

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Cité Chott, El Oued, B.P.789, El Oued



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MASTER EN GENIE CIVIL**

Option : Matériaux de Construction

Thème

**ETUDE DU RENFORCEMENT DES
STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ PAR
LES MATÉRIAUX COMPOSITES**

Rédigé par :

Chellig Salem

Guechout Abdelkamel

Soutenu le : Samedi 15 juin 2019

Devant le jury composé de :

Président de jury : Houidi Karima

Directeur de Mémoire : Farik Ali

Examineur : Chaïbi Abdelhamid

Promotion:juin 2019

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- ✓ A mes très chers parent qui m'ont guidé durant long
de mes études.
- ✓ A tout la famille Chellig
- ✓ A mes camarades de la promotion.
- ✓ A tous mes amis.

Salem

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- ✓ A mes chères parents pour toute l'aide et le soutien qu'il m'ont offert tout au long de mes études.
- ✓ A tout mes frères et mes sœurs
- ✓ A tout mes petit famille
- ✓ A toute ma famille sans exception.
- ✓ A mes camarades de la promotion
- ✓ A tous mes amis.

Abdelkamel

Remerciements

Nos premiers remerciements pour le dieu, le tout puissant, qui nous a donné la force et la sagesse d'arriver à ce stade dans nos études .

Nous tenons à remercier nos promoteurs Mr : [Farik Ali](#) pour leur orientations et leur conseils durant l'évolution de ce travail.

Nous remercions tout nos enseignants durant toute notre étude.

Comme nous tenons à remercier tout ceux qui de loin ou près ont contribué à finaliser ce modeste travail.

Merci pour tous

Chellig - Guechout

ملخص :

تتميز تقنيات إصلاح وترابط مركبات ألياف الكربون ببساطتها في التنفيذ والكفاءة ، والمواد المستخدمة في قوتها الشد العالية ومقاومتها الجيدة للتآكل. تطبيق هذه المواد لتعزيز الهياكل والمباني حديث للغاية.

الهدف من هذه الدراسة هو كيفية تدعيم رافدة متهالكة (ليس كلياً) ، أو أنها تخضع لأحمال تفوق كفاءتها عن طريق المواد المركبة .

في الخطوة الأولى ، نكشف أسباب تدهور الخرسانة وطرق الإصلاح ، وثانياً نكشف عن صيغ حساب التسليح لرافدة مدعمة بالمواد المركبة ، وأخيراً ، نقدم مثلاً على "دراسة حالة" مع التطبيق الرقمي

الكلمات المفتاحية : رافدة , تدعيم , انحناء , قوى القص , مواد مركبة

RESUME :

Les techniques de réparation et renforcement par collage de composites de fibres de carbone se caractérisent par leur simplicité de mise en oeuvre et leur efficacité, et les matériaux utilisés par leur résistance à la traction élevée et leur bonne résistance à la corrosion. L'application de ces matériaux pour le renforcement des ouvrages d'art et bâtiments est très récente.

L'objectif de cette étude est comment renforcer d'une poutre dégradé (pas totalement), ou elle soumise un charge plus de leur performance, avec matériaux composite.

Dans la première étape nous expose les causes de dégradation de béton et les méthodes de la réparation, et en second lieu nous expose les formules de calcul pour Dimensionnement d'une section de poutre renforcée par matériau composite, Enfin, nous fournissons un exemple d'une "étude de cas" avec l'application numérique

Mots clés:

Poutres, renforcement, flexion , effort tranchant, matériaux composites.

ABSTRACT :

The techniques for repairing and bonding carbon fiber composites are characterized by their simplicity of implementation and efficiency, and the materials used for their high tensile strength and good corrosion resistance. The application of these materials for the reinforcement of structures and buildings is very recent.

The objective of this study is how to reinforce a degraded beam (not totally), or it submits a load more than their performance, with composite materials.

In the first step we expose the causes of concrete degradation and methods of repair, and secondly we expose the calculation formulas for Dimensioning a beam section reinforced by composite material, Finally, we provide an example of a "case study" with the digital application

Key words :

Beams, reinforcement , bending, shear stresses, composites materials.

SOMMAIRE

Dédicace-----	I
Dédicace-----	II
Remerciements-----	III
ملخص / RESUME / ABSTRACT-----	VI
SOMMAIRE-----	1
LISTE DES FIGURES-----	4
LISTE DES TABLEAUX-----	6
Liste des symbols-----	7
Introduction général -----	8
Chapitre 01 : Dégradation et Méthodes d'Evaluation et Diagnostic des Structures en Béton Armé -----	9
Titres de Chapitre 01 -----	10
1- Introduction -----	11
2- Origines et causes de dégradation du béton-----	11
2-1- Les facteurs climatiques et environnementaux-----	11
2-2- Les facteurs reliés à la conception de l'ouvrage-----	14
2-3- Les facteurs reliés à la mise en œuvre de l'ouvrage-----	14
2-4- Les facteurs reliés à l'entretien de la structure-----	15
2-5- Modification des Conditions d'Exploitation ou d'Utilisation des Ouvrages -----	15
3- Evaluation et Diagnostic des Structure en Béton-----	15
3-1- Compagne d'évaluation -----	16
3-1-1- Dossier de documentation sur l'ouvrage -----	16
3-1-2- Analyse des condition de service-----	17
3-1-3- Visite du site-----	17
3-1-4- Évaluation détaillée-----	18
3-1-5- Évaluation des données recueillies-----	18
3-2- Méthodes d'évaluation-----	18
3-2-1- Échantillonnage du béton-----	19
3-2-2- Évaluations en laboratoire-----	20
3-2-3- Analyse pétrographique et chimique-----	20
3-2-4- Caractéristiques des vides d'air-----	21
3-2-5- Résistance à la compression-----	21
3-2-6- Teneur en ions chlore-----	21
Chapitre 02 : Méthodes De Réparation Et De Renforcement les Structure en Béton Armé -----	23
Titres de Chapitre 02 -----	24
1- Généralité-----	25
2- Méthodes de Réparation Et De Renforcement-----	25
2-1- Traitement de Surface-----	25
2-1-1- Ragréages-----	25
2-1-2- Injection des fissures-----	26
2-2- Protection du Béton et des Armatures-----	27
2-2-1- Techniques de protection du béton-----	27
2-2-2- Protection des armatures-----	28

2-3- TECHNIQUES DE RENFORCEMENT-----	28
2-3-1- Définitions-----	28
2-3-2- Techniques de Renforcement Classiques des Eléments Structuraux-----	29
2-3-2-1- Béton projeté-----	29
2-3-2-2- Gainage (Chemisage) -----	29
2-3-2-3- Tôles d'acier collées-----	30
3- Conclusion -----	31
Chapitre 03 : Renforcement Par Matériaux Composites -----	32
Titres de Chapitre 03 -----	33
1- Généralité-----	34
2- DEFINITION-----	34
3- CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES-----	35
3-1- Les Renforts-----	35
3-1-1- Différents types de renfort-----	35
3-1-2- Différentes natures de renfort-----	36
3-1-3- Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base	37
3-2- La matrice-----	37
3-1-1- Différentes natures de la matrice-----	37
3-1-3- Principales caractéristiques mécaniques des résines-----	38
3-3- Les charges-----	38
3-3-1- Les Additifs-----	39
4- ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES-----	39
4-1- Monocouche-----	39
4-2- Stratifiés-----	39
4-3- Sandwichs-----	39
5- Avantages et inconvénients les matériaux composites-----	40
6- Propriétés des composites-----	41
6-1- Introduction-----	41
6-2- Calcul d'homogénéisation des composites-----	41
6-3- Relation entre fraction volumique et massique-----	42
6-4- Présence de porosités-----	43
6-5- Propriétés élastiques (composite unidirectionnel) -----	44
6-6- Propriétés de rupture-----	49
6-7- Propriétés élastiques d'un composite (cas générale) -----	54
6-8- Dimensionnement d'une section de poutre renforcée par matériau composite -----	57
6-9- Dispositions constructives pour le béton armé renforcé par Tissu de fibres de carbone-----	62
Chapitre 04 : Renforcement des poutres par matériaux composites -----	64
Titres de Chapitre 04 -----	65
1- Présentation de l'ouvrage-----	66
2- Vérification le structure -----	70
2-1- Essai d'Ultrasons -----	70
3- Déscente des charges-----	71
4- Vérification les éléments de structure-----	72
5- Les caractéristiques des matériaux utilisés-----	73

5-1- Béton-----	73
5-2- Acier-----	76
5-3- Matériaux composite : -----	77
6- Calcul la section de la composite-----	81
7- Cas Exceptionnel-----	87
8- mise en oeuvre-----	93
Conclusion générale -----	97
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -----	98

LISTE DES FIGURES

<i>N°</i>	<i>Titre de la figure</i>	<i>Page</i>
Fig 1.1	Éclatement Poutre de tablier	12
Fig 1.2	Pile de Pont	12
Fig 1.3	Pile en zone de Marnage	12
Fig 1.4	Processus de Détérioration du Béton par les Attaques Chimique	13
Fig 1.5	Les étapes d'exécution d'un structure en béton armé	14
Fig 1.6	Processus d'analyse et de décision pour les travaux de réparation des structures de béton	16
Fig 1.6	Présentation schématique de la procédure de dosage en ions chlore dans le béton	22
Fig 2.1	Technique de béton projeté	29
Fig 2.2	Technique de chemisage	30
Fig 2.3	plaques d'acier collées	31
Fig 3.1	Différents types de fibres de verre	36
Fig 3.2	Différentes familles du renfort.	36
Fig 3.3	Déférentes familles de matrice	37
Fig 3.4	ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES	40
Fig 3.5	Structure d'un matériau composite	41
Fig 3.6	Schéma simplifié d'une traction longitudinale	44
Fig 3.7	Loi des mélanges pour le module d'Young longitudinal	45
Fig 3.8	Schématisation par couches d'un composite unidirectionnel	46
Fig 3.9	Schéma par couches d'une traction longitudinale	47
Fig 3.10	Schéma par couches d'une traction longitudinale	48
Fig 3.11	Déformations en cisaillement de la matrice et de la fibre	49
Fig 3.12	Rupture de fibre	50
Fig 3.13	Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre	50
Fig 3.14	Rupture transverse de la matrice	50
Fig 3.15	Rupture longitudinale de la matrice	51
Fig 3.16	Décohésion fibre-matrice	51
Fig 3.17	Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$.	53
Fig 3.18	Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$.	53
Fig 3.19	Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre-matrice	54
Fig 3.20	Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice.	54
Fig 3.21	Couche de matériau composite orthotrope	56
Fig 3.22	Renforcement type en flexion.	57

Fig 3.23	Différent efforts dans la section du béton	58
Fig 3.24	Organigramme de calcule	59
Fig 3.25	Renforcement type cisaillement	60
Fig 3.26	Section de tissu retenu pour le dimensionnement	60
Fig 3.27	Les dispositions de tissu sur la poutre	61
Fig 3.28	Le repérage de TFC	62
Fig 3.29	superposition des couches	62
Fig 3.30	recouvrement transversalement	63
Fig 3.31	recouvrement longitudinalement	63
Fig 3.32	traitement les courbures	63
Fig 4.1	Photo plan de situation de l'institut	66
Fig 4.2	Photo plan de masse de l'institut	66
Fig 4.3	l'Atelier :Vue en plan haut RDC	67
Fig 4.4	l'Atelier a l'extérieur	67
Fig 4.5	bloc de maintenance : Vue en plan haut R+1	68
Fig 4.6	bloc de maintenance a l'extérieur	68
Fig 4.7	Laboratoire :Vue en plan haut R+1	69
Fig 4.8	Laboratoire a l'extérieur	69
Fig 4.9	Détail d'Etanchiété actuel	71
Fig 4.10	détail d'Etanchiété saharienne	72
Fig 4.11	Comparaison de comportement béton - acier	77
Fig 4.12	Les matériaux utilises de MC	78
Fig 4.13	Différent efforts dans la section du béton	81
Fig 4.14	Organigramme de calcul la section de composite	83
Fig 4.15	Les dispositions de tissu sur la poutre	87
Fig 4.16	diagramme de répartition de l'effort tranchant (poutre 12.70m)	90
Fig 4.17	Plan Répartition de TFC sur le corps du la poutre	92
Fig 4.18	Ponçage de la surface	94
Fig 4.19	Préparation de la colle	94
Fig 4.20	Découpe du tissu de carbone	95
Fig 4.21	Mise en place de la résine	95
Fig 4.22	Mise en place du composite	95
Fig 4.23	Imprégnation de la deuxième couche de colle pour coller la deuxième lit de composite	97
Fig 4.24	Résultat final	97

LISTE DES TABLEAUX

<i>N°</i>	<i>Titre de tableau</i>	<i>Page</i>
Tab 1.1	Principales techniques d'évaluation du béton et des structures	19
Tab 2.1	Avantages et inconvénients chemisage en béton armé	30
Tab 2.2	Avantages et inconvénients Tôles d'acier collées	31
Tab 3.1	Propriétés mécaniques des fibres	37
Tab 3.2	Principales propriétés des matrices Thermodurcissables et Thermoplastiques	38
Tab 3.3	Propriétés mécaniques des résines.	38
Tab 3.4	Avantages et inconvénients les matériaux composites	40
Tab 4.1	Resultat d'Essai d'Ultrasons	70
Tab 4.2	Resultats de calcules les moments et l'armatures des poutres	73
Tab 4.3	Les matériaux utilizes de MC	79
Tab 4.4	Caractéristique de SIKA CARBODUR LAMELLE	79
Tab 4.5	Caractéristique de SIKA wrap hex 230 C	80
Tab 4.6	Effort tranchants global et l'armature existant	86
Tab 4.7	Dimensionnement et vérification en cisaillement	91

Liste des symboles

f_b : Contrainte du béton
 A_s : Section d'armature
 f_s, f_e : Limite élastique de l'acier
 S_t : Espacement
 f_{su} : Limite élastique de l'acier à l'ELU
 b_c : Largeur du composite
 e_c : Épaisseur du composite
 f_{cj} : Résistance à la compression du béton à j jours
 f_{c28} : Résistance à la compression du béton à 28 jours
 f_{tj} : Contrainte de traction par flexion à j jours
 σ_{bc} : Contrainte de compression du béton
 ϵ_{bc} : Déformation du béton comprimé
 f_{bu} : Limite élastique du béton à l'ELU
 σ_s : Contrainte de l'acier
 ϵ_s : Déformation de l'acier
 ϵ_c : Déformation de la composite
 V : Effort tranchant
 W_m : Valeur moyenne d'ouverture des fissures
 E_c : Module élastique du composite
 E_s : Module élastique de l'acier
 f_{pu} : Limite élastique du composite à l'ELU
CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymer
TFC : Tissu de Fibre de Carbone
 G : Charge ultime
 Q : Charge exploitation
 A_s', A_{sc} : Section d'armature comprimée
RL : Rond lisse
 h, d : Hauteur utile
Acritique : Section d'armature correspondant au pivot AB
ELS : Etat limite de service
ELU : État limite ultime
 M_{rupt}, M_r : Moment de rupture
 F_b : Force reprise par le béton
 F_s : Force reprise par l'acier
 F_c : Force reprise par le composite
 A_c : Section longitudinale du composite
 A_t : Section transversale du composite
 M_{soll} : Moment de sollicitation
 C : Distance de l'axe neutre par rapport à la fibre la plus comprimée

Introduction générale :

Les ouvrages de génie civil sont dimensionnés pour une durée de vie de cent ans en moyenne. L'examen pathologique des différents ouvrages en béton armé montre plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie, plusieurs facteurs font qu'il peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage : la corrosion des aciers d'armature, la fissuration du béton, des chargements d'affectation qui imposent de nouvelles charges, un mauvais dimensionnement...etc.

La maintenance des ouvrages de génie civil est nécessaire pour assurer la sécurité des usagers, cette maintenance consiste à une meilleure étanchéité, ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages. Parmi les techniques disponibles, l'une des plus efficaces pour les désordres structurels, la réparation et le renforcement des structures en béton, technique par collage de matériaux composites à base de fibre de carbone (CFRP), cette technique est caractérisée par des performances en rapport avec leur poids léger, leur rigidité, haute résistance à la traction, durabilité totale très appréciable, et malgré leur prix élevé, cette technique présente un avantage économique car elle peut être mise en œuvre directement (la facilité de mise en œuvre) plusieurs

éléments de structure peuvent être renforcés par collage des matériaux composites.

Ces éléments sont essentiellement les poutres, les poteaux et les dalles.

L'objet de ce mémoire est de contribuer à la bonne maîtrise de cette technique qui reste toujours peu connue en Algérie, surtout en bâtiment, et de trouver un modèle de calcul simple (soit analytiquement et/ou par modélisation) dans le but de faciliter la tâche à l'ingénieur concepteur.

En prenant des exemples pratiques pour la validation (cas d'étude).

Le Plan de travail suivi est comme suit :

- Chapitre 01 : Dégradation et Méthodes d'Evaluation et Diagnostic des Structures en Béton Armé
- Chapitre 02 : Méthodes De Réparation Et De Renforcement les Structures en Béton Armé
- Chapitre 03 : Renforcement Par Matériaux Composites
- Chapitre 04 : Cas d'Etude
- Conclusion

Chapitre 01 :

Dégradation et Méthodes d'Evaluation et Diagnostic des Structures en Béton Armé

Titres de Chapitre 01 :

- 1- Introduction**
- 2- Origines et causes de dégradation du béton**
- 3- Evaluation et Diagnostic des Structure en Béton**

Introduction :

Un ouvrage de génie civil est dimensionné à la base de la connaissance de l'état initial réel ou supposé où cette configuration évolue dans le temps. On constate généralement l'adjonction des nouveaux défauts de forme dues aux différentes pathologies d'origines physico-chimique (corrosion des aciers, vieillissement des matériaux ...), structurelles issues de faute de conception lors du dimensionnement ou lors de l'exécution ou modification l'exploitation de l'ouvrage et enfin à caractère accidentelle de type séisme et choc. Ces défauts mettent en péril la sécurité de l'utilisateur, la conservation du patrimoine des infrastructures, ainsi que celle des monuments historiques. La réhabilitation (réparation) des ouvrages en génie civil consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité en limitant les corrosions, à chercher à compenser les pertes de rigidité ou des résistances dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité.

1- Origines et causes de dégradation du béton :

Avant de commencer à citer les origines de dégradation du béton, on doit définir la dégradation, **C'est quoi dégradation du béton ?**

La dégradation du béton est sa perte de performance elle se manifeste par détérioration, déformation ou changement de ces propriétés. La fissure constitue le signe d'une première manifestation apparente de dégradation possible, comme elle peut prendre l'aspect des éclats ou couleurs de rouille .

2-1- Les facteurs climatiques et environnementaux :

Il est clair qu'une structure de béton évoluera de manière très différente en fonction des conditions climatiques et du type d'exposition face aux agents potentiellement agressifs , les différents mécanismes à la source des dégradations sont très souvent fonction des conditions climatiques et du type d'exposition du béton sont comme suit :

- ✓ **Climat tempéré froid** : cycles de gel-dégel et taux d'humidité élevé
 - Fissuration interne due au gel-dégel
 - Écaillage due aux sels fondants
 - Corrosion des armatures
 - Réactions alcalis-granulats

✓ **Climat tempéré chaud et humide :**

- Attaque par les eaux agressives
- Réactions alcalis-granulats

✓ **Climat sec :** - Carbonatation

✓ **Environnement marin :**

- Attaque par l'eau de mer (sulfates)
- Corrosion des aciers d'armature
- Abrasion par les glaces
- Détérioration par les cycles de gel-dégel



Fig 1-1 : Éclatement Pouter de tablier



Fig 1-2 : Pile de Pont

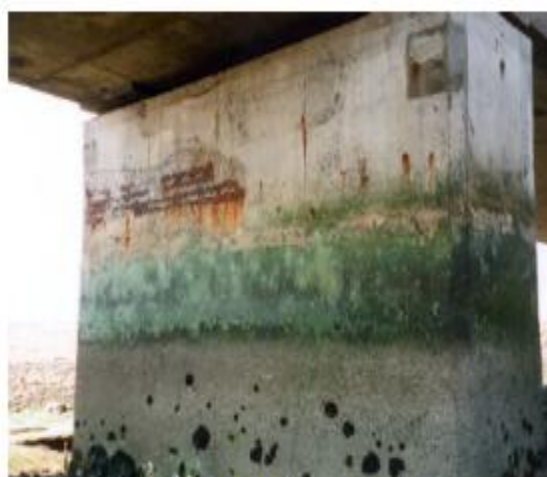


Fig 1-3 :Pile en zone de Marnage

Différents types de dégradations

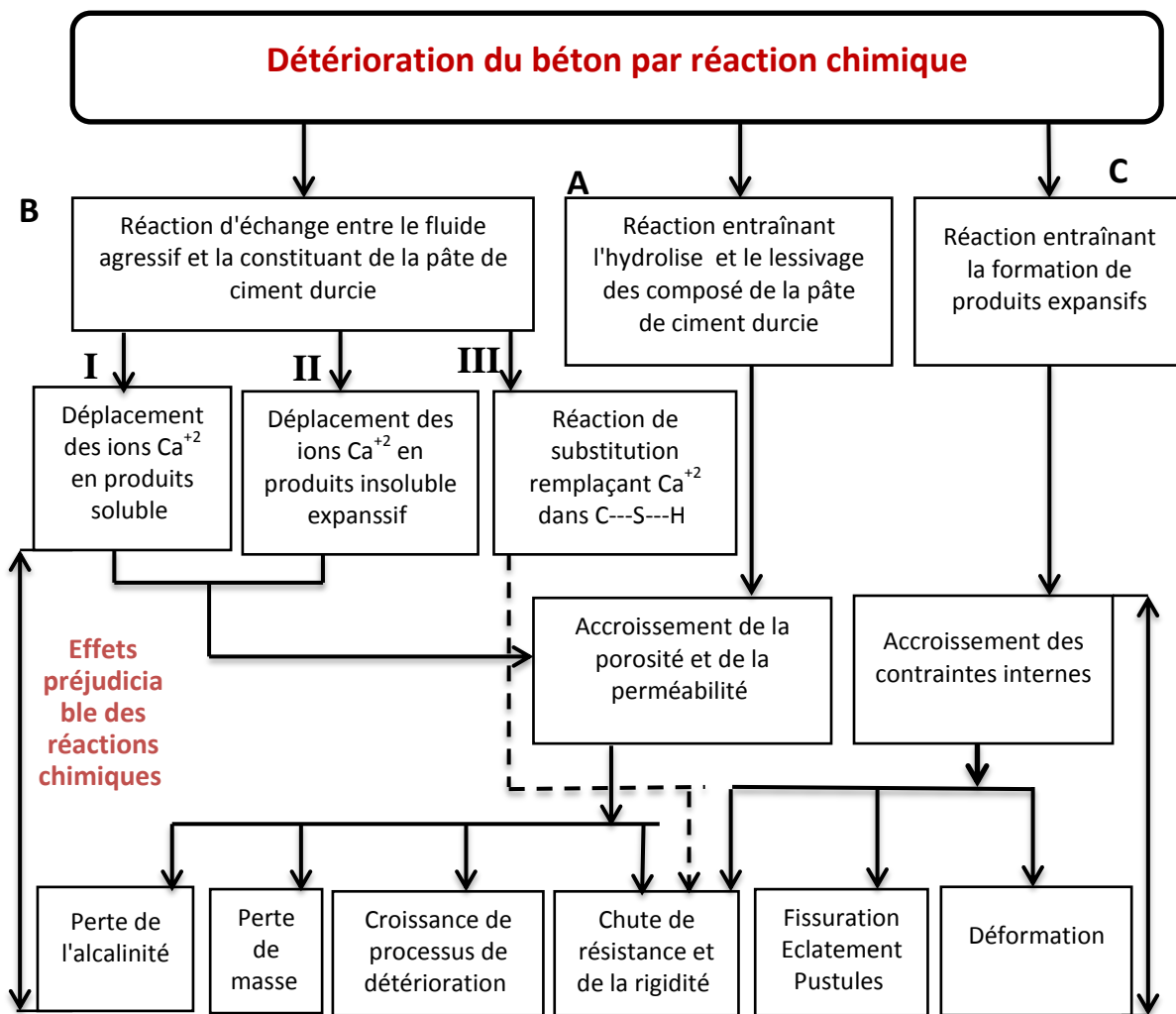


Figure 1.4 : **Processus de Détérioration du Béton par les Attaques Chimique**

Les autres origines de la dégradation :

- 1) Les facteurs liés à la conception de l'ouvrage
- 2) Les facteurs liés à la mise en oeuvre de l'ouvrage
- 3) Les facteurs liés aux caractéristiques des matériaux et du béton
- 4) Les facteurs liés à l'entretien de la structure

Le processus qui mène de la conception à la livraison finale des ouvrages peut être relativement complexe.

- Le cas d'une structure de béton par exemple (les étapes d'exécution):

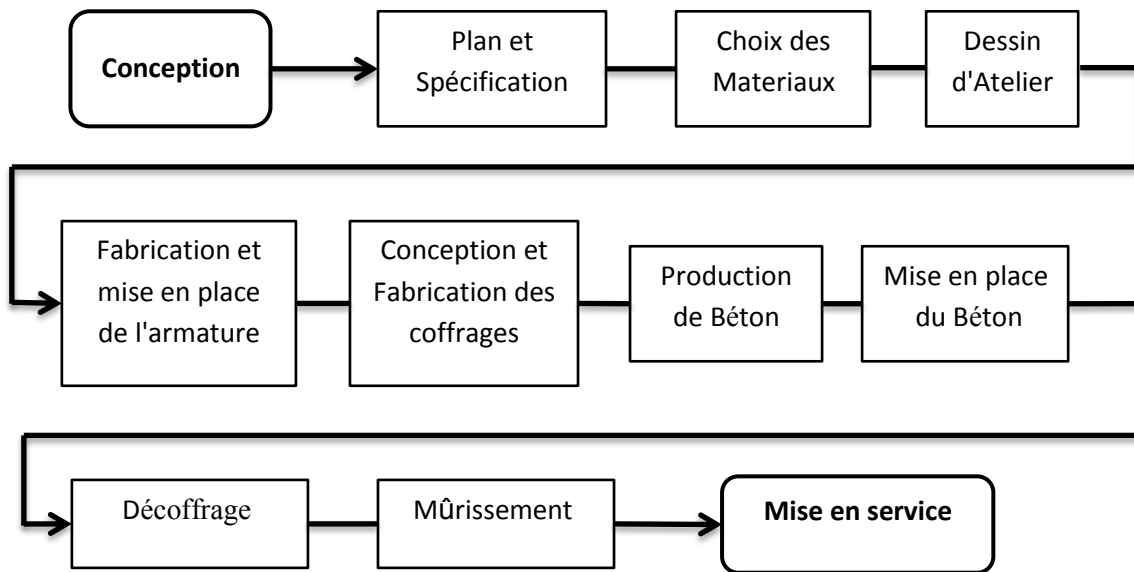


Fig 1.5 : les étapes d'exécution d'un structure en béton armé

On pourrait adapter cette figure pour d'autres types de construction , aussi des déficiences au niveau d'une ou plusieurs des étapes de ce processus peuvent avoir des répercussions importantes sur la durabilité et la performance générale de l'ouvrage .

2-2- Les facteurs reliés à la conception de l'ouvrage :

- ✓ Erreurs dans le bon choix du matériau constituant l'ouvrage.
- ✓ Erreurs dans le pré-dimensionnement des éléments.
- ✓ Structure instable.
- ✓ Erreurs dans les hypothèses de calcul.
- ✓ Mauvaise utilisation des règlements.

2-3- Les facteurs reliés à la mise en œuvre de l'ouvrage :

- ✓ Fautes d'exécution, surtout la confection des éléments en béton armé : Qualité du béton , dosage notamment l'eau de gâchage (le rapport E/C) ; Coffrage ; Bétonnage ; Ferrailage ; Décoffrage; Causes multiples (généralement bétonnage et ferrailage défectueux)
- ✓ Dispositions défectueuses (notamment dispositions d'armatures) dans certains éléments ou dans la transmission des efforts
- ✓ Désordres résultant des effets des variations dimensionnelles

2-4- Les facteurs reliés à l'entretien de la structure :

Si les méthodes de mise en place et de mûrissement ne permettent pas au béton de développer toutes ses qualités, la durabilité de l'ouvrage pourra être considérablement réduite .

2-5- Modification des Conditions d'Exploitation ou d'Utilisation des Ouvrages :

Si nous ajoutons des charges importantes à la structure et que nous ne suivons pas une augmentation équivalente du renforcement , cela conduira à une détérioration rapide du béton au fil du temps , au moment où il commence à apparaître sous la forme de fissures.

3- Evaluation et Diagnostic des Structure en Béton

L'identification des cause de dégradation est une des étapes les plus importantes et les plus difficiles de tout le processus de réparation des structures endommagées , il n'est généralement pas possible d'évaluer la nécessité de réparer une structure ou de choisi la ou les méthodes de réparation sans avoir au préalable bien identifié l'origine des dégradation .

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 obtenir des informations sur l'étendue des dommages et d'établir les cause des dégradations , la campagne d'évaluation fait partie d'un processus constitué des plusieurs étapes qui permettra de choisir la ou les méthodes de réparation les plus appropriées en fonction du type de dégradation .

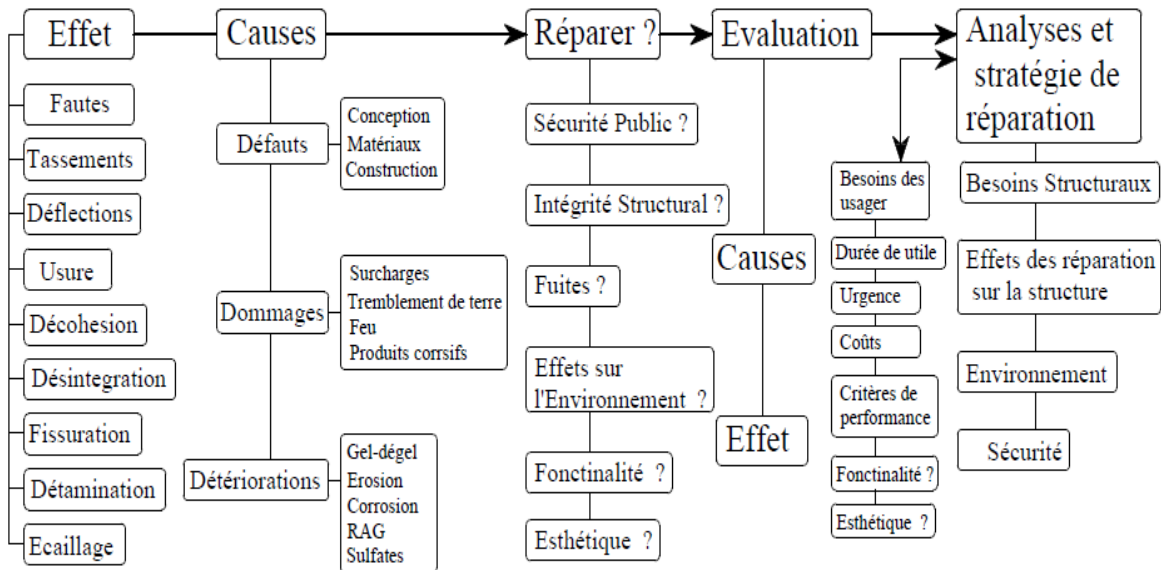


Fig 1-6 - Processus d'analyse et de décision pour les travaux de réparation des structures de béton. [tiré de Emmons, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S. Means Company, Kingston, Ma, 1994, 295 p.] [06]

3-1- Campagne d'évaluation : [06]

Une campagne d'évaluation est généralement nécessaire pour évaluer la performance des ouvrages détérioré ou très âgés ; cette étape est souvent effectuée à la demande de l'ingénieur en structure qui désire évaluer l'intégrité structurale de l'ouvrage .

La campagne d'évaluation peut parfois se résumer à une simple évaluation visuelle , elle peut aussi être beaucoup plus détaillée et comporter toute une série de prélèvement ou d'analyses in situ ou en laboratoire , dans tous les cas la campagne d'évaluation a pour but d'aider à établir les causes des dégradation et à choisir les techniques de réparations appropriées , les campagnes d'évaluation peuvent comporter cinq (05) grandes étapes :

- ✓ Dossier de documentation sur l'ouvrage .
- ✓ Analyse des condition de service .
- ✓ Visite du site .
- ✓ Évaluation détaillée .
- ✓ Évaluation des données recueillies .

3-1-1- Dossier de documentation sur l'ouvrage:

Cette étape consiste à rassembler toutes les informations disponibles concernant la conception , la construction , l'utilisation et l'entretien de la structure :

- ❖ Spécification d'origine
- ❖ Plans photos

- ❖ Dossier de construction , de surveillance
- ❖ Rapport d'essais sur les matériaux
- ❖ Changement effectués durant la construction
- ❖ Réparation antérieurs
- ❖ Causes
- ❖ Méthodes d'utilisées
- ❖ Matériaux d'utilisées
- ❖ ect

3-1-2- Analyse des condition de service :

Cette étape consiste d'abord à évaluer dans quelle mesure la fonction actuelle de la structure (condition de service) correspondent aux spécifications d'origines .

Cette analyse peut permettre d'identifier les points suivant :

- ❖ Les zones les plus sollicitées
- ❖ Les parties exposées aux cycle de gel-dégel , aux cycle thermiques et aux variations d'humidité , etc .

Cette étape devrait être effectuée avant la première visite sur site , l'analyse détaillées des conditions de service est une des étapes les plus importantes de la campagne d'évaluation . très souvent les principale causes des dégradations sont directement liés aux condition des service .

3-1-3- Visite du site :

Il est généralement conseillé de prévoir des schémas ou des plans simplifiés qui pourront être utiliser pour localiser les principaux problèmes observés lors de la visite du site , les activités suivantes peuvent être effectuées sur site :

- ❖ Observation visuelles
- ❖ Prise de photos
- ❖ Identification et localisation des zones fortement sollicitées
- ❖ Observation les zones critiques (joins , appuis , système de drainage , etc)
- ❖ Localisation des fissures , des délamination et des autres types de dégradations
- ❖ Mesures les ouvertures et des longueurs des fissures

La visite sur le site peut permettre à l'ingénieur de déterminer dans quelle mesure il est nécessaire d'entreprendre un programme d'investigation plus détaillé .

3-1-4- Évaluation détaillée :

L'évaluation détaillée peut comporter les activités suivantes :

- ❖ L'essais non destructifs
- ❖ Campagne de carottage
- ❖ Cartographie des fissures
- ❖ Instrumentation (déplacement , efforts , température , humidité , écoulement)
- ❖ Programmes des essais à effectuer sur les échantillons prélevés par carottage
- ❖ Programme d'essais sur site

3-1-5- Évaluation des données recueillies :

Cette étape consiste à évaluer et analyser l'ensembles des données (techniques , visuelles , historiques , climatiques) obtenues sur le site et au laboratoire .

3-2- Méthodes d'évaluation [06]

- Il existe de très nombreuses méthodes ou techniques d'évaluation qui peuvent aider à diagnostiquer les principales causes des dégradations (Fig 3.3).
- C'est surtout l'expérience de l'ingénieur spécialiste en réparations qui permettra de choisir la meilleure méthode d'évaluation parmi l'ensemble des méthodes disponibles.
- Les différentes méthodes d'évaluation actuellement disponibles permettent de caractériser les propriétés mécaniques du béton, de déterminer les caractéristiques chimiques et physiques du béton et de caractériser le comportement l'environnement général de la structure

Mécanical propreties	Chemical Make-up	Physical Condition	External Manifestation (behavior)
Compressive strength - Core testing (1) - Windsor probe (3) - Rebound hammer (2)	Electro-Chemical Activity - Half cell potential (9) - Electrical resistivity (10)	Unifomity - Petrologic analysis (11) - pulse velocity(4) - Windsor probe (3) - Rebound hammer (2) - Core testing (1)	Cracks/Spalls - Hammer sounding -Infrared thermography - Impact Echo - pulse velocity(4) - Remote viewing (TV , Borescope) - Exploratory Removal
Quality of concrete -Ultrasonic pulse velocity(4)	Carbonatation Depth - Acide based indicators (Phenolphthalen solution) - Petrologic analysis (11) - X-Ray diffraction -Infrared spectroscopy	Air-Void System (15)	Deflections From Service Loads - Load testing (ACI 437R) -Monitoring movements
Tensile strength - pull of testing - Splitting tensile strength (5)	Alkali aggregate reactions - Petrographic analysis(11) - Uranyl (Uranium) Acetate fluorescence methode	Delamination Voids - Hammer sounding - Chain drag - Impact Echo - pulse velocity(4) - Exploratory Removal - Remote viewing (TV , Borescope) -Infrared thermography	Movements of Service/Exposure Conditions - Load testing (ACI 437R) -Monitoring mouvements
Flexural strength (6) (7)	Chloride Content (12) (13) (14)	Location/Condition of Embedded Metals - Pachometre - Radiography - Ground penetrating radar - Exploratory Removal	Leakage - Visual observations - Infrared thermography
Abrasion resistance(8)		Water Permeability Air Permeability	External Geometry - Visual observations Temperature / Moisture Conditions - Thermocouple - Thermometre
Bond strength - pull of testing		Water Absorption (19)	
		Frost & Freeze-Thaw resistanse (16) (17)	
		Resistance to Deicing Salts (18)	

Tab 1-1 - Principales techniques d'évaluation du béton et des structures.
[tiré de Emmons, P.H. Concrete repair and maintenance illustrated, R.S. Means Company, Kingston, Ma, 1994, 295 p.] [06]

3-2-1- Échantillonnage du béton

- L'échantillonnage du béton (carottage, sciage) constitue une étape importante du processus d'évaluation in situ de la structure.

NB : Il est important de retenir que les échantillons doivent être représentatifs des éléments structuraux analysés.

- La dimension (diamètre) des carottes est généralement fonction de la dimension maximale des granulats.
- Il est important de bien identifier les carottes pour pouvoir retrouver leur localisation dans l'ouvrage.
- Il est généralement utile de prélever des carottes non seulement dans les parties les plus détériorées mais aussi dans les parties saines. L'analyse comparative des résultats d'essais facilite souvent l'identification des causes des dégradations.

3-2-2- Évaluations en laboratoire :

- L'évaluation en laboratoire commence généralement par une description des échantillons (types, dimension, provenance, etc).
- Elle peut comporter les analyses suivantes :
 - Analyse pétrographique
 - Caractéristiques des vides d'air
 - Essais mécaniques (compression, traction, flexion)
 - Densité, absorption
 - Teneur en ions chlore
 - État des aciers d'armature
 - Mesures soniques (PUNDIT)
 - Dosages en ciment et en granulats
 - Analyse chimique de la pâte

3-2-3- Analyse pétrographique et chimique :

- La norme ASTM C856 décrit les principales méthodes expérimentales utilisées pour l'analyse pétrographique. Cette analyse doit être effectuée par un pétrographe d'expérience.
- Une analyse pétrographique simple peut permettre d'identifier des problèmes au niveau de la granulométrie et de la forme des particules (granulat fin et gros granulat).
- Une analyse pétrographique, combinée à des analyses physico-chimiques (ATG, DRX, XRD) permettent généralement de diagnostiquer la plupart des types de dégradations du béton.
 - Réaction alcali-granulat: Auréole de réaction, gel de silice, microfissuration.
 - Attaque par les sulfates: Ettringite secondaire, dépôts de gypse
 - Carbonatation: Essai à la phénolphtaléine

- Corrosion: Dépôts de produits de corrosion au voisinage des barres
- Des techniques d'imprégnation de résine fluorescente et d'analyse d'image permettent d'estimer le rapport E/C du mélange et la variation du rapport E/C à l'intérieur du béton (aux interfaces).

3-2-4- Caractéristiques des vides d'air :

La mesure des caractéristiques des vides d'air (Norme ASTM C457) est un essai essentiel pour l'analyse de la performance au gel du béton.

- On doit prélever des éprouvettes à différents endroits représentatifs de la structure et noter les conditions d'exposition associées à chacune des éprouvettes.

3-2-5- Résistance à la compression :

- La résistance à la compression peut être mesurée pour estimer la qualité générale du béton.
- La résistance à la compression des carottes de béton est fonction du rapport longueur/diamètre, de la teneur en humidité du béton. Elle peut être influencée par la présence de barres d'armature.
- Il faut choisir le diamètre des carottes en fonction de la dimension maximale du gros granulat (au moins 3 fois le d_{max}).

3-2-6- Teneur en ions chlore:

- Une teneur élevée en ions chlore ($> 0,5$ % de la masse de ciment) peut engendrer des problèmes de corrosion si le béton est dans un environnement humide.
- Il existe des méthodes normalisées qui permettent de déterminer la teneur en ions chlore totaux (solubles à l'acide) ou la teneur en ions chlore hydrosolubles (Fig 1-.6).
- Cette technique peut aussi être utilisée pour déceler un surdosage en accélérateur de prise ($CaCl_2$).
- Il est généralement préférable de prélever des échantillons de poudres à différentes profondeurs, pour établir un profil de pénétration des ions chlore.

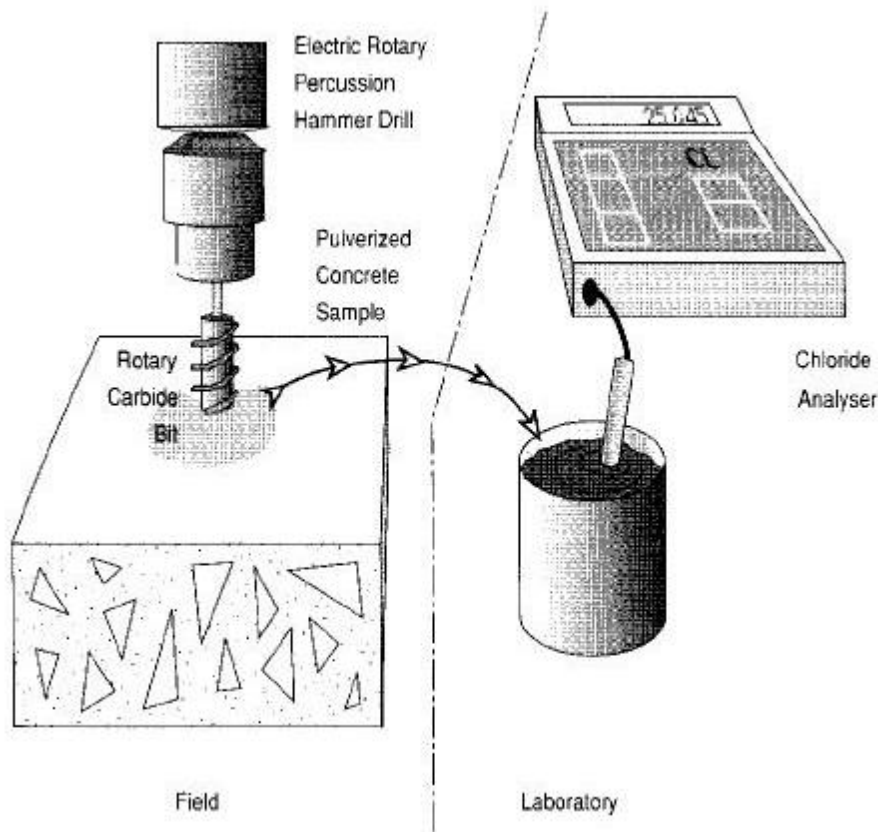


Fig 1-7 - Présentation schématique de la procédure de dosage en ions chlore dans le béton. [tiré de Emmons, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S. Means Company, Kingston, Ma, 1994, 295 p.] [06]

Chapitre 02 :

Méthodes De Réparation Et De Renforcement les Structures en Béton Armé

Titres de Chapitre 02 :

1- Généralité

**2- Méthodes de Réparation Et De
Renforcement**

3- Conclusion

1- Généralité :

Les structures en béton sont soumises à de nombreuses conditions qui peuvent nuire à leur performance attendue. Comprendre la relation entre la détérioration prématurée ou imprévue ou d'un dysfonctionnement de l'utilisateur, et les causes de ces problèmes de performances, fournit une base pour la sélection des méthodes de diagnostic, des méthodes de protection et des méthodes de réparation des ouvrages en béton armé.

2- Méthodes de Réparation Et De Renforcement :

Suivant l'importance et les causes des désordres ou des insuffisances affectant un pont en béton, le projet de réparation et/ou de renforcement repose, en général, sur la mise en oeuvre d'une combinaison de plusieurs techniques que l'on peut ranger dans l'une des deux catégories suivantes [3,7-9]:

- ❖ Les traitements de surface :
 - Ragréages et Injection des fissures;
- ❖ La protection du béton et des armatures;

2-1- Traitement de Surface :

Les principaux traitements de surface sont les ragréages et l'injection des fissures.

2-1-1- Ragréages :

Le ragréage consiste en premier lieu à préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus courantes sont *l'hydrodémolition*, le *décapage* par marteau pneumatique, le *bouchardage*, le *burinage* et le *piquage* par petit marteau pneumatique.

Il existe sur le marché une grande quantité de produits de ragréage qui peuvent être classés en trois catégories principales:

- les produits à base de liants hydrauliques, constitués par un mélange de sable, de ciment, de résines miscibles dans l'eau et éventuellement de fibres ; ce sont les produits les plus utilisés.
- les produits à base de résines de synthèse, constitués de sable (dans le cas de mortier), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et,

éventuellement, de charges minérales. Les produits les plus utilisés sont ceux à bases de résines époxydiques ou polyuréthanes .

- les produits mixtes, qui sont des produits à base de ciment et de polymère organiques réactifs .

2-1-2- Injection des fissures :

L'activité et l'évolution des fissures, permettant de distinguer les fissures inertes des fissures actives dont l'ouverture varie en fonction des facteurs extérieurs tels que: température, charges, vibrations et hygrométrie.

On distingue deux grandes catégories de traitement: les traitements de surface et le traitement dans la masse.

a). Les traitements de surface qui permettent essentiellement d'assurer ou de rétablir l'étanchéité de la surface d'une structure et d'éviter ou de stopper la corrosion des armatures. Parmi ces traitements, on peut citer :

- ❖ le calfeutrement, qui consiste à obturer la fissure par application d'un produit déposé dans une engravure façonnée le long de son tracé avec une ouverture de l'ordre des deux tiers de sa profondeur .
- ❖ l'imprégnation, qui permet d'étancher une surface présentant un réseau important et diffus de microfissures. Le produit est passé sur la surface concernée, à la brosse ou au rouleau .
- ❖ le pontage, qui rend hermétique l'ouverture de la fissure par application superficielle d'un film généralement armé et adhérent, de 3 mm d'épaisseur, de part et d'autre des lèvres de la fracture.

b). Le traitement dans la masse qui consiste à injecter en profondeur un produit liquide qui, après durcissement, a des caractéristiques mécaniques voisines de celles du matériau environnant. L'injection se fait par cheminement du produit liquide dans la fissure, de l'extérieur vers l'intérieur, après obturation de la partie visible de la fissure.

2-2- Protection du Béton et des Armatures

2-2-1- Techniques de protection du béton :

Lorsque l'enrobage des aciers est trop poreux ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi

être appliquée à un mortier fraîchement déposé, vis à vis des agressions atmosphériques, des fondants de l'eau de mer, des attaques chimiques ou bactériologiques ou, tout simplement, vis à vis de la pénétration de l'eau, afin d'assurer une grande durabilité de la réparation. On distingue cinq grandes familles de produits qui ont différentes caractéristiques [10].

a). *Hydrofuges de surface* : Destinés à rendre la surface du béton imperméable à l'eau. Il s'agit principalement de silicone en solution aqueuse que l'on peut appliquer à une surface légèrement humide.

b). *Minéralisateurs* : Ce sont des produits qui contiennent des atomes de silicium capables de réagir avec le calcium contenu dans la chaux du ciment pour donner des microcristaux de C-S-H qui pénètrent dans les pores et créent une sorte de "minéralisation" du support.

c). *Peintures* : On peut protéger le béton par de la peinture, qui joue aussi un rôle esthétique. Ces peintures sont à base des copolymères acryliques ou vinyliques en émulsion aqueuse; ou autres résines époxydiques.

d). *Revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère* : Qui sont appliqués en une ou deux couches sur des épaisseurs totales de 1 à 2 mm. Ces revêtements minces constituent la meilleure protection contre les agressions extérieures, mais pour les surfaces horizontales, la protection est difficile en raison des stagnations des eaux.

e). *Revêtements plastiques épais* : Qui ont la même composition que les peintures classiques, mais comportent en plus des charges dont la granulométrie atteint le millimètre. Ils sont appliqués avec un dosage de 1.5 à 4 kg/m², et donnant une épaisseur finale de 1 à 3 mm. Le liant est souvent une résine acrylique en émulsion.

2-2-2- Protection des armatures :

a). Prévention de la corrosion des armatures

La corrosion est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton armé. Le risque de corrosion peut être réduit considérablement si les précautions suivantes sont respectées [10]:

- ✓ L'enrobage suffisant des armatures selon l'environnement
- ✓ Qualité des bétons
- ✓ Dosage minimal en ciment : L'épaisseur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage du béton en ciment est plus élevé.
- ✓ Compacité suffisante du béton par une vibration adéquate

b). Protection des armatures

Les principales causes de la corrosion des armatures du béton armé, sont la carbonatation et la présence d'ions agressifs tels que les chlorures dans un milieu sec et humide. Les armatures peuvent être protégées par [10] :

Protection cathodique : qui est une technique permettant de stopper un processus de corrosion. Elle doit être appliquée avant que les risques d'ordre mécanique soient importants. Cette méthode consiste à abaisser en un point de l'armature le potentiel de ce métal jusqu'à une valeur qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. L'abaissement de potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique qui va de l'enrobage vers l'armature.

Les inhibiteurs de corrosion : qui sont des composés chimiques à base de nitrite ou benzoate de sodium, qui prolongent la passivité de l'acier dans le béton en présence d'agents agressifs, s'ils sont appliqués sur les barres d'acier

2-3- TECHNIQUES DE RENFORCEMENT

2-3-1- Définitions

La réparation d'une construction 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 propriétés des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux,...), l'utilisation intensive (effet de la répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (chocs, incendies, séisme etc...) [8].

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de ductilité, de la résistance etc...) 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 [8].

2-3-2- Techniques de Renforcement Classiques des Eléments Structuraux

2-3-2-1- Béton projeté

Les bétons transportés 'secs' ou 'mouillés' dans une conduite desservant les différentes parties d'un ouvrage à réparer, sont appelés bétons projetés lorsque, grâce à l'utilisation d'air comprimé, ils peuvent être mis en place par projection (Fig 2-1).

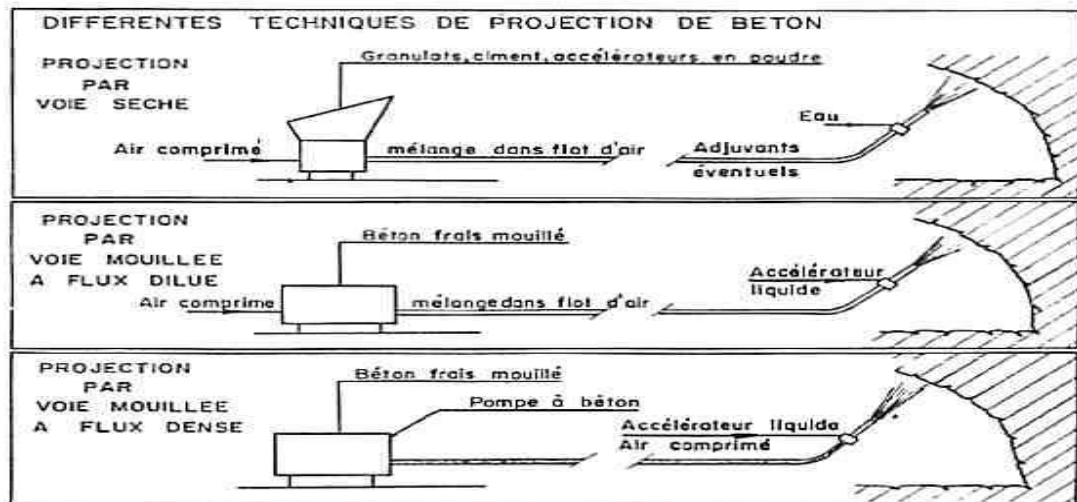


Fig.2-1: Technique de béton projeté

Cette technique est employée par deux méthodes pour la projection du béton, il s'agit de la voie sèche et de la voie mouillée [8].

2-3-2-2- Gainage (Chemisage)

L'utilisation des gaines convient particulièrement à la réparation des poteaux, des piles et des pieux détériorés. Cette technique consiste à reconstituer la section d'un élément en service (surtout celle d'un élément travaillé en compression) en le gainer de béton. Il n'est pas nécessaire que l'élément d'origine soit lui-même en béton, il est possible de gainer des sections en acier ou en maçonnerie.

Les travaux de préparation des surfaces avant l'opération de gainage revêtent une importance primordiale. Le coffrage de la gaine doit être muni de cales d'espacement destinés à prévoir un vide entre le coffrage même et la surface du béton ou matériau initial. Ce coffrage peut être temporaire ou permanent. Il peut être en bois, en acier ou en béton préfabriqué, selon sa destination et les conditions d'exploitation [8].



Fig 2.2 : *Technique de chemisage*

Tableau 2-1 : Avantages et inconvénients chemisage en béton armé :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Technique peu coûteuse du fait des matériaux utilisés . -Main d'œuvre peut qualifier 	<ul style="list-style-type: none"> -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 œuvre souvent difficile

2-3-2-3- Tôles d'acier collées [13]

Le principe de cette technique est de relier la plaque d'acier à la surface du béton pour transférer les efforts et augmenter la résistance et la rigidité de la structure. cette technique est très économique et ne change pas forme et les dimensions de la structure .



Fig 2-3 : plaques d'acier collées

Tableau 2-2 : Avantages et inconvénients Tôles d'acier collées :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Courte durée de réalisation par rapport au chemisage en béton. -Bonne performance des éléments rebforcés (bonne ductilité). -Faible augmentation des section . 	<ul style="list-style-type: none"> -Coût relativement élevé. - Nécessité des sodure donc une main-d' œuvre qualifiée . - Problème de corrosion ce que nécessite un face . -Nécessite d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécesste une surface parfaitement plane pou assurer l'uniformité en épaisseur de l'adhésif). - Nécessité d'un collage sou prèssion (vérins) pour assurer une adhésion suffisante et évité les bulles d'air dans la couche de résine de collage . -Impossiblilité de généraliser cette technique à des surfases importantes (masses manipulées tros importantes) ce qui limite d'autant les possibilité de réparation .

Conclusion :

Après avoir constaté de nombreux inconvénients des techniques de réparation du béton, qui nécessitent beaucoup de main-d'œuvre ainsi que du temps et des rendements très limités. Par conséquent, des solutions alternatives qui limitent l'emploi et le temps doivent être recherchées avec une meilleure efficacité .

Chapitre 03 :

Renforcement Par Matériaux Composites

Titres de Chapitre 03 :

1-Généralité

2-DEFINITION

3- CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES

4- ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES

5-Propriétés des composites

1- Généralité :

Depuis une dizaine d'années, une alternative est proposée : renforcer ou réparer les ouvrages en béton par des matériaux composites.

Avec leur très grand rapport résistance / poids, leur remarquable résistance à la corrosion, une excellente résistance à la fatigue ainsi que leur facilité d'installation, les matériaux composites sont apparus très clairement comme la solution à plusieurs problèmes rencontrés. Mais c'est quoi les matériaux composites

2- DEFINITION :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels [1] [4]:

- légèreté
- grande résistance à la fatigue
- liberté de formes
- maintenance réduite
- faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf alu carbone)
- insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les éthers.
- Une bonne isolation électrique.

Leur faible taux d'utilisation vient de leur coût.

On distingue deux types de composites: les composites grande diffusion et les composites haute performance.

Grande diffusion :

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont :

optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et

la simplicité du principe d'élaboration du matériaux (moulage par contact, SMC et injection).

Hautes performances :

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées.

Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels.
- CMM, CMC.

3- CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES :

3-1- Les Renforts :

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

3-1-1- Différents types de renfort :

Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7 .

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.

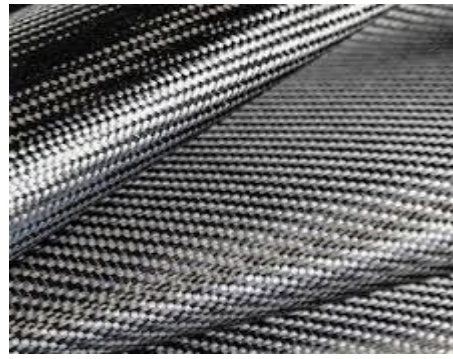
- Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ...): le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.
- Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc. ...): le tissu est forme par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.

Les tissus de roving peuvent peser jusqu'à 800 g/m².

- Sous forme de mat (a fil coupé, a fil continu):le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.



Roving de Carbone



Tissu de Carbone



Mat de Carbone

Fig. 3-1 : Différents types de Fibres de Carbone

3-1-2- Différentes natures de renfort:

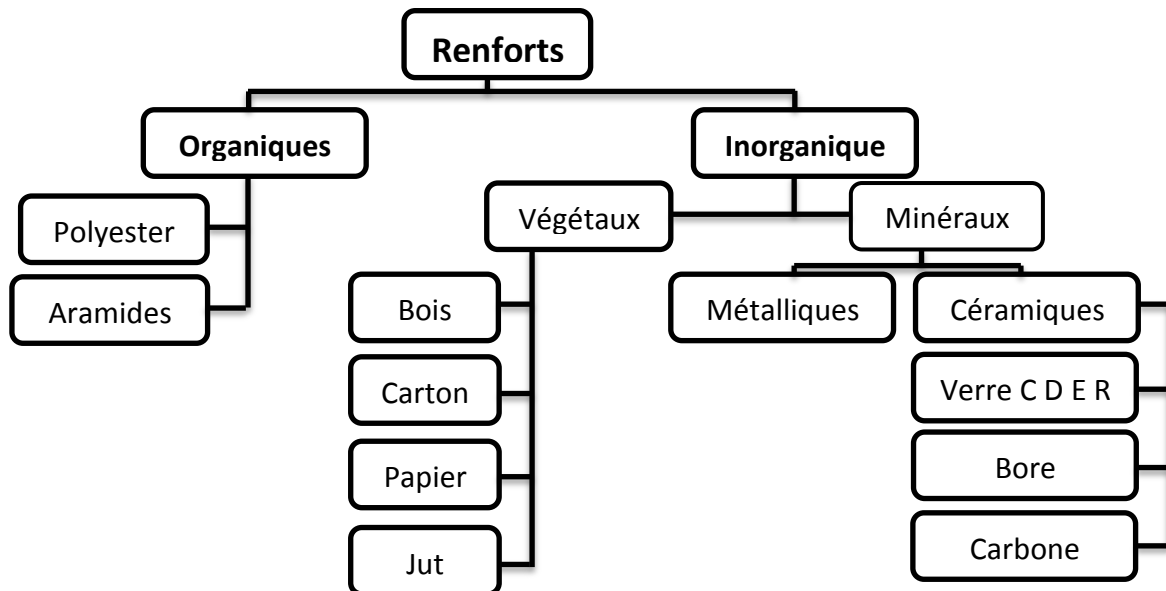


Fig. 3-2 : Différentes familles du renfort.

3-1-3- Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base:

Tableau 3-1 : Propriétés mécaniques des fibres

fibre	densité	σ_r (MPa) en traction	Allongement à la rupture en %	EL (MPa) Longitudinale	Diamètre du filament élémentaire μm
Verre E	2.54	3400	4.8	73×10^3	3-30
Verre R	2.48	4400	5.4	86×10^3	3-30
Aramide BM	1.45	3100	2	70×10^3	12
Aramide HM	1.45	3100	1	130×10^3	12
Kevlar	-	2900	2.3	130×10^3	1.45
Aluminium	-	1380	0.7	380×10^3	3.9
Carbone HT	1.78	2800	0.5	200×10^3	8
Carbone HM	1.80	2200	-	400×10^3	8
Bore	2.63	3500	0.8	400×10^3	100-200

3-2- La matrice :

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

3-2-1- Différentes natures de la matrice :

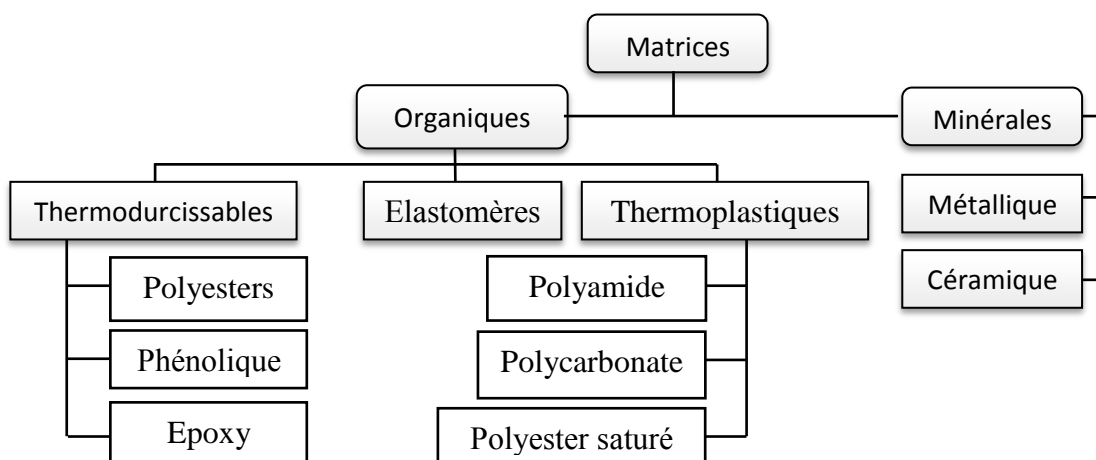


Fig. 3-3 : Différentes familles de matrice.

- ✓ Résine thermodurcissable: sont mis en forme et se polymérisent selon la forme souhaitée. La transformation irréversible.
- ✓ Résine thermoplastique: mis en forme par chauffage, durcissent au cours du refroidissement. La transformation est réversible.

Tableau 3-2 : Principales propriétés des matrices Thermodurcissables et Thermoplastiques:

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

3-2-2- Principales caractéristiques mécaniques des résines :

Tableau 3.3 : Propriétés mécaniques des résines.

	Polyester	Epoxyde	Phénolique	Polyamide	Aluminium
ε_r en traction (%)	2 - 5	2 - 5	2.5	-	-
ρ (Kg/m ³)	1200	1100 – 1500	1200	1130	2630
σ_r en traction (MPa)	50 - 80	60 - 30	40	70	358
E en traction (GPa)	2.8 – 3.5	3 - 5	-	3	69

3-3- Les charges : [1]

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

Les principales charges utilisées sont :

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

3-4- Les Additifs : [1]

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

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

- ✓ lubrifiants et agents de démoulage.
- ✓ pigments et colorants.
- ✓ agents anti-retraits.
- ✓ agents anti-ultraviolets.
- ✓ accélérateur.
- ✓ catalyseur.

4- ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES :

4-1- Monocouche:

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissus et mat.

4-2- Stratifiés :

Les stratifiés sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifiles, mat, tissus, etc.) imprégnés de résines.

4-3- Sandwichs : [4]

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou coeur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande rigidité en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

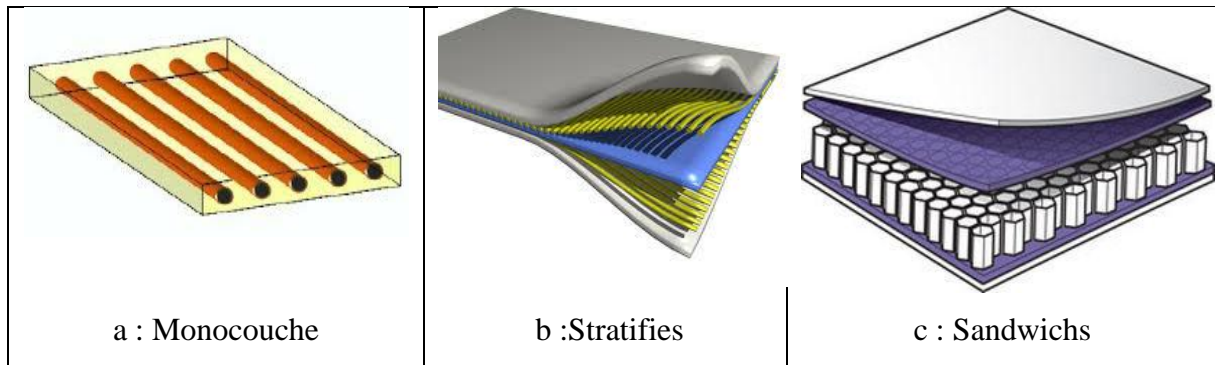


Fig 3-4 ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES

5- Avantages et inconvénients les matériaux composites

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Ils sont beaucoup plus légers -Caractéristiques mécaniques très élevées . -Faible densité (et donc facilité de transport, manutention, pose) . -Excellent isolant thermique . -Isolant électrique (de 3 à 20 kV/mm) . -Faible dilatation . -Excellente résistance aux agressions extérieures (corrosion chimique, rayonnement IR ou UV, et même aux graffitis) . -Transparence aux ondes électromagnétiques . -Teintés dans la masse sans surcoût . -Qualités esthétiques spécifiques . -Grande capacité d'absorption de chocs . -Bilan écologique très favorable . -Pas toxiques ni pour l'Homme ni pour l'environnement . -Peu de ressources primaires rares pour leur fabrication . -Aucun entretien . -Économies d'énergie lors de l'exploitation (isolation thermique, faible densité...) . -Recyclables. 	<ul style="list-style-type: none"> -Prix très élevé - Ils sont beaucoup plus sensibles à tous les impacts. Une petite faille peut engendrer de grosses déformations. . - La détection de ces problèmes est difficile, ce qui entraîne une rigueur extrême dans leur fabrication et leur assemblage. - La mise en oeuvre des réparations est beaucoup plus complexe.

Tableau 3-4 : Avantages et inconvénients les matériaux composites

6- Propriétés des composites

6-1- Introduction

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau issu de cet assemblage sera hétérogène avec des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. Les propriétés mécaniques des matériaux composites sont très variables à cause de leur complexité.

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- des propriétés des matériaux constituants,
- de leur distribution géométrique,
- de leurs interactions, etc.

6-2- Calcul d'homogénéisation des composites

Les composites sont composés de l'ensemble « matrice + renfort ». L'ajout du renfort augmente les propriétés mécaniques de la matrice renforcée. Considérons le composite unidirectionnelle suivant :

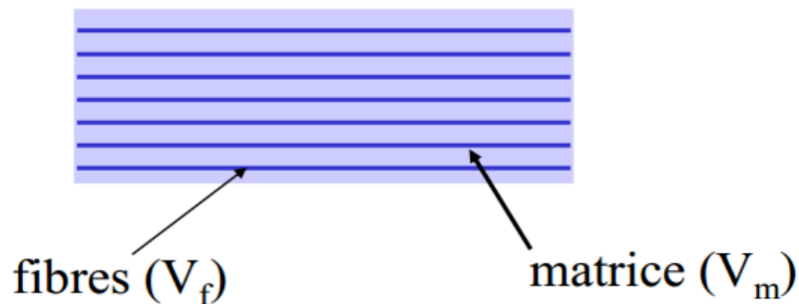


Figure 3-5 : Structure d'un matériau composite.

Ce matériau est non homogène et ses diverses propriétés dépendent de celles des fibres et de la matrice qui les constituent. Cependant, ce dernier, peut être supposé comme homogène en considérant ses propriétés moyennes vis-à-vis des charges externes appliquées. Le composite unidirectionnelle est supposé se comporte comme un matériau dont les propriétés mécaniques varient d'une direction à une autre mais semblable le long de ce matériau.

5-2-1- Fraction volumique

Considérons un volume v_c du matériau composite, composé d'un volume v_f de fibres et d'un volume v_m de la matrice. On définit :

La fraction volumique de fibres: $V_f = \frac{v_f}{v_c}$

— La fraction volumique de la matrice: $V_m = \frac{v_m}{v_c}$

Sachant que :

$$V_m = 1 - V_f$$

$$v_c = v_m + v_f$$

5-2-2- Fraction massique

Considérons la masse W_c du matériau composite, composé d'une masse W_f de la fibre et une masse W_m de la matrice. Les fractions massiques des fibres et de la matrice sont :

— La fraction massique de fibres: $P_f = \frac{W_f}{W_c}$

— La fraction massique de la matrice: $P_m = \frac{W_m}{W_c}$

Sachant que :

$$P_m = 1 - P_f$$

$$W_c = W_m + W_f$$

6-3- Relation entre fraction volumique et massique

Les relations entre les fractions volumiques et massiques font intervenir les masses volumiques ρ_c , ρ_f , ρ_m respectives du matériau composite, des fibres, de la matrice. Les masses et volumes sont liés par les relations :

$$W_f = \rho_f v_f, \quad W_c = \rho_c v_c, \quad W_m = \rho_m v_m$$

La masse totale du matériau composite est :

$$W_c = W_m + W_f$$

Ou

$$\rho_c v_c = \rho_m v_m + \rho_f v_f$$

La masse volumique du matériau composite s'écrit donc en fonction des fractions volumiques suivant :

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m (1 - v_f) \quad (1)$$

De même, en partant du volume total du composite : $v_c = v_m + v_f$

Donc:
$$\frac{W_c}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m}$$

D'où l'expression de la masse volumique en fonction des fractions massiques :

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_m}{\rho_m}} \quad (2)$$

Les relations entre fractions massiques et fractions volumiques peuvent maintenant être établies, en partant des relations de définition :

$$P_f = \frac{W_f}{W_c} = \frac{\rho_f V_f}{\rho_c V_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f$$

Et

$$P_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m$$

Les expressions précédentes entre fractions volumiques et fractions massiques peuvent être étendues au cas d'un nombre quelconque de constituants. Les expressions générales s'écrivent pour n constituants :

$$P_i = \frac{\rho_i}{\rho_c} V_i$$

Avec: $\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i$ et $V_i = \frac{\rho_c}{\rho_i} P_i$

Avec

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\rho_i}}$$

6-4- Présence de porosités

Il peut arriver que la masse volumique mesurée expérimentalement ne coïncide pas avec la valeur calculée par l'expression (2) à partir des masses des constituants introduites. Dans le cas où ce désaccord dépasse les précisions expérimentales, il peut être attribué à la présence de porosités. La différence entre la masse volumique ρ_{ct} calculée par l'expression (2) et la masse volumique ρ_{ce} mesurée expérimentalement permettra d'estimer **la fraction volumique V_p de porosités** par l'expression :

$$V_p = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}}$$

La présence de porosités dans un composite peut entraîner une diminution significative de ses caractéristiques mécaniques, en augmentant la dispersion de ses valeurs. La présence

de porosités augmente également la sensibilité du matériau composite à l'environnement extérieur : augmentation de l'absorption de l'humidité, diminution de la résistance aux produits chimiques, etc. Il sera donc important d'avoir une estimation de la proportion de porosités, de manière à évaluer la qualité d'un composite. Un matériau composite de qualité contiendra moins de 1 % en volume de porosités, alors qu'un composite de médiocre qualité pourra atteindre 5 %.

6-5- Propriétés élastiques (composite unidirectionnel)

5-5-1- Module d'Young longitudinal

Le module d'Young longitudinal est déterminé dans un essai de traction longitudinale. L'hypothèse simplificatrice est de supposer une déformation uniforme et identique dans la fibre et dans la matrice. Si Δl est l'allongement de la cellule (identique à celui de la fibre et de la matrice), la déformation longitudinale imposée à la cellule est :

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$$

Où l est la longueur de cellule considérée. L'identité des déformations dans la fibre et dans la matrice impose : $\varepsilon_l = \varepsilon_m = \varepsilon_f$

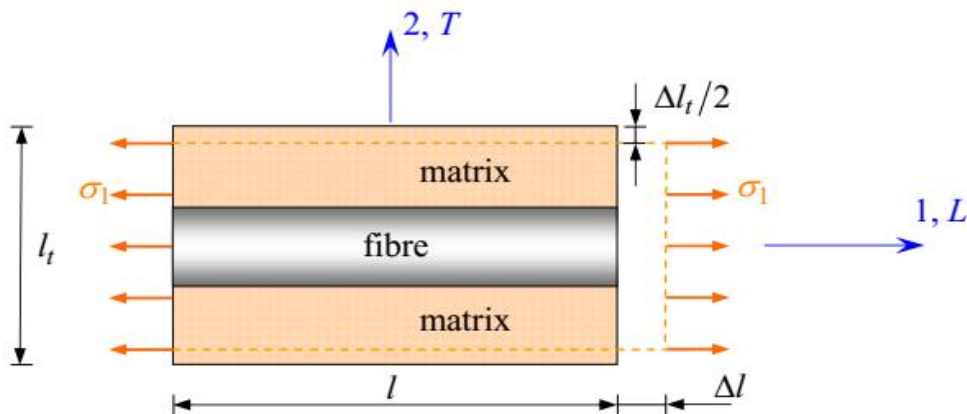


Figure 3-6 : Schéma simplifié d'une traction longitudinale.

Si la fibre et la matrice ont un comportement élastique, les contraintes dans la fibre et la matrice sont exprimées par : $\sigma_m = E_m \varepsilon_l$

$$\text{et } \sigma_f = E_f \varepsilon_l$$

La charge totale appliquée est : $F_1 = \sigma_f S_f + \sigma_m S_m$

Où S_f et S_m sont respectivement les aires des sections droites de la fibre et de la matrice. Si S est l'aire de la section droite de la cellule moyenne, la contrainte moyenne $\sigma_1 = F_1/S$ s'écrit :

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

Cette contrainte moyenne est liée à la déformation de la cellule par le module d'Young longitudinal :

$$\sigma_1 = E_L \varepsilon_1$$

La combinaison des relations précédentes conduit à l'expression du module d'Young longitudinal : $E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$ (3)

Cette expression est connue sous le nom de *loi des mélanges* pour le module d'Young dans la direction des fibres. Cette loi des mélanges est schématisée sur la figure 3. La variation du module est linéaire entre les valeurs E_m module de la matrice et E_f module des fibres, lorsque la fraction volumique V_f de fibres varie de 0 à 1.

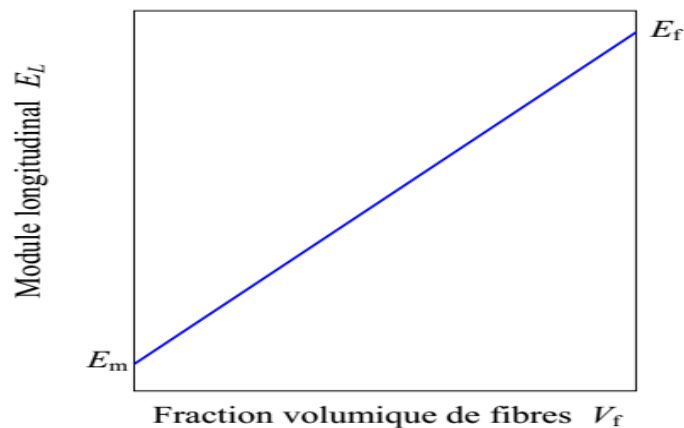


Figure 3-7 : Loi des mélanges pour le module d'Young longitudinal.

5-5-2- Module d'Young transverse

Le module d'Young transverse est déterminé dans un essai de traction transverse où le composite est chargé suivant la direction normale aux fibres. Une expression simplifiée de ce module peut être obtenue dans un schéma simpliste à deux dimensions. Dans un tel schéma, une tranche de matériau composite, d'épaisseur donnée, est considérée comme étant constituée (figure 4) de couches successives, possédant alternativement les propriétés des fibres et de la matrice. La hauteur des couches doit simplement vérifier :

$$V_f = \frac{h_f}{h_f + h_m} \quad \text{et} \quad 1 - V_f = \frac{h_m}{h_f + h_m}$$

La charge F_2 imposée suivant la direction transverse est transmise intégralement dans la fibre et dans la matrice, imposant des contraintes égales : $\sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m$

Il en résulte que les déformations respectives de la fibre et de la matrice dans la direction transverse s'écrivent :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad \text{et} \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m}$$

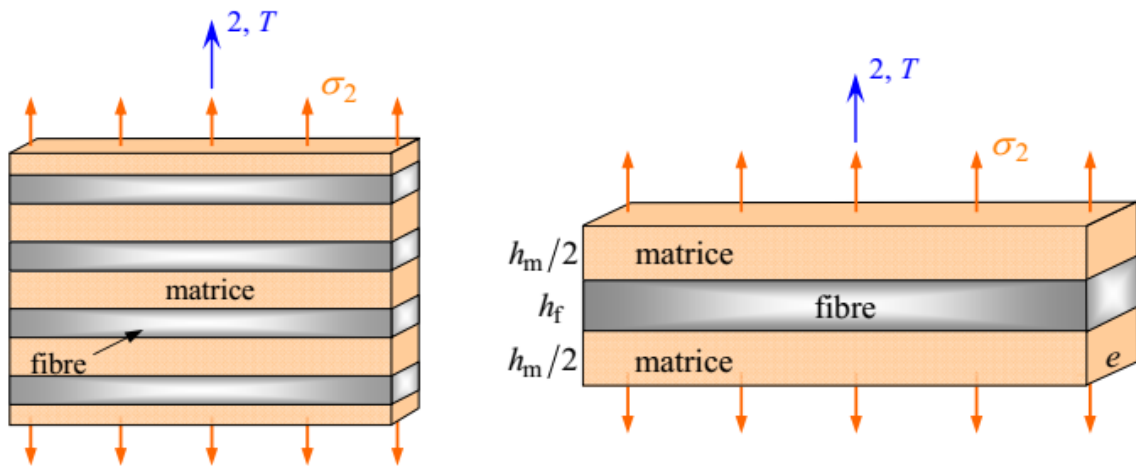


Figure 3-8 : Schématisation par couches d'un composite unidirectionnel.

L'allongement transverse d'une cellule élémentaire résulte des allongements cumulés dans la fibre et la matrice. Soit :

$$\Delta l_2 = \varepsilon_f h_f + \varepsilon_m h_m$$

Et la déformation transverse s'écrit :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{h_f + h_m} = \varepsilon_f \frac{h_f}{h_f + h_m} + \varepsilon_m \frac{h_m}{h_f + h_m}$$

Soit : $\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m (1 - V_f)$

Cette déformation est liée à la contrainte imposée sur la cellule, par le module transverse :

$$\sigma_2 = E_T \varepsilon_2$$

La combinaison des relations précédentes conduit à l'expression du module d'Young

transverse:
$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{(1-V_f)}{E_m} \quad (4)$$

Cette expression est connue sous le nom de *loi inverse des mélanges* et peut être réécrite, en rapportant le module transverse au module d'Young de la matrice, suivant une relation sans dimension sous la forme :

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1}{1 + \left(\frac{E_m}{E_f} - 1\right)V_f}$$

5-5-3- Coefficient de Poisson longitudinal

Le coefficient ν_{LT} est déterminé dans un essai de traction longitudinale, schématisé sur la figure 5.

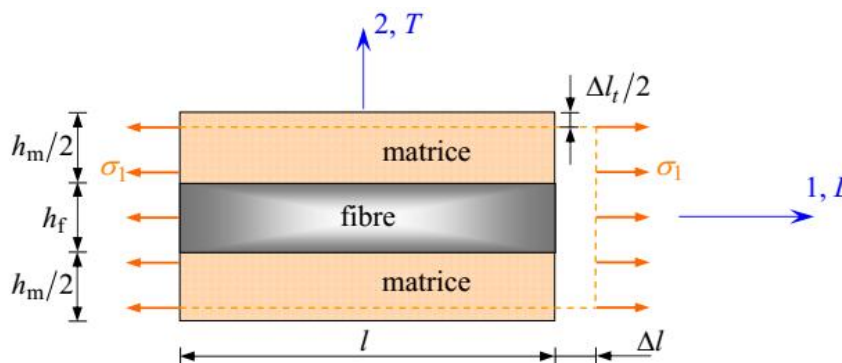


Figure 3-9 : Schéma par couches d'une traction longitudinale.

Les fibres et matrice subissent des déformations identiques. Il en résulte que les déformations transverses dans la matrice et dans les fibres s'écrivent : $\varepsilon_{2f} = -\nu_f \varepsilon_1$

$$\varepsilon_{2m} = -\nu_m \varepsilon_1$$

L'allongement transverse de la cellule élémentaire est : $\Delta l_t = -\nu_f \varepsilon_1 h_f - \nu_m \varepsilon_1 h_m$

Et la déformation transverse s'écrit : $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_t}{h_f + h_m} = -[\nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f)] \varepsilon_1$

D'où l'expression du coefficient de Poisson :

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (5)$$

Cette expression est la loi des mélanges pour le coefficient de Poisson longitudinal.

5-5-4- Module de cisaillement longitudinal

Le module de cisaillement longitudinal G_{LT} (G_{12}) est déterminé dans un essai de cisaillement longitudinal schématisé sur la figure 6, en utilisant à nouveau la modélisation

par couches du composite unidirectionnel. Les contraintes en cisaillement dans la fibre et dans la matrice sont égales, du fait des contraintes τ imposées sur la cellule.

Les déformations en cisaillement de la fibre et de la matrice s'expriment donc suivant :

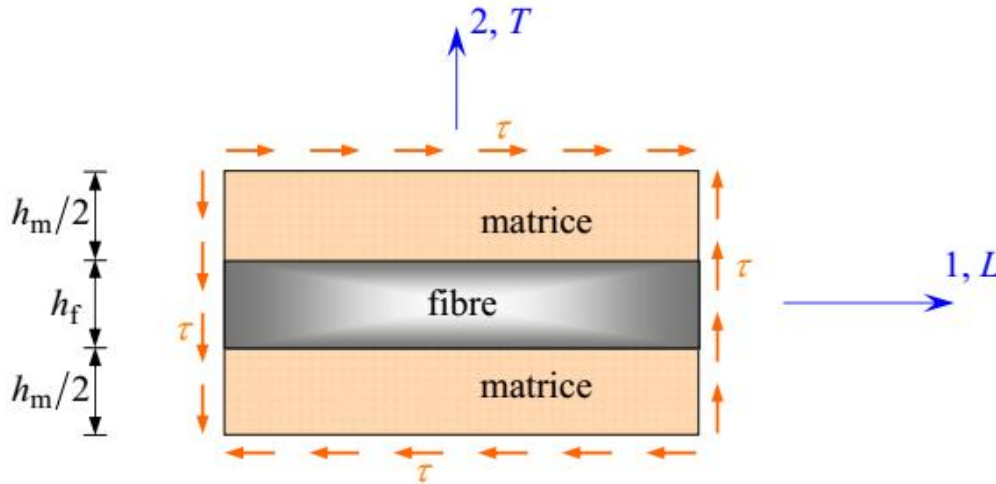


Figure 3-10 : Schéma par couches d'une traction longitudinale.

$$\alpha_f = \frac{\tau}{G_f} \quad \text{et} \quad \alpha_m = \frac{\tau}{G_m}$$

Les déformations induites dans la fibre et dans la matrice (figure 7) sont :

$$\delta_f = h_f \alpha_f \quad \text{et} \quad \delta_m = h_m \alpha_m$$

La déformation totale de la cellule (figure 6) est :

$$\delta = \delta_f + \delta_m = h_f \alpha_f + h_m \alpha_m$$

Et l'angle de cisaillement de la cellule est déterminé par l'expression :

$$\alpha = \frac{\delta}{h_f + h_m} = \alpha_f V_f + \alpha_m (1 - V_f)$$

Cet angle est lié à la contrainte de cisaillement par le module de cisaillement longitudinal

G_{LT} suivant la relation : $\alpha = \frac{\tau}{G_{LT}}$

D'où l'expression du module de cisaillement longitudinal G_{LT} :

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{(1-V_f)}{G_m} \quad (6)$$

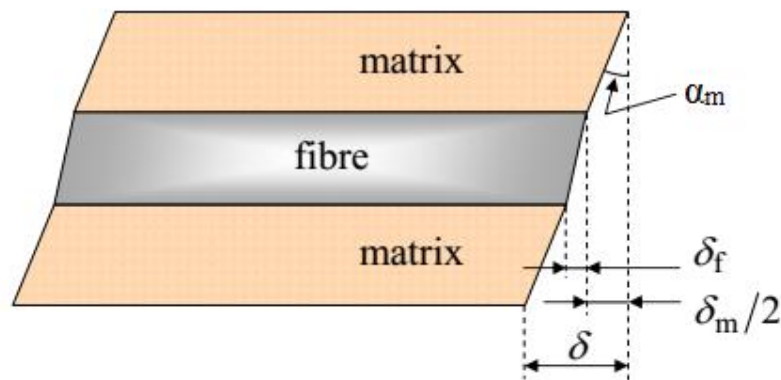


Figure 3-11 : Déformations en cisaillement de la matrice et de la fibre.

6-6- Propriétés de rupture

6-6-1- Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- la rupture des fibres,
- la rupture transverse de la matrice,
- la rupture longitudinale de la matrice,
- la rupture de l'interface fibre-matrice.

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées.

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture intervient lorsque la contrainte de traction (σ_f) dans une fibre atteint la contrainte ultime (σ_{fu}) de la fibre. La rupture de la fibre crée une concentration de contrainte au voisinage de la rupture. La redistribution des contraintes et par conséquent le processus de rupture résultant, dépend principalement :

- de la contrainte à la rupture des fibres
- de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée

- des propriétés de l'interface fibres/matrice

Les figures suivantes montrent les différents processus de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre :

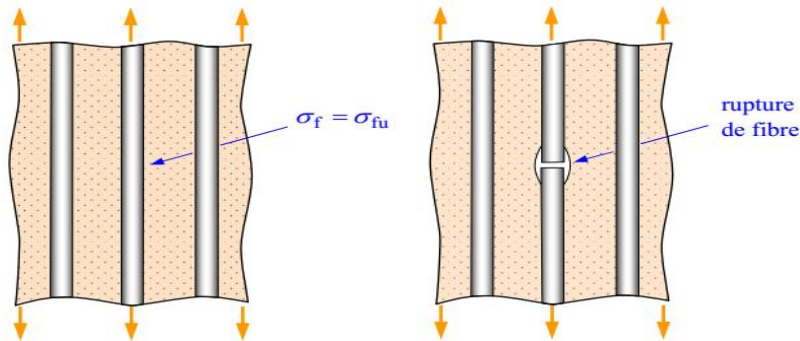


Figure 3-12. Rupture de fibre.

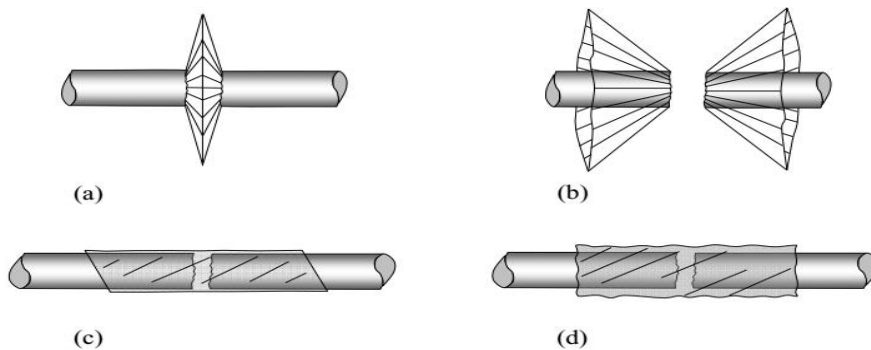


Figure 3-13. Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre.

(a) Rupture transverse de la matrice ; (b) Rupture en cisaillement de la matrice ; (c) Décohésion de l'interface fibre-matrice ; (d) Rupture longitudinale de la matrice.

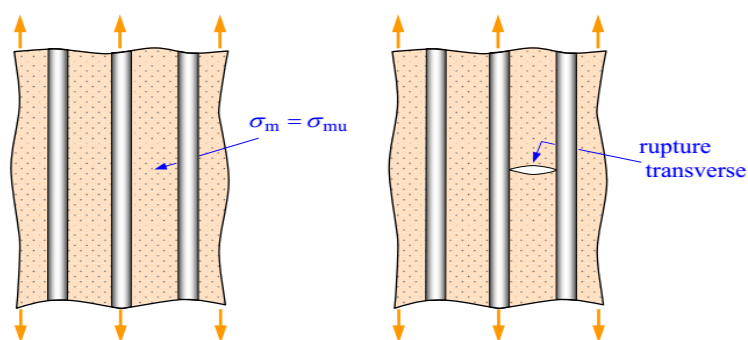


Figure 3-14. Rupture transverse de la matrice.

La fissuration de la matrice peut se produire, soit par fissuration transverse (figure 10) lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice, soit par fissuration longitudinale (figure 11) lorsque la contrainte de cisaillement τ_m dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture τ_{mu} ,

généralement au voisinage d'une fibre. Ce dernier mode de rupture, se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice : $\tau_d > \tau_{mu}$. Dans le cas contraire où $\tau_d < \tau_{mu}$, il se produit une rupture par décohésion de l'interface fibre-matrice (figure 9).

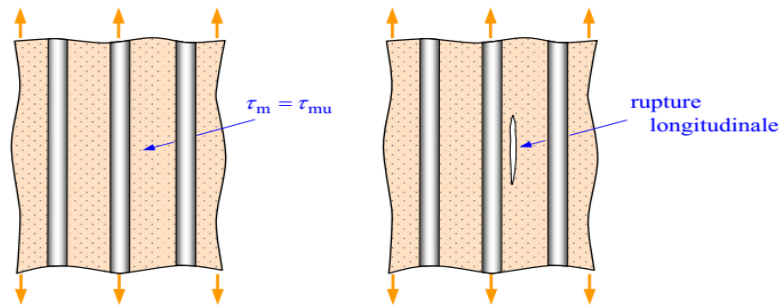


Figure 3-15. Rupture longitudinale de la matrice.

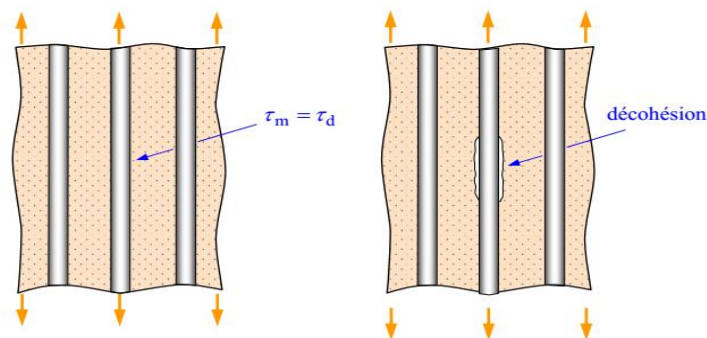


Figure 3-16: Décohésion fibre-matrice.

La rupture finale d'un matériau composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de ces divers mécanismes élémentaires. L'initiation, puis la propagation de la rupture dépendent des propriétés des fibres et de la matrice, de l'interface fibre-matrice, de la fraction volumique des fibres, de l'état et des conditions de sollicitations mécaniques imposées.

6-6-2- Exemple d'un composite unidirectionnel soumis à de la traction:

Le comportement du matériau suivant le classement des propriétés entre fibre et matrice en contrainte et déformation:

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture se produit généralement soit par rupture des fibres lorsque la déformation à la rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice ($\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$), soit par rupture transverse de la matrice dans le cas contraire.

Dans le cas où $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$, les courbes contrainte-déformation sont schématisées sur la figure 10.

Donc:
$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}} (1 - V_f) \quad (7)$$

où σ_{cu} est la contrainte à la rupture du composite, σ_{fu} la contrainte à la rupture des fibres et $(\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}}$ la contrainte dans la matrice pour une déformation égale à la déformation ε_{fu} à la rupture des fibres. La contrainte $(\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}}$ est inférieure à la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice, d'où :

$$\sigma_{cu} < \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}} (1 - V_f)$$

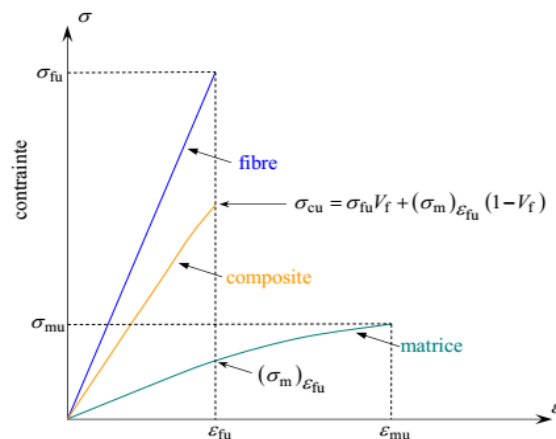


Figure 3-17: Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$.

Dans le cas où la déformation à la rupture de la matrice est inférieure à celle des fibres (figure 11), la contrainte à la rupture est donnée par l'expression :

$$\sigma_{cu} = (\sigma_f)_{\varepsilon_{mu}} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f)$$

Où $(\sigma_f)_{\varepsilon_{mu}}$ est la contrainte dans la fibre au moment de la rupture de la matrice. La valeur de la contrainte à la rupture du matériau composite est alors bien inférieure à celle donnée par l'expression (7). **La matrice ne permet pas dans ce cas de bénéficier totalement du renfort des fibres.** Il apparaît donc nécessaire d'adapter au mieux les propriétés de la matrice à celles des fibres pour optimiser les performances à la rupture des matériaux composites.

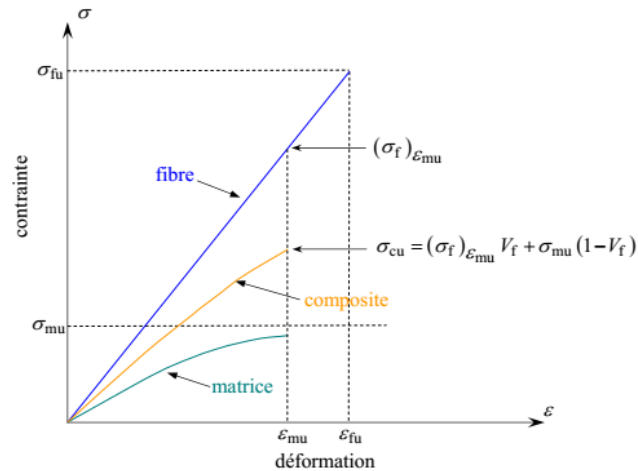


Figure 3-18 : Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\varepsilon_{fu} > \varepsilon_{mu}$.

6-6-3- Propagation de la rupture

Après initiation, la propagation de la rupture diffère suivant la nature de l'interface fibre-matrice. Dans le **cas d'une adhérence fibre-matrice élevée**, la rupture initiée, soit par rupture des fibres, soit par rupture de la matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice (figure 15.a). La rupture observée est de type fragile (figure 15.b). Il est également possible d'observer un pontage, par rupture longitudinale de la matrice ou par décohésion fibre-matrice, de deux fissures initiées dans des zones différentes (figures 15.c et 15.d).

Dans le **cas d'une faible adhérence fibre-matrice**, la propagation transverse de la fissuration peut être schématisée de la manière suivante. En tête de fissure, la rupture de la matrice traverse les fibres (figure 16), sans qu'il y ait rupture des fibres, mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice. Dans certains cas, les concentrations de contraintes en tête de fissure peuvent conduire (figure 16) à une décohésion fibre-matrice avant rupture transverse de la matrice. En arrière, l'ouverture de la fissure induit des contraintes élevées dans les fibres pontant la fissure. Ces contraintes provoquent la rupture des fibres à une distance plus ou moins proche de la surface de rupture.

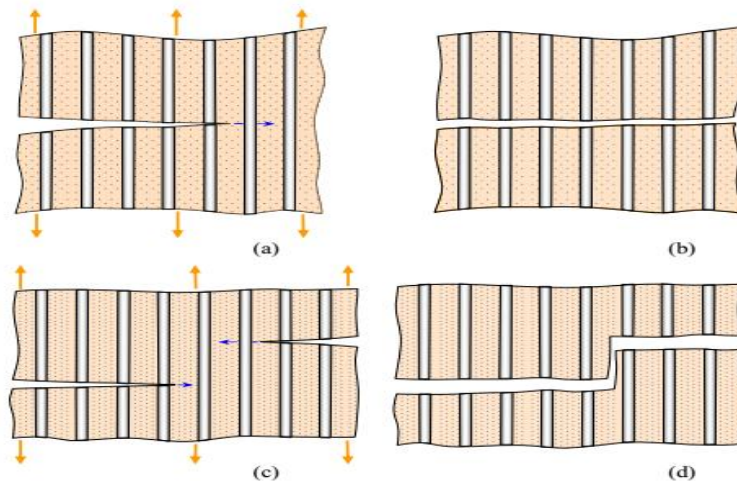


Figure 3-19 : Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre-matrice.

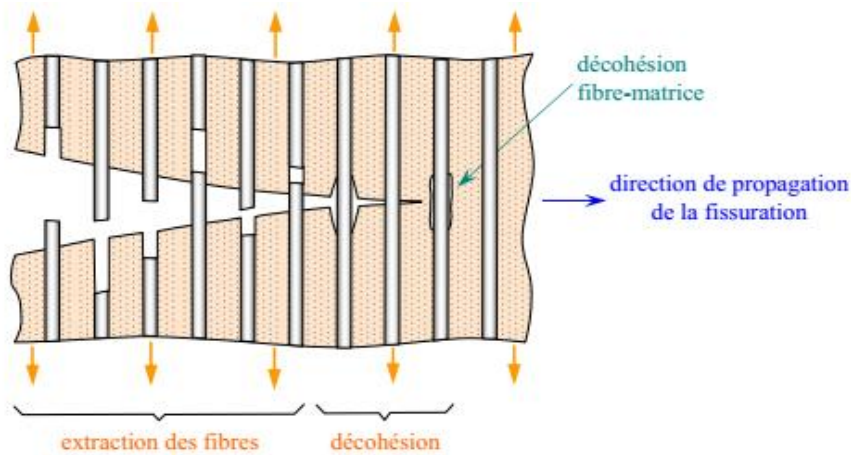


Figure 3-20. Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice.

6-7- Propriétés élastiques d'un composite (cas générale)

Pour définir leurs propriétés mécaniques, les matériaux composites nécessitent un plus grand nombre de caractéristiques que les matériaux classiques.

Une structure composite est en général constituée de plusieurs couches élémentaires. Chaque couche a un seul type de renforcement et les renforts varient en nature et/ou en direction de couche à couche (**anisotropie**). En conséquence, la mécanique des matériaux composites, pour prendre en compte de façon complète ce nombre de paramètres, fait appel au calcul matriciel, pour résoudre numériquement les équations de l'élasticité.

La loi de Hooke, ou la loi d'élasticité linéaire s'écrit :

$$\{\sigma\} = [C]\{\epsilon\}$$

Où $\{\sigma\}$ est le vecteur contrainte, $\{\varepsilon\}$ le vecteur déformation et $[C]$ la matrice de loi de comportement. On peut utiliser aussi la relation inverse : $\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\}$

Où $[S]$ est la matrice de souplesse et $S=C^{-1}$.

Un matériau élastique sans aucune symétrie son comportement élastique est caractérisé par **21 constantes indépendantes**. S'il possède trois plans orthogonaux de symétrie, il est qualifié **d'orthotrope**, le nombre de constantes indépendantes est alors de **9**. Lorsque le matériau est **isotrope transverse** il possède **5 constantes indépendantes**.

Les termes C_{ij} et S_{ij} étant difficilement mesurables, il convient de les exprimer en fonction des modules de Young et des coefficients de Poisson.

La relation d'élasticité linéaire peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \alpha_{23} \\ \alpha_{31} \\ \alpha_{12} \end{Bmatrix}$$

6-7-1- Exemple: cas de composites orthotropes

Les stratifiés sont constitués de couches de matériaux composites unidirectionnels ou de composites à base de tissus. Généralement, les tissus sont constitués de fils unidirectionnels croisés à 90° : les uns dans le sens chaîne, les autres dans le sens trame. Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope. Les directions principales (1, 2) seront prises respectivement suivant la direction chaîne et la direction trame ; ces directions seront également notées L et T (figure 17). La direction 3 orthogonale au plan de la couche sera également notée T'.

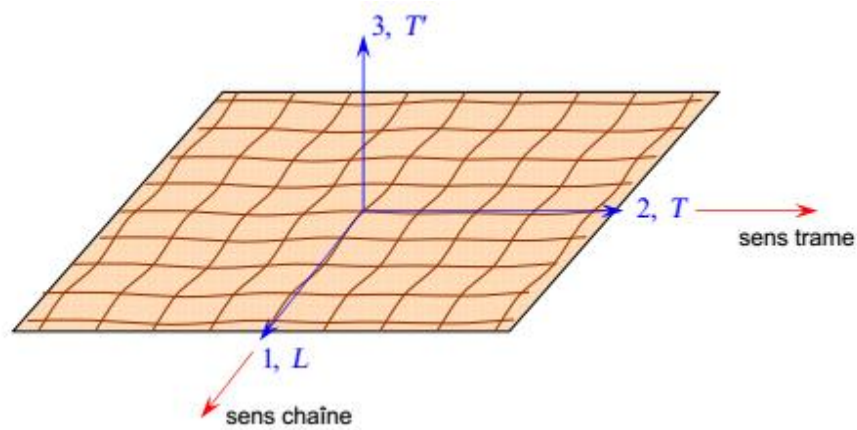


Figure 3-21 : Couche de matériau composite orthotrope.

Le comportement élastique d'un matériau composite orthotrope est déterminé entièrement par la connaissance de neuf coefficients :

- 3 modules d'Young : E_1, E_2, E_3
- 3 coefficients de Poisson : $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$
- 3 modules de cisaillements : G_{12}, G_{13}, G_{23}

La matrice de souplesse est donnée sous la forme suivante :

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

Ces modules peuvent être mesurés dans des essais particuliers.

6-8- Dimensionnement d'une section de poutre renforcée par matériau composite

6-8-1- Renforcement en flexion :

De façon générale, le renfort de composite en flexion est appliqué sur la face inférieure tendue d'une poutre. Ceci permet d'augmenter la résistance en tension dans la partie inférieure de la poutre qui sera contrebalancée par le béton en compression dans la partie supérieure. Par conséquent, le moment résistant est amélioré. Dans la figure 13, on peut voir un renforcement typique d'une poutre en béton armé en utilisant une plaque de composite. Une poutre en béton armé renforcée en flexion avec des composites. En effet, l'ajout d'une plaque en composite sur la face tendue d'une poutre permet d'améliorer sa résistance en flexion de façon significative.

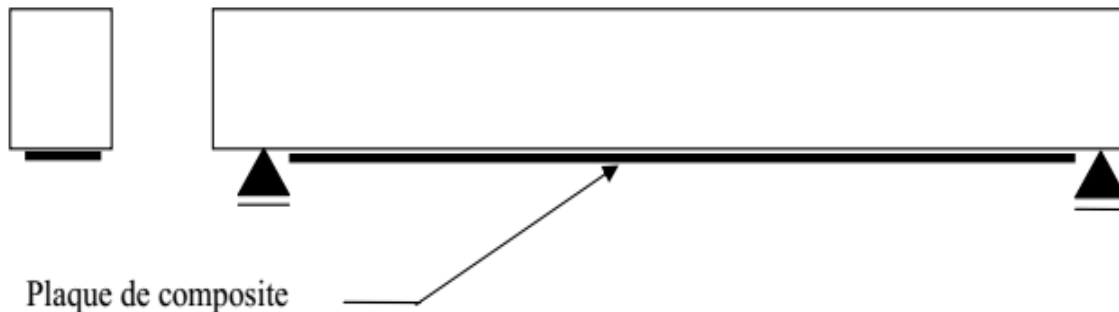


Figure 3-22 : Renforcement type en flexion.

6-8-2- Principe de dimensionnement en flexion

Le calcul des structures en béton armé renforcées par les matériaux composites se fait selon les règles et les principes du BAEL91. La vérification s'appuie sur les hypothèses fondamentales du calcul du béton armé, à savoir:

- Les déformations des différents matériaux sont petites et varie linéairement le long de la hauteur de la poutre.
- Les sections droites restent planes après déformation.
- La résistance en tension du béton est négligée.
- La résistance en compression des aciers est négligée.
- L'adhérence est parfaite entre le béton et les aciers d'armatures et le composite, Donc on néglige le glissement éventuelle a l'interface poutre-plaque.

6-8-3- Dimensionnement

Dans le cas des structures renforcées par matériaux composites, le dimensionnement à l'ELU est réalisé en définissant la résistance ultime de chacun des matériaux :

f_{bu} , f_{su} , f_{cu} : contrainte ultime reprise par le béton, les aciers, le composite

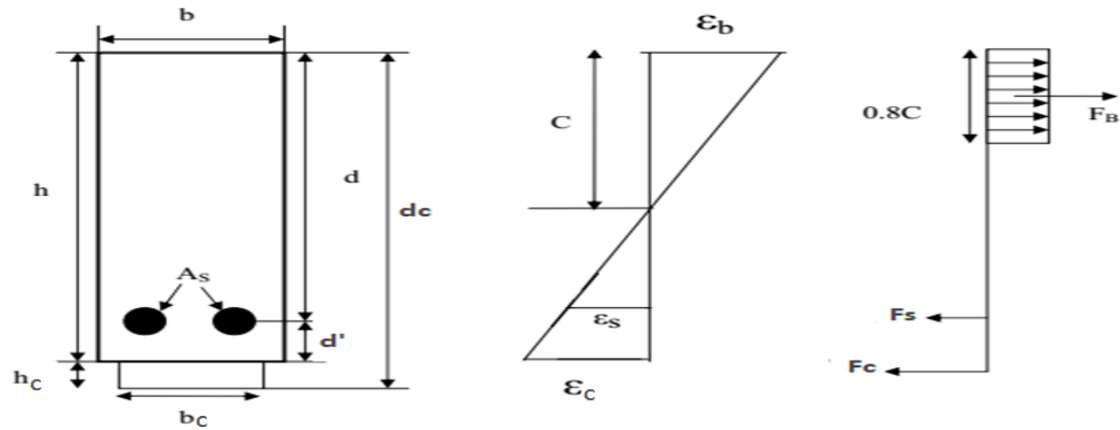


Figure 3-23 : .Différent efforts dans la section du béton

On a deux inconnues, la section du composite et la position de l'axe neutre et à partir d'équilibre des forces et l'équilibre des moments on peut déduire les deux.

5-8-3-1- Equilibre des forces :

$$F_b = F_s + F_c$$

Avec:

$$F_b = 0.8 \cdot b \cdot c \cdot f_{bu} \text{ (force reprise par le béton)}$$

$$F_s = A_s \cdot \sigma_s \text{ (force reprise par les aciers)}$$

$$F_c = A_c \cdot \sigma_c \text{ (force reprise par le composite)}$$

D'après la figure ci-dessus on peut s'exprimer les déformations dans l'acier en tension ε_s , dans la plaque de composite ε_c en fonction de la déformation dans le béton ε_b :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_b \left(\frac{d - c}{c} \right)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_b \left(\frac{d_c - c}{c} \right)$$

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad \text{et} \quad \sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c$$

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

$$c = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A}$$

$$A = 0.8 \cdot b \cdot f_{bu}$$

$$B = A_c \cdot E_c \cdot \varepsilon_c - A_s \cdot \sigma_s$$

$$D = A_c \cdot E_c \cdot \varepsilon_c \cdot d_c$$

5-8-3-2- Equilibre des moments :

$$M_{soll} < M_R = 0.8 \cdot b \cdot f_{bu} \cdot c \cdot (d - 0.4c) + A_s \cdot \sigma_s \cdot (d - c) + A_c \cdot \sigma_c \cdot (d_c - c)$$

Avec M_R est le moment résistant

5-8-3-3- Organigramme de calcul :

Le calcul se fait par itération pour obtenir la section correspondante qui vérifie la condition suivante $M_{soll} \leq M_R$

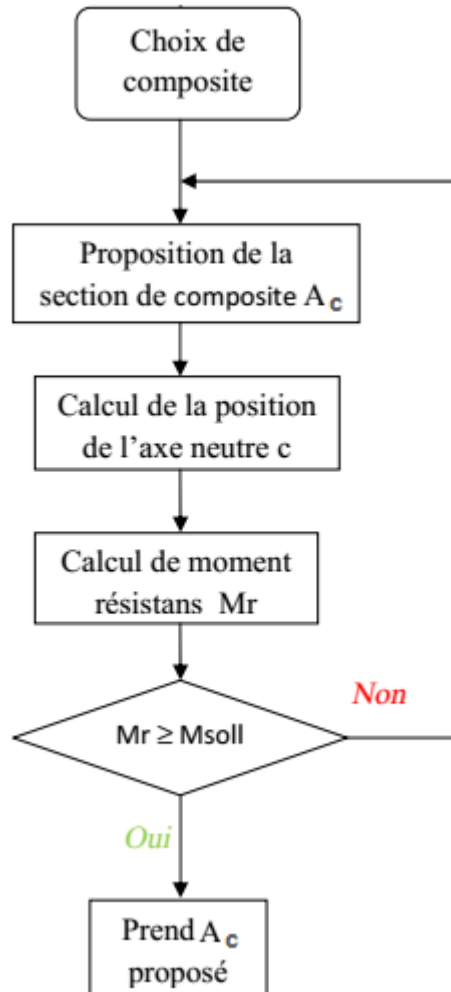


Figure 3-24 : Organigramme de calcul

5-8-3-4- Renforcement en cisaillement:

Deux techniques principales pour renforcer une poutre en cisaillement font appel aux matériaux composites, à savoir l'installation de bandes sur ses parois verticales, ou de bandes en forme de U autour de la section. Ces renforts de composite, qui peuvent être continus ou discontinus, sont illustrés à la figure 14.

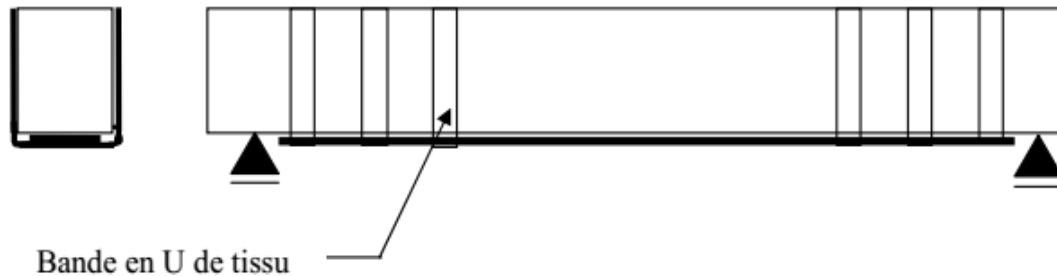


Figure 3-25 : . Renforcement type cisaillement.

5-8-3-5- Dimensionnement en cisaillement :

Le calcul de la contrainte dans le composite s'appuie sur une approche de type B.A.E.L91 en retenant l'hypothèse du treillis (inclinaison à 45° des fissures d'effort tranchant) et on fixe à 10 cm la longueur minimale de collage permettant de considérer la fissure inclinée à 45° comme cousue de manière efficace par le composite. Ainsi, on ne prend pas en compte dans le calcul les derniers 10 cm à chaque extrémité du collage.

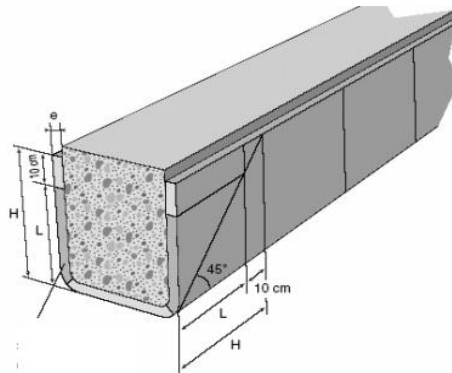


Figure 3-26 : Section de tissu retenu pour le dimensionnement

On admet par hypothèse que le composite doit équilibrer l'intégralité de l'effort tranchant non repris par le béton et les aciers existants.

Si on note V_{soll} : l'effort tranchant ultime total dans la section de poutre considérée

$V_{b,a}$: l'effort tranchant ultime repris par la structure existante,

V_c : l'effort tranchant repris par le composite s'exprime par : $V_c = V_{SOLL} - V_{b,a}$

Le composite doit donc reprendre une contrainte notée σ_c qui vaut :

$$\sigma_c = V_c / A_c$$

Où A_c représente la section utile du composite

- **Section utile de composite :**

Dans une section donnée de la poutre à renforcer, la section utile du composite qui assure la reprise de l'effort tranchant est donnée par : $A_c = 2.e.L$

e : étant l'épaisseur nominale du composite

L : la longueur utile de collage. Selon la configuration du renforcement, la longueur utile de collage retenue dans le calcul s'exprime de 2 manières différentes :

- Dans le cas d'un enveloppement partiel sur les faces latérales (cas n° 1) elle s'exprime par : $L = H - 2 \times 0,10 \text{ m}$
 H : étant la hauteur sur laquelle est appliquée le composite (en général, la retombée de la poutre).
- Dans le cas d'un enveloppement total en forme de U (Cas n° 2) elle s'exprime par:
 $L = H - 0,10 \text{ m}$

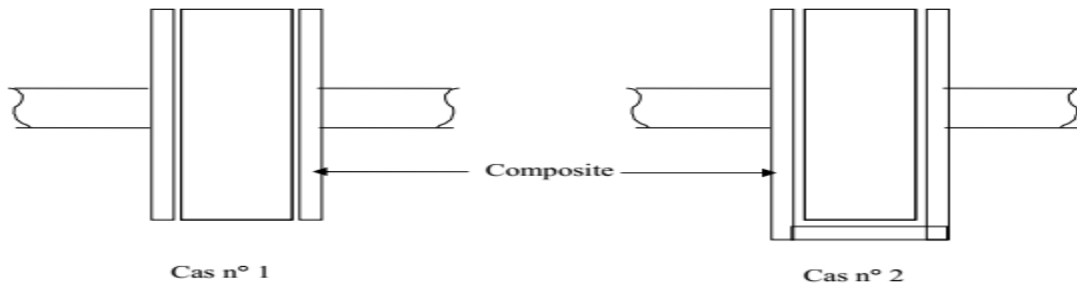


Figure 3-27 : Les dispositions de tissu sur la poutre

La section utile du composite s'exprime donc par :

- Cas n° 1 : $A_c = 2 \cdot e \cdot (H - 0,20)$
- Cas n° 2 : $A_c = 2 \cdot e \cdot (H - 0,10)$

De façon conventionnelle, l'épaisseur nominale d'une couche de tissu est définie par $e = 0,45 \text{ mm}$.

- **Vérification la contrainte à l'effort tranchant :**

L'effort tranchant excédentaire V_c à reprendre par le composite étant connu, il faut déterminer si une couche de tissu (qui donne une section de composite A_c est suffisante pour que la contrainte engendrée au sein du composite σ_c , soit inférieure à la contrainte limite σ_{cu} :

$$\sigma_c = V_c / A_c < \sigma_{cu}$$

Si ce n'est pas le cas réitérer le calcul avec **2**, puis **3**, couches de tissu...

Il y a lieu d'appliquer le renforcement sur toute la longueur de la poutre où l'effort tranchant sollicitant est supérieur à la capacité portante du béton et des aciers existants.

- **Calcul de l'espacement:**

L'espacement est calculé selon la règle de CAQUOT (B.A.E.L 91) : Le placement du première bande $a (S_c/2)$ du nu de l'appui ;

On calcule l'espacement minimal S_c et pour les autres espacements on utilise la suite des valeurs ci-dessous : 7-8-9-10-11-13-16-20-25-35-40 en cm.

6-9- Dispositions constructives pour le béton armé renforcé par Tissu de fibres de carbone :

6-9-1- Repérage et orientation des bandes

Le repérage de TFC sur plan se fait par un symbole à 2 flèches indiquant l'orientation de la chaîne (sens de la résistance) (70% de fibres) et de la trame 30% des fibres.

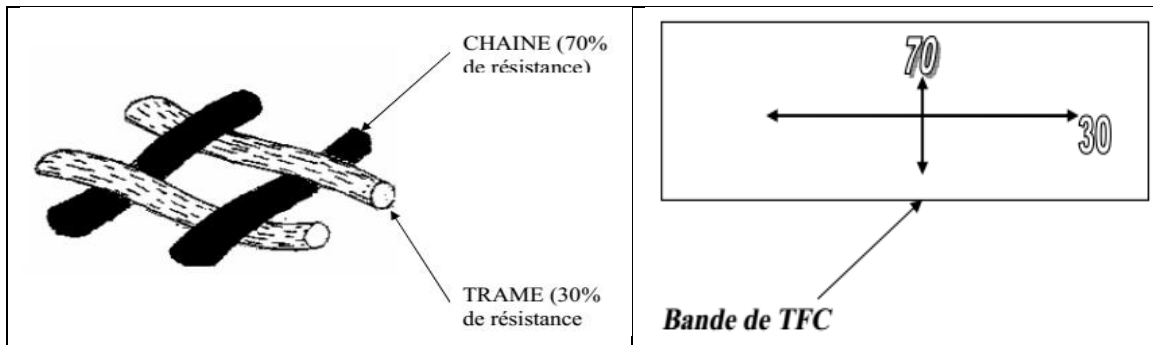


Figure 3-28 : Le repérage de TFC

6-9-2- Superposition des couches et recouvrement :

5-9-2-1- Superposition

La superposition des couches peut se faire sur couche de résine humide ou après durcissement du composite.

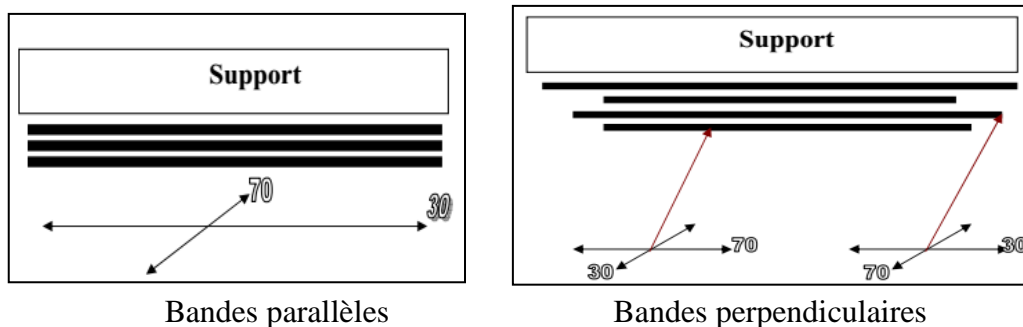


Figure 3-29 : superposition des couches

5-9-2-2- Recouvrement :

On appelle recouvrement la longueur nécessaire de tissu superposé pour assurer la continuité des bandes interrompue et prolongée par une autre. Les recouvrements s'appliquent longitudinalement et transversalement.

Le recouvrement peut alors être réalisé soit sur une couche de résine encore humide ou sur une couche de résine durcie.

- Sur la couche de résine humide : Le tissu en recouvrement peut être appliqué directement sur la couche de finition.
- Sur une couche de résine durcie la zone de recouvrement doit être dépolie au moyen d'un papier abrasif et nettoyé à l'aide d'un chiffon avant d'appliquer une couche de collage sur laquelle sera posé le tissu.

- **Transversalement:**

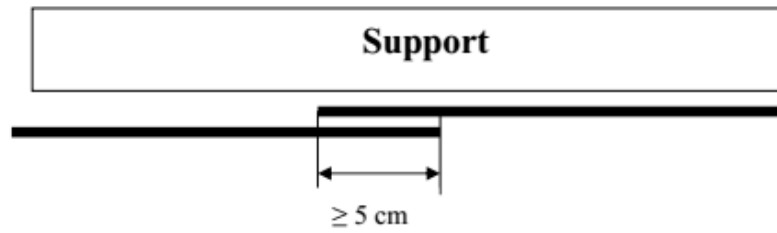


Figure 3-30 : recouvrement transversalement

- **Longitudinalement**

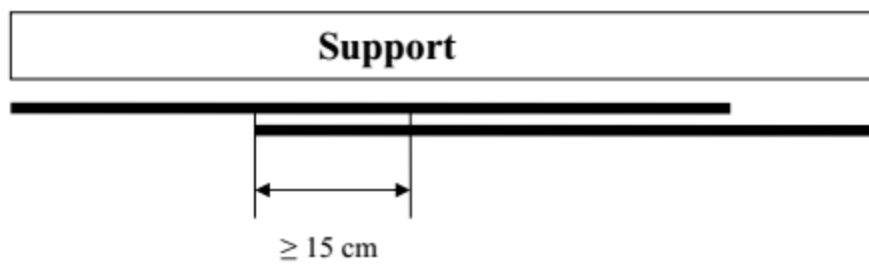


Figure 3-31 : recouvrement longitudinalement

- **Courbures**

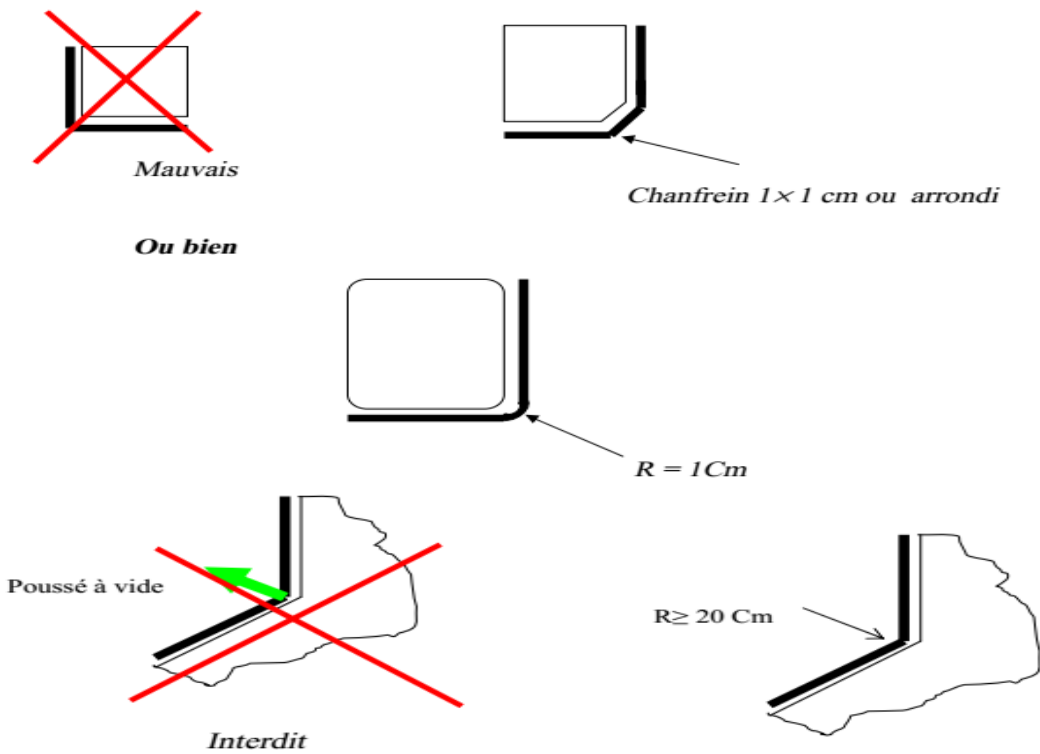


Figure 3-32 : traitement les courbures

Chapitre 04 :

Renforcement des poutres par matériaux composites

Titres de Chapitre 04 :

- 1- Présentation de l'ouvrage**
- 2- Vérification le structure**
- 3- Déscente des charges**
- 4- Vérification les éléments de structure**
- 5- Les caractéristiques des matériaux utilisés**
- 6- Calcul de la section de la composite**
- 7- Cas Exceptionnel**
- 8- MISE EN OEUVRE**

1- Présentation de l'ouvrage :

L'institut de formation professionnelle Amamra Bachir situé dans un quartier administratif au nord de cité 8 mai commune d'El-oued en face la route principale RN48 (voir la fig 4.1) ; Sa construction remonte au début de l'année 1997, conçu et suivi par bureau d'étude polytechnique (300 logt- El-oued) ; Les parties étudiées a été enseignées avec un cadre rouge (voir la fig 4.2) et comprend trois structures l'atelier, laboratoire et bloc de maintenance .

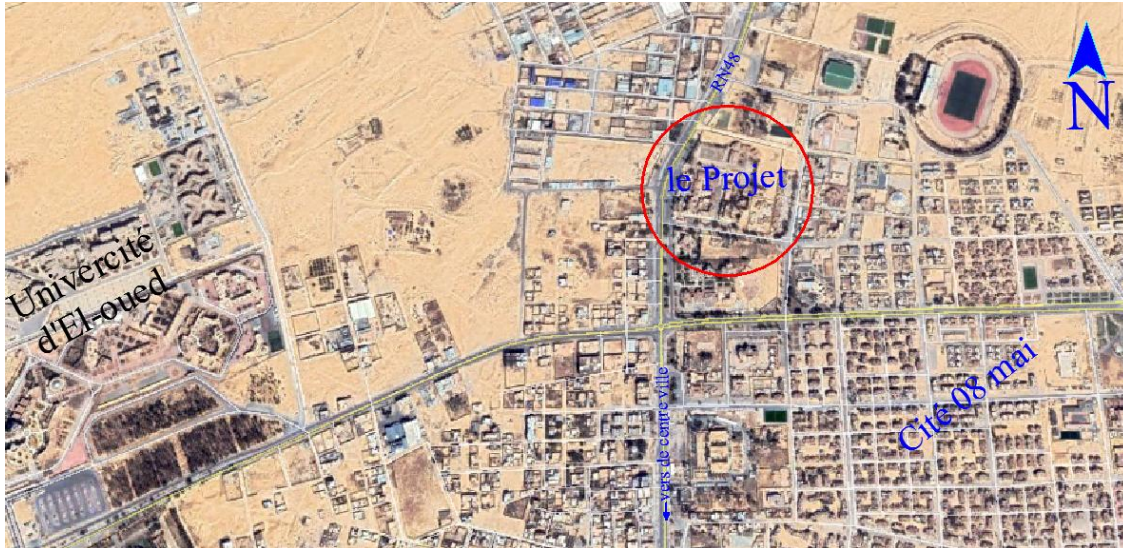


fig 4.1 Photo plan de situation de l'institut



fig 4.2 Photo plan de masse de l'institut

- **Atelier :** Atelier : structure en béton armé (RDC) sous forme rectangle de surface (21.70× 13.00)m² ; La structure est composée de quatre (04) portiques transversaux de porté 12.70 m avec hauteur constant 5.50 m (fig 4.3) .

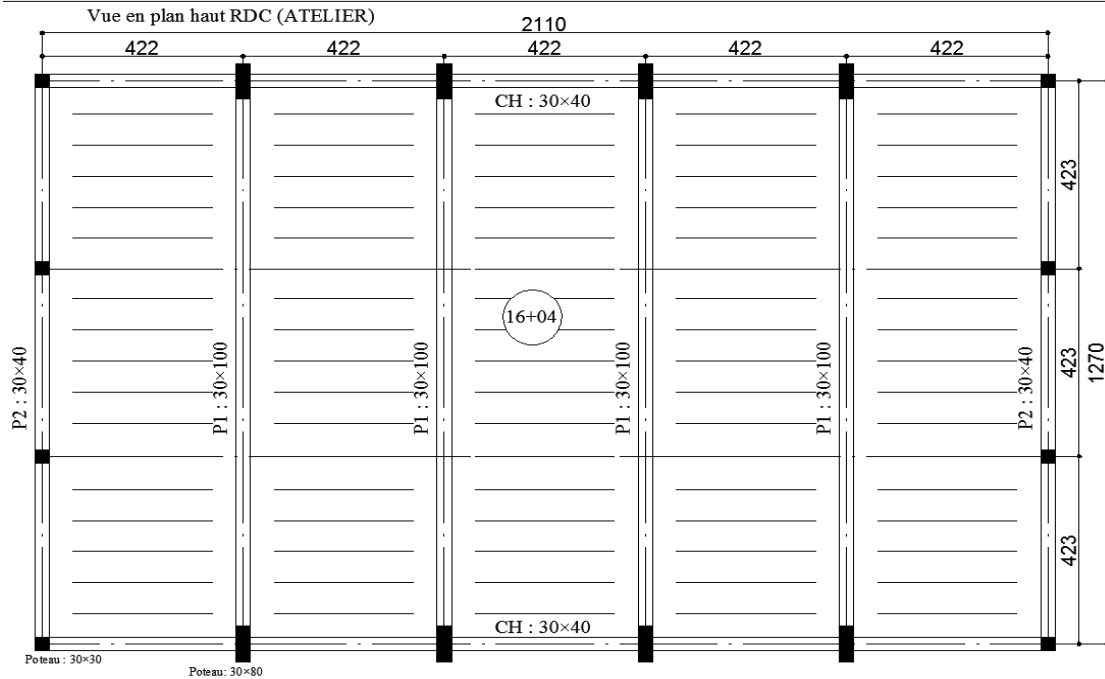


fig 4.3:Vue en plan haut RDC



fig 4.4:l'Atelier a l'exterieur

- Bloc de Maintenance : structure en béton armé (R+1) sous forme rectangle de surface $(10.80 \times 36.60) \text{ m}^2$; il se compose de deux joints $(10.80 \times 18.30) \text{ m}^2$; chacun comprend de quatre (04) portiques transversaux de porté 10.25 m avec hauteur constant 7.50 m .
fig 4.4

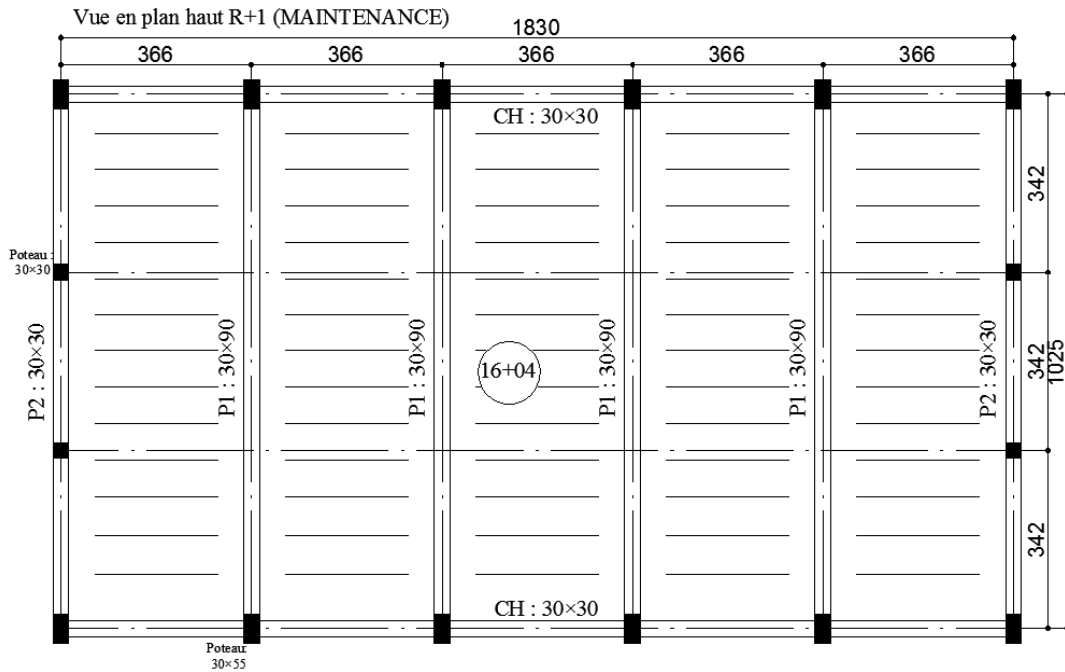


fig 4.5:Vue en plan haut R+1



fig 4.6: bloc de maintenance a l'exterieur

- Laboratoire: structure en béton armé (R+1) sous forme rectangle de surface $(13.30 \times 9.30) \text{ m}^2$; La structure est composée de trois (03) portiques transversaux de porté 9.00 m avec hauteur constant 7.50 m fig 4.5.

Vue en plan haut R+1 (LABORATOIRE)

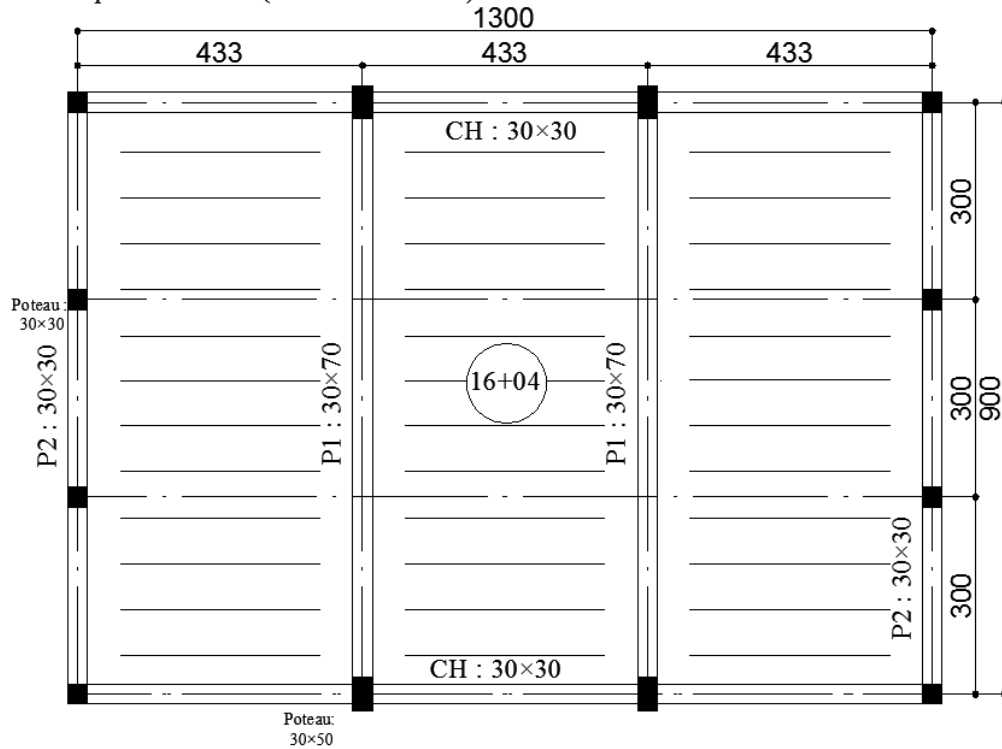


fig 4.7:Vue en plan haut R+1



fig 4.8: l'Aboratoir a l'exterieur

Ces charpentes réaliser en béton armé coulée en place , et surmontée d'un plancher, conçu en corps creux d'épaisseur $(16+4) \text{ cm}$.

La structure repose sur un sol sableux (Contacte avec les vieux employeurs) les fondations sont au moins 2 m de profondeur .

2- Vérification le structure :

L'examen visuel globale permet de ne rien dire de négatif (Fissuration – Écaillage – Détérioration – Corrosion des armatures , ...) dans auquelles points des défférents structures (au niveaux d'appuis , les murs inrterieurs et extérieurs , les intersections , système de drainage au toiture) , Il n'y a donc aucune détérioration de la structure .

Mais il faut soutenir ce résultat, avec un teste directe sur le corps de béton pour avoir une idée de la résistance du béton de notre projet .

Essai d'Ultrasons :

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

Le tableau suivant résume les résultats de site pour les poteaux de chaque structure :

- **Date d'essais** : 08/05/2019
- **Age de béton** > 28 jours.

Eléments	D (cm)	T (μ s)	Vitesse (m/s)
<u>Atelier</u>			
Poteau 1	29.76	64.84	4589.80
Poteau 2	29.59	71.19	4155.92
<u>Maintenance</u>			
Poteau 1	28.99	74.73	3879.62
Poteau 2	31.43	73.50	4276.55
<u>Labo</u>			
Poteau 1	30.12	75.02	4015.30
Poteau 2	28.74	72.48	3965.25

Tableau 4-1 : resultat d'Essai d'Ultrasons

<u>V(m/s)</u>		Recommandation
Min	Max	

2500	3200	béton de faible résistance
3200	3700	béton de qualité moyenne
3700	4200	béton de haute résistance
4200	plus	béton très haute résistance

La Conclusion En observant sur site et les résultats de l'expérience sur l'éléments ,donc notre construction est en bonne état .

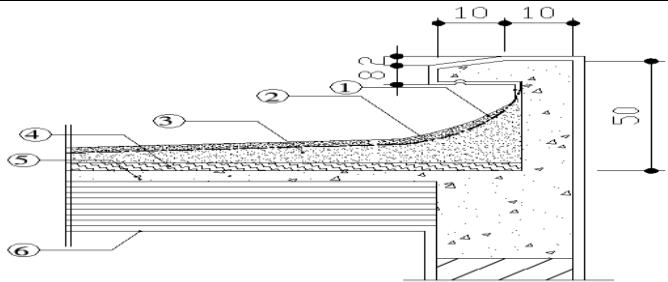
Mais quel est le but de renforcement la structure ?

Au cours de l'année 2018, le ministère du Logement a envoyé une directive visant à changer l'Étanchiété du courant au saharienne, afin de réduire le coût matériel des nouveaux projets à mesure que la colonie sahraouie est complétée à partir de matériaux locaux , Et comment cela se passera-t-il avec les anciennes structures, où l'étanchiété est des éléments les plus dégradés

3- Déscente des charges

Avant l'avancement de calcul section lamelle de PRF il faut déterminer le moments et l'armatures de chaque poutres pour les charges actuel et aussi les charge nouvelle , et il faut d'abord commencer à la descente des charges (juste pour terrasse inaccessible)

a. Plancher avec Etanchiété actuel



1-Gravillons de protection (e = 4 cm)	$0.04 * 2000 = 80 \text{ kg/m}^2$
2-Étanchéité multicouches	$0.02 * 600 = 12 \text{ kg/m}^2$
3-Forme de pente (e = 8 cm)	$0.08 * 2200 = 264 \text{ kg/m}^2$
4-Isolation en liège (e = 4 cm)	$0.04 * 400 = 16 \text{ kg/m}^2$
5- Corps creux + table de compression (16+4)	280 kg/m^2
6-Enduit en plâtre (1.5 cm)	$0.015 * 1000 = 15 \text{ kg/m}^2$
	$G = 579 \text{ kg/m}^2 \approx 6 \text{ KN/m}^2$
	$Q = 100 \text{ kg/m}^2$

Fig 4-9: détail d'Etanchiété actuel

b. Plancher avec Etanchiété saharienne

1- corps creux +dalle de compression (16+4)+ Enduit en plâtre	295 kg/m ²
2- mortier batard ep 5cm	0.05*2200 = 110 kg /m ²
3- isolation thermique de couche sable fin ep 5cm pente 2 %	0.05*1700 = 85 kg/m ²
4- couche Gravillon 3/8 (5cm)	0.05*1700 = 100 kg/m ²
5- béton arme 350kg/m ³ avec TS Ø4 200x200 ep 6 cm	0.06*2500 = 150 kg/m ²
6- deux couche croise de badigeonage a la chaux	/
	G = 740 kg/ m² ≈ 7.50 KN/m²
	Q = 100 kg/m²

Fig 4-10 : détail d'Etanchiété saharienne

Notez qu'il y a une augmentation de charge permanent d'environ 150 kg/m² = **1.50 KN/m²**

4- Vérification les éléments de structure

Poteaux :

Local	Poteau	Nd (KN)	Bc (m ²)	λ	A (cm ²) Théorique	A (cm ²) Existante	Observation
Atelier	30x80	256.29	0.24	37.20	6.40	8T16+2T14	Vérifier
Maintenance	30x55	635.48	0.165	32.91	6.80	6T16+2T14	Vérifier
Laboratoire	30x50	617.30	0.15	38.83	6.40	6T14+2T12	Vérifier

Poutres :

Poutre	Comb i	V _{MAX} KN	M (Appuis) KN.m	A (cm ²) Calcule r	A (cm ²) Existan t	Observat ion	M (Travée) KN.m	A (cm ²) Calcule r	A (cm ²) Existante	Observat ion
Terrasse avec Etanchiété actuel										
30x100	ELS									
	ELU	/	/	/	4T16+8T14 = 20.36	/	/	/	8T20+8T16+4T14 = 47.38	/
30x90	ELS							/		
	ELU	/	/	/	3T16+3T14 = 10.65	/	/		6T20+6T16 = 30.90	/
30x80	ELS							/		
	ELU	/	/	/	3T16+3T14 = 10.65	/	/		6T20+3T16+3T14 = 29.50	/
Terrasse avec Etanchiété saharienne										

30×100	ELS		-363.00				508.42			
	ELU	350.97	-495.36	11.63	/	l'armature existant suffisant	693.81	51.82	/	l'armature existant insuffisant
30×90	ELS		-123.55				371.89			
	ELU	249.71	-168.60	3.81	/	l'armature existant suffisant	507.47	32.49	/	l'armature existant insuffisant
30×80	ELS		-103.21				328.74			
	ELU	247.50	-140.91	3.48	/	l'armature existant suffisant	448.80	34.83	/	l'armature existant insuffisant

Tableau 4-2 resultats de calcules les moments et l'armatures des poutres

Selon les résultats indiqués dans les tableaux ci-dessus dans les deux cas pour chacune des poteaux et des poutres, outre l'armement adopté dans les sections originales, il est noté que l'armature inférieur (l'armature tendu) des poutres est déficient et doit être corrigé .

Autre chose et pour plus de securité nous considérons il y a un peut dégradation de béton donc nous prend la résistance à la compression $f_{c28} = 18$ MPa.

5- Les caractéristiques des matériaux utilisés :

Le béton armé se compose de béton et d'armatures. Il ne représente pas une bonne résistance à la traction ou au cisaillement, l'acier offre une bonne résistance aux efforts de traction, de l'association de ces deux matériaux, il résulte un matériau composite dans lequel chacun répond au mieux aux sollicitations aux quelles il est soumis.

5-1- Béton :

5-1-1- Composition du béton :

On appelle dosage le poids du liant employé pour réaliser un mètre cube de béton.

Dans notre ouvrage le béton est réalisé avec des mélanges contenant :

Gravier (5/25)	Sable (0/5)	Ciment (CPA)	Eau
800 ℓ	400 ℓ	350 kg	175 ℓ

Il existe plusieurs méthodes de préparation basées sur la granulométrie parmi lesquelles la méthode de DREUX-GORISSE.

5-1-2- Caractéristiques physiques et mécaniques du béton

- **La masse volumique** : La masse volumique des bétons est comprise entre 2200 et 2400 kg/m³ Cette masse volumique peut augmenter avec la modalité de mise en oeuvre, en particulier avec la vibration.

- **Le retrait** : C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement.
- **La dilatation** : puisque le coefficient de dilatation thermique du béton est évalué à 10^{-5} , pour une variation de $\pm 20^\circ\text{C}$ on obtient :

$$\Delta L = \pm (2/1000) \times \text{longueur}$$

- **Le fluage** : C'est le phénomène de déformation provoquée dans le temps sous une charge fixe constamment appliquée.

- **La résistance :**

- **La résistance à la compression :**

Pour $j < 28$ jour : $f_{cj} = 0,685 \times f_{c28} \log(j+1)$

Pour $j > 28$ jour : $f_{cj} = 1,1 \times f_{c28}$

Pour notre cas : **$f_{c28} = 18 \text{ MPa}$**

- **La résistance à la traction** : $f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$ Pour $j > 28$ jour : $f_{cj} = 1,1 f_{c28}$

Pour notre cas : **$f_{t28} = 1.68 \text{ MPa}$**

- **L'élasticité :**

Le module d'élasticité E est défini par le rapport :

$$E = (\text{contrainte unitaire} / \text{déformation relative})$$

- Pour un chargement d'une durée d'application < 24 h :

$$E_{ij} = 11000 \times f_{cj}^{1/3}$$

- Pour un chargement d'une durée d'application > 24 h :

$$E_{vj} = 3700 \times f_{cj}^{1/3}$$

Pour notre cas : **$E = 32100 \text{ MPa}$**

- **L'effet « Poisson » :**

La déformation longitudinale est accompagnée d'une déformation transversale, le coefficient de poisson est le rapport :

$$\nu = (\text{déformation transversale} / \text{déformation longitudinale})$$

$\nu = 0,2$: Pour le calcul des déformations (ELS).

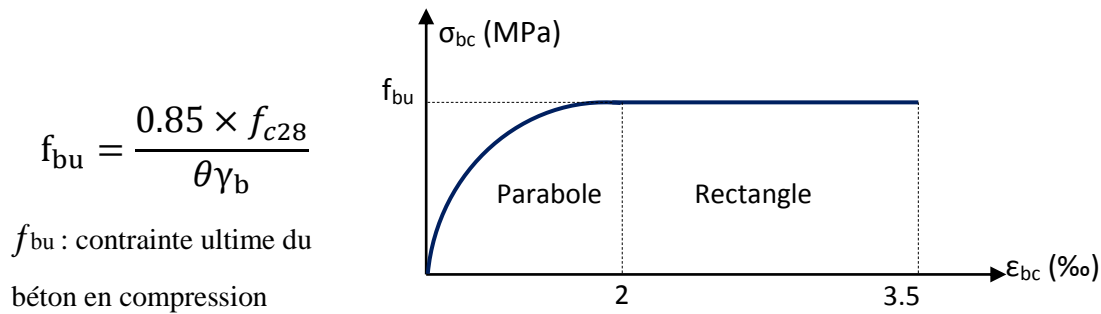
$\nu = 0,3$: Pour le calcul des déplacements (ELU).

5-1-3- Diagramme contrainte - déformation :

a. Etat limite ultime ELU :

✓ Contrainte ultime de béton :

Pour le calcul à l'E.L.U on adopte le diagramme parabole- rectangle suivant :



γ_b : Coefficient de sécurité $\left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 1.5 \text{ en situations durables ou transitoires.} \\ \gamma_b = 1.15 \text{ en situations accidentelles} \end{array} \right.$

$$\gamma_b = 1.5 \quad \Longrightarrow \quad f_{bu} = 10.20 \text{ MPa}$$

$$\gamma_b = 1.15 \quad \Longrightarrow \quad f_{bu} = 13.30 \text{ MPa}$$

Le coefficient θ est fixe à 1 lorsque la durée probable d'application de la combinaison d'action considérée est supérieure à 24h, à 0.9 lorsque cette durée est comprise entre 1h et 24h, et à 0.85 lorsqu'elle est inférieure à 1h

✓ Contrainte ultime de cisaillement :

La contrainte ultime de cisaillement est limitée par : $\tau \leq \bar{\tau}$

Avec : $\tau = \min(0.13 f_{c28}; 4 \text{ MPa}) = 2.34 \text{ MPa}$: cas normal (fissuration peu nuisible)

$\tau = \min(0.10 f_{c28}; 3 \text{ MPa}) = 1.8 \text{ MPa}$: cas où la fissuration est préjudiciable

B. Etat limite de service ELS :

Dans le cas de l'ELS on suppose que le diagramme parabole rectangle reste dans le domaine élastique linéaire, est défini par son module d'élasticité.

La contrainte limite de service en compression du béton est limitée par :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser} \times C}{I} \leq \bar{\sigma}_{bc} = 0.6 \times f_{c28} \quad \Longrightarrow \quad \sigma_{bc} = 10.80 \text{ MPa}$$

5-2- Acier

5-2-1- Définition :

L'acier est un alliage fer-carbone en faible pourcentage, son rôle est d'absorbé les efforts de traction, de cisaillement et de torsion, on distingue deux types d'aciers :

- Aciers doux ou mi-durs pour 0.15 à 0.25 % de carbone.
- Aciers durs pour 0.25 à 0.40 % de carbone.

Le module d'élasticité longitudinal de l'acier est pris égale à : $E_s = 200000$ MPa.

5-2-2- Types d'acier :

Valeur de la limite d'élasticité garantie f_e

- Barres lisses (RL) Fe E 235
- Barre à hautes adhérences (HA) Fe E 40
- Treillis soudé de diamètre 6 hautes adhérences Fe E 215

5-2-3- Contraintes limites :

a. Contraintes limites à l'ELU :

$$\sigma_s = f_e / \gamma_s \quad \text{aciers naturels}$$

$$\sigma_s = 1.1 f_e / \gamma_s \quad \text{aciers écrouis}$$

Avec : γ_s : Coefficient de sécurité dépend de type de situation

$$\gamma_s = 1.15 \quad \text{en situation courante} \quad \sigma_s = 348 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = 1 \quad \text{en situation accidentelle} \quad \sigma_s = 400 \text{ MPa}$$

b. Contrainte limite de service :

Les contraintes limites de l'acier σ_s sont données en fonction de l'état limite d'ouverture des fissures .

$$\left. \begin{array}{l} \text{-Fissuration peu nuisible} \\ \text{-Fissuration préjudiciable} \end{array} \right\} \bar{\sigma}_s \leq \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max(240; 110 \sqrt{\eta \times f_{tj}}) \right\}$$

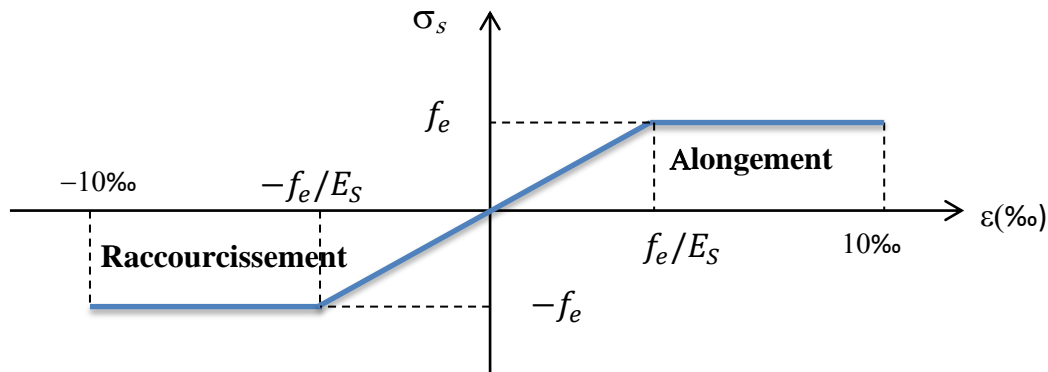
$$\text{-Fissuration très préjudiciable} \quad \bar{\sigma}_s \leq \min \left\{ \frac{1}{2} f_e; 90 \eta \times f_{tj} \right\}$$

η : Coefficient de sécurité dépend de l'adhérence

η : 1 pour les aciers (RL).

η : 1,6 pour les aciers (HA).

5-2-4- Diagramme de déformation - contrainte :



Nous aurons donc $\sigma_s = f_e / \gamma_s = 400 / 1.15 = 348 \text{ Mpa}$.

Traction

Compression

Cisaillement

Durabilité

Résistance au feu

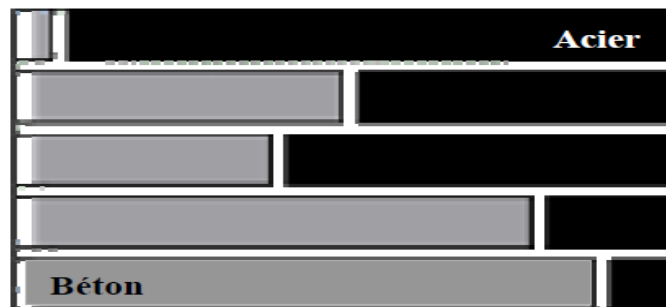


Fig 4-11 : Comparaison de comportement béton - acier

5-3- Matériaux composite :

Plusieurs études ont été effectuées sur le renforcement en flexion avec des composites, dans le but d'augmenter la charge de service, la charge ultime et la rigidité de poutres en béton armé. De façon générale, le renfort de composite en flexion est appliqué sur la face inférieure tendue d'une poutre.

Une poutre en béton armé renforcée en flexion avec des composites. En effet, l'ajout d'une plaque en composite sur la face tendue d'une poutre permet d'améliorer sa résistance en flexion de façon significative.

5-3-1- Les matériaux utilisés :

Parmi la large gamme des matériaux composites on a choisie deux types de résine et deux types de matériaux à base de fibres de carbone et un ensemble de produits complémentaires utilisés souvent en travaux publics.

Ces matériaux sont illustrés dans les trois figures et le tableau suivant :



Fig 4-12 : Les matériaux utilisés de MC

	Matériau	Référence	type	Intérêt
Matériaux de fibres de carbonées	sika wrap Photo 1	hex 230 C	Tissu de fibres de carbone	Reprendre l'effort tranchant (cisaillement)
	LAMELLE Photo 2	Carbodur	Plaque a base de fibre de carbone	Reprendre l'effet des moments fléchissent (flexion)
Les résines	SIKADUR Photo 3	30	Résine époxydique	utilisé pour le collage de sika carbodur lamelle
	SIKADUR Photo 3	330	Résine époxydique	utilisé pour le collage sika wrap hex 230c
Les produits compléments	SIKADUR INJECTION	52	Résine époxydique	utilisée pour injecter les fissures du support avant le renforcement
	SIKADUR RAGREAGE	41F	Mortier époxydique	utilisé pour les ragréages et surfacages localisés du support
	NETTOYANT SIKADUR	/	LIQUIDE	utilisé pour nettoyer et dégraisser le CARBODUR avant l'encollage.
	ELASTIC SIKAGARD	550 W	mono composant élastique	recouvrir le SIKA CARBODUR LAMELLE ou le composite SIKA WRAP HEX 230 C / SIKADUR330
	SIKAGARD	62	Liquide époxydique	recouvrir le SIKA CARBODUR LAMELLE ou le composite SIKA WRAP HEX 230 C / SIKADUR 330.

Tab 4-3 : Les matériaux utilisés de MC

- **Caractéristique de SIKA CARBODUR LAMELLE**

La lamelle de type S est la plus couramment utilisée :

	Type S	Type M
Module d'élasticité E_c	165000 MPa	210 000 MPa
Résistance en traction f_{fu}	3100 MPa	3200 MPa
Résistance de calcul ELU f_{fud}	1612 MPa	1664 MPa
Résistance de calcul ELS f_{fd}	1440 MPa	1490 MPa
Allongement de calcul ϵ_c	0.9 %	0.8 %

Tableau 4-4 : Caractéristique de SIKA CARBODUR LAMELLE

- **Caractéristique de sika wrap hex 230 C**

Valeur dans le sens longitudinal des fibres (selon la norme EN 2561*)

Épaisseur nominale du tissu		0,129 mm
Module d'élasticité en traction	Moyenne	225 GPa
	Caractéristique	220 GPa
Résistance en traction	Moyenne	3500 MPa
	caractéristique	3200 MPa

Tableau 4-5 : Caractéristique de SIKA wrap hex 230 C

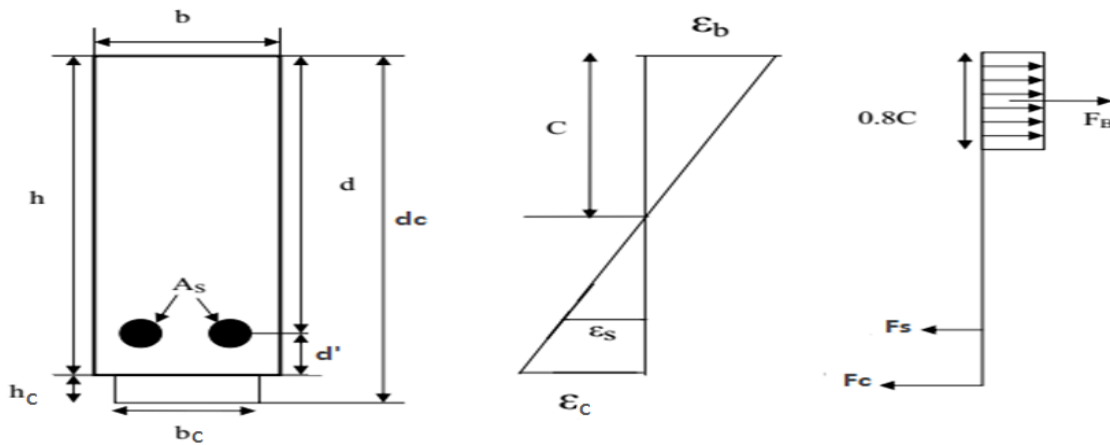
6- Calcul la section de la composite :

A partir de la norme eurocode 2 pour les poutres en béton armé, une méthode pour le calcul de la résistance en flexion d'une poutre renforcée par une plaque en **PRF** a été établie.

Les hypothèses de calcul d'une poutre classique seront utilisées, sont :

- Les déformations des différents matériaux sont petites et varie linéairement le long de la hauteur de la poutre.
- Les sections droites reste planes après déformation.
- La résistance en tension du béton est négligée.
- La résistance en compression des aciers est négligée.
- L'adhérence est parfaite entre le béton et les aciers d'armatures et la plaque en **PRF**,

Donc on néglige le glissement éventuelle a l'interface poutre-plaque.



b : largeur de la poutre	As : section d'acier.
bc : largeur de lamelle	Ac : section de lamelle.
h : hauteur de la poutre.	Fs : force dans l'acier
hc : épaisseur de PRF	Fc : force dans PRF
C : position de l'axe neutre	FB : force de béton comprimé
d' : enrobage	Es : déformation de l'acier
d : distance entre les fibres Extrêmes Comprimée Du béton et le C-D-G des barres	εb : déformation de béton
dc : distance entre les fibres Extrêmes Comprimée Du béton et lamelle	εc : déformation de PRF

Figure 4-13 :.Différent efforts dans la section du béton

1- Equilibre des forces :

$$F_B = F_s + F_c$$

Avec: $F_B = 0.8 \cdot b \cdot c \cdot f_{bu}$ (force reprise par le béton)

$F_s = A_s \cdot \sigma_s$ (force reprise par les aciers)

$$F_c = A_c \cdot \sigma_c \text{ (force reprise par le composite)}$$

D'après la figure ci-dessus on peut s'exprimer les déformations dans l'acier en tension ε_s , dans la plaque de composite ε_c en fonction de la déformation dans le béton ε_b :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_b \left(\frac{d - c}{c} \right)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_b \left(\frac{d_c - c}{c} \right)$$

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad \text{et} \quad \sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c$$

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

$$c = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A}$$

$$A = 0.8 \cdot b \cdot f_{bu}$$

$$B = A_c \cdot E_c \cdot \varepsilon_c - A_s \cdot \sigma_s$$

$$D = A_c \cdot E_c \cdot \varepsilon_c \cdot d_c$$

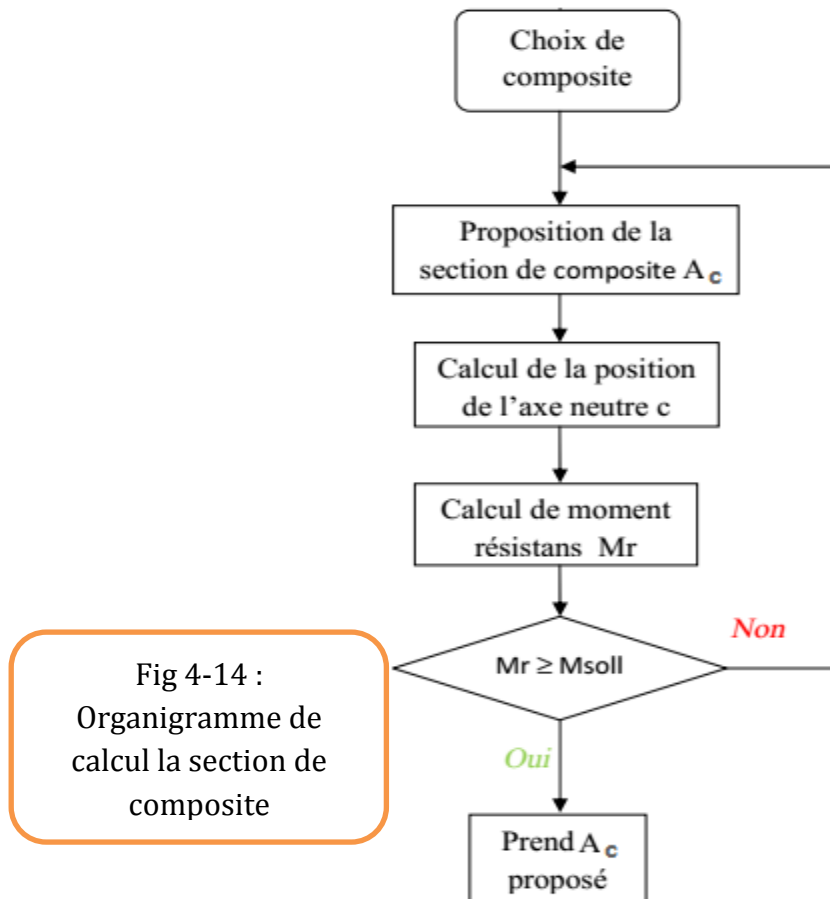
2- Equilibre des moments :

$$M_{soll} < M_R = 0.8 \cdot b \cdot f_{bu} \cdot c \cdot (d - 0.4c)$$

Avec M_R est le moment résistant

3- Organigramme de calcul :

Le calcul se fait par itération pour obtenir la section correspondante qui vérifie la condition suivante $M_{soll} \leq M_R$



6-1- Application numérique :

- Pour la poutre de 12.70 m :

$A_p = 96 \text{ mm}^2$ (01 lamelle de S812)

$$A = 0.80 \times \frac{0.85 \times 18}{1.5} \times 0.30 = \mathbf{2.448}$$

$$B = (96 \times 10^{-6} \times 165000 \times 3.5 \times 10^{-3}) - (348 \times 47.38 \times 10^{-4}) = \mathbf{-1.59}$$

$$D = -(96 \times 10^{-6} \times 165000 \times 1.0012 \times 3.5 \times 10^{-3}) = \mathbf{-0.0556}$$

$$C = \frac{-(-1.59) + \sqrt{1.59^2 - 4 \times 2.448 \times (-0.0556)}}{2 \times 2.448} = \mathbf{0.68}$$

$$\epsilon_c = 1.62 \text{ ‰} < 9 \text{ ‰} \text{ vérifie}$$

$$M_R = 0.8 \cdot f_{bu} \cdot b \cdot (Cd - 4C^2)$$

$M_R = 1149.37 \text{ KN.m} > 693.81 \text{ KN.m}$ vérifie donc on adopte 01 lamelle de S812

96 mm^2 de largeur 80 mm.

Connaissant les efforts internes:

$$F_s = \sigma_s \times A_s$$

$$F_B = 0,8 f_{bu} \times b \times C$$

L'équilibre des forces internes dans la section transversales se traduit par la relation suivante :

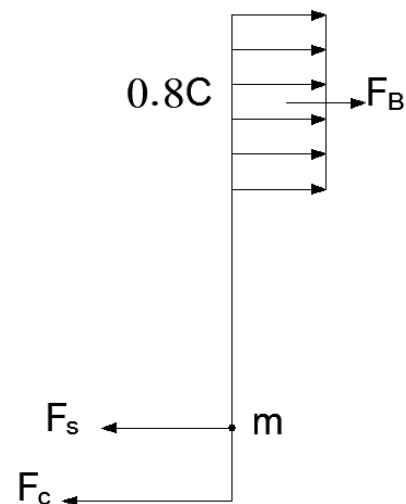
$$F_c = F_B - F_s$$

La section de lamelle à retenir doit être supérieure ou

égale à la valeur $\frac{F_c}{f_{fud}}$

$$A_c \geq \frac{F_c}{f_{fud}}$$

f_{fud} : Résistance de calcul ELU $f_{fud} = 1612 \text{ MPa}$



$$F_B = 0,8 f_{bu} \times b \times C = 0,8 \times \frac{0,85 \times 18}{1,5} \times 0,30 \times 0,68 = 1,665$$

$$F_s = \sigma_s \times A_s = 348 \times 47,38 \times 10^{-4} = 1,649$$

$$F_c = F_B - F_s = 1,665 - 1,649 = 0,016$$

$$A_c = 96 \text{ mm}^2 \geq \frac{0,016}{1612} = 9,81 \text{ mm}^2 \quad \text{vérifie}$$

Pour le choix de lamelle on adopte 01 lamelle S82 (96mm²)

6-1-1. VERIFICATIONS DES CONTRAINTES A L'E.L.S :

On calcule l'état de contrainte dans les deux phases :

- Phase 1 avant renforcement : charges initiales permanentes appliquées à la structure.
- Phase 2 après renforcement : nouvelles charges d'exploitation de la structure (coefficient d'équivalence de la lamelle $n = 12$), et éventuelles nouvelles charges permanentes.

On superpose les deux états de contrainte et on vérifie que les conditions définies cidessous pour une fissuration peu nuisible :

- poutre de 12.70 m

$$\sigma_1, \sigma_2 \leq \sigma_b = 0,6 \times f_{c28} \longrightarrow \sigma_b = \frac{M_{ser} \times C}{I} = \frac{0,562 \times 0,41}{\frac{0,3 \times 1^3}{12}} = 9,29 < 10,80 \text{ MPa} \quad \text{vérifie}$$

$$\sigma_1, \sigma_2 \leq f_e \longrightarrow$$

$$\bar{\sigma}_s \leq \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max(240; 110 \sqrt{\eta \times f_{tj}}) \right\} = 240 < 400 \text{ MPa} \quad \text{vérifie}$$

$$\sigma_c \leq 500 \text{ MPa} \longrightarrow 0 < 500 \text{ MPa} \quad \text{vérifie}$$

6-1-2. Vérification de la contrainte de glissement de la lamelle :

Il est nécessaire de vérifier que la contrainte de glissement τ_c le long de la lamelle est inférieure à une valeur critique τ_{cr} fixée à 2 MPa à l'E.L.U. Dans le cas de chargement uniforme, cette contrainte de glissement s'exprime par :

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_f \times 0.9 \times d} \times \frac{F_f}{F_f + F_s} \leq \bar{\tau}_u \quad \text{avec :}$$

V_u : effort tranchant appliqué à la section

F_f : effort de traction repris par le renfort PRFC Sika CarboDur à l'ELU

F_s : effort de traction repris par les armatures longitudinales à l'ELU

b_f : largeur de la lamelle Sika CarboDur

$\bar{\tau}_u$: contrainte limite de cisaillement à l'ELU. Cette valeur est calculée à partir des essais de pastillage.

$$\bar{\tau}_u = \frac{350.97 \times 10^{-3}}{0.08 \times 0.9 \times 0.96} \times \frac{0.016}{0.016 + 1.649} = 0.049 \leq 2 \quad \text{vérifie}$$

Poutre	A _c Choisi	C	ε _c	ε _c ≤ 9 ‰	M _R	M _u	M _R ≤ M _u	τ _u	τ _u ≤ 2MPa
30×100 L=12.70m	96	0,68	1.62 ‰	<i>vérifie</i>	1.149	0,694	<i>vérifie</i>	0,049	<i>vérifie</i>
30×90 L=10.25 m	60	0,46	3.34 ‰	<i>vérifie</i>	0,875	0,508	<i>vérifie</i>	0,27	<i>vérifie</i>
30×80 L=9.00 m	60	0,43	3.00 ‰	<i>vérifie</i>	0,832	0,449	<i>vérifie</i>	0,14	<i>vérifie</i>

6-1-3. Dimensionnement en cisaillement

Le principe de dimensionnement consiste à vérifier que dans toute section de la structure où les aciers existants sont insuffisants vis-à-vis de la reprise de l'effort tranchant, la contrainte atteinte dans le composite est inférieure à sa contrainte ultime de résistance.

On admet par hypothèse que le composite doit équilibrer l'intégralité de l'effort tranchant non repris par le béton et les aciers existants.

Si on note

V_{soll} : l'effort tranchant ultime total dans la section de poutre considérée

$V_{b.at}$: l'effort tranchant ultime repris par la structure existante,

V_{tc} : l'effort tranchant repris par le composite s'exprime par :

$$V_{tc} = V_{SOLL} - V_{b.at}$$

Le composite doit donc reprendre une contrainte notée σ_c qui vaut :

$$\sigma_c = V_{tc}/A_{tc} < \sigma_{cu}$$

Où A_{tc} représente la section utile du composite.

Avant l'avancement de calcul la section A_{tc} de MC ; il faut vérifié est ce que l'armature transversal de notre structure (Existante A_{ts}) est suffisant ou non :

L'armature transversal existant $A_{ts(bat)}=4T8 =2.011cm^2$

- **Vérifié L'Effort tranchant :**

$$\tau_t = \frac{V_{max}}{b \times d} = \frac{350.97 \times 10^{-3}}{0.3 \times 0.95} = 1.23 \text{ MPa} < 2.34 \text{ MPa} \quad \text{vérifie}$$

- **L'armature transversal ;**

$$A_{ts} \geq \left\{ \frac{b \times S_t \times \gamma_s \times (\tau_u - 0.3 f_{t28})}{0.9 \times f_e (\cos \alpha + \sin \alpha)} \right\} = \frac{0.3 \times 0.15 \times 1.15 \times (1.23 - 0.3(0.6 + 0.06 \times 18))}{0.9 \times 400} = 1.044 \text{ cm}^2$$

L'armature transversal existant $A_{ts(bat)}=4T8 =2.011cm^2 > 1.044 \text{ cm}^2$ *vérifie*

$A_{ts(bat)}$ est suffisant donc pas besoin de calcul A_{tc} de MC

Poutre	V_{max} KN	b	d	τ_t	τ_t < 2.34 MPa	A_{ts} cm²	$A_{ts(bat)}$ existant cm²	Observation
30×100 L=12.70m	350.97	0.30	0.95	1.23	<i>vérifie</i>	1.044	4T8=2.011	<i>suffisant</i>
30×90 L=10.25 m	249.71	0.30	0.85	1.37	<i>vérifie</i>	1.25	4T8=2.011	<i>suffisant</i>
30×80 L=9.00 m	247.50	0.30	0.75	1.54	<i>vérifie</i>	1.49	4T8=2.011	<i>suffisant</i>

Tab 4.6 : L'Efforts tranchants global et l'armature transversal existant

7- Cas Exceptionnel : just pour voir un exemple de calcul

Dans ce cas, nous considérons que l'acier d'armature n'est pas suffisant pour nos poutres ou que l'acier est érodé (détérioration totale)

7-1- Section utile de composite :

Dans une section donnée de la poutre à renforcer, la section utile du composite qui assure la reprise de l'effort tranchant est donnée par :

$$A_t = 2.e. L$$

e : étant l'épaisseur nominale du composite

L : la longueur utile de collage.

Selon la configuration du renforcement, la longueur utile de collage retenue dans le calcul s'exprime de 2 manières différentes :

- Dans le cas d'un enveloppement partiel sur les faces latérales (cas n° 1)

elle s'exprime par :

$$L = H - 2 \times 0,10 \text{ m}$$

H : étant la hauteur sur laquelle est appliquée le composite (en général, la retombée de la poutre).

- Dans le cas d'un enveloppement total en forme de U (Cas n° 2) elle

s'exprime par :

$$L = H - 0,10 \text{ m}$$

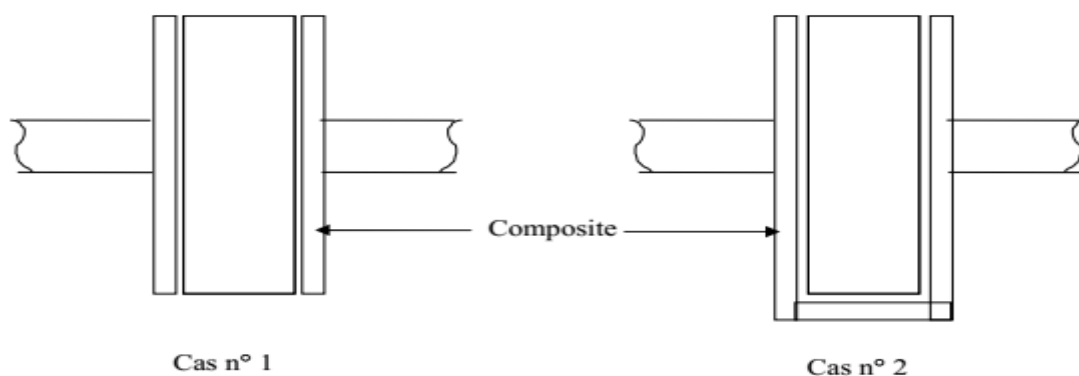


Figure 4-15 : Les dispositions de tissu sur la poutre

La section utile du composite s'exprime donc par :

- Cas n° 1 : $A_c = 2 . e . (H - 0,20)$
- Cas n° 2 : $A_c = 2 . e . (H - 0,10)$

e = Epaisseur d'une couche de renfort SikaWrap 230C : 0.129 mm.

7-2- Contrainte limite du composite :

L'allongement relatif est limité à $\epsilon_{tu} = 6 \text{ ‰}$ (pour un allongement relatif à la rupture de 11,5 ‰).

Le module d'élasticité est égal à $E_c = 55\,000 \text{ MPa}$.

La contrainte de calcul est égale à : $\sigma_{tu} = E_c \cdot \epsilon_{tu} = 55\,000 \cdot 6 \text{ ‰} \approx 330 \text{ MPa}$.

7-3- Longueur de poutre à renforcer :

Il y a lieu d'appliquer le renforcement sur toute la longueur de la poutre où l'effort tranchant sollicitant est supérieur à la capacité portante du béton et des aciers existants.

7-4- Vérification la contrainte à l'effort tranchant:

L'effort tranchant excédentaire V_t à reprendre par le composite étant connu, il faut déterminer si une couche de tissu (qui donne une section de composite A_t est suffisante pour que la contrainte engendrée au sein du composite σ_t , soit inférieure à la contrainte limite σ_{tu} :

$$\sigma_t = V_t/A_t < \sigma_{cu} = 330 \text{ MPa}$$

Si ce n'est pas le cas réitérer le calcul avec **2**, puis **3**, couches de tissu.

7-4-1. Calcul de l'espacement :

L'espacement sera calculé selon la règle de **CAQUOT** (B.A.E.L 91) :

Le placement du première bande a ($S_t/2$) du nu de l'appui :

$$S_t \leq \min \left\{ \frac{A_t \times 0.9 \times f_t (\cos \alpha + \sin \alpha)}{b \times (\tau_u - 0.3 f_{t28})}, [0.9d, 40\text{cm}], \frac{A_t \times f_t}{0.4 \times b} \right\}$$

Pour les autres espacements on utilise la suite des valeurs ci-dessous :

7-8-9-10-11-13-16-20-25-35-40 en cm

7-5- Vérification de glissement :

Il est nécessaire de vérifier la contrainte de glissement τ_t à l'interface béton/composite. à partir des hypothèses retenues, cette contrainte s'exprime par :

$$\tau_t = \frac{V_{tc}}{2 \times 0.1 \times L}$$

Elle doit être inférieure à la valeur critique $\tau_{cr} = 2 \text{ MPa}$.

7-6- Application numérique :

- Pour la poutre de 12.70 m :

La section utile de composite:

$$A_t = 2.e.L$$

$$L = H - 0,10 \text{ m} = (0,80 - 0,10) = 0,70 \dots\dots\dots (\text{Cas n}^\circ 2)$$

$$L = 0,70 \text{ m}$$

Alors:

$$A_t = (2 \times 0,129 \times 0,70 \times 10^3) = 180,60 \text{ mm}^2$$

Calcul de l'espacement :

$$S_t \leq \min \left\{ \frac{180 \times 10^{-6} \times 0,9 \times 3200}{0,3 \times \left(\frac{0,312}{0,96 \times 0,30} - 0,3(0,6 + 0,06 \times 18) \right)}, [0,9d, 40\text{cm}], \frac{180 \times 10^{-6} \times 3200}{0,4 \times 0,30} \right\}$$

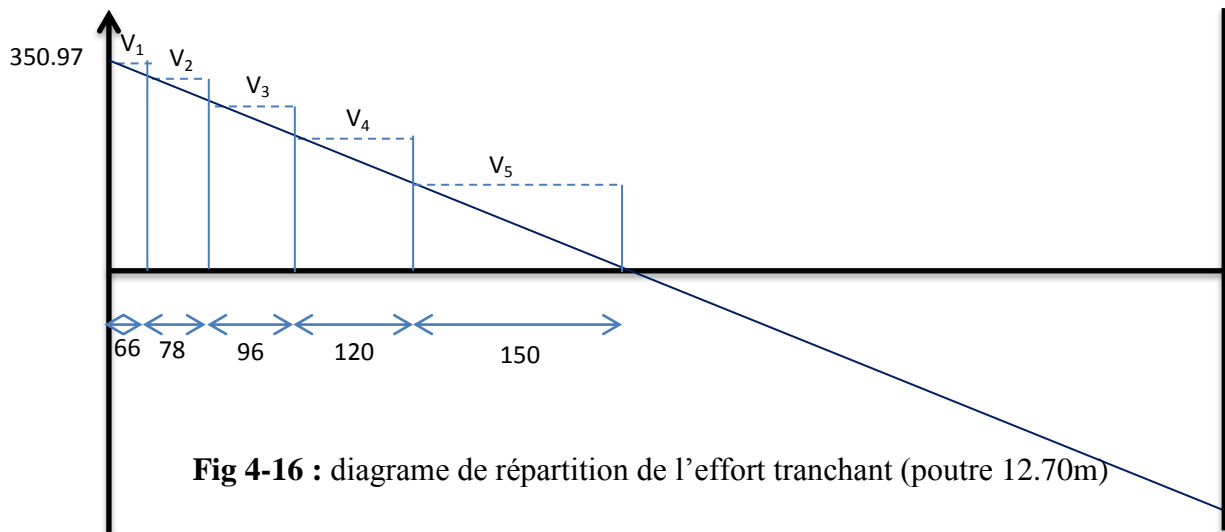
$$S_t \leq \min \{2,99 ; 0,40 ; 4,82\} = 0,40 \text{ m}$$

$$S_t = 40 \text{ cm}$$

$$\frac{L}{2} = \frac{12,70}{2} \approx 6$$

L'espacement à prévoir :

$6 \times 10 = 66$	-	$6 \times 13 = 78$	-	$6 \times 16 = 96$
$6 \times 20 = 120$	-	$6 \times 25 = 150$		



$$V_1 = 350.97 \quad \text{Donc : } V_t = 350.97 - 0 \quad V_t = 0,351 \text{ MN}$$

$$\sigma_t = \frac{V_t}{A_t} = \frac{0.351}{180.6 \times 10^{-6}} = 1943.36 > 330 \text{ MPa}$$

La condition n'est pas vérifiée donc on prend 6 couches :

$$\sigma_t = \frac{V_t}{A_t} = \frac{0.351}{6 \times 180.6 \times 10^{-6}} = 323.89 < 330 \text{ MPa}$$

La condition est vérifiée, Donc on adopte 6 bandes de tissu pour équilibrer l'effort tranchant (V_1).

Les sections adéquates pour l'ensemble des poutres sont représentées dans le tableau suivant :

Poutre	S_t	V_t	L	A_t	σ_t	$\sigma_t < 330$ Mpa	τ_t	$\tau_t < 2$ MPa	nombre des bondes
30×100 12.70	0.45	350.97	0.70	180.6×10-6×6	323.89	vérifié	0.42	vérifié	6
	0.66	284.55	0.70	180.6×10-6×5	315.12	vérifié	0.41	vérifié	5
	0.78	246.28	0.70	180.6×10-6×5	272.74	vérifié	0.35	vérifié	5
	0.96	199.18	0.70	180.6×10-6×5	220.58	vérifié	0.28	vérifié	5
	1.20	140.31	0.70	180.6×10-6×3	258.97	vérifié	0.33	vérifié	3
	1.50	66.72	0.70	180.6×10-6×2	184.72	vérifié	0.24	vérifié	2
30×90 10.25	0.45	249.71	0.60	154.8×10-6×6	268.85	vérifié	0.35	vérifié	6
	0.66	230.07	0.60	154.8×10-6×5	297.25	vérifié	0.38	vérifié	5
	0.78	190.85	0.60	154.8×10-6×5	246.58	vérifié	0.32	vérifié	5
	0.96	142.57	0.60	154.8×10-6×3	307.00	vérifié	0.40	vérifié	3
	1.20	82.22	0.60	154.8×10-6×2	265.57	vérifié	0.34	vérifié	2
	1.50	6.79	0.60	154.8×10-6	43.86	vérifié	0.06	vérifié	1
30×80 9.00	0.45	247.5	0.50	129×10-6×6	319.77	vérifié	0.41	vérifié	6
	0.66	224.15	0.50	129×10-6×5	347.52	vérifié	0.45	vérifié	5
	0.78	172.44	0.50	129×10-6×5	267.35	vérifié	0.34	vérifié	5
	0.96	109.04	0.50	129×10-6×3	281.76	vérifié	0.36	vérifié	3
	1.20	48.94	0.50	129×10-6×2	189.69	vérifié	0.24	vérifié	2

Tab 4.7 : Dimensionnement et vérification en cisaillement

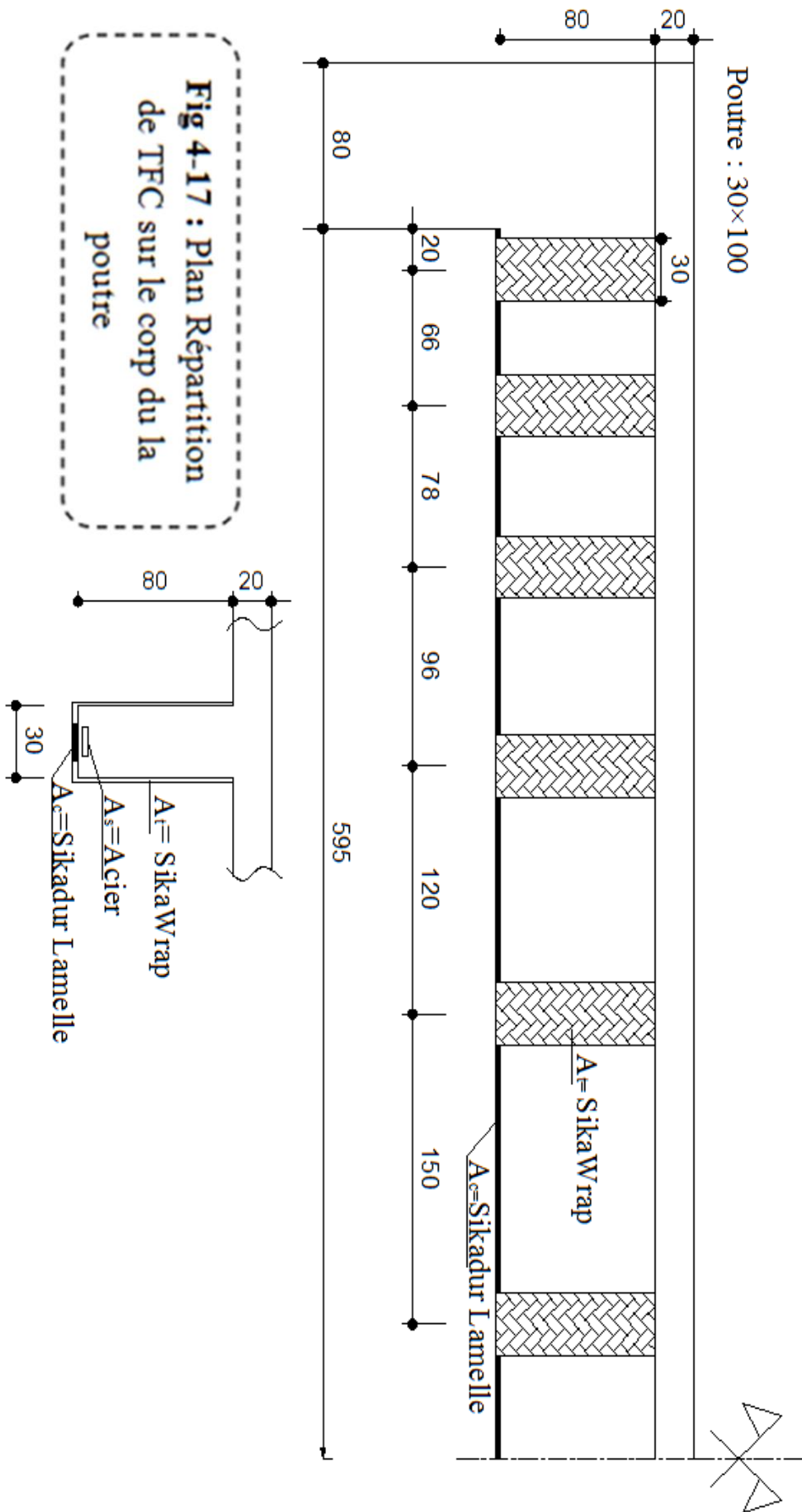


Fig 4-17 : Plan Répartition de TFC sur le corps du la poutre

8- MISE EN OEUVRE

Technique de mise en oeuvre

Les composites utilisés pour la réparation des ouvrages en béton sont élaborés selon trois méthodes classiques qui sont le moulage au contact, le moulage au sac et la pultrusion. Des méthodes de drapage automatique par enroulement filamentaire peuvent aussi être appliquées occasionnellement.

La pultrusion est utilisée pour mettre en oeuvre des plaques à base de fibres de carbone, possédant une rigidité en traction atteignant 170 GPa grâce à la proportion élevée de fibres qui peut être obtenue dans le matériau par ce procédé de fabrication. Ces plaques sont ensuite collées sur la surface à réparer selon la technique classique des plats collés. Leur utilisation concerne principalement les ouvrages travaillant en flexion et nécessitant une augmentation de la rigidité. Le rôle de ces plaques pultrudées est le même que celui d'une armature interne en acier, compte tenu de la rigidité similaire.

Les deux autres techniques concernent la stratification directe sur le support. En général, la polymérisation a lieu à température et pression ambiante. Le moulage au sac complique sérieusement la mise en oeuvre et même s'il permet d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques, son utilisation reste exceptionnelle.

Les propriétés mécaniques finales par moulage au contact sont généralement très en deçà des propriétés habituelles des carbone-époxy élaborés en autoclave ou par pultrusion (rigidité en traction de l'ordre de 50 à 70 GPa pour le carbone), mais la résistance obtenue est suffisante, de 500 à 1000 MPa. Des tissus de verre-époxy sont aussi mis en oeuvre par ce procédé, car leur résistance est du même ordre que celle des carbone-époxy pour un coût beaucoup plus faible.

Un maximum de précaution doit être pris lors de la phase de mise en oeuvre car c'est l'assemblage béton/composite qui constitue le maillon faible de la structure réparée.

Les principales applications des composites mis en oeuvre au contact concernent généralement le renforcement ou la réparation des ouvrages dans le cas où le critère de rigidité n'est pas dimensionnant. Ce sont des structures dimensionnées à l'état limite ultime, comme dans le cas de risques sismiques importants. Ils sont aussi utilisés pour renforcer, toujours vis-à-vis de l'état limite ultime, les poutres sollicitées à l'effort tranchant ou les colonnes comprimées.

Dans ce dernier cas, la technique du fretage est appliquée. Par contre, en flexion, beaucoup de codes de dimensionnement incluent une justification vis à vis de l'état limite de service, ce qui pénalise cette technique car la faible rigidité du composite et les coefficients de

sécurité importants obligent les constructeurs à empiler plusieurs couches de stratifiés. Le coût du matériau peut alors devenir pénalisant.

Un exemple de procédé de stratification directe au contact est le procédé FREYSSINET® développé par l'entreprise SAPTA. Les différentes étapes de la stratification ainsi que les critères de validation ont été recommandés par un groupe de travail "Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique" au sein de l'AFGC. Les différentes étapes sont les suivantes :



Fig. 4-18 : Ponçage de la surface



Fig. 4-19 :. Préparation de la colle



Fig. 4-20 :. Découpe du tissu de carbone



Fig. 4-21:.. Mise en place de la résine



Fig. 4-22 : Mise en place du composite



Fig. 4-23 : Imprégnation de la deuxième couche de colle pour coller la deuxième lit de composite



Fig. 4-24 :. Résultat final

Conclusion générale

L'utilisation des matériaux composites sur les surfaces tendues ou sur les surfaces latérales est un moyen très efficace pour renforcer les poutres en béton armé, plus particulièrement, pour les poutres détériorées et faiblement armées.

Le collage des matériaux composites sur les surfaces tendues permet de :

- augmenter la résistance ultime des poutres et de diminuer la flèche des structures .
- augmenter également leur raideur et limiter ainsi la propagation des fissures .
- diminuer la corrosion des armateurs et d'améliorer la durabilité des structures.

L'une des applications les plus courantes des matériaux composites pour le renforcer des structures en béton armé concerne les structures soumises aux sollicitations de flexion. Les travaux de recherche présentés dans ce document ont consisté à développer une méthodologie d'analyse du comportement mécanique des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites.

Notre travail consistait à élaborer un petit programme numérique de calcul des poutres renforcées par les matériaux composites.

On a essayé par le biais de ce modeste travail de contribuer au développement de ces techniques innovantes et les procédures de calcul numérique.

En plus ce travail, nous a permis d'appliquer nos connaissances théoriques dans la recherche bibliographique et dans le calcul, ce qui nous a donné un grand atout dans cette mémoire .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ✓ [01] H. CHALAYE, « *Les matériaux composites* », Edition Hermes, 1994.
- ✓ [02] M. REYNE, « *Technologie des composite* », Edition Hermes, 1995.
- ✓ [03] C. CANCEIL, M. KHEMAKHEM et A. BOULILA, « *Le renforcement des ouvrages à risques par des lamelles et tissus en fibres de carbone* », Colloque international : les risques en génie civil, ISET de Sfax et AIT, Tunisie, pp 70-80, Mars 2004.
- ✓ [04] C. CANCEIL, M. KHEMAKHEM et A. BOULILA, « *Le renforcement des ouvrages à risques par des lamelles et tissus en fibres de carbone* », Colloque international : les risques en génie civil, ISET de Sfax et AIT, Tunisie, pp 70-80, Mars 2004.
- ✓ [05] A. BOUDJAKDJI et A. LAICHAOUI, « *Renforcement des poutres en béton armé soumises à la flexion par matériaux composites* », Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2003.
- ✓ [06] PETER HEMMONS « *Concrete repair and maintenance illustrated* »
- ✓ [07] A. FUENTES, « *Le béton armé après fissuration* », Edition Eyrolles, 1987.
- ✓ [08] C.G.S, *Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages*, Alger – 2^{ème} Semestre 1992.
- ✓ [09] CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES-SIKA, « *SIKACARBODUR-SIKAWRAP – CCT n°37* », enquête technique SOCOTEC n° HX 0823, Février 2006.
- ✓ [10] A. FUENTES, « *Le béton armé après fissuration* », Edition Eyrolles, 1987.
- ✓ [11] COMPODEX C12, *Guide de dimensionnement des renforts composites pour béton armé* », pp 2-22, Février 2001.
- ✓ [12] C. DJELAL, E. DAVID, F. BUYLE-BODIN et Y. GICQUEL, « *Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelle composites* », Annales du bâtiment et des travaux publics, pp 39-47, Février 1998.
- ✓ [13] Ahmed LAICHAOUI Mémoire de Magister « *ANALYSE EXPÉRIMENTALE DU COMPORTEMENT DES POUTRES EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉES PAR MATÉRIAUX COMPOSITES* » 2006 .