

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mentouri, Constantine  
Faculté des Sciences de L'Ingénieur  
Département de Génie Civil

N° d'ordre : .....

N° de série : .....



**Thèse**

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Magister  
en Génie Civil

Option : "Le Béton Structurel Armé et Précontraint"

Par

**Mohcene BOUKHEZAR**

**Thème**

**REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POUTRES AU  
MOYEN DES MATERIAUX COMPOSITES**

**Membres du Jury de Soutenance :**

Président :	M L. SAMAI	Professeur	Université Mentouri, Constantine
Rapporteur :	H. CHABIL	Professeur	Université Mentouri, Constantine
Examineur :	H. HOUARI	Professeur	Université Mentouri, Constantine
Examineur :	K. DEMAGH	M.C	Université Hadj Lakhder, Batna

Juillet 2009



# REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a guidé et qui m'a donné la force et la volonté de réaliser ce travail.

Je remercie tout d'abord le Professeur CHABIL.H de m'avoir proposé ce sujet de thèse, de l'attention qu'il a portée à mon travail et des moments de discussion précieuse qu'il m'a réservés. Je le remercie infiniment pour sa confiance, ses précieux conseils, sa disponibilité et sa courtoisie.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur SAMAI M.L, Professeur au Département de Génie Civil à l'université Mentouri de Constantine, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette thèse, et consacrer une partie de son temps pour ses discussions bénéfiques, et ses encouragements.

Je tiens à remercier, Monsieur HOUARI.H, Professeur au Département de Génie Civil à l'université Mentouri de Constantine, pour ses directives et conseils et d'avoir accepté d'examiner la présente thèse.

Je tiens également, Monsieur DEMAGH.K, Maître de Conférences au Département de Génie Civil à l'université de Batna, de faire honneur d'être membre de jury.

Mes remerciements et ma reconnaissance sont adressés envers mes collègues pour un temps précieux passé ensemble. Mes plus vifs remerciements vont également à tous mes amis avec qui j'ai partagé des moments inoubliables pendant mes études.

Enfin, toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin et en particulier l'ensemble des enseignants du département de génie civil de Constantine, à ma formation d'études de la graduation et de la post graduation.

# DÉDICACE

*Je dédie le présent travail  
A mes très chers parents  
A mes sœurs et mon frère  
A l'ensemble de ma famille et mes amies*

## RESUME

Les ouvrages en béton armé demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exploitation, leur durée de vie diminue suite à une pathologie structurelle issue des erreurs de conception, des défauts de résistance dus à un chargement excessif ou des dégradations de matériaux.

Le renforcement des structures existantes adaptées à des contraintes d'exploitation additionnelles, implique un développement de méthodes nouvelles et innovantes parmi lesquelles se situe le renforcement par ajout de renforts composites collés.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels, ils apportent de nombreux avantages fonctionnels tels que : légèreté, résistance mécanique élevée, liberté de formes, ainsi qu'une maintenance réduite.

La présente thèse traite une étude analytique du comportement d'une poutre renforcée en PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone) en comparaison avec celle en béton armé, soumise à la flexion simple. La consolidation de cette étude est matérialisée par la réalisation d'abaques à trois entrées liant graphiquement le moment réduit au taux d'armatures tendues et comprimées. Ces abaques ayant une double utilisation, la détermination de la capacité flexionnelle et en même temps du ferrailage.

Vus que les paramètres sont interdépendants, il s'avère indispensable et nécessaire d'appliquer la méthode d'essais successifs pour définir la profondeur de l'axe neutre de la section, afin de déterminer le moment réduit de la poutre. La contribution du renfort de matériaux composites influe directement sur la capacité flexionnelle.

L'étude paramétrique permet de mettre en évidence l'effet des facteurs tels que :  $\rho_s$ ,  $f_y$ ,  $f_{ck}$ ,  $d'$ ,  $\rho_f$ ,  $\rho'_s$ , sur le comportement de la section de la poutre renforcée.

La superposition des courbes a montré que, quand les aciers tendus atteignent leur limite d'écoulement, le comportement de la poutre renforcée par PRFC est plus significatif par rapport à celle seulement en béton armé. Le cas contraire se présente si les aciers n'atteignent pas leur limite d'écoulement.

## ABSTRACT

The reinforced concrete works remain in excellent state after more than one century of exploitation, their lifespan decreases following a structural pathology resulting from the design errors, defects of resistance due to an excessive loading or material degradations.

The strengthening of the existing structures adapted to additional constraints of exploitation, implies a development of new and innovating methods among which the strengthening by addition of stuck composite.

The composite materials have significant assets compared to traditional materials, they bring many functional advantages such as: lightness, high mechanical resistance, free shape, as well as a reduced maintenance.

The present thesis treats an analytical study of the behaviour of a strengthened beam in CFRP (Carbone fibre reinforced polymer) in comparison with that out of reinforced concrete, subjected to the pure bending. The consolidation of this study is materialized by the realization of abacuses with three entries which graphically link the reduced moment to the rate of tended and compressed reinforcements. These abacuses having a double use, determination of the flexional capacity and at the same time the reinforcement.

Because that the parameters are interdependent, it proves to be essential and necessary to apply the successive testing method to define the depth of the neutral axis of the section, in order to determine the reduced moment of the beam. The contribution of the composite material reinforcement influences directly the flexional capacity.

Parametric study makes it possible to highlight the effect of the factors such as:  $\rho_s, f_y, f_{ck}, d', \rho_f, \rho'_s$ , on the behaviour of the section of the strengthened beam.

The superposition of the curves showed that, when steels tended reached their limit of yielding, the behaviour of the beam reinforced by PRFC is more significant compared to that of reinforced concrete. The contrary case arises if steels do not reach their limit of yielding.

## ملخص

استدامة استغلال منشآت الخرسانة المسلحة قرابة القرن حيث تنقص مدة حياتها بفعل عدة عوامل هي أخطاء التصميم حمولة زائدة وضرر المواد.

إن تدعيم الهياكل المتواجدة تحت تأثير اجهادات زائدة حتم ابتكار طرق جديدة, من بينها التدعيم بواسطة المواد المركبة, إن هذه المواد المركبة تمثل عنصر فعال مقارنة بالمواد التقليدية حيث أنها تمتلك عدة مزايا عملية مثل خفة وزنها مقاومة ميكانيكية عالية حرية التشكيل و صيانة غير مكلفة.

هذه الأطروحة تعالج دراسة تحليلية لسلوك عارضة مدعمة بمتعدد الأجزاء مقوى بألياف الكربون (PRFC), مقارنة مع عارضة غير مدعمة معرضة إلى الانحناء البسيط. توطيد هذه الدراسة يتم بواسطة تكوين منحنيات بثلاث محاور, الذي يربط بينيا العزم المصغر بنسبة التسليح الممدد و المضغوط, هذه المنحنيات لها استعمال مزدوج بتحديد القدرة الانحنائية و كمية التسليح.

بما أن العوامل متعلقة بعضها ببعض يتبين انه من الضروري استخدام طريقة التجارب المتتالية لتحديد عمق المحور الحيادي للمقطع قبل تحديد العزم المصغر للعارضة. مساهمة الدعم بواسطة المواد المركبة تؤثر بطريقة مباشرة على قدرتها الانحنائية.

تركيب المنحنيات بين بأنه عندما يبلغ التسليح الممدد حده الأقصى, يكون سلوك العارضة المدعومة بالمواد المركبة (PRFC) أكثر فعالية من مثيلاتها غير المدعومة, على العكس عندما لا يبلغ التسليح حده الأقصى.

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	i
DÉDICACE .....	ii
RESUME .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ملخص .....	v
TABLE DES MATIERES .....	vi
LISTE DES FIGURES .....	ix
LISTE DES TABLEAUX .....	x
LISTE DES NOTATIONS.....	xi
<b>1 INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
1-1 Introduction .....	1
1-2 Problématique.....	2
1-2 Structuration de la thèse.....	3
<b>2 DEGRADATIONS DU BETON ET METHODOLOGIE D'UN DIAGNOSTIC .....</b>	<b>5</b>
2-1 Introduction .....	5
2-2 Les différentes origines des dégradations .....	5
2-2-1 Les dégradations dues aux attaques chimiques.....	5
2-2-2 Les dégradations d'origine mécanique.....	9
2-2-3 Les dégradations d'origine physique .....	10
2-3 La méthodologie du diagnostic .....	10
2-3-1 préambule.....	10
2-3-2 Examen visuel ou morphologique.....	11
2-3-3 mesures in –situ .....	11
2-3-3 L'analyse technique des éléments recueillis.....	16
2-3-4 La formulation de recommandations directives.....	17
<b>3 DIFFERENTS METHODES DE RENFORCEMENT ET DE REPARATION ....</b>	<b>19</b>
3-1 Introduction .....	19
3-2 Caractéristiques des produits de renforcement.....	19
3-3 Réparation des fissures .....	21
3-4 Rajout d'armatures complémentaires .....	22
3-4-1 Introduction.....	22
3-4-2 Mise en place des armatures complémentaires .....	22
3-4-3 Protection des armatures .....	22
3-4-4 Réfection des bétons.....	23
3-5 Béton Projeté .....	23
3-5-1 Introduction .....	23
3-5-2 projection d'un béton avec un ajout d'armatures .....	25
3-5-3 Description des deux méthodes.....	25
3-5-3-1 Projection par voie sèche .....	25
3-5-3-2 Projection par voie mouillée .....	26
3-5-4 Avantages des deux méthodes.....	26
3-5-5 Inconvénients des deux méthodes .....	26
3-6 Augmentation des sections par un béton additif.....	27

3-6-1 Introduction .....	27
3-6-2 Adhérence entre les deux bétons .....	28
3-6-3 Les inconvénients de chemisage .....	28
3-7 Renforcement par platines métalliques .....	29
3-7-1 Introduction .....	29
3-7-2 Les matériaux utilisés .....	29
3-7-3 La mise en œuvre des plats collés .....	29
3-7-4 Conclusion .....	30
3-8 Réparation ou renforcement par précontrainte additionnelle .....	31
3-8-1 Introduction .....	31
3-8-2 Conception d'une précontrainte additionnelle .....	31
3-8-3 Les différents tracés de la précontrainte additionnelle .....	32
3-9 Adjonction de matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres ) .....	33
3-9-1 Introduction .....	33
3-9-2 Définitions et avantages .....	33
3-9-3 Propriétés du tissu et de la résine de collage .....	34
3-9-4 Procédures de la mise en œuvre .....	34
3-9-5 Conclusion .....	35
3-10 Conclusion et choix du méthode de renforcement .....	35
<b>4 MATERIAUX COMPOSITES.....</b>	<b>37</b>
4-1 Généralités.....	37
4-1-1 Introduction .....	37
4-1-2 définitions .....	37
4-1-3 Les caractéristiques générales .....	38
4-2 Les matrices.....	40
4-2-1 Introduction .....	40
4-2-2 Définitions.....	40
4-2-3 Les résines.....	41
4-2-3-1 Différents types de résines.....	41
4-2-3-2 Les résines thermodurcissables (TD) .....	41
4-2-3-3 les résines thermoplastiques (TP).....	43
4-2-3-4 Comparaison entre ces deux types de résines .....	44
4-2-4 les charges et additifs.....	45
4-2-4-1 Introduction.....	45
4-2-4-2 Les charges .....	45
4-2-4-3 Les Additifs.....	46
4-3 Les fibres.....	48
4-3-1 Introduction et définitions.....	48
4-3-2 Les fibres de carbone.....	49
4-3-2-1 Elaboration des fibres de carbone .....	49
4-3-2-2 Les caractéristiques mécaniques des fibres de carbone.....	50
4-3-2-3 Les produits industriels.....	51
4-3-2-4 Conclusion et commentaires .....	51
4-3-3 Les fibres de verre .....	51
4-3-3-1 L'élaboration des fibres de verre .....	51
4-3-3-2 Les propriétés mécaniques.....	52
4-3-3-3 Produits industriels.....	53
4-3-3-4 Conclusion .....	53
4-3-4 Les fibres d'aramides .....	54

4-3-4-1	Elaboration des fibres d'aramides.....	54
4-3-4-2	Les caractéristiques et utilisation industrielle des fibres d'aramides.....	54
4-3-5	Les fibres de bore .....	54
4-3-6	Les fibres de silice (ou de quartz) .....	55
4-3-7	Les fibres de polyéthylène de haut module.....	55
4-3-8	Les Caractéristiques des fibres et renforts .....	55
4-4	Classification des matériaux composites .....	56
4-4-1	Classification suivant la forme des constituants .....	56
4-4-2	classification suivant la nature des constituants.....	56
4-5	Conclusions .....	57

**5 COMPORTEMENT D'UNE POUTRE RENFORCEE AU MOYEN DE MATERIAUX COMPOSITES EN FLEXION SIMPLE : ANALYSE ET DEVELOPPEMENT GRAPHIQUE.....60**

5-1	Introduction .....	60
5-2	Caractéristiques des matériaux.....	61
5-2-1	le béton.....	61
5-2-2	Les aciers .....	62
5-2-3	Le matériaux composites .....	63
5-3	Développement des équations de base pour une section non usuelle soumise à la flexion simple .....	63
5-3-1	Section non usuelle en béton armé non renforcée.....	63
5-3-2	Section non usuelle en béton armé renforcée.....	66
5-3-3	Section rectangulaire non renforcée .....	68
5-3-4	Section rectangulaire renforcée.....	69
5-3-5	Elaboration d'un exemple numérique .....	69
5-4	Réalisation d'abaques à trois entrées.....	72
5-4-1	Introduction.....	72
5-4-2	Analyse d'une section rectangulaire en béton armé non renforcée et renforcée .....	73
5-4-2-1	Section non renforcée .....	73
5-4-2-2	Section renforcée.....	75
5-4-2-3	Conclusions et commentaires sur la superposition des deux abaques : .....	77
5-4-3	Effets des différents paramètres sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée.....	79
5-4-3-1	Effet du taux d'armatures comprimées ( $\rho_s$ ).....	79
5-4-3-2	Effet de la résistance caractéristique du béton ( $f_{ck}$ ).....	81
5-4-3-3	Effet de l'enrobage des armatures tendues ( $d'$ ).....	83
5-4-3-4	Effet du taux de renforcement en PRFC ( $\rho_f$ ).....	85
5-4-3-5	Effet de la contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_{yk}$ ).....	88

**6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....92**

6-1	Conclusions .....	92
6-2	Perspectives:.....	93

**Annexe A : Mise en œuvre des composites pour la réparation des poutres.....95**

**ANNEXE B : Justification vis-à-vis des sollicitations tangentes .....101**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE**

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: le scléromètre.....	12
Figure 1.2: appareil d'auscultation par ultrasons .....	12
Figure 1.3: le pachomètre.....	13
Figure 1.4: le profomètre.....	13
Figure 1.5: le corrosimètre .....	14
Figure 1.6: la Carotteuse .....	15
Figure 1.7: le fissuromètre .....	15
Figure 1.8: l'extensomètre .....	15
Figure 1.9: l'hygromètre.....	16
Figure 3.1 : Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures additionnelles en sa partie inférieure. ....	23
Figure 3.2 : renforcement d'une poutres au moyen de béton projeté .....	24
Figure 3.3 : renforcement d'une poutres par chemisage.....	27
Figure 3.4:organigramme de processus de chemisage en béton armé .....	28
Figure 3.6:le tracé rectiligne.....	32
Figure 3.7: le tracé polygonal.....	33
Figure 3.8: renforcement d'une poutre au moyen de matériaux composites .....	35
Figure 4-1: les différents types de composites. ....	39
Figure 4-2:Organigramme des différentes familles de matrice. ....	40
Figure 4-3:Organigramme des différentes familles de fibres. ....	48
Figure 4-4: Fabrication par carbonisation des fibres haute résistance (HR) .....	49
Figure 4-5: Fabrication par graphitisation des fibres haut modules (HM).....	50
Figure 5.1 : loi de comportement du béton .....	61
Figure 5.2 : loi de comportement de l'acier .....	62
Figure 5.3 : Loi de comportement du composite .....	63
Figure 5.4: Image à l'E.L.U d'une section non usuelle en béton armé.....	64
Figure 5.5: Image à l'E.L.U d'une section non usuelle en béton armé renforcée .....	66
Figure 5.6: section rectangulaire en béton armé.....	68
Figure 5.7: section rectangulaire en béton armé renforcée.....	69
Figure 5.8: La différence de la profondeur de l'axe neutre entre une section rectangulaire en béton armé renforcée et une section non renforcée. ....	72
Figure 5.9: comportement d'un section rectangulaire non renforcée vis-à-vis de sa capacité flexionnelle par rapport au taux d'armatures tendues.....	74
Figure 5.10: comportement d'une section rectangulaire renforcée vis-à-vis de sa capacité flexionnelle par rapport au taux d'armatures tendues.....	76
Figure 5.11: la superposition de deux comportement d'une section rectangulaire renforcée et l'autre non renforcée.....	78
Figure 5.12: Effet de taux d'armatures comprimés ( $\rho_s$ ) sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée.....	80
Figure 5.13: Effet de la résistance caractéristique du béton ( $f_{ck}$ ) sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée.....	82
Figure 5.14: Effet de l'enrobage des armatures tendues ( $d'$ ) sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée.....	84
Figure 5.15: Effet de taux de renforcement en PRFC sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée.....	87
Figure 5.16: Effet de la contrainte limite des armatures sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée.....	63

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4-1: les différents types de composites. ....	38
Tableau 4-2: Comparaison entre les deux types de résines. ....	44
Tableau 4-3: caractéristiques mécaniques des verres type E et R mesurées sur filament. ....	53
Tableau 4-4: caractéristiques mécaniques de monofilament d'aramides. ....	54
Tableau 4-5: Les Caractéristiques des fibres et renforts. ....	55
Tableau 4-6: comparaison qualitative entre fibres. ....	58
Tableau 5 .1: Effet du taux d'armatures comprimées ( $\rho's$ ) sur la capacité flexionnelle ....	79
Tableau 5 .2: Effet la résistance caractéristique du béton ( $f_{ck}$ ) sur la capacité flexionnelle. ....	81
Tableau 5 .3: Effet de l'enrobage des armatures tendues ( $d'$ ) sur la capacité flexionnelle ....	83
Tableau 5 .4: Effet du taux de renforcement en PRFC ( $P_f$ ) sur la capacité flexionnelle. ....	85
Tableau 5 .5: Effet de la contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_{yk}$ ) sur la capacité flexionnelle. ....	88

## LISTE DES NOTATIONS

- $A_c(x)$ : l'aire de la partie comprimée du béton, en fonction de  $x$
- $A_f$  : Aire de la section du renfort
- $A_s$  :Aire de la section d'aciers tendus
- $A'_s$  : Aire de la section d'aciers comprimé
- $A_u$  : la section utile
- $b$  : largeur de la section
- $d$  : la hauteur utile de la section
- $d'$  : l'enrobage des armatures tendues.
- $E_c$  : Module d'Young du béton
- $E_f$  : module de Young de composite
- $E_s$  : module de Young de l'acier
- $F_C$  : la force dans le béton
- $F_f$  : la force de traction du renfort
- $F'_s$  : la force de compression des aciers comprimés
- $F_s$  : la force de traction des aciers tendus
- $f_{ck}$  : résistance caractéristique du béton obtenue à partir d'un cylindre
- $f_f$  : contrainte dans le composite
- $f_s$  : contrainte dans l'acier dans phase élastique
- $f'_s$  : la contraintes élastique des aciers comprimés
- $f_{yk}$  : contrainte limite d'écoulement de l'acier
- $h$  : hauteur de la section
- $K_1$  : coefficient de remplissage
- $K_2$  : coefficient de positionnement .
- $l_p$  : Hauteur de la section de la poutre cantilever prise égale à  $st$
- $l_{trans}$  : longueur de transfert d'effort entre le composite et le béton majorée par l'effort tranchant.
- $l_{trans}$  :longueur de transfert d'effort entre le composite et le béton.
- $l_{anc,d}$  : longueur d'ancrage de calcul.

$l_{anc,th}$  : longueur d'ancrage théorique du composite pour l'effort  $F_f$   
 $l_{anc,exp}$  : longueur d'ancrage déterminée à partir des données expérimentales.  
 $l_{anc}$  : longueur d'ancrage réelle.  
 $M_u$  : le moment fléchissant aux états limites ultime  
 $V_b$  : effort tranchant repris par le béton  
 $V_f$  : effort tranchant repris par le composite  
 $V_s$  : effort tranchant repris par les aciers  
 $V_{Ru}$  : résistance à l'effort tranchant aux ELU  
 $V_u$  : effort tranchant appliqué à la section aux ELU  
 $t$  : l'épaisseur de renfort  
 $x$  : la profondeur de l'axe neutre

$\gamma_c$  : coefficient de sécurité du béton  
 $\gamma_s$  : coefficient de sécurité de l'acier  
 $\epsilon_{cu}$  : Déformation relative maximale dans le béton  
 $\epsilon_f$  : la déformation du renfort  
 $\epsilon_{fu}$  : allongement à la rupture du renfort  
 $\epsilon_s$  : Déformation relative dans les aciers tendus  
 $\epsilon'_s$  : Déformation dans les aciers comprimé  
 $\epsilon_{yk}$  : Déformation relative maximale dans les aciers  
 $\rho'_s$  : le taux d'armatures comprimées  
 $\rho_s$  : le taux d'armatures tendues  
 $\rho_f$  : le taux de renfort

*Chapitre 1*

**INTRODUCTION GENERALE**

## **1 INTRODUCTION GENERALE**

### **1-1 Introduction**

Au fil des années le patrimoine bâti est devenu de plus en plus important et considérable. Dans le passé la maintenance des ouvrages n'a été qu'une activité de second ordre, indispensable certes à la conservation du patrimoine et au bon fonctionnement des équipements techniques, mais délaissée au profit de la conception et de l'ingénierie de la construction. Il existe un nombre important de pathologie dans les ouvrages dont les origines peuvent être liées à des phénomènes mécaniques, physico-chimiques, accidentels ou encore liés aux erreurs de calcul et de conception.

Le sujet de renforcement a fait l'objet d'une recherche extensive durant les dernières décennies, en raison de l'augmentation des dépenses de travaux de réhabilitation des ouvrages bâtis, l'organisation et la rationalisation de l'entretien est devenu plus que nécessaire. Afin de permettre une planification et une réduction des dépenses ces enjeux économique ont été à l'origine de la mise en place des plans de maintenance, qui vont du diagnostic au renforcement.

Grace à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, les matériaux composites se sont taillés une place importante en génie civil, de nos jours le collage en matériaux composites est l'une des méthodes de réparation et de renforcement les plus employées dans ce marché en pleine expansion. Plusieurs éléments de structure peuvent être renforcés par collage de tissus ou lamelles en matériaux composites.

Ces éléments sont essentiellement les poutres, les poteaux et les dalles. Le principale objectif étant de chercher les solutions optimales de renforcement.

## 1-2 Problématique et objectifs

Les multiples recherches effectuées sur l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé ont prouvé, jusqu'à maintenant, que l'application de tissus ou lamelles en polymère renforcé en fibre de carbone (PRFC) est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelles.

L'étude d'éléments de structures ou structures en béton armé a été largement développée de manière analytique, numérique et/ou graphique. Si les éléments de structures sont renforcés alors les approches de modélisation diffèrent d'un auteur à un autre.

Dans le cadre de la présente thèse, il a été jugé nécessaire d'intégrer l'apport des matériaux composites dans le développement de la solution (de manière graphique ou analytique), avec une supposition d'une parfaite adhésion composite béton. Pour ce faire un catalogue d'abaques à trois entrées liant graphiquement le moment réduit au taux d'armatures tendues, aux différentes valeurs du taux d'armatures comprimées, et ce pour diverse proportion du renfort.

Le développement de ces abaques est basé sur des équations décrivant le comportement des sections rectangulaires de poutres renforcées en matériaux composites, en comparaison avec des sections de poutres seulement en béton armé, soumises à la flexion simple.

Ces abaques ayant une double utilisation: la détermination de la capacité flexionnelle, ainsi que le taux de ferrailage.

Une étude paramétrique est menée afin de mettre en évidence l'effet des différents facteurs influents qui sont :  $\rho_s$ ,  $f_y$ ,  $f_{ck}$ ,  $d'$ ,  $\rho_f$ ,  $\rho'_s$ , sur le comportement de la section de la poutre renforcée.

Vu que le tracé graphique des abaques est laborieux, un programme de calcul devient indispensable et nécessaire, pour permettre de regrouper les différents paramètres influents sur le développement analytique et graphique.

## **1-2 Structuration de la thèse**

La présente thèse est subdivisée en six chapitres et deux annexes.

- Le chapitre 1 est réservé à l'introduction générale avec une problématique détaillée.
- Le chapitre 2 est consacré à la détermination d'un diagnostic ainsi que l'établissement de différentes causes de dégradation du béton.
- Le chapitre 3 présente les différentes méthodes et techniques de renforcement et de réparation.
- La présentation de matériaux composites et leurs constituants fait l'objet du chapitre 4.
- L'analyse théorique d'une poutre en béton armé renforcée au moyen de matériaux composites soumise à la flexion simple, les équations de base intégrant l'apport de renforcement et le développement d'abaques à trois entrées, sont présentés au chapitre 5 .
- La conclusion générale et les perspectives sont présentées dans le chapitre 6.
- La mise en œuvre de matériaux composites est donnée dans l'annexe A.
- L'annexe B présente la justification vis-à-vis des sollicitations tangentes

*Chapitre 2*

**DEGRADATIONS DU B ETON ET  
METHODOLOGIE D' UN DIAGNOSTIC**

## **2 DEGRADATIONS DU BETON ET METHODOLOGIE D'UN DIAGNOSTIC**

### **2-1 Introduction**

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

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

Il existe donc un paramètre qui joue de façon majeure sur la durabilité: il s'agit de la porosité capillaire du béton durci.

Plus le béton est poreux, plus il est exposé aux agressions extérieures, synonymes d'altération et donc d'atteinte à la durabilité.

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

Il y a plusieurs origines des dégradations :

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

### **2-2 Les différentes origines des dégradations**

#### **2-2-1 Les dégradations dues aux attaques chimiques**

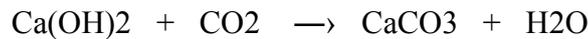
La dégradation peut provenir d'une attaque chimique par un agent se trouvant :

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

Elle peut aussi être d'origine interne :

#### **a) carbonatation du béton**

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



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

Pour protéger le béton contre la carbonatation il faut le confectionner à faible rapport E/C pour réduire la porosité du béton, et assurer un enrobage suffisant (qui peut être complété par enduit)[15].

#### **b) corrosion des armatures**

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

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

La vitesse de corrosion des barres d'armatures est plus grande en présence de chlorures (l'eau de mer, sel,...) [16].

Les chlorures ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

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

### c) Attaque par les sulfates

Les sulfates sont généralement retrouvés dans:

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

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

Les facteurs influençant l'attaque par le sulfate [16]:

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

Les moyens préventifs:

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

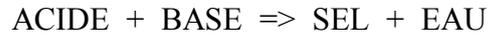
### d) Attaque par des acides

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

- Il y a possibilité d'attaque si  $\text{pH} < 6.5$
- Attaque sévère si  $\text{pH} < 5.5$ .
- Attaque très sévère si  $\text{pH} < 4.5$

Il y a deux types des acides agressifs :

- Inorganiques: carbonique, chlorhydrique, fluorhydrique, nitrique, phosphorique, sulfurique
- Organiques: acétique, citrique, formique, humique, lactique, tannique.



Les moyens préventifs contre ces attaques sont:

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

#### e) Alkali-réaction

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

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

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

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

- un béton le moins perméable possible (une bonne formulation du béton et un faible rapport : E/C).
- un ciment à faible teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  et alcalins.
- limiter ou fixer la portlandite : utiliser la fumée de silice ou des ciment CLK ou CHF (résistent mieux aux milieux acides surtout si le pH est  $< 4.5$ ).

## **2-2-2 Les dégradations d'origine mécanique**

### **a) Erreurs de conception et d'exploitation**

Les différents erreurs de conception peuvent être résumées comme suit :

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

### **b) Défauts d'exécution**

Les défauts d'exécution sont généralement à :

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

### **c) Les chocs**

Le phénomène de choc peut provenir de :

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

### **d) L'abrasion**

Le phénomène d'abrasion est due généralement à :

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

### **e) Les fissures**

Les différents type de fissures sont :

- les fissures mécaniques (due à la compression, à la traction, à la flexion ou au cisaillement).
- les fissures dues au retrait (un retrait plastique, un retrait thermique, etc.).
- les fissures dues au gel.
- les fissures dues à la corrosion[15].

### 2-2-3 Les dégradations d'origine physique

#### a) Séisme

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

#### b) Incendie

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

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

## 2-3 La méthodologie du diagnostic

### 2-3-1 préambule

Le diagnostic est le résultat des investigations effectuées pour se prononcer sur l'état d'une construction et ses conséquences. Il est devenu habituel de désigner par la même appellation de "diagnostic " la réalisation des examens nécessaires à la formulation des conclusions.

Le déroulement du diagnostic comporte quatre volées :

- Un examen visuel ou morphologique
  - Une estimation quantitative de la dégradation.
  - Une estimation qualitative de la dégradation .
  - La détermination des problèmes de structure.
- Des mesures in- situ (Appareillages de détection) .
- L'analyse technique des mesures et essais, effectuée en laboratoire des éléments recueillis.
- La formulation des conclusions et recommandations.

Il faut cependant souligner que dans le cas général, un diagnostic reste une approximation plus ou moins précise où il est rarement possible d'obtenir un recueil exhaustif des données.

### **2-3-2 Examen visuel ou morphologique**

L'examen visuel est la forme d'investigation la plus simple et la plus économique. Dans un premier temps, il s'agit d'identifier la constitution des places permettant par ailleurs de définir l'éventuel programme d'investigation complémentaire à envisager pour affiner le diagnostic.

Quel que soit leur origine, ces informations doivent être utilisées avec prudence, et surtout pas comme des données de base du diagnostic ; elles sont plutôt à considérer comme des éléments de recoupement des constats faits ultérieurement sur place ou comme des sources d'indication sur la manière d'orienter le diagnostic. Ces informations sont obtenues par :

- une prise de photos.
- une identification et localisation des zones fortement sollicitées.
- une observation des zones critiques tels: joints, appuis, etc...
- la localisation des fissures.

### **2-3-3 mesures in ósitu**

La détermination des caractéristiques : un niveau d'existence , de position et de la section des armatures dans le béton , la dureté et la résistance du béton , le degré de corrosion et d'oxydation des armatures. à l'issue d'un tour d'horizon général, on peut déjà conclure sur[16]:

- L'homogénéité de l'état des lieux ou au contraire sur l'existence de plusieurs cas de figure bien distincts.
- La nature et la localisation des manifestations.
- Des désordres vétustes, la non conformité réglementaire, des anomalies de fonctionnement.
- La nature et la localisation des sondages, une auscultation ou des prélèvements à effectuer.
- les points dont l'état apparent est suffisamment explicite pour pouvoir se prononcer d'emblée, sans avoir à envisager d'autres investigations
- L'ouverture des fissures dans le béton.

Les différentes mesures in-situ sont :

a) **Le scléromètre**

Cet instrument relativement simple à l'origine, permet d'estimer la résistance du béton, mesure la dureté superficielle du béton par rebondissement d'une masselotte.

Il est nécessaire de procéder à une quinzaine d'essais sur chaque zone testée pour déduire une valeur moyenne représentative.

Le scléromètre est un instrument particulièrement performant pour préciser l'homogénéité de la résistance du béton aux différents points d'une structure, mais l'information sur le béton reste imprécise par cette méthode. (fig 1.1)



*Figure 1.1: le scléromètre*

b) **L'auscultation par ultrasons**

Cette méthode permet d'estimer la résistance d'un béton ou de détecter la présence de microfissures internes. C'est une corrélation entre la résistance, la vitesse du son  $V_L$ , la compression  $R_c$ , et le module d'élasticité. (fig 1.2)



*Figure 1.2: appareil d'auscultation par ultrasons*

### c) Les détecteurs d'armatures

Ils fonctionnent par effets magnétiques ou électromagnétiques mais la profondeur d'investigation reste limitée à une dizaine de centimètres.

Il y a trois types de détecteurs:

#### - Le pachomètre

sert à déterminer la position des armatures dans le béton (**fig 1.3**)



*Figure 1.3: le pachomètre*

#### - Le profomètre

Utilisé pour la détermination précise de la position et du diamètre des armatures dans le béton. (**fig 1.4**)



*Figure 1.4: le profomètre*

#### - Le corrosimètre:

Employé dans le but de détecter la corrosion des armatures, d'ouvrages en béton avant l'apparition des dommages visibles, en mesurant le potentiel de surface du béton. (**fig 1.5**)



*Figure 1.5: le corrosimètre*

#### d) La radiographie

Ce procédé permet de réaliser des clichés radiographiques du béton, son coût est relativement élevé compte tenu du matériel nécessaire (source radioactive) et surtout des mesures de protection à mettre en place (évacuation du site, périmètre de sécurité, autorisation administratives ..), utilisables pour des éléments dont l'épaisseur ne dépasse pas 60 à 80 cm. La gammagraphie fournit des informations multiples et très précises sur les armatures et les défauts internes du béton:

L'analyse de la radiographie obtenue à travers les rayons traversant le béton est interprétée comme suit :

- trace claire => corps plus dense que le béton.
- trace noire => présence de vide.

#### e) Carottage:

Le prélèvement de carotte a comme but de faire des analyses en laboratoire. Ces examens peuvent être demandés en vue de: (**fig 1.6**)

- examen pétrographique pour identification des agrégats, détériorations des agrégats, homogénéité du béton, profondeur de carbonations, répartition des fissures.
- analyse chimique
- Essais physico – mécanique : densité, résistance à la compression, module d'élasticité.



*Figure 1.6: la Carotteuse*

f) **Détecteur des fissures**

**-Fissuromètre**

suivi de l'évolution d'une fissure sur un plan ou dans un angle. (**fig. 1.7**)



*Figure 1.7: le fissuromètre*

**-Extensomètre**

mesure de la déformation linéaire d'un élément de structure . (**fig 1.8**)



*Figure 1.8: l'extensomètre*

### c) Hygromètre

Pour l'évaluation de l'humidité, en surface et en profondeur, de parois de construction .cet humidimètre permet de mesurer le taux d'humidité en profondeur de façon non destructive par une méthode basée sur la radiofréquence. (**fig 1.9**)



*Figure 1.9: l'hygromètre*

### 2-3-3 L'analyse technique des éléments recueillis

L'analyse des informations et les données collectées, doit permettre d'interpréter les constats effectués en vue de formuler des conclusions. Pour faciliter ce travail, on peut reporter les données de manière à modéliser les phénomènes observés et les constats effectués [15].

Les modes d'analyse font appel à plusieurs types d'opérations:

#### a) Le calcul

Il permet notamment de déterminer la capacité portante des structures ainsi que les zones critiques au niveau des éléments structuraux.

#### b) Le recoupement

C'est la recherche de la cohérence ou au contraire de l'incompatibilité entre les données ou les informations portant sur un même aspect, mais provenant de sources différentes. Cela permet de consolider la validité de certaines hypothèses et d'en écarter d'autres.

**c) La comparaison**

Il s'agit de repérer les ressemblances et les écarts permettant souvent, d'extrapoler ou d'exclure des résultats de données ou d'informations. Cela permet de hiérarchiser les différentes constatations.

**d) L'évaluation**

C'est une estimation quantitative ou qualitative elle comporte une part d'approximations par rapport à un calcul scientifique. L'évaluation peut par ailleurs s'appuyer sur des comparaisons, des recoupements ou des calculs.

**e) La vérification**

L'objectif est de détecter les éventuels écarts par rapport aux exigences des référentiels techniques et réglementaires pris en compte.

**f) L'évaluation**

On peut conduire une opération d'évaluation par:

- Un examen du dossier d'ouvrage : des plans d'exécution et les notes de calcul.
- Un état actuel de l'ouvrage : une exploitation des données et des informations pris en compte antérieurement.

**2-3-4 La formulation de recommandations directives**

Les conclusions correspondent à des avis argumentés, fondés sur les constats et les analyses effectuées. Il s'agit là d'une véritable prise de position du diagnostic sur l'état de la structure ou des éléments structuraux, accompagnée le cas échéant des marges d'incertitudes n'ayant pu être levées.

Les recommandations se déduisent des conclusions en les replaçant dans la perspective de la commande du diagnostic[15].

Les recommandations doivent donc tenir compte des enjeux économiques et de la faisabilité technique des travaux préconisés en matière de :

- réparation, renforcement des structures.
- traitement des causes et des effets de désordres constatés lors du diagnostic.

*Chapitre 3*

**DIFFERENTS METHODES DE  
RENFORCEMENT ET DE REPARATION**

### **3 DIFFERENTS METHODES DE RENFORCEMENT ET DE REPARATION**

#### **3-1 Introduction**

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

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

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

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

Les procédés utilisables pour le renforcement sont également applicables aux travaux de réparation ou de consolidation.

#### **3-2 Caractéristiques des produits de renforcement**

Les produits de renforcement utilisés doivent posséder vis-à-vis d'un béton dégradé les qualités suivantes [14]:

- a) être compatible avec le support à savoir:
  - un retrait plastique limité pour les liants hydrauliques (retrait apparaissant pendant les premières heures lors de la prise et du durcissement). La présence de fibres de polypropylène permet de répartir la fissuration sous forme de microfissures (des précautions particulières sont à prendre lors de la mise en œuvre: humidification du support, protection contre la dessiccation)
  - un retrait limité pour les liants hydrauliques de manière à éviter l'apparition de fissures ou de décollement de l'interface (produit de renforcement par rapport au béton renforcé).
  - une adhérence au béton support et une résistance au moins égale à la résistance du béton renforcé.

- une adhérence aux armatures métalliques initiales ou rajoutées.
  - des résistances mécaniques à la compression, à la traction, similaires ou supérieures à celles du béton de support.
  
  - un coefficient de dilatation le plus proche possible de celui du béton support.
- b) présenter une durabilité par rapport aux conditions environnementales:
- les principaux agents agressifs participant au phénomène de corrosion des armatures à prendre en compte pour l'environnement sont :
    - les chlorures
    - les sulfates
    - le gaz carbonique
    - l'oxygène
  - les vecteurs de ces agents agressifs sont l'air et l'eau.
  - comme tout béton réalisé selon les règles de l'art, les produits de renforcement doivent donc présenter une compacité permettant d'obtenir une imperméabilité garantie de:
    - la résistance à la carbonatation, c'est-à-dire à la pénétration du gaz carbonique contenu dans l'air qui, lorsqu'il entrera en contact avec les armatures, provoquera leur corrosion. Cette caractéristique est étroitement liée, outre l'aspect formulation du produit de renforcement, à la qualité de sa mise en œuvre et à la mise en place.
    - La résistance aux sulfates apportés soit par l'eau de mer, soit par l'eau présente dans des sols riches en gypse, ou par le sel de déverglaçage utilisé en hiver. Dans un milieu alcalin comme le béton, la présence de sulfates provoque la formation d'hydrates expansifs (ettringite) entraînant, à terme, la ruine du béton. Il faut tenir compte de cet élément pour la formulation du produit de renforcement fabriqué en usine ou sur chantier, en choisissant les ciments adaptés.
    - La résistance aux chlorures apportées essentiellement par l'eau de mer, et le sel de déverglaçage, les chlorures migrant

dans le béton se transforment en acide chlorhydrique provoquant la corrosion des armatures ,

- La résistance aux cycles de gel et dégel, est indispensable, ainsi pour de tels produits de renforcement à base de liant hydraulique, une exigence d'un entraîneur d'air s'avère nécessaire.

### 3-3 Réparation des fissures

Les fissures fonctionnelles ne nécessitent aucun traitement dans la mesure où les sollicitations restent dans les limites prise en compte dans les calculs et que le fonctionnement réel des ouvrages est cohérent avec la modélisation initialement retenue.

Si tel n'est pas le cas, il faut d'abord consolider ou modifier les éléments concernés de façon à obtenir un fonctionnement correct[7].

Les fissures accidentelles doivent en général être traitées, surtout si leur ouverture dépasse les limites indiquées précédemment. Les choix du procédé de traitement dépend principalement de l'objectif recherché, éviter la corrosion des armatures, empêcher l'eau de traverser une paroi ,corriger un défaut d'aspect extérieur, etc....

Les principales solutions envisageables sont:

- Pontage ou revêtement protecteur en surface:  
Il s'agit de supprimer le défaut de protection des armatures par un revêtement , partiel ou global, imperméable ou étanche. Ces types de revêtement sont principalement des produits à base de résines plastiques appliquées en couches minces.
- Rebouchage des fissures:  
Cette solution peut être retenue pour des fissures très ouvertes. Il est cependant nécessaire de les élargir pour assurer la pénétration des produits de calfeutrement.les fissures sont élargies par repiquage ou meulage. Un dépoussiérage soigné doit être effectué, en abondance d'eau. Le rebouchage doit être réalisé avec une pâte de ciment additionnées de résines ou avec des mastics adéquats.
- Injection des fissures:  
Cette opération nécessite le nettoyage préalable des fissures au moyen d'un jet d'eau sous pression éventuellement additionné d'un détergent , selon le produit injecté,

coulis de ciment ou résines synthétiques , les fissures doivent être humidifiées ou au contraire parfaitement sèches.

### **3-4 Rajout d'armatures complémentaires**

#### **3-4-1 Introduction**

Il s'agit là d'enlever le béton dans les zones où les aciers sont corrodés. Les armatures existantes conservées doivent être bien soignées afin d'éviter une continuité de leurs dégradations.

Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration et contribuer à la résistance des sections ainsi renforcées.

La liaison s'effectue par soudure ou bien par scellement tout en respectant les longueurs de recouvrement et d'ancrage.

La géométrie d'origine doit être régénérée avec des mortiers riches pour augmenter l'adhérence et la résistance mécanique de sections finales.

#### **3-4-2 Mise en place des armatures complémentaires**

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

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, soudure, ou des systèmes explicites de fixation (cheville, tiges collées, boulonnage), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celles-ci devront être effectuées, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.

#### **3-4-3 Protection des armatures**

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

On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation[14].

### 3-4-4 Réfection des bétons

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

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

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

Ce type de réparation demande généralement , pour être efficace , une augmentation non négligeable des dimensions des éléments de structure et l'emploi d'un volume relativement important de matériaux , ce qui n'est plaisant ni sous l'aspect économique, ni sous l'aspect esthétique ,dans le cas de structures de façades [17] [12].



*Figure 3.1 : Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures additionnelles en sa partie inférieure.*

## 3-5 Béton Projeté

### 3-5-1 Introduction

La technique de projection du béton a d'abord été utilisée pour réparer des structures endommagées et conforter des tunnels.

Cette technique a ensuite bénéficié de nombreuses évolutions pour être actuellement utilisée de façon courante en réparation et renforcement d'ouvrages, afin de mettre en place des matériaux lorsque les moyen traditionnels de mise en oeuvre s'avèrent moins adaptés ou plus couteux.

Il existe deux techniques principales de projection du béton, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires: une projection par voie sèche (avec ou sans prémouillage) et une projection par voie mouillée (à flux dilué ou à flux dense).

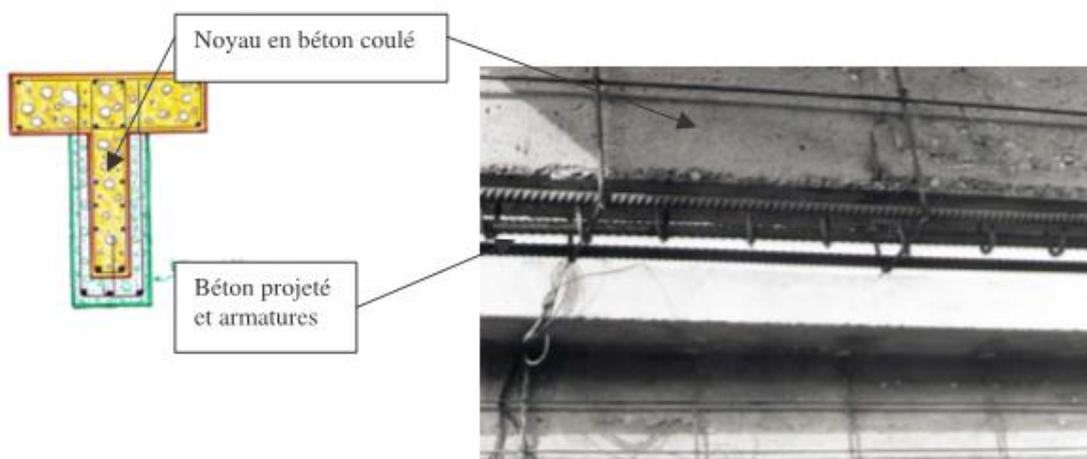
La plupart des adjuvants et additions utilisés dans la fabrication des bétons mis en place par coulage peuvent être incorporés dans le béton projeté.

La nature de ces ajouts est à adapter au mode de projection utilisé. En fait, la plupart des matériaux employés, pour fabriquer des bétons spéciaux mis en œuvre par coulage sont utilisables pour élaborer des bétons projetés particuliers:

- Les bétons projetés légers à base de granulats légers (argiles ou schiste expansé)
- Les bétons projetés de fibres à base de fibres métalliques, mais aussi à base de fibres de verre.
- Les bétons projetés avec incorporation de fumé de silice.

Il y'a lieu de faire une distinction entre le béton et le mortier projeté utilisés en réparation de structure. La dimension maximale des granulats utilisés permet de différencier le mortier du béton. Le mortier à des granulats dont la dimension est inférieure ou égale à 5mm. Le béton contient des granulats dont la dimension peut aller jusqu'à 16mm en voie sèche et 12mm en voie mouillée, ces valeurs sont celles actuellement compatibles avec le matériel couramment utilisé et correspondant à celle du mélange avant projection.

Le terme "béton projeté" peut alors paraître exagérée, quand la valeur de dimension des granulats du béton est de l'ordre de 6 à 8mm, car il s'agit en fait d'un "micro-béton".



**Figure 3.2 :** renforcement d'une poutre au moyen de béton projeté

### **2-5-2 projection d'un béton avec un ajout d'armatures**

Lorsqu'il s'agit de réparation ou de renforcement structural, l'étude doit comporter une étude de fonctionnement de la structure et des conditions dans lesquelles sont repris les efforts tant à vide que sous charges d'exploitation, pendant et après les travaux.

Dans les cas d'un renforcement avec un ajout d'armatures, il convient de préciser les conditions de mise en charge de l'élément à renforcer soit sous l'effet des charges d'exploitation seules, soit sous l'effet des charges permanentes. Si nous prenons l'exemple d'un poteau dégradé qui nécessite un renforcement, il peut être intéressant de faire participer le béton projeté à la reprise des charges permanentes, pour cela, il est nécessaire de précéder à un étalement du poteau accompagné d'un vérinage actif, de placer les aciers de renfort, de projeter le béton, puis de décroître.

Pour reconstituer des sections précises de béton ou pour dresser des arrêtes, il est souvent nécessaire d'utiliser des coffrages, ceux-ci constituent cependant des obstacles qui gênent la projection et qui peuvent provoquer la formation de zones mal compactées, en raison d'un piégeage de rebonds dans les angles.

Il est donc préférable de procéder d'abord à l'enrobage des aciers, puis de ne mettre en place les coffrages que pour la projection de la couche de finition.

Il a été vérifié que lorsque les règles de l'art relatives à l'exécution du béton projeté sont respectées, le plan de liaison entre béton projeté et béton support ne constitue pas systématiquement un plan de faiblesse. Dans la grande majorité des cas, la rupture se produit soit dans le béton support, soit dans le béton projeté. Cet essai permet de définir les conditions d'acceptation d'une réparation par béton projeté du point de vue de son adhérence sur le support, cette adhérence est ainsi jugée satisfaisante[17].

### **3-5-3 Description des deux méthodes**

#### **3-5-3-1 Projection par voie sèche**

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

- un serrage énergétique dû à la grande vitesse de projection.

- une bonne adhérence due à la richesse en ciment dans la zone au contact de la surface d'application.

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité. Toute fois les normes préconisent un dosage pas moins de  $280 \text{ kg/m}^3$  de ciment ayant une résistance à la compression supérieure à 25 MPa .

### **3-5-3-2 Projection par voie mouillée**

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

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

### **3-5-4 Avantages des deux méthodes**

#### **a) Par voie sèche**

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

#### **b) Par voie mouillée**

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

### **3-5-5 Inconvénients des deux méthodes**

#### **a) Par voie sèche**

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

**b) Par voie mouillée**

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

**3-6 Augmentation des sections par un béton additif****3-6-1 Introduction**

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

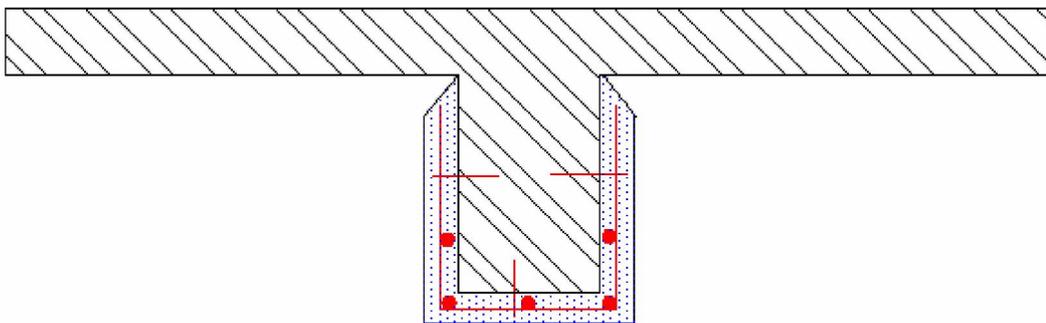
La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy. Ces décaissés seront remplis en béton avant le séchage des résines.

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

Le béton devra être traité avec des adjuvants pour éviter la vibration et le compactage.

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

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



*Figure 3.3 : renforcement d'une poutre par chemisage*

**3-6-2 Adhérence entre les deux bétons**

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

Cette adhérence est due essentiellement à une liaison chimique entre le béton existant et le nouveau béton. La valeur maximale de l'adhérence est atteinte pour des valeurs de glissement d'environ 0,01 à 0,02 mm et est maintenue pratiquement constante jusqu'à des valeurs de glissement de l'ordre de 0,05mm[19].

**3-6-3 Les inconvénients de chemisage**

Les inconvénients de renforcement par béton additionnel sont résumés dans l'organigramme ci-dessous comme suit:

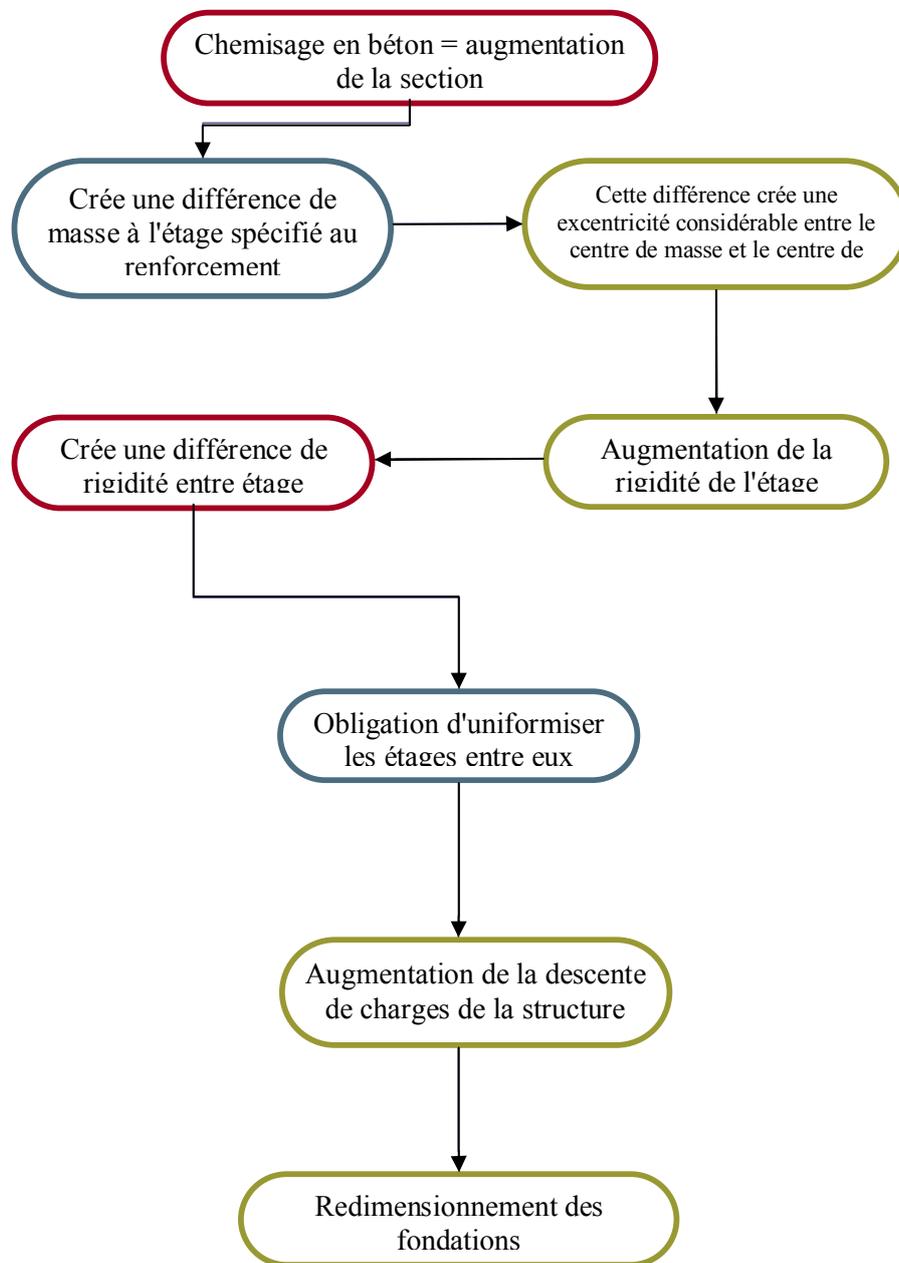


Figure 3.4: organigramme de processus de chemisage en béton armé

Conclusion : le renforcement d'un élément par l'augmentation de sa section influe directement sur la masse de toute la structure, par contre l'utilisation des métaux ou de matériaux composites permet de renforcer les éléments concernés, à cause de leur légèreté relative.

### **3-7 Renforcement par platines métalliques**

#### **3-7-1 Introduction**

Ce type de renforcement consiste à pallier les insuffisances locales ou globales des structures en béton par des tôles d'acier, collées en surface du béton.

Cette surface de béton doit subir avant tout, une préparation soignée ayant pour objet d'éliminer de la surface toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible.

#### **3-7-2 Les matériaux utilisés**

- a) La colle : c'est une résine époxy choisie pour ses propriétés d'adhérence sur l'acier ainsi que sur le béton.

Le film résiduel de la colle doit être de faible épaisseur et d'une rigidité suffisante pour transmettre intégralement par adhérence les efforts à la tôle. Cette rigidité étant réduite par une augmentation de température, des précautions spéciales doivent être prises dans le cas de structures soumises à des températures élevées.

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

- b) La tôle : les tôles d'aciers sont généralement de qualité courante, leur épaisseur est limitée à 3mm de façon à leur permettre de suivre les courbures du support.

Si des sections d'acier plus importantes sont nécessaires, il est préférable de superposer des tôles plutôt que d'augmenter l'épaisseur dans le but d'épouser l'allure de la déformée de la section de béton renforcé (exemple: ressorts à lames des camions) [12].

#### **3-7-3 La mise en œuvre des plats collés**

- Pour parvenir à des fins de mise en œuvre correcte, il est impérativement souhaitable à procéder à un sablage, permettant une préparation d'une grande surface de collage, sans attaquer en profondeur les parements.
- Un mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à replanir les surfaces, sans pour autant dépasser les 20% des surfaces destinées au collage.

- La colle est général une résine époxy choisi pour ses propriétés d'adhérence à l'acier et au béton. Une attention particulière doit être accordée aux conditions atmosphériques environnant le site lors de la mise en œuvre des tôles.
- La colle n'apporte pas de résistance mécanique, mais transmet fortement les efforts.
- Les tôles ou platines de renfort, constituées, dans la plupart des cas, de tôles en acier. Ces tôles possède une épaisseur de 3 à 5mm et doivent subir toute leur préparation en usine (découpage- préassemblage si besoin, abattage des arrêtes ainsi qu'une éventuel sablage) pour avoir une bonne tenue de l'adhérence entre l'acier et la colle.
- Les tôles doivent être protégées en utilisant une pellicule, de même nature que celle qui doit être appliquée avant encollage.
- La protection des aciers contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée. En fin des travaux les aciers doivent être protégés contre la corrosion.
- Après l'enlèvement de vernis de protection ou de primaire de protection , la colle est étalée sur tôle et sur le surface du béton l'épaisseur minimale mise en œuvre sur chaque face est de l'ordre du millimètre.
- Le dispositif de serrage peut , suivant le cas , être constitué de serre-joints, de barres filetées transvasant l'élément à renforcer, doit permettre d'appliquer sur toute la tôle une pression voisine de  $4 \text{ N/mm}^2$  durant toute la duré de polymérisation de la colle .

#### **3-7-4 Conclusion**

la technique des tôles collées, qui fut utilisée d'abord dans le domaine du bâtiment industriel, s'est très vite répandue dans le domaine du génie civil où dans bien des cas, elle a permis soit d'accroître la capacité portante d'une structure, présentant des insuffisances de résistance .

l'utilisation de ce type de renfoncement devrait voir son emploi augmenté avec des recherches menés sur d'autres matériaux nouveaux pour remplacer l'acier.

### **3-8 Réparation ou renforcement par précontrainte additionnelle**

#### **3-8-1 Introduction**

La précontrainte additionnelle s'est imposé dans le renforcement ou la réparation, tant des ouvrages d'art que des bâtiment, mieux même, les progrès technologiques accomplis dans le domaine de la réparation ont fait évoluer la conception du câblage puisque ils sont conçus, de nos jours , avec une précontraintes partiellement ou totalement extérieur.

Sur le plan mécanique, la précontraintes additionnelle extérieure se caractérise par de faibles pertes de tension par frottements, la possibilité d'ajuster assez facilement le tracé des câbles en fonction des effets recherchés.

Sur le plan pratique , elle offre une assez grande facilité d'installation et la possibilité d'un contrôle efficace de l'exécution , en au droit des raccordement de conduits de précontrainte, c'est particulièrement vrai pour l'incorporation des câble qui, lorsque elle est préconisée, est simplifiée puisque l'on dispose, d'un accès facile aux points hauts et bas du tracé.

Compte tenu de son efficacité et de sa souplesse de mise en œuvre, la précontrainte additionnelle peut être employée pour renforcer et/ ou répare une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoir, silos...) ou éléments structuraux tels: dalles de plancher ou poutres.

#### **3-8-2 Conception d'une précontrainte additionnelle**

##### **a) Aspect général**

La conception d'un câblage additionnelle, lorsque des dispositions spéciales n'ont pas été prévues au moment du projet initial, doit être étudiée en intégrant, dans la flexion de l'étude trois aspects essentiels:

- L'injection et l'obturation des fissures.
- Prise en compte du changement éventuel du schéma statique de la structure ou l'élément structural concerné.
- Préconisation de la démontrabilité de la précontrainte.

##### **b) L'injection des fissures**

Les ouvrages à répare présentent généralement des fissures d'ouverture variable. Il convient donc, dans tous les cas, d'injecter préalablement les fissures, même si cette opération est longue, pour amoindrir les effets de la non-linéarité et reconstituer, dans la mesures du possible, un solide élastique et homogène.

La précontrainte ne peut, à elle seule, refermer les fissures car, d'une part, les grains de béton ont pu se détacher au moment de l'ouverture des fissures et modifier la conjugaison des lèvres.

Ces grains, sous l'effet de la précontrainte additionnelle, peuvent créer des points durs et perturber le passage des efforts en l'absence d'injection préalable des fissures.

#### c) **Changement du schéma statique**

Il est rare que l'on cherche à modifier le schéma statique initial théorique d'une structure, en le renforçant ou en le réparant, indépendamment de l'évolution du schéma statique réel due à la fissuration.

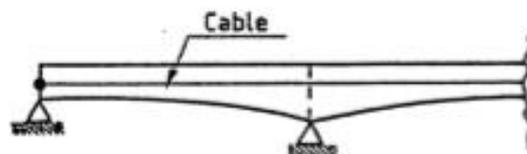
#### d) **Démontage de la précontrainte**

Dans tous les cas, la précontrainte additionnelle doit être démontable pour pouvoir être facilement remplacée en cas de défaillance. Il peut arriver qu'on la souhaite réglable pour contrôler, dans le temps, l'effort de précontrainte additionnelle appliquée et optimiser l'efficacité de la réparation.

la démontrabilité soit possible et pratique, tous les points singuliers du câblage additionnelle, doivent être étudiés dans cette optique tels les zones d'ancrages, les traversés d'entretoises, les bossages ainsi que les déviateurs de câbles ...etc [7].

### 2-8-3 Les différents tracés de la précontrainte additionnelle

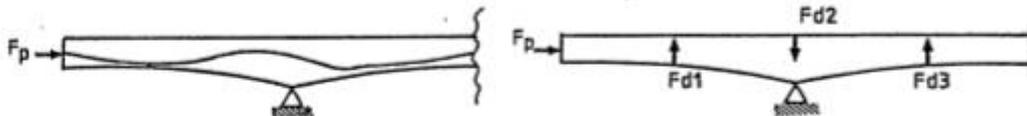
le tracé des armatures de précontrainte additionnelle peut être rectiligne ou polygonal. Un câblage rectiligne est plus pratique et aussi facile à le mettre en œuvre et les pertes d'effort par effet de frottement sont localisées au voisinage des zones d'ancrages, et sont de faibles estimation [12].



*Figure 3.6: le tracé rectiligne*

Par contre le tracé polygonal qui consiste à dévier les câbles, de façon à optimiser l'effet de la précontrainte tant sur le plan de la résistance en flexion que sur celui de la résistance à l'effort tranchant.

Les pertes par frottement sont un peu plus fortes que dans le cas d'un tracé rectiligne, tout en restant modérées, et la mise en œuvre est plus compliquée, à cause de la confection des déviateurs, mais c'est la conception la plus courante.



*Figure 3.7: le tracé polygonal*

### 3-9 Adjonction de matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres )

#### 3-9-1 Introduction

Le renforcement des structure par collage de tôle d'acier, resté favori dans le bâtiment, n'a connu qu'un développement limité dans le domaine du génie civil.

Afin de affranchir de ce type de renfort , les groupe de recherches ont entrepris d'autres actions en utilisant d'autres matériaux appelés: matériaux composites . cette voie est plus prometteuse, et consiste à développer une technique permettant le renforcement des structures en béton, en acier par imprégnation et collage d'un tissu sec à base de fibres.(un polymère renforcé en fibre de carbone PRFC).

#### 3-9-2 Définitions et avantages

les fibres utilisées généralement dans le domaine du génie civil sont les fibre de carbone.

Ces fibres sont obtenues par pyrolyse de fibres organiques, réticulées et orientées en atmosphère contrôlé.

Elles s'utilisent essentiellement sous forme de matériaux composites pour conférer au produits fini le meilleur des propriétés physiques, statiques et dynamiques. Ces matériaux présentent une contrainte de rupture très élevés pour une densité cinq fois moindre que celle de l'acier.

Les composites issus de fibres de carbone bénéficient sans équivalent et de propriété physiques très étendues.

- Grande résistance en traction (avec haut module d'élasticité)

- Grande résistance à la fatigue.
- Légèreté
- Grande résistance à l'usure
- Absorption des vibration
- Grande résistance à la corrosion

### **3-9-3 Propriétés du tissu et de la résine de collage**

D'un transport et d'une manutention faciles, le tissu ne pèse que  $0.8 \text{ Kg/m}^2$ , le tissu en fibre de carbone peut être aisément découpé sur place à la forme désilée, sa mise en œuvre n'exige qu'un échafaudage léger.

A l'inverse des tôles d'acier, le TFC (tissu de fibre de carbone) ne nécessite aucune pression de contact pendant le durcissement de la résine.

Sa faible épaisseur, de l'ordre de 1 mm, permet son entraînement en traction par la résine durcie, sans flexion parasite.

La résine est utilisée à double fin, elle réalise à la fois l'imprégnation du tissu et son collage au support. Il en résulte, d'une part, une grande simplicité de mise en œuvre et, d'autre part, un fonctionnement mécanique amélioré, le renfort ne comportant qu'une seule surface de contact. La résine peut être appliquée sur un support humide, après mélange de deux composants, sa durée de prise et de durcissement est de quelques heures; cette durée varie faiblement en fonction de la température [17].

### **3-9-4 Procédures de la mise en œuvre**

Dans le cas du béton, il convient d'effectuer un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0.5 et 1 mm, les dépôts de poussière et les particules non adhérentes sont éliminés par un brossage, ainsi qu'un chanfreinage des arrêtes vives.

L'application de la couche de résine s'effectue au moyen d'un rouleau à poils de façon à atteindre un dépôt moyen de  $0.7 \text{ Kg/m}^2$ , le tissu est ensuite appliqué, si nécessaire, il est possible de juxtaposer plusieurs bandes bord à bord. Puis une couche d'imprégnation de même résine. si nécessaire, cette opération peut être renouvelée avec une deuxième couche de TFC.

### 3-9-5 Conclusion

L'analyse du renforcement à l'aide de TFC, a montré que le cout du matériaux, supérieur à celui de la tôle d'acier, est largement compensé par l'économie réalisée sur les temps de main d'œuvre et la mobilisation du matériel.



*Figure 3.8: renforcement d'une poutre au moyen de matériaux composites*

### 3-10 Conclusion et choix du méthode de renforcement

Vus que les matériaux composites aient une grande flexibilité en s'adaptant au formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés, et pour leur légèreté par rapport aux aciers, leur facilités de manutention, de transport et de mise en œuvre sur site, ainsi que leurs résistance mécanique assez importante que les autres moyens de renforcements.

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

C'est pour cette raison que Le choix de renforcement à l'aide de matériaux composites (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) de l'élément à renforcer dont a fait l'objet de cette étude est jugé favorable .

*Chapitre 4*

**MATERIAUX COMPOSITES**

## **4 MATERIAUX COMPOSITES**

### **4-1 Généralités**

#### **4-1-1 Introduction**

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés. Ils offrent une meilleure isolation thermique, et pour certains d'entre eux une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions.

Dans chacun des marchés d'application (bâtiment, automobiles, équipements industriels...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions innovantes.

Les matériaux composites offrent aux industriels et aux concepteurs des possibilités nouvelles d'associer fonctions, formes et matériaux au sein de la réalisation. C'est un système de plus en plus performant.

Le poids, la plurifonctionnalité sont autant d'atouts de principes de processus nouveaux de conception, d'industrialisation, qui permettent d'étendre les possibilités techniques et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids – fonction ...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

#### **4-1-2 définitions**

Dans un sens large, le mot " composite " signifie, constitué de deux ou plusieurs parties différentes. En fait l'appellation "matériau composite" ou "composite" est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de cette thèse. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau (4-1). Et dans un sens plus précis, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort sous forme filamentaire et nécessite l'association intime d'au moins deux composants: le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison.

Contrairement aux matériaux classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on

réalise en même temps, le matériau et le produit bien définis.

Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.

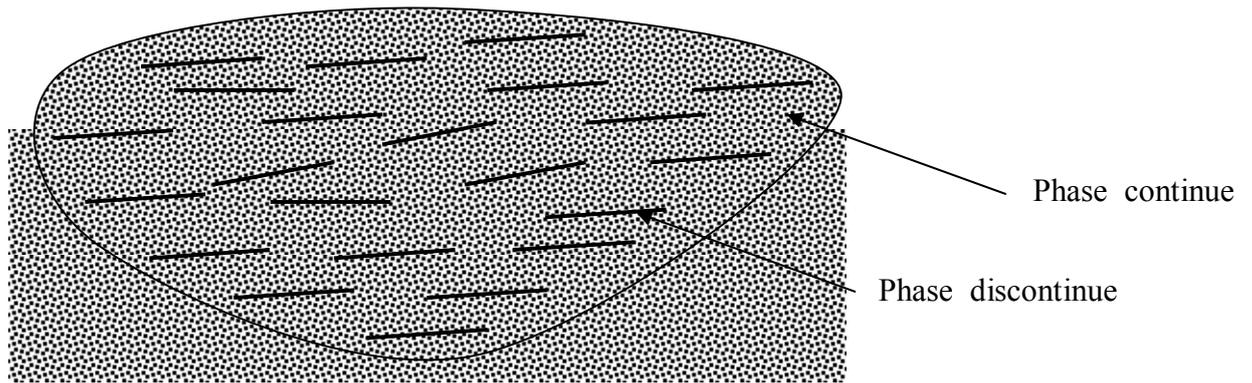
Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice; ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés: les pigments de coloration, l'isolation thermique ou acoustique[20] [2].

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
1/Composites à matrice organique - papier -carton -panneaux de fibres toiles enduites -matériaux d'étanchéité et pneumatiques	-Résine/fibre cellulosique -Résine /copeaux -Résine / tissus -Elastomère -Caoutchouc/ acier	-Imprimerie -bâtiment -toitures -Automobile
2/composites à matrice minérale -bidon -Composite –carbone-	Ciment /sable /granulats Carbone / fibres	-Géné civil -aviation -espace
3/ Composites à matrice métallique	Aluminium /fibres de bore Aluminium /fibres de carbone	- aéro-spacial

**Tableau 4-1:** les différents types de composites.

#### 4-1-3 Les caractéristiques générales

Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée " la matrice ", la phase discontinue est appelée "le renfort " (figure 4-1).



**Figure 4-1:** les différents types de composites.

Les propriétés des matériaux composites résultent en:

- les propriétés des matériaux constituants.
- leurs distributions géométriques.
- leurs interactions.

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

- la nature des constituants et leurs propriétés.
- la géométrie du renfort, et sa distribution.
- la nature de l'interface: matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (son orientation).

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse), la concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés mécaniques du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important, sa distribution uniforme assurera une homogénéité du matériau composite.

Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans des zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas des matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'isotropie du matériau composite.

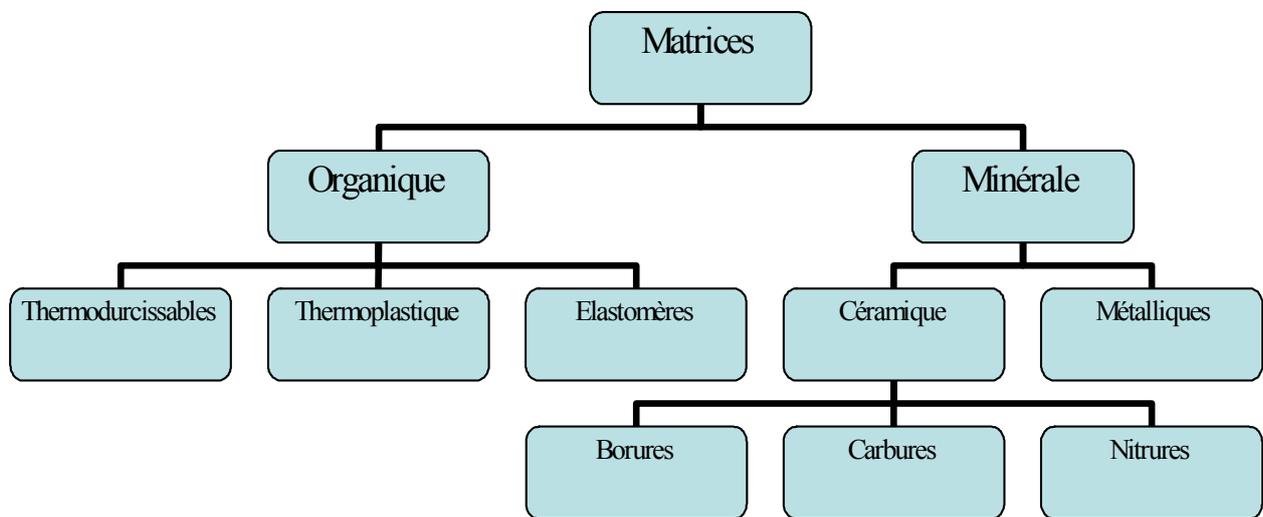
Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées[5] [6].

**4-2 Les matrices**

**4-2-1 Introduction**

Du fait de leurs faibles sections (des diamètres aux environs de 10 à 20 µm), les fibres ne pouvant toute fois être utilisées directement dans une application mécanique d'où l'idée de les incorporer dans une matrice polymère pour constituer un composite à fibres.

La matrice a ainsi diverses fonctions: lier les fibres entre elles, transférer les charges mécaniques aux fibres, protéger les fibres de l'environnement extérieur, ainsi ce nouveau matériau modulable, présente des caractéristiques mécaniques spécifiques assez élevées.



*Figure 4-2: Organigramme des différentes familles de matrice.*

**4-2-2 Définitions**

La matrice composée elle même d'une résine ( polyester , époxy etc.) , et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène et le composite est constitué de ce matériau homogène (la matrice) et d'un renfort. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis –vis des agressions extérieures.

### 4-2-3 Les résines

#### 4-2-3-1 Différents types de résines

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur, les résines doivent donc être assez déformables et présentent une bonne compatibilité avec les fibres. En outre elles doivent avoir une masse volumique, et des caractéristiques mécaniques spécifique élevées.

Compte tenu des contraintes, les résines utilisées sont des polymères modifiés par différents adjuvants et additifs (agents de démoulage stabilisant etc.), les résines sont livrées en solution sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules prépolymérisées.

Deux grandes familles de résines polymères existent: les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables.

Ces deux types de résines possèdent la faculté de pouvoir être moulés ou mises en forme pour donner, soit un produit fini soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée[2].

#### 4-2-3-2 Les résines thermodurcissables (TD)

Sont associées à des fibres longues, leur structure a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontage (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme, de façon définitive lors d'un échauffement (la transformation est donc irréversible). Ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique, ainsi elles possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques.

Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites. Parmi ceux qui sont les plus utilisés:

##### a) les résines polyesters insaturées

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

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classés en: résines souples, résines semi-rigides et résines rigides.

Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide, leurs avantages sont:

- une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé.
- une bonne stabilité dimensionnelle.
- une bonne mouillabilité des fibres et des tissus.
- la facilité de mise en œuvre.
- un faible coût de production.
- une bonne tenue chimique.
- une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.).

Et leurs inconvénients sont:

- Emission des styrènes ( éléments polluants)
- inflammabilité.
- une dégradation à la lumière par des rayons ultraviolets.
- une mauvaise tenue à la vapeur et à l'eau bouillante.
- retrait important.

#### b) les époxydes

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

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

- ses avantages sont :

- Adhérence parfaite sur les fibres.
- une bonne propriété mécanique (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.), supérieure à celles des polyesters.
- faible retrait.
- mise en œuvre facile, sans apport de solvant.
- bonne tenue thermique, chimique et à la fatigue.

- ses inconvénients:

- coût élevé.
- temps de polymérisation long.
- vieillissement sous température.
- sensibilité à l'humidité et aux rayons ultra –violet.
- nécessite de prendre des précautions lors de la mise en œuvre.

c) **les résines vinylesters**

Elles sont considérées comme des variantes de polyesters, qui se produisent à partir d'acides acryliques, elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeurent combustibles.

d) **les résines phénoliques**

Elles se caractérisent par une bonne tenue au feu sans fumée, elles restent fragiles, sensible à l'humidité, difficile à colorer et mettre en œuvre.

e) **les résines polyuréthannes et polyurées**

Dans la fabrication des pièces composites, il est utilisé surtout des formules, dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule, les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides.

f) **poly-imides**

Ces résines sont surtout utilisées dans les composites à haute performance pour leurs stabilités à haute température (de l'ordre de 250°C), elles restent toutefois difficile à mettre en œuvre, ils sont utilisés essentiellement dans les pièces de structure pour les réacteurs.

g) **Bismaléimides**

Ce sont des matrices très peu utilisées, elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et à la température, mais restent difficiles à mettre en œuvre, elles sont utilisées comme support dans les cirant imprimés.

#### **4-2-3-3 les résines thermoplastiques (TP)**

La famille des résines thermoplastiques est très vaste, et peut être séparée en plastique de grande diffusion et plastique technique. Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extension pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc.

Les plastiques sont généralement mis en œuvre par injection.

Les résines thermoplastiques possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme

plusieurs fois par chauffage, et par refroidissement successifs, donc elles peuvent être récupérées et facilement recyclées.

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

Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivantes:

- polyamide: une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- polytéréphtalate éthylénique et butylique: bonne rigidité.
- polycarbonate: une bonne tenue au choc.
- polysulfures de phénylène: une résistance à l'hydrolyse.
- polyoxyméthylènes: une bonne tenue à la fatigue.
- polysulfurés: une bonne stabilité chimique.
- polypropylène: assez stable en température, mais combustible.

L'intérêt des résines thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois des matières premières disponibles et des procédés de fabrication, toutefois ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques, et thermomécaniques faibles.

Ces diverses résines peuvent être renforcées par des fibres courtes, cependant dans le domaine des composites ces résines ont un développement limité du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à haute température de produits solides.

#### 4-2-3-4 Comparaison entre ces deux types de résines

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

*Tableau 4-2: Comparaison entre les deux types de résines.*

#### 4-2-4 les charges et additifs

##### 4-2-4-1 Introduction

Ils est désigné sous le nom général de charge ou additif toute substance inerte, minérale, ou végétale qui, incorporée à la résine, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface, de réduire le prix de revient du matériau transformé ou de faciliter la mise en œuvre du matériau composite.

À l'inverse des matrices thermoplastiques (TP), les matrices thermodurcissables (TD) contiennent des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60% en terme de masse[2].

Pour une résine donnée, le choix des charges ou des additifs est déterminé en fonction des modifications recherchés pour l'objet fini, mais d'une manière générale, ce choix devra satisfaire un certain nombre d'exigences qui sont:

- compatibilité avec la résine de base.
- Mouillabilité.
- uniformité de qualité et de granulométrie.
- faible action abrasive.
- bas prix de revient.

##### 4-2-4-2 Les charges

Il y a plusieurs types de charges:

###### a) les charges organiques

Les charges cellulósiques utilisées comme étant des charges de résines thermodurcissables. ces avantages sont d'un coût peut élevé et d'une faible densité .

###### b) les charges minérales

Sont les craies et les carbonates. Les craies sont à 99% de calcite, de la silice et d'autres minéraux, Les carbonates de calciums ou de magnésium sont utilisés comme des charges et aussi comme des retardateurs de flamme.

###### c) Oxydes et hydrates métalliques

- Poudre et micro sphères:

L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium, de titane et d'antimoine sont utilisés sous forme de poudre fines. Ils permettent de diminuer le prix de revient et augmenter la densité de la matière élastique.

- Alumine et trihydrate d'aluminium:

L'alumine apporte aux résines une meilleure résistivité électrique ainsi qu'une bonne conductivité thermique, elle diminue le coefficient de dilatation thermique, augmente la rigidité ainsi que la résistance à l'abrasion et au feu. L'hydrate d'aluminium est une charge qui du point de vue prix, est concurrentielle, elle réduit l'inflammabilité ainsi que l'émission des fumées de combustion.

- Trioxyde d'antimonié :

Il apporte aux résines une coloration blanche.

- Les céramiques:

Il existe des microsphères en céramique dont la densité varie entre 0.4 et 2.4 et la dimension au-delà de 300  $\mu\text{m}$ .

Elle apporte une réduction de masse de 15 à 25% avec une amélioration de la résistance à la compression et au choc

- Le verre:

- poudres de verre : Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie de 13  $\mu\text{m}$ , son incorporation confère aux thermodurcissables une meilleure résistance à l'abrasion et à la compression, elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces mouillées
- billes de verre creuses: Sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent de gonflement, elles améliorent la résistance à la pénétration de l'eau et au vieillissement
- microsphères de verre: l'utilisation de microsphères de verre permet de réduire de 25 à 35% la masse des pièces obtenues (destinées à l'industrie d'automobiles)

- Le carbone:

Le carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques à la fois colorant, barrière anti-ultraviolet, et anti-oxydant, il améliore la résistance à la chaleur.

#### **4-2-4-3 Les Additifs**

Les additifs se trouvent en faible quantité, quelques pourcentages de moins, par contre les charges peuvent atteindre des dizaines de pourcentage et interviennent comme étant:

- lubrifiants et agents de démoulage

- pigments et colorants
- agents anti-retrait
- agents anti- ultraviolet

#### a) **lubrifiants et agents de démoulage**

Ces agents ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules.

#### b) **pigments et colorants**

Les pigments sont des produits insolubles, se présentent sous forme de poudres ou de paillettes, généralement. Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques.

A partir de ces pigments, il est également possible d'obtenir des pâtes colorants, constituées de dispersions de pigment dans une pâte de manière à avoir une utilisation aisée.

Les colorants sont des composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant organique, leur emploi est généralement limité, à savoir sa mauvaise tenue chimique et thermique.

Le choix de ces agents est fonction de sa compatibilité avec la résine du composite et de l'utilisation du matériau composite.

#### c) **agents anti- retrait et agents de fluage**

Ces agents peuvent aboutir à un mauvais état de surface, un gauchissement ou des microfissurations de la pièce moulée, bien que l'incorporation des charges à la résine en limite le retrait; il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques anti- retrait (additif appelé " low shrink") qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait. Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage.

Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base de thermoplastiques ou d'élastomères, se présentent sous forme de poudre ou de solution.

#### d) **agents anti- ultraviolets**

Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines des rayons ultraviolets. le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et éviter ainsi la détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation.

### 4-3 Les fibres

#### 4-3-1 Introduction et définitions

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites, et se présentent sous forme filamentaire. Ils sont caractérisés par:

- la nature de la fibre: minérale ou organique.
- l'architecture de renfort: unidirectionnelle ou bidirectionnelle.
- principaux matériaux de renfort.

Ces renforts sont constitués par plusieurs centaines ou milliers de filaments, de diamètre compris entre 5 et 15  $\mu\text{m}$ .

Il existe deux types de fibres:

- fibres courtes: quelques centimètres ou fraction de millimètre, les feutres, les mats et les fibres courtes impactées utilisées en moulage
- fibres longues: coupées au moment de la fabrication du matériau composite, utilisées telles quelles ou bien tissées.

Ces différents types de fibres sont classés selon la nature de leurs composants:

- Des renforts à base de fibres unidirectionnelles: orientés suivant une même direction de l'espace
- Des renforts à base de fibres bidimensionnelles: surface tissées (tissus).
- Des renforts à base de fibres tridimensionnelles: volumes préformés ou non, constitués par des fibres orientées

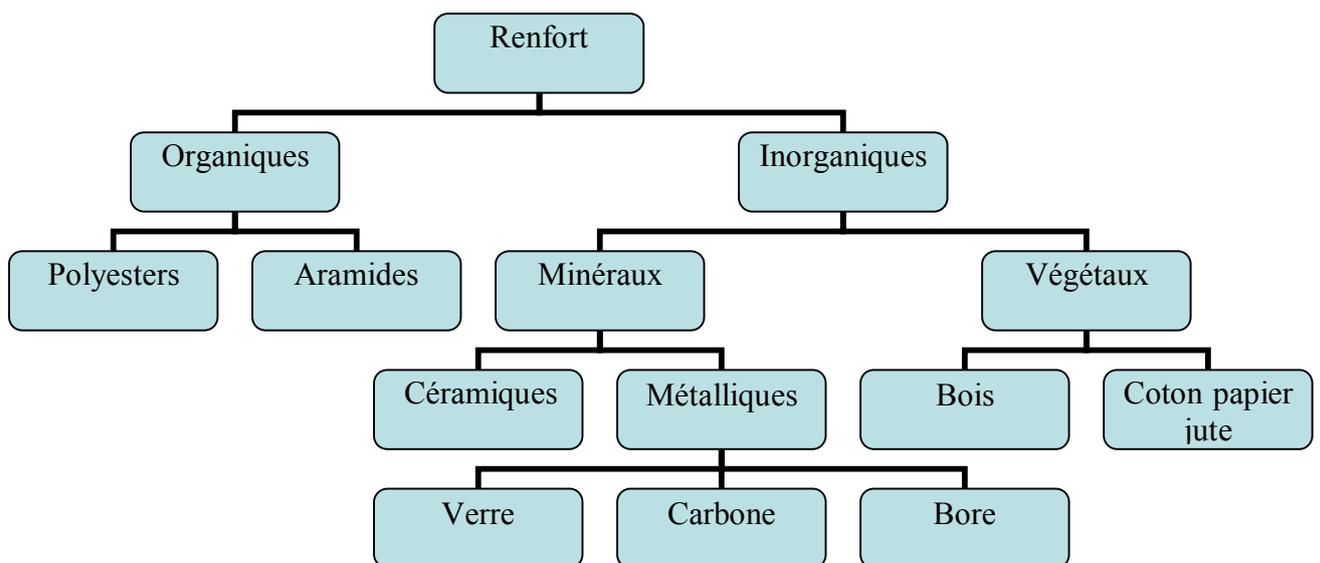


Figure 4-3: Organigramme des différentes familles de fibres.

### 4-3-2 Les fibres de carbone

#### 4-3-2-1 Elaboration des fibres de carbone

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé "précurseur", se présentant lui même sous forme de fibres orientées.

Actuellement, les fibres utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité finale des fibres de carbone dépend des qualités du précurseur. Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique, sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation dans laquelle on retrouve la structure initiale des fibres. Les procédés actuels utilisent des mèches de filaments acryliques assemblés sans torsion (de 1000 , 6000 jusqu'à 10000 filaments ) , et leur font subir quatre traitements successifs : une oxydation, une carbonisation, une graphitisation et un traitement de surface[2].

##### a) L'oxydation

Les fibres acryliques étant fusibles, la phase d'oxydation a pour but de supprimer artificiellement le pont de fusion. Cette opération est effectuée en chauffant les fibres à environ 300°C en atmosphère d'oxygène. Il se produit alors une oxydation à une réticulation des chaînes moléculaires.

##### b) La carbonisation

Cette deuxième phase consiste à chauffer progressivement les fibres réticulées de 300°C à 1100°C environ, en atmosphère inerte. Il y a alors une élimination de l'eau et de l'acide cyanhydrique, seuls les carbones sont conservés dans la chaîne.

Les fibres ainsi obtenues ont de bonnes caractéristiques mécaniques et peuvent être utilisées après traitement de surface .Les fibres sont alors dénommées fibres à haute résistance (HR) ou à haute ténacité (HT).

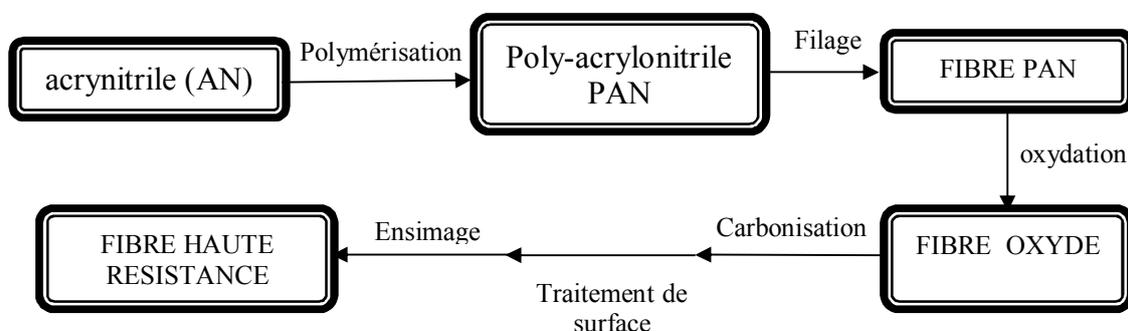
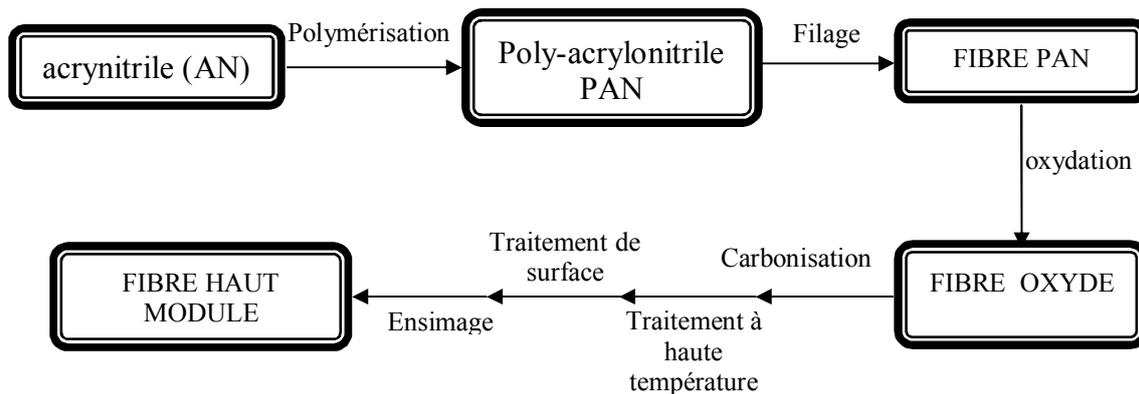


Figure 4-4: Fabrication par carbonisation des fibres haute résistance (HR)

### c) La graphitisation

La phase de graphitisation est utilisée lorsqu'on souhaite obtenir des fibres à module d'Young élevé. Cette phase consiste à effectuer à la suite de la carbonisation, une pyrolyse des fibres, en atmosphère inerte, jusqu'à une température de l'ordre de 2600°C . La graphitisation provoque une réorientation des réseaux de carbone suivant l'axe des fibres, ce qui aboutit à une augmentation du module d'Young. Suivant le taux de graphitisation, on obtient des fibres à haut module (HM) ou des fibres à très haut module.



*Figure 4-5: Fabrication par graphitisation des fibres haut modules (HM)*

### d) Le traitement de surface

La dernière phase consiste en un traitement de surface, par oxydation ménagée en milieu acide (nitrique ou sulfurique). Cette phase a pour objet d'accroître la rugosité des filaments ainsi que la nature des liaisons chimiques afin d'améliorer la liaison fibre-résine.

#### 4-3-2-2 Les caractéristiques mécaniques des fibres de carbone

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques, d'autant plus que leur masse volumique est faible. En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue à haute température. En effet leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500°C environ. Cette propriété a conduit à développer des composites : fibres de carbone/matrice de carbone, à haute tenue thermique, utilisés dans les tuyères de fusées, les éléments de fours, etc. Ces matériaux revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante, trouvent également des applications en atmosphère oxydante dans le domaine spatial.

### **4-3-2-3 Les produits industriels**

Le produit de base en industrie courante est le fil continu, constitué de monofils de carbone, assemblés sans torsion. Ces stratifils peuvent être utilisés directement pour les procédés de fabrication de composites par pultrusion ou par enroulement filamentaire. Les stratifils peuvent être également tissés pour obtenir des rubans, des tresses, des tissus unidirectionnels ou multidirectionnels.

### **4-3-2-4 Conclusion et commentaires**

La liaison covalente carbone-carbone est la plus forte que nous trouvons dans la nature, puisque c'est le sixième élément chimique classé dans le tableau de Mandeliev. L'étude théorique des liaisons prévoit dans la direction parallèle aux plans cristallographiques un module de Young de  $1200 \text{ KN/mm}^2$  et une résistance à la rupture de  $20000 \text{ N/mm}^2$ , ainsi qu'une faible masse volumique, de l'ordre de  $2000 \text{ Kg/m}^3$ , conduisant à des propriétés mécaniques spécifiques remarquablement élevées.

Ces faits expliquent les nombreux développements et d'élaboration, permettant d'obtenir des fibres de carbone les plus parfaites possibles.

Les fibres industrielles n'atteignent toutefois pas ces valeurs numériques, théoriques, du fait des imperfections des structures cristallines. Les caractéristiques des fibres ainsi élaborées restent cependant élevées et peuvent atteindre une performance de l'ordre de  $650 \text{ KN/mm}^2$  pour le module de Young et  $4000 \text{ N/mm}^2$  pour la contrainte de rupture.

### **4-3-3 Les fibres de verre**

#### **4-3-3-1 L'élaboration des fibres de verre**

Les fibres de verre sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières chauffées aux environs de  $1250^\circ\text{C}$ . A cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir, soit des filaments continus, soit des fibres discontinues. Il existe deux procédés d'étirage : l'un mécanique et l'autre pneumatique.

**a) Etirage mécanique**

A la sortie de la filière, les fibres sont étirées par un procédé mécanique. Les monofilaments sont assemblés parallèlement sans torsion, sous forme de fils de base dénommés "sillionnes". Ces fils de base sont les plus utilisés comme renforts de verre dans les matériaux composites.

**b) Etirage pneumatique**

Dans ce procédé, les fibres de verre sont étirées par un système d'aspiration à travers un tambour perforé. Les fibres obtenues, discontinues et de longueur allant de 5 à 80 mm, sont ensuite assemblées parallèlement en un ruban appelé "verranne". Les fibres verranne se distinguent des fibres sillionne par un aspect pelucheux.

**c) Ensimage des fibres de verre**

Les filaments de verre issus de la filière ne peuvent pas être utilisés directement pour diverses raisons:

- L'absence de cohésion entre les filaments qui s'oppose à la constitution de fils
- La sensibilité du verre à l'abrasion.
- La sensibilité à l'attaque à l'eau.
- La création de charges électrostatiques consécutive aux divers frottements.

Pour palier à ces défauts, on réalise à la sortie de la filière, une opération dite "ensimage", qui consiste à déposer à la surface des filaments de verre, un produit d'ensimage de composition complexe. A la lumière des défauts évoqués ci-avant, les diverses fonctions essentielles de l'ensimage sont:

- Etablir une cohésion certaine entre les filaments.
- Donner une raideur assez grande aux fils.
- Protéger les filaments contre l'abrasion.
- Eviter l'apparition de charges électrostatiques.
- Faciliter l'imprégnation des filaments par la résine.
- Favoriser la liaison verre-résine dont dépendent les performances mécaniques du composite, mais également son comportement vis-à-vis du vieillissement, de la sensibilité à l'humidité et à la corrosion, etc.

**4-3-3-2 Les propriétés mécaniques**

A la suite du fibrage, les filaments de verre sont soumis à diverses sollicitations mécaniques (abrasion, etc.), chimiques (humidité, etc.) qui réduisent leurs caractéristiques mécaniques

initiales. Dans les matériaux composites, la liaison verre-résine par l'intermédiaire de l'ensimage assure une répartition assez homogène de la charge.

Il est intéressant de noter que les fibres de verre, conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures assez élevées, de l'ordre de 200°C pour le verre de type E, et de 250°C pour le verre de type R. Ces fibres sont donc bien adaptées pour le renforcement des résines à tenue thermique élevée.

Caractéristique		Verre type E	Verre type R
Masse volumique $\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	2600	2550
Module d' Young $E_f$	(N/mm <sup>2</sup> )	73000	86000
Contrainte à la rupture $\bar{\sigma}_{fu}$	(N/mm <sup>2</sup> )	3400	4400
Allongement à la rupture $\varepsilon_{fu}$	(%)	44	52

**Tableau 4-3:** caractéristiques mécaniques des verres type E et R mesurées sur filament.

#### 4-3-3-3 Produits industriels

Les fils de base sont élaborés par assemblage parallèle, sans torsion des monofilaments à la sortie de la filière, pour aboutir soit à des fils continus (fils silionne), soit à des fils discontinus (fils verranne), et sont caractérisés essentiellement par:

- La désignation des verres (type E ou R).
- Le type du fil : silionne ou verranne.
- Le diamètre des filaments.
- La masse linéique du fil.

#### 4-3-3-4 Conclusion

Dans la gamme des fibres de verre, il existe également des complexes appelés: mâts-tissus mis au point pour répondre à des exigences particulières. Leur principale application est le renforcement des pièces de formes planes ou à grands rayons de courbure et plus particulièrement de grandes dimensions. Dans de telles pièces sollicitées en flexion, le tissu est disposé dans la zone sollicitée en traction, et le mât dans la zone en compression, compte tenu de leurs bonnes adéquations respectives à ces deux types de sollicitations.

### 4-3-4 Les fibres d'aramides

#### 4-3-4-1 Elaboration des fibres d'aramides

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de "Kevlar", nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours .

L'élaboration des fibres d'aramide est effectuée à basse température (-10°C), puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement afin d'augmenter leur module d'élasticité.

#### 4-3-4-2 Les caractéristiques et utilisation industrielle des fibres d'aramides

Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont reportées dans le tableau 4-4. Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres aramides:

- Résistance faible à la compression, à la flexion, au flambement.
- Sensibilité au cisaillement.

Ces faiblesses sont généralement attribuées à une mauvaise adhérence fibre-matrice. Compte tenu de leur légèreté et de leur bonne résistance au choc, à l'impact et à l'abrasion, les fibres aramides sont utilisées pour la fabrication de blindages et de produit de friction et de joints.

Caractéristique		Kevlar 29	Kevlar 49
Masse volumique $\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	1440	1450
Module d' Young $E_r$	(N/mm <sup>2</sup> )	60000	120000
Contrainte à la rupture $\sigma_{fu}$	(N/mm <sup>2</sup> )	3000	3000
Allongement à la rupture $\epsilon_{fu}$	(%)	36	19

**Tableau 4-4:** caractéristiques mécaniques de monofilament d'aramides.

### 4-3-5 Les fibres de bore

un filament de tungstène ( $\phi = 12 \mu\text{m}$ ) sert de catalyseur à la réaction de chlorure de bore et d'hydrogène à 1200°C. les fibres de bore obtenues ont un diamètre d' environ 100  $\mu\text{m}$  (la vitesse de croissance est de 1  $\mu\text{m/s}$ ).

fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène

#### 4-3-6 Les fibres de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

#### 4-3-7 Les fibres de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

#### 4-3-8 Les Caractéristiques des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filament ( $\mu\text{m}$ )	Masse volumique ( $\text{kg}/\text{mm}^3$ )	Module d'élasticité longitudinal ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Module de cisaillement ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction) ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Allongement à la rupture (%)	Coefficient de dilatation thermique
	D	Mv	E	G	K	G	A	u
Verre E	16	2600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	$0.5^\circ 10$
Verre R	10	2500	86 000		0.2	3 200	4	$0.3^\circ 10$
Carbone HM	6.5	1800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	$0.08^\circ 10$
Carbone HR	7	1750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	$0.02^\circ 10$
Kevlar 49	12	1450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	$0.2^\circ 10$
Bore	100	2600	400 000			3 400	0.8	$0.4^\circ 10$
Silicate d'alumine	10	2600	200 000			3 000		
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

Tableau 4-5: Les Caractéristiques des fibres et renforts.

## **4-4 Classification des matériaux composites**

### **4-4-1 Classification suivant la forme des constituants**

#### **a) Introduction**

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants. En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

#### **b) Les composites à fibres**

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous une forme fibreuse. Les fibres utilisées se présentent, sous un aspect de fibres continues, sinon d'un aspect discontinu : ces fibres sont soit coupées, soit courtes.

L'arrangement des fibres, et leurs orientations dans un plan, permet de moduler les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes.

#### **c) Les composites à particules**

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de dimensions privilégiées.

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc.

Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour diminuer le coût de revient du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Le choix de l'association matrice – particules dépend des propriétés souhaitées par exemple, des incursions de plomb dans des alliages de cuivre, ces particules facilitent l'usinage.

Des particules de métaux tels que le tungstène, le chrome incorporé dans les métaux ductile, augmentera leurs propriétés à température élevée, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante[2].

### **4-4-2 classification suivant la nature des constituants**

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant les composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices, seuls certains couples d'association ont actuellement un usage

industriel:

- composites à matrice organique avec :
  - fibres minérales : verre, carbone.
  - fibres organiques : kevlar, polyamide.
  - fibres métalliques : bore, aluminium.
  
- composites à matrice métallique avec :
  - fibres minérales : carbone.
  - fibres métalliques : bore.
  - fibres métal –minérales. Fibres de bore revêtues de carbure de silicium.
  
- composites à matrice minérale avec :
  - fibres métalliques.
  - particules métalliques.
  - particules minérales.

#### 4-5 Conclusions

Les matériaux composites présentent des avantages tels que:

- résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée.
- poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier ; pour une même résistance ultime le poids de PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) est inférieur de 10% au poids des platines d'acier.
- maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.
- Vu la difficulté d'assemblage et de transport sur site des platines d'acier, les PRFC sont beaucoup plus concluants que ces derniers.
- facilité de préparation de surfaces
- la non nécessité d'une fixation mécanique comparativement aux platines d'acier, cependant le collage des matériaux composites doit être minutieux.
- la durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à la corrosion par rapport à celle des platines d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leurs zones de fixation seront fissurées.

- tenue au feu : la conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente à celle des platines d'aciers.
- réduction du risque « gel- dégel » : la mise en œuvre du bandage des matériaux composites favorise une bonne étanchéité vis-à-vis de la formation du phénomène « gel- dégel »
- la maintenance et entretien : le système de renforcement de matériaux composites n'exige pas un entretien, par contre le renforcement par les platines d'acier demande une maintenance périodique continue.
- réduction du temps d'exécution et mise en œuvre : la préparation, le transport et la mise en œuvre des platines d'acier prend un temps considérable par rapport à l'application des matériaux composites.
- l'aptitude de précontrainte dans les matériaux composites : un nouveau champ des bandes plats de précontrainte des composites est appliquée afin de compenser la perte de tension dans l'élément structurel et réduire ainsi les fissures.
- Le choix est porté sur les fibre de carbone en comparaison avec les fibres de verre et les fibres d'aramide (*tableau 4-6*), de MEIR.

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

**Tableau 4-6:** comparaison qualitative entre fibres.

## *Chapitre 5*

# **COMPORTEMENT D'UNE POUTRE RENFORCEE AU MOYEN DE MATERIAUX COMPOSITES EN FLEXION SIMPLE : ANALYSE ET DEVELOPPEMENT GRAPHIQUE**

## **5 COMPORTEMENT D'UNE POUTRE RENFORCEE AU MOYEN DE MATERIAUX COMPOSITES EN FLEXION SIMPLE : ANALYSE ET DEVELOPPEMENT GRAPHIQUE**

### **5-1 Introduction**

L'analyse des sections usuelles ou non usuelles en béton armé des poutres ,soumises à la flexion simple, a fait déjà l'objet d'un ensemble d'études [18].

L'analyse de ces sections, et la détermination de leurs moment ultime sont laborieuses, vu qu'elles nécessitent l'exploitation des diagrammes contraintes-déformations, des caractéristiques mécaniques du béton et de l'acier, ainsi que les caractéristiques géométriques des sections.

Le traitement de ces sections est développé, par le biais d'abaques à trois entrées liant graphiquement le moment réduit ( $M_u/bd^2$ ) aux taux d'armatures tendues et comprimées. Ces abaques ayant une double utilisation :

- La détermination de la capacité flexionnelle
- Le taux de ferrailage.

L'objet du présent chapitre est de développer une étude analytique de sections en béton armé ordinaire puis renforcées au moyen de matériaux composites ( PRFC: polymère renforcé en fibre de carbone), et faire ressortir les effets des différents paramètres influents sur le comportement de la section:

- L'enrobage de la section considérée
- Le taux d'armatures tendues et comprimées.
- La résistance caractéristique du béton.
- La contrainte d'écoulement des armatures.
- Le nombre de plis du matériau composite utilisé.

Cette étude est basée sur le concept de la théorie générale des sections en béton armé soumises à la flexion simple aux états limites ultimes. Cette théorie a pour hypothèses:

- Le béton dans sa partie tendue est négligé.
- Les sections droites avant déformation restent droites après déformation.

- Pas de glissement relatif entre les armatures d'aciers ou le matériau composite et le béton (condition de compatibilité des déformations).
- Un bloc de contraintes rectangulaire fictif est adopté pour le béton.
- Le raccourcissement relatif du béton est limité à  $\epsilon_{cu} = 3.5 ‰$ .
- la limite d'écoulement pour les aciers est de  $\epsilon_e = 2 ‰$ .
- Le composite dans sa partie comprimée est négligé.

Les lois de comportement retenues pour le béton et l'acier sont celles adoptées par l'Eurocode2 [18].

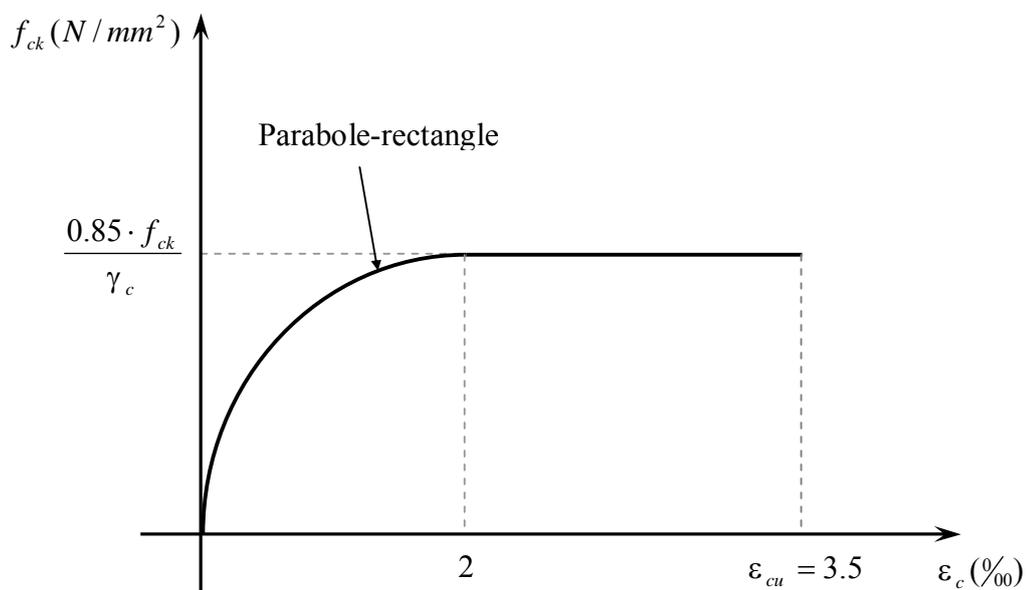
La loi de comportement retenue aussi pour le composite est définie dans plusieurs documents et recommandations techniques: SIKA, FREYSSINET, [9].

## 5-2 Caractéristiques des matériaux

### 5-2-1 le béton

Aux états limite ultimes, le diagramme contraintes-déformations utilisé est le diagramme dit "parabole-rectangle" [18].

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



*Figure 5.1 : loi de comportement du béton*

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

La valeur de  $\gamma_c$  est généralement prise égale à 1.5

### 5-2-2 Les aciers

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

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

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

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

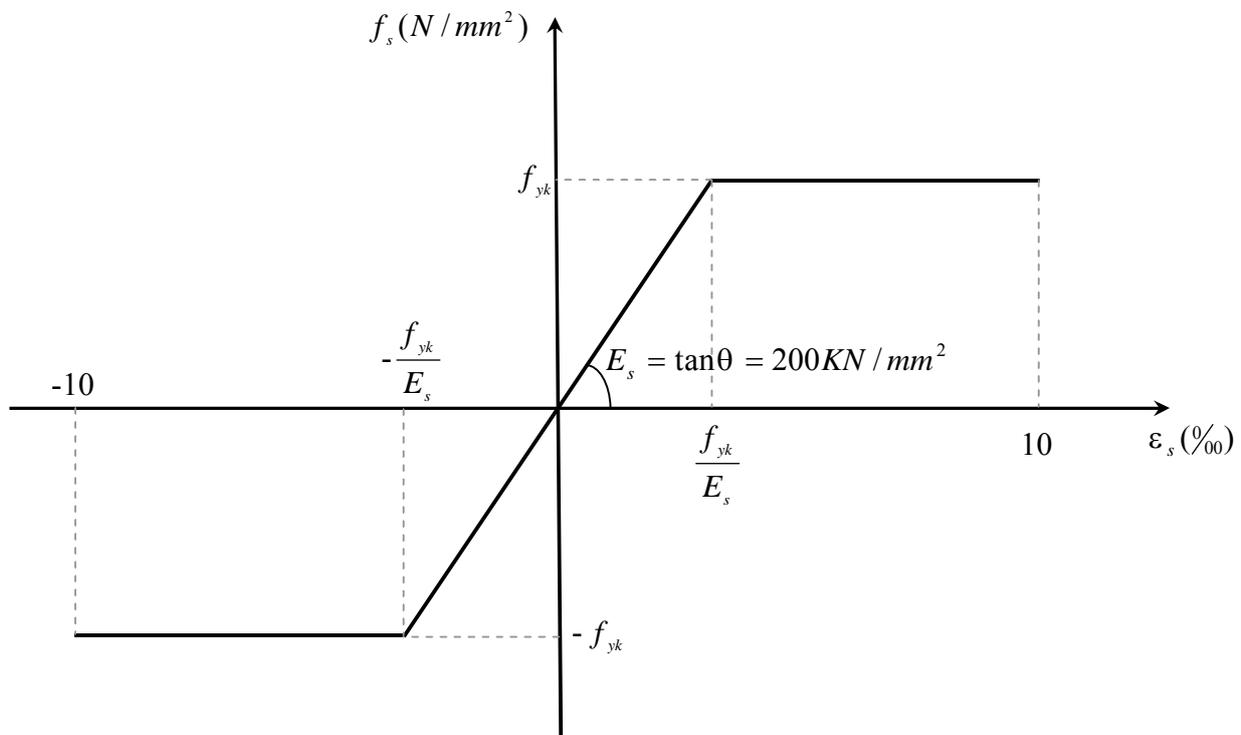
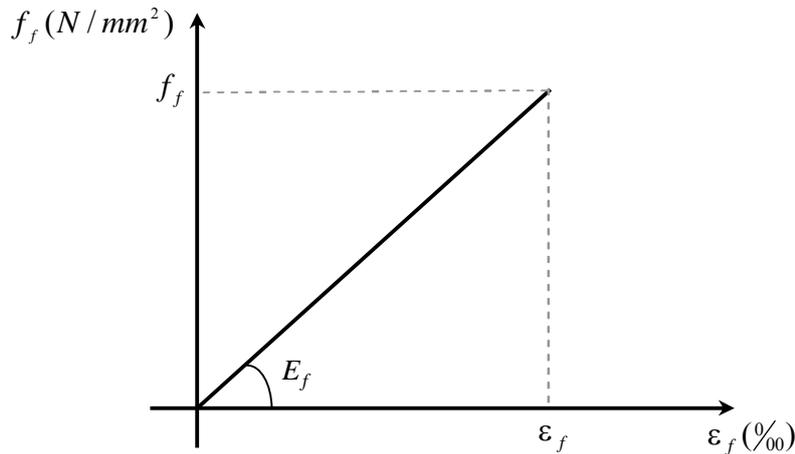


Figure 5.2 : loi de comportement de l'acier

### 5-2-3 Le matériaux composites

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

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



*Figure 5.3 : Loi de comportement du composite*

Cette loi se décrit par les deux paramètres:

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

Ces paramètres sont issus d'un essai de traction tel que présenté dans le paragraphe 1.7 (détermination des propriétés mécaniques en traction des composites stratifiés in situ) [9] [10].

## 5-3 Développement des équations de base pour une section non usuelle soumise à la flexion simple

### 5-3-1 Section non usuelle en béton armé non renforcée

Le bloc des contraintes rectangulaire simplifié adopté par [18], est basé sur le principe de Whitney, cas de l'utilisation d'un bloc rectangulaire fictif de telle sorte que le centre de gravité du bloc coïncide avec le centre de gravité du bloc réel, et sa valeur est de l'ordre de 80% de la valeur de la profondeur de l'axe neutre à partir de la fibre la plus comprimée.

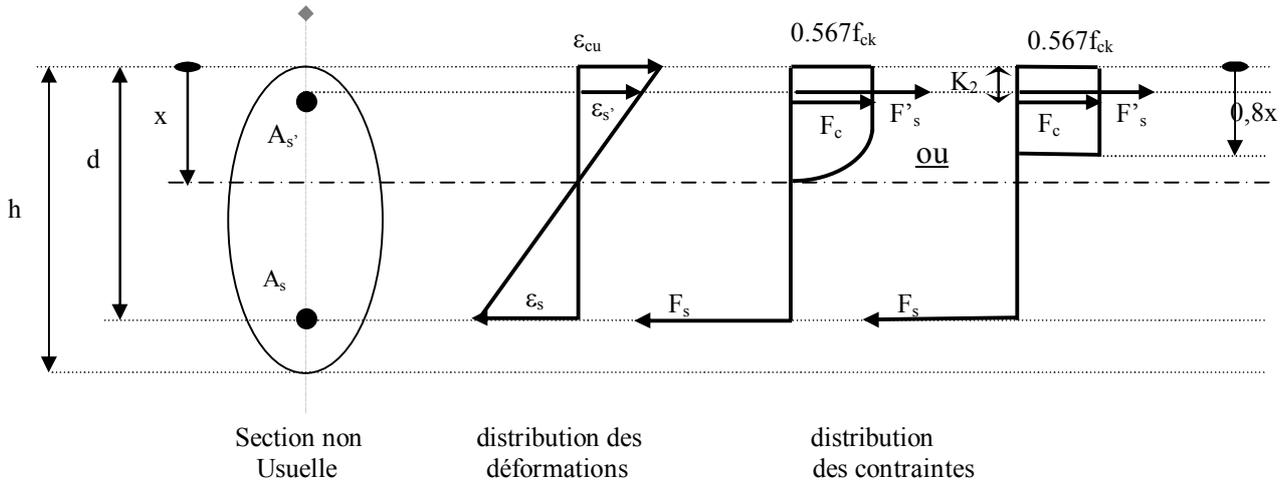


Figure 5.4: Image à l'E.L.U d'une section non usuelle en béton armé

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

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

La valeur de la déformation relative de la fibre la plus comprimée du béton est fixée à 3.5‰, pour une section à l'état limite ultime [4].

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

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

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

Pour le bloc rectangulaire fictif des contraintes du béton :

- $K_1 = 0.567$
- $K_2$  est le coefficient de positionnement pris égal à 0.4

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

$$F_c + F_s' = F_s \quad (5-3)$$

où  $F_c$  est la force de compression dans le béton

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

$$F_C = 0.567 \cdot f_{ck} \cdot A_C(x)$$

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

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

$F_S$  est la force de traction au niveau des armatures tendues.

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

L'équation d'équilibre devient alors:

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

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

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

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

- i. Fixer la profondeur de l'axe neutre " $x$ " pour une valeur balayant la section.
- ii. Calculer les déformations relatives " $\epsilon_s$ " et " $\epsilon'_s$ " à partir des équations (5-1) et (5-2).
- iii. Evaluer les contraintes  $f_s$  et  $f'_s$  respectivement à partir des diagrammes contraintes-déformations appropriés.
- iv. Injecter ' $x$ ,  $f_s$ , et  $f'_s$ ' dans l'équation d'équilibre (5-7).
- v. Vérifier à travers l'équation (5-8) si l'équilibre est atteint, donc " $x$ " est solution. Dans le cas contraire, le problème exigerait une succession des valeurs de " $x$ " jusqu'à ce que l'équilibre des forces soit atteint:  $F_C + F'_S = F_S$

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

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

En divisant les deux termes de cette équation par " $A_u \cdot d$ " , on obtiendra l'expression du "moment réduit"[4]:

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

### 5-3-2 Section non usuelle en béton armé renforcée

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

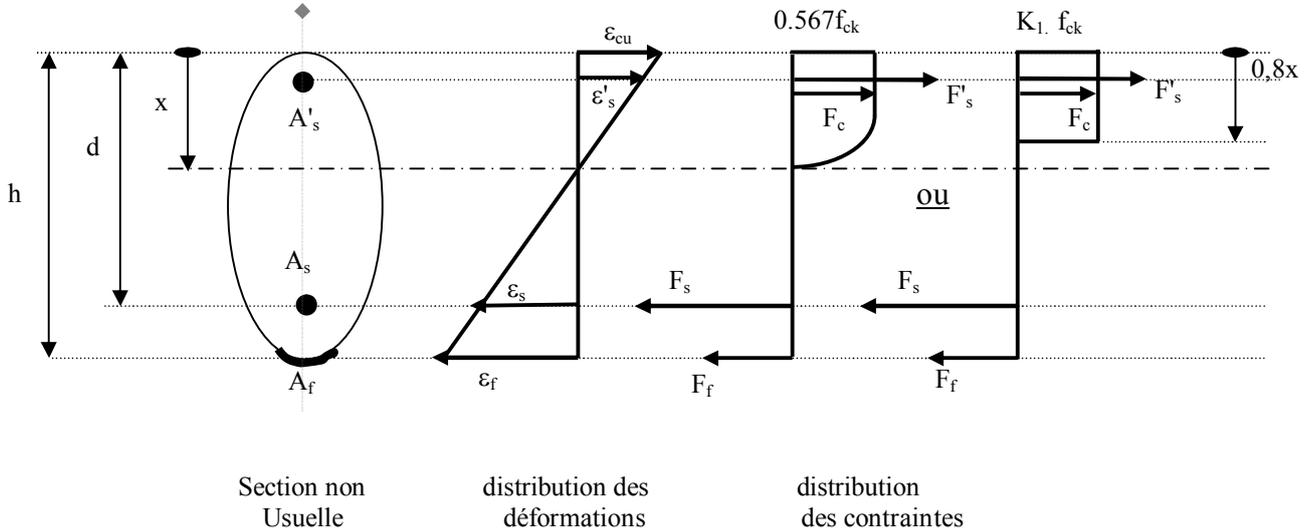


Figure 5.5: Image à l'E.L.U d'une section non usuelle en béton armé renforcée

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

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

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

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

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

$$\epsilon_f = \left( \frac{h + \frac{t}{2} - x}{x} \right) \cdot \epsilon_{cu} \quad (5-11)$$

Avec:

$t$  : l'épaisseur du renfort

$K_1$  pris égal à 0.567

$K_2$  : le coefficient de positionnement est pris égal à 0.4

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

$$F_C + F'_S = F_S + F_f \quad (5-12)$$

où  $F_C$  est la force de compression dans le béton

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

$$F_C = 0.567 \cdot f_{ck} \cdot A_C(x)$$

$F'_S$  est la force de compression des armatures comprimées.

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

$F_S$  est la force de traction des armatures tendues.

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

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

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

L'équation d'équilibre devient alors:

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

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

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

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

Les étapes à suivre dans cette méthode sont :

- i. Fixer la profondeur de l'axe neutre " $x$ ",commencer par  $x=d/2$ .
- ii. Calculer les déformations relatives " $\epsilon_s$ ", " $\epsilon'_s$ " et " $\epsilon_f$ ", à partir équations (5-1), (5-2) et (5-11).
- iii. Evaluer les contraintes  $f_s$ ,  $f'_s$  et  $f_f$  respectivement à partir des diagrammes contraintes-déformations appropriés.
- iv. Injecter  $x$ ,  $f_s$ ,  $f'_s$ ,  $f_f$  dans l'équation d'équilibre.

- v. Vérifier à travers l'équation (5-14) si l'équilibre est atteint, donc "x" est solution. Dans le cas contraire, le problème exigerait une succession de valeurs de "x" jusqu'à ce que l'équilibre des forces soit atteint:  $F_c + F_s' = F_s + F_f$

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

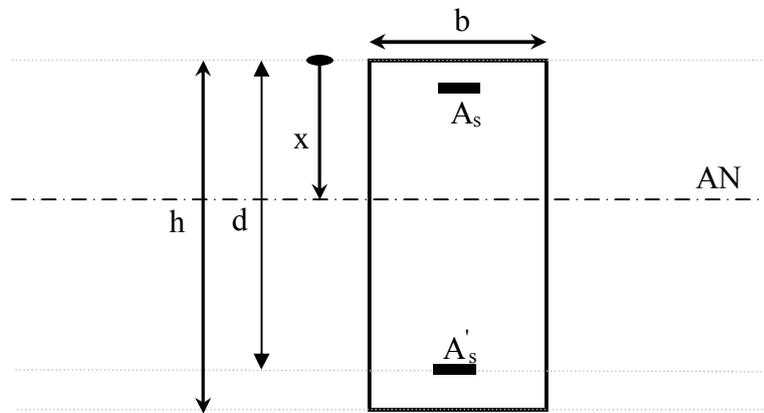
$$M_{u/cdg} = F_s' \cdot (0.4x - d') + F_s(d - 0.4x) + F_f(h + \frac{t}{2} - 0.4x) \quad (5-16)$$

Divisant les deux termes de cette équation par "A<sub>u</sub> d", on obtient l'expression du "moment réduit".

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

### 5-3-3 Section rectangulaire non renforcée

Les relations de l'analyse d'une section rectangulaire en flexion simple sont déduites de celles de la section non usuelle, en remplaçant la section du béton comprimé A<sub>c</sub>(x) par une section rectangulaire : A<sub>c</sub>(x) = b · x



**Figure 5.6:** section rectangulaire en béton armé

L'équation d'équilibre devient alors:

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

Donc:

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

La section utile est:

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

L'expression du moment réduit est donnée comme suit:

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

### 5-3-4 Section rectangulaire renforcée

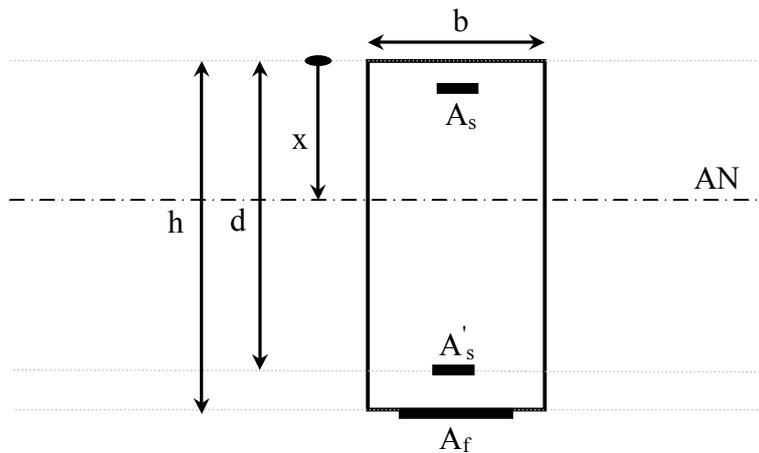


Figure 5.7: section rectangulaire en béton armé renforcée

L'équation d'équilibre est:

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

L'expression du moment réduit est donc:

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

### 5-3-5 Elaboration d'un exemple numérique

#### a) Détermination de la capacité flexionnelle d'une section rectangulaire non renforcée

Soit une section rectangulaire de 150x280, caractérisée comme suit:

d=260 mm	$f_{ck}=30 \text{ N/mm}^2$	$\epsilon_{cu}=3.5 \text{ ‰}$
d'=20 mm	$f_{yk}=400 \text{ N/mm}^2$	$K_1=0.567$
$A_s=A'_s=226 \text{ mm}^2$	$E_s=200000 \text{ N/mm}^2$	$K_2=0.4$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_s = \left( \frac{d-x}{x} \right) \cdot \varepsilon_{cu} \\ f_s = \varepsilon_s \cdot E_s \quad \text{Si } \varepsilon_s \leq 2\text{‰} \end{array} \right. \quad (\text{les armatures tendues})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon'_s = \left( \frac{x-d'}{x} \right) \cdot \varepsilon_{cu} \\ f'_s = \varepsilon'_s \cdot E'_s \quad \text{Si } \varepsilon'_s \leq 2\text{‰} \end{array} \right. \quad (\text{les armatures comprimées})$$

L'utilisation de la méthode d'essais successifs a permis de déterminer la profondeur de l'axe neutre x.

D'où l'équilibre des forces est vérifié pour une valeur de x= 26 mm, cela pour :

$$F_s = 90.4 \text{ KN}$$

$$F'_s = 36.51 \text{ KN}$$

$$F_c = 53 \text{ KN}$$

Le moment ultime de la section est exprimé comme suit:

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

$$M_{u/cdg} = 22.21 \text{ KN.m}$$

### **b) Détermination de la capacité flexionnelle d'une section rectangulaire renforcée**

Soit la même section précédente avec un renforcement au moyen de PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone) dans sa partie inférieure, d'une section de  $A_f = 150 \text{ mm}^2$

Avec :  $E_f = 55\,000 \text{ N/mm}^2$  (module de Young du matériau composite), et  $\varepsilon_{fu} = 11.5\text{‰}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_f = \left( \frac{h + t/2 - x}{x} \right) \cdot \varepsilon_{cu} \\ f_f = \varepsilon_f \cdot E_f \end{array} \right.$$

L'utilisation de la méthode d'essais successifs a permis de déterminer la profondeur de l'axe neutre x.

D'où l'équilibre des forces est vérifié pour une valeur de x= 56.5 mm, cela pour :

$$F_s = 90.4 \text{ KN}$$

$$F'_s = 90.4 \text{ KN}$$

$$F_c = 115.18 \text{ KN}$$

$$F_f = 114.48 \text{ KN}$$

Le moment ultime de la section est exprimé comme suit:

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

$$M_{u/cdg} = 90.4 \cdot (0.4 \cdot 56.5 - 20) + 90.4 \cdot (260 - 0.4 \cdot 56.5) + 114.48 \cdot (280.5 - 0.4 \cdot 56.5)$$

$$M_{u/cdg} = 51.22 \text{ KN.m}$$

Le rapport du moment ultime d'une section non renforcée sur le moment ultime d'une section renforcée est de l'ordre de 43.36 %.

### c) commentaires de résultats:

Les résultats obtenus dévoilent, l'importante différence (43.36%) de la valeur du moment ultime d'une section en béton armé renforcée, qui présente plus que deux fois la valeur du moment ultime d'une section en béton armé non renforcée.

Les travaux de Ozkul (M.H.Ozkul et H.Yildirim) [21], pour une section 300x200x2800 (mm<sup>3</sup>) des poutres renforcées, soumise à la flexion simple, ont révélé que la charge de ruine des poutres a augmenté d'un ordre de 40% par rapport à celles non renforcées.

Cela confirme que la contribution du renforcement, au moyen de PRFC vis-à-vis de la capacité flexionnelle de la section en béton armé, est assez significative.

L'influence du renfort en PRFC sur la section en béton armé, fait augmenter la profondeur de l'axe neutre (**fig 5.8**), d'une valeur plus du double, par rapport à celle d'une section non renforcée; cela signifie que la contribution de la section du béton comprimé dans le cas d'une section renforcée est importante par rapport à la section non renforcée.

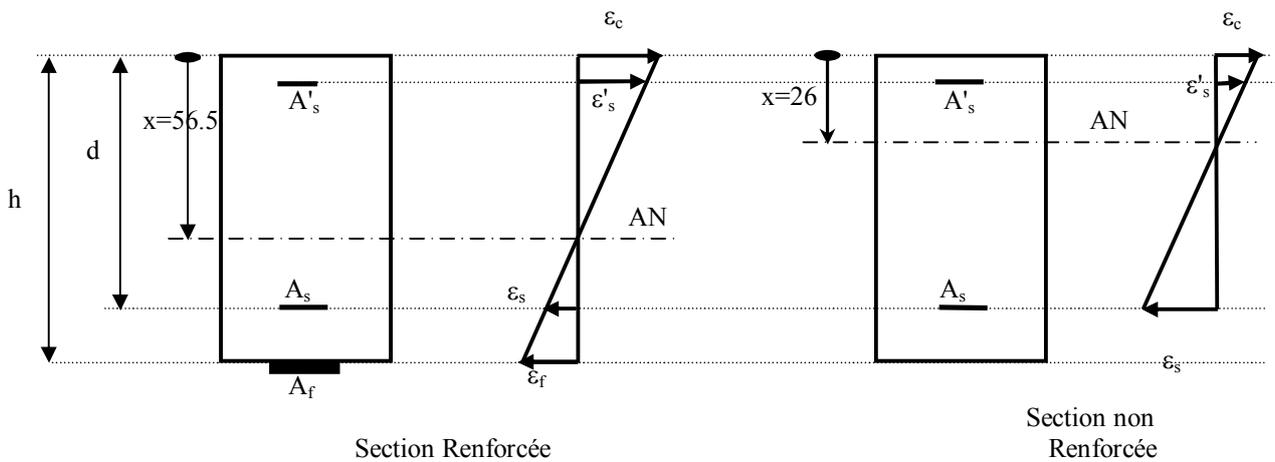


Figure 5.8: La différence de la profondeur de l'axe neutre entre une section rectangulaire en béton armé renforcée et une section non renforcée.

## 5-4 Réalisation d'abaques à trois entrées

### 5-4-1 Introduction

Pour des paramètres fixes,  $f_{ck}$ ,  $f_{yk}$ ,  $d'/d$ ,  $\rho_f$  (taux de renforcement), d'une section en béton doublement armé, et pour chaque valeur de taux d'armatures comprimées ( $\rho_s'$ ), et d'armatures tendues ( $\rho_s$ ), on déterminera la valeur de l'axe neutre "x" suivant la méthode d'essais successifs ; cela permet de calculer le moment ultime réduit " $M_u/bd^2$ " à partir de l'équation (5-22).

Pour permettre de développer un abaque à trois entrées, qui représente pour chaque valeur de  $\rho_s'$  et  $\rho_s$  une valeur correspondante au moment ultime réduit " $M_u/bd^2$ ", le tracé d'une série de points successifs s'avère laborieux, donc il a été jugé nécessaire d'exécuter un programme de calcul .

Pour les classes de béton inférieures à C35/45, correspondant à une résistance caractéristique  $f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$ , l'Eurocode2 [18] exige une valeur de la profondeur de l'axe neutre "x" inférieure ou égale à une valeur de  $0.45d$ , contrairement aux classes supérieures à C35/45, l'Eurocode2 limite la valeur de "x" à une valeur égale ou inférieure à  $0.35d$ .

Ces recommandations exigent que la section soit sous-armée, cela permet d'avoir une rupture lente et non brusque dans sa partie tendue [3].

## **5-4-2 Analyse d'une section rectangulaire en béton armé non renforcée et renforcée**

### **5-4-2-1 Section non renforcée**

Pour un taux d'armatures comprimées fixe, l'évaluation du moment ultime réduit " $M_u/bd^2$ ", augmente conjointement avec le taux d'armatures tendues ( $\rho_s$ ), jusqu'à un point correspondant au point d'écoulement (**fig 5.9**), où la contrainte des armatures tendues ( $f_s$ ) atteint sa limite d'écoulement ( $f_{yk}$ ). Au delà de ce point de cassure l'évaluation du moment ultime réduit " $M_u/bd^2$ " est peu considérable.

Le tronçon au dessous du point de cassure de la courbe, représente une section où les armatures tendues travaillent dans le plateau plastique donc la contrainte de ces armatures ( $f_s$ ) atteint sa contrainte limite d'écoulement ( $f_{yk}$ ).

Contrairement au second tronçon de la courbe, situé au-dessus du point de cassure présente une section où les armatures n'atteignent pas leur limite d'écoulement.

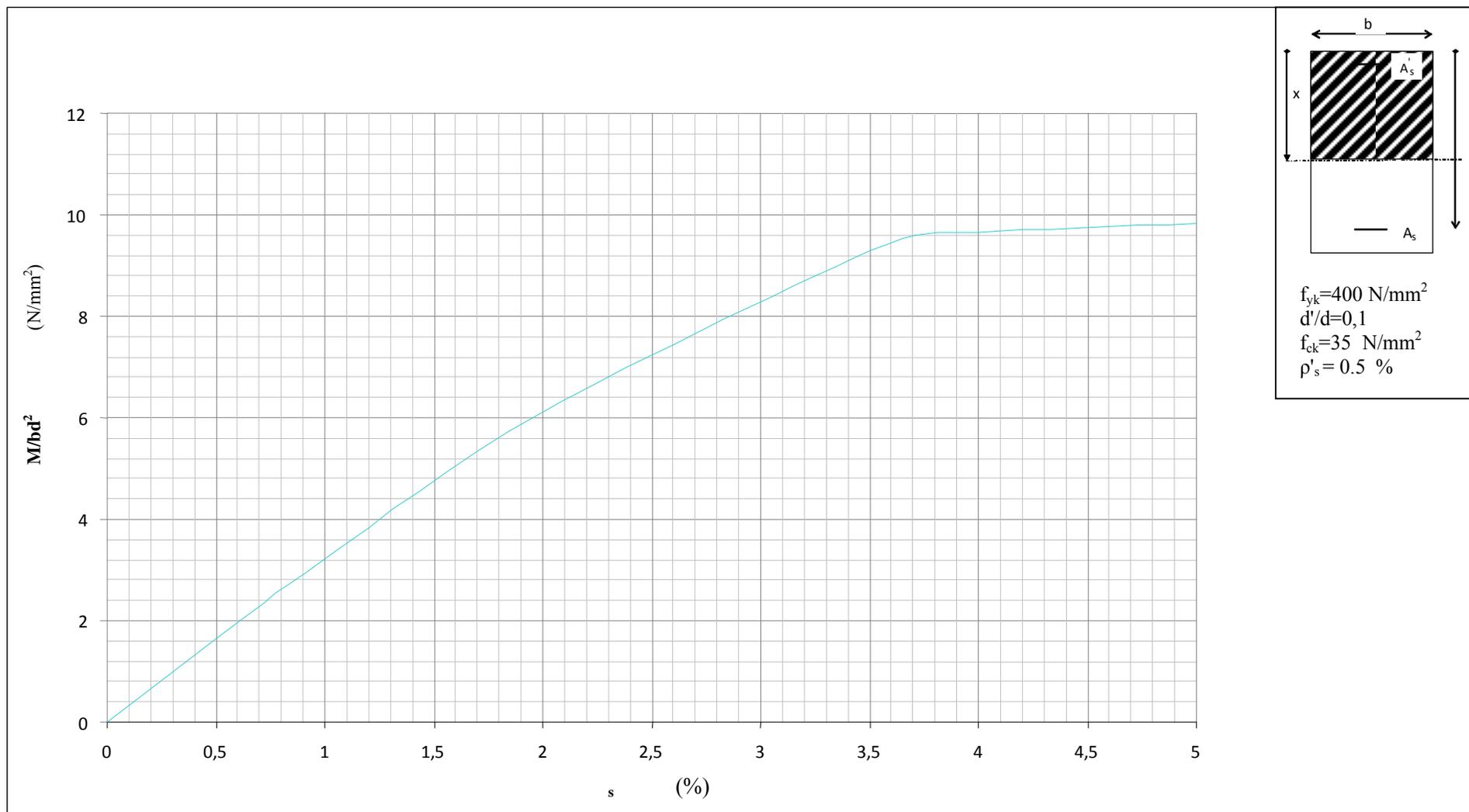


Figure 5.9: comportement d'un section rectangulaire non renforcée vis-à-vis de sa capacité flexionnelle par rapport au taux d'armatures tendues

#### **4-4-2-2 Section renforcée**

Pour un taux d'armatures comprimées ( $\rho'_s$ ) fixe, et un taux de renforcement ( $\rho_f$ ) fixe, l'évaluation du moment ultime réduit " $M_u/bd^2$ ", augmente conjointement avec le taux d'armatures tendues ( $\rho_s$ ), jusqu'à un point correspondant au point d'écoulement ( $\rho_s = 3.7\%$ ; voir fig 5.10), où la contrainte des armatures tendues ( $f_s$ ) atteint sa limite d'écoulement ( $f_{yk}$ ). Au delà de ce point de cassure l'augmentation du moment ultime réduit est peu considérable .

Le tronçon au dessous du point de cassure de la courbe représente une section où les armatures tendues travaillent dans le plateau plastique, où la contrainte de ces armatures atteint la limite d'écoulement ( $f_{yk}$ ).

Contrairement au second tronçon de la courbe, situé au-dessus du point de cassure, présente une section où les armatures n'atteignent pas leurs limite découlement.

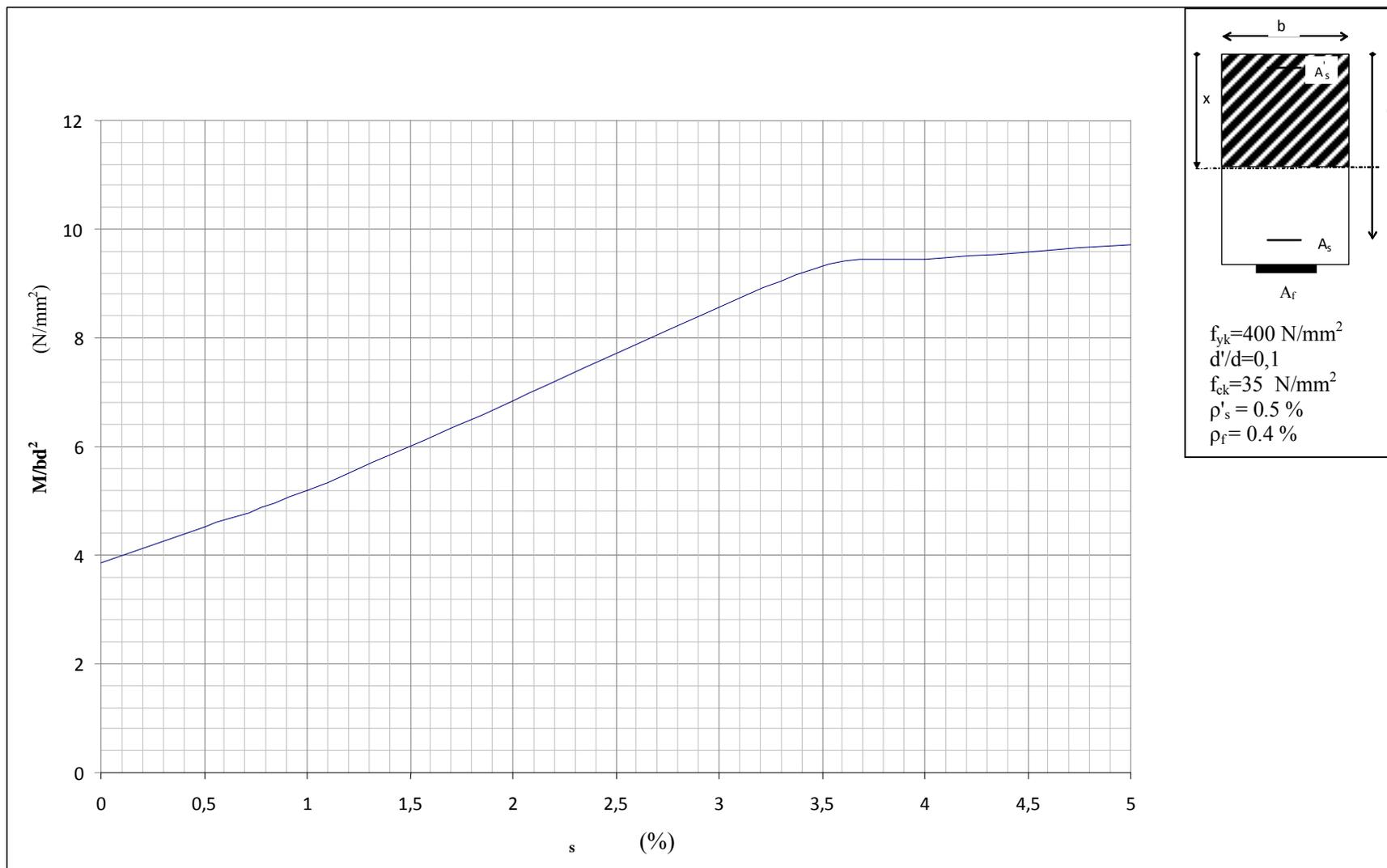


Figure 5.10: comportement d'une section rectangulaire renforcée vis-à-vis de sa capacité flexionnelle par rapport au taux d'armatures tendues

### **5-4-2-3 Conclusions et commentaires sur la superposition des deux abaques :**

La superposition des deux abaques présentés précédemment, avec un taux d'armatures comprimé fixe, et un taux de renforcement de matériau composite (PRFC : polymère renforcée en fibre de carbone) fixe, montre que la contribution, du renfort greffée sur la section en sa partie tendue, est significative quand celle-ci est particulièrement lorsque les aciers auront atteint leurs limite d'écoulement.

En conséquence, cette contribution du matériau composite sur une section en béton armé définie, permet d'augmenter progressivement sa capacité flexionnelle.

Dans cet abaque, les deux courbes superposées convergent progressivement, et se confondent au delà du point de cassure (fig 5.11), puisque les aciers n'atteignent pas leur limite d'écoulement, cela signifie que l'influence de la contribution du renfort est négligeable.

Pour que la capacité flexionnelle d'une section de poutres ait un rendement optimal, il est nécessaire que les aciers atteignent leur limite d'écoulement, pour assurer un mode de rupture lent dans sa partie tendue.

Par contre, si les aciers n'atteignent pas leurs limite d'écoulement, le taux d'armatures tendues est largement suffisant vis-à-vis de la capacité flexionnelle de la section. Une rupture se produit au niveau de la partie comprimée du béton, ce qui implique que le renforcement ne sera pas nécessaire.

En comparaison aux études expérimentales antérieures, des poutres soumises à la flexion simple de Rahimi (Rahimi et Hutchinson 2001)[1], en faisant varier le taux d'armatures tendues de 0.65 % à 1.68 % , il s'est avéré que l'augmentation de la capacité flexionnelle, d'un taux égal  $\rho_s=1.68\%$ , est plus significative par rapport à celle d'un taux égal  $\rho_s=0.65\%$ . Ainsi la rupture d'une section fortement armée d'une poutre renforcée, est située dans la zone comprimée du béton , puisque la contrainte limite des armatures tendues est loin d'être atteinte; cette rupture est prématurée et brutale. Par contre pour les sections faiblement armées, la rupture est lente et se situe dans la zone tendue de la section.

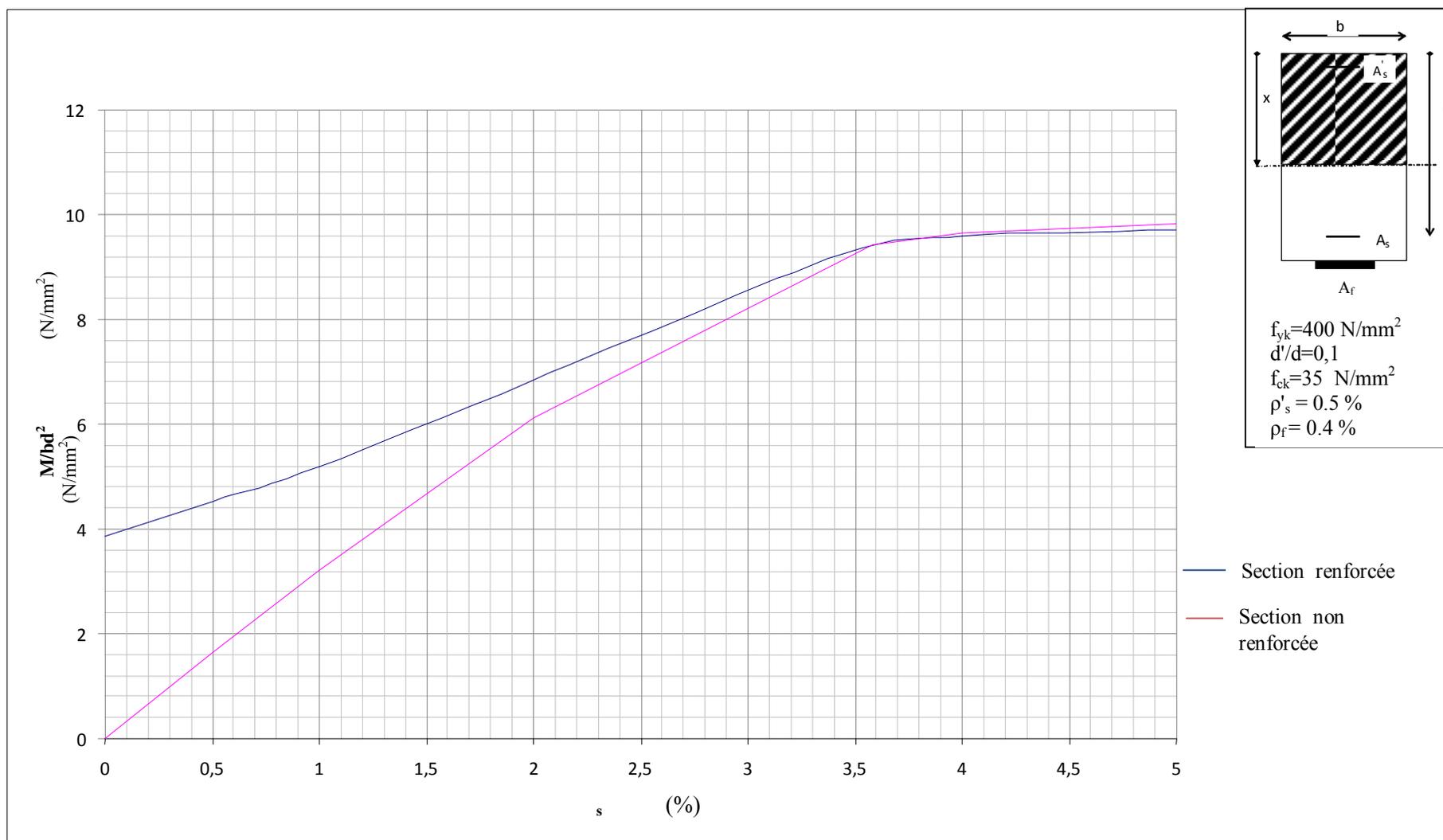


Figure 5.11: la superposition de deux comportements d'une section rectangulaire renforcée et l'autre non renforcée

**5-4-3 Effets des différents paramètres sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée**

**5-4-3-1 Effet du taux d'armatures comprimées ( $\rho'_s$ )**

L'effet de la variation du taux d'armatures comprimées ( $\rho'_s$ ) pour une section renforcée est exprimé comme suit :

$\rho'_s$ (%)	<b>0.5 - 1</b>			
$\rho_s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	17.78	11.76	9.68	11.46

$\rho'_s$ (%)	<b>1 - 1.5</b>			
$\rho_s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	9.43	10.53	5.88	16.66

$\rho'_s$ (%)	<b>1.5 ó 2</b>			
$\rho_s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	8.62	9.52	7.44	11.11

$\rho'_s$ (%)	<b>0.5 ó 2</b>			
$\rho_s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	40	35.29	24.31	43

*Tableau 5.1: Effet du taux d'armatures comprimées ( $\rho'_s$ ) sur la capacité flexionnelle*

Le tronçon en-dessous du point de cassure de la courbe, devient plus large et s'étend, progressivement au taux d'armatures comprimées ( $\rho'_s$ ).

L'effet du renforcement sur le comportement de la section, permet à sa capacité flexionnelle de croître conjointement avec le taux d'armatures tendues ( $\rho_s$ ).

L'effet du taux d'armatures comprimées ( $\rho'_s$ ) sur le comportement de la section renforcée, est positif en terme de gain du moment ultime réduit. (*fig 5.12*).

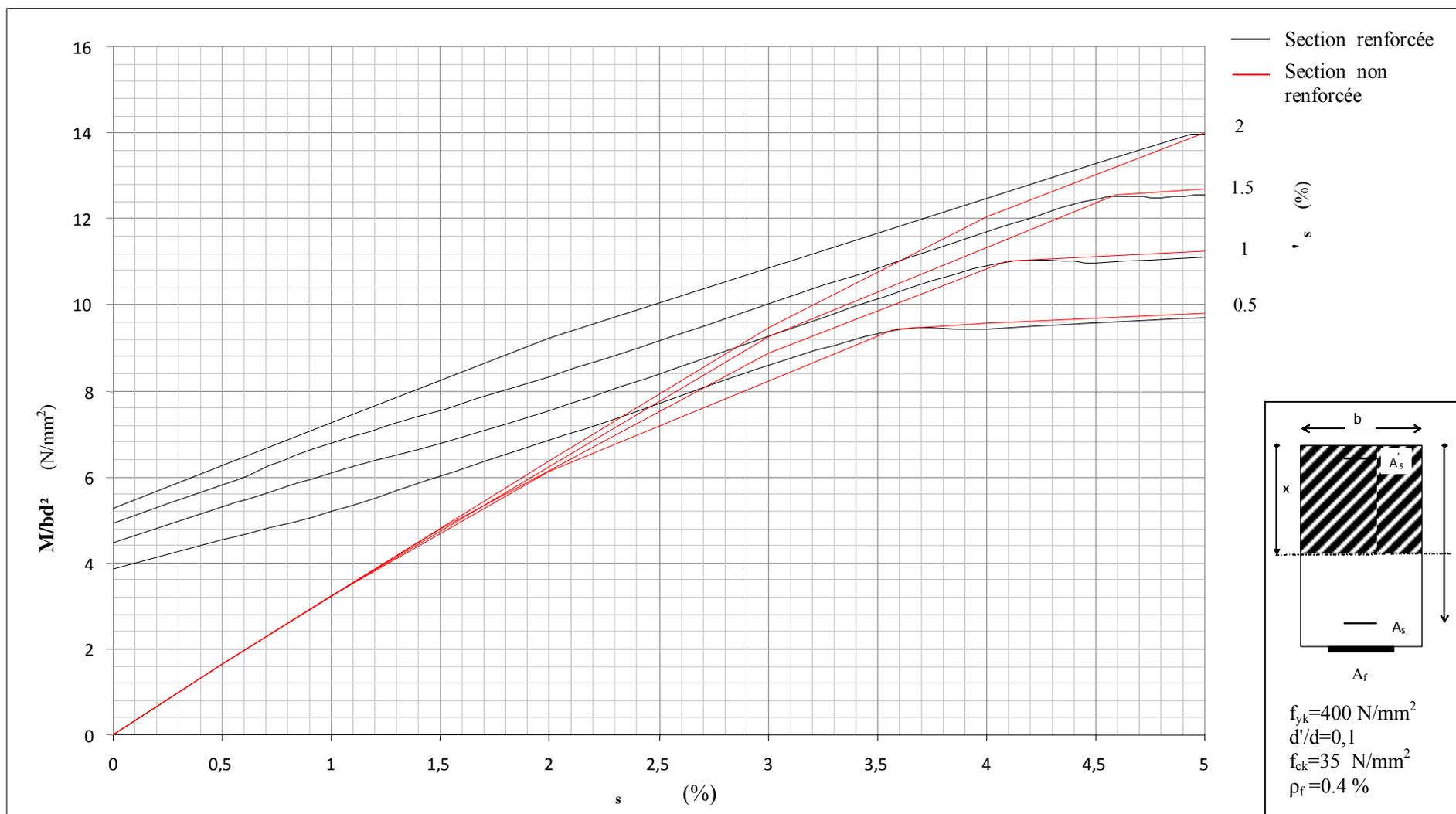


Figure 5.12: Effet de taux d'armatures comprimés ( $\epsilon_s$ ) sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée

**5-4-3-2 Effet de la résistance caractéristique du béton ( $f_{ck}$ )**

L'effet de la variation de la résistance caractéristique du béton ( $f_{ck}$ ) pour une section renforcée est exprimé comme suit :

$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	<b>20 - 30</b>			
$s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	16.67	14.03	31.17	34.38

$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	<b>30 ó 40</b>			
$s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	14.28	9.23	18.07	25.58

$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	<b>20 ó 40</b>			
$s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	33.33	24.56	55.55	68.75

*Tableau 5.2: Effet la résistance caractéristique du béton ( $f_{ck}$ ) sur la capacité flexionnelle*

Le tronçon en-dessous du point de cassure de la courbe, devient plus étendu progressivement à la résistance caractéristique ( $f_{ck}$ ).

L'effet de la résistance caractéristique ( $f_{ck}$ ) sur le comportement de la section renforcée, est positif en terme de gain du moment ultime réduit. (fig 5.13)

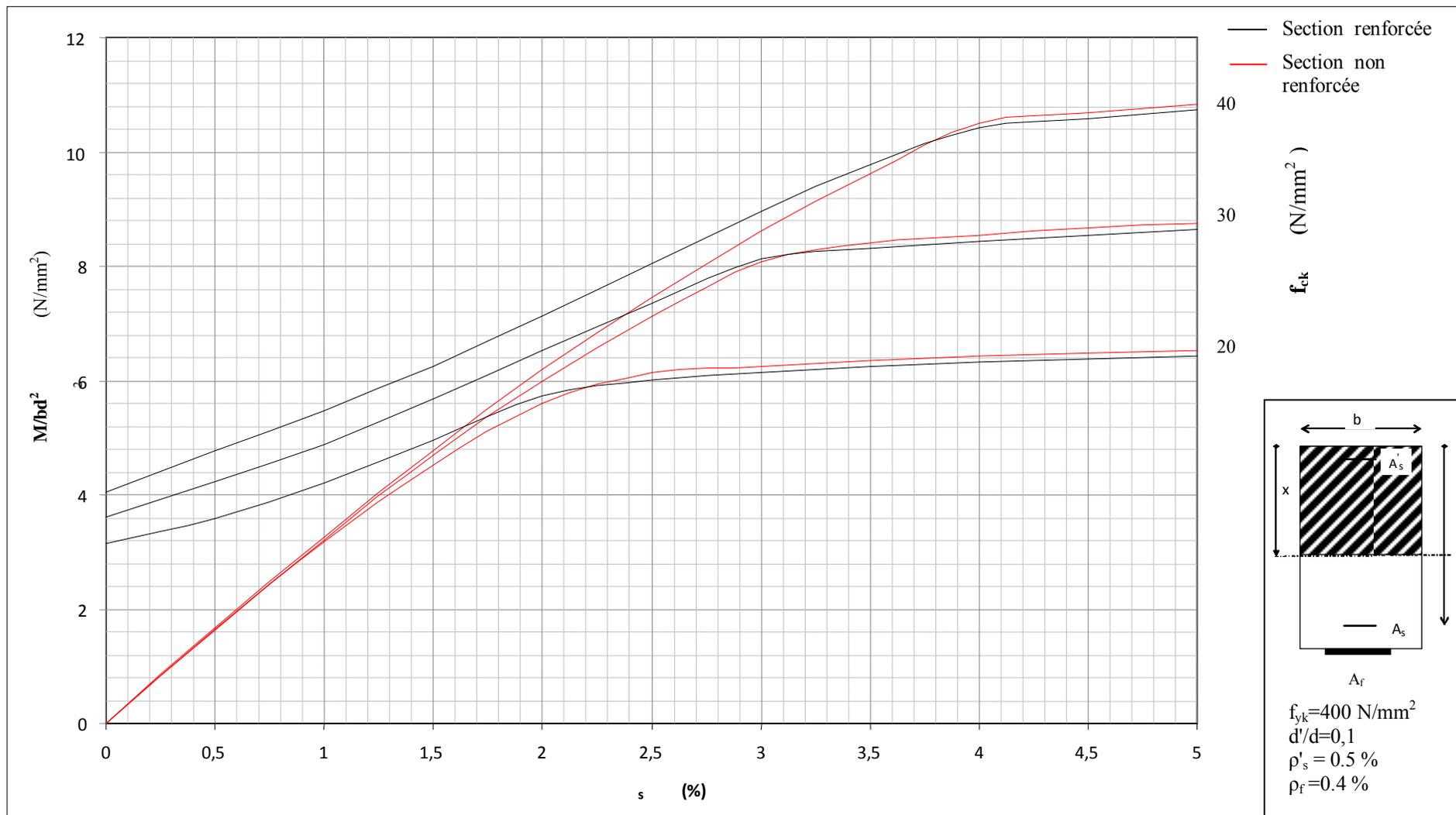


Figure 5.13: Effet de la résistance caractéristique du béton ( $f_{ck}$ ) sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée

### 5-4-3-3 Effet de l'enrobage des armatures tendues (d')

L'effet de la variation du rapport d'/d pour une section renforcée est exprimé comme suit :

<b>d'∅d</b>	<b>0.1 - 0.15</b>			
<b>s (%)</b>	0.5	2	3.5	5
<b>une perte (%)</b>	8.33	1.59	1.23	1.19

<b>d'∅d</b>	<b>0.15 - 0.2</b>			
<b>s (%)</b>	0.5	2	3.5	5
<b>une perte (%)</b>	8.97	1.56	1.22	1.76

<b>d'∅d</b>	<b>0.1 - 0.2</b>			
<b>s (%)</b>	0.5	2	3.5	5
<b>une perte (%)</b>	18.05	3.17	2.47	2.38

*Tableau 5.3: Effet de l'enrobage des armatures tendues (d') sur la capacité flexionnelle*

La croissance de l'enrobage des armatures tendues (d'), est inversement proportionnelle vis-à-vis du moment ultime réduit " $M_u/bd^2$ ", ce qui rend cette augmentation de l'enrobage (d') défavorable vis-à-vis la capacité flexionnelle de la section. Cet effet est de plus en plus considérable sur le tronçon de la courbe situé au-dessous du point de cassure .

Vu l'hypothèse que le matériau béton est caractérisé seulement par sa résistance à la compression, l'augmentation de l'enrobage (d') a un effet de plus en plus négatif sur la section. Une rupture peut apparaître en sa partie tendue . (fig 5.14)

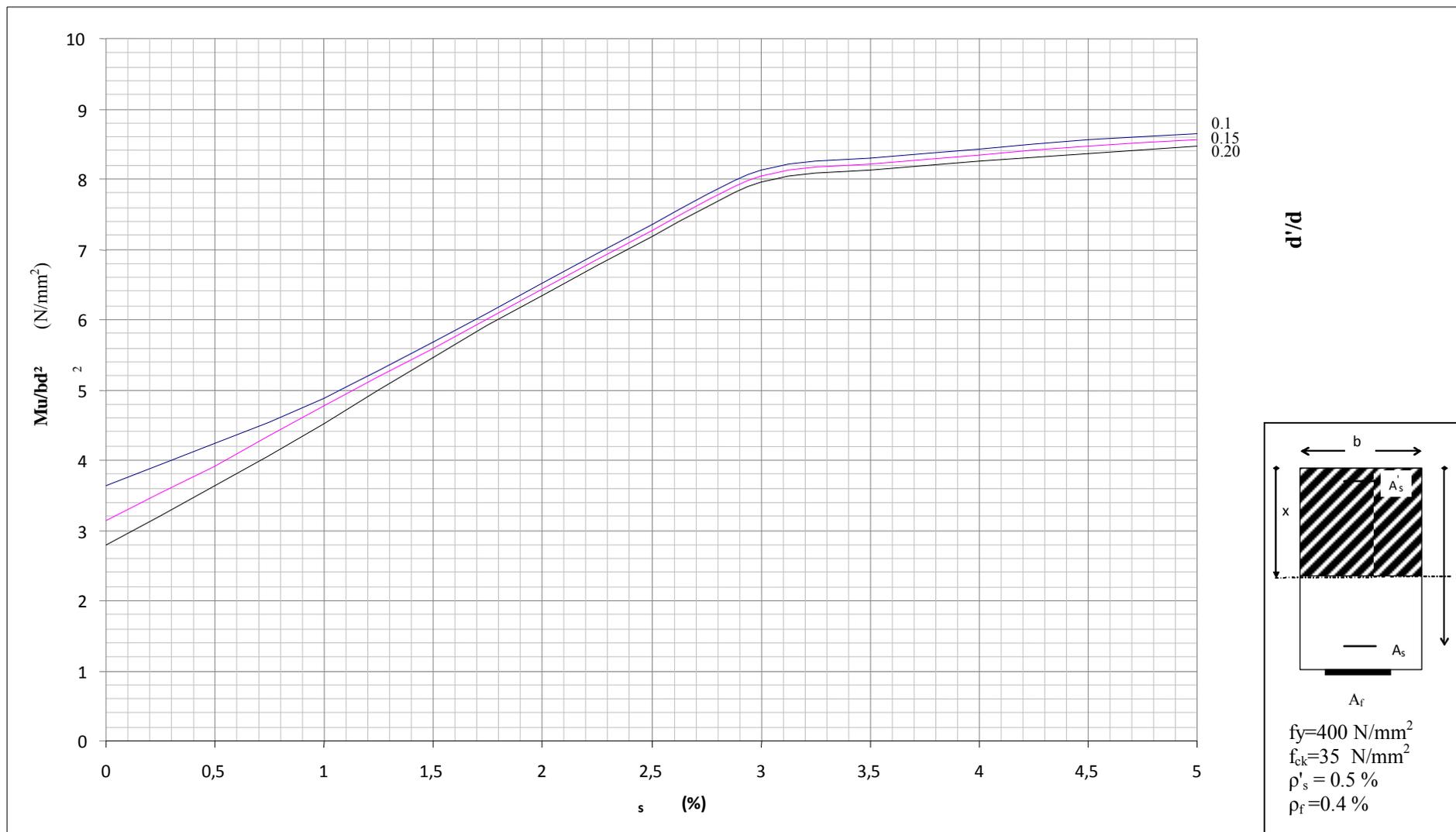


Figure 5.14: Effet de l'enrobage des armatures tendues ( $d'$ ) sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée

**5-4-3-4 Effet du taux de renforcement en PRFC ( $\rho_f$ )**

L'effet de la variation du taux de renfort en PRFC ( $\rho_f$ ) pour une section en béton armé est exprimé comme suit (*fig 5.15*) :

<b>f (%)</b>	<b>0 - 0.4</b>			
<b>s (%)</b>	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	181.25	11.29	0	0

<b>f (%)</b>	<b>0.4 - 0.8</b>			
<b>s (%)</b>	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	16.66	4.35	0	0

<b>f (%)</b>	<b>0.8 - 1.2</b>			
<b>s (%)</b>	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	7.62	2.78	0	0

<b>f (%)</b>	<b>0 - 1.2</b>			
<b>s (%)</b>	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	253.13	19.35	0	0

*Tableau 5.4: Effet du taux de renforcement en PRFC ( $P^f$ ) sur la capacité flexionnelle*

- a. Le tronçon au-dessous du point de cassure des courbes correspond au point d'écoulement et représente une section où les aciers auront atteint leur limite d'écoulement.

L'effet du renfort sur La capacité flexionnelle de la section est de plus en plus significatif lorsque le taux d'armatures tendu décroît.

Le comportement de la section renforcée au moyen de matériaux composites est liée directement au taux de renfort ( $\rho_f$ ), l'influence de ce rajout, avec un certain nombre successif de plis, fait croître progressivement sa capacité flexionnelle.

b. Le point de cassure de la courbe correspondant à une section renforcée est situé au-dessous du point d'inflexion de la courbe d'une section non renforcée

c. Au-dessus du point de cassure:

Pour une section renforcée, le tronçon de la courbe est situé au-dessous de celle d'une section non renforcée. Sur ces deux tronçons, les armatures tendues ( $A_s$ ), n'ont pas encore atteint leurs limites d'écoulement, donc on peut conclure que le taux d'armatures tendues ( $\rho_s$ ) est largement suffisant, et confirme que le renforcement de la section devient inutile.

Dans ce cas, le taux d'armatures tendues ( $\rho_s$ ) est suffisant vis-à-vis de la capacité flexionnelle de la section renforcée, et dans un sens d'obligation, d'obtenir un équilibre interne des forces:  $F_c + F'_s = F_s + F_f$ , la contribution de la force du renfort ( $F_f$ ) dans cet équilibre de la section, exige une limite supérieure à la force ( $F_s$ ) des armatures tendues. Cette limite est inversement proportionnelle au taux du renfort ( $\rho_f$ ). Cela influe directement sur les armatures tendues ( $A_s$ ), et limite leurs comportements dans la phase élastique .

En référence aux travaux expérimentaux antérieurement établis par Rahimi (Rahimi et Hutchinson 2001) et Grace (Grace 2001), pour des poutres soumises à la flexion simple, où précise que le taux de renforcement améliore et augmente la charge ultime des poutres[1].

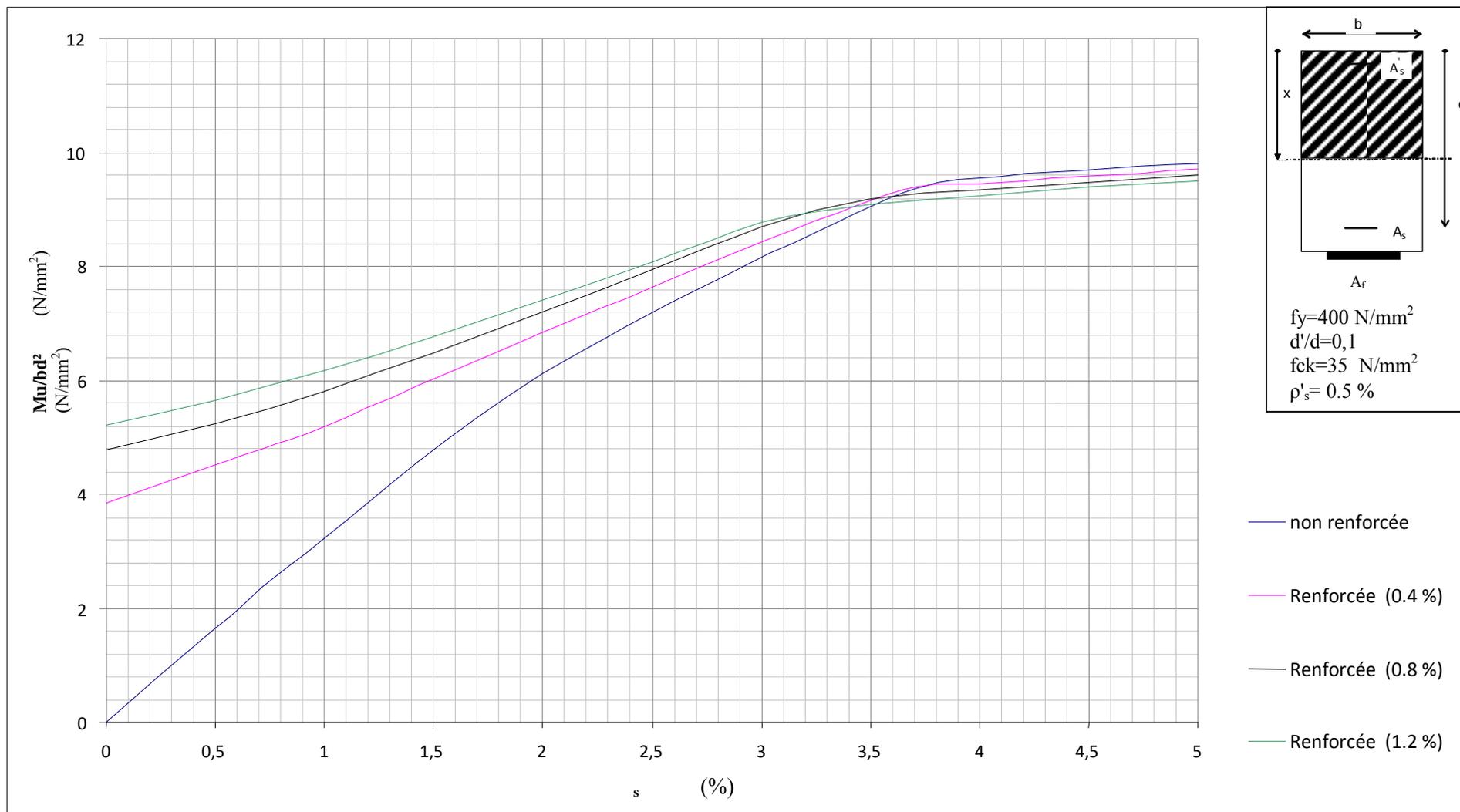


Figure 5.15: Effet de taux de renforcement en PRFC sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée

**5-4-3-5 Effet de la contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_{yk}$ )**

L'effet de la variation de la contrainte limite des armatures ( $f_{yk}$ ) pour une section renforcée s'exprime comme suit :

$f_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	<b>250 à 300</b>			
$s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	5.41	8	12.12	3.75

$f_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	<b>300 - 400</b>			
$s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	7.69	20.37	12.16	3.61

$f_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	<b>400 à 500</b>			
$s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	4.76	16.92	3.61	4.65

$f_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	<b>250 à 500</b>			
$s$ (%)	0.5	2	3.5	5
<b>un gain (%)</b>	18.92	52	30.30	12.5

*Tableau 5.5: Effet de la contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_{yk}$ ) sur la capacité flexionnelle*

La contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_{yk}$ ) influe directement et progressivement sur la capacité flexionnelle de la section renforcée. Cette influence est de plus en plus significative lorsque les aciers auront atteint leur limite d'écoulement ( le tronçon inférieur par rapport au point de cassure).

Par contre sur le tronçon supérieur ( au-delà de point de cassure), où les aciers n'atteignent pas leurs limite d'écoulement, l'influence des différentes contraintes limites d'écoulement des armatures tendues ( $f_{yk}$ ), sur cette section est peu significative vis-à-vis de la capacité flexionnelle (*fig 5.16*).

La contrainte limite d'écoulement ( $f_{yk}$ ) gouverne directement le point limite d'écoulement des armatures. Si cette contrainte limite croît, la valeur du point de cassure de la courbe correspondante augmente vis-à-vis de la capacité flexionnelle, et diminue vis-à-vis du taux d'armatures tendues ( $\rho_s$ ).

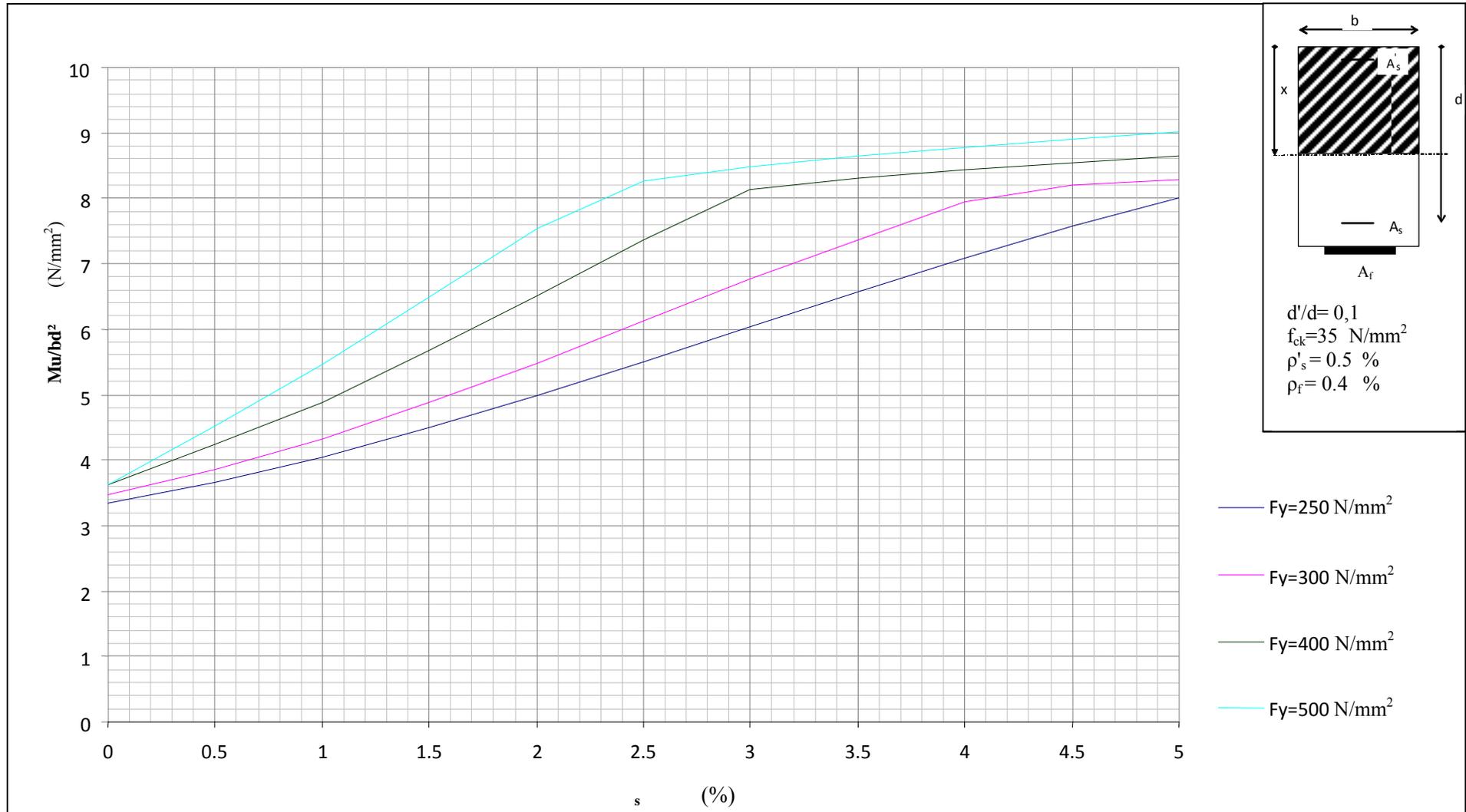


Figure 5.16: Effet de la contrainte limite des armatures sur le comportement d'une section rectangulaire renforcée

*Chapitre 6*

**CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

## 6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 6-1 Conclusions

Les principales conclusions peuvent être synthésées comme suit :

- intuitivement l'effet de rajout de CFRP est généralement positif, la présente étude montre que cette effet est explicitement significatif sur le tronçon inférieur par rapport au point de cassure de la courbe déjà représenté, lorsque les aciers auront atteint leur limite d'écoulement. Contrairement, le tronçon au-dessus de ce même point de cassure, dévoile que l'effet est négligeable, donc le taux d'armatures tendues est suffisant, cela confirme que le renfort devient inutile dans cette partie.
- L'analyse de sections renforcées en PRFC et non renforcées, en flexion simple, a confirmé que le renfort placé dans la partie tendue améliore la capacité flexionnelle de la poutre d'un ordre de 181.25 % pour un  $\rho'_s=0.5\%$  , et un  $\rho_s=0.5\%$ . Pour un  $\rho_f=0.4\%$ ( la charge de ruine est presque multipliée par deux).
- Pour le rajout de deux à trois couches (0.8 à 1.2 %) greffées sur la partie inférieure de la poutre l'augmentation de la capacité flexionnelle n'est pas constante . [elle est importante pour de petite valeurs de  $\rho_s$  d'un ordre de 23.62% est devient de moins en moins importante pour des valeurs de  $\rho_s$  se rapprochant de la valeur critique (point de cassure sur le graphe) et s'annule pour des valeurs de  $\rho_s$  supérieures à la valeur critique ].
- Les paramètres tels que : le taux d'armatures tendues( $\rho_s$ ), le taux d'armatures comprimées ( $\rho'_s$ ), ainsi que la contrainte limite d'écoulement des aciers ( $f_{yk}$ ), influent directement sur la capacité flexionnelle; la variation de  $f_{ck}$ (de 20 à 40 N/mm<sup>2</sup>) pour des valeurs de  $\rho_s$  inférieures à  $\rho_s$  équilibre n'a aucune incidence sur la capacité flexionnelle( les trois tronçons superposés) pour les sections non renforcées ; par contre pour les sections renforcées l'augmentation est détectable sur les graphes d'un ordre de 68.75%.
- La tendance générale de l'effet positif du renforcement sur la capacité flexionnelle est conforté par les résultats expérimentaux précédemment menés sur ce type de

renforcement au moyen de matériaux composites (Rahimi et Hutchinson 2001), (Grace 2001), (M.H.Ozkul et H.Yildirim).

- L'exploitation pratique de ces abaques est devenue évidente, elle est d'une triple utilisation, permettant de déterminer ou de vérifier aisément, pour une section bien définie, sa capacité flexionnelle, le taux de ferrailage ainsi que le taux de renforcement.

Sans la construction de ces abaques à trois entrées la quantification des effets des différents paramètres aurait été impossible.

## **6-2 Perspectives:**

- Développer une étude expérimentale de poutres soumises à la flexion simple, et renforcées au moyen de PRFC. Avec une variation des différents paramètres influant.
- Etudier le comportement de poutres renforcées au moyen de bandes en PRFC, vis-à-vis du cisaillement.
- Faire une analyse plus précise de sections de poutres renforcées au moyen de PRFC, éventuellement avec la méthode des éléments finis.
- Etudier et analyser le comportement de l'élément structurel renforcé à long terme.

*Annexe A*

**MISE EN ñ UVRE DES COMPOSITES  
POUR LA REPARATION DES POUTRES**

## **Annexe A : Mise en œuvre des composites pour la réparation des poutres**

### **A.1 Préparation du support**

Le support doit être propre, sain, exempt de laitance, de graisse, d'huile, de produit de cure, de particules non ou peu adhérentes, de tout revêtement de type peinture, etc.

Le support doit être sec (humidité  $\leq 4\%$ ).

Le support béton doit être âgé d'au moins 28 jours et avoir une cohésion superficielle, après préparation, d'au moins 1,5 MPa. saillies de coffrage ne doivent pas excéder 0,5 mm.

Si nécessaire, ragréer à l'aide du SIKADUR 41 F.

Les angles saillants de la structure doivent être arrondis, jusqu'à obtenir un rayon d'au moins 10 mm, par exemple par ponçage au disque diamanté.

### **A.2 Préparation du tissu SIKA WRAP HEX 230 C**

Découper le tissu aux dimensions appropriées suivant les indications du Bureau d'Etudes en veillant à ne pas endommager l'extrémité découpée; veiller à ne pas plier le tissu et à toujours le conserver en position enroulée.

### **A.3 Préparation de la résine SIKADUR 330**

- Homogénéiser chaque composant séparément dans son emballage.
- Verser la totalité du composant B dans le composant A.
- Mélanger avec un agitateur électrique muni d'une hélice pendant environ

3 minutes jusqu'à obtenir un mélange uniforme de couleur grise.

- Transvaser l'ensemble du mélange dans un récipient propre, puis mélanger à nouveau pendant environ 1 minute, à faible vitesse afin de limiter l'entraînement d'air dans la résine.
- La durée de vie en pot débute dès le mélange des deux composants. Elle est plus longue à basses températures et se raccourcit à hautes températures.

Pour augmenter la durée d'utilisation par température élevée, il est recommandé de diviser la colle mélangée en petites portions. Une autre méthode efficace consiste à refroidir les 2 composants avant le mélange.

Les différentes étapes sont les suivantes :

Etape A

Appliquer à l'aide d'un rouleau ou d'une brosse le SIKADUR330 sur le support

Etape B

Conformément au calepinage et au dimensionnement réalisés par le bureau d'études, placer le tissu découpé sur la couche d'apprêt, en veillant à la correcte orientation des fibres.

Noyer soigneusement le tissu dans la résine avec le rouleau de marouflage.

Répartir la résine au rouleau jusqu'à l'obtention d'une structure homogène.

Etape C

En cas d'application de couche supplémentaires de tissu (au maximum 2), appliquer à chaque fois une couche de résine à raison d'environ  $0.5 \text{ kg/m}^2$ .

A  $20^\circ\text{C}$  ceci doit être réalisé dans les 60 minutes suivant la pose de la couche précédente de tissu. Si tel n'est pas le cas, respecter alors un temps d'attente d'au moins 12 heures avant de procéder à l'application d'une nouvelle couche de résine.

Nota: en cas de températures basses et/ou d'humidité relative élevée, la surface du composites peut être devenue poisseuse. Avant de poursuivre, il faut enlever ce film poisseux en lavant la surface avec une éponge saturée d'eau puis en la rinçant laisser sécher.

Reprendre ensuite l'exécution à l'étape B.

Etape D

Pour augmenter la rugosité nécessaire à l'adhérence d'un revêtement de finition à base de ciment, il est possible d'appliquer une couche supplémentaire de résine d'environ  $0.5 \text{ kg/m}^2$ , puis de la saupoudrer à l'état frais de sable de quartz propre et sec.



(a) Ponçage de la surface



(b) Découpe du tissu de carbone



(c) Mise en place de la résin



(d) Imprégnation du tissu



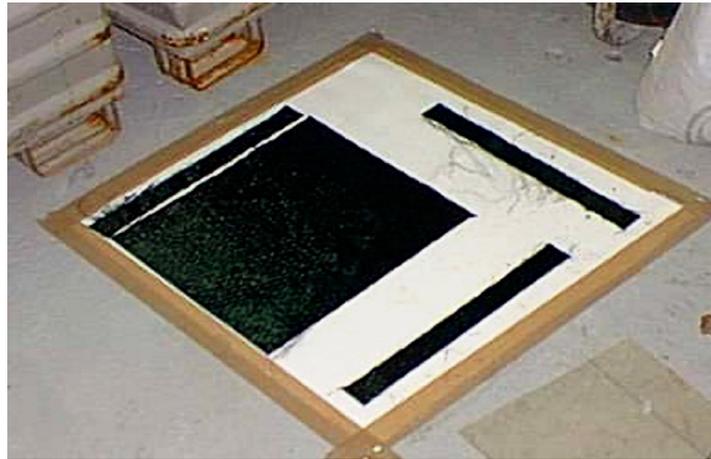
(e) Mise en place du tissu



(f) Rouleau ébulleur



(g) Poutres stratifiées



(h) Réalisation de plaques témoins

*Annexe B*

**JUSTIFICATION VIS -A-VIS DES  
SOLLICITATIONS TANGENTES**

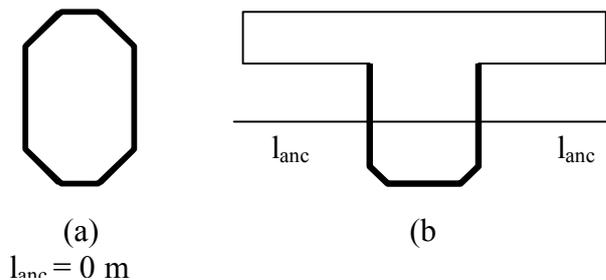
## ANNEXE B : Justification vis-à-vis des sollicitations tangentes

### B.1 Longueur d'ancrage du composite:

On appelle  $l_{anc}$  la longueur d'ancrage d'effort tranchant.

Deux cas se présentent :

- si la poutre le permet, les bandes de composite entourent la poutre. Il n'y a pas de problèmes d'ancrage :  $l_{anc} = 0$  m ;
- si la poutre se trouve sous une dalle, le composite est collé sur les deux faces latérales en continuité en passant sous la poutre. Il reste une contrainte d'ancrage aux extrémités supérieures des bandes proches de la dalle. Le composite intervient comme armature pour «recoudre» une fissure potentielle d'effort tranchant.



**Figure B.1:** Armatures complémentaires en composite vis-à-vis de l'effort tranchant

Une longueur d'ancrage expérimentale  $l_{anc,exp}$  est déterminée à partir des données expérimentales (cf. paragraphe 1.11 du document de l'AFGC de décembre 2003).

$$l_{anc,exp} = 200 \text{ mm} \cdot \frac{R_f}{F_{ad,e}} \quad \text{avec} \quad F_{ad,e} \text{ l'effort de traction correspondant à } \tau_{ad,e}$$

$R_f$  la résistance à la traction du composite définie dans les paragraphes 1.7 et 1.8 du document AFGC de décembre 2003.

On détermine également une longueur critique d'ancrage théorique  $l_{anc,th}$  en équilibrant l'effort de traction repris par le composite  $F_f$  par l'intégration des contraintes moyennes de cisaillement de la colle ou de l'interface sur une surface définie par le produit  $l_{anc,th} \times b_f$  ( $b_f$  = largeur de la bande de composite) :

$$F_f = f_{fu,d} \times A_f = \tau_{adu,d} \times l_{anc,th} \times b_f \quad \Rightarrow \quad l_{anc,th} = \frac{f_{fu,d} \times A_f}{\tau_{adu,d} \times b_f}$$

(les caractéristiques  $f_{fu,d}$  et  $\tau_{adu,d}$  sont définies respectivement aux paragraphes 2.2.3 et 2.2.4)

La longueur d'ancrage de dimensionnement est définie par :  $l_{anc,d} = \min(l_{anc,exp} ; l_{anc,th})$

## B.2 Dimensionnement à l'effort tranchant:

### a) Résistance à l'effort tranchant du composite

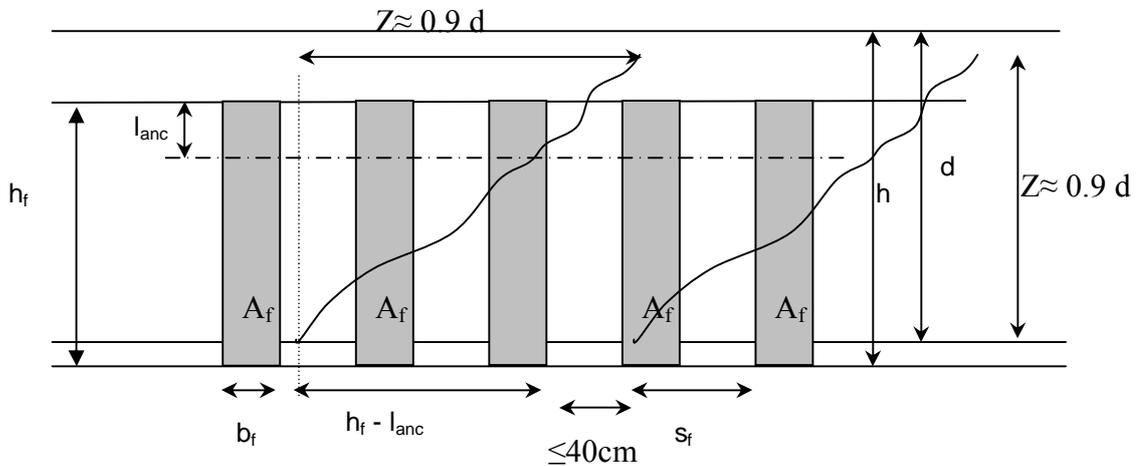
Une insuffisance d'armatures d'effort tranchant peut être compensée par ajout de matériaux composites collés. Le composite se comporte comme une armature externe complémentaire aux étriers en acier existants.

Les poutres soumises à des efforts tranchants sont justifiées vis-à-vis de l'état limite ultime pour une fissure d'effort tranchant inclinée à  $45^\circ$ .

La résistance à l'effort tranchant  $V_{Ru}$  est alors la somme des efforts que peuvent reprendre le béton  $V_b$ , l'acier  $V_s$  et le composite  $V_f$ .

$$V_{Ru} = V_f + V_s + V_b$$

Il s'agit de déterminer la répartition des bandes de composite sur les faces latérales : leur largeur  $b_f$  et leur espacement  $s_f$ .



**Figure B.2 :** Renforcement à l'effort tranchant pour une fissure inclinée à  $45^\circ$  dans une poutre en T.

La partie supérieure du composite, correspondant à la longueur d'ancrage  $l_{anc,d}$  choisie lors du dimensionnement n'est pas prise en compte dans le renfort.

Il n'est généralement pas possible d'ancrer le composite sur la longueur  $l_{anc,d}$  et ainsi la contrainte de traction dans le composite ne peut pas être égale à  $f_{fu,d}$ . Du choix de la valeur

de  $l_{anc} \leq l_{anc,d}$  va dépendre la valeur du coefficient  $\alpha_v$  minorant la contrainte de traction dans le composite transversal à  $\alpha_v \cdot f_{fu,d}$  avec :

$$\alpha_v = \frac{l_{anc}}{l_{anc,d}} \quad 0 \leq \alpha_v \leq 1$$

La résistance à l'effort tranchant du composite est alors :

$$V_f = \alpha_v \frac{A_f \cdot f_{fu,d} \cdot \min [0,9 \cdot d ; (h_f - l_{anc})]}{s_f}$$

avec -  $A_f = 2 \cdot t_f \cdot b_f$  avec  $b_f$  la largeur d'une bande verticale de composite (cette formule suppose qu'il y a une bande sur chaque face),

-  $h_f$  est la longueur d'une bande verticale de composite,

-  $d$  est la hauteur utile de la poutre, distance fibre comprimée / aciers tendus

Les déformations des aciers passifs d'effort tranchant et du matériau composite doivent être compatibles.

La position des fissures n'est pas connue a priori. Pour qu'aucune fissure potentielle n'apparaisse entre les bandes de renforcement composite, la condition sur l'espacement des bandes est :

$$s_f < (h_f - l_{anc}).$$

L'espacement entre les bords des renforcements doit de plus être inférieur à 40 cm.

### **b) Résistance à l'effort tranchant des armatures et du béton**

Les résistances à l'effort tranchant des armatures et du béton sont respectivement :

$$V_s = \left[ \frac{A_t}{s_t} \cdot \frac{f_e}{\gamma_s} \cdot 0,9d \right]$$

$$V_b = [0,3 \cdot f_{ij} \cdot b_o \cdot d \cdot k]$$

$k = 1$  en flexion simple .

$k = 0$  au droit d'une reprise de bétonnage.

On vérifie également le taux de cisaillement  $\tau_u = V_u / (b_o \cdot d)$

### B.3 Vérification du cisaillement de glissement en flexion aux ELU

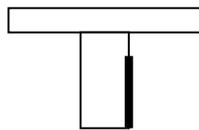
On vérifie que le cisaillement à l'interface entre le béton et la colle est acceptable. Il peut être calculé par :

$$\tau_u = \frac{1}{n} \left( \frac{V_u}{b_f \cdot z} \right) \cdot \left( \frac{F_f}{F_f + F_s} \right) \quad \text{avec } z \approx 0,9 d, \text{ à défaut d'une valeur exacte}$$

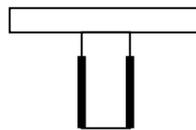
Dans cette expression:

-  $F_f$  et  $F_s$  sont respectivement les efforts à l'ELU repris dans le composite et dans les aciers passifs longitudinaux.

-  $n$  est le nombre de faces concernées ( $n = 1$  ou  $2$ )



$n=1$



$n=2$

On vérifiera :  $\tau_u \leq \tau_{ad,u,d}$  (ELU)

#### Remarque :

Le mode de ruine le plus courant des éléments fléchis est un délaminage survenant aux points qui concentrent un effort tranchant et un moment sollicitant importants. Cette condition est prépondérante dans le cas des structures faiblement armées ou fortement renforcées.

### B.4 Vérification du délaminage à l'extrémité du renforcement ou rupture interface béton-composite

#### a) Rupture de l'interface dans le béton

- Vérification à l'état limite de service.

On calcule l'effort repris dans le composite à l'état limite de service dans la section située juste après la zone de transfert (répartition triangulaire de la contrainte de cisaillement).

Soit  $F_{f,ELS}$  la valeur de cet effort.

On vérifie que le cisaillement maximal dans le béton d'enrobage est inférieur au cisaillement admissible à l'ELS, en considérant une répartition triangulaire de la contrainte de cisaillement :

$$\frac{2.F_{fELS}}{b_f \cdot I_{anc}} \leq \tau_{ad,d} \text{ (ELS) avec } \tau_{ad,d} \text{ (AFGC)}$$

- **Vérification à l'état limite ultime**

On détermine l'épaisseur minimale de renforcement nécessaire pour assurer la résistance en flexion à l'ELU de la section  $\Sigma_1$ . Soit  $t_{fu}$  cette épaisseur et  $F_{fELU}$  l'effort ultime correspondant dans le renforcement : ( $F_{fELU} = E_f \times \varepsilon_{fu,d} \times b_f \times t_{fu}$ ).

On vérifiera que le cisaillement maximal correspondant à l'introduction de l'effort  $F_f$  sur la longueur de transfert est inférieur au cisaillement admissible à l'ELU, en considérant une répartition triangulaire de la contrainte de cisaillement.

$$\frac{2.F_{fELU}}{b_f \cdot I_{anc}} \leq \tau_{adu,d} \text{ (ELU) avec } \tau_{adu,d} \text{ défini au §2.2.4}$$

b) **Rupture de l'interface dans la colle**

L'interface peut se fissurer dans la direction parallèle au plan de collage sous l'effet du couplage des contraintes normales et de cisaillement. Au moment du décollement de la plaque, en échelle macroscopique, la rupture s'exprime à partir d'une loi simplifiée de type Mohr-Coulomb (cf. référence bibliographique H. Varasthepour dans l'annexe 4 du document AFGC de décembre 2003).

$$\tau_{ad} + \sigma_{ad} \cdot \text{tg } \phi = C$$

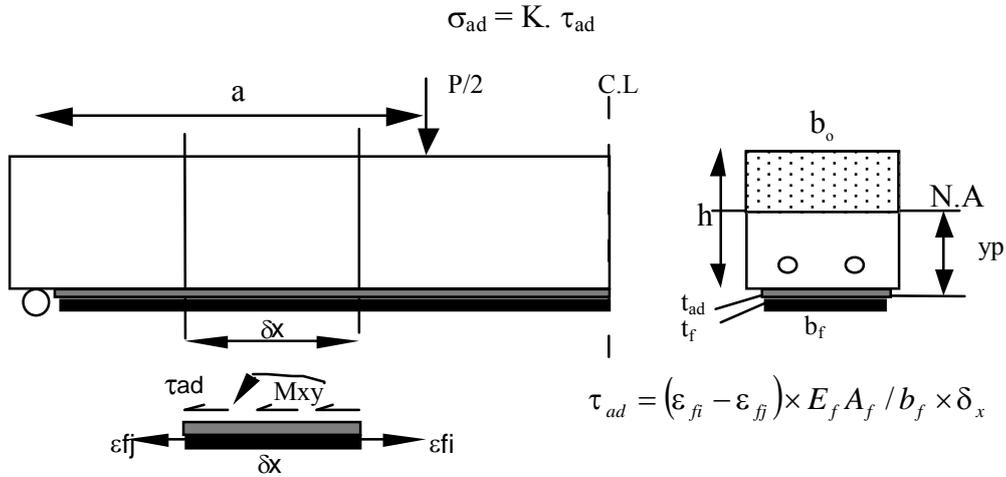
où  $\tau_{ad}$  est la contrainte de cisaillement à l'interface calculée,  $\sigma_{ad}$  la contrainte normale, C la cohésion et  $\phi$  l'angle de frottement interne.

Les valeurs de C et  $\phi$  dépendent largement du traitement de surface et des propriétés mécaniques de la colle.

Pour un cas simple, c'est-à-dire, lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface  $\tau_{ad}$  est constante, on peut remplacer les systèmes de forces internes (figure ci-dessous) par une force tangentielle générant une contrainte tangentielle ( $\tau_{ad}$ ) et un moment interne  $M_{xy}$  qui se développent sur toute la longueur du plan de colle :

$$M_{xy} = b_f \cdot (\tau_{ad} + \tau_f/2) \cdot \tau_{ad}$$

La contrainte normale à l'extrémité de la plaque peut être causée par ce moment interne ( $M_{xy}$ ).



**Figure B.3:** Distribution de la contrainte à l'interface

Dans cette équation,  $K$  est un paramètre qui montre la relation entre la contrainte de cisaillement et la contrainte normale à l'extrémité de la plaque composite, il ne dépend que des propriétés physiques et mécaniques de la colle et de la plaque.

$$K = 1,31 \left( \frac{\tau_f \cdot G_{ad}}{\tau_{ad} \cdot E_f} \right)^{0,25}$$

Le critère à vérifier sur la contrainte  $\tau_{ad}$  en fonction des conditions d'environnement est :

$$\tau_{ad} = \frac{C}{1 + K \cdot \text{tg} \phi} < \tau_{adu,d} \text{ avec } \tau_{adu,d} \text{ (défini au AFGC)}$$

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. ZE YI WU, Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton arme pré-fissurées et renforcées par matériaux composite sous chargement statique et de fatigue thèse de doctorat ENPC 2004.
- [2]. J.M.BERTHELOT , matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures, TEC et DOC 4eme édition, 2002.
- [3]. MOSLEY W.H, HULSE R, BUNGEY J.H.. "Reinforced concrete design to Eurocode 2". Eurocode 2. EDITIONS ROWE LTD CHIPPENHAM WILTS. Londres. Grande-Bretagne (1996).
- [4]. SAMAI M. L. Notes des cours de post- graduation. Université de Constantine. Algérie (2007).
- [5]. D.G.HERMES, matériaux composites, 5eme édition, 2005.
- [6]. C.BATHIAS, matériaux composites, édition DUNOD, année 2005.
- [7]. J.A.CALGARO, maintenance et réparation des ponts, ENPC, année 1997.
- [8]. L.C.HOLLAWAY, strengthening of reinforced concrete structures: using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering, CRC press, année 2001.
- [9]. Document scientifique et techniques AFGC , réparation et renforcement des structure en béton au moyen de matériaux composites, année 2003.
- [10]. Document scientifique et techniques AFGC , réparation et renforcement des structure en béton au moyen de matériaux composites, année 2007
- [11]. Avis technique, CSTB, 2008
- [12]. A.PLUMIER, pathologie et réparations structurelles des constructions, ArGenCo, édition 2006.
- [13]. Technical recommendation construction, guide for the design and construction of externally-bonded , FRP système for strenghtening existing structure, CNR année 2004
- [14]. J. PERCHAT. « Béton Armé, Règles BAEL, Pièces soumises à des sollicitations normales », Techniques de l'Ingénieur, C2306-C2320, 1991.
- [15]. Perfectionnement sur les techniques de réhabilitation et de renforcement des structure , rencontres scientifique ,SOCOTEC-CTC année 2002.
- [16]. Document technique SIKA El-Djazair année2002.
- [17]. J.V.MIRANDA, techniques et systèmes de renfort des structure en béton 2004.

- [18]. Règlement eurocode2. calcul des structures en béton AFNOR1992
- [19]. Règlement eurocode8. Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme et document d'application nationale AFNOR 2000.
- [20]. Glossaire des matériaux composites, CARMA centre d'animation régional en matériaux avancés, 2006
- [21]. Article Ozkul turk