément :**

En général plus le maillage est fin plus les résultats obtenus sont meilleurs, mais en même temps un grand effort de programmation est requis. Le nombre d'éléments utilisés sera la fonction du type de la structure à analyser, mais généralement plus d'éléments sont requis dans les régions où les contraintes varient rapidement que dans les régions où elles varient graduellement. Cependant pour les éléments complexes les maillages grossiers donneront des résultats aussi bons que ceux des maillages fins ayant des éléments simples.

**IV-2-6 : Domaines d'application de la MEF :**

Les principaux domaines d'application de la MEF sont au nombre de trois :

- Problèmes d'équilibre et statique : dans lequel le comportement du système ne varie pas avec le temps,
- Problèmes de dynamique et de stabilité (valeurs propres): ce sont des extensions des problèmes d'équilibre pour lesquelles des valeurs spécifiques ou critiques de certains paramètres sont déterminés,
- Problèmes de propagation : ils concernent les problèmes où les phénomènes dont le comportement est dépendant du facteur temps.

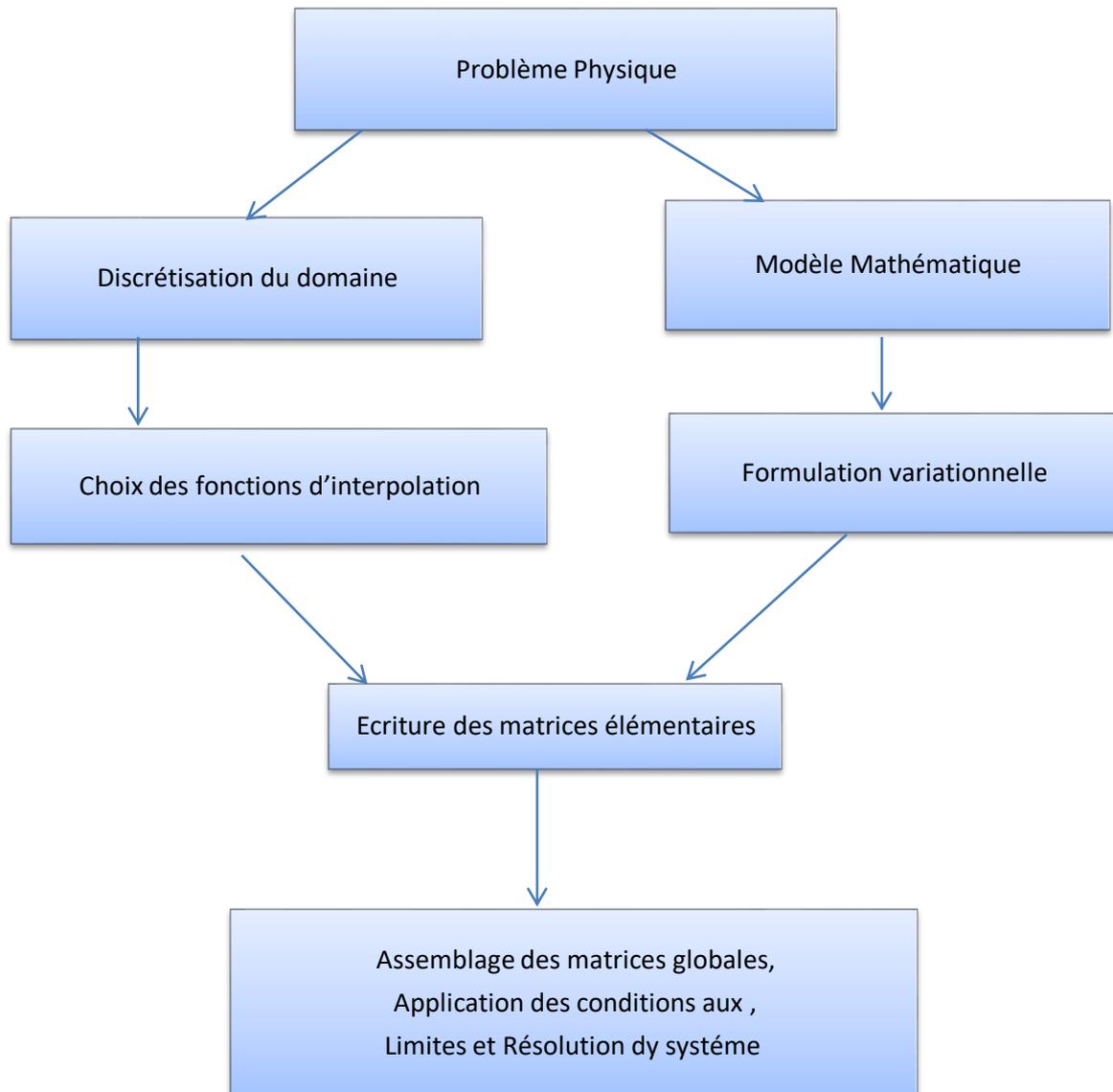
<b>Spécialité</b>	<b>Problèmes d'équilibres</b>	<b>Problèmes de valeurs propres</b>	<b>Problèmes de propagation</b>
Génie Civil - structure	Analyse statique de structures : treillis, portiques, plaque, coques, voiles, ponts,  Béton précontraint	Fréquences et modes propres et stabilité des structures.	Réponse des structures à des charges accidentelles (séisme, incendie)
Géotechnique	Analyse des excavations, stabilité des talus, murs de soutènement, interaction sol-structure, analyse des contraintes dans les sols	Fréquence et modes propres des ouvrages enterrés et semi enterrés, et problèmes d'interaction sol-structure	Problèmes de sol-structure dépendant du temps.  Propagation de contraintes dans les sols et les roches
Hydraulique	Analyse d'écoulements potentiels, d'écoulements à surface libre, écoulement visqueux.  Analyse de structures hydrauliques et barrages, etc.	Périodes et modes propres de bassins superficiels, digues, mouvements des liquides dans des bacs(conteneurs)rigides ou flexibles	Analyse de problèmes d'écoulements turbulents et propagation d'ondes. Ecoulements hydrodynamiques

**Tableau IV-1:** Résumé ces types d'applications MEF

**IV-2-7 : Les grandes lignes de la méthode:**

Dans ce paragraphe, nous essayerons de présenter d'une manière simplifiée, les étapes d'application de la méthode des éléments finis et les outils nécessaires à sa mise en œuvre.

La résolution d'un problème physique par éléments finis suit grosso modo les étapes suivantes (Figure IV-2) :



**Figure IV-2:** Etapes générales de la méthode des éléments finis

**➤ Etape 1 : Formulation des équations gouvernantes et des conditions aux limites**

La majorité des problèmes d'ingénierie sont décrits par des équations différentielles aux dérivées partielles associées à des conditions aux limites définies sur un domaine et son contour. L'application de la MEF exige une réécriture de ces équations sous forme intégrale. La formulation faible est souvent utilisée pour inclure les conditions aux limites.

**➤ Etape 2 : Division du domaine en sous domaines**

Cette étape consiste à discrétiser le domaine en éléments et calculer les connectivités de chacun ainsi que les coordonnées de ses nœuds. Elle constitue ainsi la phase de préparation des données géométriques.

**➤ Etape 3 : Approximation sur un élément**

Dans chaque élément la variable tel que le déplacement, la pression, la température, est approximée par une simple fonction linéaire, polynomiale ou autre. Le degré du polynôme d'interpolation est relié au nombre de nœuds de l'élément. L'approximation nodale est appropriée. C'est dans cette étape que se fait la construction des matrices élémentaires.

**➤ Etape 4 : Assemblage et application des conditions aux limites**

Toutes les propriétés de l'élément (masse, rigidité,...) doivent être assemblées afin de former le système algébrique pour les valeurs nodales des variables physiques. C'est à ce niveau qu'on utilise les connectivités calculées à l'étape 2 pour construire les matrices globales à partir des matrices élémentaires.

**➤ Etape 5 : Résolution du système global**

Le système global peut être linéaire ou non linéaire. Il définit soit un problème d'équilibre qui concerne un cas stationnaire ou statique ou un problème de valeurs critiques où il faut déterminer les valeurs et vecteurs propres du système qui correspondent généralement aux fréquences et modes propres d'un système physique.

Un problème de propagation qui concerne le cas transitoire (non stationnaire) dans lequel

il faut déterminer les variations dans le temps des variables physiques et la propagation d'une valeur initiale. Les méthodes d'intégration pas à pas sont les plus fréquentes telles que, méthode des différences finies centrales, méthode de Newmark, méthode de Wilson.

A ces méthodes doivent être associées des techniques d'itération pour traiter le cas non linéaire. La plus célèbre est la méthode de Newton Raphson.

**IV-2-8 : Les différentes formulations de la méthode des éléments finis:**

En général, le principe de toute méthode de discrétisation consiste à remplacer un milieu continu (structure) comportant une infinité de modes de déformations ou de tensions par un milieu idéalisé ne possédant qu'un nombre fini de tels modes.

On va alors définir une approximation de la solution (déplacement et/ou contraintes) non pas pour l'ensemble de la structure, mais pour chacun de ses éléments en les réduisant à un petit nombre de mode décrits par des fonctions simple. Ils sont choisis parmi les plus fondamentaux pour la description du comportement de l'élément dans la structure.

La structure entière est donc idéalisée par un nombre fini de modes qui se transmet entre chaque élément de manière bien précise. Les inconnues du problème sont alors les paramètres qui représentent l'intensité de chaque mode.

Il existe plusieurs manières d'approcher un système réel, cette approche consiste à formuler un champ qui porte sur tout le système ou une partie de celui-ci, les différentes formulations existantes sont les suivantes :

**IV-2-8-1 : Formulation en déplacement:**

C'est une formulation selon laquelle l'approximation est faite sur le champ de déplacements de façon que l'intégrabilité du champ de déformations soit assurée à l'intérieur de l'élément. L'élément est dit "cinématiquement admissible".

➤ Cette condition est automatiquement réalisée lorsque le champ de la déformation est déduit à un champ de déplacement continu et éventuellement différentiable.

Si la continuité du champ de déplacement est vérifiée aux surfaces de séparation des éléments, le modèle est dit **Co-déformable ou compatible**.

Il existe un autre groupe d'éléments où l'on satisfait plus que les conditions de compatibilité, ce modèle est alors dit **sur-conforme ou sur-compatible**.

En général, dans ce modèle, on assure au moins la continuité au noeud du tenseur complet des déformations, y compris le changement des courbures.

**IV-2-8-2 : Formulation équilibre:**

C'est une formulation dans laquelle l'approximation se fait sur le champ de tension de façon que les équations d'équilibre soient satisfaites à l'intérieur de chaque élément.

**IV-2-8-3 : Formulation hybride:**

Dans cette formulation, le plus souvent on définit la solution en termes d'approximation, d'une part du champ de contraintes interne en équilibre, d'autre part de déplacements sur la frontière de l'élément.

**IV-2-8-4 : Formulation mixte:**

Dans celle-ci, on définit la solution en terme d'approximation de deux ou plusieurs champs indépendants; généralement, le champ des déplacements et celui des contraintes, étendues à tout

l'élément ; en général cette formulation conserve les paramètres inconnus de tous les champs comme **DDL** ; sa mise au point peut être longue et couteuse ; elle peut toutefois être d'excellente qualité.

#### **IV-2-8-5 : Formulation en déformation:**

C'est une formulation dans laquelle l'approximation se fait sur le champ de déformation de façon telle que les équations de compatibilité et d'équilibre soient satisfaites à l'intérieur de l'élément. Le champ de déplacement est déduit du champ de déformations qui est continu et différentiable. **Ce modèle est sur compatible.**

#### **IV-2-9 : Support informatique et logiciels incorporant la MEF:**

##### ➤ **Exemples de logiciels:**

La possibilité d'une application presque généralisée de la MEF, lui a permis d'être un outil puissant et versatile pour résoudre une large variété de problèmes.

De ce fait, un grand nombre de logiciels professionnels ont été développés pour résoudre un grand nombre de problèmes d'ingénieur et de génie civil en particulier.

On peut citer un certain nombre de logiciels pouvant être utilisés sur ordinateurs personnels:

➤ **SAP, ETAPS, ROBOT** - Analyse statique/dynamique, linéaire/non linéaire, effet de température, sols et structures etc. ayant acquis une popularité d'utilisation dans les bureaux d'études de génie civil.

➤ **ANSYS** -Utilisation pour une analyse plastique, fracture mécanique, hautes températures et retrait, coques et systèmes tubulaires,

➤ **ABAQUS** -Utilisation pour des analyses non linéaires et dynamiques,

➤ **PAFEC** -Utilisation pour l'analyse des structures avec différents types de propriétés .Analyses de contraintes, déplacements, stabilité et fréquences, fatigue, optimisation et transfert de chaleur,

➤ **NAG Library** : Bibliothèque de sous-programmes d'Eléments Finis en langage Fortran pouvant être assemblés et appelés par le biais d'un programme principal pour résoudre un problème précis. (Bon pour l'apprentissage didactique de la mise en œuvre de la MEF),

➤ **MATLAB** (Utilisation pour tous les problèmes d'ingénieurs, ayant acquis une popularité parmi les ingénieurs de mécanique, électrotechniques et d'électronique)

➤ **MATHEMATICA** (Ensemble de programmes et sous programmes pour l'analyse matricielle des structures et par MEF)

**Et bien d'autres comme le cas dans notre présente analyse, le logiciel utilisé est ANSYS.**

### IV-3 : LOGICIEL ANSYS :

#### IV-3-1 : Présentation du logiciel :

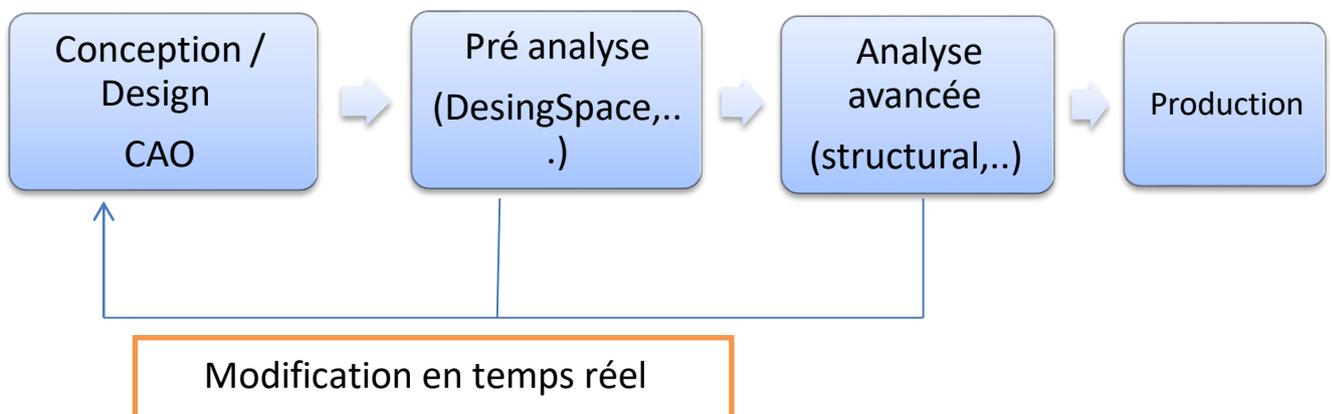
ANSYS est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique . L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

La fiabilité des résultats résulte de la variété des modèles de matériaux disponibles, de la qualité de la bibliothèque d'éléments, de la robustesse des algorithmes de résolution et de la possibilité de modéliser n'importe quel type de produit (des pièces individuelles aux ensembles complexes contenant des centaines de composants en interaction par contacts ou par mouvements relatifs).

Le confort et la facilité d'utilisation du logiciel permet aux utilisateurs de se concentrer sur la partie la plus importante du processus de simulation, c'est à dire l'interprétation des résultats et l'impact des variations des paramètres de conception sur la performance du modèle.

Quelles que soient la taille ou la complexité des modèles, la solution de calcul de structures d'ANSYS intègre des algorithmes parallèles qui accélèrent le calcul pour ces modèles de grande taille.

Les outils intégrés au logiciel permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts( **figure IV-3**).



**Figure IV-3:**Cycle de conception

En effet, intégrer l'Analyse de Conception dans un bureau d'études, c'est lui permettre de décupler ses capacités d'innovation et de prendre une réelle avance technologique. L'outil de simulation se présente sous plusieurs niveaux de licences.

Les logiciels de calculs par éléments finis sont généralement peu accessibles car ils nécessitent des connaissances dans le calcul. L'interface **WORKBENCH** qui encapsule les différents niveaux de l'outil de simulation et ses modules a été conçue pour être utilisée sans avoir une formation basée sur les éléments finis. L'interface est très intuitive, permettant une prise en main très rapide du logiciel. Les difficultés du calcul par éléments finis sont ici gommées, notamment par l'automatisation de la reconnaissance des zones de contacts et la génération du maillage.

Ainsi, ANSYS satisfera l'ensemble de la chaîne de conception : du concepteur du bureau d'étude qui pourra effectuer des calculs rapides de pré-dimensionnement à l'ingénieur de calcul qui réalisera des études plus précises (réponse spectrale, non linéarité...)

Il existe deux solutions pour effectuer les modélisations:

- réaliser un fichier .txt qu'ANSYS est capable de lire, en faisant «file », «Read input from »
- ou directement en utilisant les fonctions du préprocesseur afin de réaliser la structure, le maillage et les calculs.

#### **IV-3-2 : Environnements logiciels:**

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

- **ANSYS classic** : 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 classic* 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 ré-utilisant 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 généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

#### **IV-3-3 : Interface utilisateur :**

L'interface utilisateur est basée sur l'environnement X windows conjointement à OSF/Motif. La partie graphique est interactive et permet la visualisation 3D, incluant les gradients, les

isosurfaces, les flux de particules et les coupes de volumes. Il est possible de générer des images en postscript, HPGL ou TIFF.

#### **IV-3-4 : Préprocesseur :**

La phase de préprocesseur est celle où sont spécifiées les données. L'utilisateur peut choisir le système de coordonnées et le type d'éléments, définir des constantes et des propriétés de matériaux, créer des modèles solides et les mailler, ainsi que définir des équations de couplage et contraintes. L'utilisateur peut aussi exécuter un programme qui lui indiquera la taille des fichiers générés, la mémoire nécessaire, le temps d'exécution et le *wavefront* nécessaire. Le maillage peut être de 3 types :

- maillage conforme (seulement des briques)
- maillage libre (tétraédrique)
- maillage adaptatif (itératif)

#### **IV-3-5 : Solveur :**

Le type d'analyse sélectionné détermine les équations qui seront utilisées par le solveur. Les catégories disponibles incluent :

- ◆ structure, thermique, champ EM , champ électrique ,électrostatique ,fluides ,acoustique
- ◆ champs couplés : ceci signifie qu'il est possible de résoudre simultanément plusieurs aspects (par exemple, la thermo-mécanique, l'hydro-mécanique,...etc).

Chaque catégorie peut encore inclure différents types d'analyses spécifiques (statique ou dynamique, etc.). Dans le simulateur ANSYS utilisé dans nos travaux, il existe différents algorithmes de résolution pour traiter les problèmes à éléments finis. On peut citer deux classes de méthodes :

- ◆ Les méthodes de résolution directes.
- ◆ Les méthodes itératives (gradient conjugué par exemple).

##### **IV-3-5-1 : Les méthodes de résolution directes :**

Ces méthodes aboutissent à la solution en un nombre fini d'opérations. Elles sont adaptées au mode de stockage de la matrice [K]. Si cette matrice est symétrique, la méthode de décomposition de Choleski est généralement utilisée. Si elle ne l'est pas, les logiciels recourent à la méthode d'élimination de Gauss. Les méthodes directes sont employées pour des systèmes de taille moyenne (inférieure à quelques milliers d'inconnues). Le temps de calcul est sensiblement proportionnel au nombre d'inconnues.

## IV-3-5-2 : Les méthodes itératives :

Dans ce cas, la solution approchée est atteinte en un nombre infini d'opérations convergent vers la solution analytique. Ces méthodes intègrent donc un critère d'arrêt, lorsque la solution approchée est suffisamment proche de la solution analytique. Si le système à résoudre est:

$$[K].\{U\} = \{B\}$$

Alors, l'algorithme de résolution cherche à diminuer le résidu  $\|\mathcal{R}\|$ , qui s'écrit :

$$\|\mathcal{R}\| = \|[K].\{U_i\} - \{B\}\|$$

Où  $\{U_i\}$  est la solution approchée du problème à l' $i$ ème itération.

Suivant le type de méthode itérative, la norme  $\|X\|$  peut être la norme euclidienne ou la norme du maximum. De plus, la plupart des algorithmes sont basés sur la descente du gradient :

faire évoluer  $\{U_i\}$  les dans le sens de  $-\text{grad}(\|\mathcal{R}\|)$ . Le critère d'arrêt est soit

$$\|\mathcal{R}\| < \varepsilon_1$$

soit  $\|U_i - U_{i-1}\| < \varepsilon_2$ . Le choix de  $\varepsilon_1$  ou de  $\varepsilon_2$  dépend de ce que l'on considère comme petit.

Les méthodes itératives sont employées pour des systèmes de grande taille, où le traitement par la méthode directe serait prohibitif en termes de temps de calcul. Finalement, ce type de méthode est un compromis entre l'exactitude et le coût de calcul.

IV-3-6 : Procédure générale ANSYS:

Réaliser un modèle éléments finis sur ANSYS peut se résumer aux trois grandes étapes suivantes :

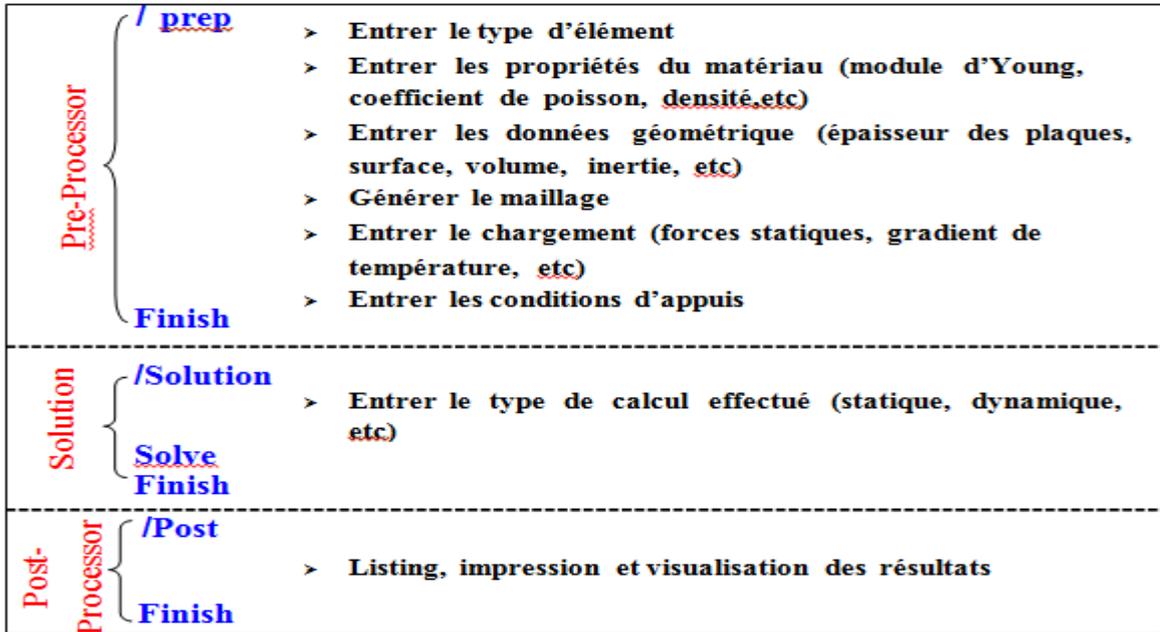


Figure IV-4: Schéma d'utilisation classique d'ANSYS

La figure IV-5 expose le cheminement d'un calcul éléments finis sur ANSYS à travers un exemple de plaque en traction.

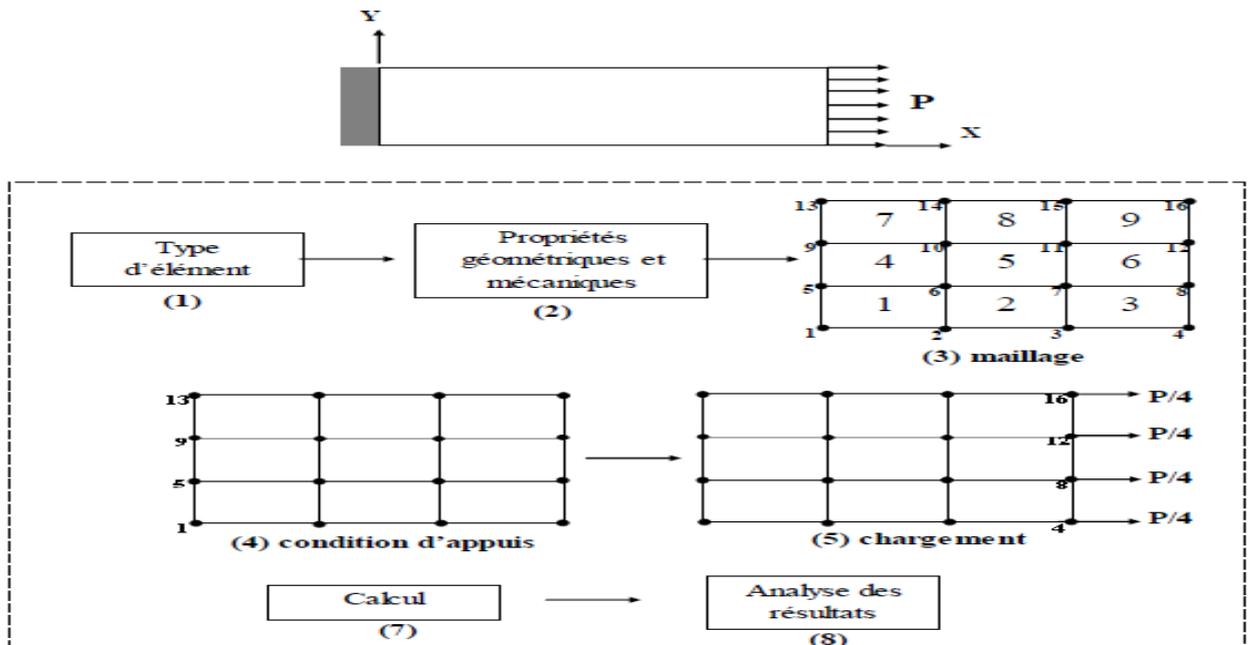


Figure IV-5: Exemple de la modélisation d'une plaque en traction

**IV-3-7 : La prise en compte de la fissuration dans les calculs :**

L'hypothèse de non fissuration repose sur la supposition d'un matériau parfaitement homogène. Or il est évident que ce cas ne saurait exister, car le béton lors de sa mise en forme, de sa prise ou encore de sa mise en chargement subit différentes contraintes internes et externes qui entraînent l'apparition de fissures. Le logiciel nous permet de tenir compte de cette fissuration, de la quantifier et de l'orienter dans l'espace. Cela implique cependant quelques modifications dans la programmation du volume de béton, à savoir principalement un passage d'un modèle SOLID45 à un modèle SOLID65 qui possède les mêmes caractéristiques géométriques et une répartition d'éléments égale au SOLID45 mais prend en compte la fissuration. Par ailleurs, il est nécessaire de spécifier à la modélisation cette volonté de prendre en compte la fissuration.

**IV-3-8 : Modèle élément finis :**

Choisie par le logiciel ANSYN workbench, est une méthode général pour résoudre les problèmes industriels en construisant très efficacement des simulation .Elle est actuellement appliquée dans des domaines très divers pour résoudre des problèmes de mécanique des solides et/ou de mécanique des fluides, des problèmes thermiques des fluides, d'électricité, d'électromagnétismeetc ...

L'étude théorique sur le comportement en flexion de poutres en béton initialement endommagés réparés par des plaques en fibre de carbone a été réalisée en utilisant le progiciel d'éléments finis ANSYS. Ce logiciel offre un élément spécial pour modéliser les éléments en béton armé appelé Solid65 qui est un élément brique à huit noeuds. Les renforts en acier ont été modélisés à l'aide de Link8 qui est un élément bar à deux noeuds et l'élément Solid45 a été utilisé pour les composites en fibre de carbone (élément solide à huit noeuds). L'interface béton-CFRP a été prise en compte par l'utilisation de l'élément d'interface Inter205 qui est aussi un élément à 8 noeuds avec épaisseur initiale égale à zéro. Chaque noeud de ces éléments a trois degrés de liberté de translation dans les directions x, y et z.(ANSYS Release V. 12. ANSYS, Inc., Manuals set. SAS IP, Inc. USA, 2009)

## IV-3-9 : Solide en béton armé 3D:

## IV-3-9-1 : Description de l'élément SOLID65:

SOLID65 est utilisé pour la modélisation 3D de solides avec ou sans barres d'armature (rebar). Le solide est capable de se fissurer en traction et de s'écraser en compression. Dans les applications concrètes, par exemple, la capacité solide de l'élément peut être utilisée pour modéliser le béton tandis que la capacité d'armature est disponible pour modéliser le comportement des armatures. D'autres cas pour lesquels l'élément est également applicable seraient les composites renforcés (tels que la fibre de verre) et les matériaux géologiques (tels que la roche). L'élément est défini par huit nœuds ayant trois degrés de liberté à chaque nœud : translations dans les directions nodales x, y et z. Jusqu'à trois spécifications d'armature différentes peuvent être définies.

L'élément en béton est similaire à un solide structural 3D, mais avec en plus des capacités spéciales de fissuration et d'écrasement. L'aspect le plus important de cet élément est le traitement des propriétés non linéaires des matériaux. Le béton est capable de se fissurer (dans trois directions orthogonales), d'écrasement, de déformation plastique et de fluage. Les barres d'armature sont capables de tension et de compression, mais pas de cisaillement. Ils sont également capables de déformation plastique et de fluage.

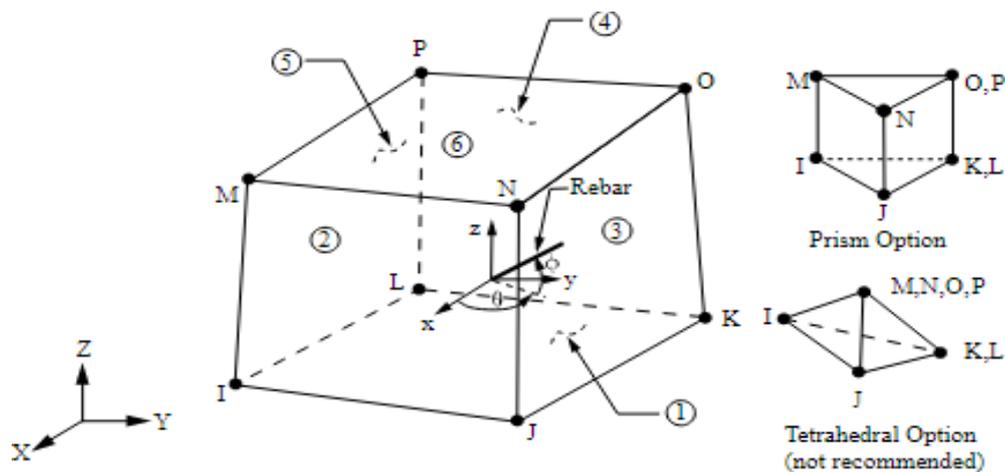


Figure IV-6: Géométrie SOLID65

## IV-3-9-2 :LINK180 Élément Description:

LINK180 est un longeron 3-D qui est utile dans une variété d'applications d'ingénierie. L'élément peut être utilisé pour modéliser des fermes, des câbles affaîssés, des liens, des ressorts, etc. L'élément est un élément de traction-compression uni axial avec trois degrés de liberté à chaque nœud : translations dans les directions nodales x, y et z. Les options de tension uniquement (câble) et de compression uniquement (espace) sont prises en charge. Comme dans une structure articulée, aucune flexion de l'élément n'est considérée. Les capacités de plasticité, de fluage, de rotation, de grande déviation et de grande déformation sont incluses.

Par défaut, LINK180 inclut des termes de rigidité de contrainte dans toute analyse incluant des effets de grande déviation. L'élasticité, la plasticité de durcissement isotrope, la plasticité de durcissement cinématique, la plasticité anisotrope de Hill, la plasticité de durcissement non linéaire

de Chaboche et le fluage sont pris en charge. Pour simuler les options traction/compression uniquement, une approche de solution itérative non linéaire est nécessaire. La masse ajoutée, la masse et la charge ajoutées hydrodynamiques et la charge flottante sont disponibles.

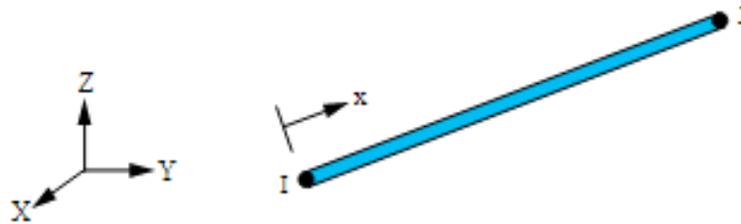


Figure IV-7: Géométrie LINK180

#### IV-3-9-3 :LINK33 Élément Description:

LINK33 est un élément uniaxial capable de conduire la chaleur entre ses nœuds. L'élément a un seul degré de liberté, la température, à chaque point de nœud. La barre conductrice est applicable à une analyse thermique en régime permanent ou transitoire.

Si le modèle contenant l'élément barre conducteur doit également être analysé structurellement, l'élément barre doit être remplacé par un élément structurel équivalent.

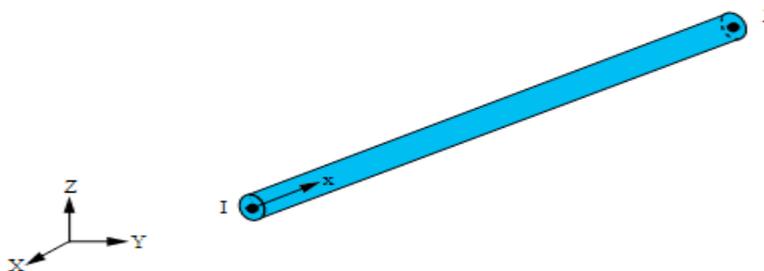


Figure IV-8: Géométrie LINK33

#### IV-3-9-4 : SOLID 45: Modèle structure:

Un élément solide, SOLID45 est utilisé pour la modélisation tridimensionnelle des structures solides. L'élément est défini par huit noeuds ayant trois degrés de liberté à chaque noeud: translations dans les directions nodales x, y et z.

L'élément présente des propriétés de plasticité, fluage, de gonflement, de rigidité sous contrainte, de grande déviation et de grandes contraintes. Une option d'intégration réduite avec le contrôle de sablier est disponible

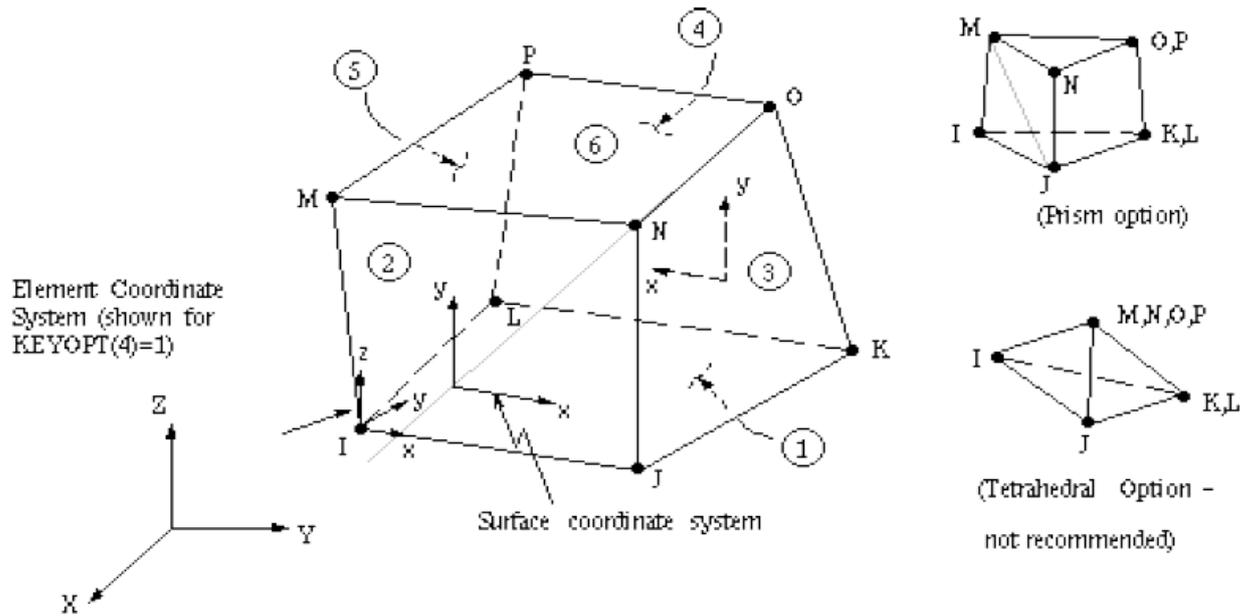


Figure IV-9: Géométrie de l'élément solide (SOLID45)

IV-3-9-5 : modèle Solid 46 :

Un élément solide, SOLID46, est utilisé pour modéliser le composite en fibre de carbone.

L'élément permet jusqu'à 100 couches de matériaux différents avec des orientations différentes, et les propriétés des matériaux orthotropes dans chaque couche. L'élément comporte huit noeuds avec trois degrés de liberté de translation au niveau de chaque noeud. La translation dans les directions nodales x, y et z.

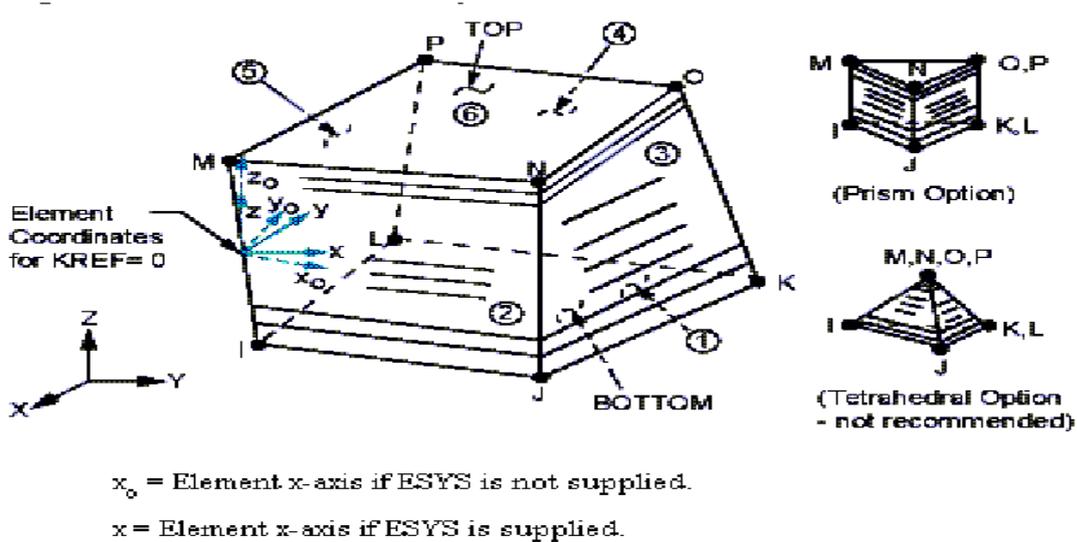
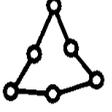
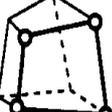
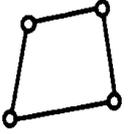


Figure IV-10: Géométrie solide à 46 éléments en couches

IV-3-10 :Type d'éléments structuraux utilisés dans ANSYS:

Structural Point	Structural 2-D Line	Structural 2-D Beam		
<p>Structural Mass</p>  <p><b>MASS21</b> 1 node 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Spar</p>  <p><b>LINK1</b> 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY</p>	<p>Elastic Beam</p>  <p><b>BEAM3</b> 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, ROTZ</p>	<p>Plastic Beam</p>  <p><b>BEAM23</b> 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, ROTZ</p>	<p>Offset Tapered Unsymmetric Beam</p>  <p><b>BEAM54</b> 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, ROTZ</p>
Structural 3-D Line			Structural 3-D Beam	
<p>Spar</p>  <p><b>LINK8</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Tension-Only Spar</p>  <p><b>LINK10</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Linear Actuator</p>  <p><b>LINK11</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Elastic Beam</p>  <p><b>BEAM4</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Thin Walled Plastic Beam</p>  <p><b>BEAM24</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>
<p>Offset Tapered Unsymmetric Beam</p>  <p><b>BEAM44</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Structural Pipe</p> <p>Elastic Straight Pipe</p>  <p><b>PIPE16</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Elastic Pipe Tee</p>  <p><b>PIPE17</b> 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Curved Pipe (Elbow)</p>  <p><b>PIPE18</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Plastic Straight Pipe</p>  <p><b>PIPE20</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>
<p>Immersed Pipe</p>  <p><b>PIPE59</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Plastic Curved Pipe</p>  <p><b>PIPE60</b> 2 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p>Structural 2-D Solid</p> <p>Triangular Solid</p>  <p><b>PLANE2</b> 6 nodes 2-D space DOF: UX, UY</p>	<p>Axisymmetric Harmonic Struct. Solid</p>  <p><b>PLANE25</b> 4 nodes 2-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p>Structural Solid</p>  <p><b>PLANE42</b> 4 nodes 2-D space DOF: UX, UY</p>

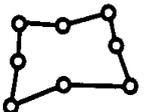
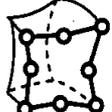
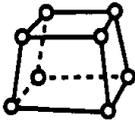
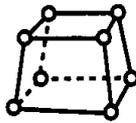
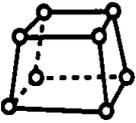
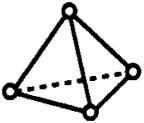
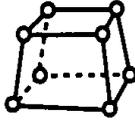
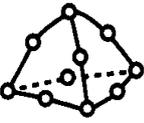
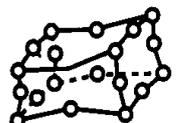
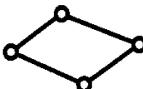
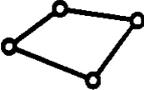
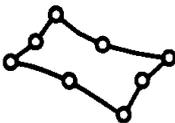
		<b>Structural 3-D Solid</b>		
<p><b>Structural Solid</b></p>  <p><b>PLANE82</b> 8 nodes 2-D space DOF: UX, UY</p>	<p><b>Axisymmetric Harmonic Struct. Solid</b></p>  <p><b>PLANE83</b> 8 nodes 2-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p><b>Structural Solid</b></p>  <p><b>SOLID45</b> 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p><b>Layered Solid</b></p>  <p><b>SOLID46</b> 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p><b>Anisotropic Solid</b></p>  <p><b>SOLID64</b> 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>
<p><b>Reinforced Solid</b></p>  <p><b>SOLID65</b> 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p><b>Solid with Rotations</b></p>  <p><b>SOLID72</b> 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p><b>Solid with Rotations</b></p>  <p><b>SOLID73</b> 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p><b>Tetrahedral Solid</b></p>  <p><b>SOLID92</b> 10 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p><b>Structural Solid</b></p>  <p><b>SOLID95</b> 20 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>
<b>Structural 2-D Shell</b>		<b>Structural 3-D Shell</b>		
<p><b>Plastic Axisymmetric Shell with Torsion</b></p>  <p><b>SHELL51</b> 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTZ</p>	<p><b>Axisymmetric Harmonic Struct. Shell</b></p>  <p><b>SHELL61</b> 2 nodes 2-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTZ</p>	<p><b>Shear/Twist Panel</b></p>  <p><b>SHELL28</b> 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ or ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p><b>Membrane Shell</b></p>  <p><b>SHELL41</b> 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ</p>	<p><b>Plastic Shell</b></p>  <p><b>SHELL43</b> 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>
<p><b>Elastic Shell</b></p>  <p><b>SHELL63</b> 4 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p><b>16-Layer Structural Shell</b></p>  <p><b>SHELL91</b> 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p><b>Structural Shell</b></p>  <p><b>SHELL93</b> 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	<p><b>100-Layer Structural Shell</b></p>  <p><b>SHELL99</b> 8 nodes 3-D space DOF: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ</p>	

Tableau IV-2: Type d'éléments structuraux utilisés dans ANSYS

#### IV-4: Les données d'exécution:

##### IV-4-1: La géométrie:

Dans logiciel modélisation, Nous avons pris les données suivantes : La longueur de la poutre  $L=3000\text{mm}$  et la longueur de la plaque de réparation  $L_p=2400\text{mm}$ ,  $a=300\text{mm}$  et  $b=1500\text{mm}$  respectivement la distance entre appui et la plaque de réparation et la distance entre appui et la charge,  $b_2=200\text{mm}$  est la largeur de la plaque de réparation.

L'épaisseur de la couche adhésive  $t_a=2\text{mm}$  et  $t_1=300\text{mm}$ ,  $t_2=4\text{mm}$  respectivement l'épaisseur de la poutre BA et l'épaisseur de la Plaque de réparation

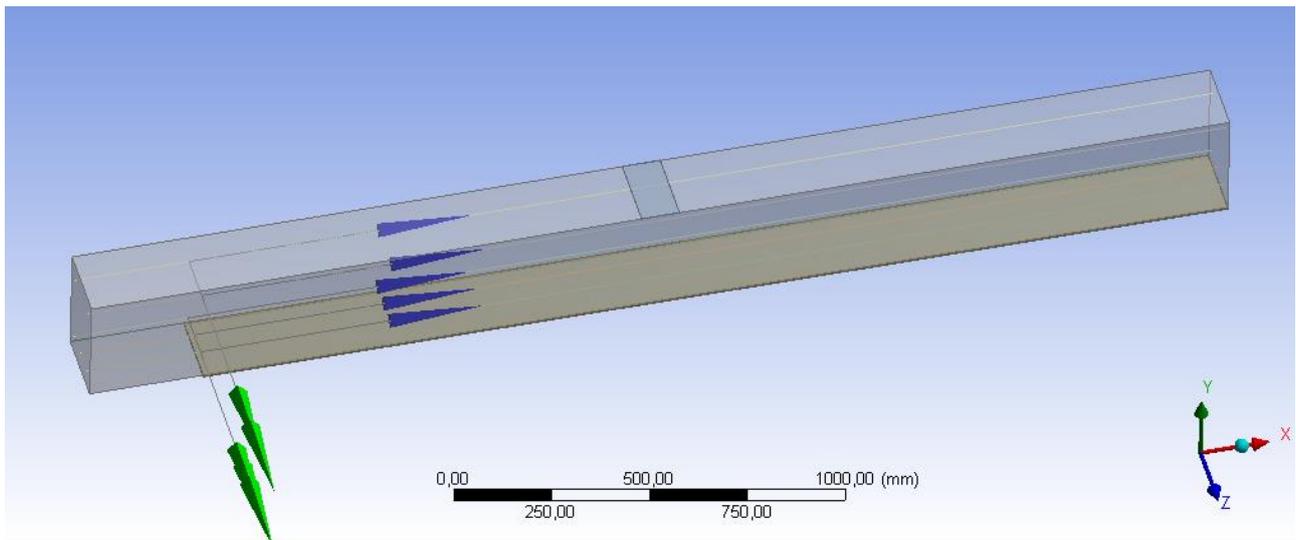


Figure IV-11: Géométrie de la poutre réparée

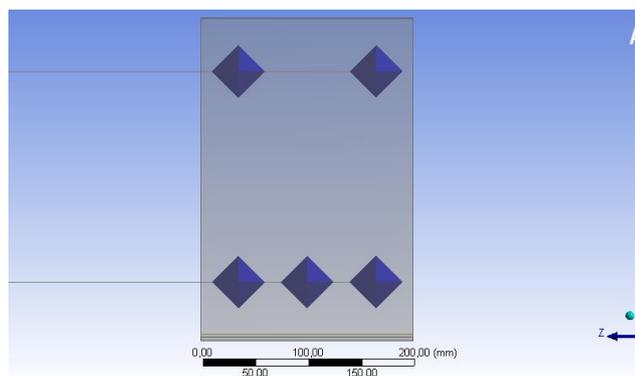


Figure IV-12: Ferrailage de la poutre

##### IV-4-2: Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés:

$E_1$ ,  $E_2$  Le module d'élasticité de la poutre en BA/Plaque de réparation leur valeur  $E_1=30000\text{MPa}$  et  $E_2=140000\text{MPa}$  et Le module de cisaillement de la couche adhésive  $G_a=108\text{MPa}$ , Coefficient de Poisson égal  $\nu_{u1}=0.18$  poutre en BA,  $\nu_{ua}=0.28$  adhésive ; le module de cisaillement transverse de la Plaque de réparation  $G_2=5000\text{MPa}$ .

#### IV-4-3: Conditions aux limites:

Les conditions aux limites symétriques ont été simulées par un appui au niveau de chaque nœud placé perpendiculairement à chaque plan de symétrie, comme le montre la figure ci-dessous, une poutre simplement appuyée.

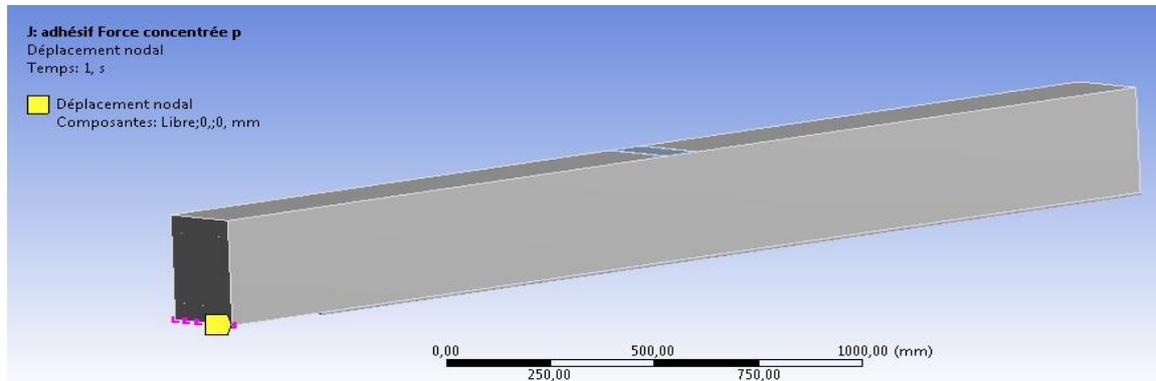


Figure IV-13:Poutre simplement appuyée

#### IV-4-4: Chargement:

Pour l'assemblage collé CFRP est soumis à une charge de traction aux deux bords libres des adhérents.

Les conditions aux limites symétriques ont été simulées par un appui au niveau de chaque nœud placé perpendiculairement à chaque plan de symétrie. Puis une charge concentrée de **50 kN / m** est appliquée sur la face supérieure de la poutre de la structure. Cette charge mécanique a été simulée dans le modèle FE en appliquant une pression de **7.5 MPa** à la face supérieure de la poutre.

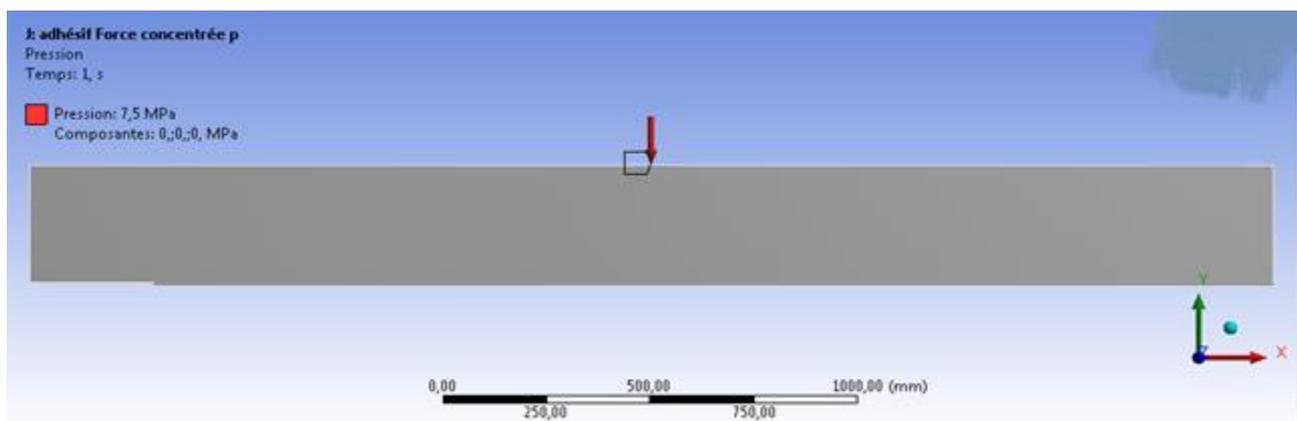


Figure IV-14:La charge appliquée sur la poutre

#### IV-4-5: Maillage:

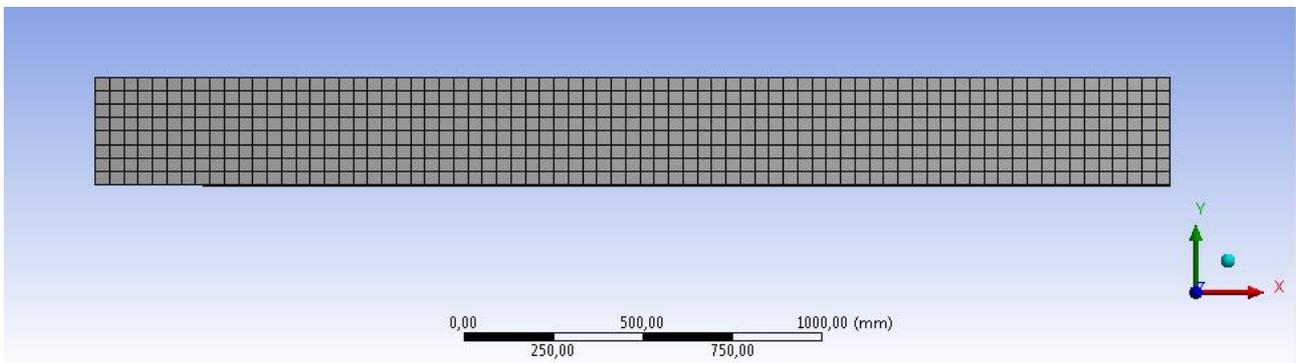
La première étape de la simulation est la définition du domaine du calcul. Il s'agit de choisir le nombre de dimensions, pour la forme géométrique de la zone à étudier. Une fois cette étape

franchie, il faut définir un maillage du domaine, c'est-à-dire découper le domaine en mailles élémentaires. Le choix de la finesse du maillage est un problème délicat et plus particulièrement dans notre cas. Il convient de faire un maillage suffisamment fin pour que les résultats aient une bonne précision et reproduisent l'ensemble des phénomènes sans toutefois conduire à des temps de calcul trop longs.

Le Choix de la taille des mailles peut être basé sur les échelles caractéristiques des phénomènes et des détails géométriques à représenter.

Un maillage peut être structuré ou non structuré, uniforme ou non uniforme

Le maillage FE du modèle de poutre est illustré à la **figure IV-15**. Pour obtenir de bons résultats de **Solid65**, l'utilisation d'un maillage rectangulaire est recommandée. Par conséquent, le maillage a été mis en place de telle sorte que des éléments rectangulaires ont été créés. La taille de l'élément varie suivant la géométrie de la poutre en béton armé entre 50mm et 40mm, celle de la plaque entre 20mm et 10mm.

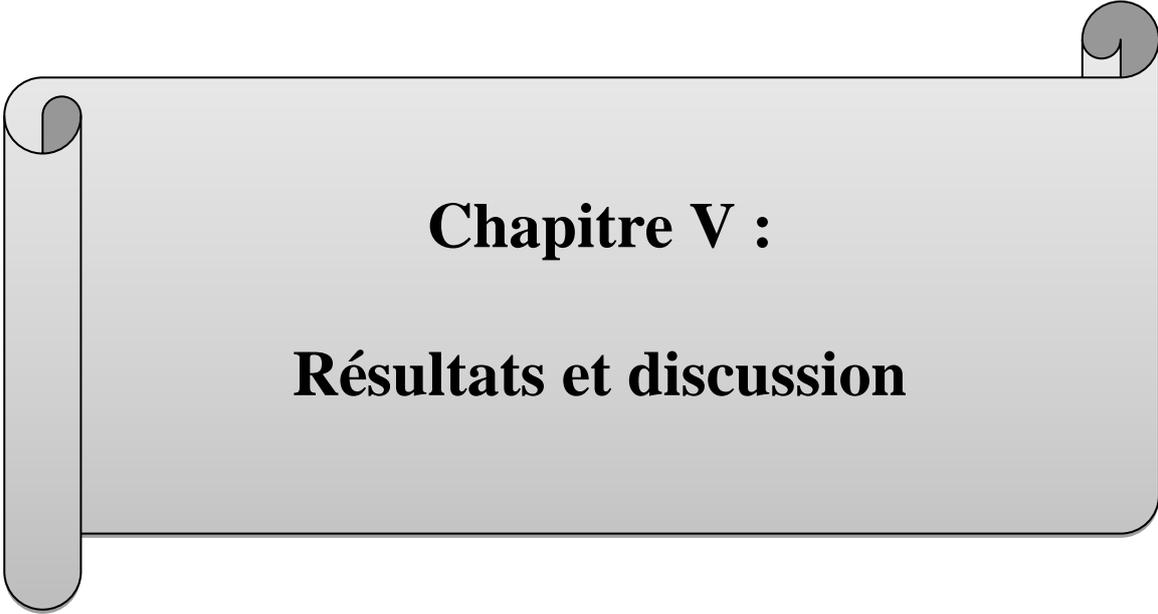


**Figure IV-15:**Maillage de la poutre réparée

**IV-5: Conclusion:**

Dans cette partie, nous avons présenté quelques concepts de la méthode élément finis pour la modélisation de l'interface béton/renfort. Tout d'abord, la méthode des éléments finis est une manière numérique de résoudre certains problèmes physiques. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs, de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées.

Il existe de nombreuses méthodes d'analyse numérique, parmi lesquelles on peut citer la méthode des éléments finis. Celle-ci correspond à la méthode utilisée par notre simulateur de référence (ANSYS) **WORKBENCH**. et ce dernier, comprend une définition de ce logiciel, la façon dont il est utilisé et les données applicables.



**Chapitre V :**  
**Résultats et discussion**

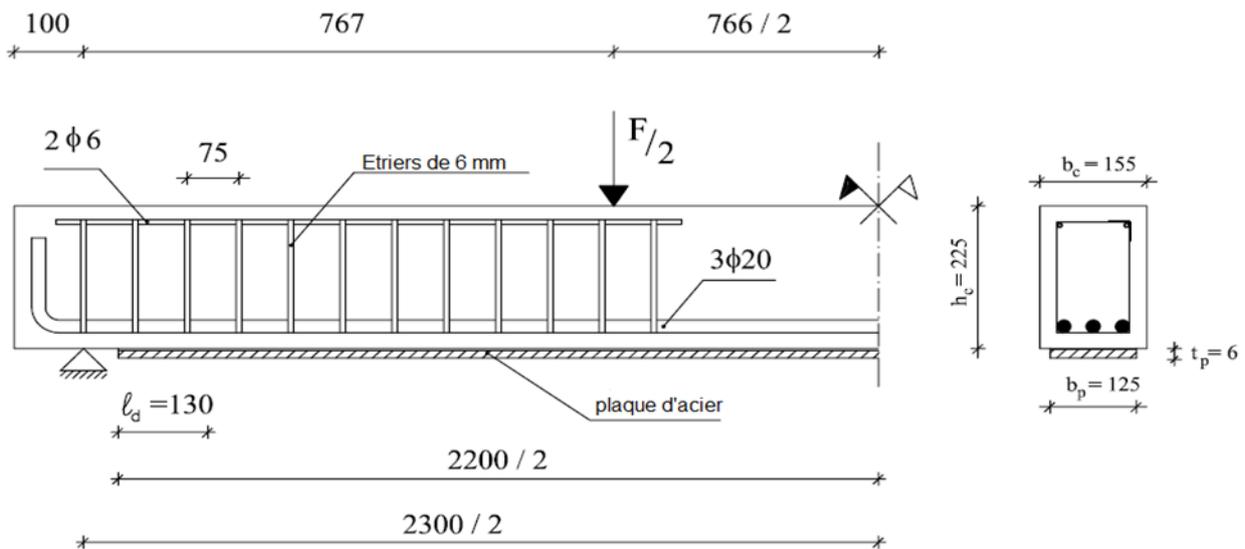
**V -1: Introduction:**

Nous avons exposé des résultats issus de différentes recherches, varier plusieurs paramètres dans l'étude des matériaux composites avec différents renforts (Fibres de verre, de Carbone et d'Acier).

Dans ce chapitre nous allons donner les résultats de ces différents tests ainsi que les discussions qui en découleront.

**V -2: Résultats numériques et conclusions :**

Le modèle numérique présenté ici a été validé en comparant les contraintes prédites avec les résultats expérimentaux obtenus par (Swamy RN, 1988) , et avec les résultats théoriques présentés par Roberts dans la Réf (Roberts KTM) .Ils se réfèrent à la même poutre en béton armé, testée par (Swamy RN, 1988), .(Reportez-vous à la figure:V-1). En particulier une telle poutre est renforcée par une plaque d'acier collée sur la face inférieure (Poutre F31). La géométrie et les propriétés des matériaux de l'échantillon ont été tirées de la (Roberts KTM) et sont résumés dans le **tableau V-1**.



**Figure V-1:** Poutre BA renforcé par une plaque d'acier – Dimensions en (mm) - (Roberts KTM)

<b>Béton</b>	$b_1 = 155 \text{ mm}$	$t_1 = 225 \text{ mm}$	$E_1 = 31\,000 \text{ N/mm}^2$
<b>Acier</b>	$b_2 = 125 \text{ mm}$	$t_2 = 6 \text{ mm}$	$E_2 = 200\,000 \text{ N/mm}^2$
<b>Adhésif</b>	$b_a = 125 \text{ mm}$	$t_a = 1.5 \text{ mm}$	$E_a = 280 \text{ N/mm}^2$ $G_a = 108 \text{ N/mm}^2$
<b>Longueur de diffusion <math>l_d = 130 \text{ mm}</math>.</b>			

**Tableau V-1:** Dimension et propriétés des matériaux (Roberts KTM)

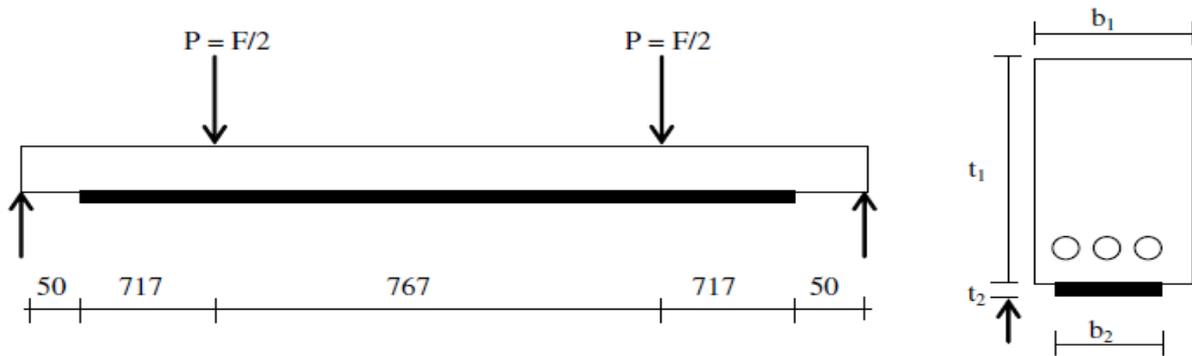


Figure V-2: Comparaison des résultats théoriques avec les résultats expérimentaux pour poutre F31

Les résultats expérimentaux présentés par (Swamy RN, 1988) et ceux (Ascione, 2000) utilisant la méthode des éléments finis montrent que la contrainte de cisaillement se réduit à zéro dans la section de coupure. Cependant, les méthodes développées par (S.T. Smith et J.G. Teng, 2001), (Roberts KTM) et (Malek, 1998) prévoient des valeurs maximales pour les contraintes de cisaillement à la même section. La méthode présentée prédit également des valeurs maximales dans la section de coupure, mais comparativement à celles des méthodes citées ci-dessus, les contraintes l'interface calculées sont considérablement plus petites que celles obtenues par d'autres modèles qui négligent les déformations de cisaillement adhérentes. En revanche, (Tsai, 1998) ont utilisé la même théorie pour étudier les joints à recouvrement adhésifs. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux des résultats expérimentaux et numériques.

Composant	Largeur (mm)	Profondeur (mm)	Module d'Young(MPa)	Coefficient de Poisson	Module de cisaillement (Mpa)
<b>Poutre BA</b>	$b_1 = 200$	$t_1 = 300$	$E_1 = 30000$	0.18	-
<b>Couche adhésive</b>	$b_a = 200$	$t_a = 2.0$	$E = 3000$	0.35	-
<b>Plaque PRV</b>	$B_2 = 200$	$t_2 = 4.0$	$E_2 = 50000$	0.28	$G_{12} = 5000$
<b>Plaque CFRP</b>	$B_2 = 200$	$t_2 = 4.0$	$E_2 = 140000$	0.28	$G_{12} = 5000$
<b>Plaque d'acier</b>	$B_2 = 200$	$t_2 = 4.0$	$E_2 = 200000$	0.3	

Tableau V-2: Propriétés géométriques et matérielles

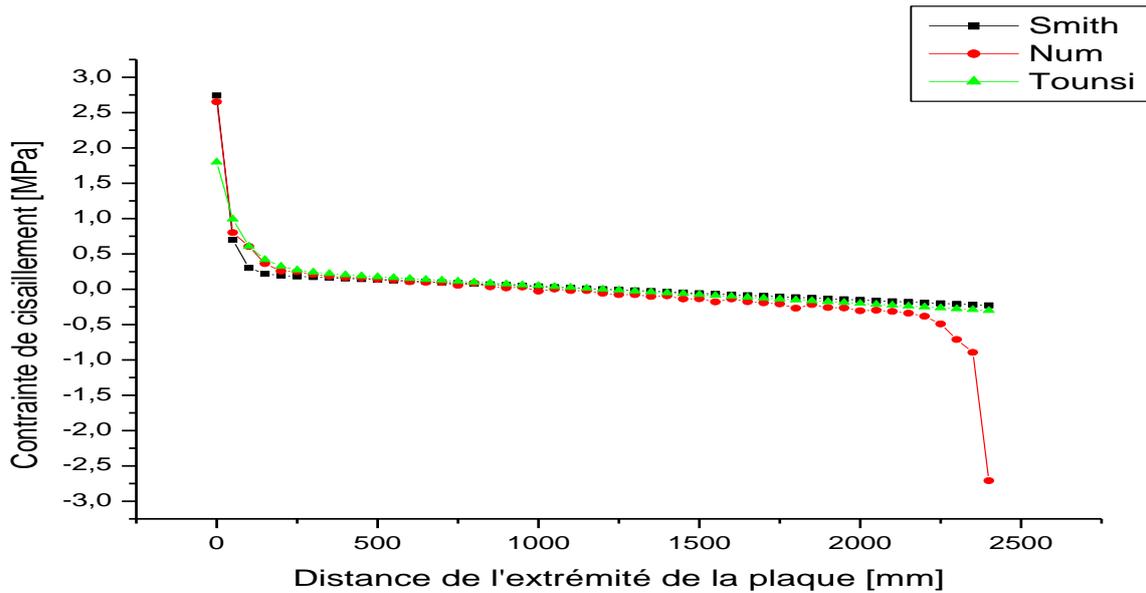


Figure V-3: Comparaison des contraintes l'interface de cisaillement pour une poutre BA avec une plaque de réparation collée en CFRP soumis à un UDL

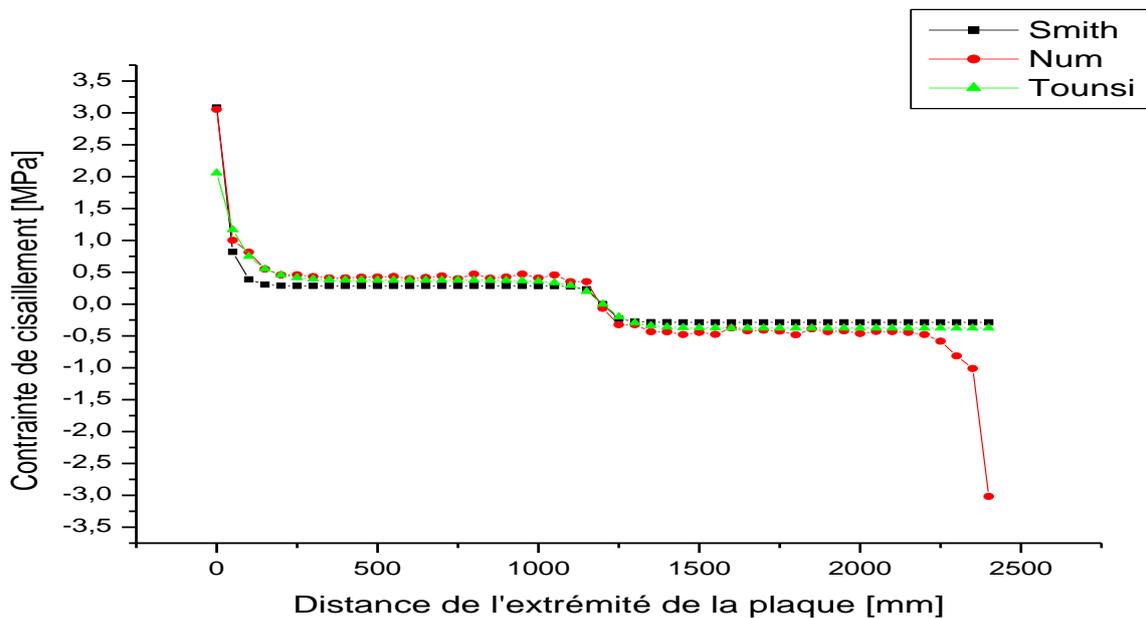


Figure V-4: Comparaison des contraintes l'interface de cisaillement pour une poutre BA avec une plaque de réparation collée en CFRP soumis à force concentrée

La ( figure V-3; V-4) montrent la variation de les contraintes l'interfaces de cisaillement pour la poutre en BA collée par une plaque CFRP (Carbone) sous une charge uniformément répartie et une force concentrée appliquée au milieu respectivement, nous avons remarqué que les trois courbes suivent la même allure à l'exception enregistrée de la contrainte maximale au début de la plaque de réparation, **2.74 MPa** de **Smith**, **2.65 MPa** de **Tounsi** et **1.79 MPa** de la modélisation numérique

pour la charge uniformément répartie, et **3.08 MPa** de **Smith**, **2.05 MPa** de **Tounsi** et **3.05 MPa** de la modélisation numérique pour une force concentrée appliquée au milieu, les contraintes à l'interface maximales évaluées par la théorie (Tounsi Abdelouahed, 2005) sont plus petites que celles données par la solution de (S.T. Smith et J.G. Teng, 2001). Cela implique que la déformation par cisaillement des adhésives est un facteur important influençant la distribution des contraintes à l'interface adhésives.

### V -3: Comparaisons numériques :

L'effet de la rigidité de cisaillement transversal adhérent sur le cisaillement maximal, est examiné en comparant les résultats à partir des méthodes développées par (S.T. Smith et J.G. Teng, 2001) et (Tounsi Abdelouahed, 2005). Pour cela, une poutre BA renforcée avec une plaque de réparation en plastique renforcé de fibres de verre (VFRP), en CFRP ou en acier est analysée. Les poutres sont simplement appuyées et soumises à une charge concentrée au milieu ou à une charge uniformément répartie. Un résumé des propriétés géométriques et matérielles est donné dans (le tableau V-2).

La portée de la poutre BA est **L = 3000 mm**, la distance entre le support et l'extrémité de la plaque est **a = 300 mm**, la force concentrée est de **150 kN** et UDL est de **50 kN/m**.

Les deux tableaux ci-dessous exposent des résultats sur les maximums de la contrainte de cisaillement de l'interface poutre BA renforcée par le collage de VFRP et CFRP ou plaque d'acier. Comme on peut le voir :

On remarque que la contrainte de cisaillement obtenus par (Tounsi Abdelouahed, 2005) a diminué par rapport à celle obtenus par (S.T. Smith et J.G. Teng, 2001) et cela est due à la déformation de cisaillement des deux adhésives (poutre en BA, plaque de réparation) qui est prise en considération par (Tounsi Abdelouahed, 2005), nous remarquons aussi que la contrainte obtenue par modélisation numérique s'approche de celle de (S.T. Smith et J.G. Teng, 2001)

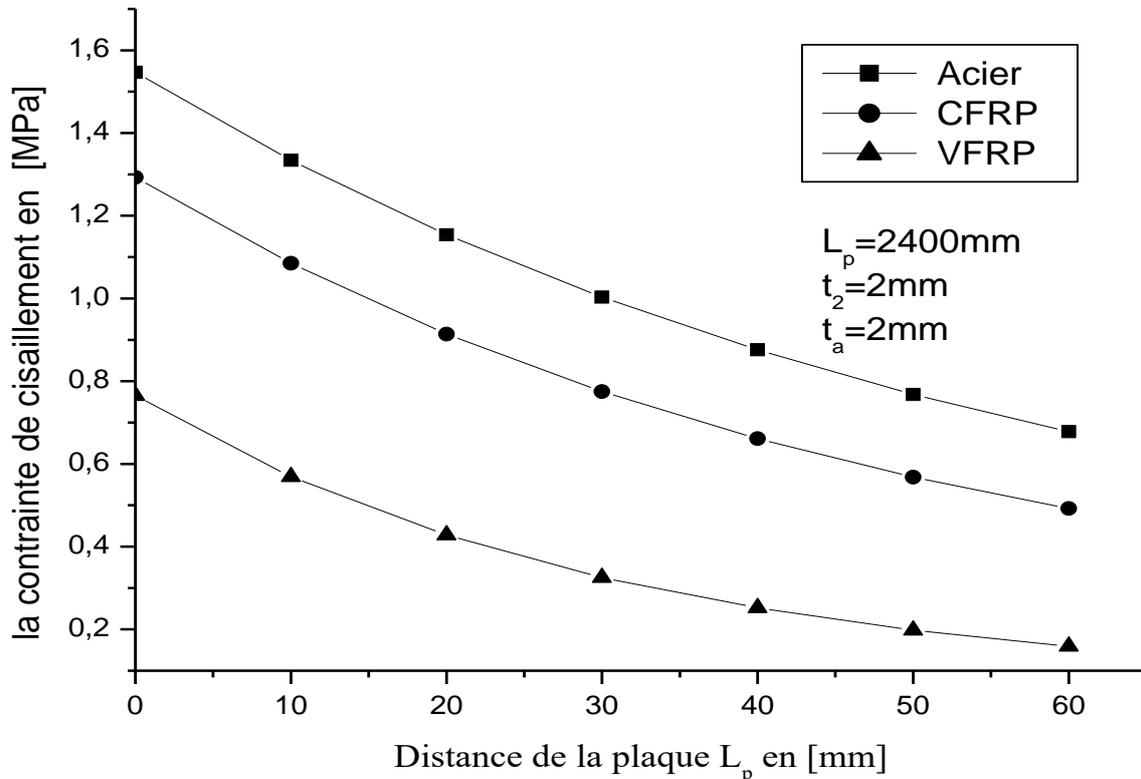
La théorie	Poutre BA avec VFRP	Poutre BA avec CFRP	Poutre BA avec plaque en acier
	$\tau$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
(S.T. Smith et J.G. Teng, 2001)	1.97	2.74	3.96
(Tounsi Abdelouahed, 2005)	1.08	1.79	2.12
NUM	1.81	2.65	4.10

Tableau V-3: Comparaison des résultats maximums de la contrainte de cisaillement : UDL

La théorie	Poutre BA avec GFRP	Poutre BA avec CFRP	Poutre BA avec plaque en acier
	$\tau$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\tau$ (MPa)
(S.T. Smith et J.G. Teng, 2001)	2.21	3.08	4.17
(Tounsi Abdelouahed, 2005)	1.22	2.05	2.43
NUM	2.04	3.05	4.25

Tableau V-4: Comparaison des résultats maximums de la contrainte de cisaillement : Charge concentrée au milieu

#### V -4 : Effet du matériau de la plaque sur la variation de la contrainte de l'interface poutre en BA/plaque:



**Figure V-5:** Variation de la contrainte de l'interface poutre en BA/plaque en fonction du matériau de la plaque

La ( **figure V-5**) montre la variation de les contraintes l'interfaces de cisaillement pour la poutre en BA collée avec une plaque d'acier, une plaque CFRP (Carbone) et une plaque VFRP (Verre), respectivement, qui démontrent l'effet des propriétés du matériau de la plaque sur les contraintes l'interface. La longueur de la plaque est  $L_p = 2400 \text{ mm}$ , et l'épaisseur de la plaque et de la couche adhésive sont toutes les deux de  $2 \text{ mm}$ . On remarque pour la plaque d'acier la valeur de la contrainte de cisaillement  $1.547\text{MPa}$  et pour la plaque de fibre en carbone  $1.293\text{MPa}$ , et  $0.765\text{MPa}$  pour le VFRP. et cela est due au caractéristique mécanique ( $E, \nu$ ) de chaque matériau.

Les contraintes l'interface deviennent plus faibles, comme prévu. En effet, sous une même charge, l'effort de traction développé dans la plaque est plus faible, ce qui conduit à des contraintes l'interface réduites. La position de la contrainte de cisaillement l'interface maximale se rapproche du bord libre.

### V -5: Contraintes l'interface pour différents paramètres:

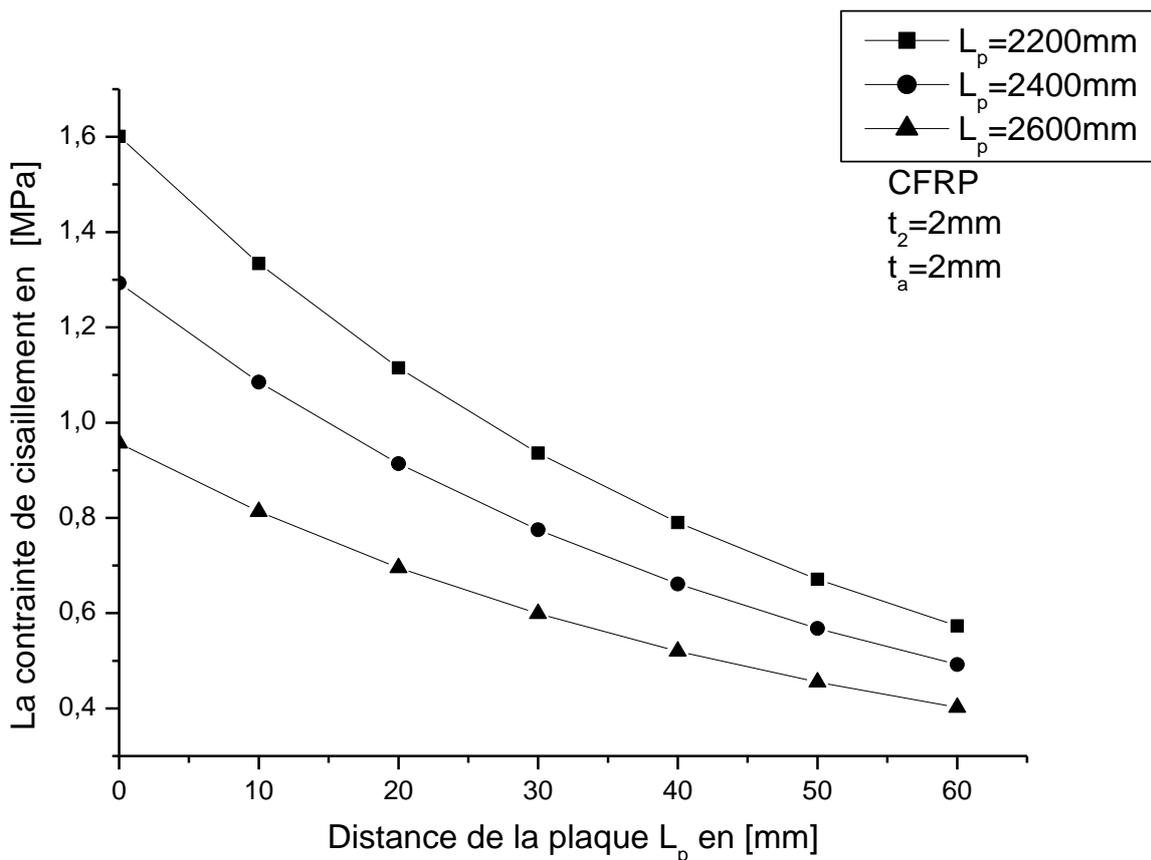
Dans cette section, les résultats numériques de la solution actuelle sont présentés pour étudier l'effet de divers paramètres sur les distributions des contraintes l'interface dans une poutre BA collée avec du FRP ou une plaque d'acier. Ces résultats visent à mettre en évidence les principales caractéristiques des distributions de contraintes l'interface dans ces poutres renforcées. Les résultats numériques sont présentés dans les Figure.

L'exemple de poutre BA a une portée de **3000 mm** et une hauteur de section  $t_1=300$  mm. Les propriétés matérielles de la poutre BA et de l'adhésif adoptés dans l'étude paramétrique sont respectivement :

$$E_1^1 = 30,0 \text{ GPa}, \quad \nu_{12}^1 = 0,18 \quad \text{et} \quad E_a = 3,0 \text{ GPa} \quad \nu_a = 0,35$$

Le matériau de la plaque de renforcement a été considéré comme l'un des trois suivants : renforcé de fibre de verre composite polymère (VFRP). Composite CFRP et acier. Les trois couches ont la même largeur de  $b_2=200$  mm et la poutre est soumise à une charge uniformément répartie de **50 kN/m**.

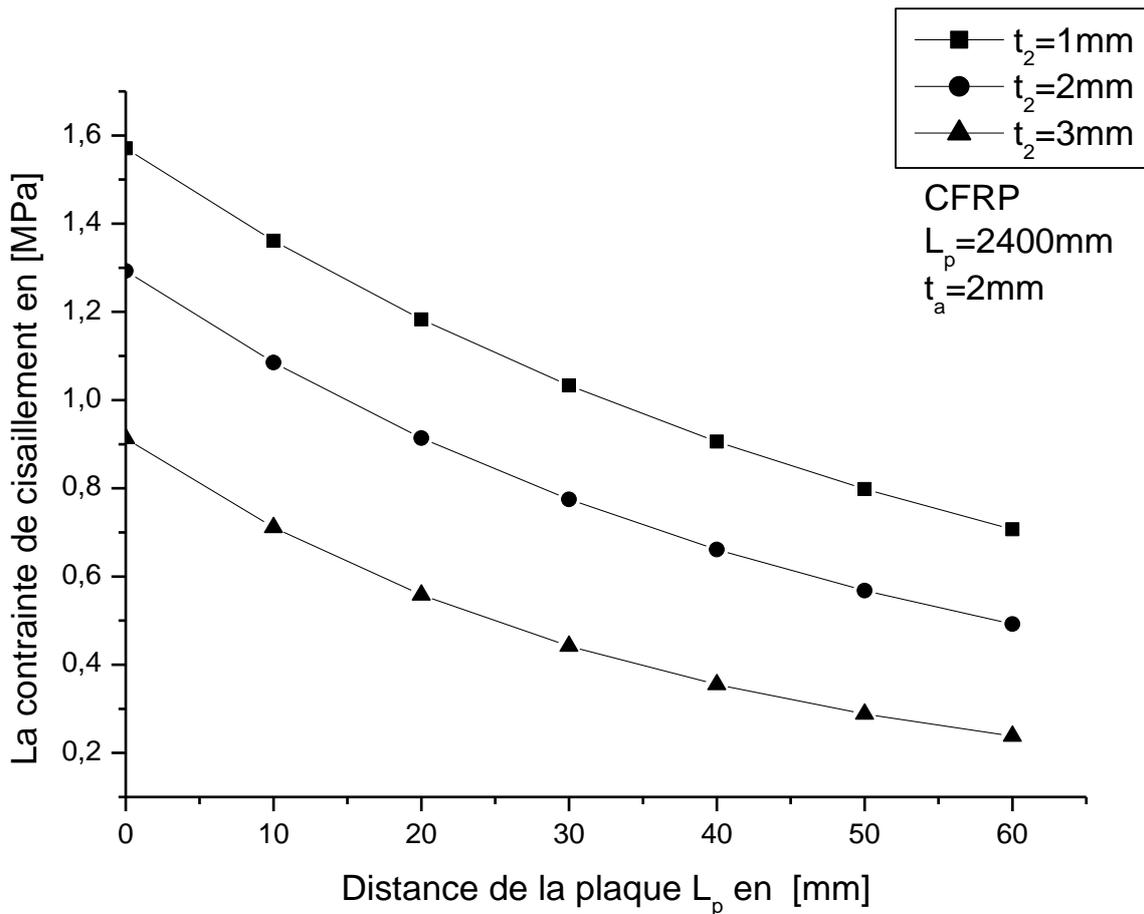
#### V -5-1 : Effet de la longueur de la plaque de réparation sur la variation de la contrainte de l'interface poutre en BA/plaque:



**Figure V-6:** Variation de la contrainte de l'interface poutre en BA/plaque, en fonction de la longueur de la plaque de réparation

La (figure V-6) montre la variation de la contrainte l'interface pour la poutre en BA collées avec la plaque de réparation CFRP de différentes longueurs, On remarque pour une plaque de **2200mm** la contrainte de cisaillement a valeur **1.601Mpa** et la longueur de  **$L_p=2400mm$**  donner **1.293MPa**, et **0.957MPa** pour longueur **2600mm**. On voit que, l'effet de la longueur de la plaque de réparation influe inversement avec la contrainte de cisaillement, à chaque fois que la longueur de la plaque sa valeur est grande donc la contrainte de cisaillement diminuant.

#### V -5-2 : Effet de l'épaisseur de la plaque de réparation sur la variation de la contrainte de l'interface poutre en BA/plaque:

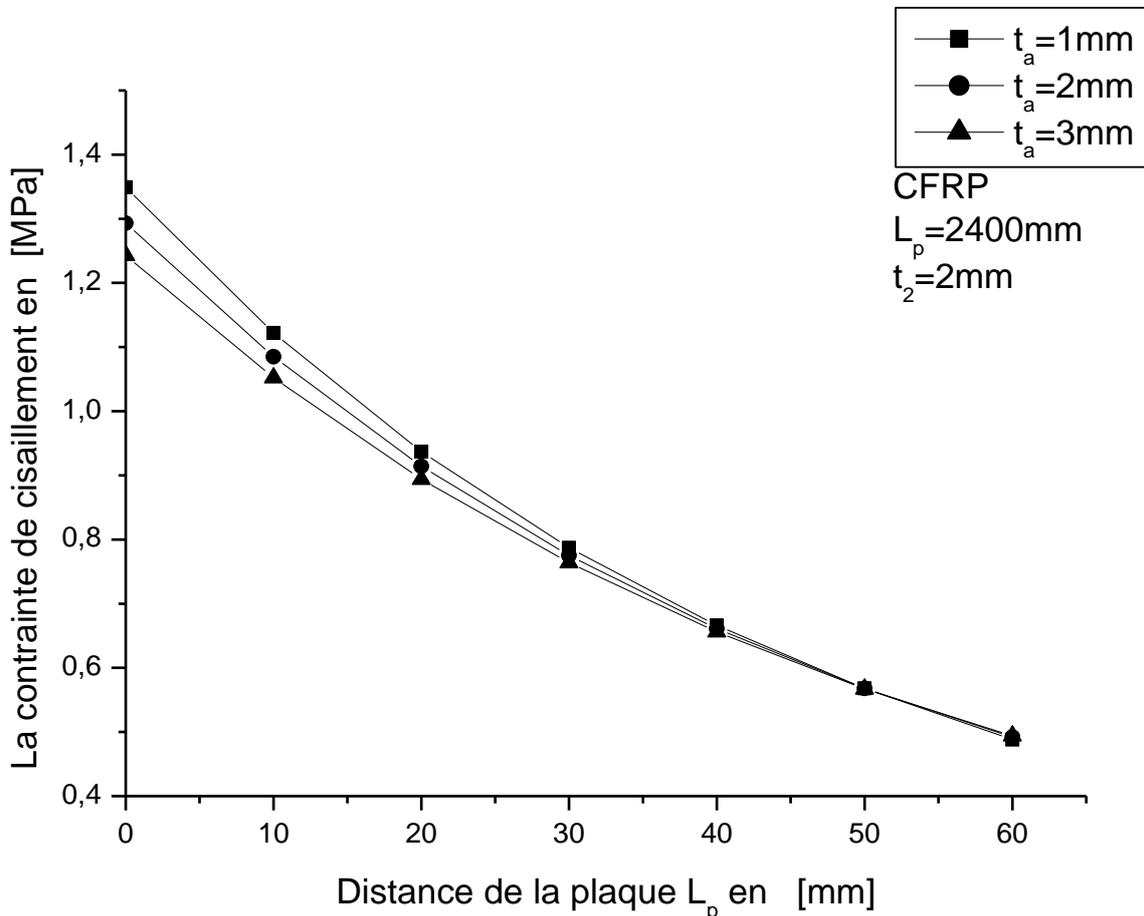


**Figure V-7:** Variation de la contrainte de l'interface poutre en BA/plaque, en fonction de l'épaisseur de la plaque de réparation

La (Figure V-7) montre la variation de la contrainte de cisaillement de l'interface poutre en BA/plaque de réparation, en effet de l'épaisseur de la plaque CFRP , on remarque pour l'épaisseur  $t_2= 1mm$  sa valeur de contrainte de cisaillement **1.571MPa**, **2et3 mm** respectivement **1.293** **et0.913MPa** pour les contraintes de l'interface. Pour cela on constate que l'effet de l'épaisseur de la

plaque en fibre de carbone influe inversement sur la contrainte de l'interface .c'est-à-dire, quand l'épaisseur de la plaque de réparation augmente, la contrainte de cisaillement diminue.

### V -5-3 : Effet de l'épaisseur de la couche adhésive sur la variation de la contrainte de l'interface poutre en BA/plaque:

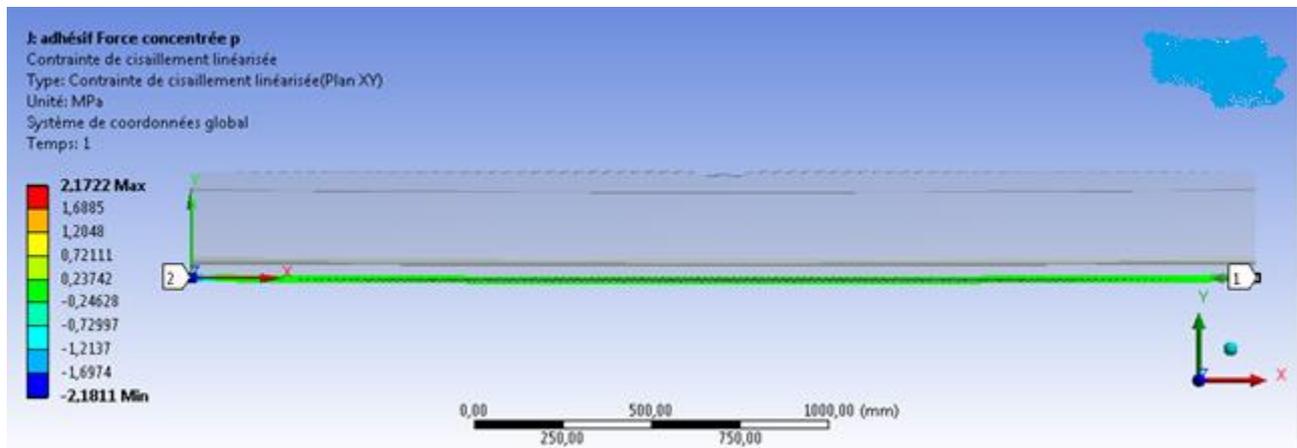


**Figure V-8:** Variation de la contrainte de l'interface poutre en BA/plaque, en fonction de l'épaisseur de la couche adhésive

La (Figure V-8) montre la variation de la contrainte de cisaillement de l'interface poutre en BA/plaque de réparation, en effet de l'épaisseur de la couche adhésive, on remarque pour l'épaisseur  $t_a = 1\text{mm}$  sa valeur de contrainte de cisaillement **1.349MPa**, et pour épaisseur **2mm** égal **1.293MPa** et **1.243 MPa** pour **3mm**. Dédire que l'effet de l'épaisseur de la couche adhésive influe inversement avec la contrainte de cisaillement .C'est-à-dire à chaque fois que l'épaisseur de l'adhésive diminue, la contrainte de cisaillement augmente.

Illustré à la (FigureV-7). Les contraintes de cisaillement sont augmentées à la suite d'une augmentation de l'épaisseur de la plaque. Cet effet est similaire à celui d'une augmentation du module d'élasticité de la plaque. On peut voir sur la (Figure V-8) que l'épaisseur de la couche

adhésive n'affecte que les concentrations de cisaillement, à peine les niveaux de contrainte. Cependant, la conception des propriétés et de l'épaisseur de l'adhésif est un problème difficile. Une conception d'optimisation de l'adhésif est attendue, comme on peut voir la variation de la contrainte de cisaillement de l'interface dans la (**Figure V-9**) le long de la couche d'adhésif.



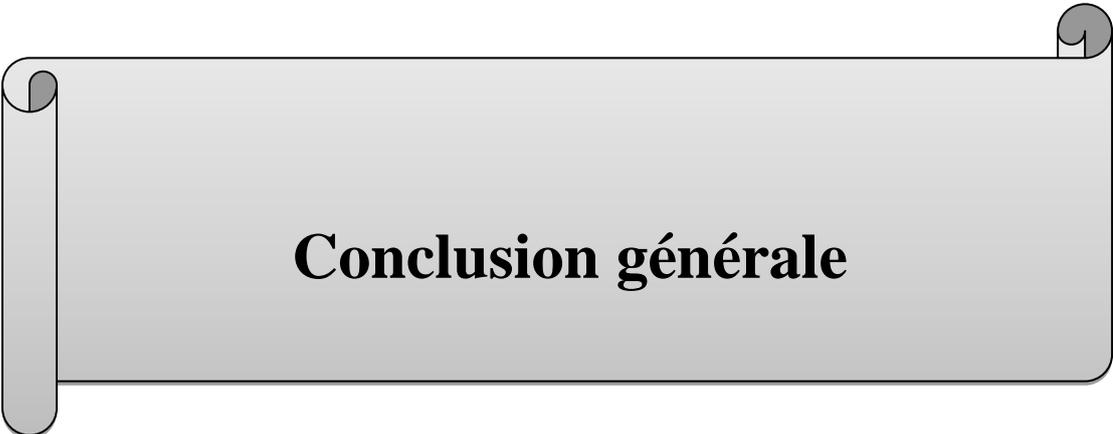
**Figure V-9:** Contrainte de cisaillement le long de la couche d'adhésif

## V -5: Conclusion :

La connaissance du comportement mécanique d'un matériau composite destiné pour réparation des structures en béton armé est très utile.

D'un assemblage collé en CFRP ainsi que le comportement thermomécanique à haute température des matériaux composites sachant que le CFRP est un composite de choix utilisé pour la réparation et/ou renforcement des structures endommagées.

En effet, les concentrations de contraintes de l'interface de (Tounsi Abdelouahed, 2005) sont considérablement plus faibles que celles obtenues par d'autres modèles tel que (S.T. Smith et J.G. Teng, 2001) qui négligent les déformations de cisaillement des adhérents. Il est démontré que les contraintes de cisaillement à l'interface sont influencés par la nature du matériau et de géométrie de la plaque en composite. Cette recherche est utile pour comprendre mieux le comportement mécanique de l'interface et la conception des structures hybrides.



## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

### Conclusion générale

Une grande partie du patrimoine national et des infrastructures ont atteint la fin de leur durée de vie utile. Des études ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner à la structure ancienne, la capacité structurale nécessaire pour résister aux sollicitations auxquelles elle est soumise.

Parmi les techniques envisagées, l'utilisation des matériaux composites est très prometteuse. Ils présentent de nombreux avantages, puisqu'ils affichent un rapport résistance poids très élevé et ne corrodent pas, ainsi l'utilisation de ces matériaux est sûrement le meilleur choix pour des structures plus rigides.

De plus, la réparation par les composites une réduction de leur la durée pratique de leur mise en œuvre, ces matériaux présentent en plus un bon comportement en compression et en traction.

Les travaux de ce mémoire ont été répartis en cinq chapitres .Une étude bibliographique a mis en évidence les différents types de dégradation et les techniques de réparations des ouvrages en béton armé, ainsi que les multiples utilisations des matériaux composites comme solution efficace dans le renforcement des structures endommagées.

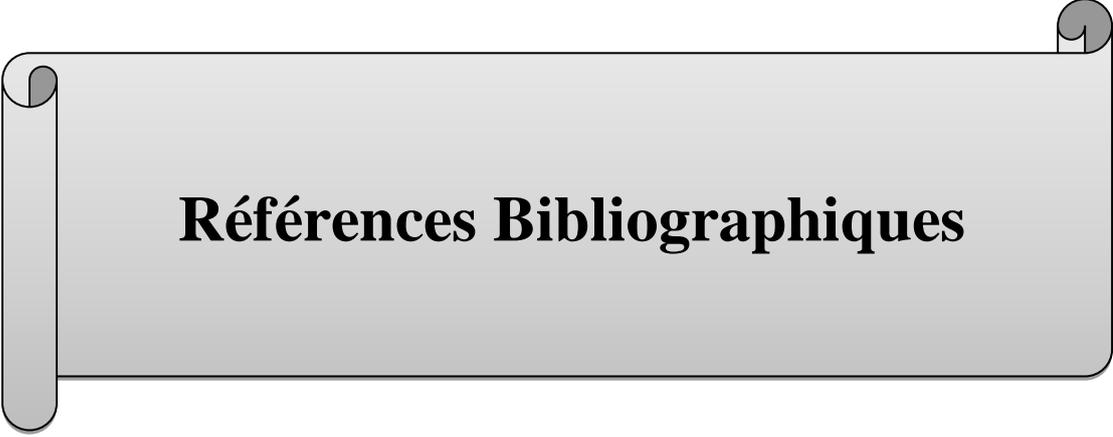
Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats :

Il y a une bonne coordinance entre les contraintes de cisaillement d'interface maximales calculée par FEA (ANSYS) et ceux du model analytique (S.T. Smith et J.G. Teng, 2001), par contre il y a une mauvaise corrélation entre les contraintes de cisaillement d'interface maximales prédit par (ANSYS) et le model analytique de (Tounsi Abdelouahed, 2005), cela est dû au fait de la déformation de cisaillement des deux adhérents (poutre en BA ; plaque de réparation) qui a réduit la contrainte d'interface. Ce qui veut dire l'influence de la déformation de cisaillement des adhérents est très significative sur la variation de la contrainte de cisaillement de l'interface.

Concernant l'étude paramétrique, les résultats obtenues nous mènes à déduire ce qui suit :

- L'augmentation de l'épaisseur de la plaque en CFRP ainsi que l'épaisseur l'adhésif engendre une réduction dans la contrainte de cisaillement.
- La contrainte de cisaillement diminue si la longueur de la plaque de réparation augmente.
- La nature du matériau de la plaque de réparation joue un rôle très important dans l'efficacité du renforcement des structures en béton armé, le CFRP est considéré comme le matériau le plus efficace (résistance et légèreté).

Ce travail nous a permis de faire une synthèse bibliographique comparatives des recherches basées sur la réparation des structures en béton armé ainsi que, découvrir quelques paramètres important influençant sur l'interface des structures en béton armé tel que la nature du matériau, la géométrie de la plaque de réparation.



## **Références Bibliographiques**

## Références bibliographiques

### Références bibliographiques :

- «Glossaire des matériaux composites». (2006, Octobre). carma –Actualisation.
- ANSYS Release V. 12. ANSYS, Inc., Manuals set. SAS IP, Inc. USA. (2009).
- Bluey Technologies :Evaluating Cracking in Concrete. (2014).  
<https://www.giatecscientific.com/education/cracking-in-concrete-procedures/>.
- ACI, 4.-9. (1996). “Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures”. American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, MI, USA, p. 40.
- Ascione, L. F. (2000). Modeling of composite/concrete interface of RC beams strengthened with composite laminates. Composites Engineering Part B 31. pp. 535–540.
- Association, P. C. (n.d.). Types and Causes of Concrete Deterioration.  
[https://www.cement.org/docs/default-source/fc\\_concrete\\_technology/durability/is536-types-and-causes-of-concrete-deterioration.pdf?sfvrsn=4](https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/durability/is536-types-and-causes-of-concrete-deterioration.pdf?sfvrsn=4).
- ASTM, D.-0. (2002). “Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method”. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, USA,, p. 4.
- BERTHELOT, J. (2002). matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures, TEC et DOC 4eme édition.
- Berthelot, J. (2005). Matériaux composites, comportement mécanique et. Dans éditions.
- Berthelot, J. M. (2005). Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4ème Edition.
- Chatain, M. (2001). Matériaux composites : présentation générale. Technique de l’ingénieur, Traité Plastiques et Composites, Vol. AM 6.
- Chen, Y. D. (2007). “Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures”. . Composite Structures, Vol. 78, No. 1,, pp. 101-111.
- Clear, K. a. (s.d.). “Time-to-Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabe, V.1: Effect of Mix Design and Construction Parameters,”. p. 103 pages.
- Daniel Gay. (2009). Matériaux Composites. 4ème Edition,Hermès.
- Dominique Boussuge, E. t. (s.d.). Les principales dégradations du béton.  
<https://www.journaldelagence.com/1181974-les-principales-degradations-du-beton-dominique-boussuge-pathologiste-expert-technique-scientifique-en-ouvrages-batis>.
- Fissuration des ouvrages en béton armé - Généralités. (s.d.).  
[https://www.infociments.fr/betons/generalites-sur-la-fissuration-des-ouvrages-en-beton-arme#:~:text=de%2050%20microns\).-](https://www.infociments.fr/betons/generalites-sur-la-fissuration-des-ouvrages-en-beton-arme#:~:text=de%2050%20microns).-)

## Références bibliographiques

- ,%C3%80%20I%C3%A9tat%20normal%20le%20b%C3%A9ton%20est%20fissur%C3%A9,%C3%A0%20sa%20r%C3%A9sistance%20en%20traction).
- Foo, S. N. (2001). “Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d’atténuation des risques pour les immeubles canadiens”, Bureau de la Protection des Infrastructures Essentielles et de la Protection Civil, Ministère des Travaux Publics et Service Gouvernementaux. N° du Catalogue : D 82-73/2002F-IN.
  - Généralité sur les matériaux composites. (s.d.). <http://thesis.univ-biskra.dz/1136/3/CHAPITRE%20I.pdf>.
  - Généralités sur les matériaux composites. (s.d.). Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296v1>.
  - Guillon, D. (1995). “Fibres de verre de renforcement ”, Technique de l’Ingénieur, Traité Plastiques et Composites.
  - Ishai, O. (1975). “Environmental effects on deformation, strength and degradation of unidirectional glass fiber reinforced plastics. I. Survey”. Polymer engineering and Science, vol. 15,, pp. 486-490.
  - jaquinet, P. (1991). Utilisation des matériaux composites, Edition Hermès, paris.
  - Jean Marie Berthelot. (2010, Novembre). Mécanique des Matériaux et structures composites.
  - Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot. (2000). Des Matériaux ,3ème Edition.
  - JSCE, -E. (1995). “Test method for tensile fatigue of continuous fiber reinforcing materials”. Japanese Society of Civil Engineering (JSCE), Tokyo, Japan,.
  - Karbhari, V. a. (1998). Issue related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening, composite structures,. pp. 293-304.
  - L. Ascione, L. F. (s.d.). Modeling of composite/concrete interface of RC beams strengthened with composite laminates. Department of Civil Engineering, University of Salerno, Via Ponte Don Melillo, 84084 Fisciano, SA, Italy.
  - La carbonatation du béton. (s.d.). [https://www.m-habitat.fr/terrassement-et-fondation/maconnerie/la-carbonatation-du-beton-4055\\_A#:~:text=Les%20cons%C3%A9quences%20de%20la%20carbonatation%20du%20b%C3%A9ton&text=La%20carbonatation%20entra%C3%Aene%20des%20probl%C3%A8mes,et%20continuent%20%C3](https://www.m-habitat.fr/terrassement-et-fondation/maconnerie/la-carbonatation-du-beton-4055_A#:~:text=Les%20cons%C3%A9quences%20de%20la%20carbonatation%20du%20b%C3%A9ton&text=La%20carbonatation%20entra%C3%Aene%20des%20probl%C3%A8mes,et%20continuent%20%C3).
  - La dégradation des structures en béton par réaction sulfatique interne (RSI). (s.d.). <https://www.constructioncayola.com/batiment/article/2009/12/10/33926/la-degradation-des-structures-beton-par-reaction-sulfatique-interne-rsi>.

## Références bibliographiques

- Lacroix R. (1999). renforcement et réparation des structures par collage de composites :le TFC®, maintenance- diagnostic et réparation. pp. (23-29).
- Leeming, M. B. (1999). Design and specifications for FRP plate bonding of beams, strengthening of reinforced concrete structures using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering. pp. 21-26.
- Lomothe, P. (1999). essai de renforcement avec des matériaux composite pour poutre de pont en béton armé, mémoire de maîtrise et science appliqué, département de génie civil, l'université Sherbrooke (Québec),. Canada.
- Luyckx, J. (1999). “Composites à fibres de carbone dans le génie civil”, Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, AM 5 620.
- Malek, M. S. (1998). Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end. ACI Structural Journal 95 (2). pp. 142–152.
- Maurice Reyne. (1990). Technologie des composites. Edition HERMES, Paris.
- Meier. (1995). strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites, construction and building materials. pp. (341-351).
- MEMOIRE DE FIN D'ETUDE. (2019-2020). Renforcement des structures par des matériaux composites, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/19921/memoire%20finale%202020%20pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Mémoire de Magister. (2005). Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA. <https://bu.umc.edu.dz/theses/gcivil/MER4221.pdf>.
- OUZAA.KH. (2004). réhabilitation des structures.
- Paradis, F. (2004). analyse du comportement structural d'un composite mince en béton. Analyse du comportement structural du canoë de béton. Faculté des sciences et de génie maîtrise en génie civil, université Laval. [www.these.ulaval.ca/2004/21701/21701](http://www.these.ulaval.ca/2004/21701/21701).
- Phalippou, J. (2001). “Verres – Aspects théoriques – Propriétés et applications”, Technique de l'ingénieur, Traité Sciences fondamentales, AF 3 600, AF 3 601.
- Renard, J. (2010). « Fatigue des Matériaux Composites Renforcés de Fibres Continues ». Ed. Techniques de l'Ingénieur, AM5410, Caractérisation et propriétés d'usage des composites.
- Roberts KTM. (s.d.). Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams. The Structural Engineer 1989. pp. 37-46.
- S.T. Smith et J.G. Teng. (2001). Interfacial stresses in plated beams. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.

## Références bibliographiques

- S.T. Smith, J. T. (2001). Interfacial stresses in plated beams. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.
- Swamy RN, J. K. (1988). Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates. *The Structural Engineer*, pp. 85-94.
- Thoft-Christensen. ( P. (2008)). Deterioration of reinforced concrete structures.
- Tounsi Abdelouahed. (2005). Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate. Laboratoire des Matériaux et Hydrologie, Université de Sidi Bel Abbès, BP 89 Cité Ben M'hidi, 22000 Sidi Bel Abbès, Algeria.
- Tounsi Abdelouahed. (2005). Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate. Laboratoire des Matériaux et Hydrologie, Université de Sidi Bel Abbès, BP 89 Cité Ben M'hidi, 22000 Sidi Bel Abbès, Algeria.
- Tsai, M. O. (1998). Improved theoretical solutions for adhesive lap joints. *International Journal of Solids and Structures* 35 (12). pp. 1163–1185.
- Verdu, j. ., (2000). « Action de l'eau sur les plastiques ». Ed. Techniques de l'Ingénieur, AM3165, Traité des plastiques et des composites,.
- Youcef, D. (2004). Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des. Université de Biskra

