

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université HAMMA LAKHDAR El-Oued

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Génie Civil.

Option : Matériaux en Génie Civil.

Theme :

Etude du renforcement des poutres en béton armé par les matériaux composites

Dirigé par:

D^r: Ali FARIK

Présenté par:

- ✓ HADDANA Houssam
- ✓ KAROUI Abed Hamid
- ✓ REZZAG BARA Med Lamine

Membres du Jury:

D^r SOULIMANE Ilyas Examineur

D^r KAAB Med Zouhair Examineur

Promotion : Juin 2021

هَلَاء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(قل إعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله
والمؤمنون)
صدق الله العظيم

إلهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار إلا بطاعتك .. ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك ..
ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك .. ولا تطيب الجنة إلا برويتك الله جل جلاله
.. إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة .. إلى نبي الرحمة ونور العالمين
سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار .. إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى من أحمل أسمه بكل افتخار ..
أرجو من الله أن يمد في عمرك لتري ثماراً قد حان قطافها بعد طول انتظار
.. وستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد
والدي العزيز

إلى ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني .. إلى بسمه الحياة وسر الوجود
إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى أغلى الحبايب
إلى من أروضتني الحب والحنان
إلى رمز الحب وبلسم الشفاء
إلى القلب الناصع بالبياض
إلى ينبوع الصبر والتفاؤل والأمل
إلى كل من في الوجود بعد الله ورسوله
إلى سندي وقوتي وملأذي بعد الله
والدتي الحبيبة

إلى من آثروني على أنفسهم
إلى من علموني علم الحياة
إلى من أظهروا لي ما هو أجمل من الحياة
إخوتي

إلى من كانوا ملاذي وملجئي
إلى من تذوقت معهم أجمل اللحظات
إلى من سأفقتهم وأتمنى أن يفتقدوني
إلى من جعلهم الله أخوتي بالله و من أحببتهم في الله

طلاب قسم الهندسة المدنية

شكرتكم

لأبد لنا ونحن نخطو خطواتنا الأخيرة في الحياة الجامعية من وقفة نعود إلى أعوام قضيناها في رحاب الجامعة مع أساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين بذلك جهودا كبيرة في بناء جيل الغد لتبعث الأمة من جديد وقبل أن نمضي تقدم أسمى آيات الشكر والامتنان والتقدير والمحبة إلى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة

إلى جميع أساتذتنا الأفاضل... إلى الذين مهدوا لنا طريق العلم والمعرفة...
"كن عالما .. فإن لم تستطع فكن متعلما ، فإن لم تستطع فأحب العلماء ، فإن لم تستطع فلا تبغضهم"

وأخص بالتقدير والشكر:

الدكتور " علي فريـك "

الذي نقول له بشراك قول رسول الله صلى الله عليه وسلم:

"إن الحوت في البحر ، والطير في السماء ، ليصلون على معلم الناس الخير"

كما أنني أتوجه بخاص الشكر إلى من علمنا التفاؤل والمضي إلى الأمام، إلى من وقفوا إلى جانبنا عندما ضللتنا الطريق

الذين كانوا عوناً لنا في بحثنا هذا ونورا يضيء الظلمة التي كانت تقف أحيانا في طريقنا.
إلى من زرعوا التفاؤل في دربنا وقدموا لنا المساعدات والتسهيلات والأفكار والمعلومات، ربما دون يشعروا

بدورهم بذلك فلهم منا كل الشكر

ملخص

تشكل تقوية وصيانة الهياكل المنجزة بالخرسانة المسلحة عملية مهمة جدا في مجال الهندسة المدنية. حيث تتواجد العديد من التقنيات والتي من بينها أحد الطرق الأكثر فعالية لإصلاح وتقوية الهياكل الخرسانية والمتمثلة في التعزيز بالمواد المركبة.

والجاذبية أداء تقنية التسليح باستخدام المواد المركبة، فإن هذه المذكرة تهتم بدراسة سلوك رافده من الخرسانة المسلحة معززة بالمواد المركبة بواسطة طريقة حسابية معتمدة.

أجريت هذه الدراسة الحسابية لتقييم تأثير بعض المتغيرات على كفاءة وأداء تقوية الروافد مثل مساحة مقطع ونوع التسليح. حيث أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها على تحسن كبير في سعة اللي النهائية لمقطع ذو شكل مستطيل معزز بالمواد المركبة دون زيادة كبيرة في وزن العناصر المقواة.

الكلمات المفتاحية: رافده، التعزيز، الإصلاح، المواد المركبة، سعة اللي.

Résumé

Le renforcement et la maintenance des ouvrages en béton armé sont des tâches très importantes dans le domaine du génie civil. Plusieurs techniques sont disponibles et parmi elles, l'une des plus efficaces pour la réparation est le renforcement de structures en béton armé le renforcement par matériaux composites.

Attiré par les performances de la technique de renforcement par matériaux composites, ce mémoire s'intéresse à l'étude de comportement d'une poutre en béton armé renforcé par des matériaux composites par une méthode analytique approuvée.

Cette étude a été menée pour évaluer l'effet de quelques paramètres sur la performance du renforcement des poutres comme la section de renforcement et le type de renforcement. Les résultats obtenus permettent de constater une amélioration considérable de la capacité flexionnelle ultime des sections rectangulaires renforcées sans augmentation considérable du poids des éléments renforcés.

Mots-clés : poutre, renforcement, réparation, matériaux composites, capacité flexionnelle.

TABLE DES MATIERE

Introduction générale	1
CHABITRE 1: DEGRADATIONS DES STRUCTURES EN BETON ARME ET METHODOLOGIE D'UN DIAGNOSTIC	
1.1. Dégradations des structures en béton armé:.....	3
1.1.1. Introduction:	3
1.1.2. Les phases de dégradation du béton armé:.....	3
1.1.2.1. Les phases de degradation:.....	3
1.1.2.1.1 Une phase d’incubation ou de latence.....	3
1.1.2.1.2. Une phase de développement	3
1.1.2.1.3. Les dégradations dues à la corrosion des armatures:	3
1.1.3. Origines et mécanismes des désordres dus a la corrosion	4
1.1.3.1. Les agents corrosifs dans les milieux au contact du béton:	4
1.1.3.2. Les stades de corrosion:	4
1.1.4. Les pathologies du béton armé	6
1.1.4.1. Les causes physiques de degradation:.....	6
4.4.1.2.Les causes chimiques de degradation:	8
1.1.4.3. Les causes mécanique de degradation:	11
1.1.4.4. Les autres causes de dégradation des bétons:.....	11
4.4.1.1.4. Mauvais positionnement des armatures:	12
1.1.4.4.2. Mauvaise qualité des bétons employés:	12
1.1.4.4.3. Vibration trop importante:.....	12
1.1.4.4.4. Absence de cure du béton:.....	12
1.1.4.4.5. Cycle humidité / sécheresse:	12
1.2. METHODOLOGIE D'UN DIAGNOSTIC.....	12
1.2.1. C’est quoi un diagnostic?	12
1.2.2. Diagnostic d'un ouvrage en béton armé	12
1.2.2.1. Objectifs du diagnostic de corrosion	12
1.2.2.2. Procédure à suivre.....	13
1.2.2.3. Visite preliminaire	13
1.2.2.4. Inspection detaillee	14

1.2.2.5. Investigation in SITU:	14
1.2.3 Types d'investigation:	16
1.2.3.1. Les méthodes de non destructives et destructives appliquées en génie civil:	16
1.2.3.1.1. Les investigations non destructives:	16
1.2.3.1.2. Investigations destructives:	19
1.2.4. Rapport de diagnostic	22
1.3. CONCLUSIONS	23

CHABITRE 2: LES MATERIAUX COMPOSITE

2.1. INTRODUCTION.....	24
2.2. Définitions et Propriétés matériau composite	24
2.2.1. Qu'est ce qu'un matériau composite?	24
2.3. Éléments Constituants d'un Matériau Composite:	26
2.3.1. Les fibres:.....	26
2.3.2. Les matrices et adhésifs:	31
2.4. Les polymers:	34
2.4.1. Classification des polymères:	35
2.4.2. Propriétés du polymère	35
2.4.2.1. Propriétés et structures chimiques:	35
2.4.2.2. Propriétés physiques et mécaniques:	36
2.5. Avantages et inconvénient des matériaux composites	37
2.5.1. Avantages.....	37
2.5.2. Inconvénients	37
2.6. Application des composites en génie civil.....	37
2.6.1. Réparation des fissures:	38
2.6.2. Renforcement des poutres par collage de plaques:.....	38
2.6.3. Renforcement des dalles:	39
2.7. CONCLUSION	41

CHABITRE 3: DIFFERENTS METHODES DE RENFORCEMENT ET DE REPARATION

3.1. Définitions.....	42
3.1.1. Réparation:	42
3.1.2. Renforcement:	42
3.2. Les méthodes de réparation structurale:	42
3.2.1. Réparation des désordres superficiels:.....	42
3.2.2. Traitement des fissures:	43
3.2.3.L'augmentation de la hauteur utile de la section:	44
3.2.4.Réparation par béton projeté	45
3.2.5.Réparation ou renforcement par précontrainte additionnelle:.....	46
3.2.6.Réhabilitation renforcement avec plaques d'acier.....	47
3.2.6.1. Les matériaux utilises:	48
3.2.7.Renforcement par collage de plats composites	49
3.3. CONCLUSION:	50

CHABITRE 4 : ETUDE DE CAS D'UNE POUTRE RENFORCE PAR LES MATERIAUX COMPOSITES

4.1. Introduction.....	51
4.2. Méthode de calcul d'une section rectangulaire en béton armé renforcée au moyen de matériaux composites en flexion simple:	51
4.2.1. Caractéristiques des matériaux.....	51
4.2.1.1. Le béton.....	51
4.2.1.2.Les aciers:.....	52
4.2.1.3. Le matériaux composites.....	53
4.2.2. Développement des équations de base pour une section non usuelle soumise à la flexion simple	53
4.2.2.1. Section non usuelle en béton armé non renforcée	53
4.2.2.2. Section non usuelle en béton armé renforcée	55
4.2.2.3. Section rectangulaire non renforcée	58
4.2.2.4. Section rectangulaire renforcée	59
4.3. Présentation de cas	60
4.3.1.Présentation d l'ouvrage	60

4.3.2.Calcul de poutre sans renforcement.....	62
4.3.2.1. Section la poutre sans renforcement	63
4.4.Capacité flexionnelle d'une section rectangulaire renforcée.....	64
4.4.1.Section rectangulaire renforcé Par SikaWrap-230 C – Sikadur-330	64
4.4.2.Section rectangulaire renforcé Par SikaWrap-600 C – Sikadur-300:.....	67
4.5. Comparaison entre le renforcement par les matériaux composites et le chemisage par béton armé.....	70
4.5.1. Poutre renforcé par SIKA WRAP 230 – C	70
4.5.2. Poutre renforcé par SIKA WRAP 600 – C	71
4.6. Calcul de la section nécessaire de matériaux composites pour le renforcement d'une poutre renforcé soumise à la flexion simple	72
4.6.1. Renforcement par SIKA WRAP 230 – c	73
4.6.2. Renforcement par SIKA WRAP 600 – c	74
4.7. Conclusion	74
CONCLUSION GENERALE	75
REFERENCES	76
L'ANNEXES.....	78

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1: Dégradation due à la corrosion.....	5
Figure 1.2: Erosion béton	6
Figure 1.3: Désordres dus à l'incendie	7
Figure 1.4: Les dégradations dues au Gel.....	7
Figure 1.5: Deux types de dégradations Gel interne et Écaillage	8
Figure 1.6: La carbonatation d'un morceau de béton a induit une corrosion du renfort avec un effritement du béton armé.....	9
Figure 1.7: Fissures profondes du béton causées par la décomposition alcaline:.....	10
Figure 1.8 : Les Réactions Sulfatiques d'origine Interne et Externe	11
Figure 1.9: L'auscultation sonique des bétons.....	17
Figure 1.10: Scléromètre	18
Figure 1.11: Test à la carbonatation	20
Figure 1.12: Prélèvement d'acier	21
Figure 1.13: Mesure du potentiel de corrosion	22

CHAPITRE 2

Figure 2.1: Éléments Constituants d'un Matériau Composite	25
Figure 2.2: Orientation des fibers.....	26
Figure 2.3 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort	27
Figure 2.4: Rubans de fibre de verre	28
Figure 2.5: Formes de fibres de verre.....	28
Figure 2.6: Carbon Fiber.....	29
Figure 2.7: Application majeure des fibres aramides.....	30
Figure 2.8: Formes de fibres d'aramide	30
Figure 2.9: Organigramme des différentes familles de matrices	32
Figure 2.10: Différentes techniques de renforcement des poutres en béton armé	39
Figure 2.11: Renforcement des dalles en béton par des bandes en CFRP	40
Figure 2.12: Différentes techniques de renforcement des éléments en béton.....	40

CHAPITRE 3

Figure 3.1: Renforcement des poutres par chemisage.....	44
Figure 3.2: Les deux techniques de projection	46
Figure 3.3: Précontrainte Additionnelle	47
Figure 3.4 :La mise en oeuvre des plats collés	48
Figure 3.5 : Renforcement par collage de plats composites	49

CHAPITRE 4

Figure 4.1 :loi de comportement du béton.....	51
Figure 4.2 : loi de comportement de l'acier	52
Figure 4.3 : Loi de comportement du composite	53
Figure 4.4: Image à l'E.L.U d'une section non usuelle en béton armé.....	54
Figure 4.5: Image à l'E.L.U d'une section non usuelle en béton armé renforcée	56
Figure 4.6: section rectangulaire en béton armé	58
Figure 4.7: section rectangulaire en béton armé renforcée.....	59
Figure 4-8: programme créé avec Excel pour le calcul d'une poutre renforcé par Sika Wrap.....	60
Figure 4-9 : présentation de l'ouvrage.....	61
Figure 4 – 10: Organigramme de calcul d'une section rectangulaire en béton armé soumis à la Flexion simple (E.L.U).....	62
Figure 4 – 11: SikaWrap-230 C	64
Figure 4 – 12: Sikadur-330	64
Figure 4-13 : Variation de MU en fonction de nombre des couches de PRFC (Section rectangulaire renforcé par sikawarp 230-c)	66
Figure 4 – 14: SikaWrap-600 C	67
Figure 4 – 15: Sikadur-300	67
Figure 4-16: Variation de MU en fonction de nombre des couches de PRFC (section rectangulaire renforcé par sikawarp 600-c)	69
Figure 4-17: Organigramme de calcul de la section de composite nécessaire	72

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 2

Tableau 2.1: Propriétés mécaniques et physiques des composites à base de fibres.....	31
Tableau 2.2: présente une étude comparative rapide de quelques fibres présentées dans cette section.....	31
Tableau 2.3 : Caractéristiques des résines thermodurcissables	33
Tableau 2.4: caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide	33
Tableau 2.5: présente une étude comparative rapide des différents types de matrices polymères présentées dans cette section... ..	34
Tableau 2.6: résume la composition chimique des différents polymères.....	36
Tableau 2.7: Caractéristiques physiques et mécaniques des polymers... ..	37

CHAPITRE 3

Tableau 3.1: Avantages et inconvénients chemisage en béton armé	45
--	----

CHAPITRE 4

Tableau 4-1 : Section rectangulaire renforcé par sikawarp 230-c.....	66
Tableau 4.2: Section rectangulaire renforcé par sikawarp 600-c.....	69
Tableau 4.3: Section équivalente de chemisage par béton armé (section rectangulaire avec SIKA WRAP 230 – C)	70
Tableau 4.4 : Section équivalente de chemisage par béton armé (section rectangulaire avec SIKA WRAP 600 – C)	71

LISTE DES SYMBOLES

PRFC	Polymère renforcé par fibre de carbone
PRF	Polymère renforcé de fibres .
PRFV	Polymère Renforcé par Fibre de verre .
AC (X)	L'aire de la partie comprimée du béton, en fonction de x
A_F	Aire de la section du renfort
A_{FNEs}	Aire de la section nécessaire
A_s	Aire de la section d'aciers tendus
A'_s	Aire de la section d'aciers comprimé
A_U	La section utile
M_U	Moment ultime
M_{SOLL}	Moment de sollicitation
NP	Nombre de plis de composite
B	Largeur de la section
D	La hauteur utile de la section
D'	L'enrobage des armatures tendues.
E_c	Module d'Young du béton
E_F	Module de Young de composite
E_s	Module de Young de l'acier
F_c	La force dans le béton
F_F	La force de traction du renfort
F'_s	La force de compression des aciers comprimés
F_s	La force de traction des aciers tendus
F_{CK}	Résistance caractéristique du béton obtenue à partir d'un cylindre
F_c	Contrainte de compression de béton
F_s	Contrainte dans l'acier dans phase élastique
F'_s	La contraintes élastique des aciers comprimés
F_F	Contrainte dans le composite
F_{YK}	Contrainte limite d'écoulement de l'acier
F_{FUD}	Contrainte limite en traction du renfort .
H	Hauteur de la section
K_1	Coefficient de remplissage
K_2	Coefficient de positionnement
T	L'épaisseur de renfort
X	La profondeur de l'axe neutre
Γ_C	Coefficient de sécurité du béton
Γ_S	Coefficient de sécurité de l'acier
F_{c28}	Résistance de calcul en compression du béton .
FE	Limite d'élasticité d'acier en MPa .
f_{bu}	Limite élastique du béton à l'ELU
f_{su}	Limite élastique de l'acier à l'ELU
ϵ_{CU}	Déformation relative maximale dans le béton
ϵ_F	La déformation du renfort
ϵ_{FU}	Allongement à la rupture du renfort
ϵ_s	Déformation relative dans les aciers tendus
ϵ'_s	Déformation dans les aciers comprimé
ϵ_{YK}	Déformation relative maximale dans les aciers
ρ'_s	Le taux d'armatures comprimées
ρ_s	Le taux d'armatures tendues
ρ_f	Le taux de renfor

Introduction générale

Il existe un nombre important des structures en béton armé qui ne répondent plus aux exigences d'exploitation actuelles et ce pour des raisons de dégradation ou de détérioration. Les différentes pathologies dues à des erreurs humaines lors de la conception ou durant la réalisation, ou à des changements de fonctionnalité de l'ouvrage, ou à la dégradation des matériaux constitutifs (corrosion d'armatures, carbonatation du béton....) ont un impact direct sur longévité des ouvrages. Ces structures dégradées nous obligent à intervenir pour entretenir les ouvrages pour assurer la sécurité des usagers.

L'entretien structurel est un problème complexe car les nouvelles structures ont un coût élevé et les techniques de réparation sont plus difficiles, ce qui nous oblige à diagnostiquer correctement les causes de la détérioration structurelle.

Plusieurs techniques efficaces sont disponibles dans la réparation des structures en béton armé, notamment:

- Renforcement par la méthode de chemisage en béton armé.
- Renforcement par la méthode d'enfermant avec acier dans le périmètre de l'élément en béton.

Ces dernières années, les spécialistes de ce domaine ont eu accès à une nouvelle technologie, à savoir l'installation de matériaux composites sur la surface extérieure des structures détériorées, une technique qui a prouvé sa fiabilité et son efficacité dans le domaine de la réparation des éléments en béton armé.

Les matériaux composites sont utilisés dans le domaine du génie civil pour réhabiliter et renforcer les éléments structurels tels que les poutres et les poteaux. Les premières études sur la technologie de renforcement par des matériaux composites ont commencé dans le domaine du génie civil en 1980, mais en 1990, la première utilisation de cette technologie a commencé, d'abord à titre expérimental, puis sur une base commerciale.

Le renforcement des poutres en béton par des matériaux composites peuvent être à base d'aramide, de verre ou de fibre de carbone. L'application de ces matériaux aux poutres améliore sa résistance à la flexion.

Dans ce mémoire nous avons évoqué, une étude du comportement d'une section rectangulaire d'une poutre en béton armé dans une installation en béton représentée dans une notre poutre est appliquée se trouvé dans El Oued et utilisée dans le projet de STAND de TIR U.R.S .

Cette thèse est composée de quatre chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les types de détérioration des structures en béton, leurs causes et les méthodes de diagnostic.

Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique sur les matériaux composites, leurs définition des matériaux composites, leurs types, leurs différentes caractéristiques.

Dans le troisième chapitre nous avons traité de nombreuses techniques différentes utilisées pour réparer et renforcer des structures en béton armé.

Le dernier chapitre est consacré pour des applications analytiques ont été faites pour connaître et évaluer l'effet de renforcement des poutres en béton armé soumis à la flexion simple par les matériaux composites, notamment sur la capacité flexionnelle ultime d'une section rectangulaire, comparaison entre les méthodes de renforcement. On termine ce chapitre par un exemple de renforcement et réparation de la poutre par les matériaux composites.

CHAPITRE 01 :

Dégradations des structures en béton armé et méthodologie d'un diagnostic

1.1. DÉGRADATION DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ:

1.1.1. Introduction:

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif.

Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en oeuvre des bétons.

Avant d'entreprendre des travaux de réparation il faut donc prévoir une campagne d'évaluation la plus détaillée possible de l'état de la structure.

Le but de la campagne d'évaluation est d'obtenir des informations sur l'étendue des dommages et d'établir les causes des dégradations.

La campagne d'évaluation fait partie d'un processus, constitué de plusieurs étapes, qui permettra de choisir la ou les méthodes de réparation les plus appropriées en fonction du type de dégradation.

1.1.2. Les phases de dégradation du béton armé:

1.1.2.1. Les phases de dégradation:

La détérioration du béton armé comprend trois phases successives.

1.1.2.1.1 Une phase d'incubation ou de latence:

Dite parfois d'amorçage, qui correspond à l'altération lente du béton, sans qu'il ne se produise encore des effets visibles.

La phase d'incubation s'arrête soit lorsque les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un "volume critique " provoquant un gonflement néfaste du béton (par exemple, par réaction sulfatique), soit lorsque l'enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion (par exemple, si l'enrobage est carbonaté).

1.1.2.1.2. Une phase de développement:

dite parfois de croissance, des dégradations du matériau.

La phase de développement s'arrête est celle où les dégradations sont visibles. A ce stade les réparations deviennent lourdes et coûteuses.

1.1.2.1.3. Les dégradations dues à la corrosion des armatures:

Les corps dissous dans le milieu qui environne l'ouvrage, peuvent pénétrer progressivement dans le béton. Certains d'entre eux sont agressifs, par exemple le dioxyde de carbone (CO_2), les acides (engrais, etc.) et les chlorures.

Un acier mis au contact d'un béton qui a une forte basicité (pH de l'ordre de 12) et qui n'est pas pollué par des chlorures, se recouvre d'oxydes protecteurs. Si son enrobage est chimiquement modifié, cet acier se recouvre de produits " intermédiaires " qui ne sont pas stables en présence

d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits “ finaux ” non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enrouillement continu de l'acier.

C'est pourquoi, les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu'après un certain délai. Les défauts invisibles sont des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l'enrobage de béton. Il s'agit aussi du début d'un éclatement (délaminage) de cet enrobage ou de la formation d'une fine couche de rouille sur l'acier. Dans certains cas, la dissolution des armatures se produit, sans aucune trace visible sur le parement.

Les dégradations mises en évidence sont des éclatements, des épaufrures et des fissures du béton d'enrobage. D'autres mécanismes peuvent également être à l'origine de ce type de désordres. Lorsque la corrosion est très avancée, des traces de rouille sont visibles, les armatures peuvent être mises à nu et leur dissolution (perte de section) constatée.

1.1.3. Origines et mécanismes des désordres dus à la corrosion:

1.1.3.1. Les agents corrosifs dans les milieux au contact du béton:

Les bétons armés sont au contact d'un milieu naturel : atmosphère, eaux ou sols. Ces milieux contiennent souvent des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton ou des armatures. Ainsi, les sulfates contenus par exemple dans l'eau de mer et les eaux séléniteuses peuvent provoquer le gonflement du béton, s'ils sont en quantité suffisante. Mais les agents qui sont à l'origine de la corrosion des armatures sont surtout le dioxyde de carbone et les chlorures.

Le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton. Il provoque une réaction, dite de carbonatation, avec l'eau interstitielle. Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme les hydroxydes [surtout, la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$] en carbonate (CaCO_3) et abaisse le pH de la solution interstitielle depuis environ 13 jusqu'à environ 9. Ceci dégrade la passivation des armatures.

Les chlorures dissous dans l'eau (eau de mer, sels de déverglaçage, etc.) pénètrent à partir de la surface du béton. Ainsi, la teneur en chlorure dans le béton a un certain profil. Il s'agit d'une courbe “ concentration-profondeur ” qui est strictement décroissante, si les cycles humidification-séchage sont négligeables. Dans le cas contraire, ce profil n'est décroissant qu'à partir d'une profondeur où le béton est, de façon permanente, saturé d'eau (l'eau interstitielle ne s'évaporant pas).

1.1.3.2. Les stades de corrosion:

Le stade d'incubation de la corrosion correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage de béton, sans corroder les

armatures. Il s'arrête lorsqu'au niveau des armatures, la teneur en agent agressif atteint un certain seuil.

La figure (1) ci-après illustre ces stades de dégradation par corrosion due à des agents agressifs venant du milieu environnant.

Dans le cas de la carbonatation, ce seuil correspond au fait que les armatures se trouvent dans un béton carbonaté et suffisamment humide.

Dans le cas des chlorures, le béton étant alors généralement humide et oxygéné, le seuil correspond très approximativement à un taux de 0,4% par rapport au poids de ciment.

Cette valeur correspond à un rapport de concentrations $[Cl^-]/[OH^-]$ compris entre 0,6 et 1, suivant les ciments.

Pendant le stade de développement de la rouille, la vitesse de dissolution (corrosion) de l'acier est significative. La rouille formée est le plus souvent gonflante et provoque une désagrégation de l'enrobage, par épaufrure, éclatement ou fissuration.

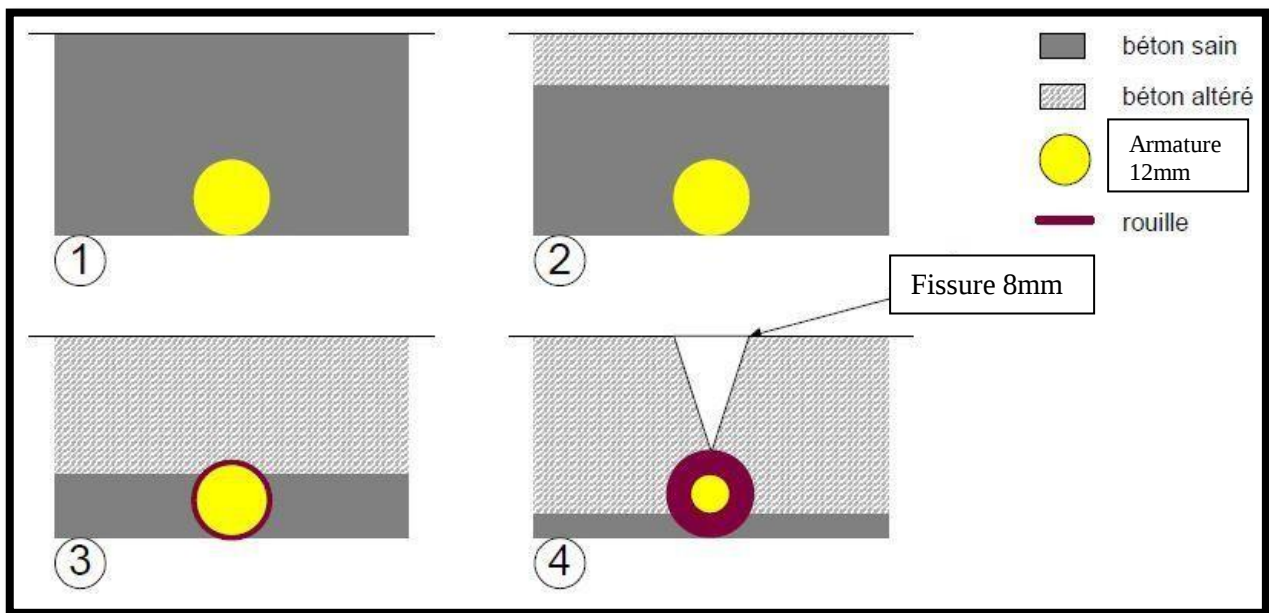


Figure 1.1: Dégradation due à la corrosion.

Cette dégradation procède par étape : dans le béton sain (1), un agent agressif pénètre progressivement (2), lorsque sa teneur est assez forte, l'armature commence à se corroder (3) et la rouille peut faire éclater l'enrobage (4)

1.1.4. Les pathologies du béton armé :

Causes et consequences:

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif.

Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en oeuvre des bétons.

1.1.4.1. Les causes physiques de dégradation:

Erosion:

Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement.



Figure 1.2: Erosion beton

Incendie:

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.



Figure 1.3: Désordres dus à l'incendie

Cycle gel/ dégel:

Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de béton, des chambres froides.



Figure 1.4: Les dégradations dues au Gel



Gel interne

Écaillage

Figure 1.5: Deux types de dégradations Gel interne et Écaillage

4.4.1.2. Les causes chimiques de dégradation:

La carbonatation:

Etonnamment, la carbonatation a peu d'impact direct sur les caractéristiques mécaniques du béton. En fait, le dioxyde de carbone, lorsqu'il est en forte concentration dans une atmosphère humide, pénètre dans les pores du béton et entre en réaction avec l'hydroxyde de carbone présent dans le ciment constitutif du béton. Cette réaction, qui évolue depuis la surface vers l'intérieur d'élément en béton, induit un changement des propriétés chimiques du béton !

Le béton possède naturellement la capacité de protéger les armatures enrobées contre la corrosion. En revanche, lorsqu'il est « carbonaté », le béton perd cette capacité. Les armatures se retrouvent donc directement exposées et « affaiblies » vis-à-vis de la corrosion. Ainsi, en présence d'humidité et d'oxygène, ces armatures corrodent. La création d'oxyde de fer (la rouille) engendre une augmentation locale du volume des armatures. Ce gonflement, en exerçant des pressions internes, fait éclater la croûte extérieure de l'élément en béton. Ces éclats, aussi appelés « épaufrures », sont très caractéristiques d'une dégradation de la structure induite par une carbonatation du béton.

La **figure 6** présente quelques conséquences de la carbonatation sur le matériau béton armé comme la corrosion des armatures, les microfissures et les fissures orientées au niveau des enrobages (au voisinage et le long des aciers), ainsi que les éclatements et les décollements du béton plus particulièrement aux coins.



Figure 1.6: La carbonatation d'un morceau de béton a induit une corrosion du renfort avec un effritement du béton armé

Alcali-réaction ou cancer du béton (RAG) :

Réaction qui se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide. Des gels gonflants apparaissent en développant des microfaiençages et un éclatement du béton.



Figure 1.7. dans le béton causées par la décomposition alcaline

Réactions sulfatiques :

Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étringite, le gypse et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.

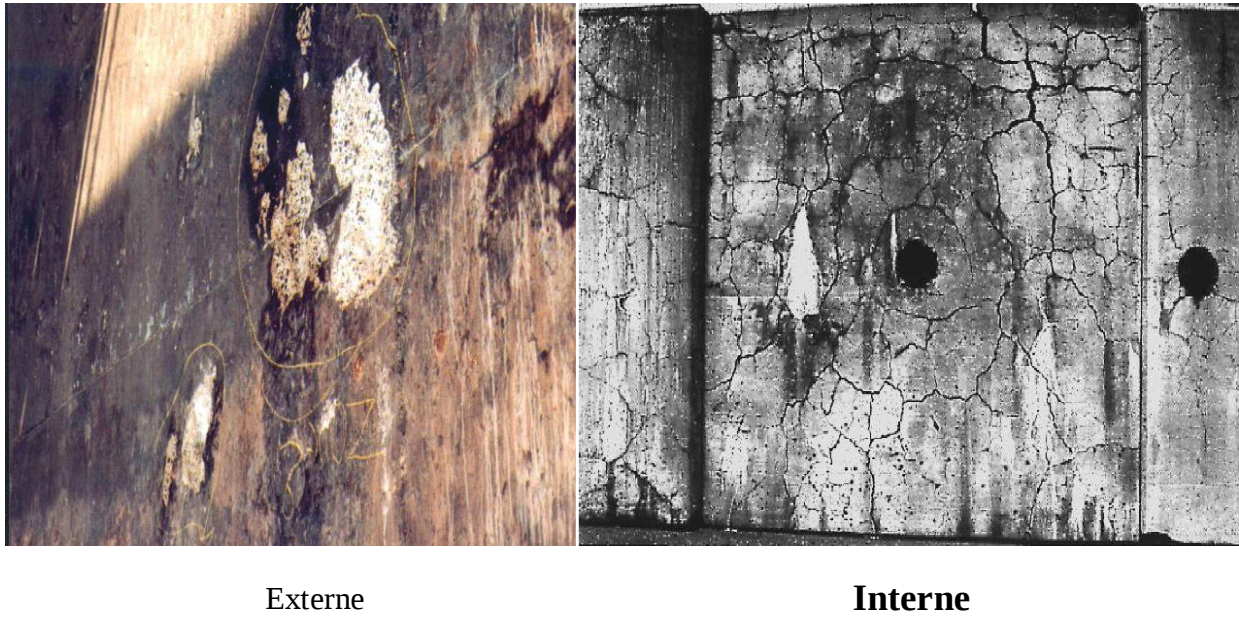


Figure 1.8 : Les Réactions Sulfatiques d'origine Interne et Externe

1.1.4.3. Les causes mécanique de dégradation:

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

Les fissures sont des phénomènes qui affectent la détérioration de béton, leur présence est un signe d'endommagement de la structure. Elle accélère le processus des dégradations des bétons, car elles augmentent la perméabilité et réduisent la compacité de ces matériaux. Elles représentent la trajectoire que prennent des éléments agressifs de l'extérieur vers le cœur de béton ou la trajectoire au sens inverse des résultants des réactions chimiques internes en vers l'extérieur. L'étude et le monitoring des fissures vis-à-vis de ces emplacements, sa forme et ses orientations (la géométrie), ses évolutions en cours du temps sur la surface des bétons et éventuellement en profondeur représentent une mission parfois difficile voire même impossible.

1.1.4.4. Les autres causes de dégradation des bétons:

Nous avons vu que les bétons se dégradent à cause des milieux dans lesquels ils sont placés car ils y subissent des agressions physiques et chimiques. Certaines causes, essentiellement dues à une mauvaise mise en oeuvre, peuvent également participer à la dégradation des bétons.

4.4.1.1.4. Mauvais positionnement des armatures:

Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface.

1.1.4.4.2. Mauvaise qualité des bétons employés:

Un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.

1.1.4.4.3. Vibration trop importante:

Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton.

1.1.4.4.4. Absence de cure du béton:

La cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se faïence en surface.

1.1.4.4.5. Cycle humidité / sécheresse:

Les cycles répétés d'humidité/sécheresse entraînent des variations dimensionnelles du béton pouvant créer des fissures et par conséquent la corrosion des aciers.

1.2. METHODOLOGIE D'UN DIAGNOSTIC:

1.2.1. C'est quoi un diagnostic?

Le diagnostic est un ensemble de techniques élaborées dont l'objectif est d'évaluer l'état de matériau dans une structure donnée, tout en évaluant la stabilité globale et partielle de cette structure. Pour pouvoir analyser, déterminer les causes affectant cette conception, et envisager à la fin une intervention et réparation avec succès.

1.2.2. Diagnostic d'un ouvrage en béton armé:

1.2.2.1. Objectifs du diagnostic de corrosion:

Les objectifs d'un diagnostic de corrosion sont :

- L'identification de l'origine (carbonatation, chlorures externes ou internes, autres),
- L'évaluation de l'étendue dans l'espace,
- La prédiction de l'évolution probable, dans le temps ou dans l'espace, • l'estimation des conséquences sur la sécurité de l'ouvrage ou des personnes, • la définition des suites à donner et entre autres le principe des solutions de réparation.

Des considérations d'ordre esthétique sont par ailleurs à prendre en compte dans de nombreux cas : bâtiments, monuments historiques, du fait de la nature des matériaux de base, de leur texture, de leur couleur et de la nature du ciment. Ceci est à prendre en compte dans l'établissement du programme d'investigations.

1.2.2.2. Procédure à suivre:

La procédure à suivre pour un diagnostic, s'intègre dans une démarche globale qui peut mener jusqu'à des travaux de réparation.

La découverte des désordres sur une structure entraîne généralement:

- la mise en oeuvre de mesures de sauvegarde si nécessaire (purges, filet de protection...),
- la réalisation d'une visite préliminaire et de certaines autres opérations dans le but d'établir un pré-diagnostic,
- la mise au point d'un programme d'investigation,
- le lancement des opérations liées au diagnostic...

L'ingénieur chargé des opérations de diagnostic doit avoir des compétences sur la physico-chimie des matériaux, l'instrumentation, les méthodes de réparation et de traitement. Dans les cas délicats, il devra s'associer avec un ingénieur spécialiste des structures (pour les problèmes d'ordre mécanique), ou un ingénieur chimiste de laboratoire (pour les problèmes liés aux gonflements du béton, etc.).

1.2.2.3. Visite préliminaire:

La visite préliminaire a pour objet d'améliorer la compréhension de l'état et du fonctionnement de la structure, de préciser les conditions environnementales, les désordres visibles, l'accessibilité des parties dégradées. Cette inspection débouche sur un pré-diagnostic et sur un programme d'investigations. Elle comprend :

- la collecte des informations nécessaires à la compréhension de l'ouvrage : historique, documents, dossiers, rapports, implantation, orientation, date de construction, plans de coffrage et de ferrailage, environnement (nature chimique, vents dominants), matériaux (ciment, agrégats, dosage), etc.
- Un examen succinct de l'intégralité de la structure, et le relevé de tous les symptômes avec prise de photographies. On utilisera les moyens d'accès les plus adaptés : il est nécessaire de voir de près les surfaces dégradées. Quelques tests simples (profondeur de carbonatation, présence de chlorures, alcali-réaction) pourront être envisagés à cette étape, afin d'orienter le programme d'analyse futur).

Après cette visite, l'ingénieur doit être capable :

- d'émettre un pré-diagnostic sur les causes probables des désordres,
- d'effectuer la mise au point du programme des investigations. Ce dernier tiendra compte de toutes les sujétions relatives à l'accès, l'environnement, la présence d'énergie électrique etc.,
- d'évaluer si la mise en jeu des responsabilités et garanties est nécessaire,

- et de faire évoluer les mesures de sauvegarde (limitation du trafic, mise sous surveillance renforcée...).

Il doit également estimer le coût probable et la durée des investigations, si celles-ci sont raisonnables au vu de la valeur vénale de l'ouvrage...

1.2.2.4. Inspection détaillée:

L'inspection visuelle de la totalité de la structure est mise en oeuvre afin de détecter tous les signes de détérioration, et d'identifier toutes les sources potentielles de désordres. Elle comprend les deux phases suivantes :

a. Préparation de l'inspection:

Il s'agit tout d'abord de vérifier et compléter les informations recueillies lors de la visite préliminaire, de rechercher des documents de synthèse déjà établis, tels que les précédents rapports d'expertise, etc.

Les moyens d'accès seront recensés et définis au préalable, et toutes les dispositions prises (sécurité, accès, nettoyage, etc.).

b. Inspection:

L'inspection proprement dite comprend le relevé, éventuellement sur plans, de tous les désordres visibles, et de tous renseignements utiles quant à l'aspect du parement:

- La présence d'anciens revêtements, ou de produits d'imprégnation,
- L'apparence de la surface du béton, stalactites, efflorescences, traces de rouille,
- La présence de fissures, (ouverture, réseau),
- La détérioration de la peau du béton,
- Les armatures apparentes et les épaufrures,
- La déformation de la structure,
- La détection des zones sonnant creux,
- Les traces d'humidité.

1.2.2.5. Investigation in SITU:

Le programme des investigations est établi en tenant compte des contraintes et impératifs suivants :

- L'importance de la structure,
- La nature, la gravité et l'intensité des phénomènes, la sécurité des personnes,
- Les délais et les coûts,
- L'accessibilité,
- l'environnement, etc.

Schéma des étapes de diagnostic d'un ouvrage en béton armé

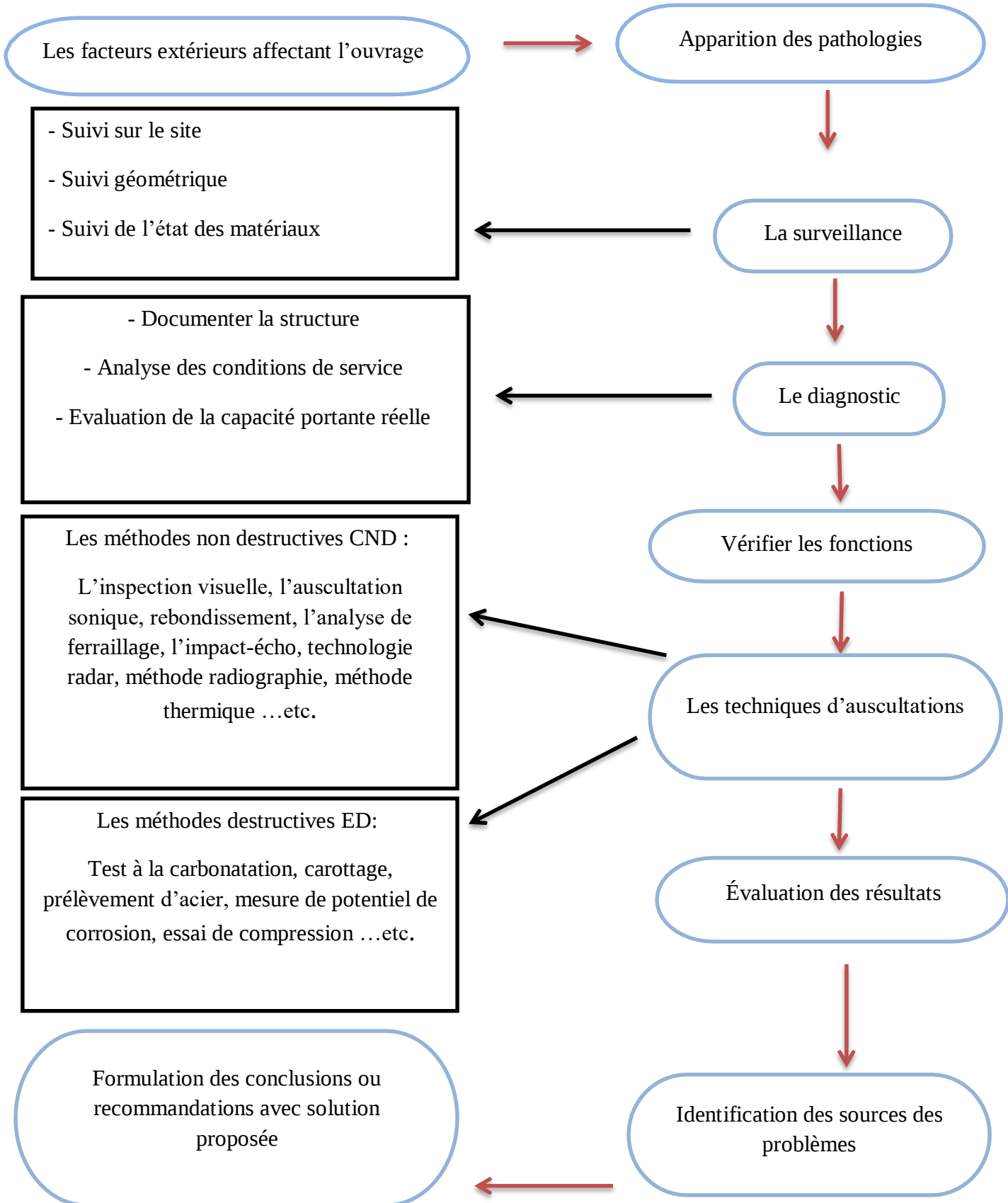


Figure 1.8: Schéma des étapes de diagnostic d'un ouvrage en béton armé

1.2.3 Types d'investigation:

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives.

1.2.3.1. Les méthodes de non destructives et destructives appliquées en génie civil :

Les techniques de (CND) constituent l'une des méthodes les plus efficaces pour prévenir aux risques, et de suivre le vieillissement afin d'augmenter la durée de service des structures. En général, les essais destructifs (CD ou ED) sur carottes sont destinés pour évaluer les propriétés réelles des bétons. Toutefois, il existe des obstacles comme la difficulté de réaliser des prélèvements en cas de sensibilité d'ouvrage ou en présence d'un environnement dangereux (radioactivité), les informations obtenues sont à l'échelle locale, en plus le prélèvement peut être réalisé dans des zones non représentatives. Ces limites justifient l'utilité de l'évaluation par essai non destructif réservé à l'étude des propriétés du matériau béton armé surtout.

1.2.3.1.1. Les investigations non destructives:

Le principe des investigations non destructives réside dans le fait qu'on ne touche pas directement à la structure. Pour les ouvrages en béton armé, il existe différentes méthodes permettant d'effectuer un diagnostic sans risques de porter atteinte à son intégrité. plusieurs techniques sont pris en considération comme:

a. Relevé visual:

Le principe du diagnostic visuel est d'aller sur le site et de répertorier les différents défauts que présentent les structures. Ces défauts, pour les ouvrages en béton armé peuvent être très nombreux.

Les principaux désordres sont les suivants :

- Les fissures avec leur ouverture et leur longueur.
- Les fractures avec leur ouverture, décalage ou rejet.
- La présence de coulures de calcite.
- Les zones d'altération superficielles et profondes.
- Les zones humides ainsi que les zones de mousses ou de végétation.
- Les zones de faïençage.
- Les éclats de béton en formation ou profonds ainsi que la présence d'aciers apparents.
- Les zones de ségrégation.

Tous ces éléments doivent être répertoriés sur des plans, accompagnés d'un reportage photographique des principaux désordres. Cette première étape permet de définir la gravité des troubles mais aussi de permettre de classer les différents éléments selon leur priorité.[1]

b. Méthode d'auscultation sonique:

connu sous le nom d'essai aux ultrasons qui permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales à travers un élément en béton (semblable au comportement de la compression). Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée. La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonores et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'âge du béton, les conditions d'humidité, le rapport Granulat/ Ciment (G/C), le type des granulats et la localisation des aciers ...etc. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance exacte du béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions. La technique de contrôle par ultrasons est très simple, le matériel est facile à utiliser en laboratoire et sur site, donc, elle est plus efficace pour évaluer la qualité du contrôle de santé du béton in-situ et étudier son homogénéité. [2]



Figure 1.9: L'auscultation sonique des bétons

c. Scléromètre:

le principe de l'essai sclérométrique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille entraîne un index coulissant sur une règle de mesure. Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur. Et il est important de savoir que de différents paramètres peuvent influencer sur les résultats, tels que l'inclinaison du scléromètre ou encore l'homogénéité du béton. Il peut être intéressant de coupler ces résultats avec des essais de résistance à la compression sur des prélèvements de la zone étudiée [2]. Il est donc plus correct de se limiter pour cet essai d'étudier

l'homogénéité du béton, non plus sa résistance en compression vu qu'il existe plusieurs paramètres influençant celle-ci ; dont l'erreur est majorée.



Figure 1.10: Scléromètre

d. L'analyse de ferrailage:

Les mesures de reconnaissance du ferrailage (position et enrobage) peuvent se faire à l'aide d'un pachomètre. La profondeur d'auscultation de cet appareil est de l'ordre de 10cm suivant le béton et le réseau d'armature. Il existe deux types de mesures : soit par détection linéaire, consistant à détecter les aciers perpendiculaires à la trajectoire du pachomètre, soit par imagerie, permettant de détecter les aciers présents dans un carré de soixante centimètres de côté.

La première méthode permet par exemple de connaître l'espacement des cadres d'une poutre.

Alors que la deuxième permet de déterminer le clavetage des aciers au niveau d'une jonction poteau/poutre. Cependant, pour les deux types de mesure, les résultats donnent les enrobages et l'espacement du ferrailage. Il peut être utile, lorsque cela est possible, de dégager quelques armatures afin de calibrer l'appareil. L'inspection des armatures dégagées permet de confirmer leur nature, et de mettre en évidence d'éventuels désordres ou pertes de section en zone altérée. [3]

e. L'impact-écho:

L'impact-écho, à l'origine développée pour mesurer l'épaisseur et l'intégrité d'une structure est exécutée point par point, en utilisant un petit marteau pour frapper la surface de la zone auscultée à un endroit donné et en enregistrant l'énergie réfléchie avec un accéléromètre placé à côté de l'impact. [4]

f. Technologie radar:

la technique est basée sur la réflexion et l'atténuation d'ondes électromagnétiques dans le milieu du matériau. La propagation d'ondes électromagnétiques dépend de la permittivité diélectrique, de la conductivité et de la perméabilité du matériau ausculté. C'est pourquoi, cette technique permet de localiser rapidement des cavités dans les chaussées, détecter des armatures, des câbles précontraints, des défauts (vides, fissures, délaminages) dans le béton et même dans le sol. [2]

g. La méthode radiographie:

il s'agit des techniques classiques de radiographie, dont la surface à ausculter est exposée à un rayonnement (γ ou X selon la méthode) pour impressionner un film photographique lorsqu'il traverse le matériau testé. On distingue la méthode gammagraphie, la radiographie et la radioscopie ou endoscopie. [5]

h. La méthode thermique:

afin de tester les anomalies internes du matériau béton, des caméras infrarouges sont utilisées pour ausculter les zones importantes de manière rapide et efficace en traduisant les données résultantes comme des images présentant la variation thermique à la surface de béton. Cette variation est liée de la porosité et la présence des défauts ou vides, l'état de surface et l'environnement qui l'entoure (humidité, température...).

1.2.3.1.2. Investigations destructives:

Lorsque cela est possible, il peut s'avérer utile d'avoir recours à des essais destructifs. Ces méthodes permettent généralement de faire des prélèvements et de connaître la nature des matériaux présents, leurs caractéristiques mécaniques et chimiques ainsi que leur état d'altération.

a. Test à la carbonatation:

Le dioxyde de carbone atmosphérique qui pénètre à travers la porosité du béton, depuis la surface du parement, réagit avec les constituants alcalins contenus dans le béton. Au fur et à mesure de sa pénétration, ce processus conduit à une réduction de la valeur du pH d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. Ceci a pour effet de diminuer voir supprimer l'effet de passivation de l'acier qui lui assurait une protection naturelle contre la corrosion.

Le degré d'avancement de la carbonatation (profondeur de carbonatation) de la matrice cimentaire est directement lié aux caractéristiques intrinsèques des matériaux (porosité, âge,...) ainsi qu'aux conditions environnementales (humidité, température,...)

Une des méthodes d'essai existante consiste à pulvériser un colorant sensible au pH (solution de phénolphthaléine) sur une coupe fraîche de béton. La partie non colorée indiquant la zone carbonatée ($\text{pH} < 9$). [1]

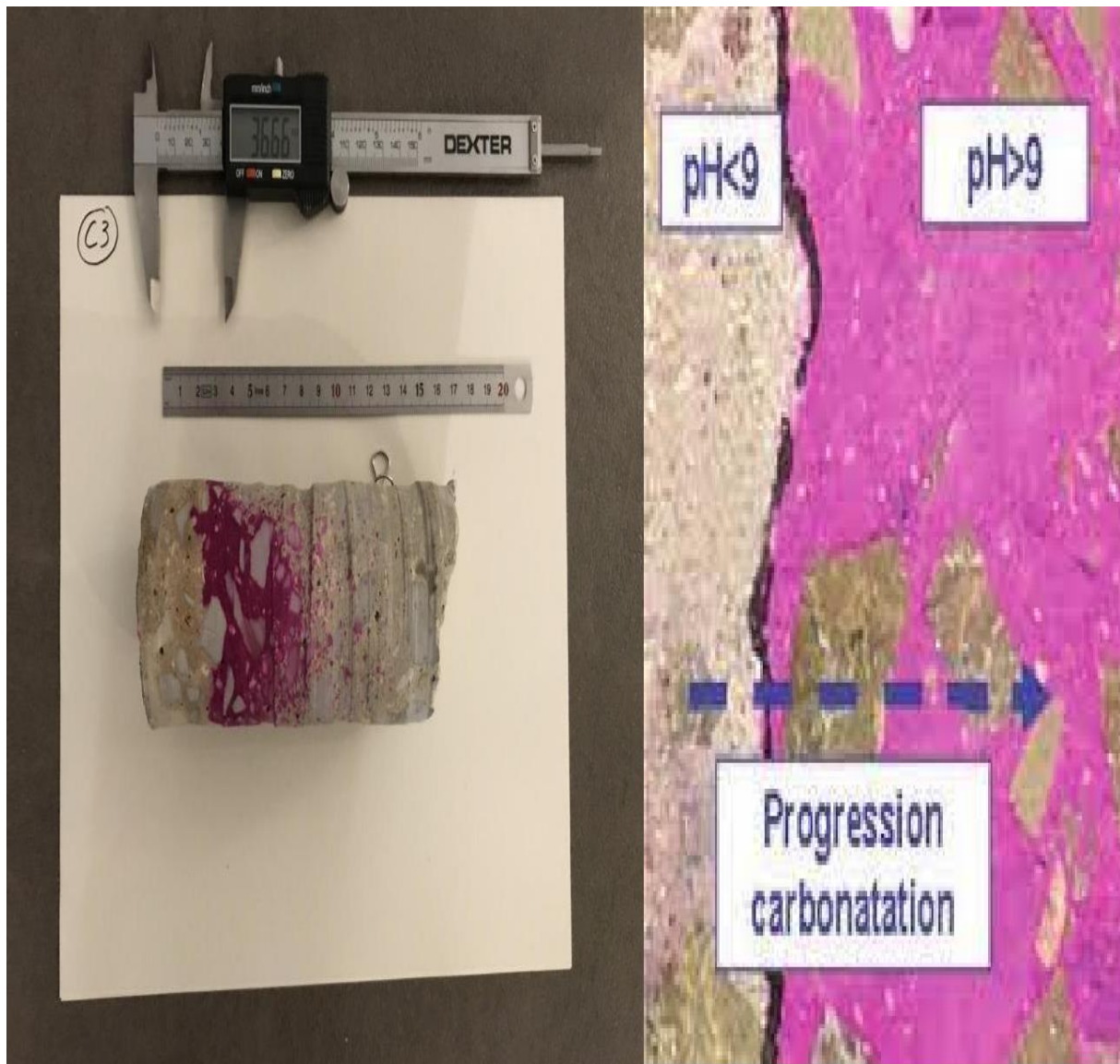


Figure 1.11: Test à la carbonatation

b. Prélèvement d'acier:

En cas de re-calcul d'une structure, il est important de connaître les aciers présents dans un ouvrage.

Le prélèvement d'acier permet de déterminer le type d'acier (HA, lisse, TOR, etc.) ainsi que leurs caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité. [3]



Figure 1.12: Prélèvement d'acier

c. Mesure du potentiel de corrosion:

La mesure du potentiel de corrosion ne peut se faire que sur des ouvrages ayant un ferrailage continu et n'ayant pas de revêtement de surface pouvant agir comme isolant.

Le principe de l'essai est de mettre à nu une armature puis la connecter à une borne d'un millivoltmètre à haute impédance. Une électrode de référence est placée sur le parement étant elle-même reliée à une autre borne du millivoltmètre.

Elle est dite de référence car elle a un potentiel constant du à un équilibre électrochimique.

Les résultats obtenus permettent de déterminer la probabilité de corrosion des armatures.



Figure 1.13: Mesure du potentiel de corrosion

1.2.4. Rapport de diagnostic:

Le rapport de diagnostic présente l'ensemble des résultats et leur interprétation, mais doit être compréhensible par un non initié.

Il comprend :

- L'identification de la structure, le nom du demandeur.
- L'identification du laboratoire (ou de l'ingénieur) chargé de l'étude, la date.
- Une brève description de la structure.
- Le rappel des objectifs de l'étude.
- La liste des documents consultés.
- Les résultats de l'inspection détaillée.
- Les résultats des essais in situ et de laboratoire.
- Une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable, et leur incidence sur la sécurité.
- Des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude.
- Une liste des priorités des réparations et travaux à effectuer.
- Des recommandations relatives aux méthodes de réparation les plus adaptées.

1.3. CONCLUSIONS:

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser. C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'ouvrage ainsi que leur ampleur.

Donc, il est possible de conclure que les constructions en béton armé souffrent de plusieurs phénomènes des dégradations plus ou moins prononcés. Qui sont liés d'une part aux techniques et les conditions de mise en oeuvre, et non respect des propriétés du béton sur chantier (enrobage insuffisant, mauvais choix des constituants...). Et d'autre part, aux conditions de milieu extérieur. Ce qu'il exige de prendre soin du béton et l'entretenir après le diagnostic détaillé de l'état de santé des ouvrages. En utilisant ainsi l'évaluation par essai non destructif (CND) réservé à l'étude des propriétés du matériau béton armé surtout. La technique (CND) est élaborée qu'on t-il-y a des obstacles de prélèvements aux ouvrages affectés ou en zones non représentatives, et en cas de risque d'informations à l'échelle locale.

CHAPITRE 02 :

Les matériaux composite

2.1. INTRODUCTION :

Depuis une dizaine d'année, l'utilisation des matériaux composites a connu un essor important que soit dans l'industrie mécanique, dans l'aéronautique et surtout dans la construction civile.

Ces matériaux sont susceptibles de substituer l'acier, en vu de leurs avantages qu'ils présentent à savoir : la résistance, la légèreté et l'insensibilité à la corrosion. Les matériaux composites à base de fibres sont une solution très attractive pour répondre au besoin de renforcement et de réhabilitation des constructions en béton armé. De plus, malgré leurs prix élevés, ils présentent un avantage économique, car ils peuvent être mis en oeuvre directement sur les structures par moulage au contact ou par stratification directe. Ceci permet de réduire considérablement le poids propre des structures et leurs coûts liés à la manipulation des matériaux ainsi que les problèmes liés aux interruptions de trafic. Cette section permet tout d'abord de comprendre le principe, les types et comportement typique des matériaux composites utilisés dans la construction.

2.2. DEFINITION ET PROPRIETES MATERIAU COMPOSITE:

2.2.1. Qu'est ce qu'un matériau composite?

matériaux composites c'est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles qui possède des propriétés que les éléments constitutifs seuls n'ont pas.

Un matériau composite est constitué :

- d'une **ossature** appelée **renfort** qui assure la tenue mécanique du matériau composite. Le renfort permet aux matériaux composites d'avoir des propriétés isotropes, anisotropes ou orthotropes.
- d'une **matrice** : matériau constitué de plastique (*Thermodurcissable ou Thermoplastique*), métal ou céramique.

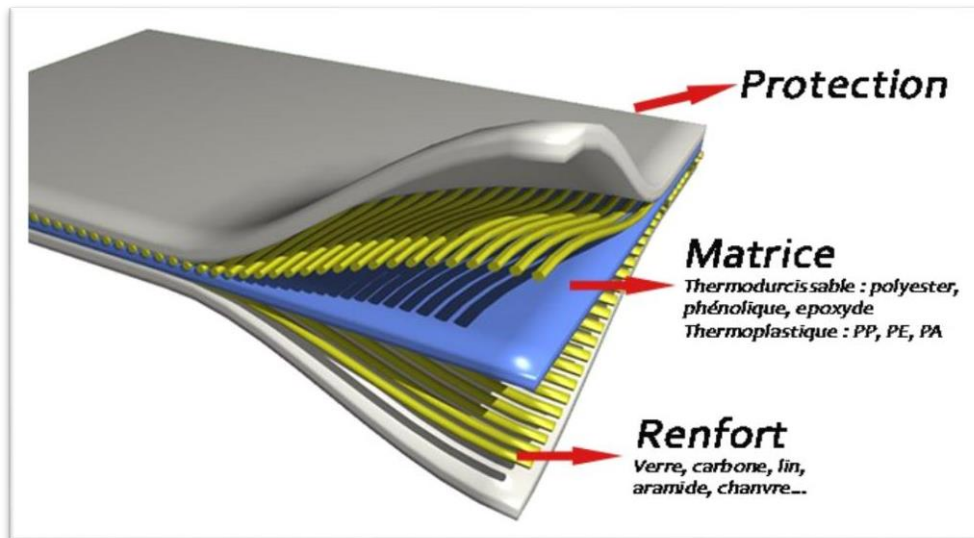


Figure 2.1: Éléments Constituants d'un Matériau Composite

On distingue deux types de matériaux composites :

- Les matériaux composites de “grande diffusion” : ces propriétés mécaniques sont plus faibles mais son coût est compatible avec une production en grande série.
- Les matériaux composites de “hautes performances” qui présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important. Ce type de matériaux composites est souvent employé en aéronautique et dans le domaine spatial.

Il existe aujourd’hui un grand nombre de matériaux composites que l’on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- Les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd’hui à l’échelle industrielle ;
- Les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins carbone) ;
- Les composites à matrices métalliques (CMM).

L'avantage principal des matériaux composites est leur aptitude à être conçus à la carte. Ainsi, on peut concevoir des matériaux avec une forte anisotropie. Cet avantage permet de concevoir la pièce en tenant compte des sollicitations mécaniques qu'elle va subir. L'autre avantage des matériaux composites est leur masse volumique très faibles, ils permettent ainsi un allègement des structures en industrie aéronautique et spatiale.

2.3. ÉLÉMENTS CONSTITUANTS D'UN MATÉRIAU COMPOSITE :

2.3.1. Les fibres:

Une fibre est un ensemble de filaments élémentaires dont le diamètre varie entre 5 et 25 μm selon la nature de la fibre. Il y a principalement trois types de fibres appliqués dans le secteur du bâtiment : les fibres Aramides, les fibres de verre et les fibres de carbone. Les fibres supportent la majorité des contraintes mécaniques et assurent la résistance et la rigidité du composite. Elles travaillent essentiellement en traction et se trouvent sous forme de mèches, de tissus ou de mats. Les fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : Linéiques (fils, mèches), Tissus surfaciques (tissus, mats), et Tissus tridimensionnels.

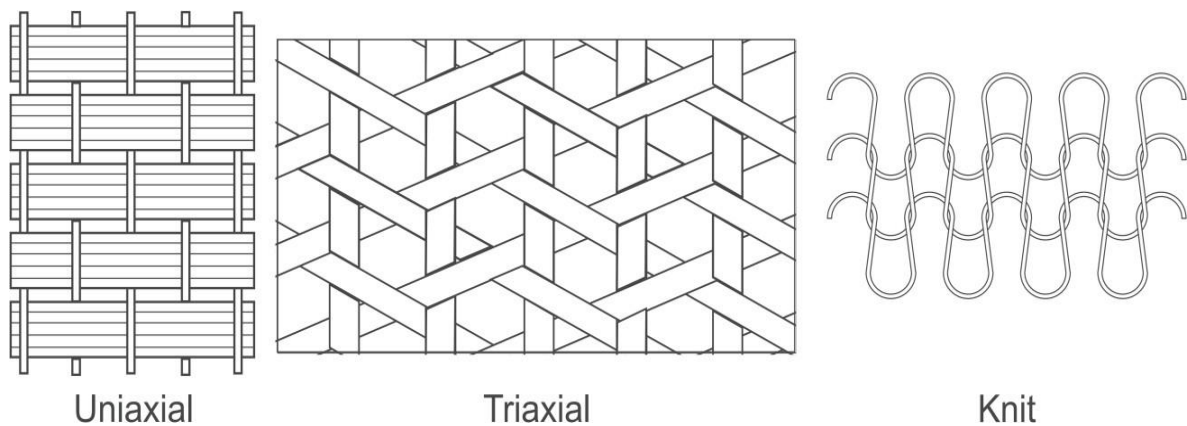


Figure 2.2: Orientation des fibers

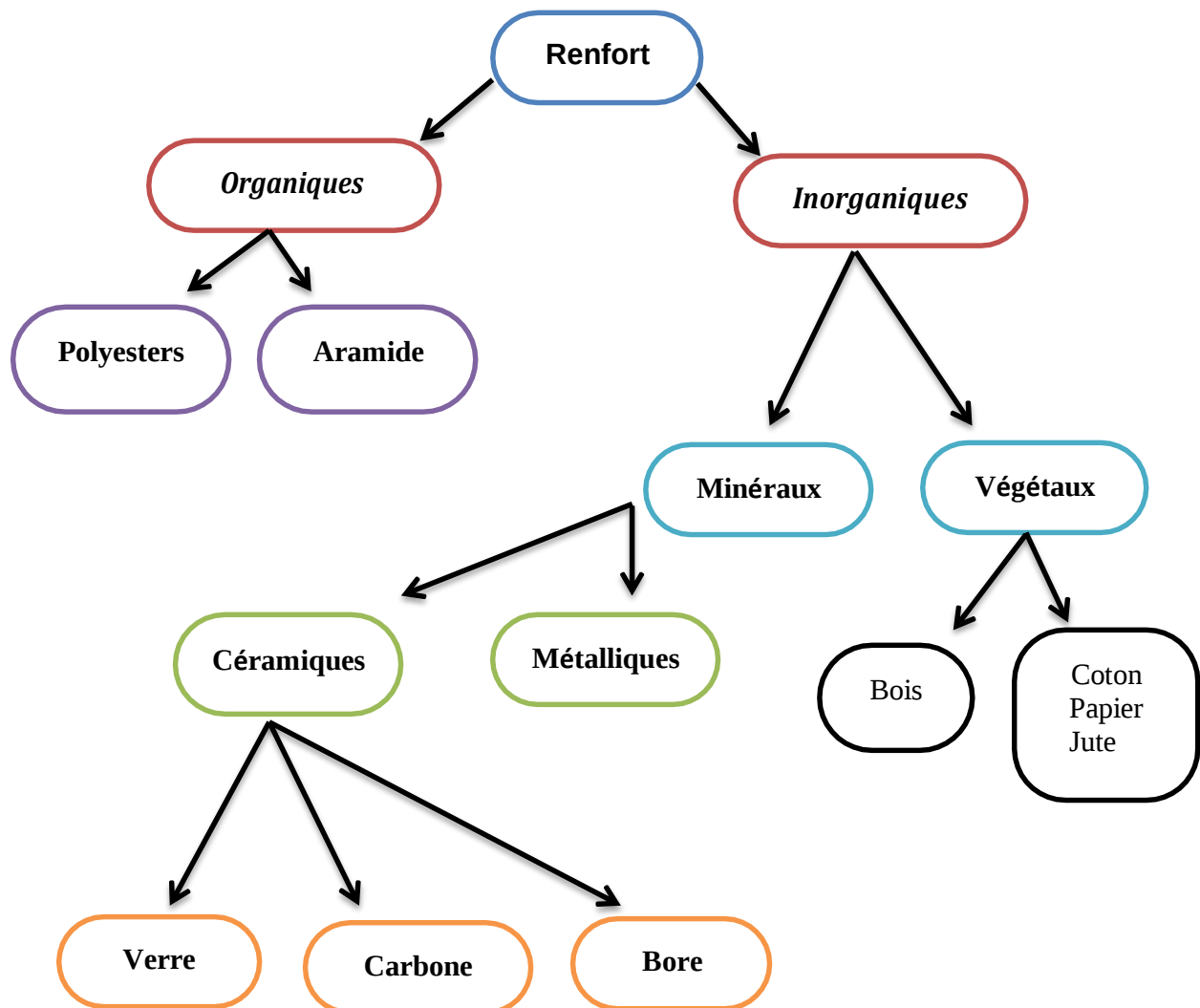


Figure 2.3 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP):

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance – prix, qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Ces dernières présentent un module de traction faible, mais une résistance en traction intéressante. Elles sont constituées de silicate de diamètre de 10 μm et considérées comme des matériaux orthotropes.



Figure 2.4: Rubans de fibre de verre



Figure 2.5: Formes de fibres de verre

✓ Avantages de la fibre de verre:

- haute résistance.
- À bas prix
- Bonne résistance chimique aux acides et aux solvants
- Isolant électriquement,
- Allongement supérieur à la rupture par rapport
- faible absorption d'humidité

✓ Inconvénients de la fibre de verre:

- Mauvaise résistance à l'abrasion
- Mauvaise adhérence à certaines résines matricielles polymères,
- Module inférieur
- Manque de rigidité en raison de leur structure moléculaire

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) :

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. La qualité finale des fibres de carbone dépend fortement des qualités du précurseur. Le brai, qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole, est utilisé pour produire des fibres de carbone.

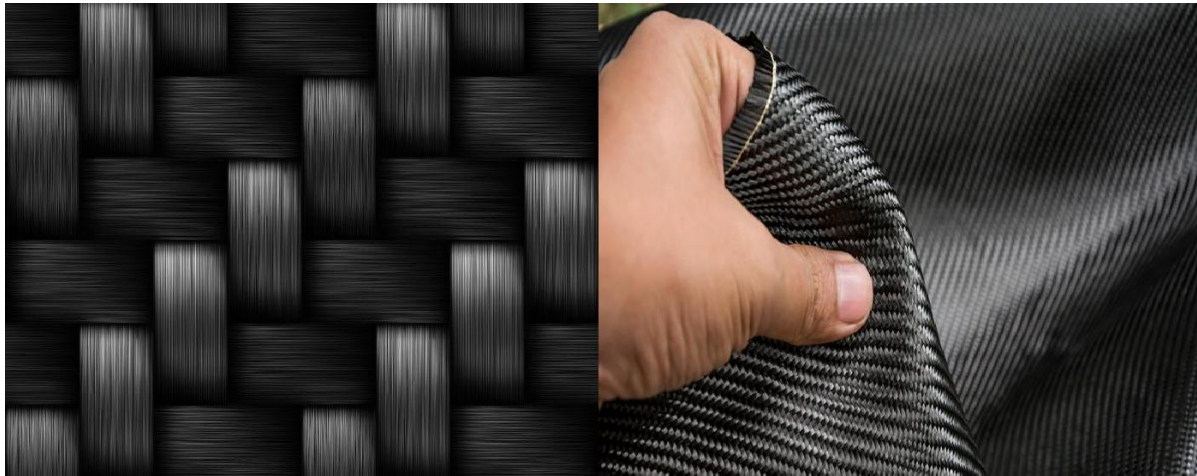


Figure 2.6: Carbon Fiber

• Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP) :

Les fibres aramides, dont la plus connue est le kevlar, ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les fibres de carbone, mais leurs résistances à la compression sont faibles. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice.

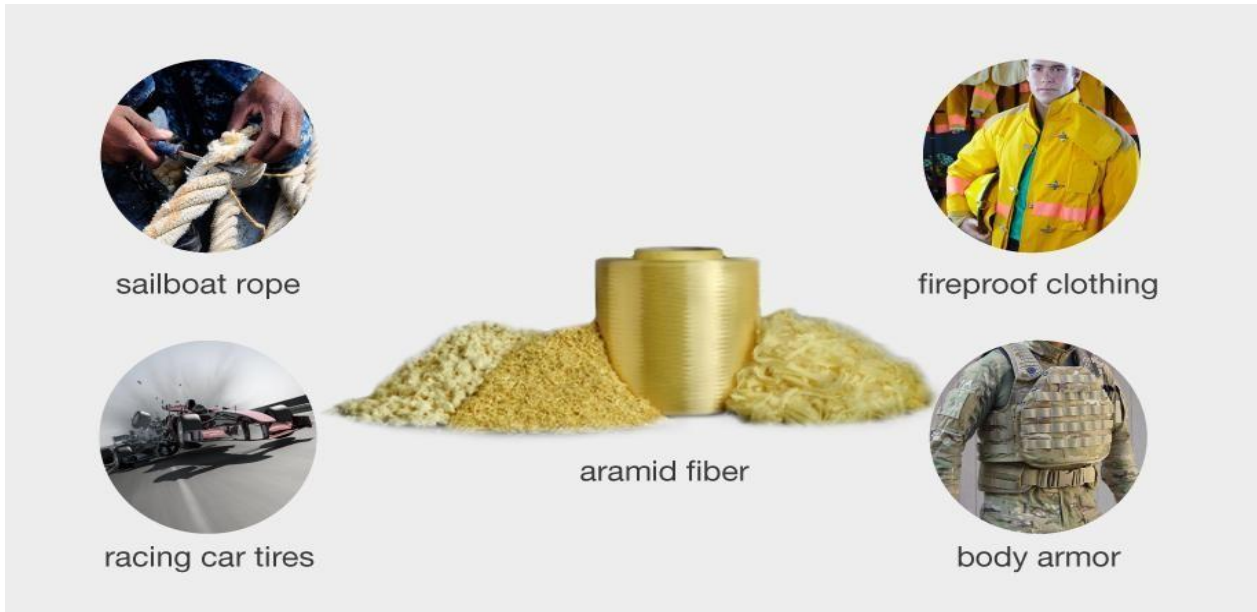


Figure 2.7: Application majeure des fibres aramides

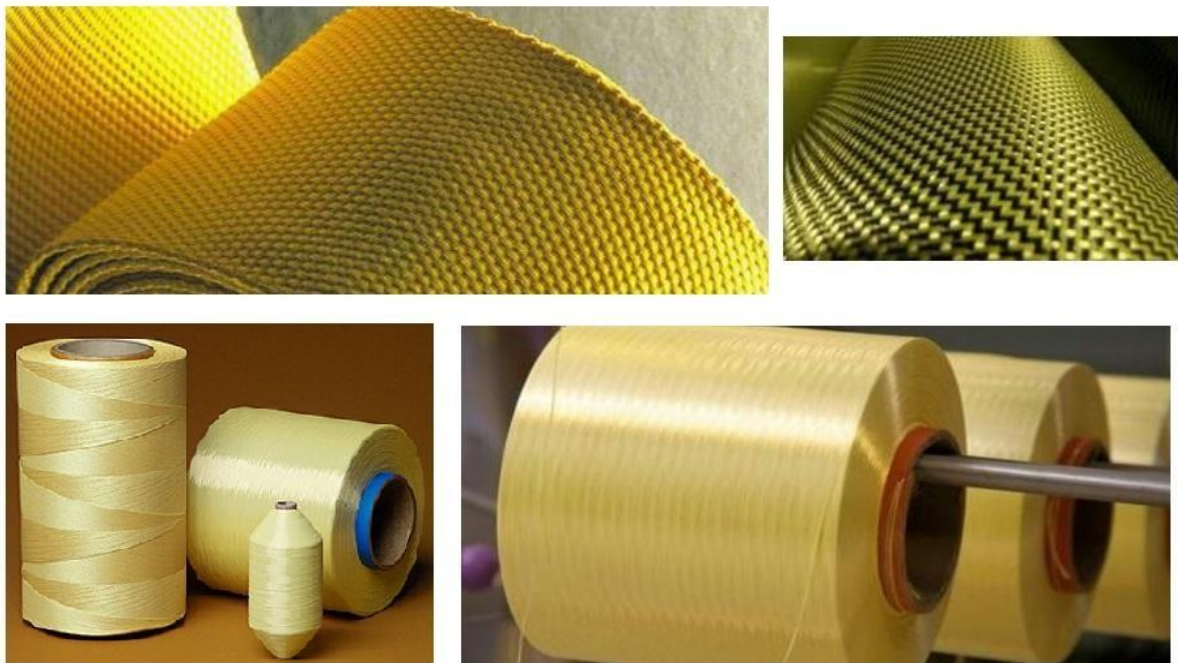


Figure 2.8: Formes de fibres d'aramide

- ✓ **Propriétés des fibres d'aramide**
- Faible densité
 - Haute résistance à la traction et module
 - Allongement faible en fibres
 - Propriétés à faible compression

CHAPITRE 02 : Les Matériaux Composite

Tableau 2.1: Propriétés mécaniques et physiques des composites à base de fibres [6]

Type de fibre	Densité	Diamètre (µm)	R/la traction (Gpa)	Mod D'éla (Mpa)	All max (%)	T de fusion (°C)
Verre E	2.54	3 – 30	3400	73000	4.5	850
Verre D	2.14	3 – 30	2500	55000	4.5	-
Verre R	2.48	3 – 30	4400	86000	5.2	990
Carbone HR	1.78	8	3500	200000	1	2500
Carbone HM	1.8	8	2200	400000	0.5	2500
Aramide HR	1.45	12	3100	70000	4	480
Aramide HM	1.45	12	3100	130000	2	480

Tableau 2.2 les différentes propriétés des fibres : [7]

Critères	Fibres de carbone	Fibres d'aramide	Fibres de verre
Résistance à la traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Résistance à la compression	Très bonne	Inadéquate	Bonne
Module d'élasticité	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à long terme	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à la fatigue	Excellent	Bon	Adéquat
Densité	Bonne	Excellente	Adéquate
Résistance alcaline	Très bonne	Bonne	Inadéquate
Prix	Adéquat	Adéquat	Très bon

2.3.2. Les matrices et adhésifs:

Les matrices sont des matériaux isotropes, leur utilisation dans les composites permet de coller les fibres entre elles et de leur transférer les efforts. De plus, la matrice joue un rôle très important pour résister aux efforts tranchants, aux forces transversales et aux forces de compression. Par ailleurs, la matrice protège les fibres, en les isolant de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques. Les matrices les plus utilisées dans les composites sont les résines thermodurcissables : le polyester, le vinylester, l'époxy et le phénolique. conséquent, on distingue deux familles : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques. Généralement, la matrice utilisée dans l'élaboration d'un matériau composite est une résine polymère.

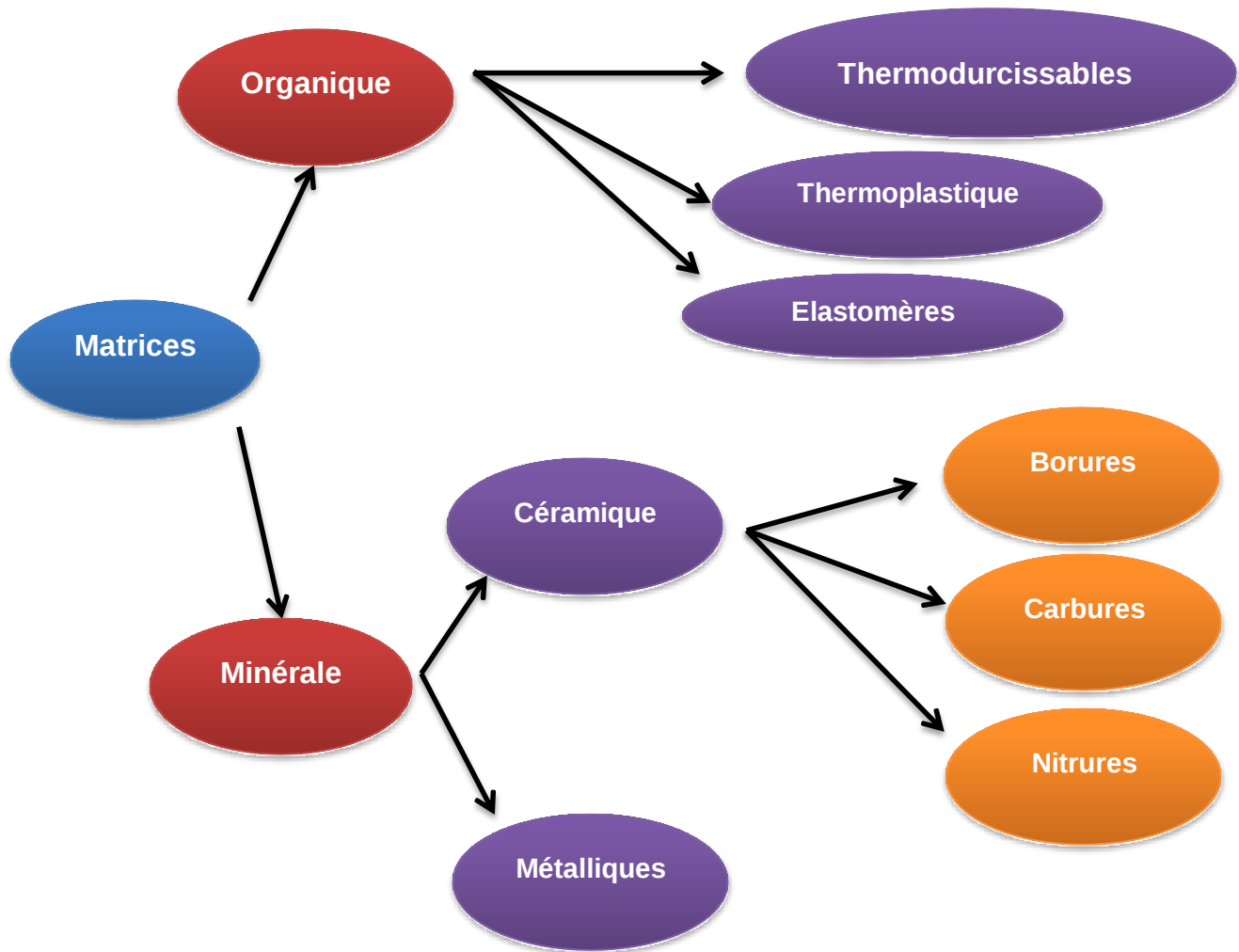


Figure 2.9: Organigramme des différentes familles de matrices

Matrices thermodurcissables (TD) :

Les matrices thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces dernières ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation et les résines époxydes sont des résines thermodurcissables.

Tableau 2.3 : Caractéristiques des résines thermodurcissables [8]

Résines	T°(C)	ρ (Kg/m ³)	ϵ_f^R (%)	σ_f^R (Mpa)	E (Gpa)
Polyesters	60 à 100	1120	2 à 5	50 à 85	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1140	2,5	40	3 à 5
Epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	3 à 5
Polyamide	65 à 100	1140	60 à 85	1,2 à 2,5	/
Polypropylène	900	1200	20 à 25	1,1 à 1,4	/

• Matrices thermoplastiques (TP) :

La famille des résines thermoplastiques (on parle de “plastiques”) est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou technopolymères).

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

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont dures et solides qui nécessitent une transformation à très haute température.

Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.

Nous donnons ci-après quelques caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide.

Tableau 2.4: caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide.

	Polypropylène	Polyamide
Masse volumique (kg/m ³)	900	1 140
Contrainte à la rupture (MPa)	20–35	60–85
Module d'élasticité (GPa)	1,1–1,4	1,2–2,5
Température de fléchissement sous charge (°C)	50–60	65–100

Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres et font partie alors des matériaux composites. Cependant, dans le domaine des composites, les résines thermoplastiques ont

CHAPITRE 02 : Les Matériaux Composite

un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures de produits solides.

Matrices métalliques et céramiques :

Ce sont des matrices à hautes températures, cette matrice ne peut être associée qu'à des fibres réfractaires de type SiC ou des fibres de carbone.

Le coût de fabrication de ces matériaux est très onéreux. Un adhésif est nécessaire pour coller le matériau composite sur une surface.

Tableau 2.5: présente une étude comparative rapide des différents types de matrices polymères présentées dans cette section :

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
Etat de base	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	réduit
Mouillabilité renforts	difficile	aisée
Moulage	chauffage + refroidissement	chauffage continu
Cycle	court	long
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite	bonne
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	émanation pour "méthode humide"

2.4. LES POLYMERS:

Les polymères sont devenus des éléments essentiels d'un nombre très important d'objets de la vie courante, dans lesquels, ils ont souvent remplacés les substances naturelles. Ils sont présents dans de nombreux domaines industriels. Ce sont des matériaux « légers », ils ont une masse volumique faible (en général inférieure à $1\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, soit une densité par rapport à l'eau inférieure à 1,5 ; ils sont en général souples. D'un point de vue chimique, un polymère est une substance composée de macromolécules.

Les polymères sont très utilisés pour les matrices des matériaux composites. La plupart des polymères se ramollissent ou fondent à des températures comprises entre $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $250\text{ }^{\circ}\text{C}$;

2.4.1. Classification des polymères:

Les polymères sont classés selon deux grandes classes en fonction de la mise en oeuvre et la microstructure :

Les polymères thermoplastiques :

ils sont solubles dans leurs solvants respectifs. Le plus souvent, ils sont constitués par un réseau mono dimensionnel ou des chaînes faiblement ramifiées. On peut les mettre en forme par injection ou par extrusion au-delà de leur température de fusion. Ils possèdent la mémoire de cette forme après déformation plastique. Ils sont a priori recyclables.

Les polymères thermodurcissables :

ils sont insolubles, infusibles. Différemment des polymères thermoplastiques, ils durcissent en subissant une transformation chimique irréversible. On peut définir une température, au-delà de laquelle ils sont chimiquement dégradés. Une fois mis en oeuvre, la forme moulée est définitive. Ils ne sont donc pas recyclables.

Les polymères amorphes :

ils sont transparents. En dessous de leur température de transition vitreuse (ramollissement) ils sont à l'état vitreux et l'on parle de verres organiques. Ils sont généralement peu résistants à la rupture. L'adjonction de particules d'élastomère permet de les rendre plus ductiles. Les chaînes macromoléculaires peuvent être orientées au cours de la mise en oeuvre, ce qui leur confère des propriétés anisotropes.

Les polymères semi-cristallins :

ils sont constitués de phases cristallines et de phases amorphes du même polymère. Leur microstructure est souvent complexe et en conséquence la description de leurs propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement bonnes. Les polymères sont des matériaux très économiques (entre 0,5 € /kg et 1,25 €/kg) et ne demandent pas un entretien régulier. Ils présentent une excellente tenue dans le temps, aucun effet de pourrissement, de corrosion. Enfin, c'est des matériaux légers. En effet leurs masses volumiques sont faibles : entre 1 et 2 g/cm³.

2.4.2. Propriétés du polymère:

2.4.2.1. Propriétés et structures chimiques:

Généralement, les polymères sont peu affectés par les solutions salines, les acides faiblement dosés jusqu'à une température de 60°C. En revanche, ils sont pour la plupart sensibles aux solvants organiques. Compte-tenu de la diversité des polymères, il faut toujours spécifier au

fabriquant les conditions d'utilisation de son produit et l'associer au choix du meilleur produit ou compromis.

Tableau 2.6: résume la composition chimique des différents polymères. [9]

Structures	Nom dérivé du précurseur	Nom systématique
$-(CH_2)_n-$	Polythène/ polyéthylène	Poly (méthylène)
$-(CHCl_2-CH_2)_n-$	Poly chlorure de vinyle	Poly (1-chloro- éthylène)
$-(CH(C_6H_5)-CH_2)_n-$	Polystyrène	Poly (1-phényléthylène)
$-(O-CH_2-CH_2)_n-$	Poly oxyde d'éthylène	Poly (oxyéthylène)
$-(O-CH_2)_n-$	Poly formaldéhyde	Poly (oxyméthylène)
$-(CHOH-CH_2)_n-$	Poly alcool vinylique	Poly (1-hydroxyéthylène)

2.4.2.2. Propriétés physiques et mécaniques:

Les propriétés mécaniques des polymères se situent entre celles des céramiques (matériaux les plus fragiles) et celles des métaux connus pour leurs bonnes performances mécaniques. Les polymères thermodurcissables ont un comportement mécanique semblable aux polymers thermoplastiques. Cependant, à moins de n'être que très faiblement réticulés, ils ne subissent pas de fort ramollissement lorsque la température augmente. Les propriétés mécaniques ne seront significativement affectées aux hautes températures que par la dégradation chimique du réseau macromoléculaire.

Le tableau suivant indique les valeurs courantes des propriétés physiques des polymères les plus usuels. Les valeurs données dans ce tableau ont un caractère indicatif. En effet, les propriétés peuvent être très variables pour certains polymères.

Tableau 2.7: Caractéristiques physiques et mécaniques des polymères [10]

Polymères	Densité (kg/m ³)	Module d'Young (Mpa)	Allong à la rupture (%)	Coeff de dilatation therm (K ⁻¹)	Temp de transition (°C)	Temp de fusion (°C)
PVC Souple	1160 – 1350	≤ 1000	200 - 500	7. 10 ⁻⁵	(-10) – (-40)	≤ 130
PVC Rigide	1400	2000 – 3000	20 - 70	7. 10 ⁻⁵	80	≤ 150
PE-BH	920	200	500	2. 10 ⁻⁴	(-110)	115
PE-HD	950	1000	≤ 50	1 - 2. 10 ⁻⁴	(-110)	130
PP	900	1000 - 2000	≤ 20	1 - 2. 10 ⁻⁴	(-20)	165
P-isoprène	950	/	100 - 800	2. 10 ⁻⁴	(-50)	/
Silicone	1000 – 1600	Variable	/	1.7 - 3.5 10 ⁻⁴	/	≤ 150

2.5. AVANTAGES ET INCONVENIENT DES MATERIAUX COMPOSITES:

2.5.1. Avantages :

- Gain de masse.
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de la corrosion.
- Insensibles aux produits chimiques « mécaniques » comme les graisses, huiles, liquids hydrauliques, peintures, solvant, pétrole.

2.5.2. Inconvénients :

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
- Meilleure tenue au feu que les alliages mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices.
- Coût parfois prohibitifs, le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

2.6. APPLICATION DES COMPOSITES EN GENIE CIVIL:

La technologie du renforcement, réparation et confinement des éléments structuraux porteurs par les polymères renforcés de fibres est l'une des techniques les plus prometteuses pour

améliorer la résistance, la rigidité et la ductilité. Son application est relativement simple, très peu dérangement pour les utilisateurs des ouvrages renforcés et peu exigeante en main d'œuvre. Les caractéristiques non corrosives de la matrice et des fibres et leurs résistances à la plupart des substances chimiques donnent à ce système de renforcement, une durée de vie bien plus longue que celle des matériaux conventionnels, tels que l'acier, c'est à dire une valeur plus économique à long terme. D'une manière générale, les matériaux composites «PRF» présentent des avantages considérables dès qu'il s'agit de la protection, la réparation et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en béton armé, tels que : les poutres, les poteaux, les dalles et les ouvrages d'art. Cette partie traitera principalement les différentes applications des matériaux composites dans le génie civil.

2.6.1. Réparation des fissures:

Il existe de nombreuses méthodes de réparation des fissures à l'aide de résines et des matériaux composites, en général. Certaines méthodes sont spécifiquement conçues pour réparer des fissures actives, tandis que d'autres sont mieux adaptées pour réparer des fissures stables. Certaines méthodes permettent de restaurer la capacité portante de l'élément (améliorer la résistance mécanique), alors qu'il existe aussi des méthodes qui permettent de rétablir l'étanchéité de la structure (améliorer l'apparence). Avant de choisir la technique de réparation, il est nécessaire d'utiliser les informations recueillies pendant la visite in situ de l'ouvrage, afin de vérifier l'intégrité structurale de l'ouvrage, la présence de fuites par des fissures, le type de fissure (isolées ou en réseau) et l'activité de celles-ci (actives ou stables) [11].

2.6.2. Renforcement des poutres par collage de plaques:

Les matériaux composites utilisés pour le renforcement des poutres en béton armé se présentent, généralement, sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préalablement fabriquées. Les différentes études montrent que les résistances obtenues avec ce type de renforcement sont plus importantes que les résistances obtenues avec un renforcement par des tôles en acier. Ainsi, l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des composites : la rigidité, la résistance mécanique, la résistance à la corrosion et l'étanchéité. Le renforcement vis à vis de la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites «PRF» est généralement réalisé par collage externe des lamelles «PRF» sur le support de la poutre concernée. La Figure (I-11) présente les différentes techniques de renforcement des poutres en béton armé par collage de matériaux composites.

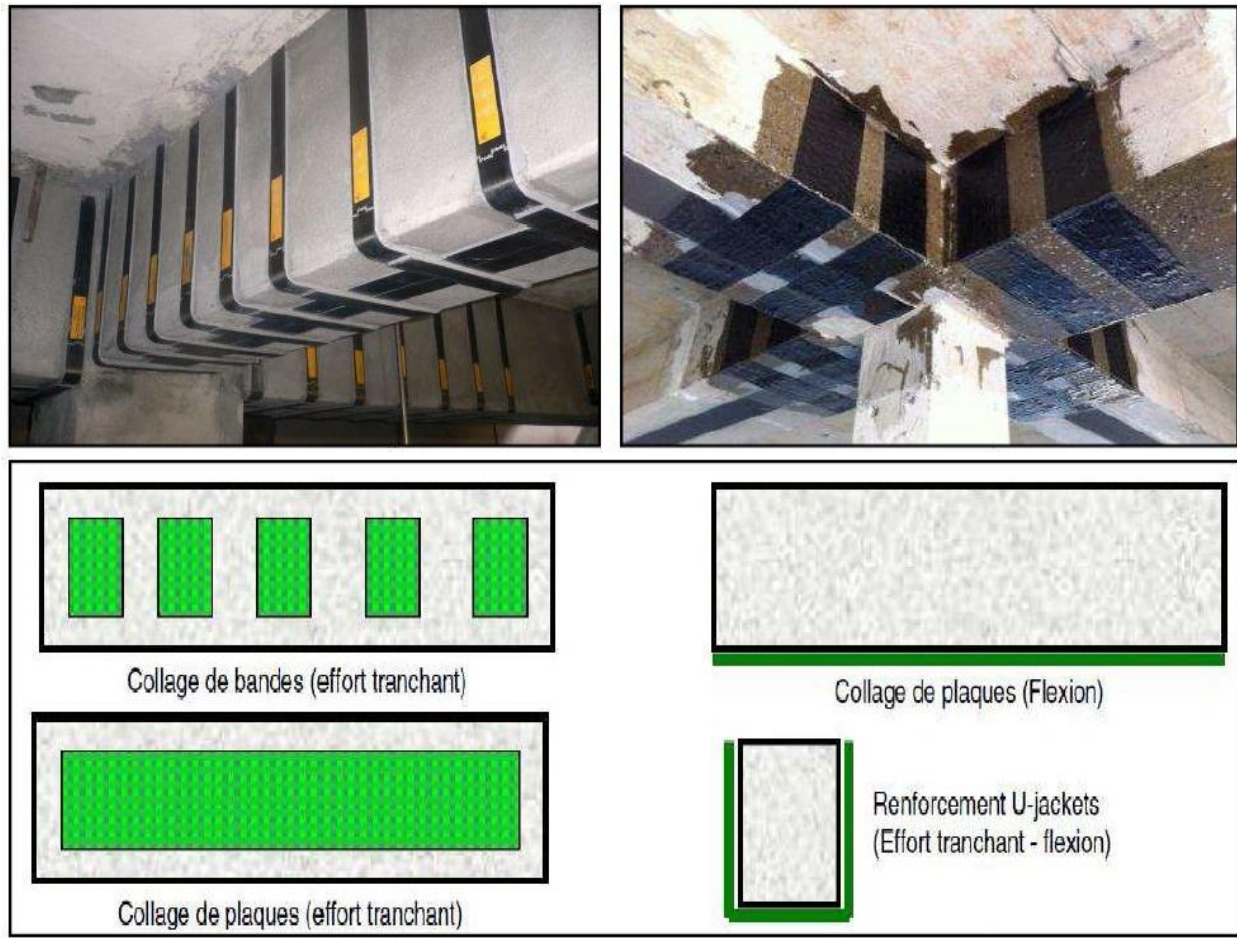


Figure 2.10: Différentes techniques de renforcement des poutres en béton armé [12]

2.6.3. Renforcement des dalles:

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion des dalles en béton armé. La procédure de base de renforcement des dalles simplement appuyées par «PRF» consiste à coller des bandes ou des lamelles «PRF» sur la sous-face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillant dans les deux sens, on utilise des lamelles croisées (Figure I.12), ou bien des «PRF» avec des fibres dans les deux directions. D'autre part, le renforcement d'une dalle en béton armé travaillant dans les deux sens peut être concentré dans la région central ou dans la région des moments maximaux, selon les besoins de renforcement, mais dans ce cas, les bandes/lamelles de «PRF» sont terminées loin des bords de la dalle.



Figure 2.11: Renforcement des dalles en béton par des bandes en CFRP [13]

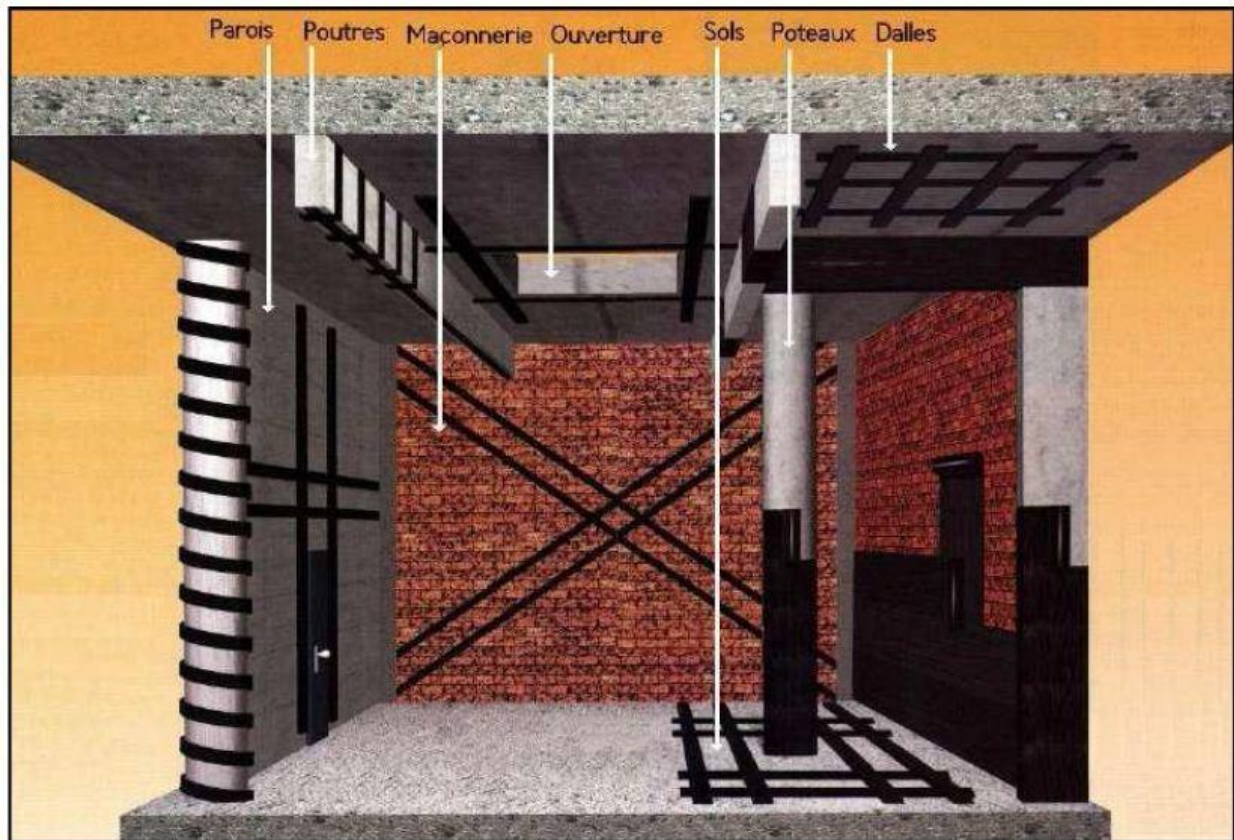


Figure 2.12: Différentes techniques de renforcement des éléments en béton [14]

2.7. CONCLUSION:

Les matériaux composites présentent des avantages tels que:

- résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée.
- La procédure qui doit être utilisée pour obtenir une homogénéité presque complète du matériau afin d'assurer la continuité de la résistance de la pièce est l'utilisation de l'acier inoxydable car il contient une fine couche cohésive et invisible d'oxyde de chrome qui adhère à la surface du métal et le protège de la corrosion, et cette couche est suffisamment protectrice chaque fois que le pourcentage de chrome dans l'acier est élevé.
- poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier ; pour une même résistance ultime le poids de PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) est inférieur de 10% au poids des platines d'aciers.
- maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en oeuvre et son application dans les zones confinées.
- Vu la difficulté d'assemblage et de transport sur site des platines d'acier, les PRFC sont beaucoup plus concluants que ces derniers.
- facilité de préparation de surfaces.
- la non nécessité d'une fixation mécanique comparativement aux platines d'acier, cependant le collage des matériaux composites doit être minutieux.
- la durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à la corrosion par rapport à celle des platines d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leurs zones de fixation seront fissurées.
- tenue au feu : la conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente à celle des platines d'aciers.
- réduction du risque « gel- dégel » : la mise en oeuvre du bandage des matériaux composites favorise une bonne étanchéité vis-à-vis de la formation du phénomène « gel- dégel »
- la maintenance et entretien : le système de renforcement de matériaux composites n'exige pas un entretien, par contre le renforcement par les platines d'acier demande une maintenance périodique continue.
- réduction du temps d'exécution et mise en oeuvre : la préparation, le transport et la mise en oeuvre des platines d'acier prend un temps considérable par rapport à l'application des matériaux composites.
- l'aptitude de précontrainte dans les matériaux composites : un nouveau champ des bandes plats de précontrainte des composites est appliquée afin de compenser la perte de tension dans l'élément structurel et réduire ainsi les fissures.

CHAPITRE 03 :

Différents méthodes de renforcement et de réparation

3.1. DEFINITION :

3.1.1. Réparation :

La réparation d'une structure est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), l'utilisation intensive (effet de répétition des charges) voire abusive (utilisation au delà des charges prévues), les accidents et sinistres (incendies, choc ,séisme, ...) [15], [16].

3.1.2. Renforcement :

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs [15], [16]. Un renforcement peut être associé à une réparation. Nous avons présenté les principales techniques pour la réparation et de renforcement des poutres ponts en béton armé qui peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle), soit par ajout de matières (béton projeté et renfort collés), ceci est en fonction de la nature et de l'impotence des désordres constatés, la tenue au sollicitations plus élevées que celles prévues à l'origine et tenant compte des critères économiques de matériaux de construction et des techniques choisies.

3.2.LES METHODES DE REPARATION STRUCTURALE:

3.2.1. Réparation des désordres superficiels:

Si les désordres de la partie d'ouvrage en béton sont superficiels et si les armatures ne sont pas corrodées, l'opération de réparation comprend :

- une préparation de surface avec élimination du béton dégradé et de toute trace de pollution ;
- le traitement éventuel des armatures contre les risques de corrosion;
- la reconstitution de l'enrobage des armatures et de la géométrie de la pièce par un ragréage manuel ou mécanisé avec du béton ou un mortier technique de réparation adapté ou par projection de béton
- la mise en oeuvre d'un revêtement de protection ou à caractère esthétique sur les surfaces traitées.
- Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés sont classés en troiscatégories:
- Produits et systèmes à base de liants hydrauliques classiques ou modifiés par ajout de polymères

- Produits et systèmes à base de résines synthétiques ;
- Produits et systèmes mixtes dont le liant actif est constitué à la fois de lianthydraulique et de résines synthétiques.

Ils doivent être compatibles avec le béton de la structure et adaptés aux conditions d'environnement.

3.2.2. Traitement des fissures:

Il existe plusieurs techniques de traitement des fissures. Le choix de la technique adaptée est en fonction des caractéristiques de la fissuration : ouverture (microfissures, fissures fines, fissures moyennes...), profondeur, activité (fissures ouvertes, fermées, mortes, actives...), tracé, géométrie, exposition aux intempéries (fissures sèches, humides, saturées, ruisselantes...), présence d'eau libre ou sous pression... de l'état et du type de support. Parmi ces techniques [18]:

Injection:

elle consiste à faire pénétrer dans la fissure un produit qui va créer une continuité mécanique ou une étanchéité entre les parties disjointes. Elle s'applique à des fissures dont l'ouverture est au moins comprise entre 0.1 et 0.2 mm. L'injection par un produit souple permet son adaptation aux mouvements générés par les variations thermiques et hygrothermiques. L'injection par un produit rigide permet d'assurer la continuité de la matière.

Cachetage:

il a pour but d'obturer provisoirement une fissure pendant l'injection afin de contenir le liquide injecté dans la fissure jusqu'à sa prise.

Calfeutrement:

il a pour objectif de colmater définitivement et en profondeur une fissure au moyen d'un produit souple (mastic ou mortier déposé dans une engravure créée le long de la fissure) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou d'empêcher la pénétration de matières solides, mais sans bloquer les mouvements de la fissure. Ce processus est effectué par des spécialistes dans ce domaine pour obtenir de bons résultats et garantir pleinement les résultats du processus

Pontage :

il est destiné à recouvrir une fissure au moyen d'un produit souple adhérent à la surface du support (revêtement, feuille préfabriquée...) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou empêcher la pénétration de matières solides en laissant libres les mouvements de la fissure.

Protection généralisée :

ce traitement consiste à mettre en oeuvre sur la surface de la structure fissurée un revêtement qui ferme les fissures. Il est applicable lorsque la fissuration est anarchique et concerne l'ensemble du support. Le choix des produits à utiliser est fonction de l'ouverture des fissures, de la présence

éventuelle d'eau et de l'activité des fissures.

3.2.3.L'augmentation de la hauteur utile de la section:

Est un procédé classique consiste à chemiser l'élément en augmentant sa section par mise en oeuvre d'une épaisseur de béton sur tout le périmètre de l'élément primitif. L'utilisation d'un micro-béton, auto-compactable, pour remplir les interstices sans mode de vibration, peut s'avérer essentielle. La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy. Ces décaissés seront remplis en béton avant le séchage des résines. Cette augmentation s'obtient par collage, avec une résine époxyde, d'une sur – épaisseur S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage. Le béton devra être traité avec des adjuvants pour éviter la vibration et le compactage.

Le principal problème est que les dimensions augmentent de manière considérable, ce pourquoi dans quelques éléments il sera impossible de l'effectuer. En outre ce qui est encombré du béton dans la chemise est complexe non seulement par la technique mais aussi par la composition de ce dernier, parce qu'il doit garantir un bon attachement avec le béton de la poutre. Parfois on effectue un certain traitement préalable pour faciliter la création d'une assemblée optimale. Ce système permet un accroissement de jusqu'à 60% de la capacité de flexion.

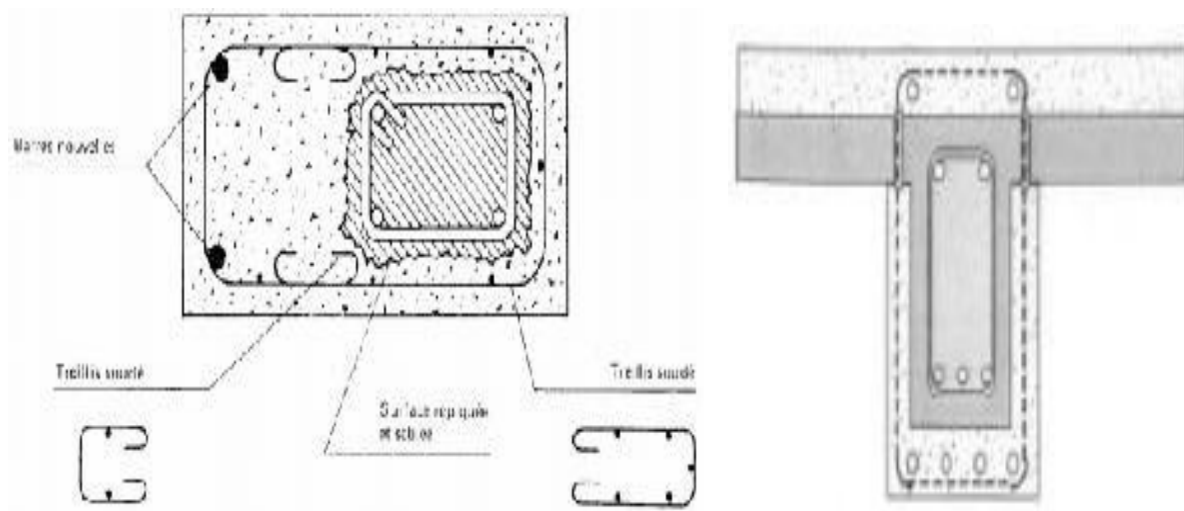


Figure 3.1: Renforcement des poutres par chemisage

Tableau 3.1: Avantages et inconvénients chemisage en béton armé :

Avantages	Inconvénients
-Technique peu coûteuse du fait des matériaux utilisés . -Main d'oeuvre peut qualifier	-Augmentation considérablement des section donc du poids de la structure. -Les éléments sont encombrants et moins esthétiques . -Nécessité mettre hors service l'ouvrage à renforcer pendant la durée des travaux qui est généralement longue . -Transport des matériaux. - Nécessité de coffrages . -Mise en oeuvre souvent difficile

3.2.4.Réparation par béton projeté :

Le béton projeté est un béton mis en oeuvre par refoulement dans une conduite et projeté sur une paroi par un jet d'air comprimé. Cette technique de réparation était très couramment employée car particulièrement bien adaptée à la réparation des voûtes et tunnels ou des murs en béton armé. Elle permet de réaliser aussi bien des réparations superficielles, comme la réparation d'un parement en béton présentant de légères épaufures, que des réparations ou des renforcements de structures, en disposant de nouvelles armatures à la structure. Dans ce cas, le béton reconstitue non seulement la géométrie de la construction mais aussi, il joue également le rôle confié au béton dans l'association acier / béton armé. Les étapes importantes avant la projection du béton sont la mise en état du support (sablage, brossage des armatures,...), la mise en disposition et l'ancrage des armatures ajoutées et enfin la mise en place des coffrages.

Il existe deux techniques de projection, qui se distinguent essentiellement par le moment d'introduction de l'eau de gâchage :

_Technique par voie sèche: introduction lors de la projection du béton

_Technique par voie mouillée: introduction lors du malaxage en centrale à béton.

La technique par voie sèche est plus utilisée en réparation qu'en travaux neufs. Elle s'applique à des chantiers de petite taille ou nécessitant des arrêts fréquents. La voie mouillée est généralement réservée à des chantiers nécessitant des rendements importants. Au niveau de l'entrée de la lance, fixée à l'extrémité du tuyau d'approvisionnement du béton, aboutissent les autres tuyaux d'approvisionnement:

CHAPITRE 03 : Différents méthodes de renforcement et de réparation

En eau et éventuellement en adjuvant, dans le cas de la voie sèche,

En adjuvant et en air comprimé, dans le cas de la voie mouillée à flux dense.

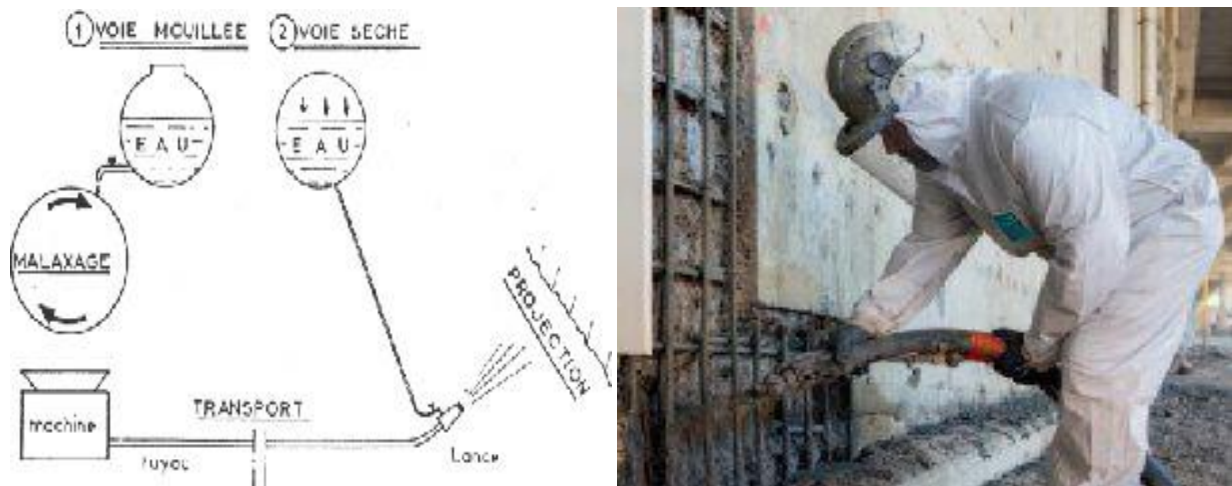


Figure 3.2: Les deux techniques de projection

Avantage :

Permet de s'affranchir de la manutention pénible de coffrages lourds et encombrants.

Simplicité de mise en oeuvre par rapport aux solutions coffrées.

Rapidité de mise en oeuvre. Sécurité améliorée de la tenue des parois.

Adaptabilité du béton à la forme des supports.

3.2.5. Réparation ou renforcement par précontrainte additionnelle:

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation. Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compression, recomprimer les zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées. Cette technique permet [17]:

- Soit d'améliorer la pérennité des ouvrages ;
- Soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement de prise en compte de lois de fluage mal adaptées) ;
- Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages (augmentation des charges ou des trafics, modification des fonctionnalités ou de convois exceptionnels).

CHAPITRE 03 : Différents méthodes de renforcement et de réparation

Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint. La précontrainte extérieure est le plus souvent constituée de câbles fixés à des bossages ancrés à la structure par des barres de précontrainte. Les câbles sont protégés par une gaine en polyéthylène injectée à la cire pétrolière. La technique des torons graissés est beaucoup plus simple d'utilisation car elle permet la mise en tension toron par toron à l'aide de petits vérins

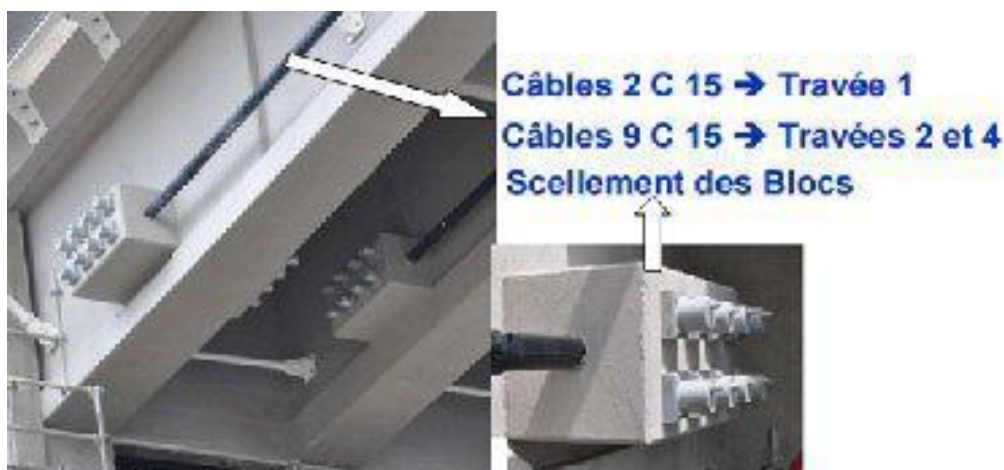


Figure 3.3: Précontrainte Additionnelle

Le tracé des armatures de précontrainte additionnelle peut être rectiligne ou polygonal. Un câblage rectiligne est plus pratique et aussi facile à le mettre en œuvre et les pertes d'effort par effet de frottement sont localisées au voisinage des zones d'ancrages, et sont de faibles estimations. Par contre le tracé polygonal qui consiste à dévier les câbles, de façon à optimiser l'effet de la précontrainte tant sur le plan de la résistance en flexion que sur celui de la résistance à l'effort tranchant. Les pertes par frottement sont un peu plus fortes que dans le cas d'un tracé rectiligne, tout en restant modérées, et la mise en œuvre est plus compliquée, à cause de la confection des déviateurs, mais c'est la conception la plus courante [18]

3.2.6. Réhabilitation renforcement avec plaques d'acier:

L'utilisation de plaques d'acier collées afin de renforcer des insuffisances locales ou globales s'est développée ces dernières années. C'est une technique économique qui modifie peu l'aspect et les dimensions de la structure à réparer. Ces plaques sont généralement facilement inspectables pour faire le suivi des dégradations. Le collage de la plaque à la surface du béton assure un bon transfert des efforts et permet ainsi une augmentation de la résistance et de la raideur de la structure renforcée. Les plaques d'acier collées peuvent être utilisées afin d'effectuer un renforcement en flexion, en cisaillement ou pour confiner des colonnes en béton [19].

3.2.6.1. Les matériaux utilisés:

- **La colle :**

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

- **La tôle :**

les tôles d'aciers sont généralement de qualité courante, leur épaisseur est limitée à 3mm de façon à leur permettre de suivre la courbure du support. Si des sections d'acier plus importantes sont nécessaires, il est préférable de superposer des tôles plutôt que d'augmenter l'épaisseur dans le but d'épouser l'allure de la déformée de la section de béton renforcé (exemple: ressorts à lames des camions) [18].

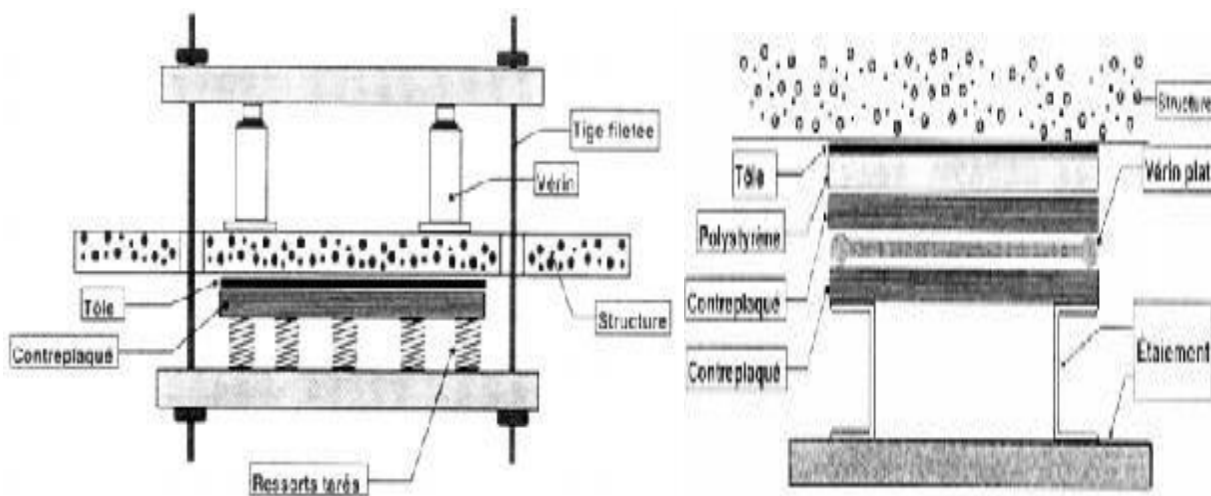


Figure 3.4 :La mise en oeuvre des plats collés

Les problèmes rencontrés peuvent être classés selon trois types : Les problèmes de mise en oeuvre, les problèmes de durabilité et les problèmes de comportement mécanique. La lourdeur de la mise en oeuvre nécessitant des moyens de manutention important [20] et une préparation des plaques d'acier en usine. Une mise en oeuvre sur des surfaces non droites est difficile. Des problèmes de corrosion sont souvent rencontrés lorsque la protection des plaques d'acier est

déficiente. Dans le cas du renforcement de poutres de ponts, l'expérience [Calgaro et Lacroix, 1997] a montré que les plaques d'acier collées résistaient mal au choc (véhicules hors gabarit). Theillout [21] indique quatre problèmes mécaniques lors de l'utilisation de plaques collées extérieures au béton :

- La mise en flexion locale de la plaque au voisinage d'une fissure;
- La répartition des efforts dans l'empilement de plusieurs plaques d'acier;
- La distribution des déformations entre les aciers internes et les aciers collés; Le décollement de la plaque.

Des travaux de recherche ont été entrepris pour remplacer ces plaques d'acier par un matériau non corrosif, léger et de haute résistance. Ceux-ci ont été si concluants que les matériaux composite renforcés de fibres (appelé FRP d'après la traduction anglaise « fiber reinforced plastics ») sont en voie d'être considérés comme une alternative préférable aux plaques d'acier pour le renforcement externe de certaines membrures en béton armé.

3.2.7. Renforcement par collage de plats composites :

La plupart des renforts composites utilisés dans le génie civil sont des composites carbone – époxyde ou verre – époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et en compression [22]. Les avantages de l'utilisation de composites sont nombreux. On peut citer par exemple leur grande résistance à la fatigue, leur orientation [23]. Dès lors, les études sur l'utilisation de matériaux composites pour la réhabilitation se sont multipliées pour mieux comprendre les problèmes posés par cette nouvelle technique (Assih (1998), Ferrier (1999), Avril (2002) et Sierra Ruiz (2002)) par exemple.

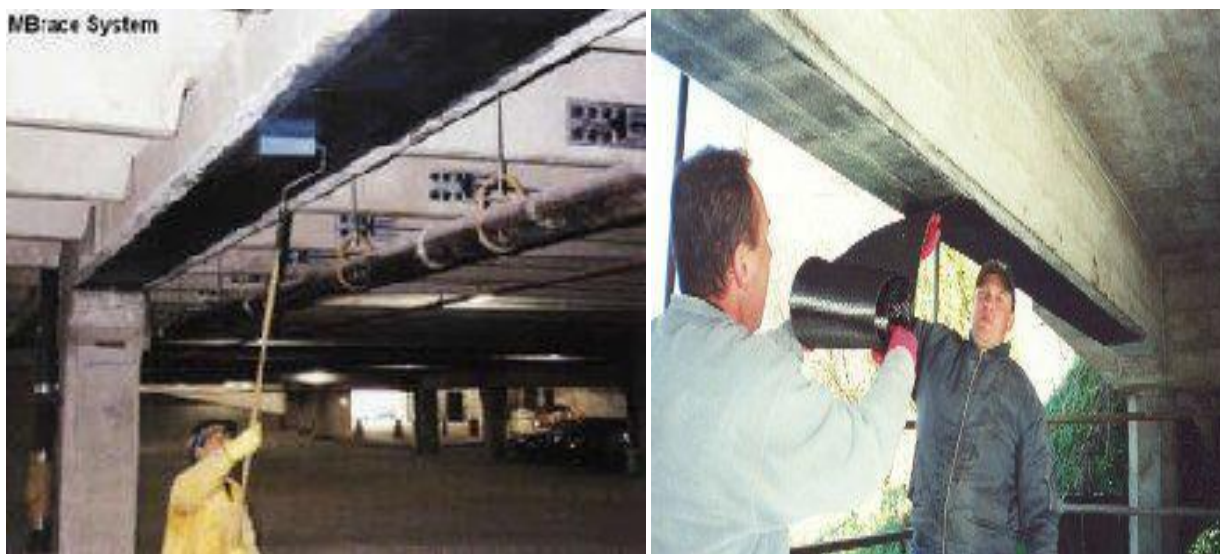


Figure 3.5 : Renforcement par collage de plats composites

3.3. CONCLUSION:

L'utilisation des méthodes classiques pour le renforcement des poutres en béton armé est limitée à cause de nombreux inconvénients. Dans ce cas le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres de carbone a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés. Le pays qui utilise aujourd'hui le plus ce procédé est le Japon, pour la protection des bâtiments et des ouvrages d'art contre le risque de destruction lors d'un tremblement de terre. En Algérie l'utilisation des fibres de carbone sont commencées seulement de 1998 et peu d'applications ont été réalisées mais la nécessité de renforcement des ouvrages vis-à-vis des modifications du trafic (probabilité de choc, augmentation des charges et de leurs fréquences), ainsi que la mise en conformité parasismique des ouvrages entraînera probablement un développement rapide de cette technique .

CHAPITRE 04 :

**Etude de cas d'une poutre renforcé par les
matériaux composites**

4.1. INTRODCION:

Ce chapitre est consacré pour déterminer les facteurs qui influent sur la performance des poutres renforcé avec des PRFC (polymère renforcé par fibre de carbone) en utilisant l'avis technique 3/10-669 qui est mise en conformité avec L'EUROCODE et qui est exploité par la société SIKA.

D'abord, on va présenter la poutre de notre cas. Ensuite, on va faire une étude paramétrique pour comprendre l'effet du renforcement des poutres par les matériaux composite. Les résultats trouvées sont comparé avec celle qui trouvées par une autre méthode traditionnelle de renforcement, c'est la méthode de chemisage par béton armé. On termine ce chapitre par un exemple de renforcement et réparation d'une poutre par les matériaux composites.

4.2.METHODE DE CALCUL D'UNE SECTION RECTANGULAIRE EN BETON ARME RENFORCEE AU MOYEN DE MATERIAUX COMPOSITES EN FLEXION SIMPLE :

4.2.1. Caractéristiques des matériaux :

4.2.1.1. Le béton :

Aux états limite ultimes, le diagramme contraintes-déformations utilisé est le diagramme dit "parabole-rectangle" [24].

La résistance à la compression de calcul du béton est définie par une résistance Caractéristique obtenue à partir de testes à la compression sur des cylindres f_{ck} .

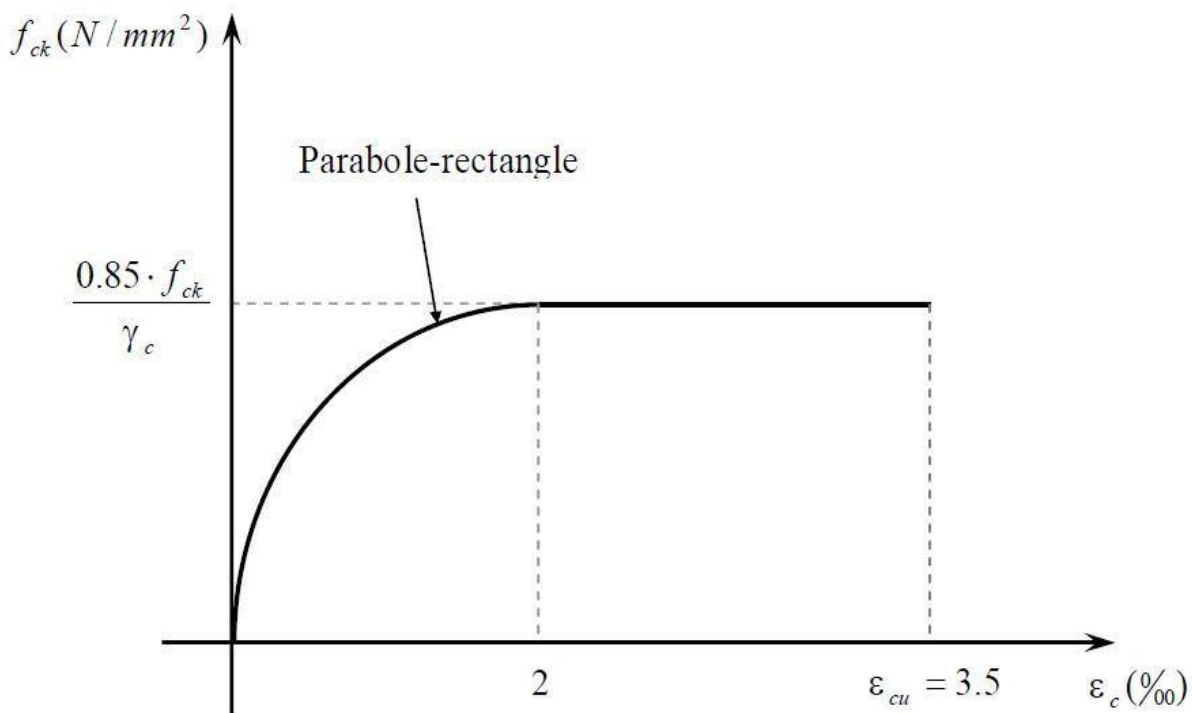


Figure 4.1 :loi de comportement du béton

La résistance caractéristique de calcul du béton, est déduite de la résistance caractéristique à la compression par application du coefficient de sécurité γ_c .

La valeur de γ_c est généralement prise égale à 1.5.

4.2.1.2. Les aciers:

Le diagramme contraintes-déformations de l'acier est représenté ci-dessous. Son Comportement est identique en traction et en compression.

La courbe reste linéaire dans la phase élastique jusqu'à la contrainte limite d'écoulement $f_s = f_{yk}$; au delà de ce point la contrainte est constante avec un accroissement des déformations [18].

Aux états limites ultimes, la loi du comportement de calcul se déduit par affinité oblique (pénalisation), d'un rapport γ_s , comme étant coefficient de sécurité. La valeur de γ_s est prise égale à 1.15.

Dans la phase élastique, la relation entre les contraintes et ses déformations relatives est définie par la loi de "Hooke": $f_s = E_s \times \varepsilon_s$

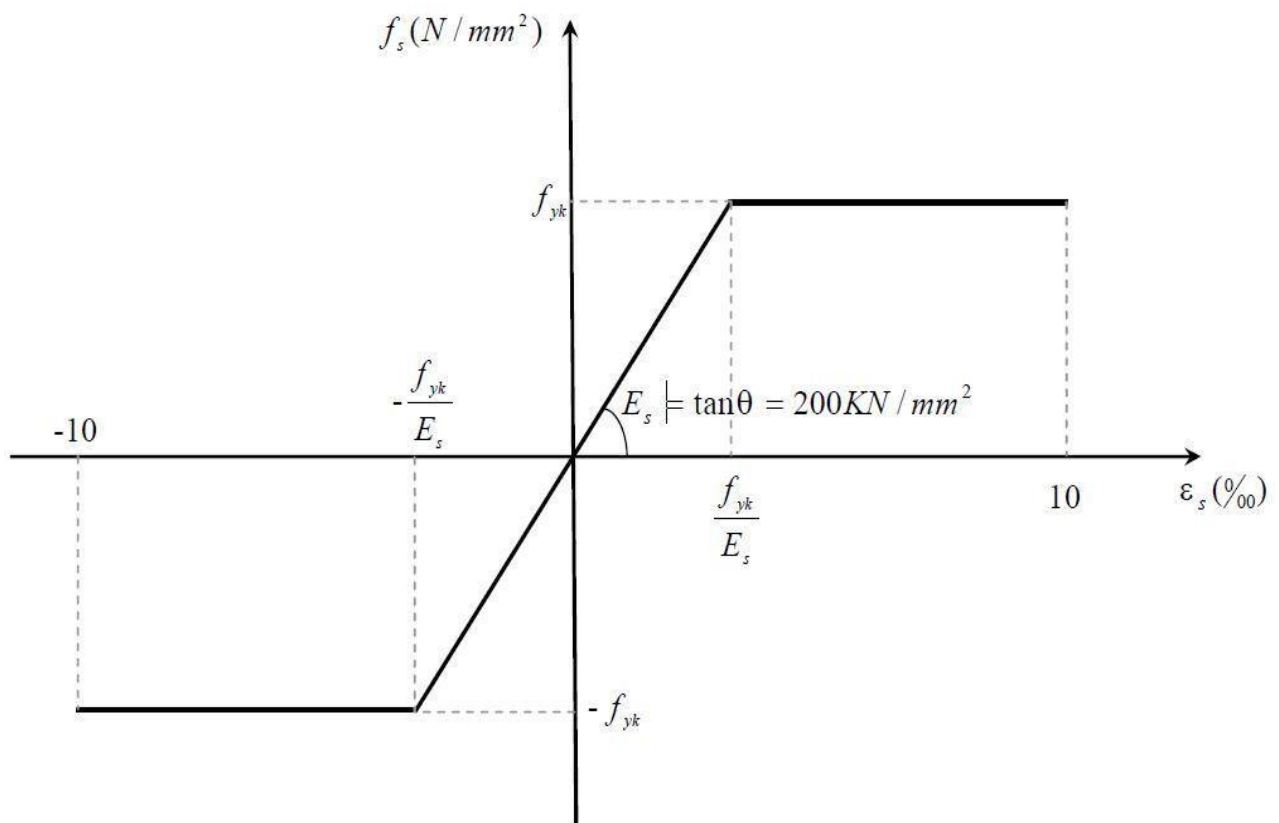


Figure 4.2 : loi de comportement de l'acier

4.2.1.3. Le matériaux composites :

Les produits composites employés doivent présenter un allongement à rupture en traction supérieur ou égal à 8.5 0/00.

Pour les matériaux composites unidirectionnels, la loi de comportement en traction est modélisée comme suit:

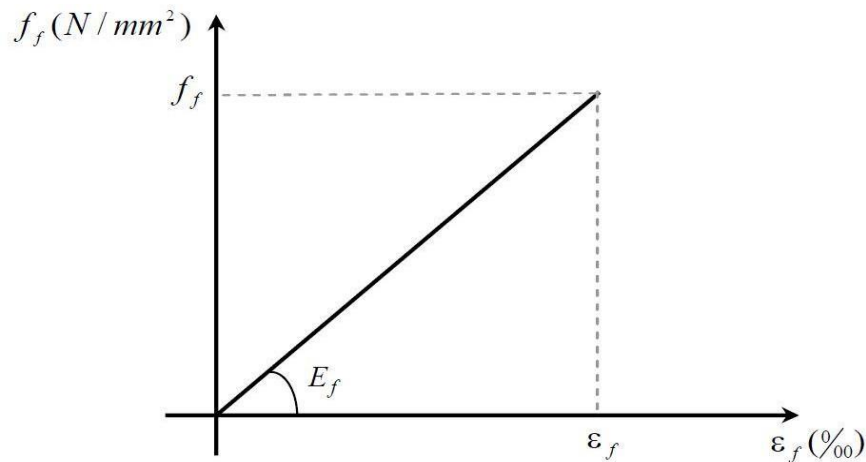


Figure 4.3 : Loi de comportement du composite

Cette loi se décrit par les deux paramètres :

- f_f : résistance garantie à la rupture en traction
- E_f : module de Young

Ces paramètres sont issus d'un essai de traction tel que présenté dans le paragraphe 1.7 (détermination des propriétés mécaniques en traction des composites stratifiés in situ) [25] [26].

4.2.2. Développement des équations de base pour une section non usuelle soumise à la flexion simple :

4.2.2.1. Section non usuelle en béton armé non renforcée:

Le bloc des contraintes rectangulaire simplifié adopté par [24], est basé sur le principe de Whitney, cas de l'utilisation d'un bloc rectangulaire fictif de telle sorte que le centre de gravité du bloc coïncide avec le centre de gravité du bloc réel, et sa valeur est de l'ordre de 80% de la valeur de la profondeur de l'axe neutre à partir de la fibre la plus comprimée.

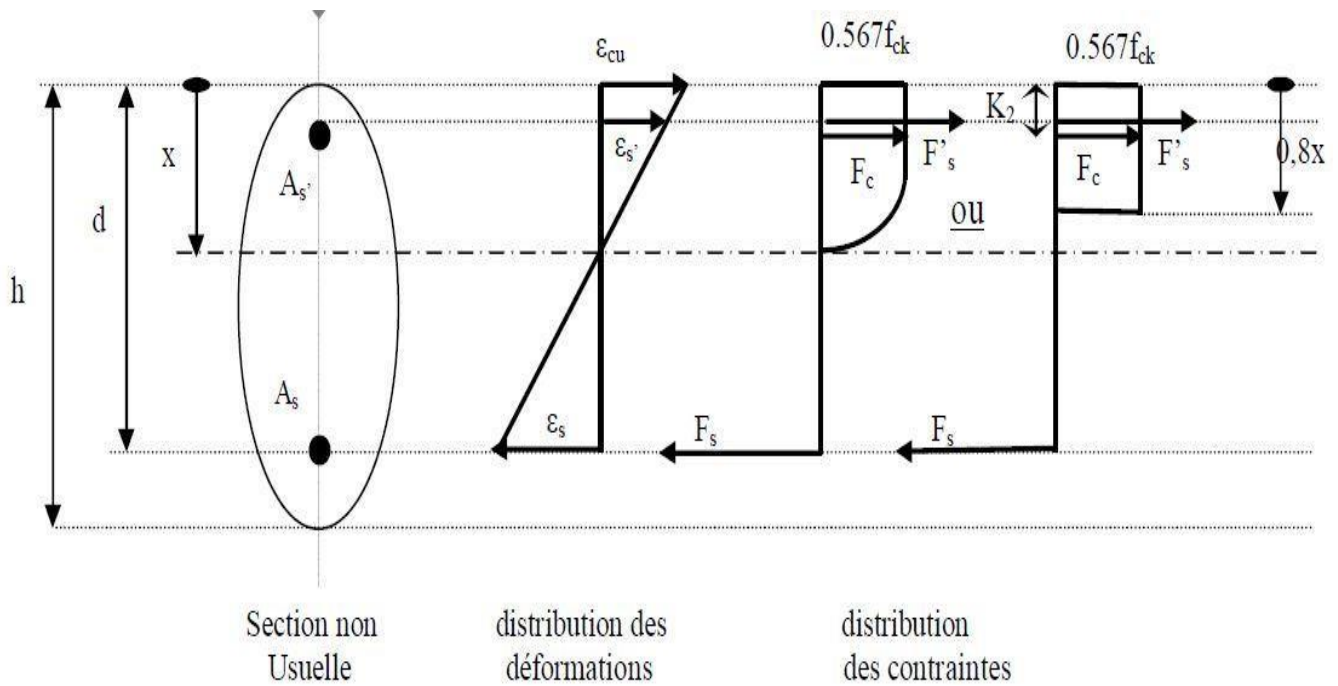


Figure 4.4: Image à l'E.L.U d'une section non usuelle en béton armé

Soit une section non usuelle à axe de symétrie vertical où A_s et A_s' représentent respectivement la section d'armatures tendues et comprimées.

La distance entre la fibre la plus comprimée et le centre de gravité des armatures tendues notée "d", est dite hauteur utile de la section.

La valeur de la déformation relative de la fibre la plus comprimée du béton est fixée à 3.5/100, pour une section à l'état limite ultime [27].

La compatibilité des déformations des matériaux: acier et béton, s'exprime par les relations suivantes:

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d-x}{x}\right) \cdot \varepsilon_{cu} \quad (5-1)$$

$$\varepsilon_{s'} = \left(\frac{x-d'}{x}\right) \cdot \varepsilon_{cu} \quad (5-2)$$

Pour le bloc rectangulaire fictif des contraintes du béton :

- $K_1 = 0.567$

- K_2 est le coefficient de positionnement pris égal à 0.4

A partir de l'équation d'équilibre des forces internes de la section:

$$F_c + F_s' = F_s \quad (5-3) \text{ Où}$$

F_c est la force de compression dans le béton

$$F_c = K_1 \cdot f_{ck} \cdot (x) \quad (5-4)$$

$$F_c = 0.567 \cdot f_{ck} \cdot A_c(x)$$

F'_s est la force de compression au niveau des armatures comprimées.

$$F'_s = f'_s \cdot A'_s \quad (5-5)$$

F_s est la force de traction au niveau des armatures tendues.

$$F_s = f_s \cdot A_s \quad (5-6)$$

L'équation d'équilibre devient alors:

$$K_1 \cdot f_{ck} \cdot A_c(x) + f'_s \cdot A'_s = f_s \cdot A_s \quad (5-7)$$

En divisant les termes de l'équation par le terme de "Au" définissant une section utile:

$$0.567 f_{ck} \cdot \frac{A_c(x)}{A_u} + f'_s \cdot \rho'_s = f_s \quad (5-8)$$

L'équation (5-8), représente une équation à trois inconnues interdépendantes : $A_c(x)$, f_s , f'_s , qui ne peut être résolue que par la méthode d'essais successifs dont les étapes sont résumées ci-dessous :

- i. Fixer la profondeur de l'axe neutre "x" pour une valeur balayant la section.
- ii. Calculer les déformations relatives " ϵ_s " et " ϵ'_s " à partir des équations (5-1) et (5-2).
- iii. Evaluer les contraintes f_s et f'_s respectivement à partir des diagrammes contraintes-déformations appropriés.
- iv. Injecter ' x , f_s , et f'_s ' dans l'équation d'équilibre (5-7).
- v. Vérifier à travers l'équation (5-8) si l'équilibre est atteint, donc "x" est solution.

Dans le cas contraire, le problème exigerait une succession des valeurs de "x"

Jusqu'à ce que l'équilibre des forces soit atteint: $F_c + F'_s = F_s$

Une fois la profondeur de l'axe neutre est connue, le moment ultime de la section est

Défini par :

$$M_{u/cdg} = F'_s \cdot (0.4x - d') + (d - 0.4x) \cdot F_s \quad (5-9)$$

En divisant les deux termes de cette équation par " $A_u \cdot d$ ", on obtiendra l'expression du "moment réduit"[27]:

$$\frac{M_u}{A_u \cdot d^2} = \rho'_s \cdot f'_s \cdot (0.4 \frac{x}{d} - \gamma) + \rho_s \cdot f_s \cdot (1 - 0.4 \gamma) \quad (5-10)$$

4.2.2.2. Section non usuelle en béton armé renforcée :

Soit une section non usuelle renforcée à axe de symétrie vertical où: A_s , A'_s , représentent respectivement les sections des armatures tendues et comprimées, A_f étant la section du renfort.

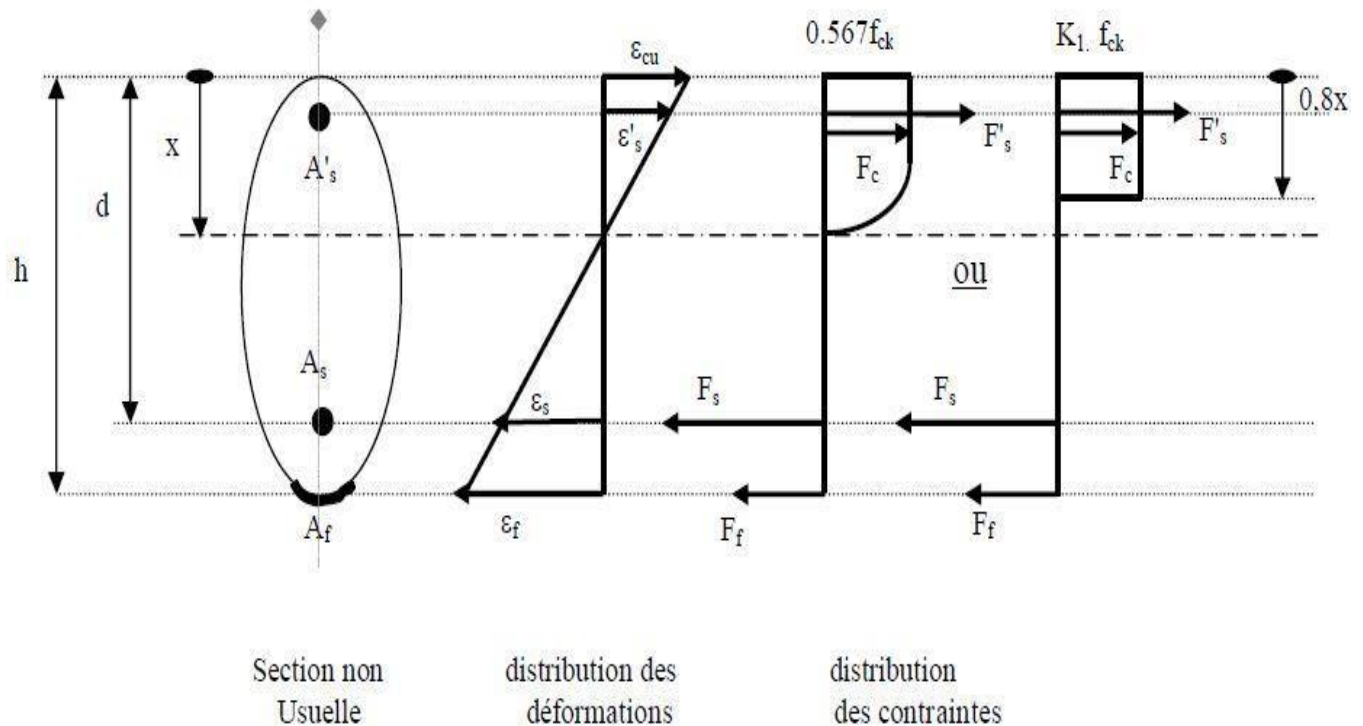


Figure 4.5: Image à l'E.L.U d'une section non usuelle en béton armé renforcée

La distance entre la fibre la plus comprimée et le centre de gravité des armatures tendues notée "d", est dite: la hauteur utile de la section.

La valeur de la déformation relative de la fibre la plus comprimée du béton est fixée à 3.5/100, pour une section à l'état limite ultime.

La compatibilité des déformations des matériaux :l'acier, le matériau composite et le béton, sont exprimés par les relations suivantes:

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d-x}{x}\right) \cdot \varepsilon_{cu} \quad (5-1)$$

$$\varepsilon'_s = \left(\frac{x-d'}{x}\right) \cdot \varepsilon_{cu} \quad (5-2)$$

$$\varepsilon_f = \left(\frac{h+t/2-x}{x}\right) \varepsilon_{cu} \quad (5-11)$$

Avec:

t : l'épaisseur du renfort

K1 pris égal à 0.567

K2 : le coefficient de positionnement est pris égal à 0.4

L'équation d'équilibre des efforts internes de la section renforcée s'écrit:

$$F_c + F'_s = F_s \quad (5-12)$$

Où F_c est la force de compression dans le béton

$$F_c = K_1 \cdot f_{ck} \cdot (x) \quad (5-4)$$

$$F_c = 0.567 \cdot f_{ck} \cdot A_c(x)$$

F'_s est la force de compression des armatures comprimées.

$$F'_s = f'_s \cdot A'_s \quad (5-5)$$

F_s est la force de traction des armatures tendues.

$$F_s = f_s \cdot A_s \quad (5-6)$$

F_f est la force due au renforcement au moyen de matériau composite.

$$F_f = f_f \cdot A_f \quad (5-13)$$

L'équation d'équilibre devient alors:

$$K_1 \cdot f_{ck} \cdot A_c(x) + f'_s \cdot A'_s = f_s \cdot A_s + f_f \cdot A_f \quad (5-14)$$

En divisant les termes de l'équation par le terme de " A_u " définissant une section utile:

$$0.567 f_{ck} \cdot \frac{A_c(x)}{A_u} + f'_s \cdot \rho'_s = f_s \cdot \rho_s + f_f \cdot \rho_f \quad (5-15)$$

L'équation (5-15), était une équation à quatre inconnues interdépendantes : $A_c(x)$, f_s , f'_s , , est devenue plus laborieuse que la précédente ,et qui ne peut être résolue que par la méthode d'essais successifs.

Les étapes à suivre dans cette méthode sont :

- i. Fixer la profondeur de l'axe neutre " x ", commencer par $x=d/2$.
- ii. Calculer les déformations relatives " ϵ_s ", " ϵ'_s " et " ϵ_f ", à partir equations (5-1), (5-2) et (5-11).
- iii. Evaluer les contraintes f_s , f'_s et f_f respectivement à partir des diagrammes contraintes-déformations appropriés.
- iv. Injecter x , f_s , f'_s , f_f dans l'équation d'équilibre.
- v. Vérifier à travers l'équation (5-14) si l'équilibre est atteint, donc " x " est solution.

Dans le cas contraire, le problème exige rait une succession de valeurs de " x " jusqu'à ce que l'équilibre des forces soit atteint: $F_c + F'_s = F_s + F_f$

Une fois la profondeur de l'axe neutre est déterminer, le moment ultime de la section s'exprime comme suit :

$$M_{u/cdg} = F'_s \cdot (0.4x - d') + (d - 0.4x) \cdot F_s + F_f \cdot (h + t/2 - 0.4x) \quad (5-16)$$

Divisant les deux termes de cette équation par " $A_u \cdot d$ ", on obtient l'expression du "moment réduit".

$$\frac{M_u}{A_u \cdot d} = f'_s \cdot \rho'_s \cdot (0.4 \frac{x}{d} - \frac{d'}{d}) + \rho_s \cdot f_s \cdot (1 - 0.4 \frac{x}{d}) + \rho_f \cdot f_f \cdot (\frac{h+t/2}{d} - 0.4 \frac{x}{d}) \quad (5-17)$$

4.2.2.3. Section rectangulaire non renforcée:

Les relations de l'analyse d'une section rectangulaire en flexion simple sont déduites de celles de la section non usuelle, en remplaçant la section du béton comprimé $A_c(x)$ par une section rectangulaire : $A_c(x) = b \cdot x$

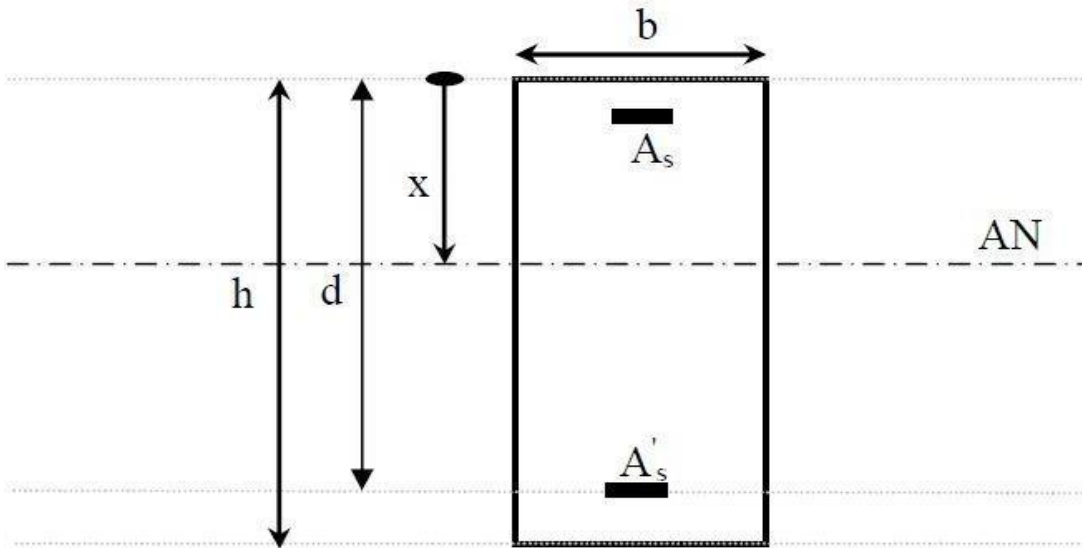


Figure 4.6: section rectangulaire en béton armé

L'équation d'équilibre devient alors:

$$0.567 \cdot f_{ck} \cdot \frac{0.8 \cdot x \cdot b}{b \cdot d} + \rho'_s f'_s = \rho_s \cdot f_s$$

Donc:

$$0.454 \cdot f_{ck} \cdot \frac{x}{b} + \rho'_s f'_s = \rho_s \cdot f_s \quad (5-18)$$

La section utile est:

$$A_u = b \cdot d \quad (5-19)$$

L'expression du moment réduit est donnée comme suit:

$$\frac{M_u}{b \cdot d^2} = \rho'_s f'_s \cdot \left(0.4 \frac{x}{d} - \frac{d'}{d}\right) + \rho_s \cdot f_s \cdot \left(1 - 0.4 \frac{x}{d}\right) \quad (5-20)$$

4.2.2.4. Section rectangulaire renforcée:

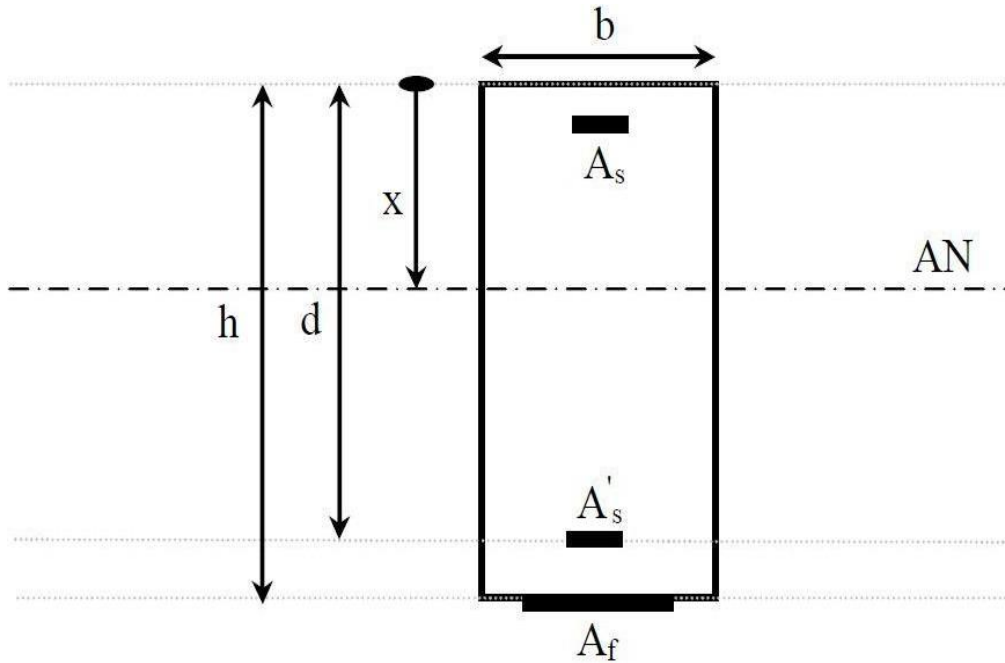


Figure 4.7: section rectangulaire en béton armé renforcée

L'équation d'équilibre est:

$$0.454 \cdot f_{ck} \cdot \frac{x}{b} + \rho'_s \cdot f'_s = \rho_s \cdot f_s + \rho_f \cdot (5-21)$$

L'expression du moment réduit est donc:

$$\frac{M_u}{b \cdot d^2} = \rho'_s \cdot f'_s \cdot \left(0.4 \frac{x}{d} - \frac{d'}{d}\right) + \rho_s \cdot f_s \cdot \left(1 - 0.4 \frac{x}{d}\right) + \rho_f \cdot f_f \cdot \left(\frac{h+t/2}{d} - 0.4 \frac{x}{d}\right) (5-22)$$

CHAPITRE 04 : Etude de cas d'une poutre renforcé par les matériaux composites

Données			
Dimensions caractéristiques	Hauteur de la poutre (mm)	$h =$	1200
	Largeur de la poutre (mm)	$b =$	300
	Hauteur utile de la poutre (mm)	$d =$	1170
	Distance entre A' et la fibre la plus comprimée (mm)	$d' =$	30
	section d'armature comprimée A_s' (mm ²)	$A_s' =$	339
	section d'armature tendu A_s (mm ²)	$A_s =$	1600
section de béton comprimée A_c	en (mm ²)	$A_c =$	55650
Contrainte de l'acier utilisé	en Mpa	$f_e =$	400
Contrainte du béton à 28 jours	en Mpa	$f_{c28} =$	20
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	$E_s =$	200000
Taxe neutre		en (mm)	$x = 185,9$
calcul des déformations			
déformation de béton	$\epsilon_{cu} = 0.35\%$	$\epsilon_{cu} =$	0.0035
déformation de l'acier comprimées	$\epsilon_s' = (x-d')/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_s' =$	0.0029 0.0020 ϵ_{su}
déformation de l'acier tendues	$\epsilon_s = (d-x)/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_s =$	0.0186 0.0020 ϵ_{su}
calcul des Contraintes			
Contrainte de compression de béton	$f_c = 0.567/f_{c28}$	$f_c =$	11.33
Contrainte des aciers comprimées	$f_s' = \epsilon_s' E_s$	$f_s' =$	400
Contrainte de traction des aciers tendues	$f_s = \epsilon_s E_s$	$f_s =$	400
calcul des forces			
force de compression de béton (KN)	$F_c = f_c \cdot 0.8 \cdot x \cdot b$	$F_c =$	504.56
force des aciers comprimées (KN)	$F_s' = f_s' \cdot A_s'$	$F_s' =$	135.60
force de traction des aciers tendues (KN)	$F_s = f_s \cdot A_s$	$F_s =$	640.00
Vérification			
Vérification	force de compression	$F_{bc} + F_s' =$	640.16
	force de traction	$F_s =$	640.00
	comparaison		OK
capacité flexionnelle d'une section rectangulaire non renforcée (KN.m)	$M_u = F_s \cdot (0.4x - d') + F_s(d - 0.4x)$	$M_u =$	707.31

Données			
Dimensions caractéristiques	Hauteur de la poutre (mm)	$h =$	1200
	Largeur de la poutre (mm)	$b =$	300
	Hauteur utile de la poutre (mm)	$d =$	1170
	Distance entre A' et la fibre la plus comprimée (mm)	$d' =$	30
	section d'armature comprimée A_s' (mm ²)	$A_s' =$	339
	section d'armature tendu A_s (mm ²)	$A_s =$	1600
section de béton comprimée A_c	en mm ²	$A_c =$	84840
Contrainte de l'acier utilisé	en Mpa	$f_e =$	400
Contrainte du béton à 28 jours	en Mpa	$f_{c28} =$	20
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	$E_s =$	200000
module de young du composite utilisé	en Mpa	$E_f =$	235000
Taxe neutre		en mm	$x = 282,8$
calcul des déformations			
déformation de béton	$\epsilon_{cu} = 0.35\%$	$\epsilon_{cu} =$	0.0035
déformation de l'acier comprimées	$\epsilon_s' = (x-d')/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_s' =$	0.0031 0.0020
déformation de l'acier tendues	$\epsilon_s = (d-x)/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_s =$	0.0110 0.0020
déformation du composite	$\epsilon_c = (h-(V2-x))/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_c =$	0.0114 0.0115
calcul des Contraintes			
Contrainte de compression de béton	$f_c = 0.567/f_{c28}$	$f_c =$	11.33
Contrainte des aciers comprimées	$f_s' = \epsilon_s' E_s$	$f_s' =$	400
Contrainte de traction des aciers tendues	$f_s = \epsilon_s E_s$	$f_s =$	400
Contrainte de traction du composite	$f_c = E_f \cdot \epsilon_c$	$f_c =$	2568
calcul des forces			
force de compression de béton (KN)	$F_c = f_c \cdot 0.8 \cdot x \cdot b$	$F_c =$	799.22
force des aciers comprimées (KN)	$F_s' = f_s' \cdot A_s'$	$F_s' =$	135.60
force de traction des aciers tendues (KN)	$F_s = f_s \cdot A_s$	$F_s =$	640.00
force de traction de composite (KN)	$F_c = f_c \cdot A_f$	$F_c =$	264.94
Vérification			
Vérification	force de compression	$F_{bc} + F_s' =$	934.82
	force de traction	$F_s =$	964.94
	comparaison		OK
capacité flexionnelle d'une section rectangulaire renforcée (KN.m)	$M_u = F_s \cdot (0.4x - d') + F_s(d - 0.4x) + F_c(h - (V2 - 0.4x))$	$M_u =$	975.68

Données			
Dimensions caractéristiques	Largeur de la poutre (mm)	$b =$	300
	Distance entre A' et la fibre la plus comprimée (mm)	$d' =$	30
	section d'armature comprimée A_s' (mm ²)	$A_s' =$	0
	section d'armature tendu A_s (mm ²)	$A_s =$	2091
section de béton comprimée A_c	en (mm ²)	$A_c =$	80217.39
Contrainte de l'acier utilisé	en Mpa	$f_e =$	400
Contrainte du béton à 28 jours	en Mpa	$f_{c28} =$	20
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	$E_s =$	200000
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	$E_s =$	200000
Moment ultime	en N.m	$M_u =$	838.23
force de traction des aciers tendues	$F_s = f_s \cdot A_s$	$F_s =$	727304.3478
Taxe neutre		en (mm)	$x = 267,39$
calcul des déformations			
déformation de béton	$\epsilon_{cu} = 0.35\%$	$\epsilon_{cu} =$	0.0035
déformation de l'acier comprimées	$\epsilon_s' = (x-d')/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_s' =$	0.0031 0.0020 ϵ_{su}
déformation de l'acier tendues	$\epsilon_s = (d-x)/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_s =$	#REF! 0.0020 ϵ_{su}
calcul des Contraintes			
Contrainte de compression de béton	$f_c = 0.567/f_{c28}$	$f_c =$	11.33
Contrainte des aciers comprimées	$f_s' = \epsilon_s' E_s$	$f_s' =$	621
Contrainte de traction des aciers tendues	$f_s = \epsilon_s E_s$	$f_s =$	348
calcul des forces			
force de compression de béton	$F_c = f_c \cdot 0.8 \cdot x \cdot b$	$F_c =$	727.30
force des aciers comprimées	$F_s' = f_s' \cdot A_s'$	$F_s' =$	0.00
force de traction des aciers tendues	$F_s = f_s \cdot A_s$	$F_s =$	727.30
Résultats			
Hauteur utile de la poutre (mm)	$d = (M_u + F_s \cdot 0.4 \cdot x) / F_s$	$d =$	1259.47
Hauteur de la poutre (mm)		$h =$	1288.47

Données			
Dimensions caractéristiques	Largeur de la poutre (mm)	$b =$	300
	Hauteur utile de la poutre (mm)	$d =$	1170
	Distance entre A' et la fibre la plus comprimée (mm)	$d' =$	30
	section d'armature comprimée A_s' (mm ²)	$A_s' =$	0
	section d'armature tendu A_s (mm ²)	$A_s =$	1600
section de béton comprimée A_c	en (mm ²)	$A_c =$	141176.47
Contrainte de l'acier utilisé	en Mpa	$f_e =$	348
Contrainte du béton à 28 jours	en Mpa	$f_{c28} =$	10
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	$E_s =$	200000
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	$E_s =$	200000
Moment ultime	en N.m	$M_u =$	937.000.00
Contrainte du composite utilisé	en Mpa	$f_{cu} =$	1625
section du composite utilisé	en (mm ²)	$A_f =$	98.7
force de traction des aciers tendues	$F_s = f_s \cdot A_s$	$F_s =$	640000
Taxe neutre		en (mm)	$x = 478.99$
calcul des déformations			
déformation de béton	$\epsilon_{cu} = 0.35\%$	$\epsilon_{cu} =$	0.0035
déformation de l'acier comprimées	$\epsilon_s' = (x-d')/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_s' =$	0.0033 0.0020 ϵ_{su}
déformation de l'acier tendues	$\epsilon_s = (d-x)/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_s =$	0.0052 0.0020 ϵ_{su}
calcul des Contraintes			
Contrainte de compression de béton	$f_c = 0.567/f_{c28}$	$f_c =$	5.67
Contrainte des aciers comprimées	$f_s' = \epsilon_s' E_s$	$f_s' =$	655
Contrainte de traction des aciers tendues	$f_s = \epsilon_s E_s$	$f_s =$	400
calcul des forces			
force de compression de béton	$F_c = f_c \cdot 0.8 \cdot x \cdot b$	$F_c =$	640.00
force des aciers comprimées	$F_s' = f_s' \cdot A_s'$	$F_s' =$	0.00
force de traction des aciers tendues	$F_s = f_s \cdot A_s$	$F_s =$	640.00
Résultats			
a			544.00
b			191720.00
delta			25395940000.00
delta*0.5			12697970.00
$x1$			2334.43
$x2$			0.00572
Taxe neutre		en (mm)	$x = 2324.43$
force de compression de béton	$F_c = f_c \cdot 0.8 \cdot x \cdot b$	$F_c =$	3877.23
force de traction de composite	$F_c = f_{cu} \cdot A_f$	$F_c =$	3337.23

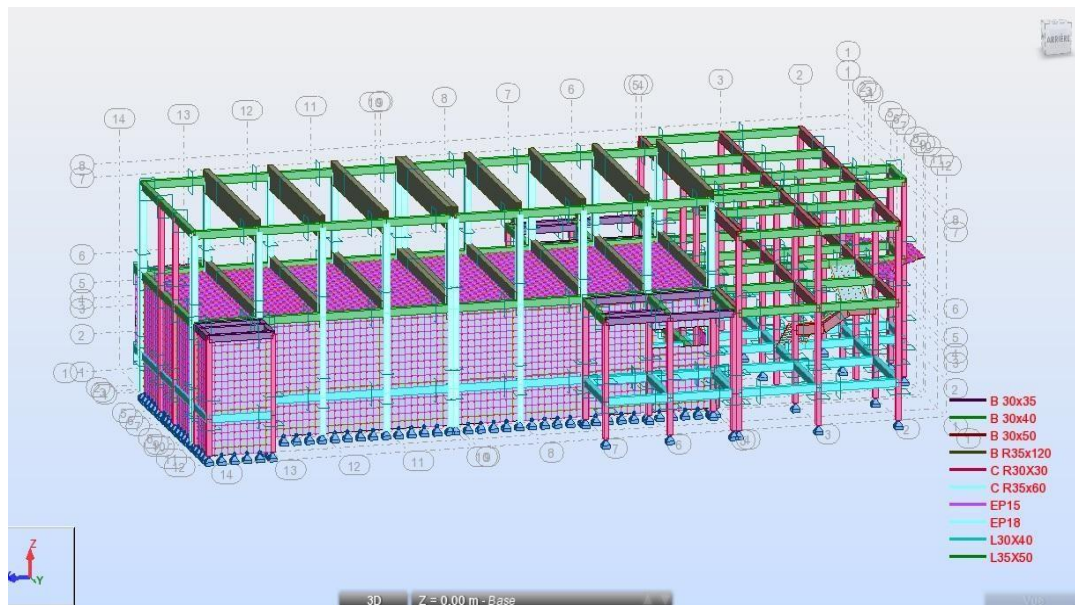
Figure 4-8: programme créé avec Excel pour le calcul d'une poutre renforcé par Sika Wrap

4.3. PRESENTATION DE CAS :

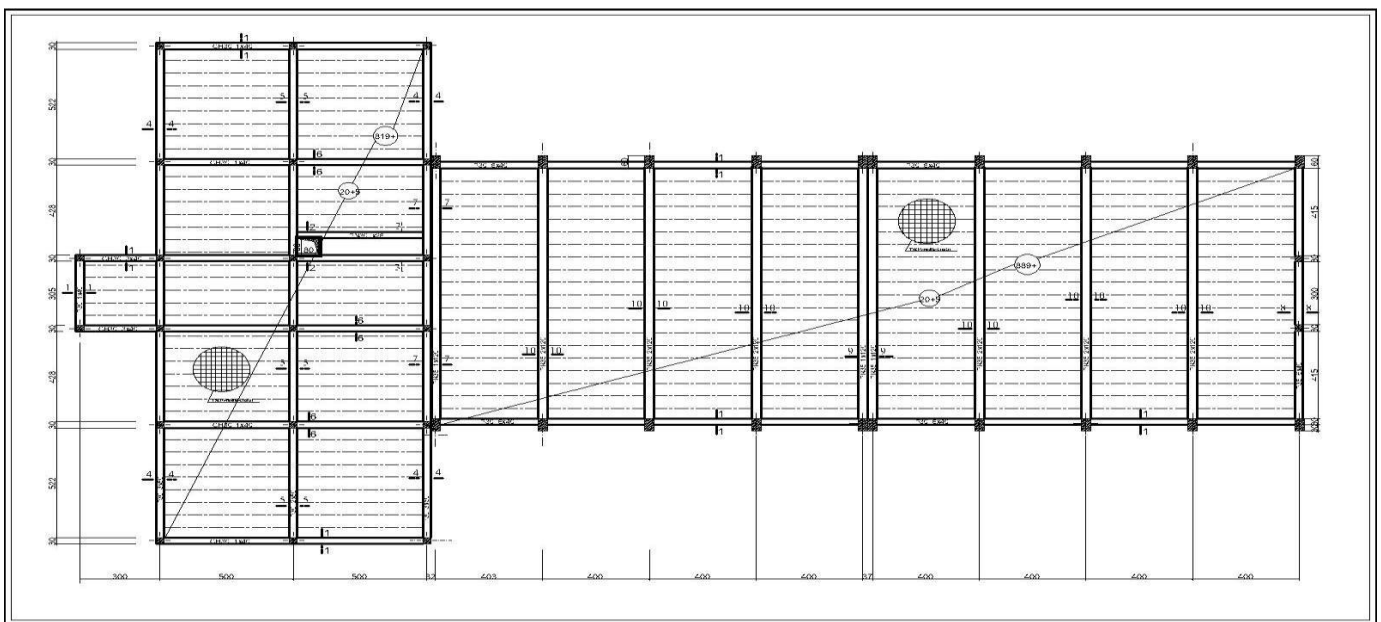
4.3.1. Présentation d l'ouvrage :

La poutre utilisée pour cette analyse est une poutre de section rectangulaire de dimension (1.20*0.30) m, cette poutre a une longueur de 11.90 m. notre poutre est appliquée se trouvé dans El Oued et utilisée dans le projet de STAND de TIR U.R.S .

Pour les matériaux composites, le renforcement est fait par des matériaux composites à bases de fibre de carbone (Sika warp). Pour le calcul des charges on utilisé logiciel Robot2010.



(a) Vue en 3D du modèle de l'ouvrage robot 2010



Coffrage de plancher

Figure 4-9 :présentation de l'ouvrage

4.3.2.Calcul de poutre sans renforcement :

Organigramme pour le calcul d'une section rectangulaire d'une poutre en flexion simple à l'état limite ultime

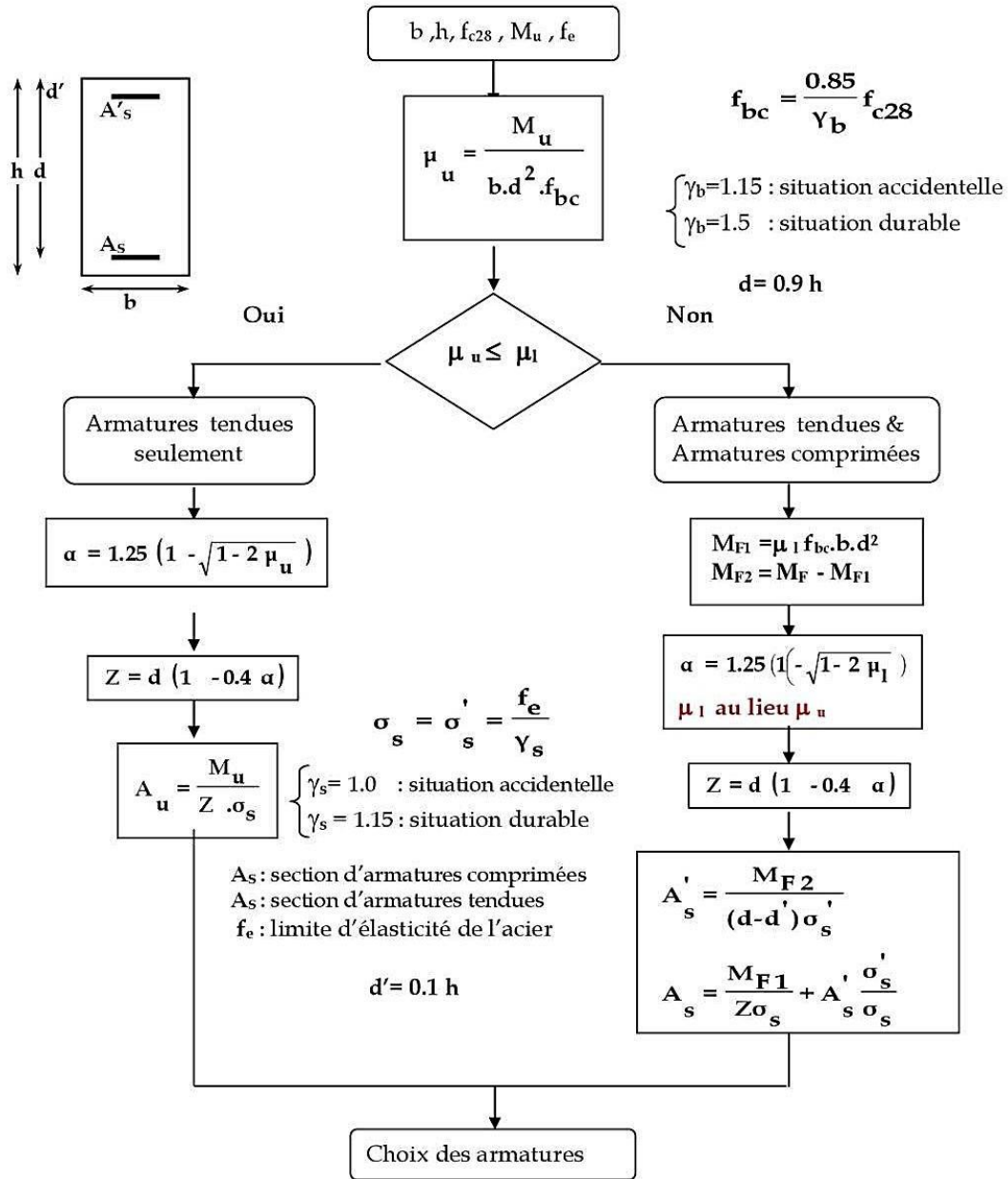


Figure 4 – 10: Organigramme de calcul d'une section rectangulaire en béton armé soumis à la Flexion simple (E.L.U).

$$f_{bu} = \frac{0,85}{1,15} * 20 = 11,3$$

$$M_U = 616,22 \text{ KN.m}$$

$$U = \frac{M_U}{b \cdot d^2 \cdot f_{bu}} = \frac{0,66122}{0,3 * 1,17^2 * 11,33} = 0,132 < 0,186 \quad \text{oui}$$

$$\alpha_u = 1,25 [1 - \sqrt{1 - (2 * 0,132)}] = 0,1775$$

$$Z = 1,17 [1 - (0,4 * 0,1775)] = 1,08693$$

$$f_{su} = \frac{400}{1,15} = 347,82$$

$$A_s = \frac{0,61622}{1,086 * 347,82} = 0,001629 \text{ m}^2 = 16,29 \text{ cm}^2$$

Ferrailage réelle

$$A_s = 16,29 \text{ cm}^2 (8 \text{ } \varnothing 16) \quad A'_s = 3,39 \text{ cm}^2 (3 \text{ } \varnothing 12)$$

4.3.2.1. Section la poutre sans renforcement :

$$h = 1200 \text{ mm} \quad d' = 30 \text{ mm} \quad f_{c28} = 20 \text{ Mpa}$$

$$b = 300 \text{ mm} \quad A_{s'} = 339 \text{ mm}^2 \quad f_e = 400 \text{ Mpa}$$

$$d = 1170 \text{ mm} \quad A_s = 1600 \text{ mm}^2 \quad E_s = 200000 \text{ Mpa}$$

$$x = 185,5 \quad (x) = b \cdot x = 300 * 185,5 = 55650 \text{ mm}^2$$

♦ Calcul des déformations :

$$\epsilon_s = \left(\frac{(X - d')}{X} \right) \cdot \epsilon_{cu} = \left(\frac{(185,5 - 30)}{185,5} \right) * 0,0035 = 0,0029$$

$$\epsilon_s = \left(\frac{(d - x)}{x} \right) \cdot \epsilon_{cu} = \left(\frac{(1170 - 185,5)}{185,5} \right) * 0,0035 = 0,0186$$

♦ calcul des Contraintes :

$$\epsilon'_s > 2\text{‰} \rightarrow f'_s = 400$$

$$\epsilon_s > 2\text{‰} \rightarrow f_s = 400$$

$$f_c = K_1 * f_{c28} = 0,567 * 20 = 11,33$$

♦ calcul des forces :

$$F_c = f_c * 0,8 * (x) = 11,33 * 0,8 * 55650 = 504560 \text{ N} = 504,56 \text{ KN}$$

$$F'_s = f'_s \cdot A'_s = 400 * 339 = 135600 \text{ N} = 135,60 \text{ KN}$$

$$F_s = f_s \cdot A_s = 400 * 1600 = 640000 \text{ N} = 640 \text{ KN}$$

♦Vérification :

$$F_c + F'_s = F_s$$

$$504,56 + 135,60 = 640$$

$$640,16 \approx 640 \rightarrow \# \text{Équation vérifiée} \#$$

$$\begin{aligned} Mu &= F's (0.4x - d') + (d - 0.4x) \\ &= 135.60 [(0,4 * 185,5) - 30] + 640 [1170 - (0,4 * 185,5)] \\ &= 707310 \text{KN.mm} = 707,31 \text{KN.m} \end{aligned}$$

4.4. CAPACITE FLEXIONNELLE D'UNE SECTION RECTANGULAIRE RENFORCEE:

4.4.1. Section rectangulaire renforcé Par SikaWrap-230 C – Sikadur-330 :



Figure 4 – 11: SikaWrap-230 C



Figure 4 – 12: Sikadur-330

SikaWrap-230 C – Sikadur-330	
Module d'élasticité E_f	225000 MPa
Allongement de calcul ε_{fud}	0.7 %
Résistance moyenne en traction f_{fu}	3500 MPa
Résistance de calcul ELU f_{fud}	1625 MPa
Résistance de calcul ELS f_{fd}	500 MPa

$$E_f = 225000 \text{ Mpa} \quad \varepsilon_{\text{fud}} = 0.7\%$$

$$t = 0.139 \text{ mm} \quad X = 232.3$$

$$A_f = b \cdot t = 300 \cdot 0.139 = 38.7 \text{ mm}^2$$

$$A_{c(x)} = b \cdot x = 300 \cdot 232.3 = 69690$$

♦ Calcul des déformations :

$$\varepsilon'_s = \left(\frac{X - d'}{X} \right) \cdot \varepsilon_{cu} = \left(\frac{232.3 - 30}{232.3} \right) \cdot 0.0035 = 0.0030$$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d - x}{x} \right) \cdot \varepsilon_{cu} = \left(\frac{1170 - 232.3}{232.3} \right) \cdot 0.0035 = 0.0141$$

$$\varepsilon_f = \left(\frac{h + t/2 - x}{x} \right) \varepsilon_{cu} = \left(\frac{1200 + (0.139/2) - 232.3}{232.3} \right) \cdot 0.0035 = 0.0146$$

♦ calcul des Contraintes :

$$\varepsilon'_s > 2\text{‰} \rightarrow f'_s = 400$$

$$\varepsilon_s > 2\text{‰} \rightarrow f_s = 400$$

$$\varepsilon_f > 0.7\% \rightarrow f_f = \varepsilon_f \cdot E_f = 0.0146 \cdot 225000 = 3281$$

$$f_c = K_1 \cdot f_{c28} = 0.567 \cdot 20 = 11.33$$

♦ calcul des forces :

$$F_c = f_c \cdot 0.8 \cdot (x) = 11.33 \cdot 0.8 \cdot 69690 = 631860 \text{ N} = 631.86 \text{ KN}$$

$$F'_s = f'_s \cdot A'_s = 400 \cdot 339 = 135600 \text{ N} = 135.60 \text{ KN}$$

$$F_s = f_s \cdot A_s = 400 \cdot 1600 = 640000 \text{ N} = 640 \text{ KN}$$

$$F_f = f_f \cdot A_f = 3281 \cdot 38.7 = 126974 \text{ N} = 126.974 \text{ KN}$$

♦ Vérification :

$$F_c + F'_s = F_s + F_f$$

$$631.86 + 135.60 = 640 + 126.974$$

$$767.46 \approx 766.974 \rightarrow \text{\#Équation vérifiée\#}$$

$$\begin{aligned} Mu &= F'_s (0.4x - d') + (d - 0.4x) \cdot F_f + F_f [h + (t/2) - 0.4x] \\ &= 135.60 [(0.4 \cdot 232.3) - 30] + 640 [1170 - (0.4 \cdot 232.3)] \\ &\quad + 126.974 [1200 + (0.129/2) - (0.4 \cdot 232.3)] \end{aligned}$$

$$Mu = 838430 \text{ KN} \cdot \text{mm} = 838.43 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

Tableau 4-1 : Section rectangulaire renforcé par sikawarp 230-c

Nombre de couch	tf (mm)	Af (mm ²)	Fc28 (Mpa)	f _f	Mu (Kn.m)	Taux %
sans plis	-	-	03	-	737707	0
7	37700	0877	03	0087	808730	35.81
0	37058	7773	03	0770	007777	13.05
0	37087	77677	03	0363	006703	50.58
3	37576	75378	03	0000	7350786	55.44
5	37635	70075	03	0363	7730703	88.45

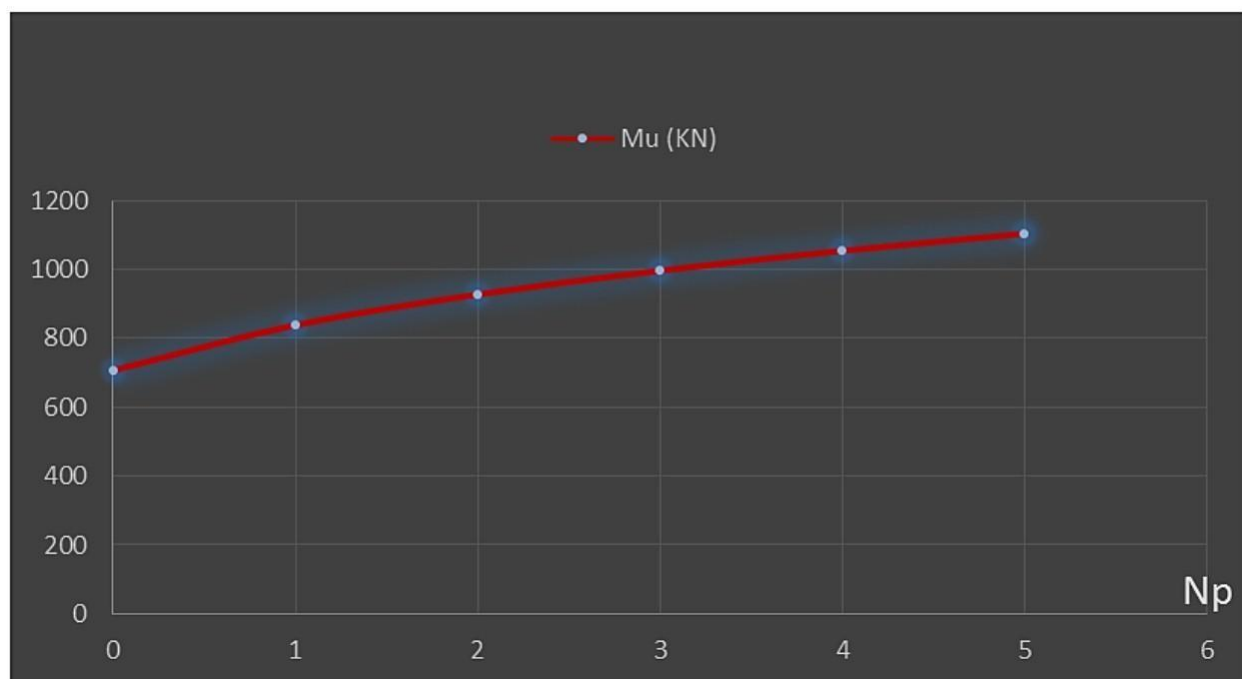


Figure 4-13 : Variation de MU en fonction de nombre des couches de PRFC
(Section rectangulaire renforcé par sikawarp 230-c)

À partir du tableau 4-1 et la Figure 4-13, on peut remarquer que la capacité flexionnelle de poutre (MU) augmente avec l'augmentation de nombre des couches de PRFC 230-c (np). Cette augmentation est importante pour les deux première couche par rapport les autres cas.

4.4.2. Section rectangulaire renforcé Par SikaWrap-600 C – Sikadur-300:



Figure 4 – 14: SikaWrap-600 C



Figure 4 – 15: Sikadur-300

SikaWrap-600 C – Sikadur-300	
Module d'élasticité E_f	235 000 MPa
Résistance moyenne en traction f_{fu}	2950 MPa
Allongement de calcul ε_{fud}	0,6 %
Résistance de calcul ELU f_{fud}	1370 MPa
Résistance de calcul ELS f_{fd}	960 MPa

CHAPITRE 04 : Etude de cas d'une poutre renforcé par les matériaux composites

$$E_f = 235000 \text{ Mpa} \quad \varepsilon_{fud} = 0.6\%$$

$$t = 0.331 \text{ mm} \quad X = 282.8$$

$$A_f = b \cdot t = 300 \cdot 0.331 = 99,3 \text{ mm}^2$$

$$A_{c(x)} = b \cdot x = 300 \cdot 282.8 = 84840$$

♦ Calcul des déformations :

$$\varepsilon'_s = \left(\frac{X - d'}{X} \right) \cdot \varepsilon_{cu} = \left(\frac{282,8 - 30}{282,8} \right) \cdot 0,0035 = 0,0031$$

$$\varepsilon_s = \frac{(d - x)}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{(1170 - 282,8)}{282,3} \cdot 0,0035 = 0,0110$$

$$\varepsilon_f = \left(\frac{h + t/2 - x}{x} \right) \varepsilon_{cu} = \left(\frac{1200 + (0,331/2) - 282,8}{282,8} \right) \cdot 0,0035 = 0,0114$$

♦ calcul des Contraintes :

$$\varepsilon'_s > 2\text{‰} \rightarrow f'_s = 400$$

$$\varepsilon_s > 2\text{‰} \rightarrow f_s = 400$$

$$\varepsilon_f > 0,6\% \rightarrow f_f = \varepsilon_f \cdot E_f = 0,0114 \cdot 235000 = 3281$$

$$f_c = K_1 \cdot f_{c28} = 0,567 \cdot 20 = 11,33$$

♦ calcul des forces :

$$F_c = f_c \cdot 0,8 \cdot (x) = 11,33 \cdot 0,8 \cdot 84840 = 769220 \text{ N} = 769,22 \text{ KN}$$

$$F'_s = f'_s \cdot A'_s = 400 \cdot 339 = 135600 \text{ N} = 135,60 \text{ KN}$$

$$F_s = f_s \cdot A_s = 400 \cdot 1600 = 640000 \text{ N} = 640 \text{ KN}$$

$$F_f = f_f \cdot A_f = 2668 \cdot 99,3 = 264940 \text{ N} = 264,940 \text{ KN}$$

♦ Vérification :

$$F_c + F'_s = F_s + F_f$$

$$769,22 + 135,60 = 640 + 264,94$$

$$904,82 \approx 904,94 \rightarrow \text{\#Equation vérifiée\#}$$

$$\begin{aligned} Mu &= F'_s (0,4x - d') + (d - 0,4x) + F_f [h + (t/2) - 0,4x] \\ &= 135,60 [(0,4 \cdot 282,8) - 30] + 640 [1170 - (0,4 \cdot 282,8)] \\ &\quad + 264,94 [1200 + (0,331/2) - (0,4 \cdot 282,8)] \end{aligned}$$

$$Mu = 975680 \text{ KN.mm} = 975,68 \text{ KN.m}$$

Tableau 4.2: Section rectangulaire renforcé par sikawarp 600-c

Number de couch	tf (mm)	Af (mm ²)	Fc28 (Mpa)	f _f	Mu (Kn.m)	Taux %
sans plis	-	-	03	-	737707	0
7	37007	0070	03	0668	075768	15.45
0	37660	70876	03	0303	7770700	85.88
0	37000	00770	03	7776	7000777	58.55
3	77003	00770	03	7563	7033707	55.50
5	77655	30675	03	7330	7077766	41.48

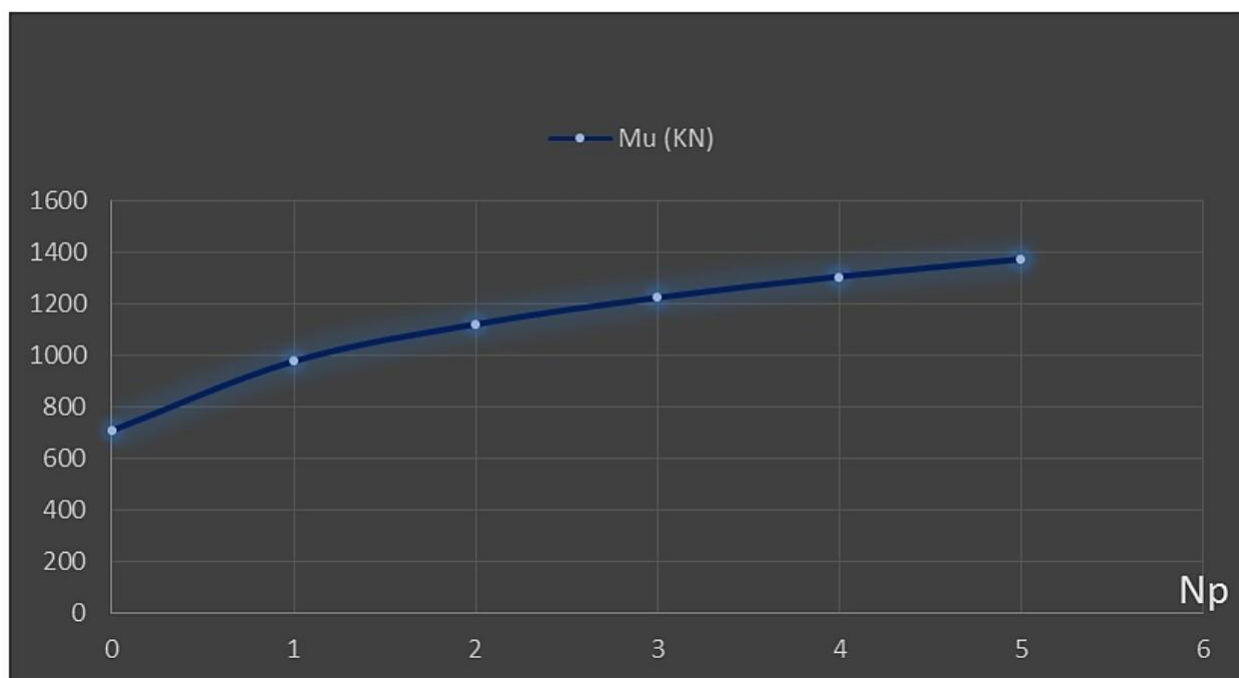


Figure 4-16: Variation de MU en fonction de nombre des couches de PRFC (section rectangulaire renforcé par sikawarp 600-c)

À partir du tableau 4-2 et la Figure 4-16, on peut remarquer que la capacité flexionnelle de poutre (MU) augmente avec l'augmentation de nombre des couches de PRFC 600-c (n_p). Cette augmentation est importante pour la première couche par rapport les autres cas.

4.5. COMPARAISON ENTRE LE RENFORCEMENT PAR LES MATERIAUX COMPOSITES ET LE CHEMISAGE PAR BETON ARME:

Afin de comparer entre le renforcement par les matériaux composites et le renforcement par chemisage on va calculer pour chaque nombre de couches composites la section de béton équivalente (avec chemisage par béton) qui donne la même capacité flexionnelle ultime (M_u).

Pour cela on propose d'augmenter la capacité flexionnelle de notre poutre (poutre rectangulaire (120*30)cm) étude en cours par les deux méthodes (renforcement par composite et par chemisage).

La procédure consiste à calculer d'abord la capacité flexionnelle ultime de la poutre renforcée par le matériau composite, puis on détermine la section de béton équivalente (la section après le chemisage par béton) qui donne la même capacité flexionnelle ultime.

La méthode de calcul est comme suit :

$$F_s = F_c$$

$$A_s \cdot f_s = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_b$$

D'où l'axe neutre est calculé est comme suit :

$$\rightarrow x = \frac{A_s \cdot f_s}{0,8 \cdot b \cdot f_b}$$

$$M_u = (d - 0,4x) \cdot F_s \cdot d - F_s \cdot 0,4x$$

Et la hauteur utile est donnée par la formule suivante :

$$d = \frac{M_u + F_s \cdot 0,4x}{F_s}$$

4.5.1. Poutre renforcé par SIKA WRAP 230 – C :

Les résultats de calcul d'une section chemisé par béton armé équivalente à la section renforcé par SIKA WRAP 230 – C est présentées dans le Tableau 4.3 :

Nombre de pils	0 pils	1 pils	2 pils	3 pils	4 pils	5 pils
Mu	555555	555525	525555	555555	550555	2213011
h(mm)th	5255	525555	555555	505555	505050	2213
h(mm)	5255	5555	5505	5005	5555	2261
Section (h.b) Cm²	5555	5555	5505	5505	5555	0561
Taux %	-	0.33	68.03	61.92	33.33	5713

Tableau 4.3: Section équivalente de chemisage par béton armé (section rectangulaire avec SIKA WRAP 230 – C)

4.5.2. Poutre renforcé par SIKa WRAP 600 – C :

Les résultats de calcul dans le cas d'une section renforcé par SIKa WRAP 230 – C est présentées dans le Tableau 4.4 :

Nombre de pils	0 pils	1 pils	2 pils	3 pils	4 pils	5 pils
Mu	555555	075768	7770700	7000777	7033707	7077766
h(mm)th	5255	5555555	5550555	5555555	5555555	1111052
h(mm)	5255	5055	5505	5505	5505	1161
Section (h.b) Cm ²	5555	5055	5505	0005	0505	2261
Taux %	-	66	37.6	61.92	26.6	78707

Tableau 4.4 : Section équivalente de chemisage par béton armé (section rectangulaire avec SIKa WRAP 600 – C)

Les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessus (4-3 à 4-4) indiquent pour obtenir la même capacité flexionnelle ultime d'une poutre renforcée par matériaux composites par la méthode de chemisage par béton armé il faut augmenter la section de la poutre d'une façon considérable. A titre d'exemple pour obtenir la capacité flexionnelle ultime de notre poutre carré (120*30) renforcé par 5 Plis de sika warp 600-c il faut augmenter la section de la poutre de 70.82 % c'est-à-dire la poutre 120cm x 30cm devient une poutre 205cm x30cm.

A noter que le renforcement de la poutre par l'augmentation de sa section de béton (chemisage), influe directement sur la masse de la structure ce qui nécessite généralement le redimensionnement des fondations. Par contre le renforcement par les matériaux composites permet de renforcé la structure avec un effet négligeable sur le poids de la structure renforcée.

4.6. CALCUL DE LA SECTION NECESSAIRE DE MATERIAUX COMPOSITES POUR LE RENFORCEMENT D'UNE POUTRE RENFORCE SOUMISE A LA FLEXION SIMPLE:

Cette partie est consacrée au calcul de la section nécessaire de matériaux composites pour le renforcement et la réparation d'une poutre en béton armé. Pour cela on suppose que notre structure nécessite un changement d'exploitation et une modification dans la structure comme le changement de l'étanchéité ordinaire par une étanchéité saharienne (plus lourd) et En plus, le béton de la structure a subit une dégradation.

Donc on suppose que notre poutre doit être supporte un nouveau moment estimer $N_{U\text{ app}} = 900 \text{ KN.m}$ La nouvelle résistance à la compression du béton (après la dégradation) sera prise $f_{c28} = 15 \text{ Mpa}$

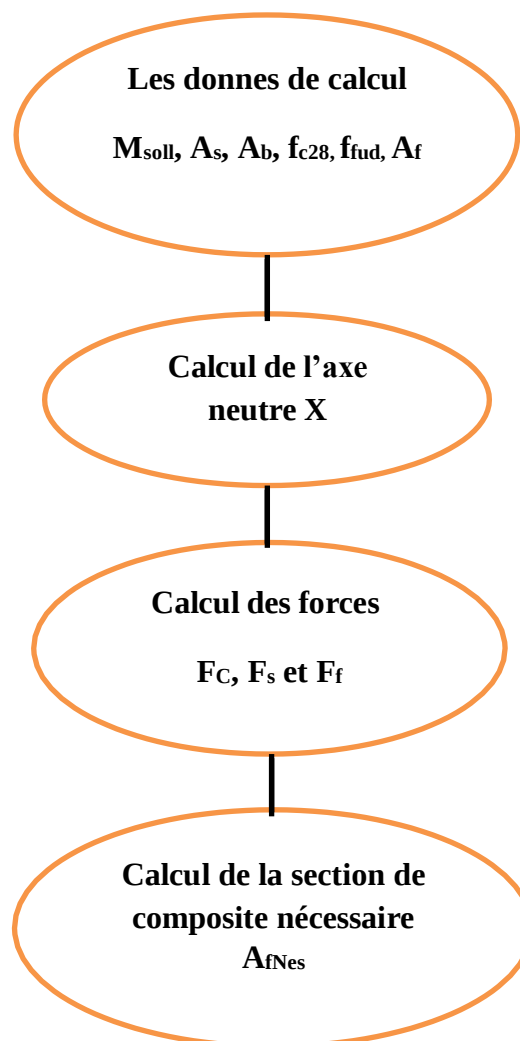


Figure 4-17: Organigramme de calcul de la section de composite nécessaire

CHAPITRE 04 : Etude de cas d'une poutre renforcé par les matériaux composites

La méthode de calcul de la section de composite nécessaire de renfort SikaWrap est comme suit :

$$f_{c28} = 15 \text{ Mpa} \quad A_s = 16 \text{ cm}^2 \quad A_b = 120.30 \quad f_{bu} = 0,567 \cdot f_{c28} = 5,67$$

$$M_u = 694,90 \text{ kn.m}$$

$$M_{soll} = 900 \text{ Kn.m}$$

♦ Le moment résistant du béton s'exprime par :

$$M_u = 0,8 \cdot b \cdot x \cdot f_{bu} \cdot (d - 0,4x)$$

Comme $M_U = M_{soll}$ on peut calculer x

$$M_{soll} = 0,8 \cdot b \cdot x \cdot f_{bu} \cdot d - 0,8 \cdot b \cdot x^2 \cdot f_{bu} \cdot 0,4$$

$$-M_{soll} = -(0,8 \cdot b \cdot f_{bu} \cdot d) + (0,32 \cdot b \cdot f_{bu})^2$$

$$(0,32 \cdot b \cdot f_{bu})^2 - (0,8 \cdot b \cdot f_{bu} \cdot d) + M_{soll} = 0$$

♦ Donc la position de l'axe neutre est donnée par la relation suivant:

$$x = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} = 2924,43$$

$$A = 0,32 \cdot b \cdot f_{bu} = 544$$

$$B = -0,8 \cdot b \cdot f_{bu} \cdot d = -1591200$$

$$C = M_{soll} = 900m = 900000$$

♦ calcul des forces :

$$F_c = 0,8 \cdot b \cdot x \cdot f_{bu} = 0,8 \cdot 300 \cdot 2924,43 \cdot 5,67 = 3977230 = 3977,23$$

$$F_s = A_s \cdot f_{su} = 1600 \cdot 400 = 640000 = 640$$

$$F_f = 0,8 \cdot b \cdot x \cdot f_{bu} - A_s \cdot f_{su} = 3337230 = 3337,23$$

4.6.1. Renforcement par SIKa WRAP 230 – c :

$$A_{fNes} = \frac{F_f}{f_{fud}} = \frac{3337,23}{1625} = 2,05368$$

$$N_p = \frac{A_{fNes}}{A_f} = \frac{2,053}{38,7} = 0,053$$

Donc le nombre de plis nécessaire pour renforcer la poutre est: $N_p = 1 \text{ pl}$

4.6.2. Renforcement par SIKa WRAP 600 – c :

$$A_f = \frac{F_f}{f_{fud}} = \frac{3337,23}{1370} = 2,436$$
$$N_p = \frac{A_{fNes}}{A_f} = \frac{2,436}{99,3} = 0,024$$

Donc le nombre de plis nécessaire pour renforcer la poutre est: $N_p = 1 \text{ pl}$

4.7. CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a dimensionné une poutre en béton armé, par la suite, on a fait une étude paramétrique pour comprendre l'effet du renforcement des poutres par les matériaux composite. Les résultats trouvées sont comparé avec celle qui trouvées par une autre méthode traditionnelle de renforcement, c'est la méthode de chemisage par béton armé.

Cette étude paramétrique a permis de mettre en évidence l'influence des plusieurs paramètres comme la section et le type de composite sur dans l'évolution de la capacité flexionnelle ultime des poutres en béton armé. Les conclusions déduites de cette étude sont :

Les résultats présentés confirment l'intérêt de renforcement des poutres par les matériaux composites non seulement en termes de légèreté, mais également en l'amélioration de la capacité flexionnelle ultime de la poutre, à titre d'exemple le renforcement d'une poutre 30x120cm par 5plis de SIKa WRAP 600-c permet d'augmenter sa capacité ultime M_u de l'ordre de 94%

Comparativement au renforcement de la poutre par l'augmentation de sa section de béton (chemisage), qui influe directement sur la masse de la structure ce qui nécessite généralement le redimensionnement des fondations, le renforcement par les matériaux composites permet d'obtenir les même résultats mais avec un effet négligeable sur le poids de la structure renforcée.

Conclusion générale:

Pour trouver des méthodes de renforcement efficaces dans les ouvrages de génie civil et pour obtenir le meilleur résultat efficace et les appliquer sur site, des études et des recherches doivent être menées pour découvrir de nouvelles techniques de renforcement.

Parmi ces techniques, on trouve le renforcement avec des matériaux composites qui sont très prometteuses. Plusieurs études ont démontré le potentiel de cette technique pour le renforcement des poutres en béton armé.

Notre étude se concentre sur l'évaluation du comportement des poutres en béton armé à section rectangulaire renforcées avec des composites en fibre de carbone.

L'étude bibliographique menée dans la première partie a permis de mettre en évidence les points suivants :

Nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation des ouvrages en béton armé ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser.

On a présenté une synthèse bibliographique sur les matériaux composites, notamment la définition des matériaux composites, leurs types, leurs différentes caractéristiques.

On a présenté les différentes techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton armé avec une comparaison entre elles afin de connaître les avantages et les inconvénients de chaque méthode.

L'étude paramétrique réalisée dans ce travail à l'aide de programmes Excel approfondis a permis de mettre en évidence l'influence de plusieurs paramètres tels que la section et le type de composite sur l'évolution de la capacité maximale de flexion des poutres en béton armé

Les conclusions tirées de cette étude sont :

Les résultats présentés confirment l'intérêt de renforcement des poutres par les matériaux composites non seulement en termes de légèreté, mais également en l'amélioration de la capacité flexionnelle ultime du poutre, à titre d'exemple le renforcement d'une poutre 30x120cm par 5plis de SIKARAP 600-c permet d'augmenter sa capacité ultime M_u de l'ordre de 94%

Comparativement au renforcement de la poutre par l'augmentation de sa section de béton (chemisage), qui influe directement sur la masse de la structure ce qui nécessite généralement le redimensionnement des fondations, le renforcement par les matériaux composites permet d'obtenir les mêmes résultats mais avec un effet négligeable sur le poids de la structure renforcée.

LISTE DES REFERENCES

- [1] Maizi Ibtissam ,Benjoudi Mouslam, mémoire de master II « réhabilitation de structures en béton armé » , université 08 Mai 1945 Guelma , Année 2013.
- [2] ITMAIZEH Ehab ; mémoire master académique, PATHOLOGIE DE STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ, Université de Larbi Tébessi, 2015 – 2016.
- [3] Documents scientifiques et techniques «Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion», Novembre 2003.
- [4] Taoufik BOURDI , Thèse de doctorat , MODÉLISATION FRÉQUENTIELLE DE LA PERMITTIVITÉ DU BÉTON POUR LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR GÉORADAR ; UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE , 2013.
- [5] Samia Hannachi, thèse de doctorat, EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON SUR SITE APPLICATION DE LA METHODE COMBINEE, UNIVERSITÉ MENTOURI CONSTANTINE 1, 2015.
- [6] J.M. Berthelot « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » Edition. Lavoisier, (2005), ISBN: 2-7430-0771-0. pp 72
- [7] U. Meier. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites, 1995, p 342.
- [8] K. Saidani « Analyse des composites sandwichs et qualification de leur intégrité vis-à-vis de la ruine » Thèse de Doctorat, L'université de Tizi Ouzou 2013
- [9] D. Broseta, G. H. Fredrickson, E. Helfand “Molecular weight and polydispersity effects at polymer-polymer interfaces”, Macromolecules 23, 132-139, 1990
- [10] H. Pernot, M. Baumert, F. Court “Design and properties of co-continuous nanostructured polymers by reactive blending” Nature Materials 1, 54-58, 2002.
- [11] Engineered concrete solutions. “ crack control ecs3 [en ligne]”. new zealand: ecs, august 1999. http://www2.holcim.com/upload/nz/publications/ecs_crack_control.pdf
- [12] Todor ZHELYAZOV « Renforcement Des Structures En Béton Armé Par Collage De Matériaux Composites » Thèse de Doctorat de l'Université de Reims 2008.
- [13] R. BENZAID H.A. MESBAH N. CHIKH « Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton » hal-00782103, version 1 - 30 Jan 2013 978-613-1-55146-8
- [14] Spoelstra. M and Monti. G “FRP-Confined concrete model”, Journal of composite construction, ASCE, 3(3): 143-150,(1999)
- [15] CGS1 92 Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique
Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages",

- [16] CGS2 92 Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique
Catalogue des Méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages", Deuxième semestre 1992
- [17] Guide technique du STRRES FABEM 8
- [18] A.PLUMIER,pathologie et réparations structurelles des constructions, ArGenCo, édition 2006.
- [19] Méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages", Deuxième semestre 1992.
- [20] Meier U; strengthening of structures using carbone-fiber- epoxy Composites;
Construction and Building Materials; 1995;
- [21] CALGARO (J.-A.), LACROIX (R.) et al. – Maintenance et réparation des ponts.
Presses de l'École des ponts et chaussées (1997).
- [22] Garden et al. (1997)
- [23] Saadatmanesh et al. (1991) et Meier et al. (1992)
- [24] Règlement eurocode2. calcul des structures en béton AFNOR1992
- [25] Document scientifique et techniques AFGC ,réparation et renforcement des
structure en béton au moyen de matériaux composites, année 2003.
- [26] Document scientifique et techniques AFGC ,réparation et renforcement des
structure en béton au moyen de matériaux composites, année 2007
- [27] SAMAI M. L. Notes des cours de post- graduation. Université de Constantine.
Algérie (2007).

ANNEXE

Programme créé avec EXCEL pour le calcul de la capacité flexionnelle d'une section rectangulaire non renforcée (Mu)

Données					
Dimensions caractéristiques	Hauteur de la poutre (mm)	h =	1200		
	Largeur de la poutre (mm)	b =	300		
	Hauteur utile de la poutre (mm)	d =	1170		
	Distance entre A' et la fibre la plus comprimée (mm)	d' =	30		
	section d'armature comprimée As' (mm ²)	As' =	339		
	section d'armature tendu As (mm ²)	As =	1600		
section de béton comprimée Ac	en (mm ²)	Ac =	55650		
Contrainte de l'acier utilisé	en Mpa	fe =	400		
Contrainte du béton à 28 jours	en Mpa	Fc28 =	20		
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	Es =	200000		
l'axe neutre	en (mm)	x	185,5		
calcul des déformations					
déformation de béton comprimée	$\epsilon_{cu}=0.35\%$	$\epsilon_{cu}=$	0,0035	ϵ_{cu}	ϵ_{cu}
déformation de l'acier comprimées	$\epsilon'_s=(x-d'/x).\epsilon_{cu}$	$\epsilon_s'=$	0,0029	0,0020	ϵ'_{su}
déformation de l'acier tendues	$\epsilon_s=(d-x/x).\epsilon_{cu}$	$\epsilon_s=$	0,0186	0,0020	ϵ_{su}
calcul des Contraintes					
Contrainte de compression de béton	$f_c=0,567*f_{c28}$	$f_c=$	11,33		
Contrainte des aciers comprimées	$f'_s=\epsilon'_s Es$	$f_s'=$	400		
Contrainte de traction des aciers tendues	$f_s=\epsilon_s Es$	$f_s=$	400		
calcul des forces					
force de compression de béton (KN)	$F_c=f_c*0,8*x*b$	$F_c=$	504,56		
force des aciers comprimées (KN)	$F'_s=f'_s As$	$F'_s=$	135,60		
force de traction des aciers tendues (KN)	$F_s=f_s As$	$F_s=$	640,00		
Vérification					
Vérification	force de compression	$F_{bc}+F'_s=$	640,16		
	force de traction	$F_s=$	640,00		
	comparaison	OK	0		
capacité flexionnelle d'une section rectangulaire non renforcée (KN*m)	$M_u=F'_s(0.4x-d')+F_s(d-0.4x)$	$M_u=$	707,31		

Programme créé avec EXCEL pour le calcul de la capacité flexionnelle d'une section rectangulaire renforcée (Mu)

Données			
Dimensions caractéristiques	Hauteur de la poutre (mm)	$h =$	1200
	Largeur de la poutre (mm)	$b =$	300
	Hauteur utile de la poutre (mm)	$d =$	1170
	Distance entre A' et la fibre la plus comprimée (mm)	$d' =$	30
	section d'armature comprimée As' (mm ²)	$As' =$	339
	section d'armature tendu As (mm ²)	$As =$	1600
	l'épaisseur du renfort t (mm)	$t =$	0,331
	section de composite Af (mm ²)	$Af =$	99,3
section de béton comprimée Ac	en mm ²	$Ac =$	84840
Contrainte de l'acier utilisé	en Mpa	$f_{su} =$	400
Contrainte du béton à 28 jours	en Mpa	$f_{c28} =$	20
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	$E_s =$	200000
module de young du composite utilisé	en Mpa	$E_f =$	235000
l'axe neutre	en mm	$x =$	282,8
calcul des déformation			
déformation de béton	$\epsilon_{cu} = 0.35\%$	$\epsilon_{cu} =$	0,0035
déformation de l'acier comprimées	$\epsilon'_s = (x - d')/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon'_s =$	0,0031 0,0020
déformation de l'acier tendues	$\epsilon_s = (d - x)/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_s =$	0,0110 0,0020
déformation du composite	$\epsilon_s = (h + (t/2) - x)/x \cdot \epsilon_{cu}$	$\epsilon_f =$	0,0114 0,0115
calcul des Contraintes			
Contrainte de compression de béton	$f_c = 0,567 \cdot f_{c28}$	$f_c =$	11,33
Contrainte des aciers comprimées	$f'_s = \epsilon'_s E_s$	$f'_s =$	400
Contrainte de traction des aciers tendues	$f_s = \epsilon_s E_s$	$f_s =$	400
Contrainte de traction du composite	$f_f = \epsilon_f E_f$	$f_f =$	2668
calcul des forces			
force de compression de béton (KN)	$F_c = f_c \cdot 0,8 \cdot x \cdot b$	$F_c =$	769,22
force des aciers comprimées (KN)	$F'_s = f'_s \cdot As$	$F'_s =$	135,60
force de traction des aciers tendues (KN)	$F_s = f_s \cdot As$	$F_s =$	640,00
force de traction de composite (KN)	$F_f = f_f \cdot Af$	$F_f =$	264,94
Vérification			
Vérification	force de compression	$F_{bc} + F'_s =$	904,82
	force de traction	$F_s =$	904,94
	comparaison	OK	0
capacité flexionnelle d'une section rectangulaire renforcée (KN*m)	$M_u = F'_s (0.4x - d') + F_s (d - 0.4x) + F_f (h + (t/2) - 0.4x)$	$M_u =$	975,68

Programme créé avec EXCEL pour le calcul de la section de béton armé renforcée par chemisage en béton équivalente à une section renforcée par les matériaux composites

Données					
	Largeur de la poutre (mm)	b =	300		
	Distance entre A' et la fibre la plus comprimée (mm)	d' =	30		
	section d'armature comprimée As' (mm ²)	As' =	0		
	section d'armature tendu As (mm ²)	As =	2091		
section de béton comprimée Ac	en (mm ²)	Ac =	80217,39		
Contrainte de l'acier utilisé	en Mpa	fe =	400		
Contrainte du béton à 28 jours	en Mpa	Fc28 =	20		
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	Es =	200000		
Moment ultime	en N.m	Mu =	838,23		
force de traction des aciers tendues	$F_s = f_s A_s$	Fs=	727304,3478		
l'axe neutre	en (mm)	x	267,39		
calcul des déformations					
déformation de béton	$\epsilon_{cu}=0.35\%$	$\epsilon_{cu}=$	0,0035		
déformation de l'acier comprimées	$\epsilon'_s=(x-d'/x).\epsilon_{cu}$	$\epsilon'_s=$	0,0031	0,0020	ϵ'_{su}
déformation de l'acier tendues	$\epsilon_s=(d-x/x).\epsilon_{cu}$	$\epsilon_s=$	#REF!	0,0020	ϵ_{su}
calcul des Contraintes					
Contrainte de compression de béton	$f_c= 0,567*f_{c28}$	$f_c=$	11,33		
Contrainte des aciers comprimées	$f'_s= \epsilon'_s E_s$	$f'_s=$	621		
Contrainte de traction des aciers tendues	$f_s= \epsilon_s E_s$	$f_s=$	348		
calcul des forces					
force de compression de béton	$F_c=f_c*0,8*x*b$	$F_c=$	727,30		
force des aciers comprimées	$F'_s= f'_s A_s$	$F'_s=$	0,00		
force de traction des aciers tendues	$F_s= f_s A_s$	$F_s=$	727,30		
Résultats					
Hauteur utile de la poutre (mm)	$d=(Mu+F_s*0.4*x)/F_s$	d=	1259,47		
	Hauteur de la poutre (mm)	h =	1289,47		

Programme créé avec EXCEL pour le calcul de la section nécessaire de matériaux composites pour le renforcement d'une poutre soumise à la flexion simple

Données						
	Largeur de la poutre (mm)	b =	300			
	Hauteur utile de la poutre (mm)	d =	1170			
	Distance entre A' et la fibre la plus comprimée (mm)	d' =	30			
	section d'armature comprimée As' (mm2)	As' =	0			
	section d'armature tendu As (mm2)	As =	1600			
section de béton comprimée Ac	en (mm2)	Ac =	141176,47			
Contrainte de l'acier utilisé	en Mpa	fe =	348			
Contrainte du béton à 28 jours	en Mpa	Fc28 =	10			
module de young de l'acier utilisé	en Mpa	Es =	200000			
Moment ultime	en N.m	Msoll =	900 000,00			
Contrainte du composite utilisé	en Mpa	fdu =	1625			
section du composite utilisé		Af=	38,7			
force de traction des aciers tendues	Fs= fs As	Fs=	640000			
l'axe neutre	en (mm)	x	470,59			
calcul des déformations						
déformation de béton	εcu=0.35%	εcu=	0,0035			
déformation de l'acier comprimées	ε's=(x-d'/x).εcu	εs'=	0,0033	0,0020	ε'su	
déformation de l'acier tendues	εs=(d-x/x).εcu	εs=	0,0052	0,0020	εsu	
calcul des Contraintes						
Contrainte de compression de béton	(fbu)fc= 0,567*fc28	fc=	5,67			
Contrainte des aciers comprimées	f's= ε's Es	fs'=	655			
Contrainte de traction des aciers tendues	fs= εs Es	fs=	400			
calcul des forces						
force de compression de béton	Fc=fc*0,8*x*b	Fc=	640,00			
force des aciers comprimées	F's= f's As	F's=	0,00			
force de traction des aciers tendues	Fs= fs As	Fs=	640,00			
	a		544,00			
	b		1591200,00			
	delta		2529959040000,00			
	delta*-0.5		1590584,50			
	x1		2 924,43			
	x2		0,56572			
l'axe neutre	en (mm)	x	2 924,43			
force de compression de béton	Fc=fc*0,8*x*b	Fc=	3977,23			
force de traction de composite	Ff= fi Af	Ff=	3337,23			
	section de composite Af	Af=	2,054			
Nombre de plis	N	N=	0,053066677			

PRODUCT DATA SHEET

Sikadur®-330

2-COMPONENT EPOXY IMPREGNATION RESIN

DESCRIPTION

Sikadur®-330 is a 2-component, thixotropic epoxy based impregnating resin and adhesive.

USES

Sikadur®-330 may only be used by experienced professionals.

Sikadur®-330 is used as:

- Impregnation resin for SikaWrap® fabric reinforcement for the dry application method
- Primer resin for the wet application system
- Structural adhesive for bonding Sika® CarboDur® plates to even surfaces
- Structural Resin for Bonding Near Surface Mounted CFRP

CHARACTERISTICS / ADVANTAGES

- Easy mix and application by trowel and impregnation roller
- Manufactured for manual saturation methods
- Excellent application behaviour to vertical and overhead surfaces
- Good adhesion to many substrates
- High mechanical properties
- No separate primer required

ENVIRONMENTAL INFORMATION

- Conformity with LEED v4 MRc 4 (Option 2): Building Product Disclosure and Optimization - Material Ingredients
- Conformity with LEED v2009 IEQc 4.1: Low-Emitting Materials - Adhesives and Sealants

APPROVALS / STANDARDS

- Complies to Specification of Bonding CFS, DPWH Item 416
- Complies to ASTM C881, Type I, Type IV, Grade 3
- Avis Technique N° 3/16-875 (annule et remplace N° 3/10-669) Sika® CarboDur®, SikaWrap®
- Adhesive for structural bonding tested according to EN 1504-4, provided with the CE-mark

PRODUCT INFORMATION

Chemical Base	Epoxy resin	
Packaging	5 kg (A+B)	Pre-batched unit
Colour	Component A: white paste Component B: grey paste Components A + B mixed: light grey paste	
Shelf Life	24 months from date of production	

Storage Conditions	Store in original, unopened, sealed and undamaged packaging in dry conditions at temperatures between +5 °C and +30 °C. Protect from direct sunlight.	
Density	1.30 ± 0.1 kg/l (component A+B mixed) (at +23 °C)	
Viscosity	Shear rate: 50 /s	
	Temperature	Viscosity
	+10 °C	~10 000 mPas
	+23 °C	~6 000 mPas
	+35 °C	~5 000 mPas

TECHNICAL INFORMATION

Modulus of Elasticity in Flexure	~ 3 800 N/mm² (7 days at +23 °C)		(DIN EN 1465)
Tensile Strength	~ 30 N/mm² (7 days at +23°C)		(ISO 527)
Modulus of Elasticity in Tension	~ 4 500 N/mm² (7 days at +23 °C)		(ISO 527)
Elongation at Break	0.9 % (7 days at +23 °C)		(ISO 527)
Tensile Adhesion Strength	Concrete fracture (> 4 N/mm²) on sandblasted substrate		(EN ISO 4624)
Coefficient of Thermal Expansion	4.5 × 10 ⁻⁵ Per °C (Temperature range -10 °C – +40 °C)		(EN 1770)
Glass Transition Temperature	Curing time	Curing temperat- TG	(EN 12614)
		ure	
	30 days	+30 °C +58 °C	
Heat Deflection Temperature	Curing time	Curing temperat- HDT	(ASTM D 648)
		ure	
	7 days	+10 °C +36 °C	
	7 days	+23 °C +47 °C	
	7 days	+35 °C +53 °C	
	Resistant to continuous exposure up to +45 °C.		
Service Temperature	-40 °C to +45 °C		

SYSTEM INFORMATION

System Structure	Substrate primer - Sikadur®-330. Impregnating / laminating resin - Sikadur®-330. Structural strengthening fabric - SikaWrap® type to suit requirements.
-------------------------	---

APPLICATION INFORMATION

Mixing Ratio	Component A : component B = 4 : 1 by weight When using bulk material the exact mixing ratio must be safeguarded by accurately weighing and dosing each component.
Consumption	See the "Method Statement for SikaWrap® manual dry application" Ref 850 41 02.
Ambient Air Temperature	+10 °C min. / +35 °C max.
Dew Point	Beware of condensation. Substrate temperature during application must be at least 3 °C above dew point.
Substrate Temperature	+10 °C min. / +35 °C max.
Substrate Moisture Content	< 4 % pbw

Temperature	Pot life	Open time
+10 °C	~90 minutes (5 kg)	~90 minutes
+23 °C	~60 minutes (5 kg)	~60 minutes
+35 °C	~30 minutes (5 kg)	~30 minutes

The pot life begins when the resin and hardener are mixed. It is shorter at high temperatures and longer at low temperatures. The greater the quantity mixed, the shorter the pot life. To obtain longer workability at high temperatures, the mixed adhesive may be divided into portions. Another method is to chill components A+B before mixing them (not below +5 °C).

APPLICATION INSTRUCTIONS

SUBSTRATE QUALITY

Substrate must be sound and of sufficient tensile strength to provide a minimum pull off strength of 1.0 N/mm² or as per the requirements of the design specification.

See also the "Method Statement for SikaWrap® manual dry application" Ref 850 41 02.

SUBSTRATE PREPARATION

See the "Method Statement for SikaWrap® manual dry application" Ref 850 41 02.

MIXING

Pre-batched units:

Mix components A+B together for at least 3 minutes with a mixing spindle attached to a slow speed electric drill (max. 300 rpm) until the material becomes smooth in consistency and a uniform grey colour. Avoid aeration while mixing. Then, pour the whole mix into a clean container and stir again for approx. 1 more minute at low speed to keep air entrapment at a minimum. Mix only that quantity which can be used within its pot life.

APPLICATION METHOD / TOOLS

See the "Method Statement for SikaWrap® manual dry application" Ref 850 41 02.

CLEANING OF TOOLS

Clean all equipment immediately with Sika® Colma Cleaner or equivalent. Cured material can only be removed mechanically.

LIMITATIONS

Sikadur®-330 may only be used experienced professionals. Sikadur®-330 must be protected from rain for at least 24 hours after application.

Ensure placement of fabric and laminating with roller takes place within open time.

At low temperatures and / or high relative humidity, a tacky residue (blush) may form on the surface of the cured Sikadur®-330 epoxy. If an additional layer of fabric or a coating is to be applied onto the cured epoxy, this residue must first be removed with warm, soapy water to ensure adequate bond. In any case, the surface must be wiped dry prior to application of the next layer or coating.

For application in cold or hot conditions, pre-condition material for 24 hours in temperature controlled storage facilities to improve mixing, application and pot life limits.

For further information on over coating, number of layers or creep, please consult a structural engineer for calculations and see also the "Method Statement for SikaWrap® manual dry application" Ref 850 41 02. Sikadur® resins are formulated to have low creep under permanent loading. However due to the creep behaviour of all polymer materials under load, the long term structural design load must account for creep. Generally the long term structural design load must be lower than 20-25% of the failure load. Please consult a structural engineer for load calculations for the specific application.

BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

LOCAL RESTRICTIONS

Please note that as a result of specific local regulations the performance of this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact description of the application fields.

ECOLOGY, HEALTH AND SAFETY

For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Safety Data Sheet (SDS) containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

LEGAL NOTES

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

Sika Philippines Inc.
888 Marcos Alvarez Ave.,
Talon V, Las Piñas City, Philippines 1747
Tel. No.: +63 2 8806-2875
Fax. No.: +63 2 8806-2883
Website: phl.sika.com

Sikadur-330-en-PH-(06-2019)-3-1.pdf

Product Data Sheet
Sikadur®-330
June 2019, Version 03.01
020206040010000004

BUILDING TRUST



PRODUCT DATA SHEET

SikaWrap®-230 C

WOVEN UNIDIRECTIONAL CARBON FIBER FABRIC, DESIGNED FOR STRUCTURAL STRENGTHENING APPLICATIONS AS PART OF THE SIKA® STRENGTHENING SYSTEM.

DESCRIPTION

SikaWrap®-230 C is a unidirectional woven carbon fiber fabric with mid-range strength, designed for installation using the dry or wet application process.

USES

SikaWrap®-230 C may only be used by experienced professionals.

Structural strengthening of reinforced concrete, masonry, brickwork and timber elements or structures, to increase flexural and shear loading capacity for:

- Improved seismic performance of masonry walls
- Replacing missing steel reinforcement
- Increasing the strength and ductility of columns
- Increasing the loading capacity of structural elements
- Enabling changes in use / alterations and refurbishment
- Correcting structural design and / or construction defects
- Increasing resistance to seismic movement
- Improving service life and durability
- Structural upgrading to comply with current standards

CHARACTERISTICS / ADVANTAGES

- Manufactured with heat-set weft fibers to keep the fabric stable
- Multifunctional fabric for use in many different strengthening applications
- Flexible and accommodating to different surface planes and geometry (beams, columns, chimneys, piles, walls, soffits, silos etc.)
- Available in different widths for optimum utilisation
- Low density for minimum additional weight
- Extremely cost effective in comparison to traditional strengthening techniques

APPROVALS / STANDARDS

- Complies to DPWH Standard Specification for Item 416 - Carbon Fiber Sheet
- Poland: Technical Approval ITB AT-15-5604/2011: Zestaw wyrobów Sika CarboDur do wzmacniania i napraw konstrukcji betonowych
- Poland: Technical Approval IBDiM Nr AT/2008-03-0336/1 „Płaskowniki, pręty, kształtki i maty kompozytowe do wzmacniania betonu o nazwie handlowej: Zestaw materiałów Sika CarboDur® do wzmacniania konstrukcji obiektów mostowych
- France: Avis Technique N° 3/16-875 (annule et remplace N° 3/10-669) Sika® CarboDur®, SikaWrap®

PRODUCT INFORMATION

Construction	Fibre orientation	0° (longitudinal, unidirectional)	
	Warp	Black carbon fibers 99 %	
	Weft	White thermoplastic heat-set fibres	
		1 %	
Fibre Type	Selected mid-range strength carbon fibers		
Packaging		Fabric length per roll	Fabric width
	1 rolls in a cardboard box	100 m	500 mm

Shelf Life	Unlimited Shelf life if stored properly	
Storage Conditions	Store in undamaged, original sealed packaging, in dry conditions at temperatures between +5 °C and +35 °C. Protect from direct sunlight.	
Dry Fibre Density	1.82 g/cm ³	
Dry Fibre Thickness	0.129 mm (based on fiber content)	
Area Density	235 g/m ² ±10 g/m ² (carbon fibers only)	
Dry Fibre Tensile Strength	4 000 N/mm ²	(ISO 10618)
Dry Fibre Modulus of Elasticity in Tension	230 000 N/mm ²	(ISO 10618)
Dry Fibre Elongation at Break	1.7 %	(ISO 10618)

TECHNICAL INFORMATION

Laminate Nominal Thickness	0.129 mm	
Laminate Nominal Cross Section	129 mm ² per m width	
Laminate Tensile Strength	Average	Characteristic
	3 500 N/mm ²	3 200 N/mm ² (ASTM D 3039*)
Laminate Modulus of Elasticity in Tension	Average	Characteristic
	220 kN/mm ²	210 kN/mm ² (ASTM D 3039*)
* modification: sample with 50 mm Values in the longitudinal direction of the fibres Single layer, minimum 27 samples per test series		
Laminate Elongation at Break in Tension	1.59 %	(based on ASTM D 3039)
Tensile Resistance	Average	Characteristic
	452 kN/m	413 kN/m (based on ASTM D 3039)
Tensile Stiffness	Average	Characteristic
	28.4 MN/m	27.1 MN/m (based on ASTM D 3039)
	28.4 kN/m per ‰ elongation	27.1 kN/m per ‰ elongation

SYSTEM INFORMATION

System Structure

The system build-up and configuration as described must be fully complied with and may not be changed.

Concrete substrate adhesive primer Sikadur®-330

Impregnating / laminating resin Sikadur®-330 or Sikadur®-300

Structural strengthening fabric SikaWrap®-230 C

For detailed information on Sikadur®-330, together with the resin and fabric application details, please refer to the Sikadur®-330 Product Data Sheet and the relevant Method Statement.

APPLICATION INFORMATION

Consumption

Dry application with Sikadur®-330

First layer including priming layer	0.7–1.2 kg/m ²
Following layers	0.5 kg/m ²

Wet application with Sikadur®-300, primer Sikadur®-330

Primer layer	1.0–1.3 kg/m ²
Fabric layers	0.6 kg/m ²

Please also refer to the relevant Method Statement for further information.

APPLICATION INSTRUCTIONS

SUBSTRATE QUALITY

Minimum substrate pull-off strength: 1.0 N/mm² or as specified in the strengthening design.

Please also refer to the relevant Method Statement for further information.

SUBSTRATE PREPARATION

Concrete must be cleaned and prepared to achieve a laitance and contaminant free, open textured surface. Please also refer to the relevant Method Statement for further information.

APPLICATION METHOD / TOOLS

The fabric can be cut with special scissors or a Stanley knife (razor knife / box-cutter knife). Never fold the fabric.

SikaWrap®-230 C is applied using the dry or wet application process.

Please refer to the relevant Method Statement for details on the impregnating / laminating procedure.

FURTHER DOCUMENTS

Method Statements

Ref. 850 41 02: SikaWrap® manual dry application

Ref. 850 41 03: SikaWrap® manual wet application

Ref. 850 41 04: SikaWrap® machine wet application

LIMITATIONS

- SikaWrap®-230 C shall only be applied by trained and experienced professionals.
- A specialist structural engineer must be consulted for any structural strengthening design calculation.
- SikaWrap®-230 C fabric is coated to ensure maximum bond and durability with the Sikadur® adhesives / impregnating / laminating resins. To maintain and ensure full system compatibility, do not exchange system components.
- SikaWrap®-230 C can be over coated with a cementitious overlay or other coatings for aesthetic and / or protective purposes. The over coating system selection is dependent on the exposure and the project specific requirements. For additional UV light protection in exposed areas use Sikagard®-550 W Elastic, Sikagard® ElastoColor-675 W or Sikagard®-680 S.
- Please refer to the relevant Method Statement of

SikaWrap® for further information, guidelines and limitations.

BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

LOCAL RESTRICTIONS

Please note that as a result of specific local regulations the performance of this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact description of the application fields.

ECOLOGY, HEALTH AND SAFETY

For information and advice on the safe handling, storage, and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Safety Data Sheet (SDS) containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data

LEGAL NOTES

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

Sika Philippines Inc.
888 Marcos Alvarez Ave.,
Talon V, Las Piñas City, Philippines
1747 Tel. No.: +63 2 8806-2875
Fax. No.: +63 2 8806-2883
Website: phl.sika.com

