

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

**Hicham BELHANNACHI**

**Thème**

**REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POTEAUX EN  
BETON ARME**

**Membres du Jury de Soutenance :**

Président :	H. HOUARI	Professeur	Université Mentouri, Constantine
Rapporteur :	H. CHABIL	Professeur	Université Mentouri, Constantine
Examineur :	M L. SAMAI	Professeur	Université Mentouri, Constantine
Examineur :	A. TEKKOUK	M.C	Université Mentouri, Constantine

Juillet 2009

# REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné la force et la volonté de réaliser et achever 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. Je le remercie pour ses conseils qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à Monsieur HOUARI H., Professeur au département de génie civil à l'université de Constantine pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Tous mes remerciements et ma reconnaissance envers Monsieur SAMAI M.L., Professeur au département de génie civil à l'université Mentouri de Constantine, qui a consacré et sacrifié une partie de son temps pour ses conseils et directives précieuses.

Je tiens également à remercier vivement, Monsieur TEKKOUK.A, Maître de Conférences au Département de Génie Civil à l'université Mentouri de Constantine, pour ses encouragements, et d'avoir accepté d'examiner cette présente thèse.

Mes sincères remerciements sont aussi adressés envers mes collègues pour un temps agréable et une ambiance exemplaire passée ensemble.

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.

# DÉDICACES

*Je dédie le présent travail  
A la mémoire de mes très chers parents  
A ma femme ainsi qu'a mes enfants*

## RESUME

Malgré que certains ouvrages en béton armé demeurent en bon état sous des conditions climatiques rigoureuses et sévères, les désordres survenus au niveau des structures sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés, ou au changement de fonctionnalité du bâti (l'accroissement de surcharges d'exploitation).

Après diagnostic et investigations diverses, et afin d'y remédier à cette problématique il est impérativement indispensable de procéder à des méthodes soient de réparation soient de renforcement. Les techniques de renforcement des structures en béton armé au moyen de matériaux composites se sont révélés être nettement plus efficace et fiables, comparativement aux anciens procédés de renforcement.

L'étude d'éléments poteaux en béton armé a été au préalable largement développée de manière analytique ou graphique. Dans le cadre de cette présente étude il a été jugé intéressant d'intégrer l'apport d'un polymère renforcé en fibres de carbone (PRFC) dans le développement analytique des différentes équations d'équilibre ainsi que dans le développement graphique des diagrammes.

L'objectif de ce travail est de voir l'effet du rajout d'un tel renfort au moyen de PRFC, qui est considéré comme partie intégrante de la section, de poteaux en béton armé soumis à un chargement excentrique. Par le biais de diagrammes liant graphiquement le moment de flexion et l'effort normal : *diagrammes d'interaction*. Ceux-ci sont développés à partir des équations d'équilibre de la section et définissent un état imminent de ruine.

L'élaboration de ces diagrammes permet de déterminer ou de vérifier aisément, pour une section de béton et d'armatures données; la capacité portante de la section du poteau vis-à-vis d'une charge excentrique. Ainsi l'exploitation de ces diagrammes permet de faciliter, réduire le temps de vérification. A partir de ces diagrammes d'interaction, on constate que la contribution d'un tel renfort collé sur la partie tendue de la section doublement armée du poteau est considérable avec un gain significatif en terme de moment. Cette contribution est d'autant plus importante que le nombre de couches superposées du matériau de renfort augmente.

# ABSTRACT

Although certain reinforced concrete works remain in good condition under rigorous and severe climatic conditions, the disorders which have occurred on the level of the structures are often due to degradations of materials employed, or the change of functionality of the frame (the increase in overloads of exploitation).

After diagnosis and various investigations, and in order to cure these problems it is imperatively essential to carry out methods of repair or of reinforcement. The techniques of strengthening of the concrete structures reinforced by means of composite materials proved to be definitely more effective and reliable, compared to the old processes of strengthening.

The study of columns elements of concrete reinforced as a preliminary was largely developed in an analytical or graphic way. Within the framework of this present study it was considered interesting to integrate the contribution of a Carbon Fibres Reinforced Polymer (CFRP) in the analytical development of the various equilibrium equations like in the graphic development of the diagrams.

The objective of this work is to see the effect of the addition of such a strengthened by means of CFRP, which is regarded as integral part of the section, of reinforced concrete columns subjected to an eccentric loading. By the means of diagrams graphically links the bending moment and the normal effort: *diagrams of interaction*. Those are developed starting from the equilibrium equations of the section and define an imminent state of failure.

The development of these diagrams makes it possible to determine or check easily, for a section of concrete and reinforcements given; bearing capacity of the section of the columns with subjected to an eccentric load. Thus the exploitation of these diagrams reduce the time of checking, and makes it easy. From these diagrams of interaction we remarks that the contribution of such a strengthening stuck on the tended part of the section doubly armed of column is considerable with a significant win in term of moment. This contribution is all the more significant since the number of superimposed layers of material of strengthening increases.

## ملخص

الهدف من محتوى هذا العمل هو ترميم وإعادة تأهيل بواسطة المواد المركبة المسماة PRFC(polymère renforcé en fibre de carbone) من الخرسانة المسلحة يخضع لانحناء مركب لرفع خصائصها الميكانيكية

إن معالجة مقاطع الأعمدة من الخرسانة المسلحة تحت تأثير الانحناء المركب كان الهدف لعدة دراسات وهذا بواسطة رسم تخطيطي يربط بيانيا عزم الانحناء و الجهد العادي المسماة المنحنيات المتداخلة هذه البيانات تبنى على أساس معادلات توازن المقطع و بهذا أيضا نعرف حالة خاصة للهدم استغلال هذه المنحنيات المتداخلة يمكننا من تحديد و التحقق بطريقة سهلة من اجل مقطع خرسانة و تسليح معطى قدرة تحمل هذا المقطع بالنسبة المؤثرات الخارجية بواسطة هذه المنحنيات المتداخلة نتحقق ان مساهمة التدعيم بالمواد المركبة المستخدمة يضيفي مكسب كبير نسبة لعزم الانحناء لمقطع الخرسانة المسلحة

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>i</b>
<b>DÉDICACES</b> .....	<b>ii</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>ملخص</b> .....	<b>v</b>
TABLE DES MATIERES .....	vi
LISTE DES FIGURES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	viii
<b>LISTE DES NOTATIONS</b> .....	<b>ix</b>

<b>1 INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
1-1 Introduction:.....	1
1-2 Problématique: .....	2
1-3 Objectifs.....	3
1-4 Structuration de la thèse : .....	4

## 1-SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

<b>2 PATHOLOGIE DES OUVRAGES EN BETON ET METHODOLOGIE D'UN DIAGNOSTIC</b> .....	<b>5</b>
2-1 Introduction .....	5
2-2 La fissuration des ouvrages: .....	5
2-2-1 Fissuration accidentelle.....	5
2-2-2 Fissuration fonctionnelle mécanique .....	6
2-2-3 Fissuration fonctionnelle thermique .....	7
2-3 La déformation anormale d'éléments en béton armé .....	7
2-4 La rupture des éléments en béton armé.....	7
2-5 Les investigations dans le béton .....	8
2-5-1 préambule :.....	8
2-5-2 Examen visuel ou morphologique : .....	8
2-5-3 Mesures in –situ .....	9
2-5-3-1 Introduction.....	9
2-5-3-2 Mesures sur le béton:.....	9
2-5-3-3 Les détecteurs d'armatures : .....	10
2-5-3-4 Détecteur des fissures : .....	11
2-5-4 L'analyse technique des données .....	11
2-5-5 La formulation des recommandations.....	12

<b>3 TECHNIQUES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT</b> .....	<b>14</b>
3-1 Introduction : .....	14
3-2 Caractéristiques des produits de renforcement: .....	14
3-3 Adjonction d'armatures d'aciers .....	16
3-3-1 Introduction.....	16
3-3-2 Mise en place des armatures complémentaires .....	16
3-3-3 Protection des armatures: .....	16
3-3-4 Réfection des bétons: .....	17

3-4 Projection du béton :	18
3-4-1 Introduction:	18
3-4-2 Description des deux méthodes :	19
3-4-2-1 <i>Projection par voie sèche</i> :	19
3-4-2-2 <i>Projection par voie mouillée</i> :	20
3-4-3 Avantages des deux méthodes :	20
3-4-4 Inconvénients des deux méthodes:	21
3-5 Chemisage des sections de béton.....	21
3-5-1 Introduction.....	21
3-5-2 Adhérence entre les deux bétons:	21
3-5-3 Les inconvénients de chemisage:	23
3-6 Renforcement par gainage métallique :	24
3-6-1 Introduction:	24
3-6-2 Les matériaux utilisés :	24
3-6-3 La mise en œuvre des plats collés:	24
3-7 Le renforcement au moyen de profilés métalliques:	26
3-8 Le scellement d'armatures pour béton armé:	27
3-9 Renforcement par une précontrainte additionnelle :	28
3-10 Adjonction de matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres) :	29
3-11 Conclusions et choix de la méthode de renforcement :	31
<b>4 MATERIAUX COMPOSITES.....</b>	<b>33</b>
4-1 Généralités :	33
4-1-1 Introduction:	33
4-1-2 définitions :	33
4-1-3 Les caractéristiques générales :	35
4-2 Les matrices :	36
4-2-1 Introduction :	36
4-2-2 Définitions :	37
4-2-3 Les résines.....	37
4-2-3-1 <i>Différents types de résines:</i> .....	37
4-2-3-2 <i>Les résines thermodurcissables (TD) :</i> .....	37
4-2-3-3 <i>les résines thermoplastiques (TP):</i> .....	40
4-2-3-4 <i>Comparaison entre ces deux types de résines:</i> .....	41
4-2-4 les charges et additifs :	42
4-2-4-1 <i>Introduction:</i> .....	42
4-2-4-2 <i>Les charges:</i> .....	42
4-2-4-3 <i>Les Additifs:</i> .....	44
4-3 Les fibres:.....	45
4-3-1 Introduction et définitions:.....	45
4-3-2 Les fibres de carbone:.....	46
4-3-2-1 <i>Elaboration des fibres de carbone:</i> .....	46
4-3-2-2 <i>Les caractéristiques mécaniques des fibres de carbone:</i> .....	48
4-3-2-3 <i>Les produits industriels:</i> .....	48
4-3-2-4 <i>Conclusion et commentaires:</i> .....	49
4-3-3 Les fibres de verre:.....	49
4-3-3-1 <i>L'élaboration des fibres de verre:</i> .....	49
4-3-3-2 <i>Les propriétés mécaniques:</i> .....	50
4-3-3-3 <i>Produits industriels:</i> .....	51
4-3-3-4 <i>Conclusion:</i> .....	52
4-3-4 Les fibres d'aramides:.....	52
4-3-4-1 <i>Elaboration des fibres d'aramides:</i> .....	52
4-3-4-2 <i>Les caractéristiques et utilisation industrielle des fibres d'aramides:</i> .....	52
4-3-5 Les fibres de bore:.....	53

4-3-6 Les fibres de silice (ou de quartz).....	53
4-3-7 Les fibres de polyéthylène de haut module :.....	53
4-3-8 Les Caractéristiques des fibres et renforts: .....	54
4-4 Classification des matériaux composites: .....	54
4-4-1 Classification suivant la forme des constituants :.....	54
4-4-2 classification suivant la nature des constituants :.....	55
4-5 Conclusions: .....	56

## 2-ETUDE THEORIQUE

<b>5 ELABORATION DES DIAGRAMMES D'INTERACTION POUR L'ETUDE DES POTEAUX EXENTRIQUEMENT CHARGÉS, RENFORCÉS AU MOYEN DE MATÉRIAUX COMPOSITES</b> .....	58
5-1 Généralités et limites d'utilisation:.....	58
5-2 Introduction : .....	58
5-3 Caractéristique des matériaux: .....	59
5-3-1 le béton: .....	59
5-3-2 Les armatures d'acier: .....	59
5-3-3 Matériaux composites : .....	60
5-4 L'effet des excentricités sur le comportement des poteaux soumis à une charge excentrée : .....	61
5-4-1 L'effet du premier ordre : .....	61
5-4-2 L'effet du second ordre : .....	61
5-5 Elaboration et conception des diagrammes d'interaction: .....	63
5-5-1 Introduction : .....	63
5-5-2 Conception des diagrammes d'interaction : .....	63
5-5-2-1 <i>Section en béton seul</i> : .....	63
5-5-2-2 <i>Section en béton simplement armée</i> : .....	67
5-5-2-3 <i>Section en béton doublement armée</i> : .....	71
5-5-2-4 <i>Section en béton doublement armée et renforcé en PRFC</i> : .....	74
5-6 Les différents paramètres influents sur une section en béton armée renforcée en PRFC: .....	77
5-6-1 Influence de la résistance caractéristique du béton " $f_{ck}$ ": .....	77
5-6-2 Influence de l'enrobage (d'): .....	80
5-6-3 Influence du taux d'armatures ( $\rho_s$ ): .....	82
5-6-4 Influence la contrainte limite des armatures " $f_y$ ": .....	84
5-6-5 Influence du taux du renforcement " $\rho_f$ ": .....	86

## 3-CONCLUSIONS

<b>6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> : .....	88
6-1 Conclusions : .....	88
6-2 Perspectives: .....	89

<b>Annexe A : CONFINEMENT DES POTEAUX</b> .....	91
---	----

<b>Annexe B : MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES</b> .....	94
--	----

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 3.1 : Réfection des bétons et protection des armatures.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 3.2 : Renforcement au moyen de béton projeté.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 3.3 : Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage) .....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 3.4 : Organigramme du processus de chemisage en béton armé.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 3.5 : Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 3.6 : Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 3.7 : Un tracé rectiligne d'une précontrainte.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 3.8 : Tracé polygonal d'une précontrainte.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure.3.9 : confinements d'un poteau au moyen de PRFC.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 3.10 : Renforcement de poteau: dans le sens longitudinal vis-à-vis de la flexion; et dans le sens radial (confinement) vis-à-vis la compression.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 4.1 : les différents types de composites.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 4.2 : Organigramme des différentes familles de matrice.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 4.3 : Organigramme des différentes familles de fibres.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 4.4 : Fabrication par carbonisation des fibres hautes résistance (HR).....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 4.5 : Fabrication par graphitisation des fibres hauts modules (HM).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 5.1 : Loi de comportement du béton.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 5.2 : loi de comportement de l'acier.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 5.3 : Loi de comportement du composite.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 5.4 : différents modes d'excentricité.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 5.5 : Image instantanée à L'E.L.U. d'une section rectangulaire en béton seul....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 5.6 : Construction du diagramme d'interaction (M-N) d'une section en Béton seul.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 5.7 : Image instantanée à L'E.L.U d'une section rectangulaire simplement armée.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure5.8 : Construction du diagramme d'interaction (M-N) d'une section en béton simplement armée.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 5.9 : Image instantanée à L'E.L.U. d'une section rectangulaire doublement armée.....</i>	<i>73</i>

<b>Figure5.10</b> : Construction du diagramme d'interaction (M-N) d'une section en béton doublement armée.....	74
<b>Figure 5.11</b> : Image instantanée à L'E.L.U. d'une section rectangulaire doublement armée et renforcé en (PRFC).....	75
<b>Figure5.12</b> : Construction du diagramme d'interaction (M-N) d'une section en béton doublement armée renforcée en PRFC.....	77
<b>Figure5.13</b> : Influence de la résistance caractéristique sur le comportement d'une section en béton armé doublement armée renforcée en PRFC.....	80
<b>Figure5.14</b> : Influence de l'enrobage ( $d'$ ) sur le comportement d'une section en béton armé doublement armée renforcée en PRFC.....	82
<b>Figure5.15</b> :Influence du taux de d'armatures ( $\rho_s$ ) sur le comportement d'une section en béton armé doublement armée renforcée en PRFC.....	84
<b>Figure 5.16</b> : Influence de la contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_y$ ) sur le comportement d'une section en béton doublement armée renforcée en PRFC.....	86
<b>Figure 5.17</b> : Influence du taux de renforcement ( $\rho_f$ ) sur le comportement d'une section en béton armé doublement armée renforcée en PRFC.....	88

## LISTE DES NOTATIONS

- $A_c(x)$ : Surface de la zone comprimée de la section du béton, en fonction de l'axe neutre  $x$
- $A_f$  : Aire de la section du renfort
- $A_s$  : Aire de la section d'aciers tendus
- $A'_s$  : Aire de la section d'aciers comprimés
- $b$  : largeur de la section
- $d$  : la hauteur utile de la section
- $d'$  : l'enrobage des armatures tendues.
- $d_1$  : l'enrobage des armatures comprimées
- $E_c$  : Module de Young du béton
- $E_f$  : module de Young de composite
- $E_s$  : module de Young de l'acier
- $e_0$  : excentricité due à un chargement excentré
- $e_i$  : excentricité due aux imperfections géométriques
- $e_1$  : excentricité totale
- $F_c$  : la force dans le béton
- $F_f$  : la force de traction du renfort
- $F_c'$  : la force de compression des aciers comprimés
- $F_s$  : la force de traction des aciers tendus
- $f_{ck}$  : la résistance caractéristique du béton obtenue à partir d'un cylindre
- $f_f$  : la contrainte dans le composite
- $f_s$  : La contrainte des aciers en phase élastique
- $f'_s$  : La contrainte élastique des aciers comprimés
- $f_{yk}$  : la contrainte limite d'écoulement de l'acier
- $h$  : la hauteur de la section
- $K_1$  : coefficient de remplissage
- $K_2$  : coefficient de positionnement.
- PRFC : Polymère Renforcé en Fibres de Carbone
- $t$  : l'épaisseur de renfort
- $x$  : la profondeur de l'axe neutre

- $\alpha_b$  : coefficient adimensionnel représentant l'effort du béton
- $\alpha_s$  : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures tendues
- $\alpha'_s$  : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures comprimées
- $\alpha_f$  : coefficient adimensionnel représentant l'effort du renfort
- $\beta_b$  : coefficient adimensionnel représentant l'effort du béton
- $\beta_s$  : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures tendues
- $\beta'_s$  : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures comprimées
- $\beta_f$  : coefficient adimensionnel représentant l'effort du aux armatures comprimées
- $\gamma_c$  : coefficient de sécurité du béton
- $\gamma_s$  : coefficient de sécurité de l'acier
- $\varepsilon_{cu}$  : Déformation relative maximale dans le béton
- $\varepsilon_f$  : Déformation relative du renfort
- $\varepsilon_s$  : Déformation relative dans les aciers tendus
- $\varepsilon'_s$  : Déformation dans les aciers comprimés
- $\varepsilon_{yk}$  : Déformation relative maximale dans les aciers
- $\lambda$  : Elancement du poteau
- $\lambda_{lim}$  : Elancement limite du poteau
- $\rho_s$  : Le taux d'armatures
- $\rho_f$  : Le taux de renfort
- $\sigma_f$  : Résistance garantie à la rupture en traction du composite

*CHAPITRE 1*

*INTRODUCTION GENERALE*

## 1-1 Introduction:

Le béton ordinaire constitue certainement l'un des matériaux de construction les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exploitation sous des conditions climatiques particulièrement rigoureuses et sévères.

Il est quelquefois surprenant de constater que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante, cela nécessitera une protection et une maintenance appropriée. Ces désordres rencontrés sont très souvent dus au vieillissement des matériaux, ce qui a une incidence directe sur la durabilité du béton.

Dans tous les cas, il est impérativement indispensable de procéder à des méthodes, soient de renforcement, soient de réparation, et cela suite à une inspection d'analyses et de méthodologie d'un bon diagnostic.

Ces travaux de réhabilitation ou de rénovation des structures, ont essentiellement pour but de remédier à des désordres survenus au cours du temps et causés soit par des agressions physico-chimiques, soit par un phénomène de fatigue sous des chargements cycliques ou suite à des sollicitations accidentelles.

L'avantage de la réhabilitation par rapport à la démolition puis la reconstruction est de limiter, voire supprimer les pertes d'exploitation, ainsi nous pouvons retenir quatre raisons principales peuvent être retenues pour une éventuelle réhabilitation et ce par ordre d'importance:

- La *remise en conformité* vis-à-vis des règlements en vigueur.
- Les *dégradations* et désordres que subissent les matériaux.
- Les *changements* de fonctionnalité.
- L'*esthétique*.

## **1-2 Problématique**

Dès leurs premières applications, les techniques de réparation des structures en béton armé au moyen de matériaux composites ont démontré d'excellentes performances et se sont révélés être nettement plus efficaces, fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement traditionnels.

L'introduction dans le domaine du génie civil de ces matériaux composites de type polymère renforcés de fibres (PRF), présente de nombreux avantages fonctionnels tels que:

- une légèreté du tissu
- une mise en œuvre aisée
- une liberté de formes

Ces composites permettent aussi d'augmenter la durée de vie de certaines structures ou éléments structurels grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu.

Le matériau composite de type polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) est un procédé breveté de renforcement structurel par placage et collage d'un tissu en fibre de carbone assurant la fonction d'armature additionnelle résistante, permettant le transfert des efforts et l'adhésion au support.

Le composite ainsi obtenu rivalise grâce ses caractéristiques mécaniques avec les meilleurs aciers, en plus de sa non sensibilité à la corrosion.

L'introduction de ces matériaux composites dans cette présente étude a pour but de renforcer un élément structurel qui généralement a pour motif: un changement de fonctionnalité ou d'usage de structures en béton armé

L'introduction de ces matériaux composites dans cette présente étude a pour but de renforcer un élément structurel qui généralement a pour motif: un changement de fonctionnalité ou d'usage de structures en béton armé

Le rajout d'un tel renfort pour de sections en béton doublement armé de poteaux, soumis à une charge excentrée est supposé: révéler une augmentation considérable de sa capacité portante vis-à-vis de sollicitations de combinaisons d'effort axial et de moment de flexion

Cette étude traite le cas d'une section en béton doublement armé d'un poteau, soumis à un chargement excentré uniaxial, puis renforcé au moyen de matériaux composites de type PRFC (polymère renforcé en fibres de carbone)..

L'objectif principal est d'examiner l'effet significatif de l'apport d'un tel renforcement de la section, en comparaison avec celle qui n'est pas renforcée.

Les résultats obtenus indiquent une nette amélioration de la capacité portante en terme de moment de la section renforcée du poteau.

### **1-3 Objectifs:**

#### **Etude bibliographique:**

- Déceler préalablement les anomalies au moyen d'un bon diagnostic
- Choisir une technique de renforcement
- Utiliser un PRF bien définie et spécifique

#### **Étude théorique:**

- Etudier et analyser ce type de renfort greffé sur la section de l'élément structurel
- Mettre en évidence l'effet des différents paramètres influents
- Etablir un catalogue de diagrammes d'interaction (M-N) incluant l'effet de ce renfort et les paramètres influents

**1-4 Structuration de la thèse :****1- Synthèse bibliographique:**

- **Le chapitre1:** Résume une introduction, une problématique et une structuration de la présente étude.
- **Le chapitre2:** Est réservé pour définir la pathologie du béton et un cheminement d'un éventuel diagnostic.
- **Le chapitre3:** Définit les techniques de renforcement et de réparation.
- **Le chapitre4:** Présente les définitions générales des matériaux composites.

**2-Etude théorique:**

- **Le chapitre5:** Est consacré à l'étude et l'analyse d'une section en béton armé d'un poteau sous une charge excentrique puis renforcée par matériau composite. Des équations de base intégrant l'apport d'un renforcement et la construction de diagrammes d'interaction y sont détaillées.

**3-conclusions:**

- **Le chapitre6:** Englobe les principales conclusions et perspectives de développement du présent thème.
- **l'annexe A:** Présente le cas de confinement de poteaux au moyen de matériaux composites.
- **L'annexe B:** Explique et détaille la mise en œuvre de matériaux composites.

## Chapitre 2

# ***PATHOLOGIE DES OUVRAGES EN BETON ET METHODOLOGIE D'UN DIAGNOSTIC***

## 2 PATHOLOGIE DES OUVRAGES EN BETON ET METHODOLOGIE D'UN DIAGNOSTIC

### 2-1 Introduction

A coté des phénomènes d'altération du béton armé qui peuvent être aggravés par une mise en œuvre défectueuse (enrobage insuffisant, mauvais choix de liants hydrauliques, de granulats ou d'adjuvants etc.), la pathologie des ouvrages en béton armé se manifeste principalement par la fissuration excessive, la déformation exagérée ou la rupture d'éléments.

### 2-2 La fissuration des ouvrages:

La fissuration du béton armé peut avoir deux origines bien distinctes et indépendantes l'une de l'autre:

- La fissuration liée à la mise en œuvre et à la qualité du matériau: fissuration accidentelle
- Les fissurations liées au fonctionnement de l'ouvrage : fissuration fonctionnelle mécanique ou thermique.

Avant d'envisager le traitement des fissures, il est impératif d'en déterminer l'origine. Les fissures ne sont en effet que la manifestation de phénomènes dont il faut mesurer la gravité.

#### 2-2-1 Fissuration accidentelle

Les principales causes de fissurations accidentelles (précoce ou plus tardive) sont en nombre de cinq:

- a) **Le ressuage:** l'exsudation superficielle d'une partie de l'eau de gâchage à la surface du béton frais s'accompagne d'un tassement qui peut créer des fissures au droit des obstacles s'opposant au mouvement, tel que les armatures et les variations d'épaisseur notamment.

L'ouverture de ces fissures peut atteindre plusieurs millimètres et entraîner la corrosion des armatures.

- b) **Le retrait plastique:** il s'agit d'un phénomène exogène de dessiccation qui se produit avant et pendant la prise du béton. L'ordre de grandeur du retrait plastique est de 1 à 5 mm par mètre selon la vitesse d'évaporation de l'eau du béton. La fissuration plastique affecte les bétons de qualité médiocre.

- c) **Le retrait thermique:**

"Après prise" La prise du ciment étant une réaction exothermique; elle s'accompagne d'un important dégagement de chaleur (plusieurs de dizaines de degrés) qui chauffe le béton. Après la prise, le refroidissement du béton se traduit donc par un retrait thermique qui peut provoquer l'apparition de fissures.

d) **Le retrait hydraulique:**

Ce retrait différé s'exerce sur une période de 1 à 2 ans après la mise en œuvre. Il est directement lié au départ de l'eau libre du béton (excédant d'eau de gâchage nécessaire à l'ouvrabilité du béton mais n'entrant pas dans sa constitution) dans le temps. Ce retrait se produit d'autant plus lentement que les pièces sont massives et que l'humidité ambiante est élevée.

Les fissures liées aux quatre premières causes apparaissent entre les premières heures et les premiers mois d'existence du béton. Les fissures accidentelles n'ont en elles-mêmes aucun caractère de gravité. Elles peuvent cependant avoir des conséquences néfastes sur les ouvrages eux-mêmes ou les éléments qui leur sont associés:

- Corrosion des armatures si leur ouverture est importante
- Infiltrations d'eau, notamment si elles sont traversantes
- Désordres causés à des revêtements rapportés

### **2-2-2 Fissuration fonctionnelle mécanique**

Le principe même du fonctionnement des ouvrages en béton armé est basée sur la médiocre résistance du béton en traction. Celle-ci est compensée par les armatures placées dans les zones tendues. La sollicitation des armatures en traction suppose donc la fissuration du béton.

Lorsque les fissurations sont conformes au schéma de calcul, il n'y a pas de danger ni de désordre. Les fissures fonctionnelles d'un ouvrage en béton correctement dimensionné et mis en œuvre sont par nature compatible avec un bon comportement. La seule anomalie peut donc provenir d'une ouverture excessive des fissures qui indique obligatoirement le dépassement des sollicitations prises en compte.

Lorsque la fissuration n'est pas conforme au schéma de calcul, on peut conclure à priori à une conception, une mise en œuvre ou un usage défectueux. Cela concerne généralement un mauvais positionnement des armatures, une sollicitation excessive du béton en compression, des dispositions constructives inadéquates ou des sollicitations non prises en

compte dans les hypothèses de calcul (surcharges exagérées, tassement de fondations, poussées et tractions au niveau d'éléments structurels).

Il est également possible que la modélisation choisie pour le calcul des ouvrages ne soit pas représentative du fonctionnement réel. Cela se produit notamment lorsque des reports de charges intéressent des éléments de raideurs très différentes. Les éléments les plus raides (de plus forte inertie ou de plus faible portée) reprennent alors des charges pouvant être beaucoup plus importantes que prévu.

### **2-2-3 Fissuration fonctionnelle thermique**

La plupart des ouvrages en béton armé sont soumis à des variations de température qui se traduisent par des dilatations et des rétractions. Lorsque ces mouvements sont gênés ou empêchés par des éléments de structure raides, ou lorsque les joints de dilatation sont trop espacés, les raccourcissements s'effectuent au prix de fissures.

### **2-3 La déformation anormale d'éléments en béton armé**

Les éléments en béton armé les plus sensibles sont ceux qui fonctionnent généralement en régime isostatique, il n'y a pas donc possibilités d'adaptation et la déformation est directement liée à l'inertie des éléments, elle-même tributaire de l'état de fissuration de béton. Les causes de désordre peuvent être liées à des hypothèses de calcul incorrectes (notamment pour l'inertie prise en compte), ou un mauvais positionnement des armatures.

### **2-4 La rupture des éléments en béton armé**

Les causes de rupture d'éléments en béton armé sont souvent les mêmes que celles qui induisent des déformations excessives:

- sollicitations de calcul largement dépassées
- sous dimensionnement des éléments
- affaiblissement de la section du béton et des armatures du à la corrosion
- mauvais positionnement des armatures

Les ruptures peuvent aussi se produire brutalement, sans prévenir par des déformations décelables:

- rupture au cisaillement par efforts tranchant
- rupture en traction

## 2-5 Les investigations dans le béton

### 2-5-1 préambule :

Le béton armé est un composant mixte, dont l'évaluation des caractéristiques est complexe. Le diagnostic est le résultat d'investigations effectuées pour se prononcer sur l'état d'une construction et ses conséquences.

Lors d'un diagnostic, on cherche à déterminer la résistance du béton, sa fissuration, la constitution et l'enrobage des armatures, etc.

Le déroulement du diagnostic comporte quatre volées :

- 1) Un *examen visuel* ou morphologique
- 2) Des *mesures* sur site au moyen d'appareillages spécifiques.
- 3) *L'analyse technique* des mesures effectuées.
- 4) La *formulation* des conclusions et recommandations techniques.

Cependant, un diagnostic reste une approximation plus ou moins précise où il est rarement possible d'obtenir un recueil exhaustif des données.

### 2-5-2 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 de définir un éventuel programme d'investigation à envisager pour affiner un éventuel diagnostic.

Quel que soit leur origine, ces informations doivent être utilisées avec prudence, et surtout pas comme des données de base du diagnostic ; elle sont plutôt à considérer comme des éléments de recoupement des constats 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: jonctions, appuis, etc...
- La localisation des fissures.

### 2-5-3 Mesures in –situ

#### 2-5-3-1 Introduction

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

- L'homogénéité de l'état des lieux ou sur l'existence de plusieurs cas de figures bien distincts.
- La nature et la localisation des désordres.
- Des anomalies de fonctionnement vétustes, non conformes à la réglementation en vigueur
- la localisation des sondages et des prélèvements à effectuer.
- Des points suffisamment explicites pour se prononcer d'emblé
- L'ouverture des fissures dans le béton.

Les différentes mesures in-situ sont :

#### 2-5-3-2 Mesures sur le béton:

- *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 au différents points d'une structure, mais l'information sur le béton reste imprécise par cette méthode.

- *L'auscultation par ultrasons*

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

- *Carottage*

Prélèvement de carotte a comme but de faire des analyse en laboratoire, ces examens d'un aspect pétrographique, peuvent être demandé en vue de:

- a) L'identification des agrégats
- b) La détérioration des agrégats
- c) L'homogénéité du béton

- d) La profondeur d'une éventuelle carbonatation
- e) La répartition des fissures
- f) L'analyse chimique : la teneur en ciment, présence et quantité de chlorures.
- g) Des essais physico – mécaniques : densité, résistance à la compression, module d'élasticité.

### 2-5-3-3 Les détecteurs d'armatures :

Ces appareils permettent de détecter la présence d'armatures, leur position (enrobage notamment) et leur diamètre. 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 et le profomètre

Utilisés pour la détermination précise de la position et du diamètre des armatures dans le béton

- 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.

- La radiographie

Ce procédé permet de réaliser des clichés radiographique 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'obtention de film photographique impressionné par les rayons qui traversent la paroi du béton. L'analyse est interprétée en fonction des traces obtenues:

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

#### 2-5-3-4 Détecteur des fissures :

- *Fissuromètre*

Permet de suivre l'évolution d'une fissure sur un plan ou dans un angle.

- *Extensomètre*

Permet de mesurer la déformation linéaire d'un élément de structure .

- *Hygromètre*

Permet d'évaluer l'humidité, en surface et en profondeur sur les parois de béton. L'hygromètre permet de mesurer le taux d'humidité en profondeur de façon non destructive par une méthode basé sur la radiofréquence.

#### 2-5-4 L'analyse technique des données

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 [1].

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

##### *Le calcul*

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

##### *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.

##### *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.

##### *L'évaluation*

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

On peut conduire une opération d'évaluation par:

- Un examen du dossier d'ouvrage: les 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.

#### *La vérification*

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

#### **2-5-5 La formulation des recommandations**

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 , accompagnées de cas échéant des marges d'incertitudes n'ayant pu être levés.

Les recommandations se déduisent des conclusions en les replaçant dans la perspective de la commande du diagnostic [1].

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

# ***TECHNIQUES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT***

### 3 TECHNIQUES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT

#### 3-1 Introduction :

Le choix d'une ou des méthodes de réparation et de renforcement est défini en relation étroite avec la nature et le degré d'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic. Ce choix est tributaire de matériaux de construction utilisés, des techniques choisies, et de critères économiques.

On peut être amené donc à procéder :

- A des *remises en état* d'éléments structurels présentant des défauts que l'on cherche à atténuer, pour obtenir un aspect satisfaisant tels que: l'obturation de fissures qui sont dues le plus souvent au retrait et aux variations environnementales.
- Au *renforcement* ou à la *réparation* d'éléments insuffisamment résistants, les réparations sont souvent réalisées dans les zones où les sections sont trop sollicitées et défailantes, par contre le renforcement des éléments consiste à améliorer leurs caractéristiques mécanique de manière à ce qu'elles offrent une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistance ultime.

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

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

- a) Présenter une *compatibilité* avec le support béton à savoir:
  - un retrait limité pour des liants hydrauliques employés, ce phénomène qui apparaît dès la prise et au durcissement final, et de manière à éviter l'apparition de fissures ou un décollement de l'interface
  - 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, similaire 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
- comme tout béton réalisé selon les règles de l'art, les produits de renforcement doivent présenter une bonne tenue vis-à-vis des agents agressifs:

-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 à 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 Adjonction d'armatures d'aciers**

#### **3-3-1 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 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 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.

#### **3-3-2 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, ou des systèmes explicites de fixation (cheville, tiges collées), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celle-ci devra être effectuée, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée[3].

#### **3-3-3 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.

### 3-3-4 Réfection des bétons:

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

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

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

Ce type de réparation demande généralement , pour être efficace , une augmentation assez importante des dimensions des éléments de structure et l'emploi d'un volume relativement consistant de matériaux , ce qui n'est pas plaisant ni sous l'aspect économique, ni sous l'aspect esthétique ( Fig3.1).



*Figure 3.1 : Réfection des bétons et protection des armatures.*

### **3-4 Projection du béton :**

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

Cette technique est largement répandue, tant sur le plan de renforcement des structures ou éléments structurels insuffisantes, que sur un plan de réparation des structures ou éléments structurels défailantes, et exigeant une mise en œuvre soignée. Le béton projeté peut éventuellement être associé avec un autre mode de réparation, qui est le rajout d'armatures d'aciers. Cette méthode de projection de béton peut être réalisée, soit par voie sèche ou bien par voie humide.

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

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

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

Si les dégradations sont profondes, on procède au préalable à un repiquage ou une démolition des surfaces de béton, sinon on fait appel au procédé de sablage pour le cas des dégradations superficielles.

La qualité des matériaux d'adjonction ou de rajouts, doit être au moins égales à celles des matériaux d'origine des ouvrages.

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

En faisant un nombre de passes aussi faible que possible, il faut chercher à réaliser un enrobage régulier, et obtenir ainsi une couche compacte.

La projection verticale vers le bas n'est pas recommandée, ainsi qu'un talochage n'est pas souhaité.



*Figure 3.2 : Renforcement au moyen de béton projeté*

### **3-4-2 Description des deux méthodes :**

#### **3-4-2-1 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 fins, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaisseur, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir, ce qui donne [3]:

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

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité. Toutefois les normes préconisent un dosage pas moins de 280 kg/m<sup>3</sup> de ciment ayant une résistance à la compression supérieure à 25 MPa.

#### **3-4-2-2 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 [5].

#### **3-4-3 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
- Une bonne adhérence sur le support.
- Une pénétration en grande profondeur dans les pores.
- Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise

##### b) Par voie mouillée :

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

#### **3-4-4 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.

#### **3-5 Chemisage des sections de béton**

##### **3-5-1 Introduction**

Le procédé classique dont l'efficacité a été largement vérifié 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.

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

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

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

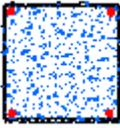
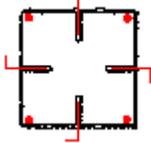
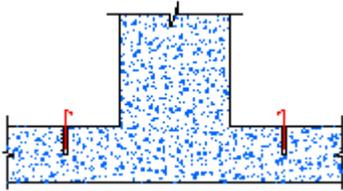
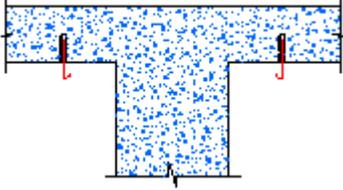
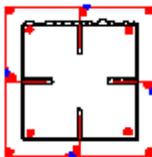
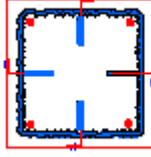
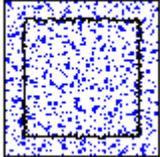
	
<p>1- nettoyage et sablage du support initial de béton du poteau</p>	<p>2- Ancrage et scellement de chevilles pour fixation d'armatures additionnelles.</p>
	
<p>3-scellement d'armatures d'ancrage sur le plancher en amont du poteau</p>	<p>4-scellement d'armatures d'ancrage sous le plancher en aval du poteau.</p>
	
<p>5-fixation des armatures additionnelles sur les tiges d'ancrage.</p>	<p>6-étalage d'une couche de résine sur la surface de béton primitif.</p>
	
<p>7-coulage de l'enveloppe en béton riche et fluide.</p>	

Figure 3.3 : Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage).

### 3-5-2 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 [4].

### 3-5-3 Les inconvénients de chemisage:

Les inconvénients de renforcement par un béton additionnel sont résumés comme suit:

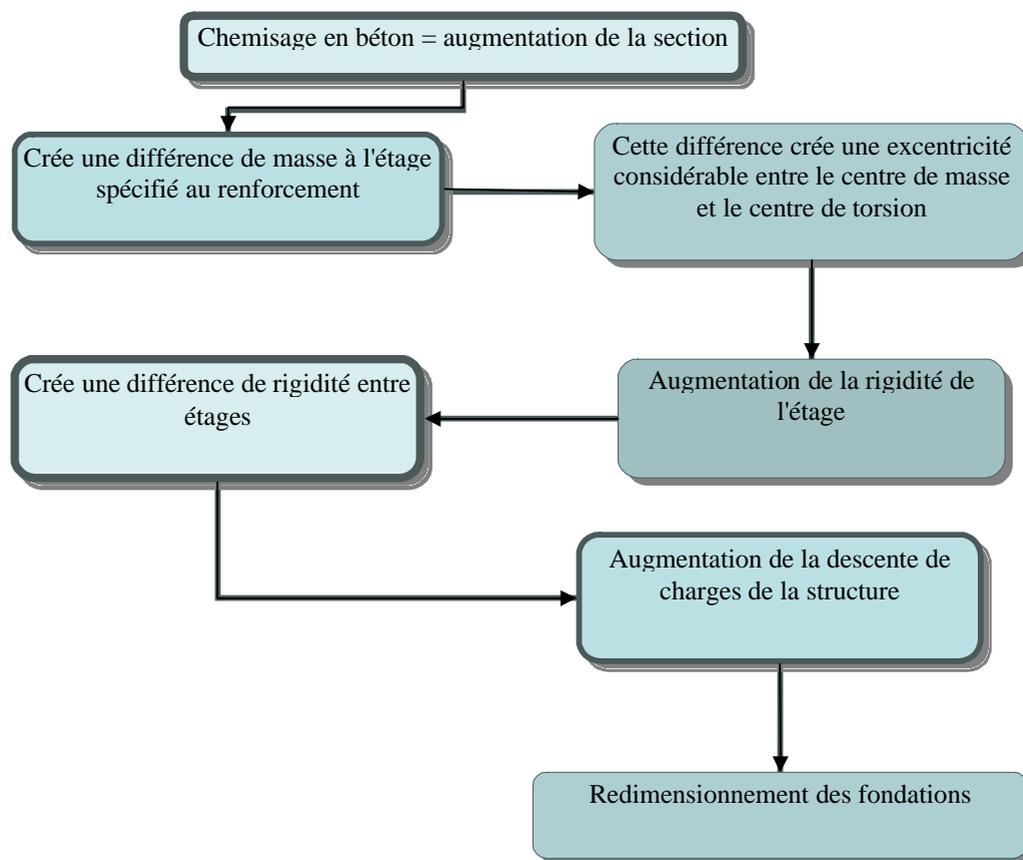


Figure 3.4: Organigramme du processus de chemisage en béton armé

A noter que le renforcement d'un élément par l'augmentation de sa section de béton (chemisage), influe directement sur la masse de la structure, comparativement aux autres moyens de renforcements, qui se caractérisent par leur légèreté relative.

### 3-6 Renforcement par gainage métallique :

#### 3-6-1 Introduction:

Ce type de renforcement est utilisé généralement pour les poteaux ; l'union de la platine à la structure peut se faire par : Collage, vissage, ou bien ancrage.

Du point de vue transmission des efforts, la meilleure technique est celle du collage.

#### 3-6-2 Les matériaux utilisés :

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

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

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

- **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) [6].

#### 3-6-3 La mise en œuvre des plats collés:

Les plats destinés à être collés doivent être traités par sablage pour donner à la surface une rugosité supérieure. Après l'étape qui suit le sablage, les plats doivent être revêtus d'un produit de protection, soit un type de vernis, soit un primaire époxy de même nature que la colle, capable d'assurer la protection temporaire de la tôle et son adhérence ultérieure à la structure (compatibilité avec les colles envisagées) [5].

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

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

La préparation du support exige les deux actions d'éliminer les parties dégradées et de rendre le support plan. La reprise de la planéité du support nécessite un

ragréage au mortier de résine ; les produits de ragréage doivent être compatibles avec les produits d'encollage. D'une façon générale les surfaces à ragrées ne doivent pas représenter plus de 20% de la surface à encoller.

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

L'encollage exige une couche de colle sur le plat d'acier et sur la paroi du béton. Le meilleur outil pour étaler régulièrement la colle et assurer l'épaisseur moyenne requise est la spatule crantée. Pour un collage efficace, il est indispensable de maintenir la colle sous pression pendant la durée de prise, le temps pendant lequel l'effort de serrage est maintenu doit être fonction de la viscosité de la colle et de la largeur des plats d'acier (Serre-joint, barres filetées, les étais).

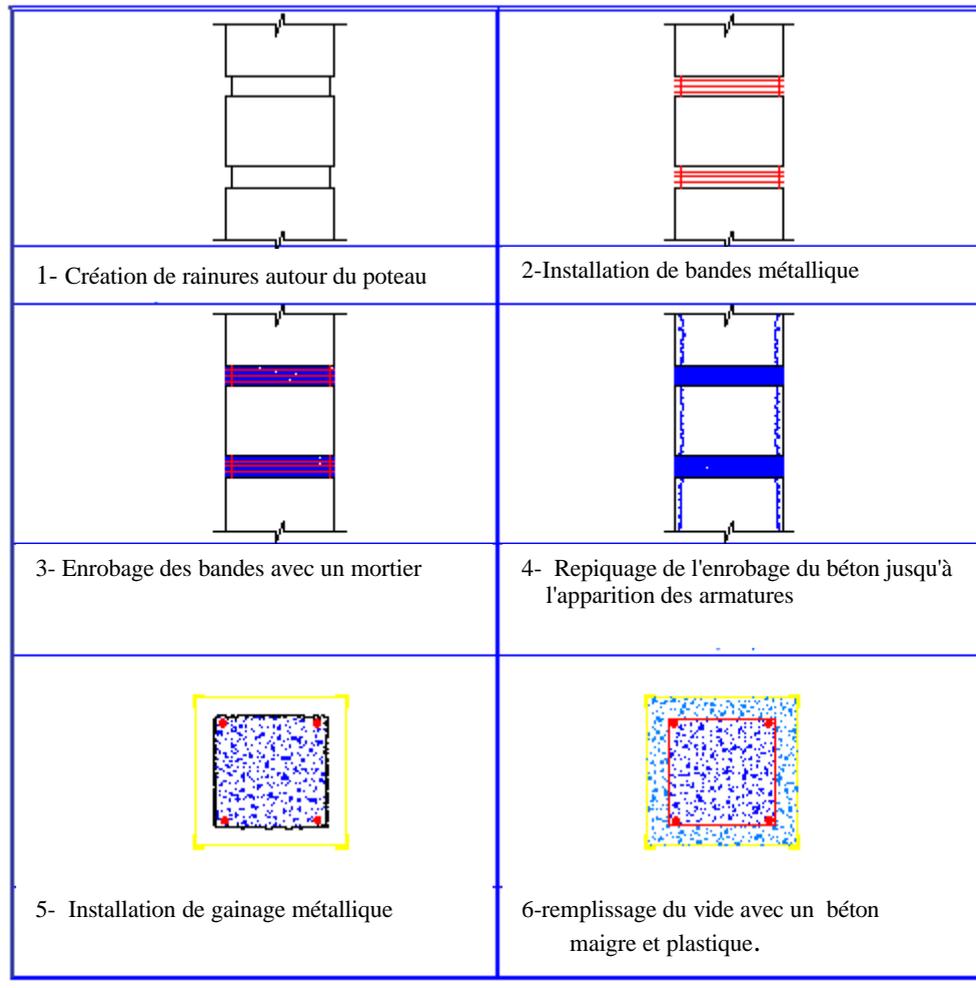
Pendant la prise de la résine de collage , il est recommandé d'éviter tout effet vibratoire , en particulier tout mouvement issu de trafic répété, ou d'effets dynamique de machines.

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

Dans le cas où la structure doit satisfaire à des exigences de stabilité au feu, une protection des plats doit être prévue pour éviter que le film de colle ne dépasse une température jugé critique. Cette protection peut être réalisée par l'utilisation de produit isolant.

Il est à noter que le renfort avec les platines en acier présente des inconvénients tels :

- le découpage des platines se fait généralement en atelier.
- les longueurs sont limitées.
- le transport n'est pas toujours aisé.
- l'étalement des éléments structuraux est parfois nécessaire.
- la durabilité vis-à-vis de la corrosion et la fatigue pose problème.



*Fig3-5 Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique*

### 3-7 Le renforcement au moyen de profilés métalliques:

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

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

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

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

L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis se positionnent correctement au montage. Il est recommandé d'envisager des possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux constructions métalliques nouvelles [3] [6].



*Fig3-6 Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique.*

### **3-8 Le scellement d'armatures pour béton armé:**

Les scellements d'armatures dans le béton armé sont habituellement utilisés pour résoudre les problèmes d'oublis d'armatures en attente, l'extension d'un ouvrage ou bien dans le but d'assurer la continuité d'éléments préfabriqués. Les scellements sont réalisés à l'aide de mortier à base de liants hydrauliques ou de résines dont les constituants du mélange sont pré-dosés. Dans ce dernier cas, le scellement peut être réalisé à volume prédéterminé (scellement chimique obtenu par broyage d'une ampoule prêt à l'emploi), ou à volume à la demande comme les scellements chimiques réalisés par mélange d'une résine et d'un durcisseur par l'intermédiaire d'une buse et d'un pistolet ou bien à partir d'un kit.

Il est important de signaler qu'il existe une certification concernant les produits spéciaux pour construction en béton, dont les produits de scellement et de calage, et a pour but de garantir l'aptitude à l'emploi du produit de scellement dont notamment ses performances minimales, ayant reçu un avis favorable d'un contrôleur technique [1].

### 3-9 Renforcement par une précontrainte additionnelle :

Il peut être envisagé d'appliquer à des ouvrages existants des efforts de précontrainte en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Cette technique présente l'avantage d'éviter les efforts concentrés importants sur la structure, elle est bien adaptée aux structures minces et peut ferraillées.

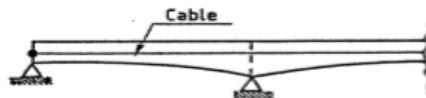
Les câbles additionnelles étant le plus souvent situés à l'extérieur du béton, il peut y avoir un risque d'instabilité d'ensemble : le flambement. On prévient ce risque en prévoyant aussi des fixations transversales qui s'opposent à une mise en vibration de ces derniers.

La conception et le calcul doivent être en conformité avec les règlements en vigueur.

L'étude doit porter sur l'influence de l'effet des efforts appliqués localement sur des structures ou éléments structurels non conçus à l'origine pour les recevoir[5] [7]..

Les tracés des armatures de précontrainte additionnelle peuvent être rectilignes ou polygonaux:

Le tracé rectiligne simple et facile à mettre en œuvre, améliore peu la résistance au cisaillement (fig.3-7).



*Fig3-7 Un tracé rectiligne d'une précontrainte.*

Le tracé polygonal est plus efficace que le tracé précédent, mais il exige la construction de déviateurs qui ont l'inconvénient d'augmenter les pertes par frottement lors de la mise en tension des câbles (fig.3-8).



*Fig.3-8 Tracé polygonal d'une précontrainte.*

Les efforts complémentaires appliqués à la structure sont introduits en deux points, aux extrémités de l'armature (cas de tracé rectiligne), et de même pour le deuxième tracé ils sont introduits aussi en certains points de leur courbure ou se trouvent les déviateurs.

Il se peut qu'une précontrainte éventuelle complémentaire soit disposée à l'intérieur du béton dans des gaines prévues à cet effet lors de la conception de l'ouvrage (cas assez rare), soit extérieurement du béton dans l'âme en cas de poutres pleines.

### **3-10 Adjonction de matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres) :**

Un matériau composite est l'assemblage de deux matériaux de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Les matériaux composites sont composés de fibres noyées dans une matrice.

Une fibre est constituée de plusieurs filaments, élémentaires dont le diamètre est de l'ordre de 5 $\mu$ m. La fibre a un comportement élastique linéaire jusqu'à rupture les lois de comportement sont de type "élastique fragile".

Le comportement mécanique des matériaux composite dépend du type de fibres et de type des matrices, qui doivent être compatibles entre eux.

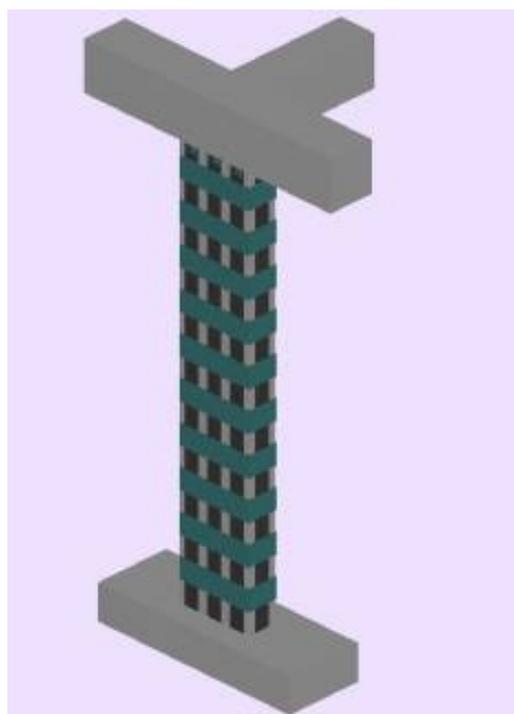
La matrice est le matériau qui donne le monolithisme à l'ensemble, et permet d'assurer le collage des fibres entre elles et transférer les efforts extérieurs à celles-ci. De plus la matrice joue un rôle très important pour résister aux efforts tranchants Par ailleurs elle protège les fibres en les isolant de l'humidité de l'oxydation et des agents agressifs chimiques. [3].

Les avantages du renfort au moyen de matériaux composites offrent :

- une légèreté 5 fois plus que l'acier.
- une résistance 10 fois plus optimale que les platines.
- une grande flexibilité avec une faible épaisseur.
- une facilité de transport
- un poids de l'ordre de 800gr le mètre carré (épaisseur d'environ 1mm)
- une mise en place et un découpage à la forme désirée
- une mise en œuvre aisée
- adaptation aux supports
- Non sensibilité à la corrosion et d'autres attaques chimiques
- Meilleure résistance au feu et à la fatigue



*Fig.3-9 confinements d'un poteau au moyen de PRFC*



*Figure 3.10 Renforcement de poteau: dans le sens longitudinal vis-à-vis de la flexion; et dans le sens radial (confinement) vis-à-vis la compression.*

**3-11 Conclusions et choix de la méthode de renforcement :**

Vus que les matériaux composites aient une grande flexibilité en s'adaptant aux formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés, et pour leur légèreté par rapport aux aciers, leur facilités de manutention, de transport et de mise en œuvre sur site, ainsi que leurs résistances mécaniques assez importantes que les autres moyens de renforcements. Ces multiples avantages, mécaniques et physico-chimiques permettent l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé, l'application de tissus ou lamelles en polymère renforcé en fibre de carbone (PRFC) est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelles.

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 ce travail. 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.

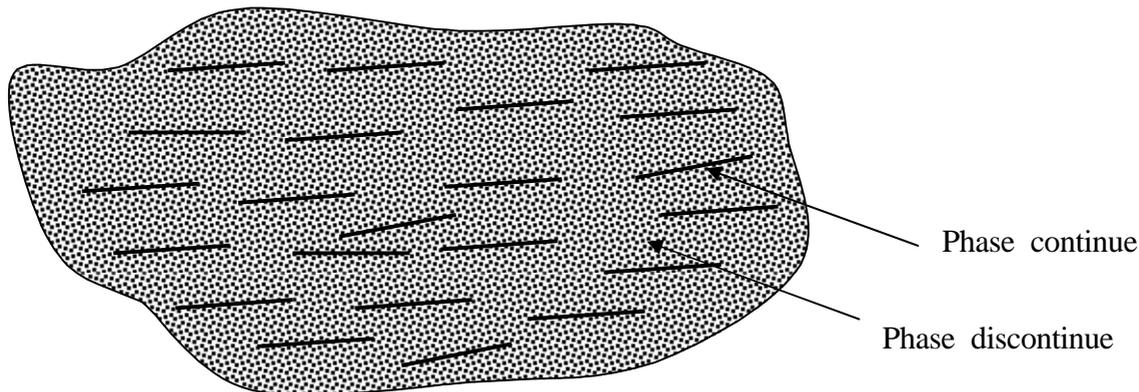
Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice; ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés: les pigments de coloration, l'isolation thermique ou acoustique[20] [8]..

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
1/Composites 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.

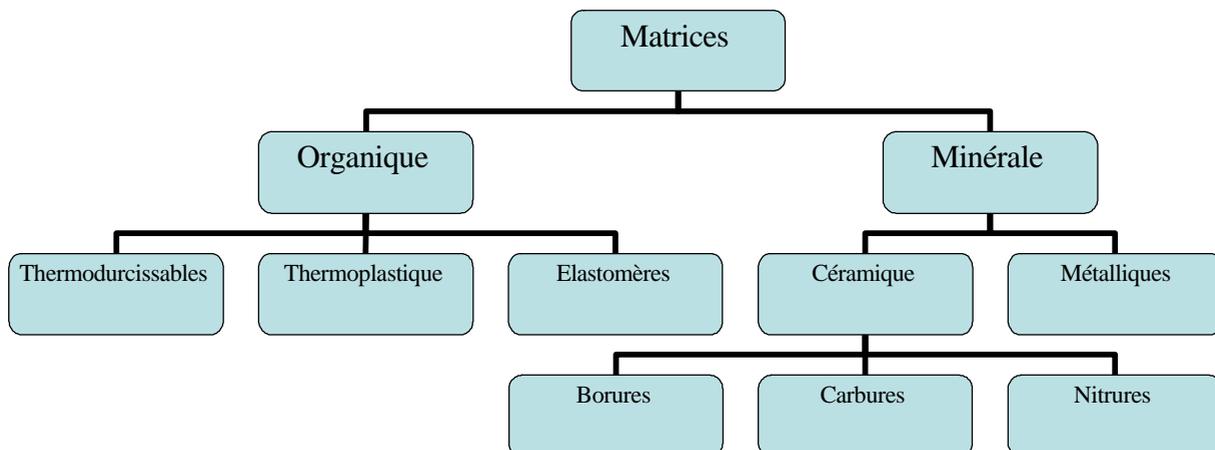
Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées [10] [9].

## 4-2 Les matrices :

### 4-2-1 Introduction :

Du fait de leurs faibles sections (des diamètres aux environs de 10 à 20  $\mu\text{m}$ ), les fibres ne pouvant toutefois 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 adjuvant et additifs (agents de démoulage stabilisant etc.), les résines sont livrées en solution sous forme de polymères en suspension dans des solvants. 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 [8].

##### **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 pontent (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 utilisées:

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 élevée.
- une bonne stabilité dimensionnelle.
- une facilité de mise en œuvre.
- un faible coût de production.
- une bonne tenue chimique.
- Une bonne résistante chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.).

Et leurs inconvénients sont:

- Emission d'éléments polluants
- inflammabilité.
- une dégradation à la lumière par des rayons ultraviolets.
- une mauvaise tenue à la vapeur

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

spatial, missiles, etc.).

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

- ses avantages sont :

- une adhérence parfaite sur les fibres.
- une bonne propriété mécanique (en traction, flexion, compression, choc, et fluage, etc.), supérieure à celles des polyesters.
- une mise en œuvre facile, sans apport de solvant.
- une 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, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et mettre en œuvre.

#### e) **les résines polyuréthanes 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 difficiles à mettre en œuvre, utilisées essentiellement dans les pièces de structure pour les réacteurs.

**g) Bismaléimides:**

Ces 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 mises 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 suivants:

- polyamide: une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- polytéraphthalate 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 disponible 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 continue	Moulage
Court	Long (polymérisation)	Cycle
Asses 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 toujours des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60% en terme de masse[8].

Pour une résine donnée, le choix des charges ou des additifs est déterminé en fonction des modifications recherchées, d'une manière générale ce choix devra satisfaire un certain nombre d'exigences:

- compatibilité avec la résine de base.
- 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 cellulosiques 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 calcium ou de magnésium, sont utilisés comme des charges et aussi comme des retardataires de flamme.

##### **c) Oxydes et hydrates métalliques:**

- Poudre et micro sphères:

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

- Alumine et tri hydrate 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-retraits
- 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 certains 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.

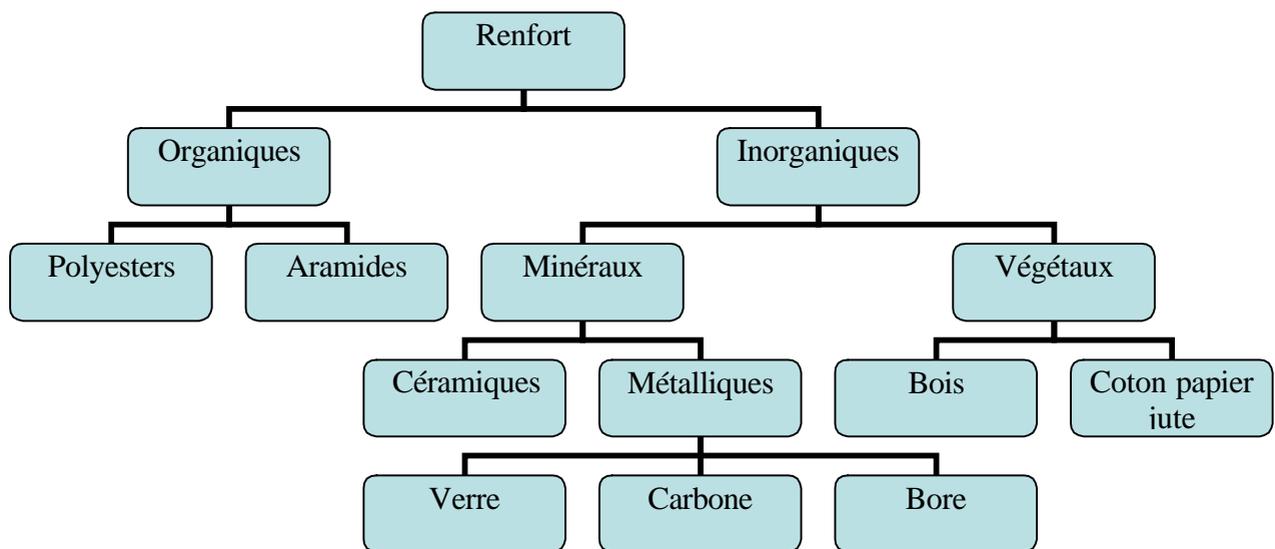
Ces renforts sont constitués par plusieurs centaines ou milliers de filaments, de diamètre compris entre 5 et 15 micromètres

Il existe deux types de fibres:

- fibres courtes: quelque 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, utilisée telles quelles ou bien tissés.

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: surfaces 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 mêmes sous forme de fibres orientées.

Actuellement, les fibres utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du poly-acrylonitrile (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[8].

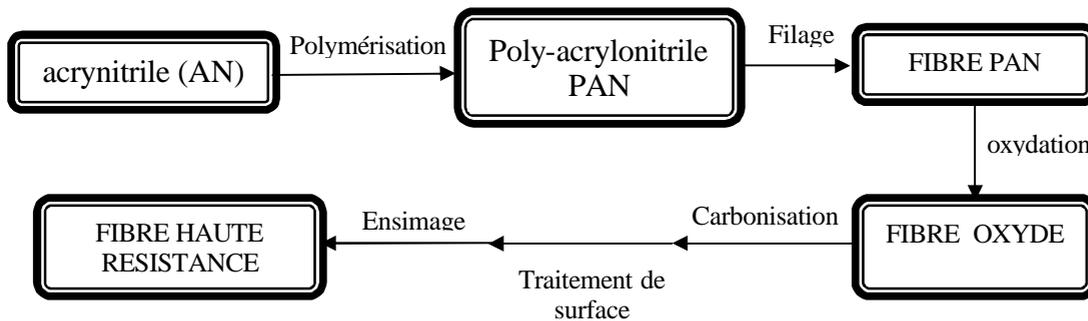
#### **a) L'oxydation:**

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).

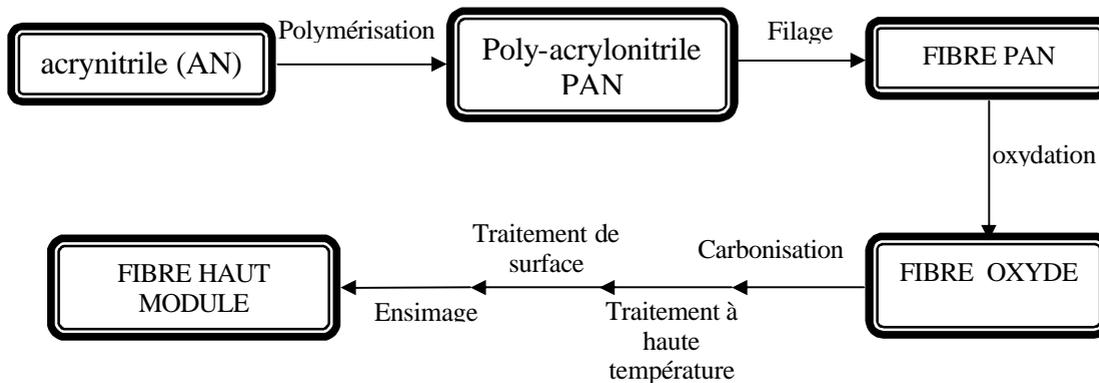


*Figure 4-4: Fabrication par carbonisation des fibres haute résistance (HR)*

### 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 hauts 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 oxydant dans le domaine spatial.

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

Le produit de base en industrie courante est le fil continue, 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 KN/mm<sup>2</sup> et une résistance à la rupture de 20000 N/mm<sup>2</sup> ; ainsi qu'une faible masse volumique, de l'ordre de 2000 Kg/m<sup>3</sup>, conduisant à des propriétés mécaniques spécifiques remarquablement élevés.[8]

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 KN/mm<sup>2</sup> pour le module de Young et 4000 N/mm<sup>2</sup> 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°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'opposent 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-avants, 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:**

Les grandeurs des caractéristiques mécaniques de référence, mesurées sur monofilaments, prélevés à la sortie de la filière sont données sur le tableau B-1.

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

Le tableau B-2 donne les valeurs de la contrainte à la rupture, mesurées sur fils de base ayant subi un ensimage. Les valeurs obtenues semblent indiquer une chute des caractéristiques lorsque le nombre de filaments augmente. Dans les matériaux composites, la liaison verre-résine par l'intermédiaire de l'ensimage assure une répartition assez homogène de la charge.

Les mesures, déduites de la rupture des matériaux composites unidirectionnels, conduisent aux valeurs, à la rupture des fibres sont reportées au tableau B-3.

Enfin, 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 $f_u$	(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 sillionne), soit à des fils discontinus (fils verranne), et sont caractérisés essentiellement par:

- La désignation des verres de type E ou R.
- Le type du fil : sillionne 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 $E_f$	(N/mm <sup>2</sup> )	60000	120000
Contrainte à la rupture $f_u$	(N/mm <sup>2</sup> )	3000	3000
Allongement à la rupture $\epsilon_{fu}$	(‰)	36	19

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

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

Un filament de tungstène (= 12  $\mu$ m) sert de catalyseur à la réaction de chlorure de bore et d'hydrogène à 1200°C. Les fibres de bore obtenue ont un diamètre d'environ 100  $\mu$ m (la vitesse de croissance est de 1 u/s

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse du 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 ( $\mu\text{m}$ )	Masser volumique (kg)	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
<b>Verre E</b>	16	2600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	$0.5^\circ 10$
<b>Verre R</b>	10	2500	86 000		0.2	3 200	4	$0.3^\circ 10$
<b>Carbonne HM</b>	6.5	1800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	$0.08^\circ 10$
<b>Carbone HR</b>	7	1750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	$0.02^\circ 10$
<b>Kevlar 49</b>	12	1450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	$0.2^\circ 10$
<b>Bore</b>	100	2600	400 000			3 400	0.8	$0.4^\circ 10$
<b>Silicate d'alumine</b>	10	2600	200 000			3 000		
<b>Polyéthylène</b>		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 discontinue : 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, augmentera leur facilité d'usinage.

Des particules de métaux tels que le tungstène, le chrome incorporé dans les métaux ductile, augmentera leurs propriétés à température élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante [8].

### **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 métallique : bore.
  - fibres métal –minérales. Fibres de bore revêtues de carbure de silicium.
- composites à matrice minérale avec :
- fibre métallique.
  - 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 inférieure de 10% au poids des platines d'aciers.
- 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 leur 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'aciers 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 fibre de verre et les fibre d'aramide (*tableau 4-6*), de MEIR.

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

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

## CHAPITRE 5

# ***ELABORATION DE DIAGRAMMES D'INTERACTION POUR L'ETUDE DES POTEAUX EXCENTRIQUEMENT CHARGÉS, RENFORCÉS AU MOYEN DE MATÉRIAUX COMPOSITES***

## **5 ELABORATION DE DIAGRAMMES D'INTERACTION POUR L'ETUDE DES POTEAUX EXCENTRIQUEMENT CHARGÉS, RENFORCÉS AU MOYEN DE MATÉRIAUX COMPOSITES**

### **5-1 Généralités et limites d'utilisation:**

Le domaine d'application des recommandations couvre le calcul des structures en béton armé réparées ou renforcées avec des matériaux composites par collage direct en sa partie tendue du support béton.

Les hypothèses de calcul présentées font référence aux documents réglementaires habituels Eurocode2, et s'inscrit dans ce cadre.

Les expressions de calcul proposées dans le présent chapitre s'appuient sur des hypothèses d'adhérence parfaite entre le "Polymère Renforcé en Fibre de Carbone (PRFC)" et le support béton (loi de compatibilité).[16]

Par ailleurs les déformations des sections et les diagrammes des contraintes qui en résultent sont développées suivant les même hypothèses que celles retenues dans le l'Eurocode 2. [19].

### **5-2 Introduction :**

En prenant compte le mode de sollicitation le plus réaliste des efforts auxquels les poteaux renforcés sont soumis à la flexion composé : un effort normal et un moment fléchissant dus à un chargement excentré ( $e_0$ ).

La géométrie des poteaux et ses liaisons, est supposée non parfaite provoquant une excentricité ( $e_1$ ).

La rupture d'un poteau en béton armé, même calculé en compression simple, provient d'un flambement d'ensemble, causé par l'élancement susceptible de présenter une instabilité de forme, engendrant une excentricité ( $e_2$ ).

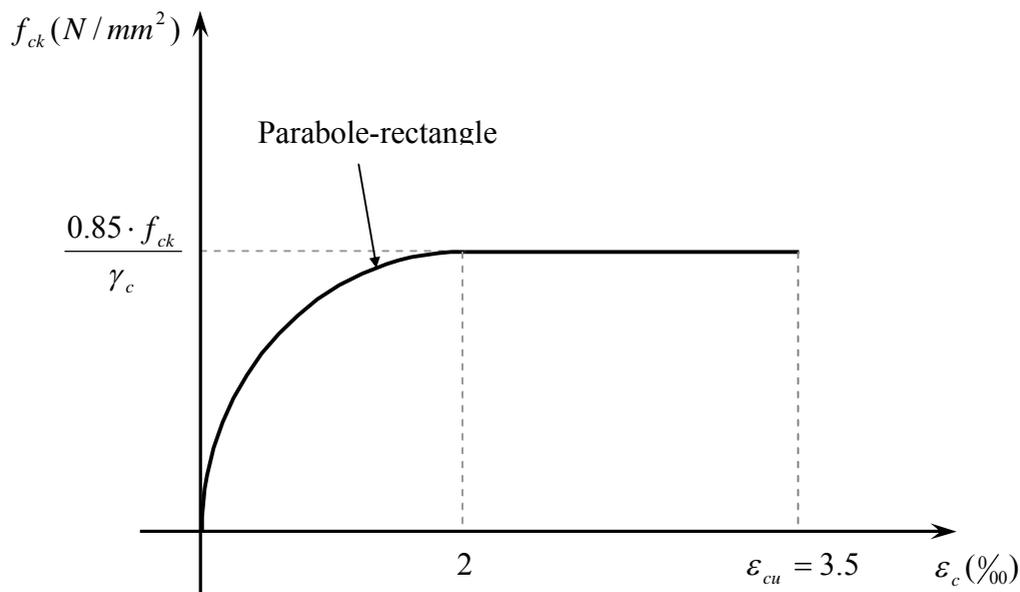
L'objectif de la présente étude est de développer une méthode graphique de dimensionnement et de vérification des sections de poteaux renforcés longitudinalement au moyen de matériaux composites (PRFC: polymère renforcée en fibre de carbone), soumis à la flexion composée uniaxiale

### 5-3 Caractéristique des matériaux:

#### 5-3-1 le béton:

Aux états limite ultimes, le diagramme contraintes-déformations utilisé est le diagramme dit "parabole-rectangle" [19].

La résistance à la compression de calcul du béton est défini par une résistance caractéristique obtenue à partir d'un cylindre  $f_{ck}$ .



*Figure 5.1 :Loi de comportement du béton.*

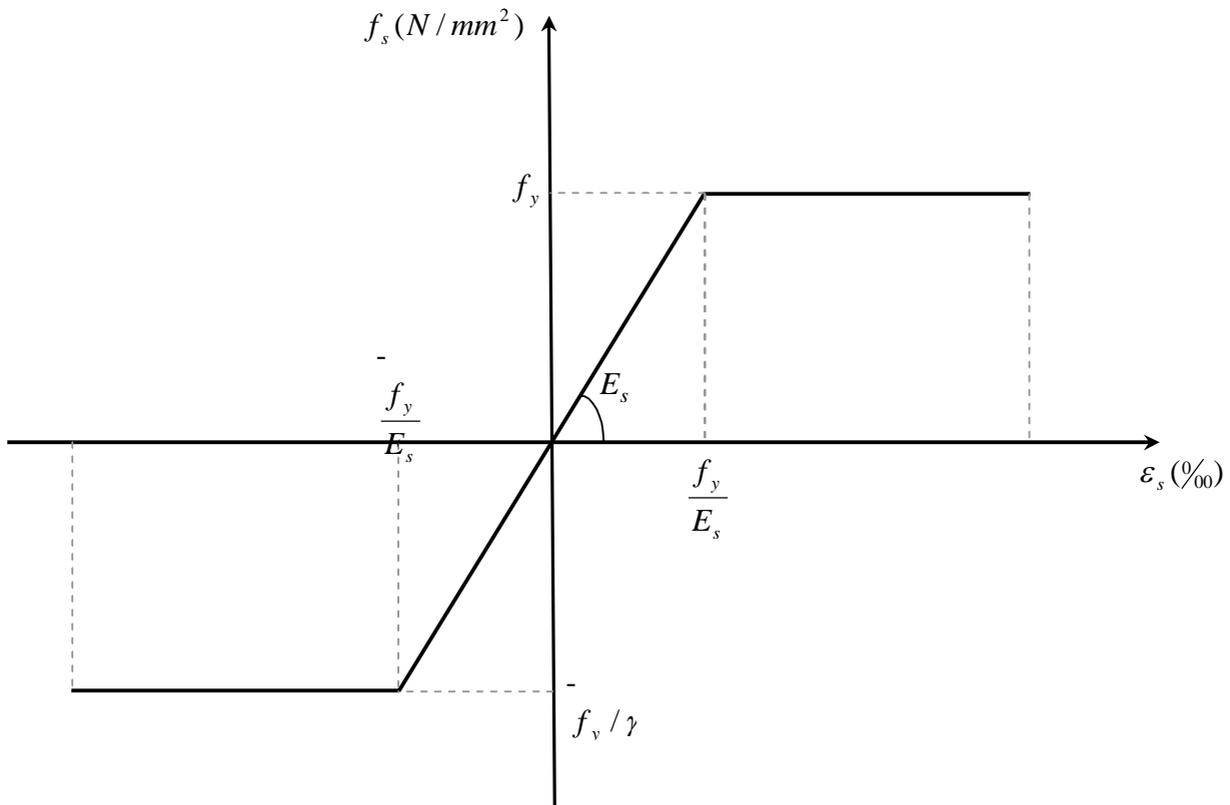
#### 5-3-2 Les armatures d'acier:

Le diagramme contraintes-déformation 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  $f_s = f_y$ ; au delà de ce point la contrainte est constante avec un accroissement des déformations [19].

A l'état limite ultime, la loi du comportement de calcul se déduit par affinité oblique (pénalisation), de rapport  $\gamma_s$ .

Où  $\gamma_s$  est le coefficient de sécurité, et prend une valeur égale à 1.15

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

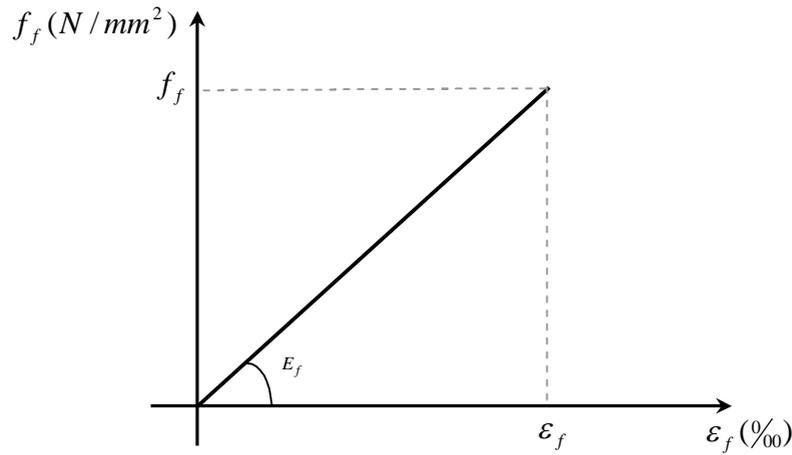


**Figure 5.2 :** loi de comportement de l'acier

### 5-3-3 Matériaux composites :

Les produits composites employés doivent présenter un allongement à rupture en traction supérieur ou égal à 8.5 ‰. Le choix est porté sur les polymères renforcés en fibres de carbone (PRFC), de type 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:

- $S_f$ : résistance garantie à la rupture en traction
- $E_f$ : module de Young pris égal à 55000 N/mm<sup>2</sup>.
- $\varepsilon_f$ : déformation relative du composite, prise égale à 11.5 ‰

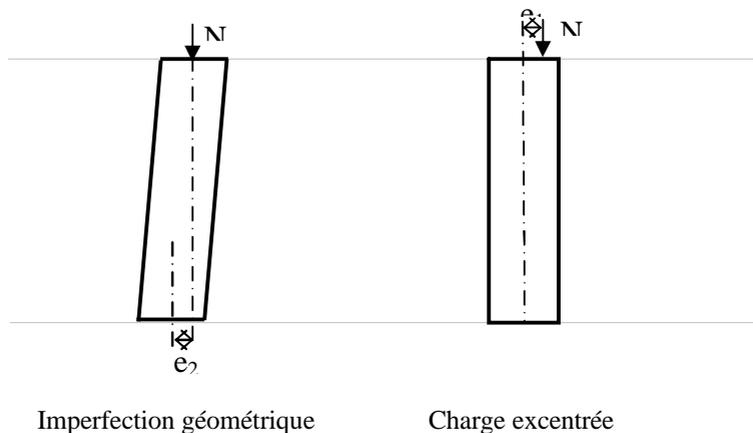
Ces paramètres sont issus d'un essai de traction tel que présenté dans le paragraphe 1.7 (détermination des propriétés mécaniques en traction des composite stratifié in situ) du document de "l'association française de génie civil (AFGC)" de décembre 2003, et juin 2007 [15] [16].

#### **5-4 L'effet des excentricités sur le comportement des poteaux soumis à une charge excentrée :**

##### **5-4-1 L'effet du premier ordre :**

Dans le cas d'une compression centrée d'un poteau, il y a toujours des imperfections sur la géométrie de la section, sur la position de la charge, sur la rectitude du poteau.

D'où l'effet dit "effet du premier ordre".



**Figure 5.4 :** différents modes d'excentricité

#### **5-4-2 L'effet du second ordre :**

L'effet du second ordre est l'effet induit d'un moment créé par la déformation du poteau, qui provient d'un flambement d'ensemble et devient plus important, plus la structure est élancée, c'est-à-dire déformable transversalement; pour juger cela, le calcul de l'élancement de l'élément est à priori indispensable, qui est le rapport de la longueur de flambement sur le rayon de giration de la section du béton [19]:

$$\lambda = \frac{\ell_0}{i} \quad (5-1)$$

Avec  $\ell_0$  : longueur du poteau (mm)

$i$  : Rayon de giration de la section géométrique (mm)

Cet élancement ( $\lambda$ ) réel doit être inférieur à un élancement limite ( $\lambda_{lim}$ ), à partir duquel l'effet du second ordre n'est pris en compte.

Selon l'EURODE2:

Si  $\lambda \leq \lambda_{lim}$  pas de prise en compte des effets de second ordre

Dans ce cas, une application d'un effort normal  $N_{ed}$  et un moment  $M_{ed}$  sur la section donne:

$$M_{ed} = M_{oed} = N_{ed} \cdot e_1$$

Donc l'excentricité totale du premier ordre est :  $e_1 = e_0 + e_i$

Les excentricités qui sont provoquées par effet du premier ordre sont dues :

- Aux imperfections géométriques :  $e_i = \frac{\ell_0}{400}$

Où  $\ell_0$  : longueur de flambement

- Aux chargements excentrés :  $e_0 = \max\left(\frac{h}{30}; 20mm\right)$

Où  $h$  : l'épaisseur du poteau dans le sens du flambement

## 5-5 Elaboration et conception des diagrammes d'interaction:

### 5-5-1 Introduction :

L'analyse des éléments en béton armé soumis à une combinaison de flexion et de charge axiale est basée sur les mêmes hypothèses que celles exposés dans la théorie générale:

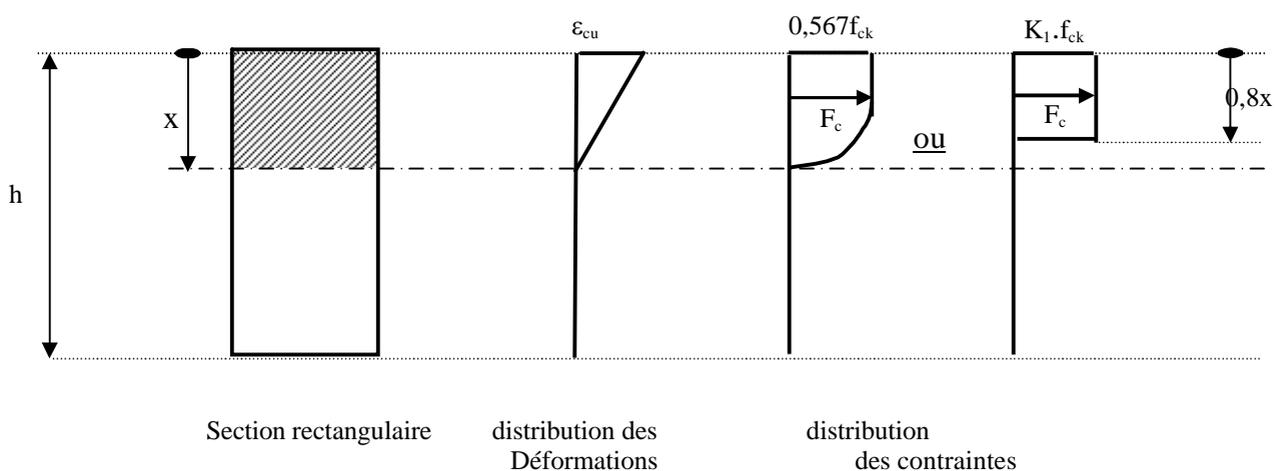
- les sections droites restent droites après déformation.
- pas de glissement relatif entre: armatures-béton et composites- béton (condition de compatibilité des déformations).
- La résistance à la traction du béton est négligée.
- La résistance à la compression du composite est négligée.
- Pour les aciers, le matériau composite et le béton, des diagrammes contraintes-déformations appropriés sont considérés.
- Un bloc des contraintes rectangulaire fictif est considéré pour le béton.

Dans le calcul des poteaux chargés excentriquement, les concepteurs exploitent de manière extensive des abaques appelés: " diagrammes d'interaction".

### 5-5-2 Conception des diagrammes d'interaction :

#### 5-5-2-1 Section en béton seul:

La section est soumise à un effort axial et un moment de flexion ultime, qui présente un état imminent de ruine où "x" représente la profondeur de l'axe neutre par rapport à la fibre la plus comprimée (*Fig. 5.5*) [14].



*Figure 5.5: Image instantanée à L'E.L.U. d'une section rectangulaire en béton seul*

Selon l'Eurocode 2 [19]

$K_1$ : le coefficient de remplissage pris égal à 0.567

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

L'effort axial :

$$N_{\text{béton}} = \left( \frac{0.85}{\gamma_s} \right) \cdot f_{ck} \cdot 0.8 \cdot x \cdot b$$
$$N_{\text{béton}} = 0.45 \cdot f_{ck} \cdot x \cdot b \quad (5-3)$$

Moment de flexion :

$$M_{\text{béton}} = N_{\text{béton}} \cdot \left( \frac{h}{2} - \frac{0.8x}{2} \right)$$
$$M_{\text{béton}} = 0.225 \cdot f_{ck} \cdot x \cdot b \cdot (h - 0.8x) \quad (5-4)$$

Ces équations peuvent être écrites de manière adimensionnelle pour une représentation universelle:

$$\alpha_{\text{béton}} = \frac{N_{\text{béton}}}{f_{ck} \cdot b \cdot h} = 0.45 \cdot \left( \frac{x}{h} \right) \quad (5-5)$$

$$\beta_{\text{béton}} = \frac{M_{\text{béton}}}{f_{ck} \cdot b \cdot h^2} = 0.225 \cdot \left( \frac{x}{h} \right) \cdot \left( 1 - \frac{0.8x}{h} \right) \quad (5-6)$$

Le tracé de la courbe est effectué point par point, en faisant varier la valeur de  $\left( \frac{x}{h} \right)$ , dans un intervalle de 0 à 1, permettant ainsi de déterminer les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  correspondantes.

- $\left( \frac{x}{h} \right) = 0$  correspondant à  $\alpha = 0$  et  $\beta = 0$ , présente une section entièrement tendue.
- $\left( \frac{x}{h} \right) = 1$  correspondant à  $\alpha = 45$  et  $\beta = 0$ , présente une section entièrement comprimée (compression simple).
- $0 < \left( \frac{x}{h} \right) < 1$  représente pour chaque point sur la courbe un état imminent de ruine.

Les points se trouvant à l'intérieur de la courbe d'interaction représentent des combinaisons de moment de flexion et d'effort axial sécuritaires.

Alors que les points qui se situent à l'extérieur de la courbe, représentent des combinaisons de moment de flexion et d'effort axial, non acceptables. (*Fig. 5.6*)

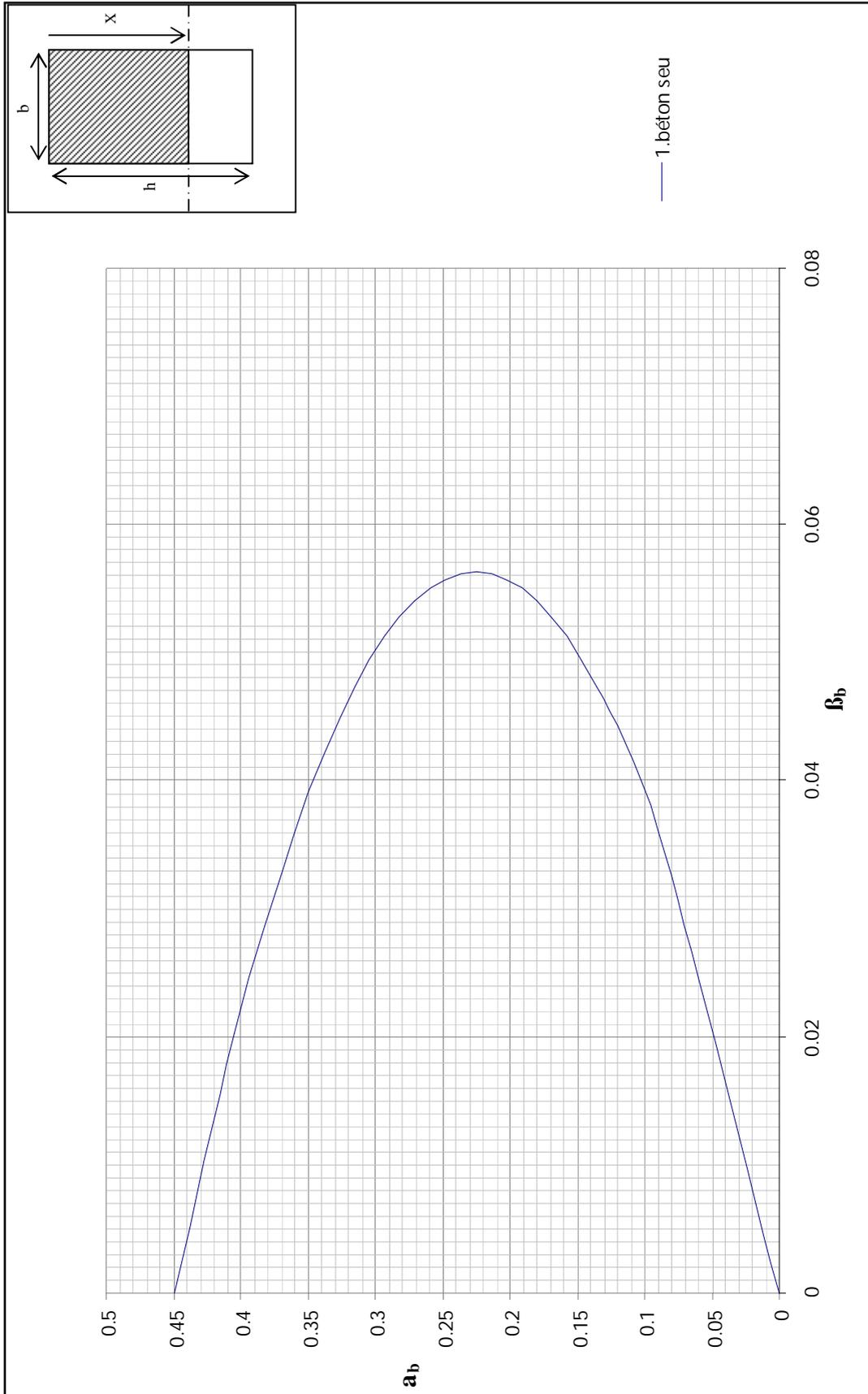
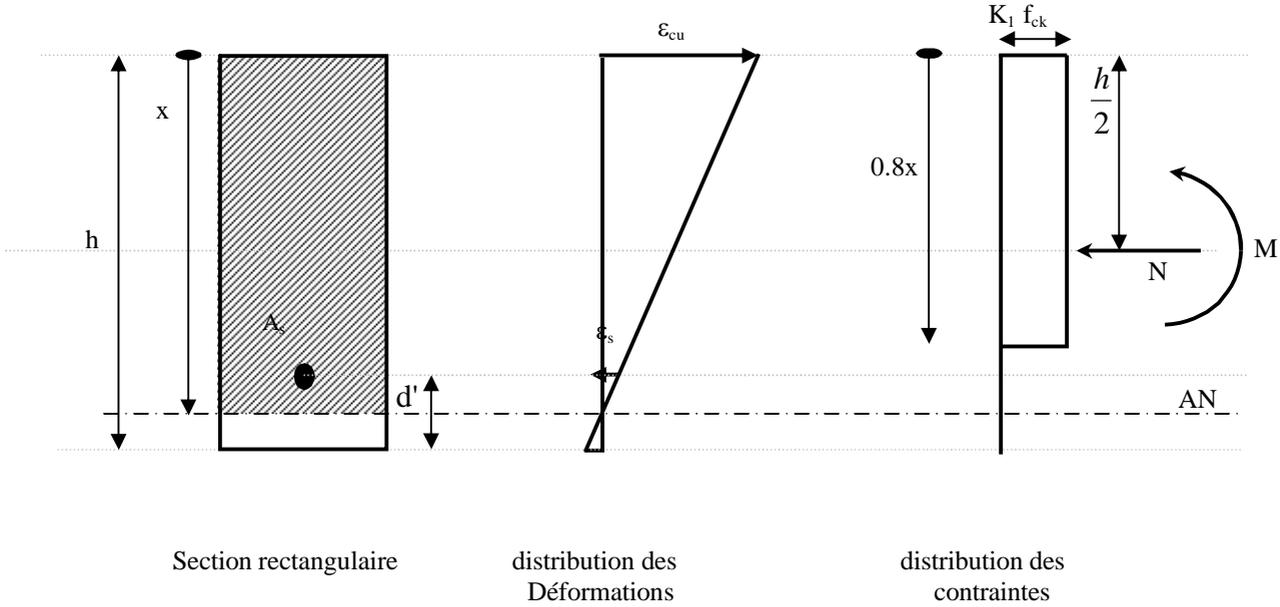


Figure 5.6: Construction du diagramme d'interaction (M-N) d'une section en béton seul

**5-5-2-2 Section en béton simplement armée:**

La section ( $A_s$ ) est la section d'armatures la plus éloignée de la fibre la plus comprimée du béton. (Fig. 5.7) [14].



*Figure 5.7: Image instantanée à L'E.L.U d'une section rectangulaire simplement armée*

La contribution de la section ( $A_s$ ) à la charge axiale est donnée par:

$$N_s = f_s \cdot A_s \quad (5-7)$$

Où  $f_s$  : est la contrainte correspondante à la déformation relative  $\epsilon_s$ .

Par convention, les contraintes  $f_s$  sont de signe positif si elles sont de compression, et de signe négatif si elles sont de traction.

Par conséquent, la contribution de ( $A_s$ ) au moment fléchissant par rapport au milieu de la hauteur de la section s'exprime comme suit.

$$M_s = -A_s \cdot f_s \cdot \left( \frac{h}{2} - d' \right) \quad (5-8)$$

Le signe négatif est utilisé parce que la force de compression de l'acier ( $A_s \cdot f_s$ ) produit un moment de sens contraire à celui produit par le bloc de contrainte par rapport au milieu de la section.

Les équations ci-dessus (4-7) et (4-8) sont rendues adimensionnelle et sont exprimées comme suit:

$$\alpha_s = \frac{N_s}{f_{ck} \cdot b \cdot h} = \frac{A_s}{b \cdot h} \cdot \frac{f_s}{f_{ck}} \quad (5-9)$$

$$\beta_s = -\frac{M_s}{f_{ck} \cdot b \cdot h^2} = -\alpha_s \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{d'}{h} \right) \quad (5-10)$$

Pour une section donnée d'un poteau, les quantités  $\frac{A_s}{b \cdot h}$ ,  $\frac{d'}{h}$ ,  $f_{ck}$  sont connues, donc  $\alpha_s$  et  $\beta_s$  sont complètement définis si  $f_s$  est définie.

Cette valeur de la contrainte  $f_s$  dépend seulement de la déformation  $\varepsilon_s$  :

$$\frac{\varepsilon_s}{3.5\text{‰}} = \frac{d' \cdot (h-x)}{x} = \frac{x/h - (1-d'/h)}{x/h} \quad (5-11)$$

De ce fait  $\varepsilon_s$  ainsi que  $\alpha_s$  et  $\beta_s$  sont des valeurs complètement définis en fonction de  $\left(\frac{x}{h}\right)$ .

Les valeurs de  $\alpha_s$  et  $\beta_s$  peuvent être représentées graphiquement pour différents valeurs de  $\left(\frac{x}{h}\right)$ .

Quand l'effet des armatures ( $A_s$ ) est superposé à celui du béton, on obtient une courbe représenté par un vecteur  $(\overline{\alpha_s + \beta_s})$ , prolongeant chaque valeur de  $\left(\frac{x}{h}\right)$  dont le module est :

$$\sqrt{(\alpha_s)^2 + (\beta_s)^2} .$$

Chaque point qui se situe sur cette courbe représente un état imminent de ruine. (Fig5.8)

- Pour une valeur de  $\frac{x}{h} = 1 - \frac{d'}{h}$ , les valeurs de la déformation  $\varepsilon_s$  ainsi que la valeur de la contrainte  $f_s$  soit nulle, ce qui implique que les valeurs de  $\alpha_s$  et  $\beta_s$  sont nulles.

Donc les armatures ( $A_s$ ) sont inactives au niveau ce point.

- Pour une valeur de  $\frac{x}{h} > 1 - \frac{d'}{h}$  les armatures sont en compression puisque la déformation  $\varepsilon_s$  et la contrainte  $f_s$  sont toutes les deux positives
- Pour une valeur de  $\frac{x}{h} < 1 - \frac{d'}{h}$  les armatures sont en traction puisque la déformation  $\varepsilon_s$  et la contrainte  $f_s$  sont toutes les deux négatives.

- Pour une certaine valeur critique de  $\left(\frac{x}{h}\right)$  correspondante à une valeur de la déformation du point limite d'écoulement des armatures tendues, (ex. pour une contrainte limite d'aciers  $f_y = 400N/mm^2$  ayant un point d'écoulement  $\varepsilon_s = \varepsilon_y = 2\text{‰}$ , ce point correspond à une valeur de  $\frac{x}{h} = 0.536$  qui définit un point d'inflexion de la courbe), Le vecteur  $\left(\overrightarrow{\alpha_s + \beta_s}\right)$  prend une valeur maximale, et demeure inchangé pour toute réduction de  $\left(\frac{x}{h}\right)$ . cela signifie que la contrainte  $f_s$  atteint une valeur limite constante égale à  $f_y$ , donc les armatures travaillent dans le plateau plastique.
- Pour une valeur de  $\left(\frac{x}{h}\right)$  correspondant à une valeur de  $\varepsilon_s$  inférieur à  $\varepsilon_y$ , le module du vecteur  $\left(\overrightarrow{\alpha_s + \beta_s}\right)$  diminue graduellement, jusqu'à ce qu'il s'annule au point où  $\left(\frac{x}{h}\right)$  est égale à  $1 - \frac{d'}{h}$ , et augmente de nouveau dans la direction opposée; Avec une inclinaison constante du vecteur.

Lorsque la charge axiale et le moment fléchissant agissant sur la section du béton, sont tels que  $\alpha$  et  $\beta$  coïncident avec le point où  $\varepsilon_s = \varepsilon_y$ ; on conclut que les armatures atteignent leur limites d'écoulement simultanément avec la fibre la plus comprimée du béton atteignant la déformation ultime  $\varepsilon_{cu}$ . Ce mode de rupture est appelé "RUPTURE EQUILIBREE".

Au dessus de ce point situé sur la courbe, les armatures n'atteignent pas leurs limites d'écoulement, quand la fibre la plus comprimée atteint sa limite  $\varepsilon_{cu}$ .

Par contre, au-dessous de ce même point de la courbe, les armatures atteignent leurs limites d'écoulement, avant que la fibre la plus comprimée n'atteigne  $\varepsilon_{cu}$ .

La condition d'équilibre "rupture équilibrée" à la ruine dépend du chargement. de moment fléchissant (M) et de l'effort normal (N), et non pas du taux armatures  $\rho_s$  comme dans le cas des poutres en flexion simple.

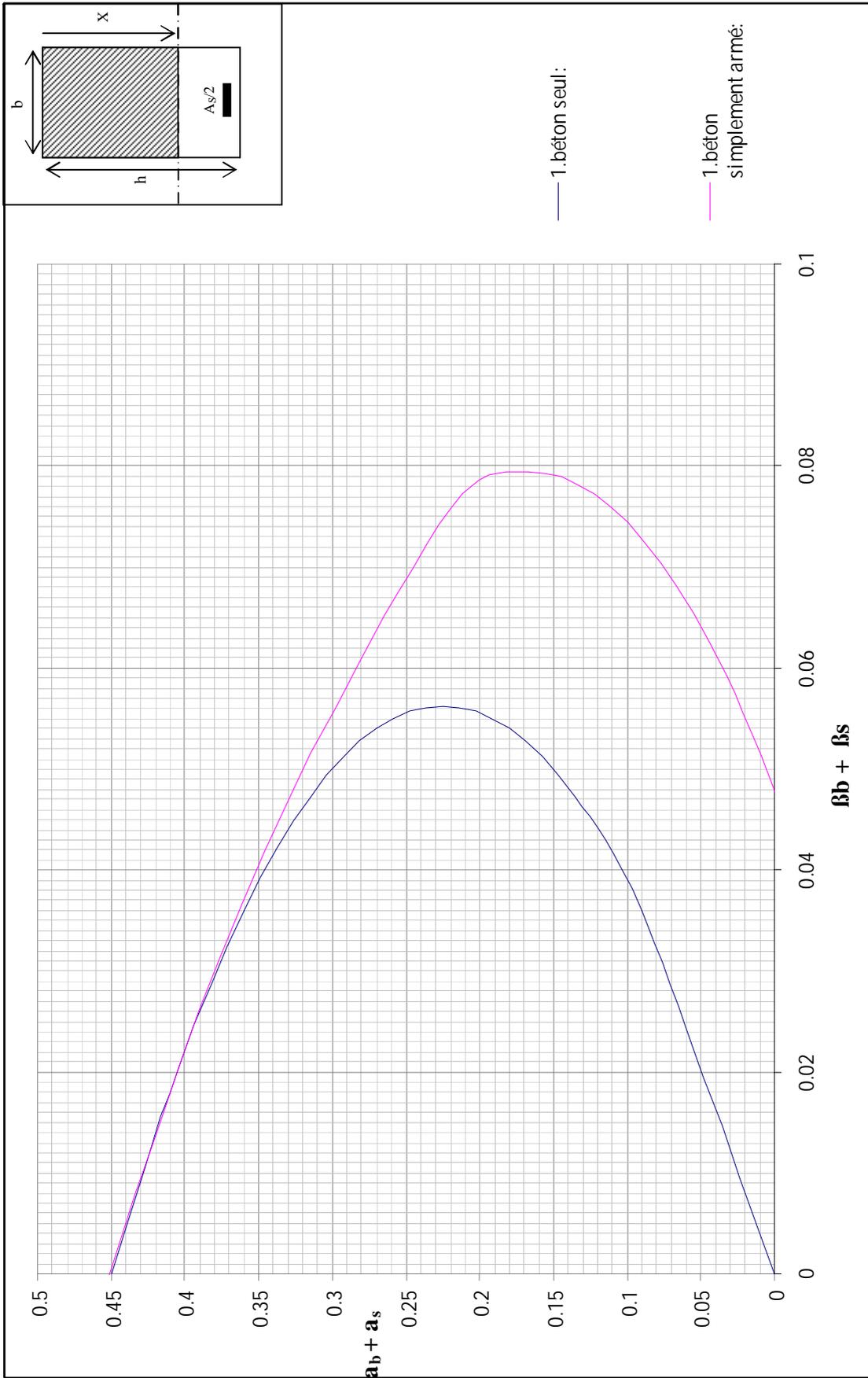


Figure 5.8: Construction du diagramme d'interaction (M-N) d'une section en béton simplement armée

**5-5-2-3 Section en béton doublement armée:**

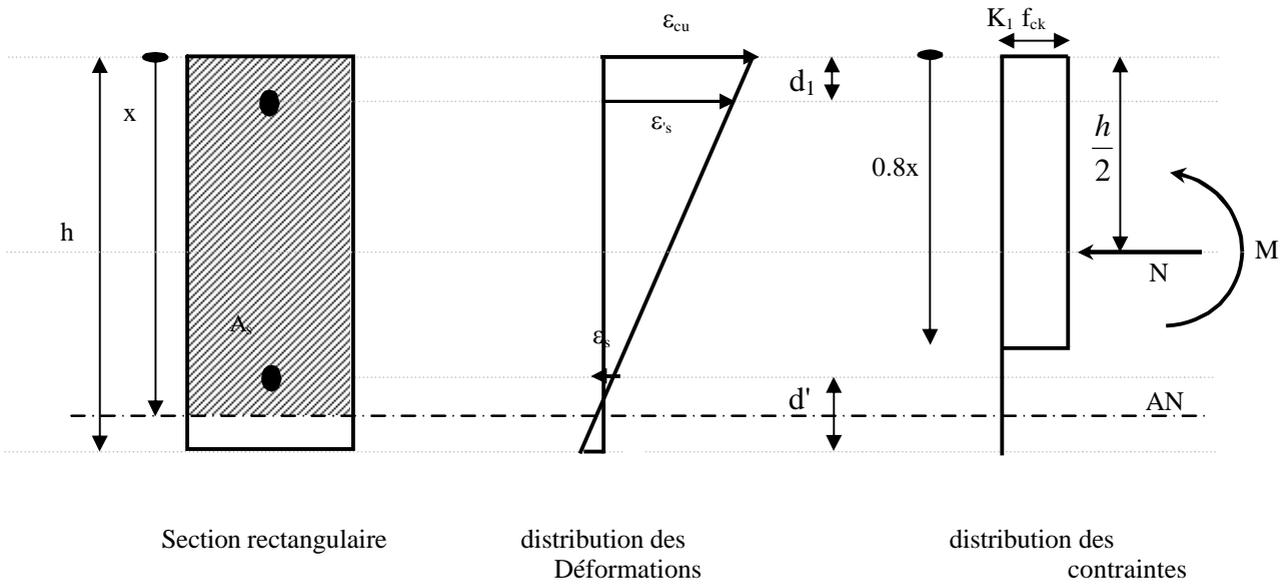
La section ( $A'_s$ ) est la section d'armatures la plus proche de la fibre la plus comprimée du béton [14].

La contribution de la section ( $A'_s$ ) à la charge axiale est donnée par:

$$N'_s = f'_s \cdot A'_s \quad (5-12)$$

Où  $f'_s$ : est la contrainte correspondant à la déformation relative  $\epsilon'_s$ .

(Fig. 4.9)



**Figure 5.9:** Image instantanée à L'E.L.U. d'une section rectangulaire doublement armée

La contribution de la section ( $A'_s$ ) au moment fléchissant est donnée par:

$$M'_s = A'_s \cdot f'_s \cdot \left( \frac{h}{2} - d_1 \right) \quad (5-13)$$

Les équations ci-dessus (4-12) et (4-13) sont rendues adimensionnelle comme suit:

$$\alpha'_s = \frac{N'_s}{f_{ck} \cdot b \cdot h} = \frac{A'_s}{b \cdot h} \cdot \frac{f'_s}{f_{ck}} \quad (5-14)$$

$$\beta'_s = \frac{M'_s}{f_{ck} \cdot b \cdot h^2} = \alpha'_s \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{d_1}{h} \right) \quad (5-15)$$

La valeur de la contrainte ( $f'_s$ ) dépend seulement de la déformation  $\varepsilon'_s$ :

$$\frac{\varepsilon'_s}{3.5\text{‰}} = \frac{(x - d_1)}{x} = \frac{x/h - d_1/h}{x/h} \quad (5-16)$$

L'effet de la section ( $A'_s$ ) est représenté sur la courbe par le vecteur  $\left(\overrightarrow{\alpha'_s + \beta'_s}\right)$ , qui est incliné d'un angle dont la tangente est égale à  $\left(\frac{1}{2} - \frac{d_1}{h}\right)$ , d'où l'inclinaison est constante

(Fig. 5.10)

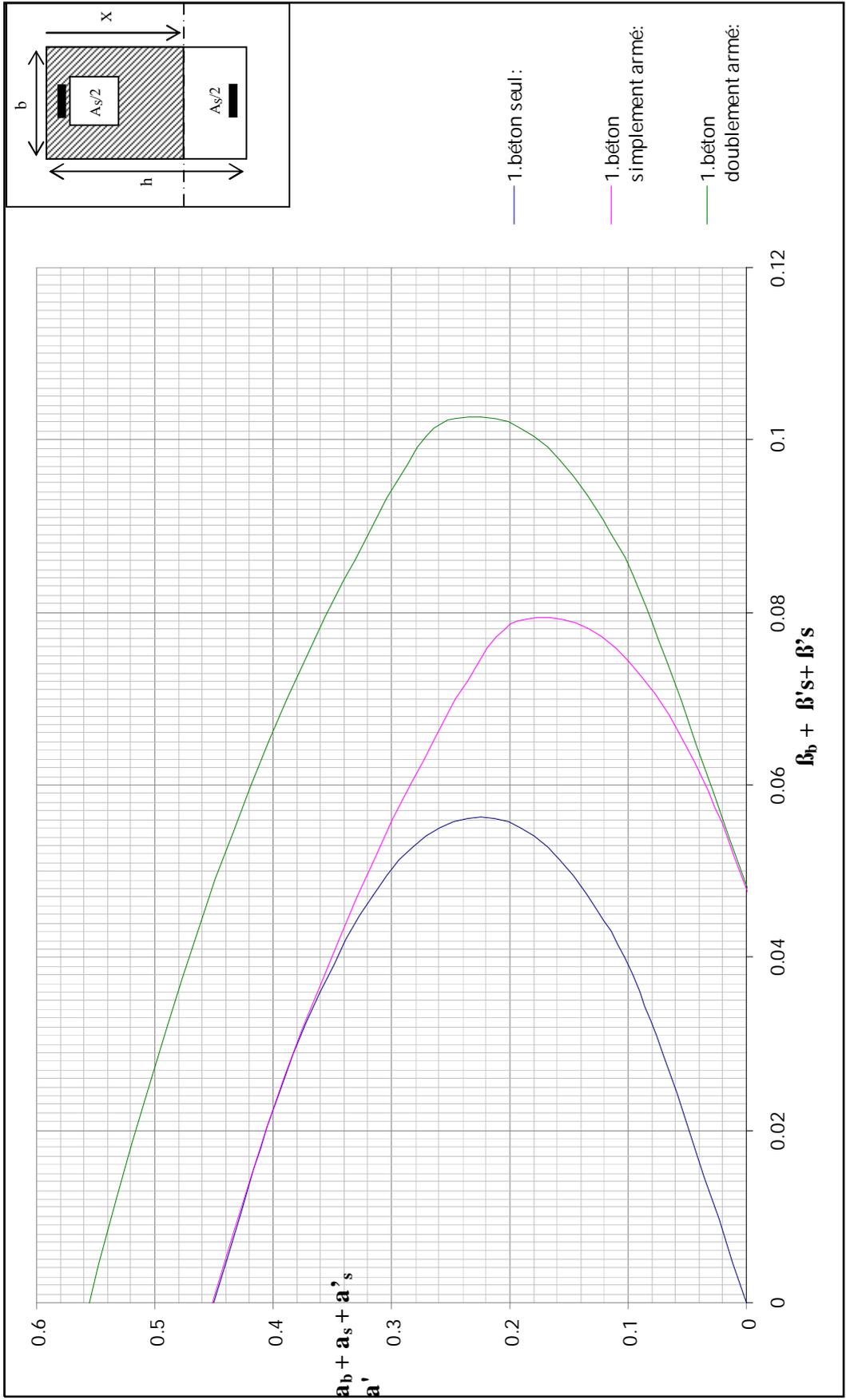


Figure 5.10: *Construction du diagramme d'interaction (M-N) d'une section en béton doublement armé*

**5-5-2-4 Section en béton doublement armée et renforcé en PRFC:**

L'effet de la section de renforcement ( $A_f$ ) en PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone), greffé dans la partie tendue de la section en béton armé, (Fig. 5.11), le rajout de la section ( $A_f$ ), représente une contribution à la charge axiale et du moment de flexion comme suit :

$$N_f = f_f \cdot A_f \tag{5-17}$$

$$M_f = A_f \cdot f_f \cdot \left( \frac{h}{2} + \frac{t}{2} \right) \tag{5-18}$$

t: l'épaisseur du renfort

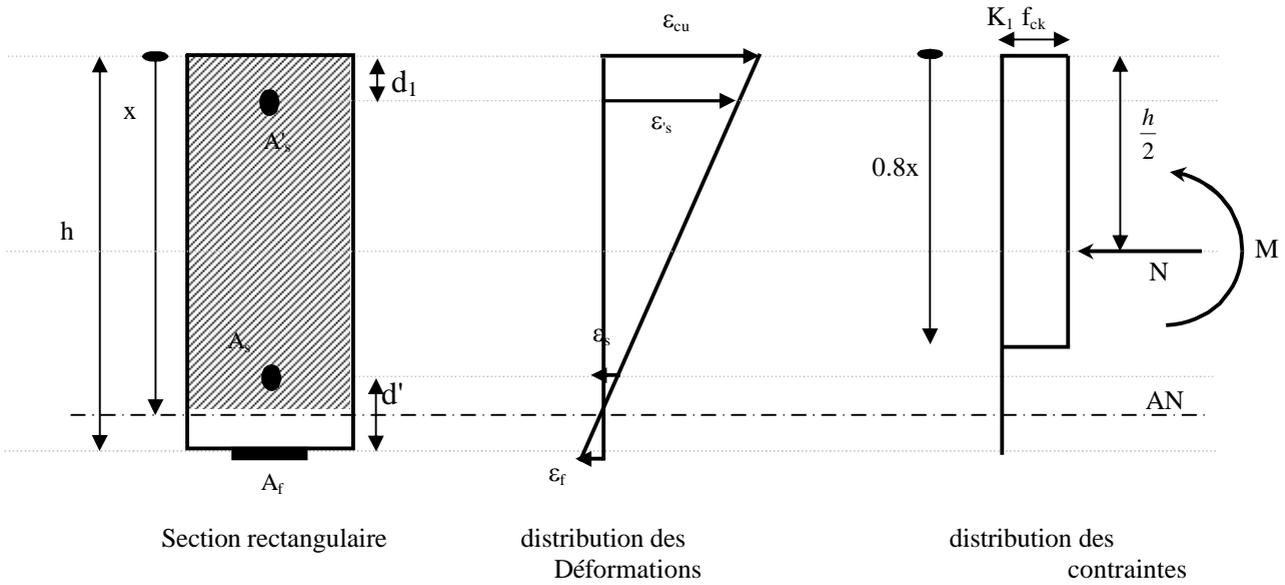


Figure 5.11: Image instantanée à L'E.L.U. d'une section rectangulaire doublement armée et renforcé en (PRFC)

Les équations (4-17) ,(4-18) sont rendues adimensionnelle comme suit:

$$\alpha_f = \frac{N_f}{f_{ck} \cdot b \cdot h} = \frac{A_f}{b \cdot h} \cdot \frac{f_f}{f_{ck}} \tag{5-19}$$

$$\beta_f = \frac{M_f}{f_{ck} \cdot b \cdot h^2} = \alpha_f \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{t}{2h} \right) \tag{5-20}$$

L'effet de la section ( $A_f$ ) est représenté sur la courbe par le vecteur  $(\overrightarrow{\alpha_f + \beta_f})$

La valeur de la contrainte ( $f_f$ ) due au renforcement, dépend seulement de la déformation ( $\epsilon_f$ ):

$$\frac{\epsilon_f}{3.5 \cdot 10^{-3}} = \frac{(h + t/2 - x)}{x} = \frac{1 + t/2h - x/h}{x/h} \tag{5-21}$$

L'épaisseur du tissu en PRFC est considérée minime vis-à-vis de la hauteur de la section du béton, donc le rapport  $\frac{t}{2h}$  tend vers une valeur négligeable.

Le tracé obtenu par l'effet additionnel du renfort, a enveloppé la courbe relative à la section doublement armée, ce qui engendre une marge sécuritaire significative vis-à-vis des sollicitations (M-N). (Fig. 5.12)

Donc cette courbe enveloppe est la courbe d'interaction pour une section doublement armée, renforcée au moyen de matériaux composites et chaque point de cette courbe est représenté comme suit :

$$\alpha = \alpha_b + \alpha_s + \alpha'_s + \alpha_f \quad (5-22)$$

$$\beta = \beta_b + \beta_s + \beta'_s + \beta_f \quad (5-23)$$

Les équations d'équilibre de la section doublement armée et renforcée en PRFC, soumis à la flexion composée sont données par:

L'effort axial :

$$N = 0.45 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot x + A_s \cdot f_s + A'_s \cdot f'_s + A_f \cdot f_f \quad (5-24)$$

Le moment de flexion :

$$M = 0.225 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot x \cdot (h - 0.8x) + A'_s \cdot f'_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right) + A_s \cdot f_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d'\right) + A_f \cdot f_f \cdot \left(\frac{h+t}{2}\right) \quad (5-25)$$

**Observation:**

Dans la partie inférieure par rapport au point inflexion de la courbe, où la valeur de  $\left(\frac{x}{h}\right)$  correspond au point d'écoulement des armatures ( $A_s$ ), la contribution du renfort est de plus en plus significative.

Au-delà de ce point, la valeur de la contribution du renfort diminue graduellement jusqu'à ce qu'elle s'annule au point où  $\left(\frac{x}{h}\right) = 1$  (avec la valeur de  $\frac{t}{2h}$  tendant vers zéro).

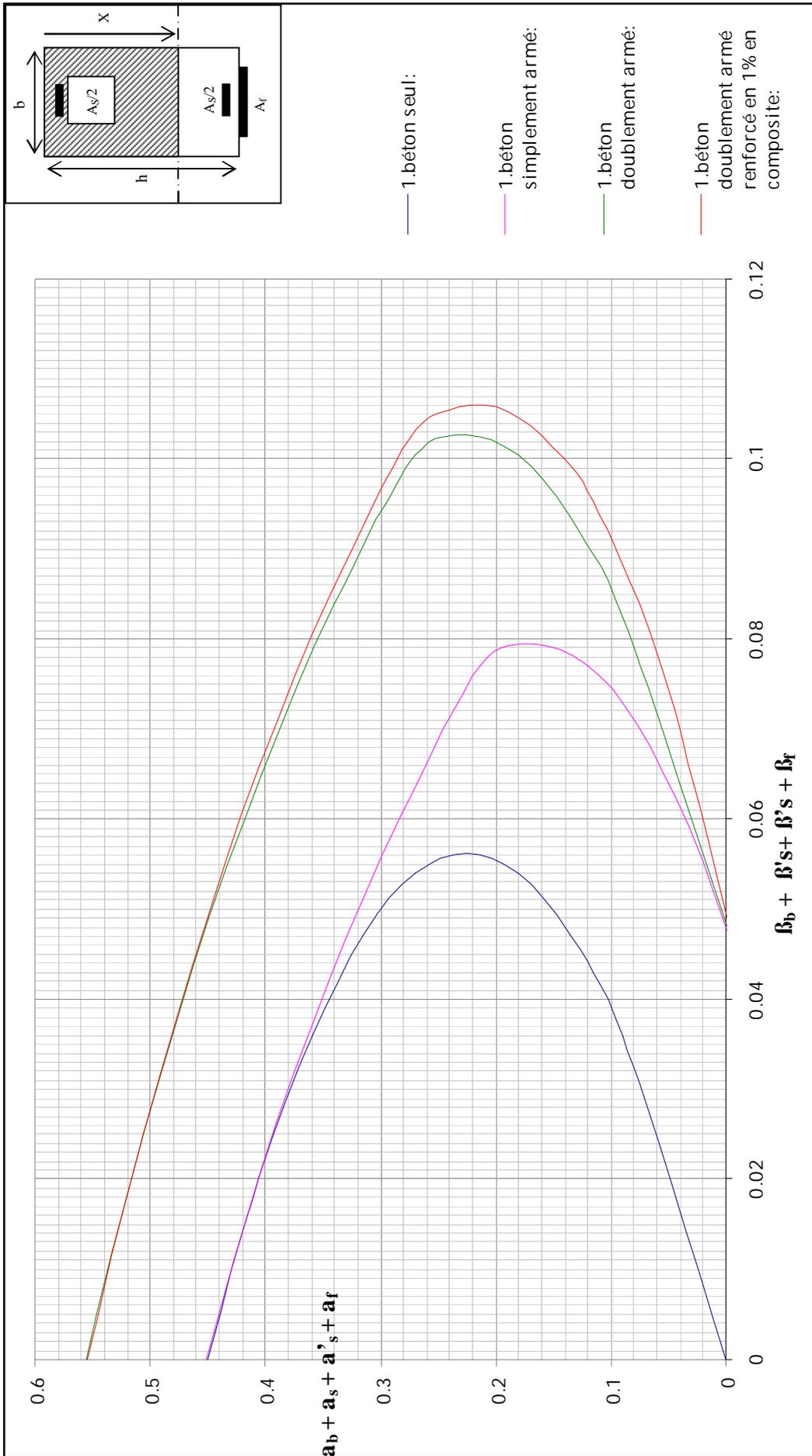


Figure 5.12: Construction du diagramme d'interaction (M-N) d'une section en béton doublement armée renforcée en PRFC

## **5-6 Les différents paramètres influents sur une section en béton armée renforcée en PRFC:**

### **5-6-1 Influence de la résistance caractéristique du béton " $f_{ck}$ ":**

Le gain obtenu en terme de valeur de l'effort axial (*Fig. 5.13*), pour les courbes entre les résistances caractéristiques  $f_{ck}=20$  N/mm<sup>2</sup> et  $f_{ck}=30$  N/mm<sup>2</sup> est de l'ordre de 36%, par contre le gain obtenu entre  $f_{ck}=20$  N/mm<sup>2</sup> et  $f_{ck}=40$  N/mm<sup>2</sup> est de l'ordre de 73%.

Le gain obtenu en terme de valeur du moment de la flexion, pour les courbes avec une résistance caractéristique  $f_{ck}=20$  N/mm<sup>2</sup> et  $f_{ck}=30$  N/mm<sup>2</sup> est de l'ordre de 20 %, par contre le gain obtenu entre  $f_{ck}=20$  N/mm<sup>2</sup> et  $f_{ck}=40$  N/mm<sup>2</sup> est de l'ordre de 41 %.

Sur le point correspondant au point d'écoulement limite des armatures ( $A_s$ ) de la section renforcée, où la valeur du moment de flexion atteint une valeur maximale, ce point devient un point d'inflexion, puisque le tracé de la courbe change de direction, c'est une limite supérieure vis-à-vis du moment de flexion sur la courbe de la section renforcée.

Le gain obtenu en terme de moment de flexion de la section renforcée, dont la résistance caractéristique du béton  $f_{ck}=20$  N/mm<sup>2</sup>, au point d'inflexion de la courbe est approximativement de l'ordre de 6 % par rapport au moment de flexion de la section non renforcée.

Au dessus de ce point, l'influence du renfort vis-à-vis du moment de flexion est moins considérable que pour la première phase.

Donc l'influence de la contribution du renfort sur le comportement d'une section en béton renforcée par rapport à celle non renforcé, obtenus pour les différentes résistances caractéristiques,  $f_{ck}=30$  N/mm<sup>2</sup> et  $f_{ck}=40$  N/mm<sup>2</sup>, est similaire en terme de gain de moment de flexion, à celle obtenue pour une résistance caractéristique  $f_{ck}=20$  N/mm<sup>2</sup>.

L'effort axial atteint une valeur remarquable, quand le rapport  $\left(\frac{x}{h}\right)$  se rapproche d'une valeur égal à "1", cela signifie que la valeur de l'axe neutre "x" est optimale, et que la section entière devient comprimée.

L'influence de l'augmentation de la résistance caractéristique ( $f_{ck}$ ) sur le comportement d'une section renforcée en PRFC, est plus significative en terme d'effort axial. Cet effet est d'un apport positif relativement au moment de flexion.

La marge de l'enveloppe sécuritaire, produite par la contribution du renfort en PRFC de la section doublement armée, obtenue par l'interaction d'une combinaison du moment de flexion et de l'effort axial (M-N), est progressive et significative vis-à-vis de l'accroissement de la résistance caractéristique ( $f_{ck}$ ).

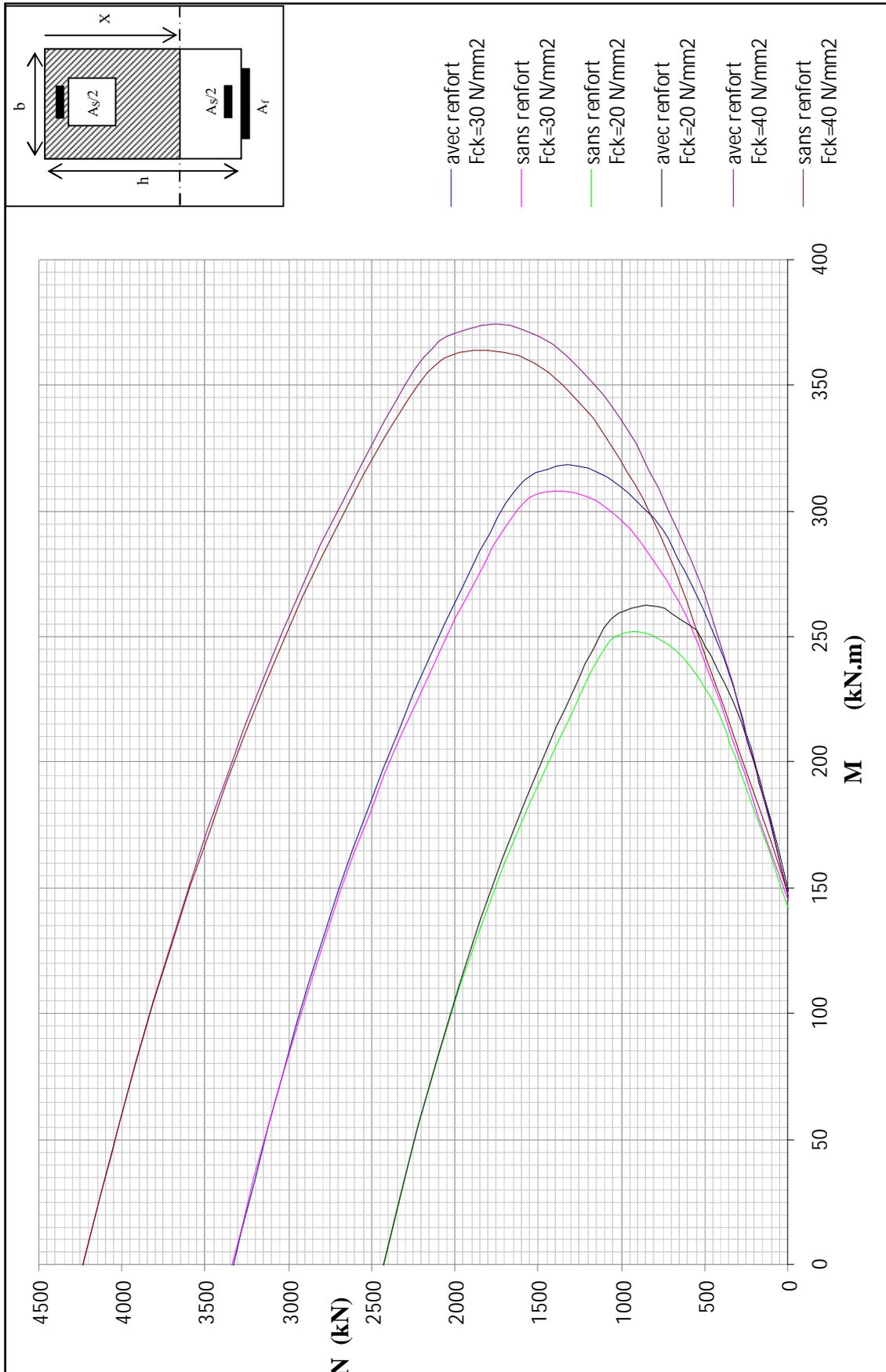
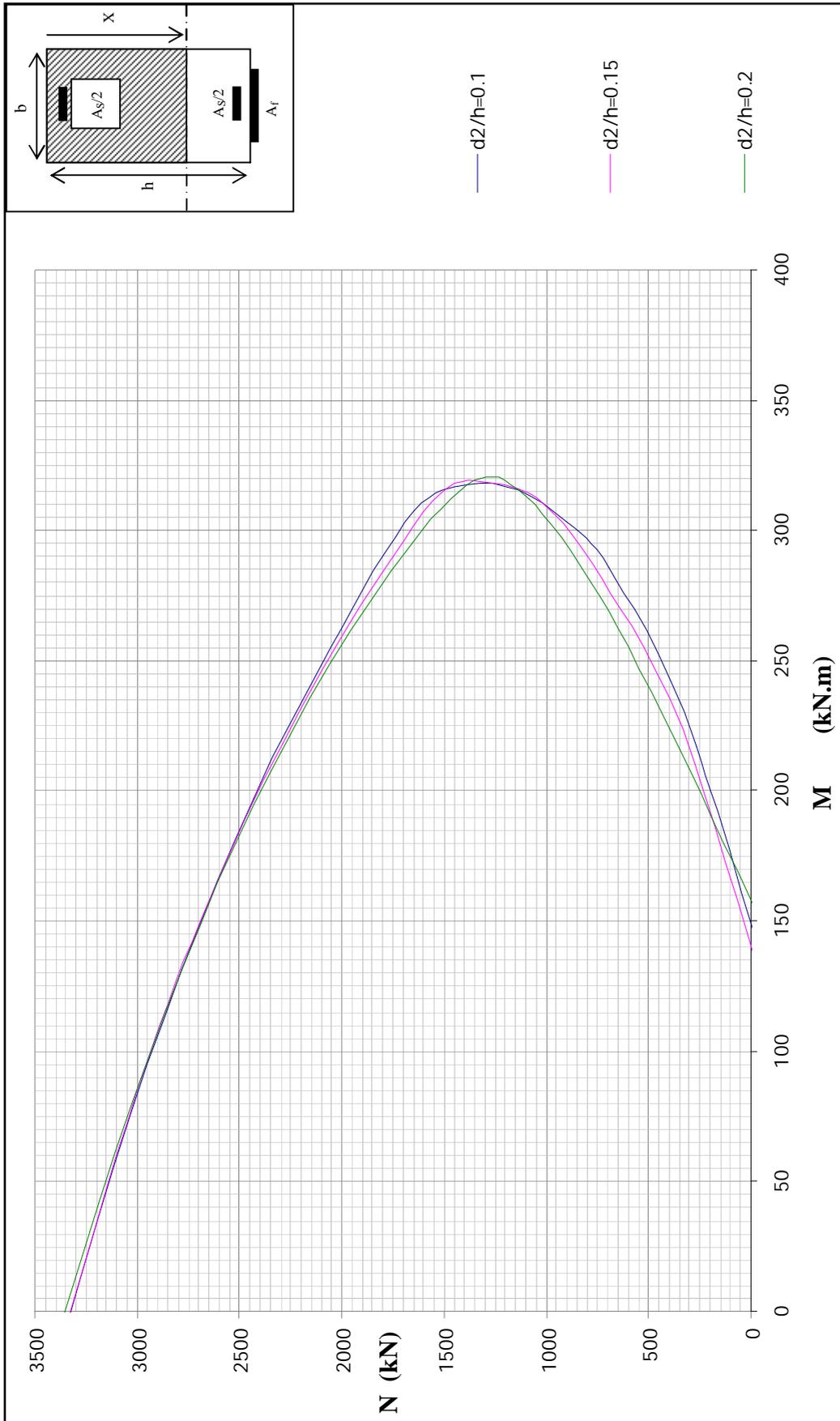


Figure 5.13: Influence de la résistance caractéristique sur le comportement d'une section en béton armé doublement armée renforcée en FRP

### **5-6-2 Influence de l'enrobage (d'):**

Il a été observé que les courbes tracées des sections en béton armé, renforcées au moyen de matériaux composites (PRFC), respectivement avec des différentes valeurs de l'enrobage prenant les valeurs 0.1, 0.15 et 0.2, sont quasiment superposées. Donc l'enrobage n'influe peu sur le comportement vis-à-vis du moment de flexion et de l'effort axial sur ces sections soumises une charge excentrée. (*Fig.5.14*)

La marge de l'enveloppe sécuritaire, produite par la contribution du renfort en PRFC de la section doublement armée, obtenue par l'interaction d'une combinaison du moment de flexion et de l'effort axial: (M-N), est presque négligeable vis-à-vis de l'augmentation de la valeur de l'enrobage (d').



**Figure 5.14:** Influence de l'enrobage ( $d'$ ) sur le comportement d'une section en béton armé doublement armée renforcée en PRFC

### **5-6-3 Influence du taux d'armatures ( $\rho_s$ ):**

Le gain obtenu en terme de valeur du moment, pour les courbes avec un taux d'armatures, de  $\rho_s = 1\%$  à  $\rho_s = 2\%$  est de l'ordre de 103%, par contre le gain obtenu pour un taux de  $\rho_s = 1\%$  à  $\rho_s = 3\%$  est de l'ordre de 193%.

Le gain obtenu en terme de valeur de l'effort axial, pour les courbes avec un taux d'armatures de  $\rho_s = 1\%$  à  $\rho_s = 2\%$  est de l'ordre de 17%, par contre le gain obtenu pour un taux de  $\rho_s = 1\%$  à  $\rho_s = 3\%$  est de l'ordre de 37%. (Fig.5.15)

L'influence de l'augmentation du taux d'armatures ( $\rho_s$ ) sur le comportement d'une section renforcée en PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone), est plus significative en terme de moment de flexion, et prend une valeur maximale au point d'inflexion correspondant au point d'écoulement ( $\varepsilon_s$  atteint  $\varepsilon_y$ ).

Sur ces points d'inflexion des courbes, correspondantes aux sections renforcées, le gain en terme de moment de flexion, a une valeur optimale.

Au-dessous de ce point d'inflexion, l'influence de l'augmentation du taux d'armatures ( $\rho_s$ ) sur le comportement d'une section renforcée en PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone), est d'un apport plus considérable vis-à-vis du moment de flexion, comparativement à l'effort axial.

La marge de l'enveloppe sécuritaire, produite par la contribution du renfort en PRFC de la section doublement armée, obtenue par l'interaction d'une combinaison du moment de flexion et de l'effort axial: (M-N), est progressive et significative vis-à-vis de l'accroissement du taux d'armatures ( $\rho_s$ ).

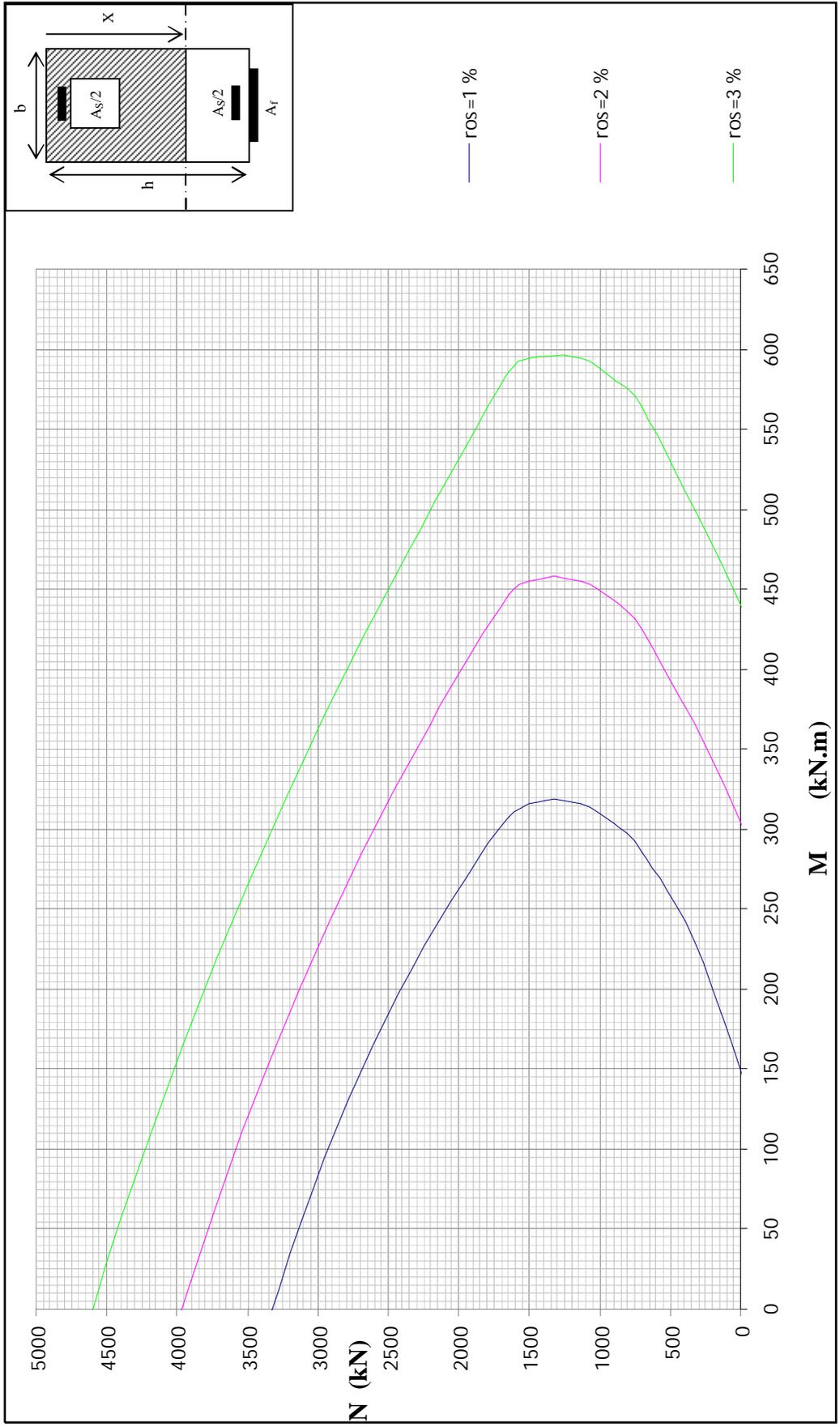


Figure 5.15: Influence du taux de armatures ( $\rho_s$ ) sur le comportement d'une section en béton armé doublement armée renforcée en PRFC

#### **5-6-4 Influence la contrainte limite des armatures " $f_y$ ":**

Le gain obtenu en terme de valeur du moment de flexion, pour les courbes avec un taux d'armatures variant de  $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$  à  $f_y = 400 \text{ N/mm}^2$  est de l'ordre de 12%, par contre le gain obtenu pour  $f_y$  variant de  $300 \text{ N/mm}^2$  à  $500 \text{ N/mm}^2$  est de l'ordre de 24%.

Le gain obtenu en terme de valeur de l'effort axial, pour les courbes avec un taux d'armatures de  $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$  à  $f_y = 400 \text{ N/mm}^2$  est de l'ordre de 5 %, par contre le gain obtenu pour  $f_y$  passant de  $300 \text{ N/mm}^2$  à  $500 \text{ N/mm}^2$  est de l'ordre de 9 %.( *Fig.5.16*)

L'influence de l'augmentation de la contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_y$ ), sur le comportement d'une section renforcée en PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone), est significative en terme du moment de flexion; et prend une valeur maximale au point d'inflexion.

La contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_y$ ) agit directement sur la position du point d'inflexion.

Sur les points d'inflexion des courbes, correspondants aux points d'écoulement des armatures, des sections renforcées en PRFC , le gain obtenu, en terme de moment de flexion, a une valeur optimale.

Au-dessous de ce point d'inflexion, l'influence de l'augmentation de la valeur de la contrainte limite ( $f_y$ ), sur le comportement d'une section renforcée en PRFC, est d'un apport plus considérable vis-à-vis du moment de flexion, comparativement à l'effort axial qui augmente graduellement.

La marge de l'enveloppe sécuritaire, produite par la contribution du renfort en PRFC de la section doublement armée, obtenue par l'interaction d'une combinaison du moment de flexion et de l'effort axial: (M-N), est progressive et significative vis-à-vis de l'accroissement de la contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_y$ ).

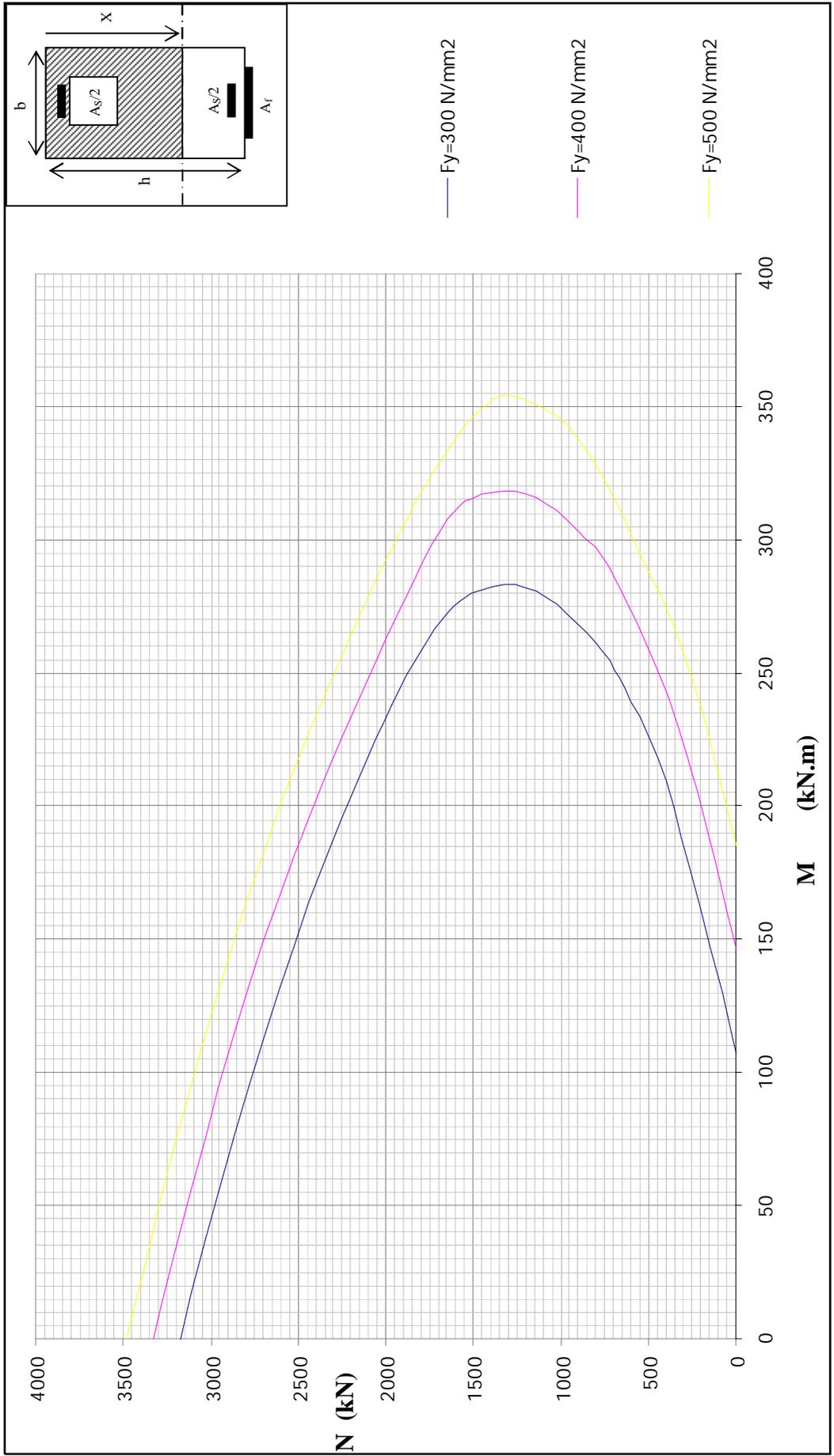


Figure 5.16: Influence de la contrainte limite d'écoulement des armatures ( $f_y$ ) sur le comportement d'une section en béton doublement armée renforcée en PRFC

#### **5-6-5 Influence du taux du renforcement " $\rho_f$ ":**

Le gain obtenu en terme de valeur du moment, pour les courbes avec un taux de renforcement,  $\rho_f = 0.1 \%$  et  $\rho_f = 0.2 \%$  est de l'ordre de 3%, par contre le gain obtenu entre  $\rho_f = 0.1 \%$  et  $\rho_f = 0.3 \%$  est de l'ordre de 6%.(Fig 5.17)

Le gain obtenu en terme de valeur de l'effort axial peut être considéré négligeable.

L'influence de l'augmentation du taux de renfort ( $\rho_f$ ), sur le comportement d'une section renforcée en PRFC, est significative en terme du moment de flexion.

le gain obtenu en terme de moment de flexion prend une valeur optimale, aux points d'inflexion des courbes.

Au-dessous de ces points d'inflexion, l'influence du taux de renfort ( $\rho_f$ ), sur le comportement d'une section renforcée en PRFC, est d'un apport considérable vis-à-vis du moment de flexion, comparativement à l'effort axial qui augmente graduellement.

La marge de l'enveloppe sécuritaire, produite par la contribution du renfort en PRFC de la section doublement armée, obtenue par l'interaction d'une combinaison du moment de flexion et de l'effort axial: (M-N), est progressive et significative vis-à-vis de l'accroissement du taux de renfort ( $\rho_f$ ).

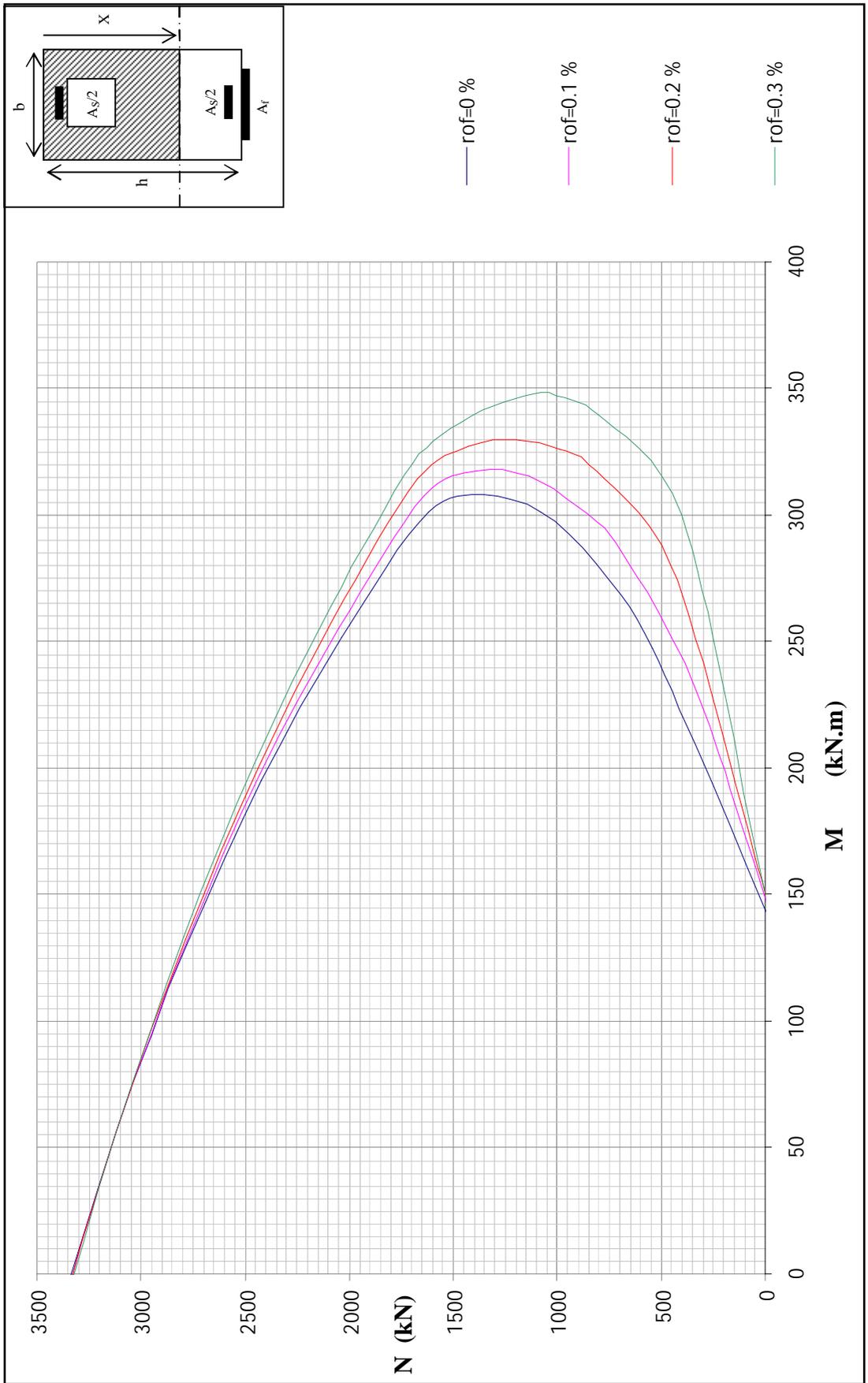


Figure 5.17: Influence du taux de renforcement ( $\rho_f$ ) sur le comportement d'une section en béton armé doublement armée renforcée en PRFC

## 6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES :

### 6-1 Conclusions :

Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit:

- Le renforcement de structures ou éléments structurels en béton armé au moyen de matériaux composites peut apporter des gains substantiels.

-L'effet du renfort longitudinal est d'un apport significatif sur le tronçon inférieur de la courbe d'interaction (M-N) par rapport au point d'inflexion, lorsque la valeur du moment tend vers sa valeur optimale. Par contre l'effet est négligeable et devient inutile sur le tronçon supérieur, au dessus de ce point d'inflexion

- Le matériau composite peut compenser la perte de rigidité et faire augmenter la capacité portante de l'élément structurel..

- La construction de diagrammes d'interaction intégrant l'effet du composite facilite deux opérations essentielles à savoir celle de la vérification (voir si la combinaison M, N est sécuritaire ou non) et celle du taux de renforcement optimal.

- La marge sécuritaire augmente progressivement, suivant les paramètres: la résistance caractéristique ( $f_{ck}$ ), le taux d'armatures ( $\rho_s$ ), la contrainte limite d'écoulement des aciers ( $f_y$ ), ainsi que le nombre de plis de PRFC.

Ainsi ces paramètres contribuent positivement et améliorent nettement la capacité portante.

## 6-2 Perspectives:

- Mener une étude expérimentale de poteaux chargés excentriquement, et renforcés au moyen de PRFC, avec une variation des différents paramètres influents:
  - La résistance caractéristique du béton
  - La contrainte limite d'écoulement des aciers
  - Le taux d'armatures des aciers
  - le taux de renforts
  
- Etudier le comportement de poteaux confinés au moyen de bandes en PRFC, vis-à-vis de la charge axiale.
  
- Utiliser la méthode des éléments finis pour une analyse plus précise de sections de poteaux renforcés au moyen de PRFC.

*Annexe: A*

# ***CONFINEMENT DES POTEAUX***

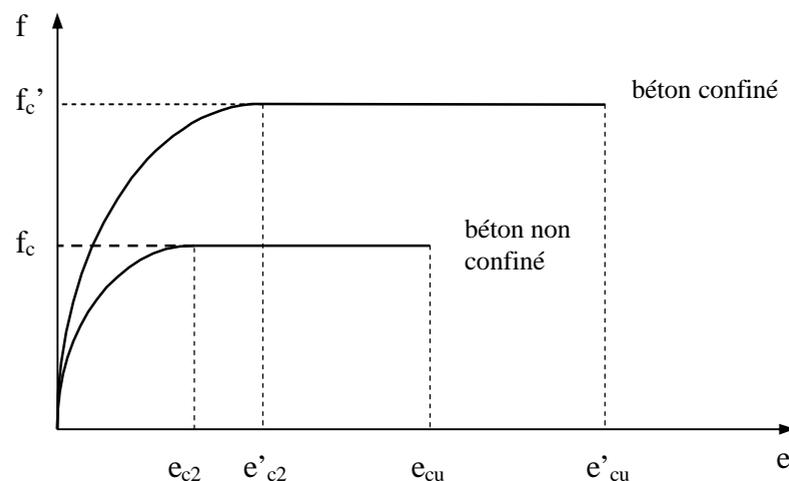
## Annexe A : CONFINEMENT DES POTEAUX

### A.1 Définition et principe de confinement :

L'application circonférentielle de bandes de renforts en PRFC, sous forme d'hélices ou sous forme de cerces fermées judicieusement espacées permet, en limitant les déformations transverses du béton, d'augmenter de manière conséquente le capacité en compression des poteaux.

L'objectif d'un tel confinement du béton par des bandes en matériaux composites est d'améliorer ses propriétés mécaniques, entre autres son principal effet est d'augmenter la capacité portante d'un poteau sain ou endommagé vis-à-vis de la compression simple.

Des prescriptions et avis techniques (Freyssinet 2002; K.Vérok 2005; AFGC 2007) suggèrent une loi de comportement (contrainte-déformation) d'un modèle de béton ordinaire et d'un béton confiné.



**Figure 1** : Loi de comportement d'un béton ordinaire et d'un béton confiné.

Avec:

$$f'_c = f_c + 4 p$$

$$e'_{cu} = e_{cu} [1 + 20 p / f_c]$$

$$e'_{c2} = e_{c2} [f'_c / f_c]^2$$

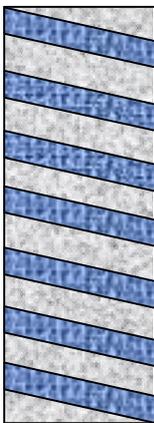
Où:

p: la pression de confinement du PRFC.

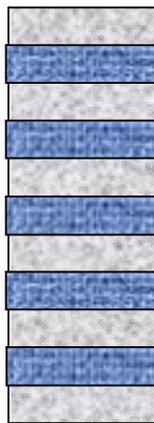
- a: le petit côté de la section rectangulaire du poteau.  
 b: le grand côté de la section rectangulaire du poteau.  
 rc: le rayon du chanfrein d'un poteau de section rectangulaire, inférieur ou égal à 35mm.  
 p: la pression imposée par le confinement en PRFC  
 $f_c$ : la résistance à la rupture du béton non confiné  
 $f'_c$ : la résistance à la rupture du béton confiné  
 $e_{cu}$ : le raccourcissement à la rupture du béton non confiné  
 $e'_{cu}$ : le raccourcissement à la rupture du béton confiné

Deux types de configurations de confinement peuvent être envisagés :

- Un confinement discontinu, réalisé avec des bandes espacées sur toute la hauteur du poteau, et peuvent éventuellement être inclinées.
- Un confinement continu, avec des bandes non espacées réalisées sur toute la hauteur du poteau.



" Confinement discontinu "



"Confinement continu"

**Figure2** : Types de confinement de poteaux.

## A.2 Pression de confinement:

La pression de confinement pour une section rectangulaire (voir **Fig.3**) est donnée par:

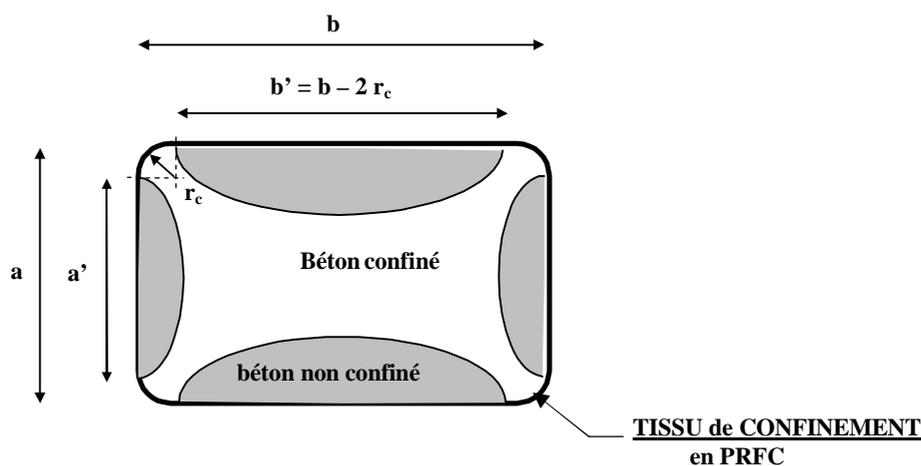
$$p = \frac{2 \cdot b_f \cdot e_{PRFC} \cdot \varepsilon_{fcu} \cdot E_f}{c_f \cdot S_f \cdot \gamma_f \cdot b} \cdot \eta$$

- Où:
- $b_f$ : Largeur des bandes en PRFC
  - $e_{PRFC}$ : Epaisseur totale du PRFC
  - $\varepsilon_{fcu}$ : Déformation du PRFC à la traction
  - $E_f$ : Module d'élasticité du PRFC
  - $c_f$ : Coefficient de cerce égal à 1.5
  - $S_f$ : Espacement des bandes en PRFC ou pas de l'hélice
  - $\gamma_f$ : Coefficient de sécurité égal à 1.15

Avec:

$$\eta = 1 - \frac{(a+b)(s_f - b_f)}{3 \cdot A_b (1 - \rho)} \leq 1$$

- $A_b$ : Aire de la section du béton
- $\rho$ : Taux d'armatures d'acier longitudinales
- $b_f$ : Largeur des bandes de PRFC



**Figure3:** Zones de confinement d'une section rectangulaire.

## *Annexe B*

# *Mise en œuvre des composites*

**Annexe B: MISE EN ŒUVRE DES PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone)****A.1 Préparation du support**

- Le support doit être propre, sain, exempt de graisse, de produits non adhérentes et de tout enduit de type peinture.
- Le support doit être sec (taux d'humidité inférieur à 4 %).
- Le support béton doit avoir au moins un âge de 28 jours, doit être préparé de façon à créer un état de rugosité suffisant et éliminer la surface présentant peu de cohésion.
- Les Saillies de coffrage ne doivent pas excéder 0,5 mm. Si nécessaire, ragréer à l'aide du SIKADUR 41 F.
- Les arrêtes vives, ou ruptures de plan de l'élément structurel doivent être abattues par un chanfrein de rayon d'au moins 10 mm, par procédé de ponçage.

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

- Découper le tissu aux dimensions appropriées
- ne pas endommager les extrémités découpées et plier le tissu
- le conserver toujours 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.
- Reporter l'ensemble du mélange dans un récipient propre, puis mélanger à nouveau pendant environ une minute, à faible vitesse afin de limiter l'entraînement d'air dans la résine.
- La durée de vie débute dès le mélange des deux composants B et A. Elle est plus longue à basse température..

**A-4 Les différentes étapes d'application sur le support**

1. Appliquer la première couche de résine, à l'aide d'un rouleau ou d'une brosse le SIKADUR330 sur le support

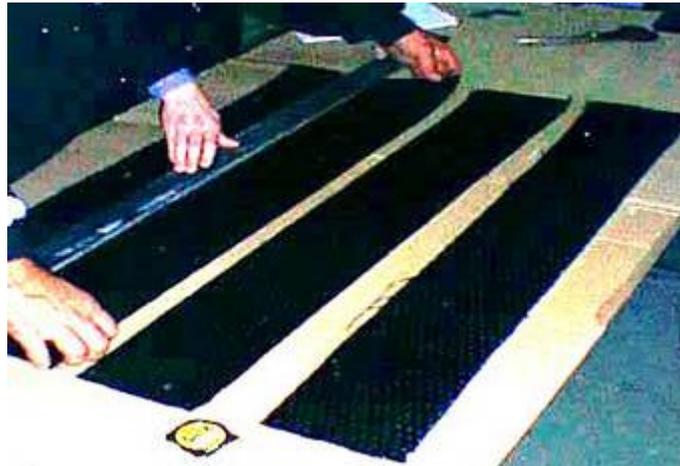
2. Conformément au calepinage et au dimensionnement souscrit, placer le tissu découpé sur la couche d'apprêt, en veillant à l'orientation correcte du sens des fibres (tissu unidirectionnel).
3. Le tissu doit être appliqué sur une couche de résine humide
4. Le tissu doit être posé sans pli et sans étirement excessif
5. Le tissu doit être fermement plaqué sur le support par un marouflage (réalisé au moyen d'un rouleau) permettant l'imprégnation de la colle dans les fibres et l'élimination des bulles d'air éventuelles.
6. Répartir la résine au rouleau jusqu'à l'obtention d'une structure homogène.
7. En cas de rajout d'une couche supplémentaire de tissu, 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 un intervalle d'une heure de temps 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.

En cas de température basse et/ou d'humidité relative élevée, la surface du composite peut être devenue collante. Avant de poursuivre, il faut enlever ce film gluant en lavant en abondance la surface à l'eau, rincer puis laisser sécher.



**(1) Ponçage de la surface du support béton**



**(2) Découpage du tissu en fibre de carbone**



**(3) application de la résine**



**(4) Imprégnation du tissu**



**(5) Mise en place, sans étirement, du tissu sur le support béton.**



**(6) Marouflage: dégagement des bulles d'air avec un rouleau**

## Références bibliographiques :

- [1]. Perfectionnement sur les techniques de réhabilitation et de renforcement des structures, rencontres scientifiques, SOCOTEC-CTC année 2002.
- [2]. Document technique SIKA El-Djazair année 2002.
- [3]. J.V.MIRANDA, techniques et systèmes de renfort des structures en béton 2004.
- [4]. Règlement eurocode 8. Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme et document d'application nationale AFNOR 2000.
- [5]. A.PLUMIER, pathologie et réparations structurelles des constructions, ArGenCo, édition 2006.
- [6]. J. PERCHAT. « Béton Armé, Règles BAEL, Pièces soumises à des sollicitations normales », Techniques de l'Ingénieur, C2306-C2320, 1991.
- [7]. J.A.CALGARO, maintenance et réparation des ponts, ENPC, année 1997.
- [8]. J.M.BERTHELOT, matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures, TEC et DOC 4eme édition, 2002.
- [9]. C.BATHIAS, matériaux composites, édition DUNOD, année 2005.
- [10]. D.G.HERMES, matériaux composites, 5eme édition, 2005.
- [11]. L.C.HOLLAWAY, strengthening of reinforced concrete structures: using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering, CRC press.
- [12]. J,G TENG FRP strengthened RC structures, WILEY editorial offices , 2001
- [13]. 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).
- [14]. SAMAI M. L. Notes des cours de béton armé, en post- graduation. Université de Constantine. Algérie (2007).
- [15]. Document scientifique et techniques AFGC, réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites, année 2003.
- [16]. Document scientifique et techniques AFGC, réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites, année 2007
- [17]. Avis technique, CSTB, 2008

- [18]. Technical recommendations construction, guide for the design and construction of externally-bonded , FRP system for strengthening existing structure, CNR année 2004
- [19]. Règlement eurocode2. calcul des structures en béton AFNOR1992
- [20]. Glossaire matériaux composites