



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



## Mémoire de Magister

Présenté à l'Université de Guelma  
Faculté des Sciences et de la technologie

Département de : Génie Civil et Hydraulique  
Option : *Structure, sol et hydraulique*

Présenté par : MERADJI Abderrazek

---

---

**Thème : Étude en traction d'armature habillée par  
matériaux composites et scellée dans le béton**

---

---

Sous la direction de : Pr Guenfoud Mohamed

### JURY

Pr : Nouaouria M.S.	Université de Guelma	Président
Pr : Guenfoud M.	Université de Guelma	Rapporteur
Dr : Benmarce A.	Université de Guelma	Examineur
Dr : Nafaa Z.	Université de Guelma	Examineur

2011

## REMERCIEMENTS

Avant de remercier toutes les personnes que j'ai pu côtoyer au cours de ma thèse de magister et celles qui ont permis son bon déroulement, mes premiers mots iront à mon encadreur, monsieur GUENFOUD Mohamed, Professeur à l'université de Guelma. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance, tant pour ses conseils, son intérêt et sa vaste culture que pour la confiance qu'il m'a accordée pendant ce projet de recherche, merci de m'avoir ouvert les portes du monde passionnant de la recherche expérimentale, et ce malgré tous ces aléas et difficultés

La présente étude s'est déroulée au Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université 08 Mai 45 de Guelma. Je remercie le directeur, Monsieur le Professeur GEUNFOUD Mohamed, de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Mes remerciements vont particulièrement à Mr. NOUAOURIA Mohamed Salah président du comité scientifique du département de Génie Civil.

Grand merci à l'ensemble des professeurs du génie civil de l'université de Guelma, en citant Dr Benmarce, Dr Mansouri, Pr Benmalek, Pr Belabed, Dr Achouche, Dr Benouis, Dr Cherait ,Pr Guenfoud, et Pr Nouaouria. Sans oublier le Dr Moussaoui, qui nous ont beaucoup donné.

Merci beaucoup à Dr Nafaa pour m'avoir aidé a manipuler l'appareil sur lequel j'ai travaillé.

Et enfin le très grand merci à mon cher ami et frère Ferhani Kamel pour son aide depuis la préparation du concours de Magister jusqu'à l'achèvement de la thèse, et son soutien pendant les moments difficiles, vraiment sans lui je ne serais pas arrivé à ce stade là. Merci encore cher ami et frère Kamel.

## ملخص

غالبا ما تتعرض المنشآت لإعتداءات عديدة منها الفيزيائية والكيميائية التي يتعين عليها مقاومتها من أجل استكمال فترة مرضية للاستخدام وجميع المهام التي من أجلها صممت .

عندما لا تستطيع مقاومة هذه الإعتداءات، تبرز إضرابات، وأكثرها شيوعا هو تآكل حديد التسليح، يظهر في هذه الهياكل الخرسانية. ولحماية الفولاذ من التآكل نستخدم حلا يتمثل في التفاف التسليح بمواد مركبة. ولكن المشكلة هي خطر تدهور الالتصاق (الإلتحام) فولاذ - مركب - خرسانة.

هذا البحث يركز على دراسة الشد لقضيب التسليح المكسو بقشرة من المواد المركبة ومختوم في الخرسانة الدراسة التجريبية، عبارة عن ختم في كتل من الخرسانة حديد التسليح من مختلف أقطار وأطوال مختلفة من المرسى محمية و معززة بالمواد المركبة (النسيج من ألياف الكربون TFC).

من خلال إجراء سحب التسليح من كتلة الخرسانة يقدر الإجهاد المماسي (الالتصاق). ثم نقارن ذلك مع تسليح بدون النسيج (تي إف سي). نخلص بالقول إذا كان هناك تدهور أو تحسن للالتصاق (الإلتحام) فولاذ - مركب - خرسانة.

المادة:

الهياكل، التربة و الري

الكلمات الرئيسية

الخرسانة المسلحة، التشققات، التآكل، الحماية، المواد المركبة، الإلتحام.

مخبر الاستقبال:

مخبر الهندسة المدنية والري، جامعة 8 ماي 45، قالممة.

## RESUME

Les ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Lorsqu'ils ne peuvent résister à ces agressions, des désordres, dont le plus fréquent est la corrosion des armatures, apparaissent dans le béton de ces structures. Pour protéger l'acier de la corrosion on adopte une solution d'habillage d'armature par matériaux composites. Mais le problème qui se pose, c'est le risque de dégradation de l'adhérence Acier-composite-béton.

La présente recherche s'intéresse à l'étude en traction d'armature habillée par matériaux composites et scellée dans le béton.

L'étude, expérimentale, consiste à sceller dans des masses de béton, des armatures en acier de différents diamètres et de différentes longueurs d'ancrage, protégées et renforcées par matériau composite (le tissu de fibre de carbone (TFC)).

En procédant, à l'arrachement de ces armatures on évalue la contrainte tangentielle (adhérence). Nous comparons ensuite cette dernière avec celle d'une barre sans tissu (TFC). Nous concluons par dire s'il y a une dégradation ou une amélioration de l'adhérence acier-composite- béton

### **DISCIPLINE :**

**STRUCTURE, SOL et HYDRAULIQUE**

---

### **MOTS-CLES :**

Béton, armé, fissuration, corrosion, protection, matériau composite, adhérence.

---

### **LABORTOIRE D'ACCUEIL :**

Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique, Université 08 Mai 45, Guelma.

## **ABSTRACT**

The works are often exposed to numerous physical and chemical attacks to which they must resist in order to satisfactorily completing their period of use, all the functions for which they were designed. When they can not resist these attacks, disorders, the most common is the corrosion of reinforcement, appear in the concrete of these structures. .. To protect steel from corrosion we adopt a solution by wrapping reinforcing composite materials. But the problem is the risk of degradation of adhesion steel-concrete-composite.

This research focuses on the study in traction frame clad with composite materials and sealed in concrete.

The study, experimental, is to seal in masses of concrete, steel reinforcement of different diameters and different lengths of anchorage, protected and reinforced composite material (the carbon fiber fabric (TFC)).

By conducting a pullout of reinforcement is estimated shear stress (adhesion).

We then compare it with that of a bar without fabric (TFC). We conclude by saying if there is a deterioration or improvement of adhesion steel-concrete-composite.

### **DISCIPLINE :**

**SRUCTURE, SOIL and HYDRAULIC**

---

### **KEY WORDS :**

Concrete reinforced, corrosion, protection, composite, adhesion.

---

### **HOME LABORATORY**

Laboratory of Civil Engineering and Hydraulics, University 08 May 45, Guelma

## Liste des figures

- Fig.I.1-Courbe contrainte-déformation d'un essai de compression. [C1]
- Fig.I.2-Essai Brésilien sur éprouvette cylindrique [C1]
- Fig.I.3-Evolution de la résistance à la traction  $f_{tj}$  en fonction de celle à la compression  $f_{cj}$
- Fig.I.4-Diagramme conventionnel  $(\sigma_s, \varepsilon_s)$  des aciers de béton armé écrouis à froid par tréfilage et/ou laminage
- Fig.I.5-Diagramme conventionnel  $(\sigma_s, \varepsilon_s)$  des aciers de béton armé écrouis à froid par torsion et/ou traction
- Fig.I.6-Courbe représentant le comportement complet de l'acier en traction
- Fig.I.7-Diagrammes contrainte-déformation d'essais de traction sur les différents types d'aciers d'armature.
- Fig.I.8-Matériau composite
- Fig.I.9-Loi de comportement du TFC<sup>®</sup>
- Fig.I.10-Dégradation due à la corrosion.
- Fig.I.11-Représentation schématique de la variation de l'adhérence maximale avec la corrosion. [D1]
- Fig.I.12-Eclat en formation
- Fig.I.13-Poutre support de réservoir
- Fig.I.14-Poteau porteur sous garage
- Fig.I.15-Poteau support de ligne électrifiée
- Fig.I.16-Pile de pont
- Fig.I.17-Paroi d'aéroréfrigérant
- Fig.I.18-Pile en zone de marnage
- Fig. I.19-Poutre de tablier de pont
- Fig.I.20-Quai en zone de marnage
- Fig.I.21-Tuyau en béton armé
- Fig.I.22-Parement en béton armé
- Fig.I.23-Dégradation des poutres d'une structure du complexe de fabrication d'engrais (nitrate d'ammonium) Annaba [C4]
- Fig.I.24-Détachement d'un bloc rocheux de 13m<sup>3</sup> à 70m au-dessus de la route pour atterrir, après trois rebonds, sur le tablier d'un pont sur la RN90 près de Moutiers, France [P3]
- Fig.I.25-Incendies dans les tunnels
- Fig.I.26-Fissurations excessives de deux poutres d'un plancher dû à la chute des panneaux en maçonnerie de l'étage au dessus (séisme de Boumerdes 2003)
- Fig.I.27-Détachement d'un balcon emportant dans sa chute le balcon d'en dessous
- Fig.I.28-Protection des armatures
- Fig.I.29-Mécanisme de transmission des forces par adhérence dans une poutre d'après Saliger[S1]
- Fig.I.30-définition du coefficient d'aire relative  $f_R$  d'après Martin et Noakowski [M3]
- Fig.I.31-Schéma de l'essai d'adhérence (« Pull-out test ») d'après la RILEM [R4].
- Fig.I.32-Mécanisme d'adhérence et schéma de la relation complète d'adhérence d'après Eligehausen et all [E1].
- Fig.III.1-Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T10, Ancrage 10cm

- Fig.III.2-Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T10, Ancrage 12cm
- Fig.III.3-Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T10, Ancrage 14cm
- Fig.III.4-Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T12, Ancrage 10cm
- Fig.III.5-Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T12, Ancrage 12cm
- Fig.III.6-Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T12, Ancrage 14cm
- Fig.III.7-Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T14, Ancrage 10cm
- Fig.III.8-Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T14, Ancrage 12cm
- Fig.III.9-Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T14, Ancrage 14cm
- Fig.III.10-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T10,A10cm)
- Fig.III.11-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T10,A12cm)
- Fig.III.12-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T10,A14cm)
- Fig.III.13-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T12,A10cm)
- Fig.III.14 -Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T12,A12cm)
- Fig.III.15-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T12,A14cm)
- Fig.III.16-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T14,A10cm)
- Fig.III.17-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T14,A12cm)
- Fig.III.18-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T14,A14cm)
- Fig.III.19-Variation de l'adhérence moyenne en fonction du nombre de couches de protection (Barres T10)
- Fig.III.20-Variation de l'adhérence moyenne en fonction du nombre de couches de protection (Barres T12)
- Fig.III.21-Variation de l'adhérence moyenne en fonction du nombre de couches de protection( Barres T14)
- Fig.III.22-Variation de l'adhérence moyenne en fonction de différentes coulées de béton (SP :sans couches de protection )
- Fig.III.23-Variation de l'adhérence moyenne en fonction de différentes coulées de béton (P1C : avec une couche de protection)
- Fig.III.24-Variation de l'adhérence moyenne en fonction de différentes coulées de béton (PC : avec deux couches de protection)
- Fig.III.25-Variation de l'adhérence moyenne en fonction de différentes coulées de béton (P3C : avec trois couches de protection)

## Liste des tableaux

- Tableau.I.1-caractéristiques moyennes des fibres et renforts  
Tableau.I.2-Principales différences entre matrices Thermodurcissables TD et Thermoplastique TP  
Tableau.I.3-Résine Thermodurcissables TD  
Tableau.I.4-Résine époxyde  
Tableau.I.5-Polyuréthanes et polyurées  
Tableau.I.6-Matrice Thermodurcissables TD  
Tableau.I.7-Matrice Thermoplastique TP  
Tableau.I.8-Caractéristiques spécifiques des matériaux usuels, élaborés sous forme massives  
Tableau.I.9-Caractéristiques spécifiques des matériaux élaborés sous forme de fibres  
Tableau.I.10-Propriétés du Tissu Sika Wrap®  
Tableau.I.11-Propriétés du TFC
- Tableau.II.1-Découpage des barres  
Tableau. Propriétés du TFC®  
Tableau Propriétés du Tissu Sika Wrap  
Tableau.II.2-découpage du tissu (TFC), en cm<sup>2</sup>  
Tableau.II.3-Composition du béton
- Tableau.III.1-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A10cm, SP  
Tableau.III.2-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A10cm, P1C  
Tableau.III.3-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A10cm, P2C  
Tableau.III.4-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A10cm, P3C  
Tableau.III.5-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A12cm, SP  
Tableau.III.6-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A12cm, P1C  
Tableau.III.7-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A12cm, P2C  
Tableau.III.8-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A12cm, P3C  
Tableau.III.9-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A14cm, SP  
Tableau.III.10-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A14cm, P1C  
Tableau.III.11-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A14cm, P2C  
Tableau.III.12-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A14cmP3C  
Tableau.III.13-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A10cm, SP  
Tableau.III.14-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A10cm, P1C  
Tableau.III.15-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A10cm, P2C  
Tableau.III.16-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A10cm,P3C  
Tableau.III.17-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A12cm, SP  
Tableau.III.18-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A12cm, P1C  
Tableau.III.19-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A12cm, P2C  
Tableau.III.20-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A12cm, P3C  
Tableau.III.21-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A14cm, SP  
Tableau.III.22-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A14cm, P1C  
Tableau.III.23-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A14cm, P2C  
Tableau.III.24-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A14cm, P3C  
Tableau.III.25-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A10cm, SP

Tableau.III.26-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A10cm, P1C  
Tableau.III.27-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A10cm, P2C  
Tableau.III.28-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A10cm, P3C  
Tableau.III.29-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A12cm, SP  
Tableau.III.30-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A12cm, P1C  
Tableau.III.31-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A12cm, P2C  
Tableau.III.32-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A12cm, P3C  
Tableau.III.33-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A14cm, SP  
Tableau.III.34-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A14cm, P1C  
Tableau.III.35-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A14cm, P2C  
Tableau.III.36-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A14cm, P3C  
Tableau.III.37-Valeurs de la force d'arrachement et de la contrainte d'adhérence pour  
les barres HA10  
Tableau.III.38 -Valeurs de la force d'arrachement et de la contrainte d'adhérence pour  
les barres HA12  
Tableau.III.39-Valeurs de la force d'arrachement et de la contrainte d'adhérence pour  
les barres HA14  
Tableau.III.40-Valeurs moyennes de l'adhérence

# Sommaire

Remerciements	
Résumés	
Liste des figures et des tableaux	
Introduction générale.....	1

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

<b>I.1-MATERIAUX.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1-le béton armé.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1.1-Historique.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1.2Concept du Béton Armé.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1.3-Le béton .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1.4-Comportement expérimental.....</b>	<b>4</b>
<b>a-Essais de compression .....</b>	<b>4</b>
<b>b-Essais de traction .....</b>	<b>6</b>
<b>I.1.2-L'acier.....</b>	<b>6</b>
<b>a- Propriétés de l'acier.....</b>	<b>7</b>
<b>a.1- Première forme bilinéaire .....</b>	<b>8</b>
<b>a.2- Deuxième forme bilinéaire .....</b>	<b>8</b>
<b>a.3- Forme complète.....</b>	<b>9</b>
<b>b-Les aciers d'armature .....</b>	<b>10</b>
<b>c-Matériaux disponibles sur le marché algérien.....</b>	<b>11</b>
<b>I.1.3-Matériaux Composites.....</b>	<b>12</b>
<b>I.1.3.1-Généralités.....</b>	<b>12</b>
<b>I.1.3.2-Historique.....</b>	<b>12</b>
<b>I.1.3.3-Exemple de matériau composite.....</b>	<b>13</b>
<b>I.1.3.4-Principaux composites.....</b>	<b>13</b>
<b>I.1.3.5-Définitions.....</b>	<b>13</b>
<b>I.1.3.6-Les composants .....</b>	<b>14</b>
<b>a-Les fibres .....</b>	<b>14</b>
<b>a.1- Fibre de verre.....</b>	<b>14</b>
<b>a.2- Fibre de carbone.....</b>	<b>14</b>
<b>a.3- Fibre d'aramide.....</b>	<b>15</b>
<b>a.4- Fibre de bore.....</b>	<b>15</b>
<b>a.5- Fibre de silice (ou de quartz).....</b>	<b>15</b>
<b>a.6- Fibres de polyéthylène de haut module.....</b>	<b>15</b>
<b>a.7- Caractéristiques moyennes des fibres et renforts.....</b>	<b>15</b>
<b>a.8-Architecture des renforts .....</b>	<b>16</b>
<b>a.9-Ensimage.....</b>	<b>17</b>
<b>b-Matrices .....</b>	<b>18</b>
<b>b.1-Definitions.....</b>	<b>19</b>

b.1.1-Résine thermodurcissable .....	19
b.1.2-Résine thermoplastique .....	19
b.1.3-Résine thermostable .....	19
b.1.4-Elastomère thermoplastique_ .....	19
b.2-Rôle des matrices.....	19
b.2.1-Les résines thermodurcissables.....	20
b.2.2- Les matrices thermoplastiques.....	24
c- Les charges.....	25
c.1-Les charges organiques.....	26
c.2-Les charges minérales.....	26
c.3- Oxydes et hydrates métalliques.....	26
c.4-Le verre.....	26
c.5-Le carbone.....	26
I.1.3.7-Les matériaux composites structuraux.....	27
a-Monocouches.....	27
b-Stratifiés.....	27
c-Sandwichs.....	27
I.1.3.8-Propriétés des matériaux composites.....	28
I.1.3.9-Classification des composites.....	28
I.1.3.10-Caractéristiques mécaniques des composites.....	29
I.1.3.11-Environnement.....	32
<b>I.2- PATHOLOGIES DU BETON ARME : CAUSES ET</b>	
<b>CONSEQUENCES.....</b>	<b>33</b>
I.2.1-Causes physiques de dégradation.....	33
I.2.2-Causes chimiques de dégradation.....	34
I.2.2.1-Alcali-réaction ou cancer du béton.....	34
I.2.2.2-Réactions sulfatiques.....	34
I.2.2.3-Corrosion .....	34
a-Introduction .....	34
b-Les stades de corrosion.....	35
c-Conséquence de la corrosion.....	36
d-L'influence de la corrosion sur le comportement mécanique des structures en BA.....	37
I.2.3-Quelques photos d'ouvrages en béton arme dégradés par corrosion des armatures.....	38
I.2.3.1- Milieux basiques.....	44
I.2.3.2- Altérations due aux chocs.....	44
I.2.3.3-Altérations dues aux forts gradients thermiques.....	45
I.2.3.4-Altérations d'origine sismiques.....	46
I.2.3.5-Altérations dus aux erreurs d'exécution.....	46
<b>I.3- MESURES PREVENTIVES-DEMARCHE A SUIVRE POUR</b>	
<b>REHABILITER UN OUVRAGE EN BETON ARME DONT LES</b>	
<b>ARMATURES SONT CORRODEES.....</b>	<b>47</b>
I.3.1- Mesures préventives.....	47
I.3.1.1- Enrobage des armatures.....	47
I.3.1.2-Prévision de la carbonatation.....	47
I.3.1.3- Prévision de la pénétration des chlorures.....	48
I.3.1.4- Le revêtement par galvanisation.....	48
I.3.1.5- L'utilisation des armatures en acier inoxydable.....	48

I.3.1.6 - Revêtements organiques.....	49
I.3.1.7-Protection des armatures par matériaux composites.....	49
I.3.2-Demarche à suivre pour réhabiliter un ouvrage en béton armé	
Les méthodes de réhabilitation .....	50
I.3.2.1. Reconstitution de l'enrobage.....	50
I.3.2.2-Elimination des zones dégradées.....	50
I.3 I.3. Remplacement des armatures fortement corrodées.....	51
I.3.2.4. Protection des armatures.....	51
<b>I.4-ADHERENCE BETON-ARMATURE.....</b>	<b>52</b>
I.4.1-Introduction.....	52
I.4.2-Relation fondamentale d'adhérence.....	53
I.4.2.1-Notion d'adhérence.....	53
I.4.2.2-Essai d'adhérence d'après la RILEM.....	55
I.4.2.3-Mecanisme d'adhérence.....	56
I.4.2.4-Facteurs principaux influençant la relation d'adhérence.....	58
a-Influence de la résistance du béton.....	58
b-Influence de la position des barres d'armature.....	58
c-Influence du type de barres d'armature.....	59
I.4.3-Définition de l'adhérence.....	60
I.4.4-Essai d'arrachement classique.....	60
I.4.5-Analyse des résultats.....	61
I.4.6-Contrainte d'adhérence.....	62
I.4.7-Différents modes de rupture.....	63
I.4.8-Scellement d'une barre à la résine.....	64
<b>I.5-CONCLUSIONS.....</b>	<b>66</b>

## CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE

<b>II.1-INTRODUCTION.....</b>	<b>67</b>
<b>II.2-MATERIELS UTILISES.....</b>	<b>67</b>
<b>II.3- EPROUVETTES D'ESSAI.....</b>	<b>72</b>
<b>II.4-MATERIAUX UTILISES.....</b>	<b>74</b>
II.4.1- La colle (Sikadur-330).....	74
II.4.2-Les barres d'acier .....	76
II.4.3- Le tissu de fibre de carbone (TFC).....	77
<b>II.5-CARACTERISTIQUES MECANQUES SECTION EFFECTIVE DU COMPOSITE.....</b>	<b>78</b>
<b>II.6 -PREPARATION DU TFC .....</b>	<b>80</b>
<b>II.7-DIFFERENTS ETAPES DE PROTECTION DES BARRES.....</b>	<b>83</b>
<b>II.8-COULAGE DU BETON.....</b>	<b>86</b>
<b>II.9-INSTALLATION DE L'APPAREIL .....</b>	<b>90</b>
<b>II.10.CONCLUSIONS.....</b>	<b>91</b>

## CHAPITRE III : RESULTATS ET ANALYSES

<b>III.1-RESULTATS D'ESSAIS.....</b>	<b>92</b>
<b>III.1.1.Force d'arrachement-Glisement pur les barres T10.....</b>	<b>92</b>
a-Ancrage : 10 cm Sans couches de protection (TFC).....	92
b-Ancrage : 10 cm avec 1 couche de protection (TFC).....	93
c-Ancrage : 10 cm avec 2 couches de protection (TFC).....	94
d-Ancrage : 10 cm avec 3 couches de protection (TFC).....	95
e-Ancrage : 12 cm Sans couches de protection (TFC.).....	96
f-Ancrage : 12cm avec 1 couche de protection (TFC).....	97
g-Ancrage : 12 cm avec 2 couches de protection (TFC).....	98
h-Ancrage : 12 cm avec 3 couches de protection (TFC) .....	99
i-Ancrage : 14 cm Sans couches de protection (TFC) .....	100
j-Ancrage : 14 cm avec 1 couche de protection (TFC) .....	101
k-Ancrage : 14 cm avec 2 couches de protection (TFC) .....	102
l-Ancrage : 14 cm avec 3 couches de protection (TFC) .....	103
<b>III.1.2.Force d'arrachement-Glisement pur les Barres T12.....</b>	<b>104</b>
a-Ancrage : 10 cm Sans couches de protection (TFC) .....	104
b-Ancrage : 10 cm avec 1 couche de protection (TFC) .....	105
c-Ancrage : 10 cm avec 2 couches de protection (TFC) .....	106
d-Ancrage : 10 cm avec couches de protection (TFC) .....	107
e-Ancrage : 12 cm Sans couches de protection (TFC) .....	108
f-Ancrage : 12 cm avec 1 couche de protection (TFC) .....	109
g-Ancrage : 12 cm avec 2 couches de protection (TFC) .....	110
h-Ancrage : 12 cm avec 3 couches de protection (TFC) .....	111
i-Ancrage : 14 cm Sans couches de protection (TFC) .....	112
j-Ancrage : 14 cm avec 1 couche de protection (TFC) .....	113
k-Ancrage : 14 cm avec 2 couches de protection (TFC). .....	114
l-Ancrage : 14 cm avec 3 couches de protection .....	115
<b>III.1.3.Force d'arrachement-Glisement pur les Barres T14.....</b>	<b>116</b>
a-Ancrage : 10 cm Sans couches de protection (TFC) .....	116
b-Ancrage : 10 cm avec 1 couche de protection (TFC) .....	117
c-Ancrage : 10 cm avec 2 couches de protection (TFC) .....	118
d-Ancrage : 10 cm avec 3 couches de protection (TFC) .....	119
e-Ancrage : 12 cm Sans couches de protection (TFC) .....	120
f-Ancrage : 12 cm avec 1 couches de protection (TFC) .....	121
g-Ancrage : 12 cm avec 2 couches de protection (TFC) .....	122
h-Ancrage : 12 cm avec 3 couches de protection (TFC) .....	123
i-Ancrage : 14 cm Sans couches de protection (TFC) .....	124
j-Ancrage : 14 cm avec 1 couches de protection (TFC) .....	125
k-Ancrage : 14 cm avec 2 couches de protection (TFC).....	126
l-Ancrage : 14 cm avec 3 couches de protection (TFC) .....	127
<b>III.2-TABLEAUX RECAPITULATIFS.....</b>	<b>128</b>
<b>III.2.1 Valeurs de la force d'arrachement et de la contrainte d'adhérence -</b> barres T10.....	128
<b>III.2.1 Valeurs de la force d'arrachement et de la contrainte d'adhérence -</b> barres T12.....	128

<b>III.2.3.</b> Valeurs de la force d'arrachement et de la contrainte d'adhérence - barres T14.....	<b>128</b>
<b>III.3-VALEURS MOYENNES EN MPA DE L'ADHERENCE A LA RUPTURE DE DIFFERENTES BARRES.....</b>	<b>129</b>
<b>III.4- REPRESENTATION GRAPHIQUE.....</b>	<b>130</b>
<b>III.4.1</b> -Evolution de la force d'arrachement.....	<b>130</b>
<b>a.</b> Pour les barres T10.....	<b>130</b>
<b>b.</b> Pour les barres T12.....	<b>131</b>
<b>c.</b> Pour les barres T14.....	<b>133</b>
<b>III.4.2.</b> Variation d'adhérence.....	<b>134</b>
<b>a.</b> Pour les barresT10,Ancrage 10cm.....	<b>134</b>
<b>b.</b> Pour les barresT10,Ancrage 12cm.....	<b>135</b>
<b>c.</b> Pour les barresT10,Ancrage 14cm.....	<b>135</b>
<b>d.</b> Pour les barresT12,Ancrage 10cm.....	<b>136</b>
<b>e.</b> Pour les barresT12,Ancrage 12cm.....	<b>136</b>
<b>f.</b> Pour les barresT12,Ancrage 14cm.....	<b>137</b>
<b>g.</b> Pour les barresT14,Ancrage 10cm.....	<b>137</b>
<b>h.</b> Pour les barresT14,Ancrage 12cm.....	<b>138</b>
<b>i.</b> Pour les barresT14,Ancrage 14cm.....	<b>138</b>
<b>III.4.3.</b> Variation de l'adhérence moyenne en fonction du nombre de couches de Protection.....	<b>139</b>
<b>III.4.4.</b> Variation de l'adhérence moyenne en fonction de différentes coulées de béton.....	<b>140</b>
<b>-VI.CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>142</b>

## **1-INTRODUCTION GENERALE**

La durabilité des ouvrages en béton armé dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits. Ces ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Lorsqu'ils ne peuvent résister à ces agressions, des désordres dont le plus fréquent est la corrosion des armatures apparaissent dans le béton de ces structures. Ces désordres sont généralement dus à des défauts de conception, à une mauvaise mise en oeuvre ou à des causes accidentelles ; ils hypothèquent la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages et peuvent entraîner leur dégradation, leur ruine.

Bien conçu et mis en oeuvre suivant les règles de l'art, le béton offre aux armatures une protection à la fois physique et chimique. L'enrobage assure la protection physique en jouant un rôle de barrière vis-à-vis de l'environnement. Sa qualité (compacité, teneur en ciment, imperméabilité, etc.) et son épaisseur (3 cm en milieu non agressif et 5 cm en milieu marin) sont des facteurs essentiels à la bonne tenue des armatures face à la corrosion.

L'alcalinité élevée du béton assure la protection chimique en recouvrant, selon le phénomène de passivation, les armatures d'un film extrêmement mince d'hydroxyde de fer. Mais, en présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, le dioxyde de carbone etc. La corrosion pourrait donc apparaître avec comme conséquences la réduction des sections d'acier et formation de rouille, dont le volume, aux moins deux supérieur à celui du fer initial, entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.

Il existe actuellement plusieurs méthodes de protection ou de réparation. Celles-ci agissent directement au niveau de l'acier (revêtements organiques ou métalliques des armatures, inhibiteurs de corrosion, protection cathodique) ou au niveau du béton, soit en empêchant la pénétration d'éléments agressifs (revêtement du béton par des peintures spéciales), soit en réhabilitant la qualité du béton (changement des parements, déchloruration, ré-alcalinisation).

Des études faites à travers le monde montrent que la corrosion des armatures est responsable de la dégradation de 75% des ouvrages en béton armé et absorbe la plus grande partie des ressources financières destinées aux activités d'entretien et de renouvellement des ouvrages de génie civil; ceci est la preuve que ce phénomène doit être pris très au sérieux. Que de nombreux ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures exigent de nouvelles interventions peu de temps seulement après qu'ils aient été réparés pour la même raison a attiré notre attention et nous a amené à penser que la corrosion qui fait tant de mal à nos ouvrages en béton armé n'est pas traitée avec tout le sérieux qui doit lui être dû. Cela peut résulter du fait que beaucoup d'ingénieurs et de techniciens ne procèdent pas au préalable à des investigations sérieuses pour évaluer l'ampleur des dégâts dans la structure avant d'engager des travaux de réparation, soit par leur méconnaissance du phénomène de la corrosion et de la démarche à suivre pour résoudre les problèmes de corrosion, soit alors qu'ils ne se fient uniquement qu'à l'apparition des dégradations visuelles sur l'ouvrage telles que : les tâches de rouille, les infiltrations d'eau, l'éclatement du béton, les fissures...Les conséquences qui en découlent sont : la non détection des dégradations cachées qui vont se propager avec le temps, le risque de baser les travaux sur un concept erroné, la mauvaise évaluation du coût des réparations.

Pour remédier à cette situation et oeuvrer à la réhabilitation efficace et durable des ouvrages en béton armé dont les armatures risquent de se corroder, nous avons décidé de travailler pour notre mémoire sur le thème « *étude en traction d'armature habillée par matériaux composites* (protégée de la corrosion) *et scellée dans le béton* » Les objectifs visés par notre étude sont :

- expliquer les mécanismes de la corrosion des armatures du béton ;
- présenter et expliquer les méthodes de protection des ouvrages qui risquent de se corroder ;
- proposer une démarche à suivre pour réhabiliter efficacement les ouvrages corrodés ;
- donner des mesures préventives pour empêcher ou retarder le plus longtemps possible la corrosion des armatures conformément à l'adage qui dit que : *«prévenir vaut mieux que guérir »*

**LE CHAPITRE I** est composé d'une synthèse bibliographique dont on a défini les matériaux sur lesquelles se déroulera la partie expérimentale. Parmi ces matériaux, on commence par définir *le béton* et son comportement expérimental, *l'acier* et ses caractéristiques mécanique, et en particulier les aciers d'armature, et enfin les différents *matériaux composites*, leurs caractéristiques mécaniques, leurs utilisations dans le domaine du génie civil.

Dans ce même chapitre on parle des *pathologies du béton*, en citant quelques exemples des causes de dégradation du béton, et en particulier l'influence de *la corrosion* sur le comportement mécanique des structures en béton armé, les dégradations dues à la corrosion des armatures, et les conséquences de la corrosion sur l'adhérence béton-acier.

On a cité quelques *mesures préventives* (parmi lesquelles : la protection des armatures par matériaux composites) et *démarches à suivre pour réparer des ouvrages* dont les armatures sont corrodées.

Et enfin on a défini profondément *l'adhérence* et cité les différents essais qui ont été faits sur cette dernière.

**LE CHAPITRE II** est consacré aux différentes étapes de réparation des éprouvettes d'essai : depuis la préparation de la colle jusqu' à obtenir le produit fini qui est une barre habillée par différentes couches de tissu de fibre de carbone et scellée dans une masse de béton avec différents ancrages.

**LE CHAPITRE III** est une récapitulation et interprétation des résultats trouvés sur l'adhérence acier-composite-béton.

## CHAPITRE I

# Etude bibliographique

### I.1-MATERIAUX

#### I.1.1-le béton armé

##### **I.1.1.1-Historique**

L'apparition des premiers bétons se situe à la fin du premier quart du XIX<sup>ème</sup> siècle lorsque la chaux hydraulique, liant utilisé jusqu'alors, est remplacée par le ciment Portland.

C'est vers 1870 que l'on introduit des barres d'acier dans le béton afin de compenser sa faible résistance à la traction, donnant ainsi naissance au béton armé. Cependant, ce n'est que vers 1900 que le béton armé remplace peu à peu les structures métalliques dans la construction d'ouvrage de génie civil. [R1] Les premières théories des calculs statiques apparaissent 30 ans plus tard et les progrès réalisés au XX<sup>ème</sup> siècle ont fait du béton armé, le principal matériau de construction utilisé aujourd'hui.

##### **I.1.1.2-Concept du Béton Armé**

Le béton de ciment présente des *résistances à la compression assez élevées*, de l'ordre de 25 à 40MPa, mais sa *résistance à la traction est faible*, de l'ordre de 1/10 de sa résistance en compression. De plus, le béton de ciment a un comportement *fragile*.

L'acier présente une *très bonne résistance à la traction* (et aussi à la compression pour des élancements faibles), de l'ordre de 500MPa, mais si aucun traitement n'est réalisé, il subit les effets de la *corrosion*. De plus, son comportement est *ductile*, avec des déformations très importantes avant rupture (de l'ordre de la dizaine de %).

Pour pallier à la faible résistance du béton en traction et à sa fragilité, on lui associe des armatures en acier : c'est le béton armé [C1]

##### **I.1.1.3-Le béton**

Le béton est un matériau obtenu après malaxage de ciment, d'eau, de granulats (sable, gravier, caillou...) et éventuellement d'adjuvants dans des proportions bien déterminées et en fonction des caractéristiques voulues. L'ensemble doit être homogène et la pâte résultant des réactions entre le ciment et l'eau est l'élément actif du béton.

Parmi la grande variété de ciments, un des plus couramment utilisé est le ciment Portland composé de clinker, de gypse ( 5%) et éventuellement d'ajouts (< 5%). Le clinker, obtenu par broyage d'une roche artificielle produite par calcination vers 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion moyenne 80%-20%, est composé de :

- Silicate tricalcique :  $3CaO.SiO_2$  ou  $C_3S$  ( 60-65%)
- Silicate dicalcique :  $2CaO.SiO_2$  ou  $C_2S$  ( 20-25%)
- Aluminate tricalcique :  $3CaO.Al_2O_3$  ou  $C_3A$  ( 5-10%)
- Ferro-aluminate tétracalcique:  $4CaO.Al_2O_3.Al_2O_3, Fe_2O_3$  ou  $C_4AF$  ( 5-10%)

L'eau est avec le ciment l'ingrédient le plus important du béton. Elle remplit à la fois une fonction physique conférant au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une fonction chimique contribuant au développement de la réaction d'hydratation du ciment et par la suite à la résistance mécanique du béton.

Les granulats, appelés aussi agrégats sont des éléments inertes composés de roches carbonatés ( $CaCO_3, MgCO_3, CaMg(CO_3)_2$ ) ou siliceuses ( $SiO_2$ ) qu'on ajoute à un liant pour former une pierre artificielle, ils constituent dans les conditions normales, le squelette du béton, lui conférant sa compacité et participant à sa résistance mécanique.

#### **1.1.1.4-Comportement expérimental**

##### **a-Essais de compression**

Le béton présente une relative bonne résistance à la compression. Les résistances obtenues dépendent de la composition.

En général, les essais sont réalisés sur des éprouvettes normalisées, appelées 16×32, de forme cylindrique de hauteur 32 cm et de diamètre 16 cm (Aire de 200 cm<sup>2</sup>).

A partir d'une courbe contrainte-déformation d'un essai de compression (Figure), on peut tirer les grandeurs suivantes :

- le module de Young instantané  $E_{ij} \approx 30\,000\text{MPa}$ ,
- la contrainte maximale  $\sigma_{max} \approx 20 \text{ à } 40\text{MPa}$ ,

- la déformation maximale à la rupture  $\approx 2 \text{ ‰} = 2 \cdot 10^{-3}$

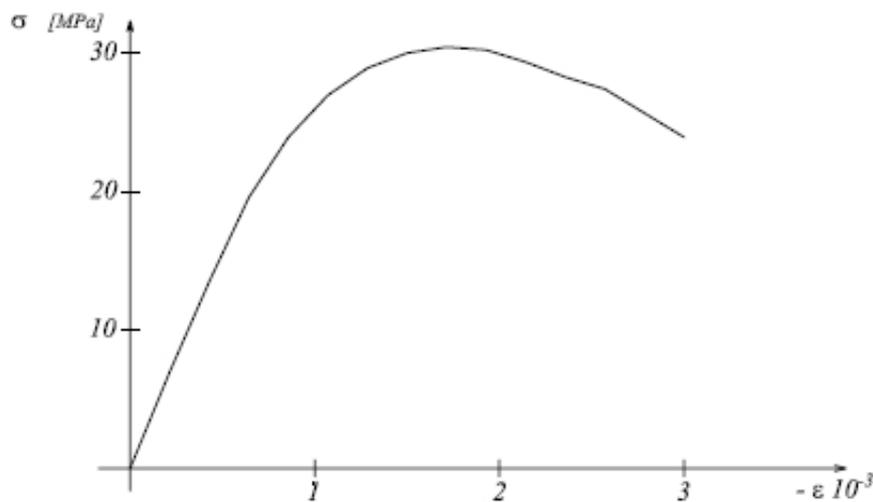
**b-Essais de traction** Il est beaucoup plus difficile de faire des essais en traction.

On distingue :

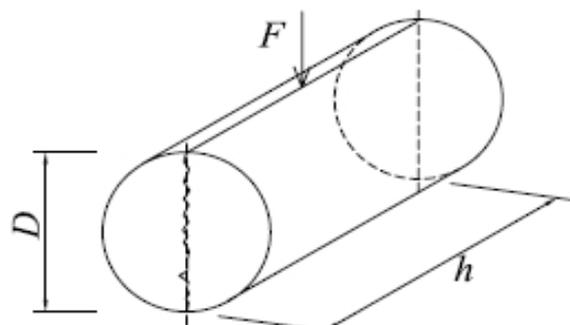
- Les essais de traction directe avec des éprouvettes collées,
- Les essais de traction indirecte tels que l'essai Brésilien ou l'essai en flexion quatre points.

Pour les essais en traction indirecte, la déduction du comportement en traction nécessite une interprétation de l'essai via un modèle. Par exemple, pour l'essai Brésilien qui consiste à fendre une éprouvette cylindrique comme indiqué sur la Figure , la résistance à la traction est donnée par :

$$R_t = \frac{2F}{\pi D h} \quad \text{Ou } F \text{ est l'effort à la rupture.}$$



**FigI.1- Courbe contrainte-déformation d'un essai de compression. [C1]**



**figI.2-Essai Brésilien sur éprouvette cylindrique [C1]**

On retiendra que la résistance à la traction du béton est beaucoup plus faible que celle à la compression :

$$R_t \approx \frac{R_c}{10}$$

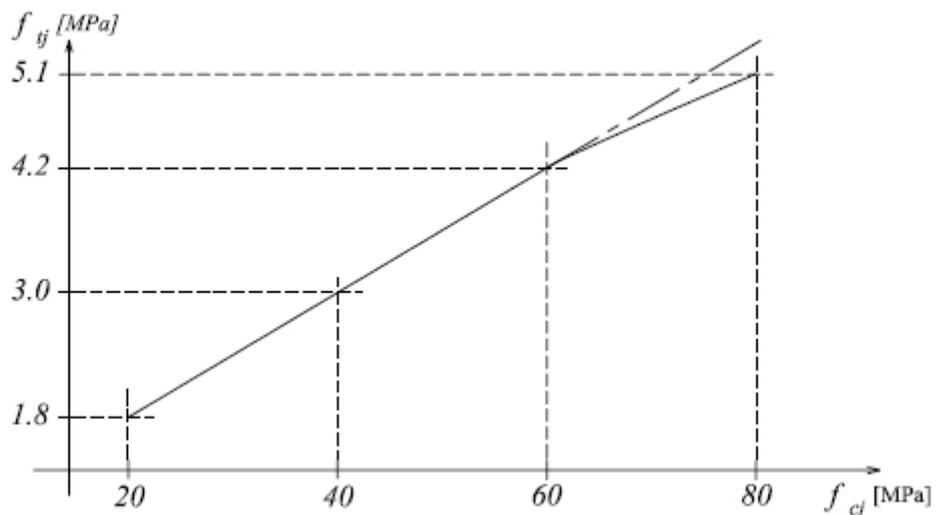
### C-Résistance caractéristique à la traction[M1]

La résistance caractéristique à la traction du béton à  $j$  jours, notée  $f_{tj}$ , est conventionnellement définie par les relations :

$$(f_{tj} = 0.6 + 0.06f_{cj} \text{ si } f_{c28} \leq 60\text{MPa (A.2.1,12)})$$

$$f_{tj} = 0.275f_{cj}^{2/3} \text{ si } f_{c28} > 60\text{MPa (Annexe F)}$$

La Figure présente l'évolution de la résistance caractéristique à la traction  $f_{tj}$  en fonction de celle à la compression  $f_{cj}$ .



FigI.3- Evolution de la résistance à la traction  $f_{tj}$  en fonction de celle à la compression  $f_{cj}$ [R1].

### I.1.2-L'acier

Le béton résiste bien à la compression mais possède une faible résistance à la traction. C'est pourquoi, pour lui conférer une bonne résistance à la traction, on dispose dans la partie tendue des armatures. Les armatures pour béton armé sont généralement des assemblages de barres en acier à caractéristiques de forme, de résistance et de section bien déterminées. On distingue :

- Les ronds lisses ou ronds à béton ;
- Les aciers, haute d'adhérence, qui possèdent des nervures tout le long de la barre, améliorant

l'adhérence béton-acier ;

- Les aciers crénelés ;
- Les treillis soudés.

Les minerais de base de l'acier sont des oxydes dont :

- L'oxyde magnétique ou magnétite :  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- L'oxyde ferrique anhydre :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- L'oxyde ferrique hydrate :  $2\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$

Les principales étapes conduisant à l'obtention de l'acier sont :

§ Elaboration de la fonte à partir des oxydes. En brûlant les oxydes en présence des carbures, on obtient :

- l'élimination des oxydes
- la fonte qui contient entre 2 et 5% de carbone
- la scorie qui est le résidu du haut fourneau

§ La fonte est ensuite affinée pour obtenir soit du fer pur (élimination totale du carbone) soit de l'acier (fer + moins 1% de carbone)

La fonte qui sort du haut fourneau contient moins de 94% de fer, 2 à 5% de carbone et le reste sous forme d'autres éléments tels que : silicium, manganèse, phosphore, soufre.

L'adhérence entre l'acier et le béton est nécessaire. Celle-ci est fonction de la forme des armatures, de leur surface, de la rugosité de l'acier et de la résistance du béton.

La qualité d'armatures et leur disposition, dictées par la répartition des contraintes, résultent de calculs qui font appel aux lois de comportement des matériaux. Les spécifications concernant les barres sont détaillées dans les normes AFNOR NF A35015 et NF A35016.

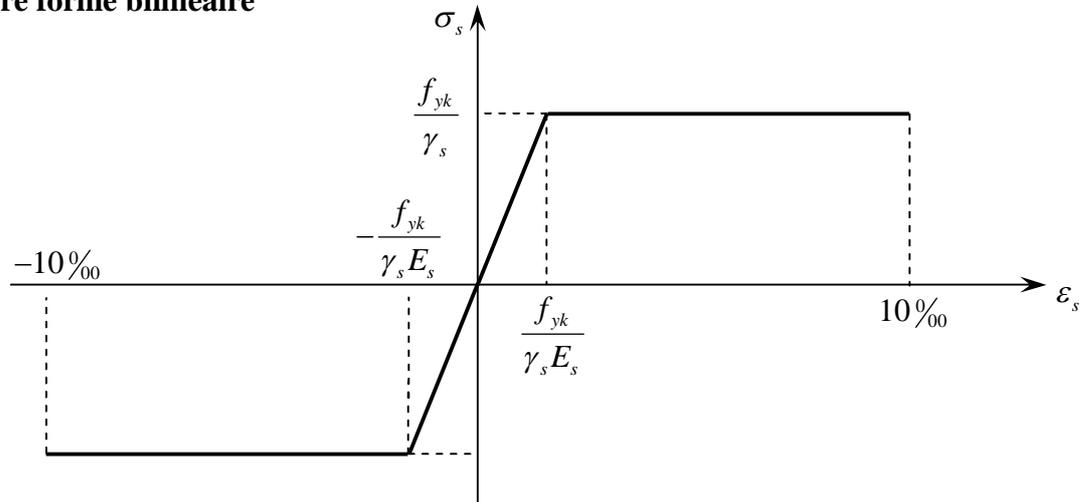
Vis-à-vis de la corrosion, l'acier inoxydable est bien plus résistant qu'un acier ordinaire mais son coût très élevé fait que, l'acier ordinaire, capable de durer assez longtemps pour satisfaire une durée de service déterminée, est utilisé dans la plupart des constructions en béton armé (BA).

### **a- Propriétés de l'acier**

Le comportement de l'acier est très différent de celui du béton. Les caractéristiques mécaniques des aciers pour béton armé font référence à des classifications normalisées, et à des aspects technologiques liés aux caractères d'adhérence, à l'aptitude au façonnage et à l'aptitude au

soudage. Les représentations suivantes représentent les principales courbes contraintes-déformations :

**a.1- Première forme bilinéaire**



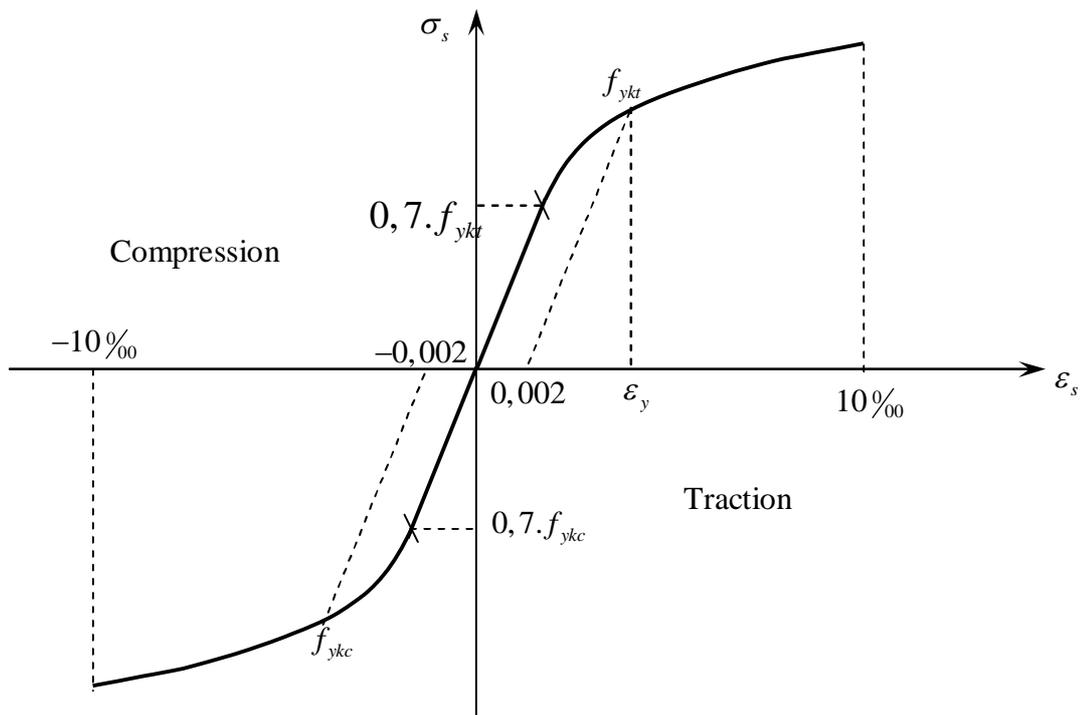
*Fig1.4. Diagramme conventionnel  $(\sigma_s, \varepsilon_s)$  des aciers de béton armé écrouis à froid par tréfilage et/ou laminage*

**a.2- Deuxième forme bilinéaire**

La courbe bilinéaire est celle que l'on utilise lorsque l'on effectue les calculs de conception. Afin d'être conservateur, on néglige l'effet de l'écrouissage, c'est-à-dire le gain supplémentaire que l'on obtient après plastification de l'acier. Les équations qui décrivent la loi de comportement s'écrivent :

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{2.10^5} + 0,823. \left[ \frac{\sigma_s}{f_{ykt}} - 0,7 \right]^5 \text{ pour la partie en traction}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{2.10^5} - 0,823. \left[ \frac{\sigma_s}{f_{ykt}} - 0,7 \right]^5 \text{ pour la partie en compression [P1]}$$



FigI.5. Diagramme conventionnel  $(\sigma_s, \varepsilon_s)$  des aciers de béton armé écrouis à froid par torsion et/ou traction

### a.3- Forme complète

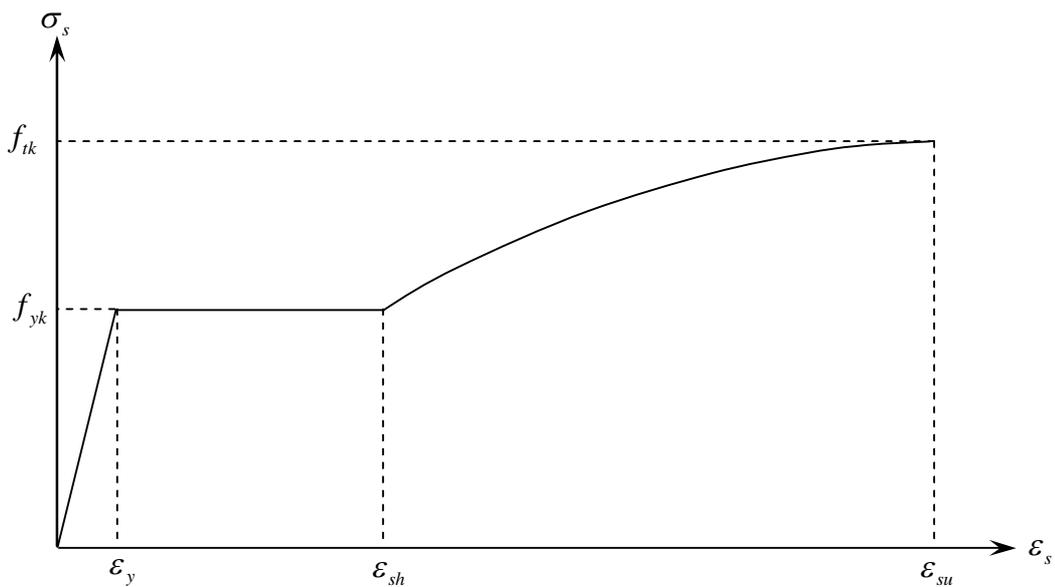


Fig.I.6. Courbe représentant le comportement complet de l'acier en traction

La relation trilineaire permet de représenter l'amorce de l'écroutissement dans certaines barres. La relation complète permet également une meilleure approximation de la courbe [P2]. En ce qui a trait aux propriétés en compression de l'acier, on suppose qu'elles sont les mêmes que celles en traction.

### **b-Les aciers d'armature**

On distingue quatre types d'acier pour armature (voir Figure ), du moins au plus écroui :

1. Les aciers doux, sans traitement thermique ayant une valeur caractéristique de la limite élastique garantie de 125 ou 235MPa. Ce sont les ronds lisses(notéΦ), qui ne sont plus utilisés que pour faire des crochets de levage en raison de leur très grande déformation à la rupture (allongement de22%).

2. Les aciers laminés à chaud, naturellement durs, dit aciers `a haute adhérence de type I. Ce type d'acier a une limite d'élasticité garantie de 400MPa et un allongement `a la rupture de14%.

3. Les aciers laminés à chaud et écrouis avec faible réduction de section(par traction -torsion), dits aciers `a haute adhérence de type II.

Ce type d'acier a une limite d'élasticité garantie de 500MPa et un allongement à la rupture de 12%.

4. Les aciers laminés à chaud par tréfilage (forte réduction de section), fortement écrouis, utilisés pour fabriquer les treillis soudés et fils sur bobines.

Ce type d'acier a une limite d'élasticité garantie de 500MPa et un allongement `a la rupture de 8%.

On pourra retenir que l'action de l'écroutissement est d'augmenter la limite d'élasticité en faisant disparaître le palier de plasticité, et de diminuer l'allongement `a la rupture (plus fragile). Les quatre types d'acier ont le même comportement élastique, donc un même module de Young de  $E_s = 210\ 000MPa$ .

La déformation à la limite élastique est voisine de 0.2%, en fonction de la valeur de la limite d'élasticité.

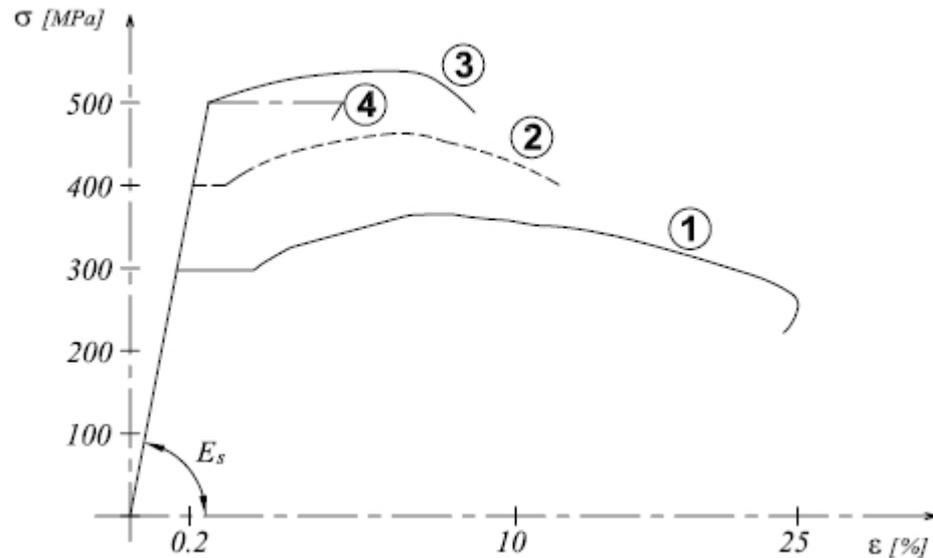


Fig I.7- Diagrammes contrainte-déformation d'essais de traction sur les différents types d'aciers d'armature.[R1]

### c- Matériaux disponibles sur le marché algérien

Les produits sur le marché algérien à l'heure actuelle sont les suivants :

*Pour les aciers :*

- les ronds lisses soudables de nuances FeE235 obtenus par filière à chaud sous la forme de barres, ils sont définis par la norme NF A 35-015 d'octobre 1996,
- les aciers pour béton armé soudables à haute adhérence de nuance FeE500 de diamètre  $\varnothing \geq 5$  mm. On peut distinguer :
  - les aciers à verrous sous la forme de barres, ils sont définis par la norme NF A 35-016 d'octobre 1996.
  - Les aciers à empreintes sous la forme de barres, ils sont définis par la norme NF A 35-020 d'octobre 1996.
- Les treillis soudés constitués de fils inférieurs à 5 mm. Ils sont définis par la norme NF A 35-024 de février 1998.

### **I.1.3-Matériaux Composites**

#### **I.1.3.1-Généralités**

Il existe différentes familles de matériaux : les métaux , les plastiques, les composites,etc.. Les composites seront traité dans ce cours. Le principal intérêt de l'utilisation des composites provient de ses excellentes caractéristiques spécifiques (module divisé par la masse volumique). Leur faible taux d'utilisation vient de son coût encore. Parmi les composites, on distingue deux types : les composites grande diffusion (GD) et les composites haute performance (HP).

Les GD représentent 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort avoisinant 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters (95% des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre (+ de 99% des renforts utilisés !). Renforts et matrices sont à des coûts voisins.

Les HP, principalement utilisés dans l'aéronautique sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le coût. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieur à celles des métaux, contrairement aux GD. Des méthodes de calculs de structures et d'homogénéisations ont été développés pour les HP. Ces calculs feront l'objet de divers chapitres de ce cours.

Il faudra toujours tenir compte du fait que l'élaboration de la structure est liée à celle du matériau, que pour les pièces travaillantes, on utilisera plutôt des composites à fibres longues et à matrice organique et pour les garnitures, capotages on utilisera des plastiques renforcés

#### **I.1.3.2-Historique**

Le [bois](#) fut le premier matériau composite naturel utilisé, ensuite le [torchis](#) a été utilisé en construction pour ses propriétés d'isolation et de coût. Parmi les premiers composites fabriqués par l'homme on trouve également les arcs Mongols (2000 ans av. J.-C.). Leur âme en bois était contrecollée de tendon au dos et de corne sur sa face interne.

.1823 : [Charles Macintosh](#) créé l'imperméable avec du [caoutchouc](#) sur des tissus comme le [coton](#). .1892 : [François Hennebique](#) dépose le brevet du [béton](#).

### I.1.3.3-Exemple de matériau composite

-Le *matériau composite* est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion). Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas.

Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc.), explique l'utilisation croissante des matériaux composites, dans différents secteurs industriels. Néanmoins, la description fine des composites reste complexe du point de vue mécanique.

### I.1.3.4-Principaux composites [C6]

Les fibres de verre sont utilisées notamment dans la fabrication de piscines.

Les fibres de carbone utilisées dans l'aviation.

Le contreplaqué utilisé en menuiserie, construction, ébénisterie.

Les cloisons de placoplâtre, très utilisé dans le bâtiment hors intempéries.

Le béton armé en génie civil.

La fibre d'aramide (ou Kevlar qui est une dénomination commerciale) utilisée dans les protections balistiques gilets pare-balles

(Attention, les gilets pare-balles ne sont pas des composites ! Par contre, le kevlar qui les compose est bien utilisé en tant que fibre pour composites dans d'autres types d'utilisations.)

Le GLARE composé principalement d'aluminium et de fibre de verre est utilisé en aéronautique

### I.1.3.5-Définitions

-Un *matériau composite* est constitué de l'assemblage de deux matériaux « ou plusieurs » 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.

Matériau composite : association d'au moins deux matériaux non miscibles. On obtient un matériau hétérogène.

### I.1.3.6-Les composants

**Matériau composite plastique** : association de deux constituants

**Le renfort** : armature, squelette, il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques).

#### a-Les fibres

Constituées par plusieurs centaines/milliers de filaments de diamètres variant de 5 à 15µm.  
Traitement sur machines textiles (mèches).

Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance à la compression faible. Parmi les fibres les plus employées on peut citer [C6]:

#### a.1- Fibre de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :



- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

#### a.2- Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances.

Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN

(Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

-fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;

-fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C

### a.3- Fibre d'aramide

Souvent appelée KEVLAR®, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide



de rigidités différentes :

- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

### a.4- Fibre de bore

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

### a.5- Fibre 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.

### a.6- Fibres de polyéthylène de haut module

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

### a.7- Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Tableau I.1 caractéristiques moyennes des fibres et renforts [C6]

Renfort	Diamètre du filament en $\mu\text{m}$	Masse volumique $\text{Kg/m}^3$	Module d'élasticité longitudinale (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (MPa)	Allongement à la rupture %	Coef de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	<b>d</b>	<b>M<sub>v</sub></b>	<b>E</b>	<b>G</b>	<b>K</b>	<b>C<sub>r</sub></b>	<b>A</b>	<b><math>\alpha</math></b>
Verre E	16	2600	74000	30000	0.25	2500	3.5	$0,5 \cdot 10^{-5}$
Verre R	10	2500	86000		0.2	3200	4	$0,3 \cdot 10^{-5}$
CarboneHM	6.5	1800	390000	20000	0.35	2500	0.6	$0,08 \cdot 10^{-5}$
CarboneHR	7	1750	230000	50000	0.3	3200	1.3	$0,02 \cdot 10^{-5}$
Kevlar 49	12	1450	130000	12000	0.4	2900	2.3	$-0,2 \cdot 10^{-5}$
Bore	100	2600	400000			3400	0.8	$0,4 \cdot 10^{-5}$
Silicated'alumine	10	2600	200000			3000	1.5	
Polyéthylène		960	100000			3000		

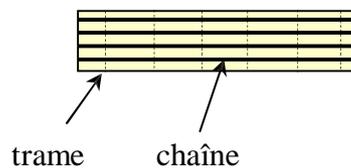
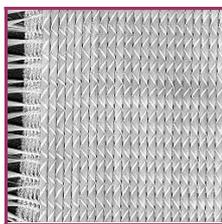
### a.8- Architecture des renforts

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif

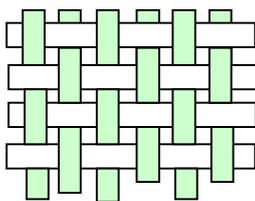
de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

Il existe différentes géométries et textures de renforts :

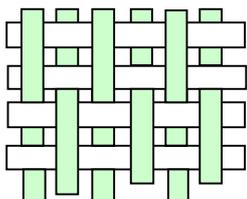
- **Les unidirectionnels (UD) :** Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.



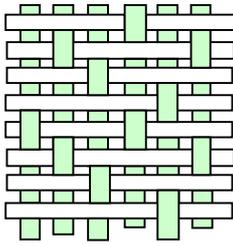
Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise[C6].



- **Toile ou taffetas :** Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

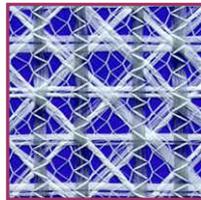


- **Serge :** Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.



- **Satin** : Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.

Comme un tissu est difficilement déformable sur une surface gauche, on réalise également pour des utilisations spécifiques des armures bi ou tridimensionnelles



*Tissu multiaxial*



*Tissu 3D ou tress*

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes.



*Tissu hybride carbone - aramide*

### **a.9-Ensimage**

Les renforts destinées à la fabrication des composites reçoivent un ensimage. L'ensimage est une dispersion aqueuse spécifique comportant un agent collant, un agent pontant et des agents antistatiques, permettant d'assurer différents rôles :

- compatibilité de la liaison fibre - matrice ;
- cohésion inter filamentaire (raideur du fil) pour qu'il soit manipulable ;
- protection contre l'abrasion générée par la mise en œuvre (frottement contre pièces métalliques) ;
- élimination des charges électrostatiques dues aux frottements ;
- augmentation du mouillage de la fibre au cours de l'imprégnation.

L'ensimage est spécifique pour une résine et un procédé donné.

### **b-Matrices**

La matrice a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi la protection du renfort vis à vis des diverses conditions environnementales. Elle permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé. Dans le cas des CMO (composites à matrices organiques) les principales matrices utilisées sont :

- Les résines [polyester](#) peu onéreuses qui sont généralement utilisées avec les fibres de verre et que l'on retrouve dans de nombreuses applications de la vie courante.
- Les résines [vinylester](#) sont surtout utilisées pour des applications où les résines polyester ne sont pas suffisantes. Elle est issue d'une modification d'une résine époxyde et est excellente pour des applications de résistance chimique.
- Les résines [époxy](#) qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les [fibres de carbone](#) pour la réalisation de pièces de structure et d'aéronautique.
- Les résines [phénoliques](#) utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue au feu et flammes imposées par les normes dans les transports civils.
- Les résines [polyimides](#) et bismaleimides pour des applications haute température.
- Les résines [thermoplastiques](#) comme le [polypropylène](#) ou le [polyamide](#).

Dans le cas des CMC (composites à matrices céramiques), la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium. Ces matrices sont déposées soit par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) par densification d'une préforme fibreuse, soit à partir de résines cokéifiables comme les résines phénoliques (dans le cas des matrices de carbone).

Dans le cas des CMM (composites à matrice métallique) le matériau composite est constitué :

- d'une matrice métallique (par ex. aluminium, magnésium, zinc, nickel,...)
- d'un renfort métallique ou céramique (par ex : fils d'acier, particules de SiC, carbone, alumine, poudre de diamant...)

### **b.1-Definitions**

**b.1.1-Résine thermodurcissable** : polymère transformé en un produit essentiellement infusible et insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physico-chimique (catalyse, durcisseur).

**b.1.2-Résine thermoplastique** : polymère pouvant être alternativement ramollie par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité.

**b.1.3-Résine thermostable** : polymère présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques.

**b.1.4-Elastomère thermoplastique** : polymère fortement élastique.

### **b.2-Rôle des matrices**

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.
- La structure des TD à la forme d'un réseau tridimensionnel qui se ponte (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

*Tableau I.2-Principales différences entre matrices TP et TD [C6]*

<b>Matrices</b>	<b>Thermoplastiques (TP)</b>	<b>Thermodurcissables (TD)</b>
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité renfort	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage + durcissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue Thermique	Réduite	Bonne
Chutes et déchets	Recyclables	Perdu ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	Emanation pour « méthode humide »

### **b.2.1- Les résines thermodurcissables**

- **Polyesters insaturés** : C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution.

Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.

Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale.

La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué

(épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique.

Il existe différents types de résines :

- Orthophtalique : la plus courante ;
- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité
- Bisphénol : possédant de bonne caractéristiques chimiques et thermiques

*Tableau I.3-Résine TD[C6]*

Avantages	Inconvénients
Bonne accroche sur fibre de verre Translucidité Bonne résistance chimique Mise en œuvre facile Tenue en température(>150°C) Prix réduit	Inflammabilité (sauf résine chlorée) Tenue vapeur et eau bouillante Retrait important (6à15%) Durée de conservation en pot limitée Emission de styrène

- **Vinylesters** : On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.
- **Phénoliques** : Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

- **Epoxydes** : Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :
  - du durcissement à chaud ou à froid ;
  - de la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C).

*Tableau I.4-Résine époxyde[C6].*

Avantages	Inconvénients
Tenue mécanique, thermique, chimique et fatigue Faible retrait (1 à 2 %) Excellente adhérence sur fibres Auto-extinguibilité Mise en œuvre facile, sans solvant	Prix élevé Sensibilité à l'humidité et aux UV Vieillessement sous température Sensibilité aux chocs Temps de polymérisation

- **Polyuréthannes et polyurées** : Dans la fabrication de pièces composites, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides :
  - Polyols + polyisocyanates = polyuréthannes ;
  - Polyéthers + polyamines = polyurées.

*Tableau I.5- Polyuréthannes et polyurées[C6].*

Avantages	Inconvénients
Facilité de moulage in situ Tenue chimique Vieillessement	Résistance mécanique réduite Combustibilité Coloration en masse difficile : foncée

- **Polyimides** : Ces résines sont surtout utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures ( $> 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.
- **Bismaléimides** : Matrices très peu utilisées en Europe. Elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre.

Tableau I.6 Matrice TD[C6].

Matrices TD	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C <sup>-1</sup>
	Mv	E	G	k	C <sub>r</sub>	A	$\alpha$
Epoxyde	1 200	4 500	1 600	0,4	130	2	11*10 <sup>-5</sup>
Phénolique	1 300	3 000	1 100	0,4	70	2,5	1*10 <sup>-5</sup>
Polyester	1 200	4 000	1 400	0,4	80	2,5	8*10 <sup>-5</sup>
Polycarbonate	1 200	2 400		0,35	60		6*10 <sup>-5</sup>
Vinylester	1 150	3 300			75	4	5*10 <sup>-5</sup>
silicone	1 100	2 200		0,5	35		
Uréthane	1 100	700 à 7 000			30	100	
Polyimide	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0.35	70	1	8*10 <sup>-5</sup>

### b.2.2- Les matrices thermoplastiques

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement à l'aide de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle.

Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à 100°C, hors POM) sont les suivantes

- Polyamide (PA) : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures ;
- Polytéraphthalate éthylénique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité ;
- Polycarbonate (PC) : tenue au choc ;
- Polysulfure de phénylène (PPS) : résistance à l'hydrolyse ;
- Polyoxyméthylène (POM) : bonne tenue à la fatigue ;
- Polysulfurés (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud ;
- Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- Polyamide imide (PAI) ;
- Polyéther imide (PEI) ;
- Polyéther sulfone (PES) ;
- Polyéther éther cétone (PEEK).

Tableau I.7- Matrice TP[C6].

Matrices TP	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C <sup>-1</sup>
	Mv	E	G	k	C <sub>r</sub>	A	α
<b>PP</b>	900	1 200		0.4	30	20 à 400	9*10 <sup>-5</sup>
<b>PPS</b>	1 300	4 000			65	100	5*10 <sup>-5</sup>
<b>PA</b>	1 100	2 000		0.35	70	200	8*10 <sup>-5</sup>
<b>PES</b>	1 350	3 000			85	60	6*10 <sup>-5</sup>
<b>PEI</b>	1 150	3 300			105	60	6*10 <sup>-5</sup>
<b>PEEK</b>	1 300	4 000			90	50	5*10 <sup>-5</sup>

### c- Les charges

On désigne sous le nom général de **charge** toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

A l'inverse des matières *thermoplastiques*, les matières *thermodurcissables* ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse.

Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences[C6]. :

- Compatibilité avec la résine de base ;
- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient.

#### **c.1-Les charges organiques**

- Charges cellulosiques, utilisées en tant que **charges des résines thermodurcissables**

(phénoplastes et aminoplastes).

Les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité.

- Farines de bois, farines d'écorces de fruit et de noyaux, fibre végétales, pâtes de cellulose, amidons

#### **c.2-Les charges minérales**

- Craies et carbonates, les argiles et alumino-silicates, les silices, les talcs, la wollastonite

#### **c.3- Oxydes et hydrates métalliques**

- Poudres et microsphères, alumine et trihydrate d'aluminium, trioxyde d'antimoine, oxyde de béryllium, les céramiques

#### **c.4-Le verre**

- Poudres de verre, billes de verres creuses, microsphères de verre

#### **c.5-Le carbone**

- Le noir de carbone

### **I.1.3.7-Les matériaux composites structuraux**

#### a-Monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes[D2].

#### b-Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

Notation " composite " : Un stratifié possédant l'empilement  $(0, +45, +90, -45)_2s$  est un stratifié avec 4 couches dans les directions  $0^\circ, -45^\circ, 90^\circ$  et  $+45^\circ$ , l'orientation  $0^\circ$  coïncidant avec la direction 1 du repère principal du composite. Ces plans seront réparties symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.

On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientée suivant la direction  $+\theta$  que de couches orientée suivant la direction  $-\theta$ .
2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
3. Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à  $0^\circ$  que de couches à  $90^\circ$ .

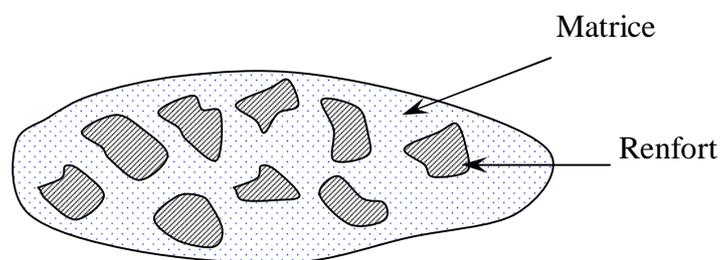
#### c-Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique [D2].

### I.1.3.8- Propriétés des matériaux composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux « ou plusieurs » 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.

Un matériau composite consiste dans le cas le plus 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* ou *matériau renforçant*.



*Fig1.8. Matériau composite*

Du fait de leurs faibles sections (diamètres de 10 à 20  $\mu\text{m}$ ), les fibres ne peuvent toutefois être utilisées directement dans des applications mécaniques, d'où l'idée de les incorporer dans une matrice polymère pour constituer un composite à fibres. La matrice a alors diverses fonctions : lier les fibres entre elles, transférer les charges mécaniques aux fibres, protéger les fibres de l'environnement extérieur [M6] .

### I.1.3.9- Classification des composites

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrices organiques, à matrice métallique ou à matrice minérale. Parmi ces composites, on peut citer :

- Composites à *matrice organique* (résine), avec :
  - des fibres minérales : verre, carbones, etc.
  - des fibres organiques : kevlar, polyamides, etc.
  - des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

- Composites à *matrices métallique* (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :
  - des fibres minérales : carbones, carbure de silicium (SiC).
  - des fibres métalliques : bore,
  - des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium.
- Composites à *matrice minérale* (céramique), avec :
  - des fibres métalliques : bore,
  - des particules métalliques : cermets,
  - des particules minérales : carbures, nitrures, etc [D2].

### I.1.3.10- Caractéristiques mécaniques des composites

Partant des considérations précédentes, il reste à rechercher les matériaux les plus performants : module d'élasticité élevé, masse volumique faible. Le tableau suivant donne les performances spécifiques de matériaux classiques élaborés sous forme massives et les matériaux élaborés sous formes de fibres [B1].

Tableau I.8. Caractéristiques spécifiques des matériaux usuels, élaborés sous forme massives[B1].

	<b>Module E (GPa)</b>	<b>Contrainte à la rupture <math>\sigma_u</math> (MPa)</b>	<b>Masse volumique <math>\rho</math> (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Module spécifique <math>E/\rho</math> (MN m/kg)</b>	<b>Contrainte spécifique <math>\sigma_u / \rho</math> (kN m/kg)</b>
<b>Acier</b>	210	340-2100	7800	26,9	43-270
<b>Alliages d'aluminium</b>	70	140-620	2700	25,9	52-230
<b>Bois</b>	30	-	390	33,3	-
<b>Verre</b>	70	700-2100	2500	28	280-840

Tableau I.9- Caractéristiques spécifiques des matériaux élaborés sous forme de fibres[B1].

	<b>Module E</b>  (GPa)	<b>Contrainte à la rupture</b>  $\sigma_u$ (MPa)	<b>Masse volumique</b>  $\rho$ (Kg / m <sup>3</sup> )	<b>Module spécifique</b>  $E/\rho$ (MN m/kg)	<b>Contrainte spécifique</b>  $\sigma_u / \rho$ (kN m/kg)
<b>Verre-E</b>	72,4	3500	2540	28,5	1380
<b>Verre-S</b>	85,5	4600	2480	34,5	1850
<b>Carbone à</b>					
-haut module	390	2100	1900	205	1100
-contrainte élevée	240	3500	1850	130	1890
<b>Kevlar</b>	130	2800	1500	87	1870
<b>Bore</b>	385	2800	2630	146	1100

tableaux qui suivent donnent les valeurs typiques de tissu de carbone de la compagnie Sika et le TFC® (tissu de fibre de carbone) de la compagnie Saptia.

Différentes longueurs sont disponibles 10, 25, 50, jusqu'à 250m.

Pour le renforcement en cisaillement la compagnie Sika, propose le tissu Wrap® de longueurs 45,70 m et de 3,05 m ou 6,10 m de largeur. Ces propriétés se résument dans le tableau suivant[Net03]. :

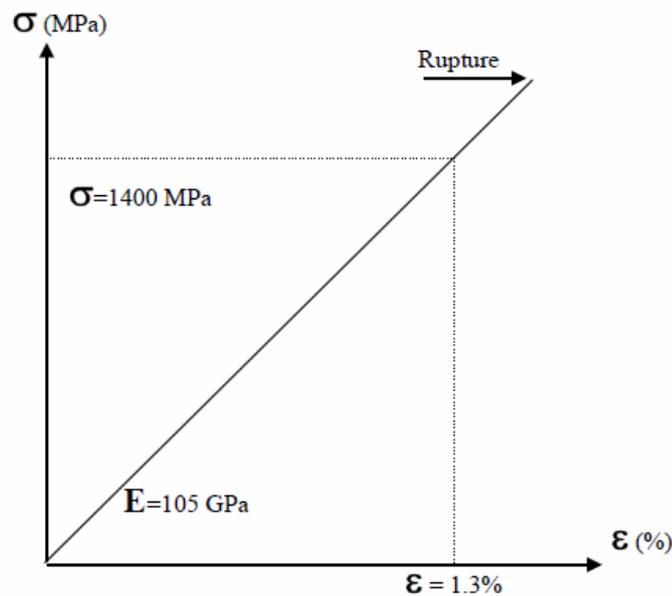
Tableau I.10- Propriétés du Tissu Sika Wrap®

<b>Propriétés</b>	<b>Wrap</b>
<b>Module d'élasticité (MPa)</b>	230 000
<b>Allongement à la rupture (MPa)</b>	1,5%
<b>Résistance à la rupture par traction (MPa)</b>	3500
<b>Largeur</b>	305 ou 610 mm
<b>Epaisseur</b>	0,13 mm

La compagnie Sapta qui est partenaire de Freyssinet Italie commercialise le TFC<sup>®</sup> (Tissu de fibre de carbone). C'est un composite à base de fibre de carbone matricées dans un liant synthétique appliqué à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour former le complément d'armature de renforcement désiré. Le TFC<sup>®</sup> est livré en rouleau à la longueur commandée n'excédant pas 50 m. Le tableau ci-après indique les principales caractéristiques Ces propriétés sont donnés dans le tableau suivant [Net03].

Tableau I.11 . Propriétés du TFC<sup>®</sup>

Propriétés	TFC Freyssinet
Module d'élasticité (MPa)	105 000
Allongement à la rupture (MPa)	1,3%
Résistance à la rupture par traction (MPa)	1400
Largeur	75, 150, 200, 300 mm
Epaisseur	0,43



FigI.9- Loi de comportement du TFC<sup>®</sup>

Valeurs de contraintes et allongement garanties à la rupture

### **I.1.3.10-Environnement**

La plupart des composites sont à base de polymères thermodurcissables, ce qui les rend difficilement recyclables. Cette contrainte va donc à l'encontre du développement durable. On peut aussi voir de nouvelles recherches axées sur les biocomposites notamment avec des fibres issues de plantes. Les biocomposites sont des matériaux formés par une matrice (résine) et un renfort de fibres naturelles provenant usuellement des plantes ou de la cellulose (fibre de bois, chanvre,...). De plus, ils contribuent au respect de l'environnement car ils sont biodégradables, utilisés dans l'ingénierie des tissus, des applications cosmétiques et de l'orthodontie. Ces biocomposites ne sont pas encore prêts à être mis sur le marché pour des secteurs de pointe. L'industrie française s'intéresse grandement à ce type de matériau<sup>1</sup>

Il est à noter qu'un composite n'est entièrement biodégradable que si la matrice utilisée, en plus de fibres naturelles, l'est elle-même (par exemple, du PLA, polyacide lactique). Dans le cas où on emploie une résine de type "classique" (polyester, époxy...), l'intérêt d'utiliser des fibres naturelles comme renfort sera le caractère renouvelable de celles-ci, mais on ne pourra pas parler de composite biodégradable.

## I.2- LES PATHOLOGIES DU BETON ARME : CAUSES ET CONSEQUENCES

Le béton armé est l'intime assemblage d'armatures (généralement en acier) et de béton afin de compenser la mauvaise tenue de ce dernier à la traction. Cet assemblage est rendu possible grâce à la dilatation comparable des deux matériaux.

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en oeuvre des bétons

### I.2.1- Les causes physiques de dégradation

**Abrasion** : Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.

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

**Cavitation** : Usure d'une structure hydraulique caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau.

**Chocs** : Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils.

**Surcharges** : Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton.

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

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

certaines composés chimiques expansifs tels que : L'étringite, le gypse et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.

## **I.2.2-Les causes chimiques de dégradation**

**I.2.2.1-Alcali-réaction ou cancer du béton :** Réaction qui se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide. Des gels gonflants apparaissent en développant des microfissures et un éclatement du béton.

**I.2.2.2-Réactions sulfatiques :** Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étringite, le gypse et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.

**I.2.2.3-Corrosion :** Attaque des matériaux par les agents chimiques. Sur les métaux, la corrosion est une oxydation.

### **a-Introduction**

La durée de vie des structures en béton armé est conditionnée par la réponse aux agressions physiques et chimiques de l'environnement, ainsi que par la capacité des matériaux constitutifs à se protéger contre ces attaques. La corrosion des armatures en acier est une des causes majeures de dégradation des structures en béton armé. Le béton d'enrobage par son pH basique protège naturellement l'armature des agressions de l'environnement. Dès les premiers instants de la mise en place du béton, le pH élevé va conférer à l'acier un état de passivation, protégeant les armatures grâce à une fine couche d'oxyde de fer stable. Cette protection va être mise en péril principalement par deux phénomènes. La dépassivation peut intervenir suite à la carbonatation du béton par le dioxyde de carbone de l'air. Ce phénomène va causer une corrosion plutôt lente et généralisée (vitesse de corrosion de l'ordre de  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Une concentration importante de chlorures aux niveaux des armatures, combinée ou non avec la carbonatation, formera des piqûres de corrosion, engendrant un processus rapide et fortement localisé (vitesse de corrosion de l'ordre de  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Quand la fine couche de protection est détruite, l'acier est dépassivé, la période dite d'initiation est terminée et nous entrons alors dans une nouvelle phase dite de propagation de la corrosion [T1].

## b-Les stades de corrosion

Le stade d'incubation de la corrosion correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage de béton, sans corroder les armatures. Il s'arrête lorsqu'au niveau des armatures, la teneur en agent agressif atteint un certain seuil.

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

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

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

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

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

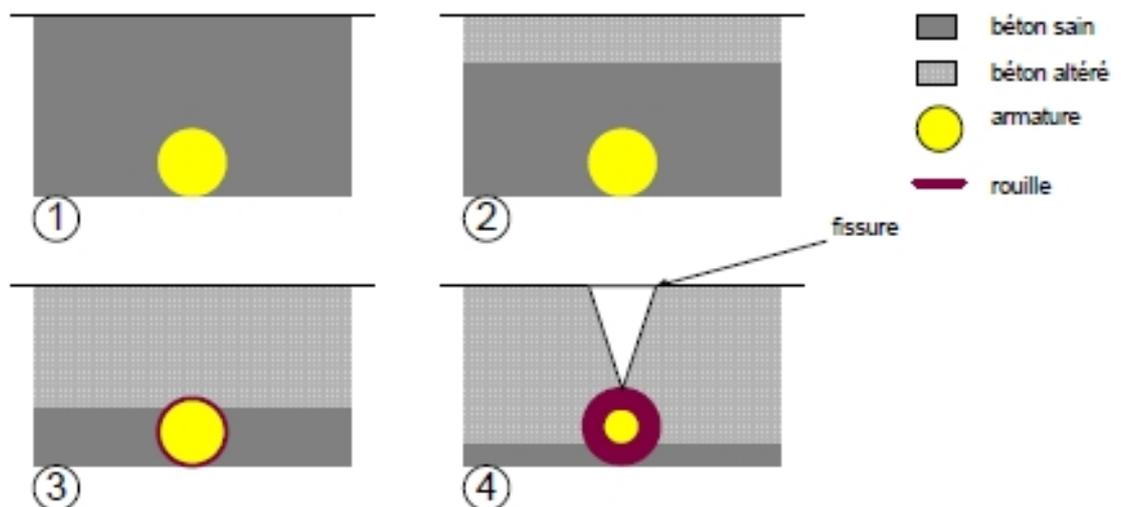


Fig I.10- Dégradation due à la corrosion. [M2].

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

L'apparition des fissures dépend fortement des caractéristiques de l'enrobage : épaisseur, résistance mécanique, etc. Plus précisément, une fois que l'armature a commencé à se corroder, les fissures apparaissent très tôt même dans un béton de bonne résistance mécanique. Les produits de corrosion diffusent facilement dans un béton poreux et tachent le parement.

### **c-Conséquence de la corrosion**

Les conséquences de la corrosion sur la structure sont non négligeables et se reflètent de différentes façons dépendantes ou non. Une des premières conséquences est **la réduction de section de l'armature corrodée**, qui aura des répercussions sur d'autres paramètres. En effet, celle-ci va s'accompagner d'une expansion volumique globale de l'armature, car l'acier corrodé va se transformer en rouille qui va s'hydrater et occuper un volume qui sera environ **deux ou trois fois le volume de l'acier sain**. [M2] Par réaction, cette augmentation de volume va induire une pression de rouille dans le béton environnant et provoquer sa **fissuration**. Ce phénomène aura une conséquence directe sur le processus de corrosion, car la fissuration va faciliter **la pénétration des agents agressifs** et donc accélérer la corrosion. Un second mécanisme subit l'influence de la corrosion, **l'adhérence entre l'acier et le béton sera modifiée** en fonction de l'état de l'interface. Expérimentalement, l'adhérence évolue suivant trois phases.

-Dans la première, correspondant aux faibles pourcentages de corrosion, **l'adhérence augmente légèrement** du fait de l'augmentation de la rugosité de la barre apportée par la rouille adhérente.

-La seconde phase correspond à **la chute brutale de l'adhérence** résultant de l'accumulation de produits de corrosion autour de l'armature, ayant pour effet direct d'émousser les nervures des barres d'acier et de provoquer une fissuration longitudinale responsable d'une perte de confinement. La transmission de l'effort entre l'acier et le béton se trouve ainsi reportée de plus en plus loin des fissures transversales ou primaires.

-Dans la troisième phase, **la contrainte d'adhérence évolue de façon constante** avec une valeur très faible, environ 10% du maximum de contrainte observé pour un pourcentage de corrosion nul.

Cette phase correspond à un comportement résiduel. La combinaison de tous les paramètres précédemment cités va provoquer dans les cas les moins graves une altération

de l'aspect extérieur des ouvrages, et dans les cas les plus graves une diminution de la capacité portante.

*La corrosion entraîne donc des dégâts majeurs : une altération de l'aspect extérieur des ouvrages dans les cas les moins graves, une détérioration de l'étanchéité, des problèmes de sécurité, une diminution de la capacité portante de la structure dans les cas les plus sévères.*

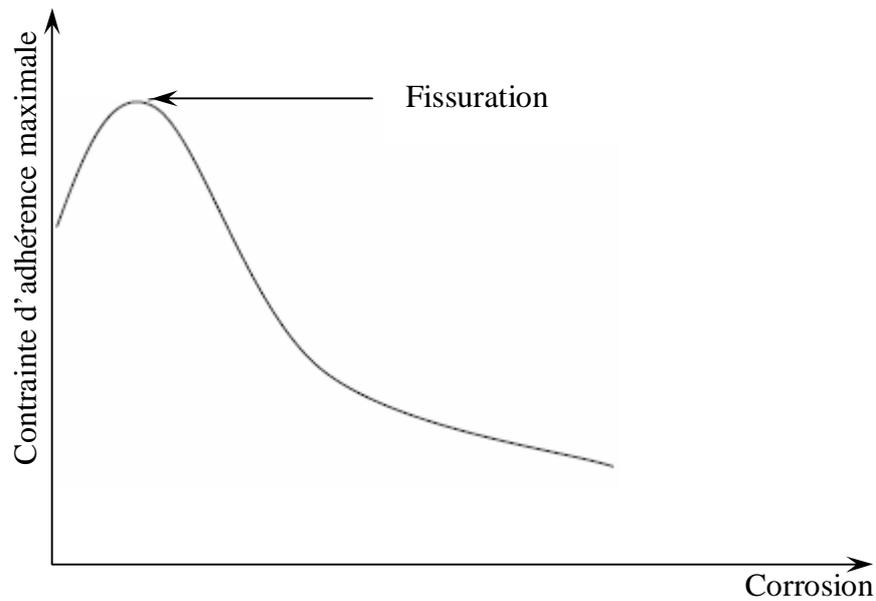
*Tous les symptômes visibles de ces altérations tels que l'émergence des produits de corrosion en surface avec formation de cavités, l'apparition de fissures, le décollement du béton d'enrobage, traduisent un état de dégradation avancé et imposent une réparation urgente de façon à rétablir une qualité acceptable de la construction.*

#### **d-L'influence de la corrosion sur le comportement mécanique des structures en BA**

La corrosion des armatures est l'une des principales causes de dégradation précoce des structures en béton armé. Quand les agents agressifs ont atteint les armatures, à cause soit de la carbonatation du béton d'enrobage soit de l'attaque par les chlorures, la sécurité et l'état de service des structures se trouvent fortement altérés, tout d'abord par le comportement de l'acier[M2].

En effet l'armature subit une perte de section ainsi qu'une modification de ses propriétés mécaniques. Ensuite, le comportement du béton d'enrobage évolue, il va se fissurer à cause des produits résultant de la corrosion. Enfin, *la diminution de l'adhérence acier-béton est observée.*

Globalement le comportement de l'adhérence comporte plusieurs phases dans son évolution avec la corrosion (voir figure I.11). A partir d'essais d'adhérence réalisés par de nombreux auteurs [A1], [C2], [A2], [A3], [C3], nous pouvons distinguer trois phases essentielles en relation avec la contrainte d'adhérence maximale.

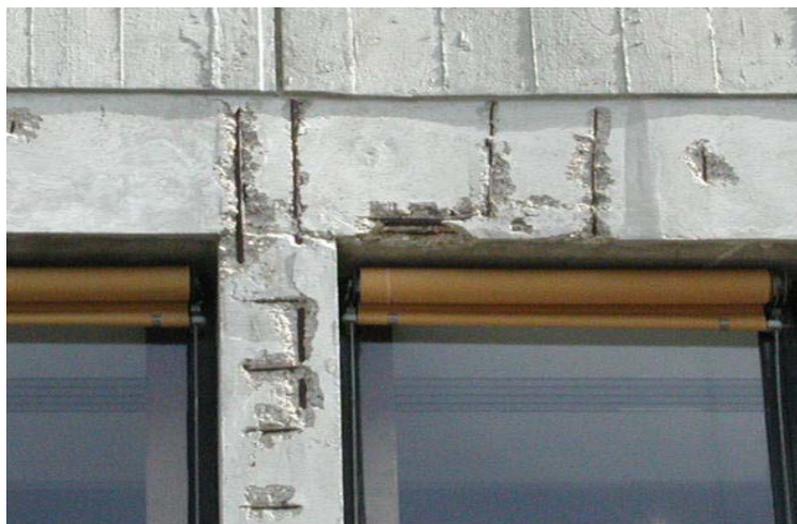


*Fig I.11- Représentation schématique de la variation de l'adhérence maximale avec la corrosion. [D1]*

### I.2.3-Quelques photos d'ouvrages en béton arme dégradés par corrosion de armature

Les ouvrages et éléments concernés par la corrosion des armatures sont les suivants :

- **Bâtiments** : acrotères et balcons, dans toutes les atmosphères, éléments Verticaux et terrasses, en milieu industriel et maritime. Ce sont bien sûr les Éléments les plus sensibles des bâtiments, du fait soit de leur minceur, soit de la difficulté à maintenir des enrobages suffisants



*FigI.12 : Eclat en formation[Net01].*

• **Bâtiments industriels** : poteaux et dalles. Ces éléments sont en effet soumis assez souvent à des expositions d'agents chimiques. Les poutres sont également des éléments particulièrement sensibles des constructions industrielles, car supportant parfois les dalles de plancher. Certaines d'entre elles sont parfois dans des états assez surprenants



*Fig I.13: Poutre support de réservoir [Net02].*

• **Parkings** : poutres et dalles, en milieu maritime ou montagneux. Cela est lié dans les deux cas à la présence des chlorures (provenant respectivement de l'eau de mer et des sels de déverglaçage [Net01]).



*Fig. I.14-: Poteau porteur sous garage*



*Fig. I.15 : Poteau support de ligne électrifiée*

- **Ponts et ouvrages d'art** : dans cette catégorie d'ouvrages, il apparaît que les zones les plus sensibles soient les tabliers, les appuis en superstructures, et les équipements de tablier où l'influence des sels de déverglaçage est importante.

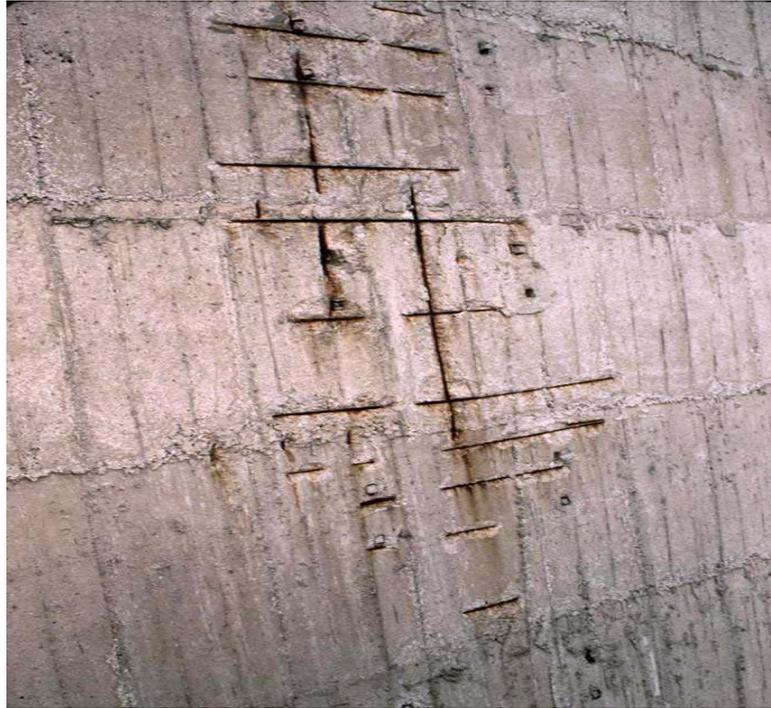


*Fig I.16 : Pile de pont[Net01].*

- **Réservoirs (enterrés, au sol, aériens)** : le principal problème de ces structures est lié aux circulations d'eau dues soit à la présence de fissures d'origines diverses (thermiques, mécaniques,...) ou de défauts d'enrobages des armatures, notamment si le milieu contient des sels agressifs (chlorures notamment).  
Sur les structures existantes souffrant de fissures, ou de fuites diffuses, les réparations consistent à colmater les défauts ou à installer une étanchéité

- **Silos** : les silos pour le stockage des matériaux granuleux ou poudreux (céréales, ciments,...) sont soumis à de fortes contraintes, notamment pendant les périodes de chargement et de déchargement. Ces contraintes induisent des fissures, verticales ou horizontales. Celles-ci peuvent être à l'origine de pénétration d'eau, engendrant une corrosion des armatures.

- **Aéroréfrigérants industriels, de centrale nucléaire** : ces structures sont soumises à un environnement sévère (brouillard d'eau sous forme de vapeur ou de gouttelettes entraînées à l'intérieur, soleil, pluie ou gel à l'extérieur) engendrant des contraintes amorçant des fissures. Par ailleurs le fort gradient hydrique est à l'origine d'un transfert de vapeur d'eau pouvant être la source d'altération du béton.



*Fig.I.17: Paroi d'aéroréfrigérant[Net01].*

- **Cheminées** : les cheminées (industrielles notamment) sont soumises à un environnement très sévère, acide particulièrement (acide sulfurique et acide chlorhydrique).
- **Structures portuaires** : celles situées en bord de mer souffrent de l'agression due aux chlorures. L'intensité de la corrosion est liée à l'agressivité du milieu (zone de marnage, d'éclaboussures, d'embruns). Des défauts d'enrobage ou de qualité du béton sont alors immédiatement mis en évidence



*Fig.I.18 : Pile en zone de marnage[Net01].*



*Fig. I.19: Poutre de tablier de pont[Net02].*



*Fig. I.20 : Quai en zone de marnage[Net02].*

- **Canalisations en béton armé et précontraint** : la plupart sont enterrées, et des ruptures surviennent lorsque la protection du béton n'est plus suffisante (défauts locaux d'enrobage, présence de chlorures).



*Fig.I.21: Tuyau en béton armé[Net01].*

Il faut également signaler les **monuments historiques protégés** (églises ou autres ouvrages des architectes tels que A. Perret ou Le Corbusier), en béton armé, de plus en plus nombreux, qui possèdent leurs contraintes propres, notamment en termes de réparation.



*Fig. I.22: Parement en béton armé[Net02].*

### I.2.3.1- Milieux basiques

Les solutions basiques ( $\text{pH} > 7$ ) sont peu agressives vis-à-vis de ciment Portland lorsque leur concentration reste modérée ( $< 20\%$ ). Cependant, pour des concentrations plus élevées, ou lorsque des risques d'accumulations des sels existent (généralement par évaporation), des dégradations sont observables surtout si le ciment utilisé est riche en  $\text{C}_3\text{A}$ .  
 obtenue avec les eaux pures à  $\text{pH} 4,5$  [L1]). En milieu insaturé, il se forme aussi des nitro-aluminates de calcium particulièrement expansifs qui accélèrent les réactions de dégradation (voir figure). Les autres sels d'ammonium (chlorures, sulfates) entraînent des dégradations mais à une vitesse moindre.



*Fig. I.23. . Dégradation des poutres d'une structure du complexe de fabrication d'engrais (nitrate d'ammonium) Annaba [C4]*

- a) Fissures et éclatement de l'enrobage avec lixiviation
- b) Effondrement partiel d'une poutre

### I.2.3.2 Altérations due aux chocs

Les chocs sont souvent d'origine accidentelle et donc non prévisible, dans le meilleur des cas, ils n'entraînent que des épaufrures, des éclats importants de béton voire même des ruptures d'acier. Dans les cas les plus graves par exemple chute de pierre (figure), ou choc de camion, ils peuvent entraîner le remplacement de certains éléments de structure (poutre préfabriquée) voir la rupture de l'ouvrage.





### **I.3- Mesures préventives-démarche à suivre pour réhabiliter un ouvrage en béton armé dont les armatures sont corrodées**

#### **I.3.1- Mesures préventives**

Très souvent, il n'y a intervention sur un ouvrage qu'à partir du moment où les désordres deviennent nettement visibles et que les morceaux de béton qui se détachent mettent en jeu la sécurité des usagers et des tiers. Les réparations à effectuer sont donc lourdes et coûteuses (élimination du béton pollué, reconstitution de l'enrobage des armatures,...). Pour remédier à une telle situation, des mesures préventives doivent être prises dans un premier temps lors de la mise en oeuvre de l'ouvrage puis dans un second temps durant la vie de l'ouvrage sous réserve d'effectuer périodiquement quelques campagnes de mesures. Une telle attitude a pour avantages[R5] :

- d'empêcher les agents agressifs de pénétrer dans le béton ;
- de détecter les désordres et les défauts que peut présenter le béton ;
- de permettre à l'ouvrage de remplir convenablement les fonctions pour lesquelles il a été conçu pendant longtemps ;

Plusieurs stratégies sont disponibles pour prévenir les ouvrages de la corrosion et une attention particulière doit leur être portée car comme dit un adage populaire, « prévenir vaut mieux que guérir ».

##### **I.3.1.1- Enrobage des armatures**

L'enrobage assure la protection physique en jouant un rôle de barrière vis-à-vis de l'environnement. Sa qualité (compacité, teneur en ciment, etc.) et son épaisseur (3 cm en milieu non agressif et 5 cm en milieu marin) sont des facteurs essentiels à la bonne tenue des armatures face à la corrosion.

##### **I.3.1.2-Prévision de la carbonatation**

La carbonatation correspond à une valeur particulière de la teneur en dioxyde de carbone dans le béton. Cette pénétration de la carbonatation correspond à une diffusion de dioxyde de carbone [R5].

La progression de la carbonatation peut être également ralenti en :

- augmentation le dosage en ciment ;

- diminuant le rapport eau/ciment (E/C) ;
- en augmentant le temps de cure (traitement du béton au jeune âge pour éviter par exemple la dessiccation.)

### **I.3.1.3- Prévision de la pénétration des chlorures**

La pénétration des chlorures est un processus de diffusion, lorsque le béton est saturé d'eau et que le ciment ne réagit pas trop avec ces sels. Les armatures sont dans un béton pratiquement saturé d'eau, lorsque leur enrobage est assez épais et se dessèche peu (cas des structures en sites maritimes ou montagneux)

### **I.3.1.4- Le revêtement par galvanisation**

Le revêtement par galvanisation est obtenu en trempant l'acier préalablement nettoyé et décapé, dans un bain de zinc à une température voisine de 450°. A l'immersion de l'acier dans le zinc fondu, il se produit une réaction entre les deux métaux (diffusion entre fer et zinc) qui entraîne de couches d'alliages.

Un revêtement de galvanisation augmente la durabilité des armatures dans un béton qui subit une carbonatation. Par ailleurs, la mise en place des armatures galvanisées est moins critique que celle des aciers nus lorsque l'épaisseur d'enrobage ne peut pas satisfaire les exigences réglementaires [R5].

La teneur en chlorures qui amorce la corrosion des armatures est plus élevée dans le cas des aciers galvanisés que dans celui des aciers nus, mais cet effet protecteur cesse si le taux de chlorures est trop élevé.

La surface des armatures galvanisées est différente de celle des aciers ordinaires. Ainsi, le diagnostic de leur état de conservation ne peut pas se faire par des mesures de potentiel d'électrode. Par ailleurs, il n'est pas conseillé d'appliquer des traitements électrochimiques de déchloruration ou de ré-alcalinisation du béton qui pourraient dégrader le revêtement de galvanisation.

### **I.3.1.5- L'utilisation des armatures en acier inoxydable**

L'acier inoxydable peut être utilisé soit comme un revêtement d'armatures en acier non allié, soit comme matériau constitutif de l'armature.

En ce qui concerne la corrosion, un acier inoxydable risque de se corroder par piqûre en présence de chlorures, surtout si la nuance a été mal choisie. Les nuances les plus couramment utilisées sont alliées au chrome et au nickel : Z 6CN18-09 à 18% de Ni (d'après AISI 304), et Z2CND17-13 à 17% de cr et 13% de Ni (selon AISI 3/6L). Ces aciers particuliers tolèrent une concentration en cl- au moins 10 fois plus grande que celle pouvant amorcer la corrosion de l'acier ordinaire.

On pourrait utiliser l'acier inoxydable seulement aux endroits qui présentent un risque élevé de corrosion et l'acier ordinaire dans les zones à faible risque. On éliminerait ainsi la nécessité de recourir à d'autres stratégies préventives.

L'acier inoxydable est plus coûteux que l'acier ordinaire mais il peut durer 3 à 4 fois plus longtemps que ce dernier[M5].

#### **I.3.1.6 - Revêtements organiques**

Parmi les revêtements organiques, le revêtement époxydique (ou époxy) convient le mieux pour protéger les armatures. Ce processus donne un film épais de 150 à 300 µm.

Une autre méthode consiste à immerger dans un lit fluidisé de poudre de résine époxydique, des cages d'armatures, qui peuvent être placées dans le coffrage pour béton immédiatement après leur traitement. Elle permet aussi des revêtements plus épais.

Un revêtement époxydique diminue l'adhérence entre l'armature et le béton, surtout pour les barres de gros diamètres, ou lisses.

Par ailleurs, les spécifications d'utilisation des armatures revêtues d'époxy recommandent de limiter le nombre et la taille des défauts sur le revêtement et de les réparer.

Il est rappelé qu'un revêtement organique est un isolant électrique qui rend difficile, voire impossible, l'application de techniques électrochimiques de diagnostic (mesure de potentiel d'électrode, de vitesse de corrosion) ou de traitement contre la corrosion (protection cathodique, ré-alcalinisation, déchloration) [M5].

#### **I.3.1.7-Protection des armatures par matériaux composites**

*Le matériau en question est le TFC (tissu de fibre de carbone). Vu sa bonne insensibilité à la corrosion, il peut être comme solution de protection des armatures contre la corrosion. Mais on aura à faire à un problème d'adhérence. Cela fait l'objet de notre recherche*

### **I.3.2-Demarche à suivre pour réhabiliter un ouvrage en béton armé**

#### **Les méthodes de réhabilitation :**

##### **I.3.2.1. Reconstitution de l'enrobage**

Plusieurs méthodes sont disponibles pour réparer durablement un parement en béton, arrêter la progression des dégradations et éviter de nouveaux désordres. Elles supposent une mise en oeuvre attentive, le contrôle des résultats et une surveillance adaptée.

##### **I.3.2.2-Elimination des zones dégradées**

Avant de réparer les zones dégradées (armatures apparentes, éclatements de béton, traces de rouille, etc.), les revêtements en place doivent être retirés, sur toute la surface, par un moyen mécanique ou chimique. Les produits de démolition doivent être mis en décharge ou recyclés, en conformité avec les textes réglementaires en vigueur sur la protection de l'environnement [R5].

Pour traiter les armatures corrodées, il convient de les dégager par burinage, repiquage ou bouchardage, jet d'eau ou sablage. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce qu'un acier

sain apparaisse et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, selon la norme NF P 95.101 (un dégagement d'un minimum de 2 cm derrière l'armature, est conseillé). Lorsque les armatures qui ne sont pas parallèles au parement sont corrodées à leurs extrémités, le béton avoisinant doit être enlevé et ces extrémités doivent être amputées de 2 cm, pour rétablir un enrobage suffisant.

La phase d'élimination de la zone sous corrosion, constitue l'une des tâches les plus délicates

à réaliser. La bonne tenue dans le temps des réfections de parement, dépend directement de la qualité d'exécution de ces travaux. Il est donc impératif d'éliminer l'intégralité de cette altération, qu'elle soit foisonnante ou de surface, et ceci sur toute la périphérie de l'acier, par décapage et brossage soigné ou par des moyens mécaniques (sablage, hydrosablage, etc.). Cette opération doit être plus particulièrement soignée en milieu marin, car la rouille y est chargée de chlorures acides. Les surfaces de bétons sont ensuite nettoyées, afin de

faire disparaître toute poussière ou toute souillure, subsistant après l'élimination des bétons dégradés. Ce nettoyage peut être réalisé par voie humide ou sèche (brossage et soufflage), mais dans le cas du lavage à l'eau, celle-ci doit être éliminée par soufflage ou par aspiration

### **I.3.2.3. Remplacement des armatures fortement corrodées**

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 soudure, 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 soudures, celles-ci devront être effectuées, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée[M5].

### **I.3.2.4. Protection des armatures**

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques ou esthétiques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements (BAEL 91, par exemple), 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.



**Fig I.28. Protection des armatures [J1]**

## I.4-ADHERENCE BETON-ARMATURE

### I.4.1-Introduction

L'adhérence entre le béton et l'armature est la propriété qui permet l'existence et la pérennité d'une structure en B.A. à l'état fissuré. Pour cette raison, cette propriété a été largement étudiée depuis l'apparition des premières structures en B.A.

Il est remarquable qu'en 1913 déjà Abrams avait réalisé une grande série d'essais du type "Pull-out" et "Beam test", ou il avait étudié expérimentalement l'influence des divers paramètres gouvernant le comportement de la liaison béton- armature [A4]

Le mécanisme de transmission des forces par adhérence depuis une section fissurée d'une poutre fléchie en B.A. illustré à la figure suivante ;a été mis en évidence par Saliger en 1936 [S1]

A partir de l'équilibre entre la force dans l'armature au droit de la fissure et celle résultante des contraintes d'adhérence au voisinage de la fissure, Saliger a tiré l'expression de l'espacement maximum des fissures. En admettant que la distribution des contraintes d'adhérence au voisinage d'une fissure est linéaire, il a écrit l'espacement maximal entre les

fissures sous la forme :

$$S_{r,\max} = \frac{\phi}{\rho} * \frac{f_{ctm}}{\tau_{\max}}$$

$\tau_{\max}$  contrainte d'adhérence maximum au voisinage de la fissure

La loi d'adhérence a été obtenue à partir d'essais d'adhérences réalisés en laboratoires. L'influence des divers facteurs sur cette loi a été étudiée expérimentalement lors des grandes campagnes d'essais comme celles de Rehm et Martin et Noakowski [R2], [M3]. Les essais d'adhérence réalisés ces deux dernières décennies ont visés à déterminer l'influence d'un facteur particulier sur la relation d'adhérence, comme "**le type et la position des armatures, la consistance du béton frais, la résistance du béton durci, le type et la durée du chargement.**"

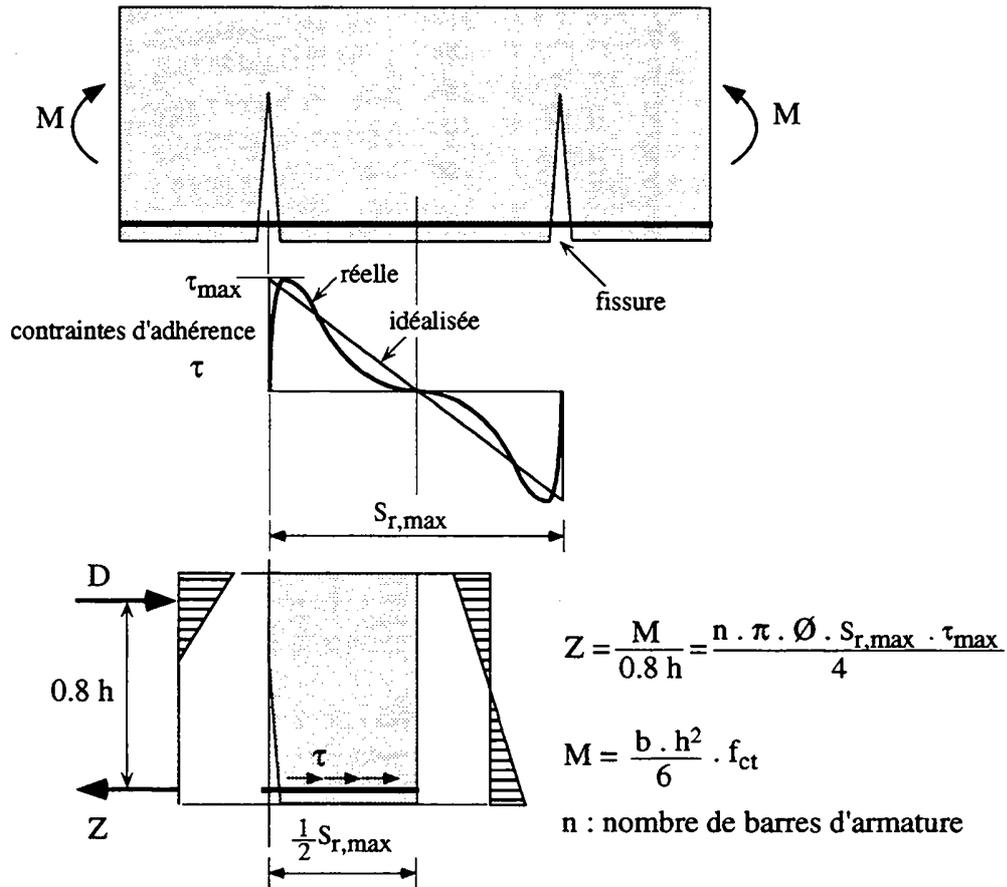


Fig I.29- Mécanisme de transmission des forces par adhérence dans une poutre d'après Saliger[S1]

## I.4.2-Relation fondamentale d'adhérence

### I.4.2.1-Notion d'adhérence

La relation fondamentale d'adhérence lie, en un point donné, la contrainte d'adhérence entre la barre d'armature et le béton avoisinant au déplacement relatif entre eux appelé "glissement". Cette relation est généralement obtenue à partir d'essais d'adhérence comme l'essai d'arrachement "Pull-out" ou l'essai par flexion "Beam-test" [R4], [R3].

La contrainte d'adhérence a été initialement définie pour les barres d'armature lisses comme étant *la contrainte tangentielle ou le frottement sur la surface latérale de la barre d'armature*. Cette définition s'applique également pour les barres nervurées, car elle correspond à une relation constitutive de la liaison béton – armature.

En effet Rehm a montré que la contrainte à l'interface béton-armature dans le cas d'une armature nervurée ancrée dans un bloc de béton et sollicitée par une force donnée, se

décompose en deux parties .La première,est la plus importante,c'est la contrainte de butée des nervures de la barre sur les petites bielles de béton. La deuxième partie est le frottement sur la partie lisse de la barre entre deux nervures. Ainsi il a défini l'importance des nervures d'une barre pour la reprise des efforts en fonction de la géométrie de sa surface [R2], [M3],il a montré que les contraintes réelles d'adhérence pour une barre nervurée peuvent être remplacées par" **une contrainte fictive du type frottement**" comme dans le cas de la barre lisse Par ailleurs, la force de butée entre le béton et les nervures se décompose en une force parallèle et une autre perpendiculaire à l'axe de l'armature. La composante perpendiculaire à l'axe de la barre est équilibrée par un anneau de béton tendu autour de la barre [T2]. Une rupture par fendage du béton a lieu quand la contrainte de traction dans l'anneau de béton tendu dépasse la résistance à la traction du béton.

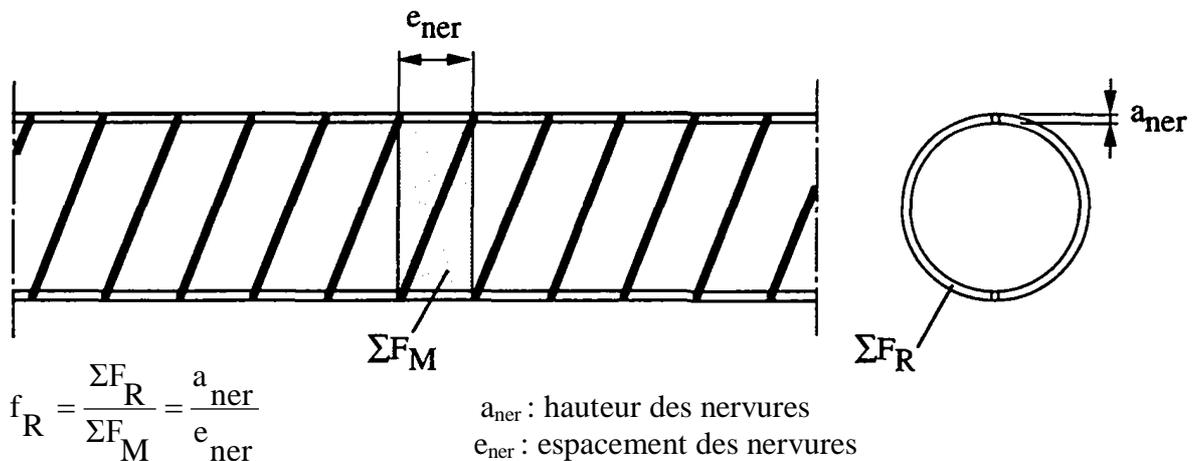
Le coefficient d'aire relative  $f_R$ , définit l'adhérence d'un type de barre d'armature donné[R2], [M3], [E1].

$$f_R = \frac{\Sigma F_R}{\Sigma F_M}$$

$\Sigma F_R$  : aire latérale des nervures projetée sur un plan perpendiculaire à la barre ( aire de butée)

$\Sigma F_M$  : aire de la partie lisse entre deux nervures (aire de frottement)

Le coefficient d'aire relative est  $f_R=0$  pour les barres lisses et varie de 0.05à 0.15pour les barres nervurées ( $f_R=0.08$  en Suisse).La valeur de  $f_R$  donnée par la formule précédente correspond à peu près au rapport entre la hauteur et l'espacement des nervures de la barre d'armature.



FigI. 30- : définition du coefficient d'aire relative  $f_R$  d'après Martin et Noakowski [M3]

### I.4.2.2-Essai d'adhérence d'après la RILEM

#### « Pull-out test »

Un grand nombre d'essais de laboratoire a été développé pour «établir la relation fondamentale d'adhérence. En plus des deux essais standards de la RILEM bien connus (le « Pull-out test » et le « Beam test »). Il y a encore l'essai de tirant [N1], [M4], [L2], [G1] et l'essai « Pull-out » avec moule métallique faisant office de coffrage perdu [L2], [L3]. L'essai d'arrachement « Pull-out test, illustré à la figure suivante d'après RILEM, est le plus courant car le plus à réaliser [R4].

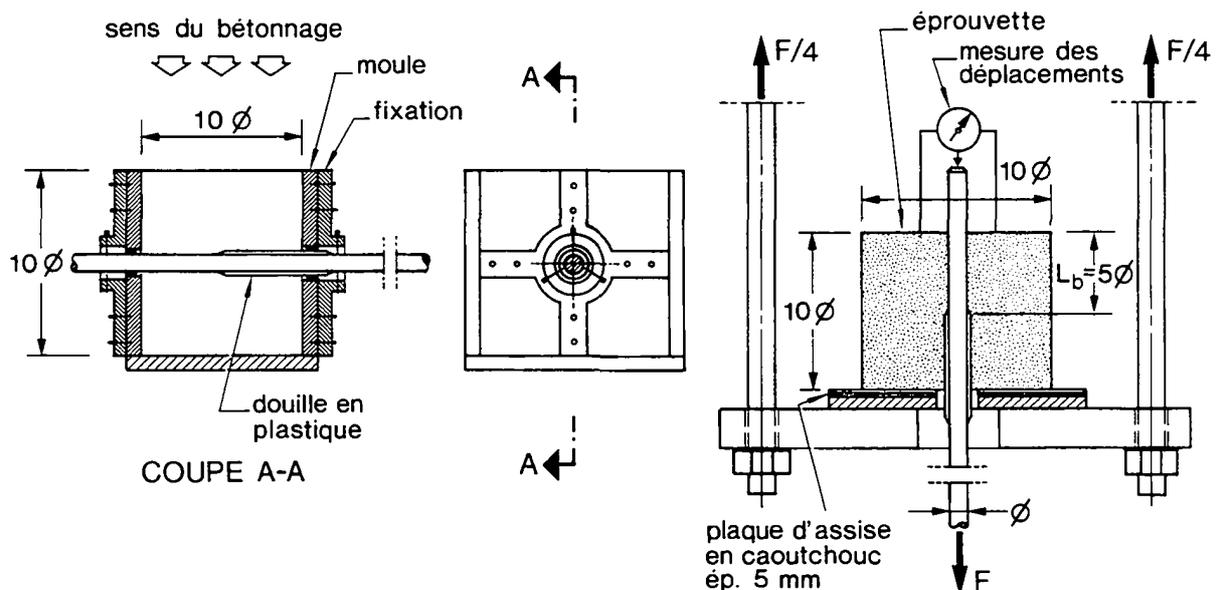
La force appliquée et le glissement de la barre à son extrémité sont mesurés. La longueur d'ancrage doit être la plus petite possible pour avoir une contrainte d'adhérence locale et constante sur la longueur d'ancrage (environ 3 à 5 diamètres). La contrainte d'adhérence s'obtient à partir de la force appliquée sur la barre d'armature dans un essai d'arrachement au moyen de la relation suivante :

$$\tau = \frac{F}{\pi \phi l}$$

$\tau$  : contrainte d'adhérence

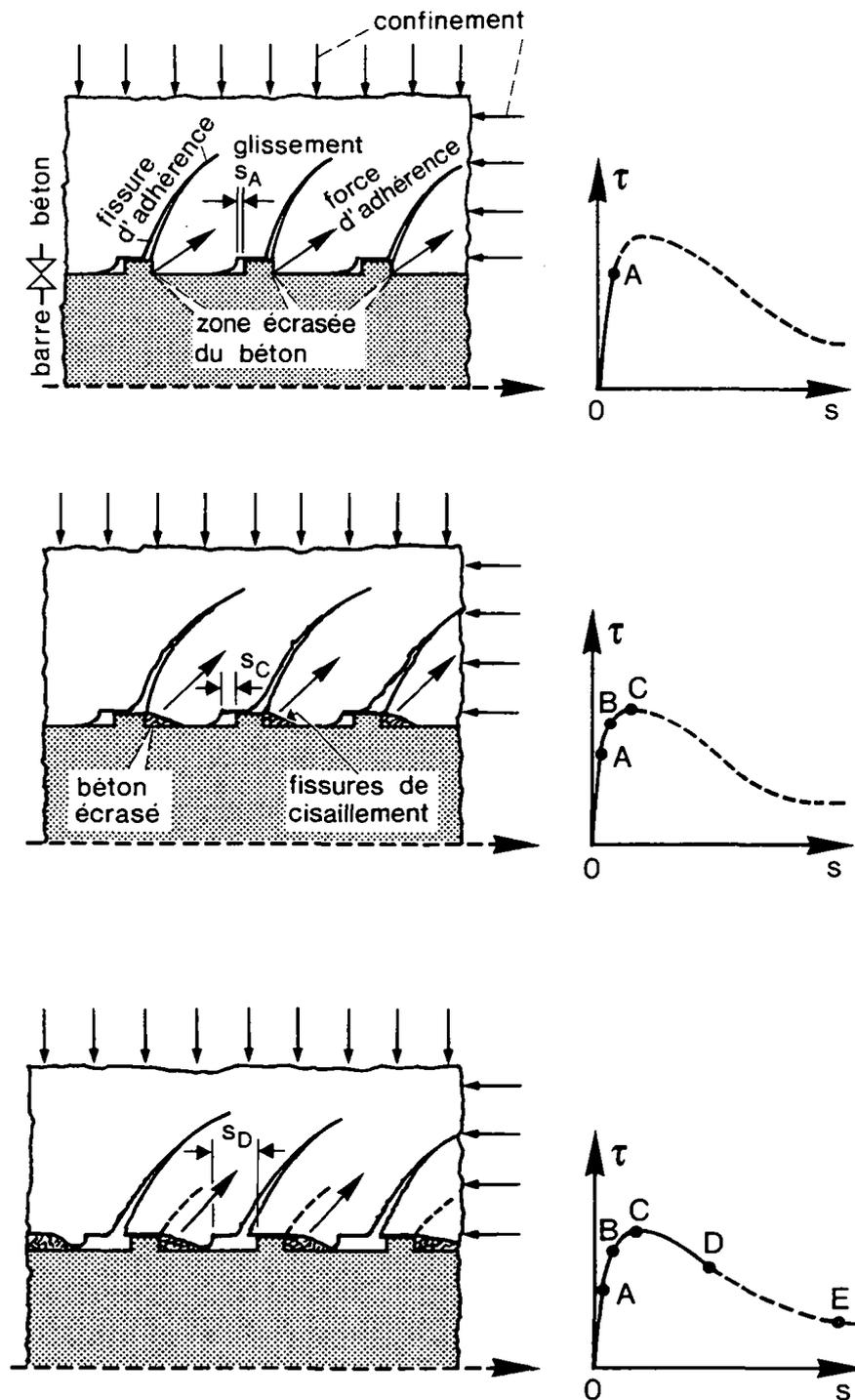
$F$  : Force appliquée sur la barre d'armature

$l$  : Longueur d'ancrage de la barre d'armature



FigI.31.- Schéma de l'essai d'adhérence (« Pull-out test ») d'après la RILEM [R4].

I.4.2.3-Mecanisme d'adhérence



FigI.32- Mécanisme d'adhérence et schéma de la relation complète d'adhérence d'après Eligehausen et all [E1].

Dans le cas de barres nervurées, la contrainte d'adhérence  $\tau$  mesurée lors d'un essai du type « Pull-out » correspond à une contrainte fictive de cisaillement agissant sur la surface latérale de la barre.

Ainsi, la relation d'adhérence obtenue traduit le comportement global de la liaison béton-armature ou  $\tau$  est équivalente à la somme des projections des contraintes réelles parallèlement à l'axe de la barre. Ces contraintes sont celles de butée des bielles de béton comprimé sur les nervures et celles tangentielles agissant sur la surface latérale de la barre entre les nervures.

La forme générale de la courbe d'adhérence et le mécanisme d'adhérence d'une barre nervurée sont illustrés à la figure précédente. Cette relation peut être obtenue à partir d'un essai d'adhérence du type « Pull-out » ou le glissement est contrôlé, et si une armature suffisante de confinement est disposée afin d'éviter une rupture par fendage du béton[E1].

La courbe commence par une contrainte d'adhérence non nulle à l'origine des glissements ( $s=0$ ), qui correspond à la liaison physico-chimique d'adhésion entre le béton et l'armature. La pente de la courbe, à sa naissance, est élevée. Après mobilisation de la contrainte d'adhésion, les nervures butent sur le béton et commencent à l'écraser. Les faibles valeurs de glissement de la barre se produisent par écrasement des bielles en béton et par la naissance des premières fissures internes (avant le point A de la figure précédente). Le glissement à ce stade est encore très faible.

Une augmentation de la force provoque le cisaillement partiel des bielles de béton entre les nervures, ce qui se traduit par une nette réduction de la pente de la courbe ( $\tau$ - $s$ ) (point B à la figure précédente). Enfin, si le confinement est suffisant, on atteint la contrainte maximale d'adhérence (point C), puis on obtient la branche descendante ou la contrainte résiduelle correspond à la friction le long de la zone de béton cisailée [R2], [E1], [C5].

#### **I.4.2.4-Facteurs principaux influençant la relation d'adhérence**

Le champ d'application de la relation d'adhérence étant très large, les chercheurs se sont souvent intéressés à l'influence de quelques-uns des paramètres sur cette relation. Par exemple, l'influence du *degré de confinement et du chargement cyclique* a été étudiée dans le but de comprendre le comportement de la liaison béton-armature dans les angles des cadres et autre liaison d'élément de structures parasismiques [T2], [E1]. Le module de rupture en fonction du rapport entre l'enrobage et le diamètre de la barre ( $c/\Phi$ ) et du degré de confinement, a été étudié pour prévenir les ruptures par fendage du béton d'enrobage dans les zones où l'armature est fortement sollicitée [T2], [E1]. [V1], [V2]. Enfin la branche ascendante de la courbe d'adhérence ( $\tau$ - $s$ ), caractérisent le comportement d'adhérence à l'état de service ( $s < 0.2$  à  $0.3$  mm), a été étudiée en fonction de *la résistance et composition du béton, du type d'armature et de la position de la barre d'armature lors du bétonnage*. Cette branche a été utilisée pour prédire la fissuration et la déformation des structures en B.A.

##### **a-Influence de la résistance du béton**

La plupart des travaux réalisés dans le domaine de l'adhérence ont visé à déterminer la résistance de la liaison d'adhérence en fonction de la résistance du béton [T2], [E1]. [K1], [Z1] [V2] Or, pour les problèmes de fissuration il est nécessaire de bien connaître la branche ascendante de la relation ( $\tau$ - $s$ ) correspondant à des faibles valeurs du glissement. On constate cependant que peu d'auteurs ont cherché à établir cette branche de la loi d'adhérence dans le cas des BHP.

La contrainte d'adhérence pour des faibles valeurs du glissement  $s \leq 0.1$  mm et pour des bétons ordinaires est proportionnelle à la résistance à la compression du béton  $f_{cm}$  d'après [R2], [M4], [T2], [M3]. Par contre, la contrainte de rupture de la liaison d'adhérence semble plutôt être fonction de la résistance à la traction du béton.

##### **b-Influence de la position des barres d'armature**

Des essais d'adhérence effectués sur bétons ordinaires en variant la position de la barre par rapport à la direction du bétonnage et de la distance des barres horizontales par rapport

au fond du coffrage, ont fourni les résultats suivant [R2], [M3] :

-les barres bétonnées en position verticales et chargées dans le sens contraire à la direction du bétonnage ont une meilleure adhérence que les barres bétonnées en position horizontale.

La contrainte d'adhérence correspondant à un glissement  $s=0.1\text{mm}$  pour une barre horizontale vaut environ 60% de la contrainte correspondante pour une barre verticale.

-la qualité d'adhérence d'une barre d'armature horizontale augmente avec la distance de la barre à la surface du béton. Des essais ont été réalisés par Martin et Noakowski sur des barres horizontales ancrées dans une tranche de mur de 1m de hauteur et se trouvant à une distance variable de la surface du béton. Les résultats de ces essais ont montrés que la contrainte d'adhérence augmente d'un facteur de 2 quand la distance entre la barre et la surface du béton passe de 10cm à 90cm

### **c-Influence du type de barres d'armature**

Il est admis, à l'heure actuelle, que l'influence de la géométrie de la barre, en particulier de sa surface, peut être prise en compte au moyen du coefficient d'aire relative, défini par l'équation précédente [R2], [M3], [C5], [B2]

Selon ces auteurs, la contrainte d'adhérence correspondant à un glissement donné augmente linéairement avec le coefficient d'aire relative  $f_R$

### I.4.3-Définition de l'adhérence

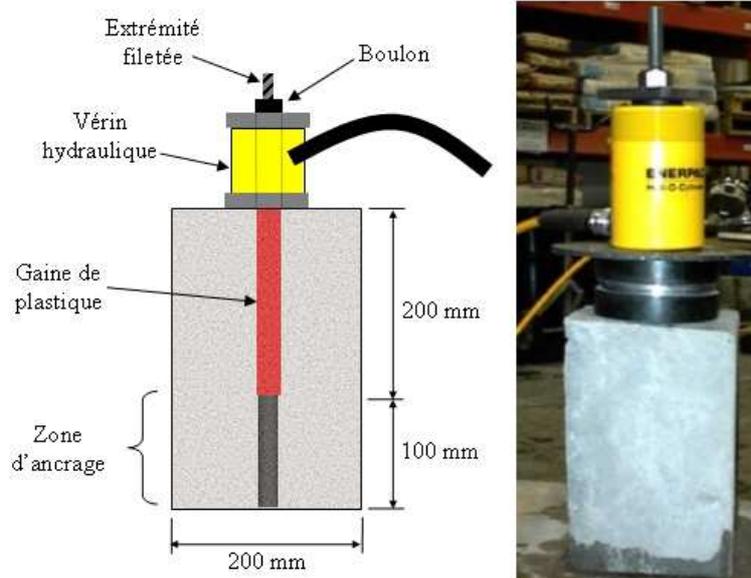
Les conditions de résistance d'un élément en béton armé supposent que les armatures ne glissent pas à l'intérieur du béton. C'est le phénomène d'adhérence qui empêche ou limite ces glissements. Cette propriété physique permet la transmission des efforts et un fonctionnement rationnel : le béton suit alors les armatures dans leurs déformations. Les justifications que nous effectuerons en ELU (A6 du BAEL) porteront sur :

- la limitation de l'entraînement des armatures de façon à ne pas endommager le béton les entourant,
- les ancrages des extrémités de barres,
- les jonctions,
- les recouvrements,
- les coutures des barres.

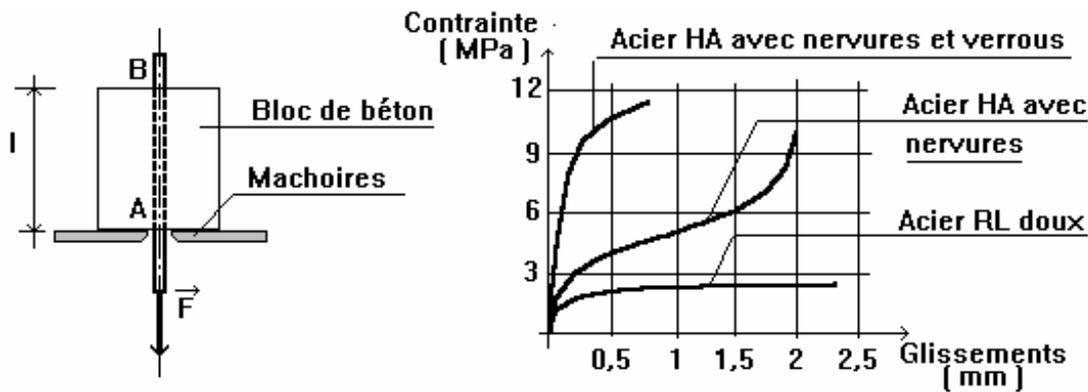
La transmission des efforts du béton aux armatures s'effectue par le phénomène d'adhérence, mais aussi par la courbure que l'on pourra donner aux barres

### I.4.4-Essai d'arrachement classique

Il s'agit d'éprouver en traction une barre d'acier entourée par une éprouvette de béton avec le dispositif expérimental suivant :



La liaison entre le béton et l'acier est caractérisée par la résistance à l'arrachement de la barre sous l'effet de l'effort  $F$ .



Dans le cas d'un acier RL de nuance douce, il y a un glissement en A s'accroissant rapidement à partir d'une contrainte faible, d'environ 1MPa, et la rupture, c'est à dire le glissement du point B, a lieu pour une valeur du glissement en A de 2,3mm et une contrainte de 2,5MPa.

Dans le cas d'une armature HA, la résistance à l'arrachement varie avec l'état de surface de la barre. Pour un acier uniquement nervuré, il y a une amorçage de glissement comme pour le RL qui est ensuite stoppée par les nervures vers 1,5mm et ces nervures permettent d'atteindre 10 MPa avant le glissement du point B. Pour un acier avec des nervures et verrous, l'amorçage de glissement n'a pas lieu et la résistance atteinte est beaucoup plus forte (environ 11MPa). On remarque aussi que le glissement de A lorsque B amorçait le sien est de l'ordre de 0,8mm, soit beaucoup plus faible.

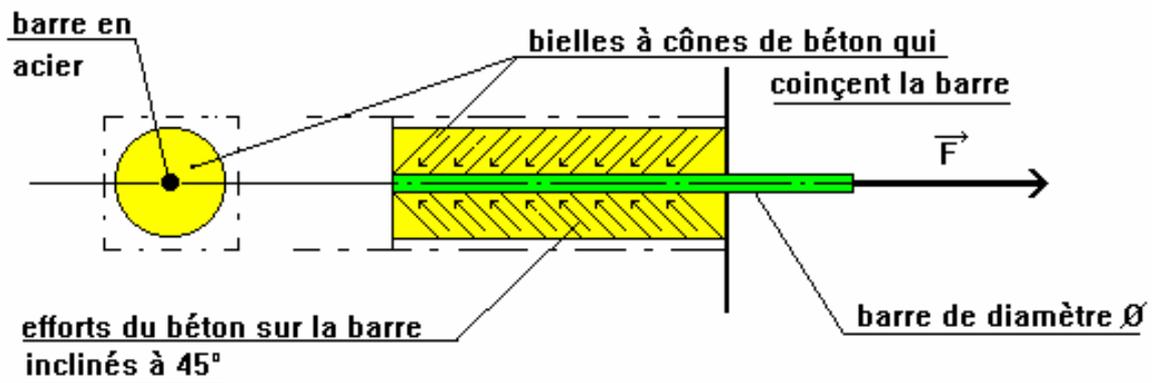
#### I.4.5-Analyse des résultats

Dans le cas des ronds lisses, l'étude expérimentale conduit à supposer qu'il se forme dans le béton, sous l'action de  $F$ , une série de cônes emboîtés les uns dans les autres et sensiblement

inclinés à  $45^\circ$  sur l'axe de la barre. L'enveloppe de ces cônes décrit une surface cylindrique.

Les cônes sont assimilés à des bielles articulées qui tendent à coincer la barre.

L'égalisation des déformations du béton et de l'acier est rendue possible par ce phénomène.  
***L'adhérence est donc assimilable à un phénomène de frottement.***



Pour qu'il y ait formation de ces cônes, il faut que les barres soient suffisamment enrobées par le béton. Les bielles ainsi créées forment des sortes de cliquets réagissant par frottement. Deux cas peuvent se produire:

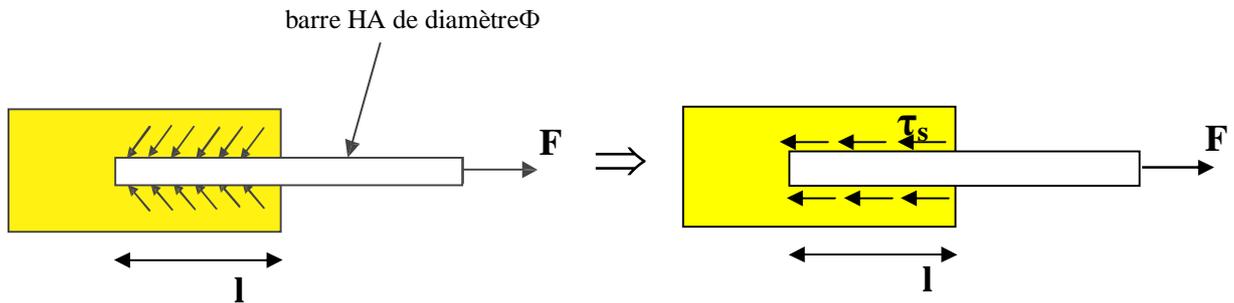
- les efforts inclinés à  $45^\circ$  sont insuffisants: il y a rupture d'adhérence car l'effort  $F$  dans la barre ne peut pas être équilibré et la barre glisse dans le béton qui ne peut s'y opposer.
- l'effort  $F$  génère dans la barre des contraintes qu'elle ne peut supporter: il y a rupture de l'acier car la résistance en traction de la barre est épuisée

Dans le cas des barres à haute adhérence, le comportement du béton est identique. Le béton entre les créneaux et les verrous s'oppose au glissement par l'intermédiaire des efforts à  $45^\circ$  mais lorsque le glissement est en mesure de s'amorcer, ces créneaux et verrous le bloquent

#### **I.4.6-Contrainte d'adhérence**

La liaison entre une armature et le béton est mesurée par la contrainte d'adhérence  $\tau_s$  (article [A.6.1, 1](#) du BAEL91).

Soit une barre rectiligne scellée dans un bloc de béton. Appliquons à cette barre un effort de traction  $F$  et étudions l'équilibre statique



La barre est donc soumise :

- à l'effort de traction  $F$ ,
- à la contrainte d'adhérence  $\tau_s$  correspondante aux efforts du béton incliné à  $45^\circ$ . La contrainte est constante sur toute la longueur  $l$  de la barre et est répartie tout autour de celle-ci, sur une surface égale à  $\pi\phi$ .

Le principe d'équilibre nous permet de dire que la contrainte d'adhérence s'oppose à l'effort de traction dans la barre donc :  $F = \tau_s \cdot \pi \cdot \Phi \cdot l$

Ce qui nous donne :

$$\tau_s = \frac{F}{\pi \phi l}$$

Une valeur limite pour la contrainte d'adhérence est fixée par l'article A.6.1,21 du BAEL91.

Cette contrainte intègre à la fois les caractéristiques de l'acier, avec le coefficient de scellement  $\psi_s$ , et celles du béton, avec sa résistance à la traction  $f_{ij}$  :  $\tau_{su} = 0,6 \cdot \psi_s^2 \cdot f_{ij}$

$\psi_s = 1$  pour les ronds lisses ;  $\psi_s = 1,5$  pour les armatures HA

#### I.4.7-Différents modes de rupture

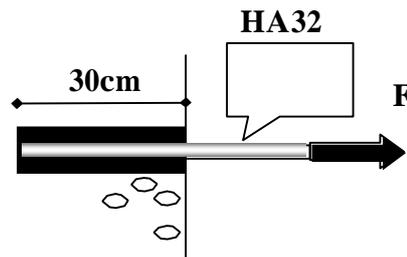
Supposons une barre scellée dans un massif en béton. Si on exerce un effort d'arrachement suivant l'axe de la barre, on peut avoir trois modes de rupture :

- 1- Glissement relatif de l'acier par rapport au béton (extraction de la barre dans une gaine de Béton)
- 2 - Rupture par traction de l'acier (scellement parfait)
- 3- Destruction du béton par arrachement d'un cône de béton [G2]

#### I.4.8-Scellement d'une barre à la résine

On veut sceller une barre HA32 dans un massif en béton tel que  $f_{c28} = 25\text{MPa}$ . Pour cela on fore avec une carotteuse un trou de diamètre 40mm et de profondeur 30cm.

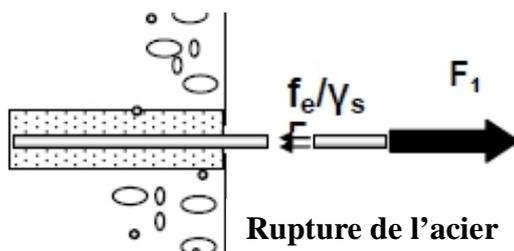
La barre y est ensuite scellée avec de la résine. Le fournisseur de la résine indique qu'à l'état limite ultime la contrainte d'adhérence entre l'acier à haute adhérence et la résine est de 5MPa et entre la résine et ce béton de 3MPa [G2]



Quels sont les différents modes de rupture possible ? Déterminer la force maximum applicable à la barre.

#### Solution

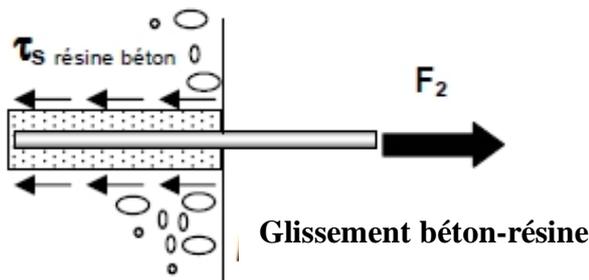
:



Rupture par traction de l'acier.  
L'équilibre de la barre s'écrit

$$F1 = \left[ \pi \cdot \phi^2 / 4 \right] f_e / \gamma_s$$

$$F1 = \left[ \pi \cdot 0,032^2 / 4 \right] \cdot 500 / 1,15 = \mathbf{0,350\text{MN}}$$

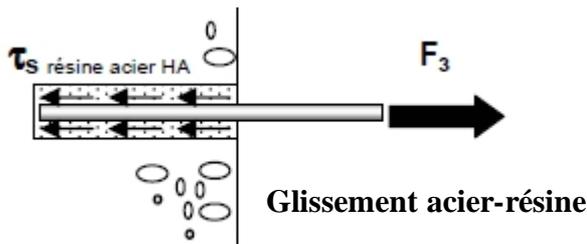


Glissement relatif de la résine par rapport au béton

L'équation d'équilibre :

$$F_2 = \pi \cdot \varphi_{\text{résine}} \cdot L \cdot \tau_{\text{su résine béton}}$$

$$F_2 = \pi \cdot 0,040 \cdot 0,30 \cdot 3 = \mathbf{0,113MN}$$

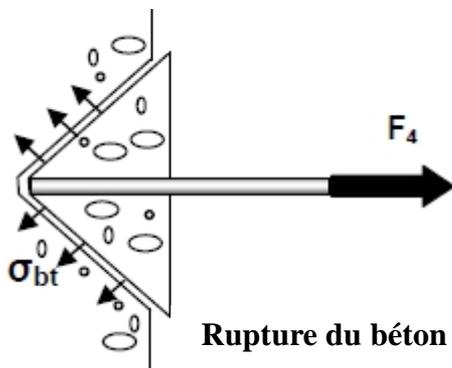


Glissement relatif de l'acier par rapport au béton.

L'équation d'équilibre :

$$F_3 = \pi \cdot \varphi_{\text{acier}} \cdot L \cdot \tau_{\text{su acier résine}}$$

$$F_3 = \pi \cdot 0,032 \cdot 0,30 \cdot 5 = \mathbf{0,151MN}$$



Destruction du béton par arrachement d'un cône de béton.

F4 = surface du cône x projection horizontale de  $\sigma_{bt}$  .

Surface d'un cône à 45° de rayon  $R = 2^{1/2} \cdot \pi \cdot R^2$

$$F_4 = 2^{1/2} \cdot \pi \cdot 0,3^2 \cdot (2,1/1,15) \cdot (2^{1/2}/2) = \mathbf{0,396MN}$$

## I.5-CONCLUSIONS

1-La corrosion des armatures est l'une des principales causes de dégradation précoce des structures en béton armé. Quand les agents agressifs ont atteint les armatures, à cause soit de la carbonatation du béton d'enrobage soit de l'attaque par les chlorures, la sécurité et l'état de service des structures se trouvent fortement altérés, tout d'abord par le comportement de l'acier. En effet l'armature subit une perte de section ainsi qu'une modification de ses propriétés mécaniques. Ensuite, le comportement du béton d'enrobage évolue, il va se fissurer à cause des produits résultant de la corrosion. Enfin, ***la diminution de l'adhérence acier-béton est observée.***

2-L'adhérence est favorisée par :

- ***l'état de surface des aciers*** : l'adhérence est améliorée lorsque la barre possède des nervures en saillies ou lorsque sa surface est rugueuse,
  - ***la qualité du béton d'enrobage*** : en particulier le dosage et les conditions de vibration qui influent sur la compacité,
  - ***les soins apportés à la mise en oeuvre*** : il faut éviter par exemple que les gros granulats empêchent, par une création de voûte, la pâte de béton d'enrober les armatures.
- Il faut donc veiller à obtenir une bonne plasticité et une bonne vibration

3-Le matériau en question est le TFC (tissu de fibre de carbone). Vu sa bonne insensibilité à la corrosion, il peut être comme solution de protection des armatures contre la corrosion. Mais on aura à faire à un problème d'adhérence. Cela fait l'objet de notre recherche.

## CHAPITRE II

# Etude expérimentale

### II.1-INTRODUCTION

Pour protéger l'acier de la corrosion on adopte une solution d'habillage d'armature par matériaux composites. Mais le problème qui se pose, c'est le risque de dégradation de l'adhérence Acier-composite-béton. La présente étude s'intéresse à la traction d'armature habillée par matériaux composites et scellée dans le béton. L'étude, expérimentale, consiste à sceller dans des masses de béton, des armatures en acier de différents diamètres et de différentes longueurs d'ancrage, protégées et renforcées par matériau composite (le tissu de fibre de carbone (TFC)). En procédant, à l'arrachement de ces armatures on évalue la contrainte tangentielle (adhérence). Nous comparons ensuite cette dernière avec celle d'une barre sans tissu (TFC). Nous concluons par dire s'il y a une dégradation ou une amélioration de l'adhérence acier-composite- béton.

### II.2-MATERIELS UTILISES :

#### -Portique d'essai universel didactique :

Le portique Didactique a été conçu spécialement pour l'enseignement dans le but de simuler les contraintes subies par les matériaux et les structures

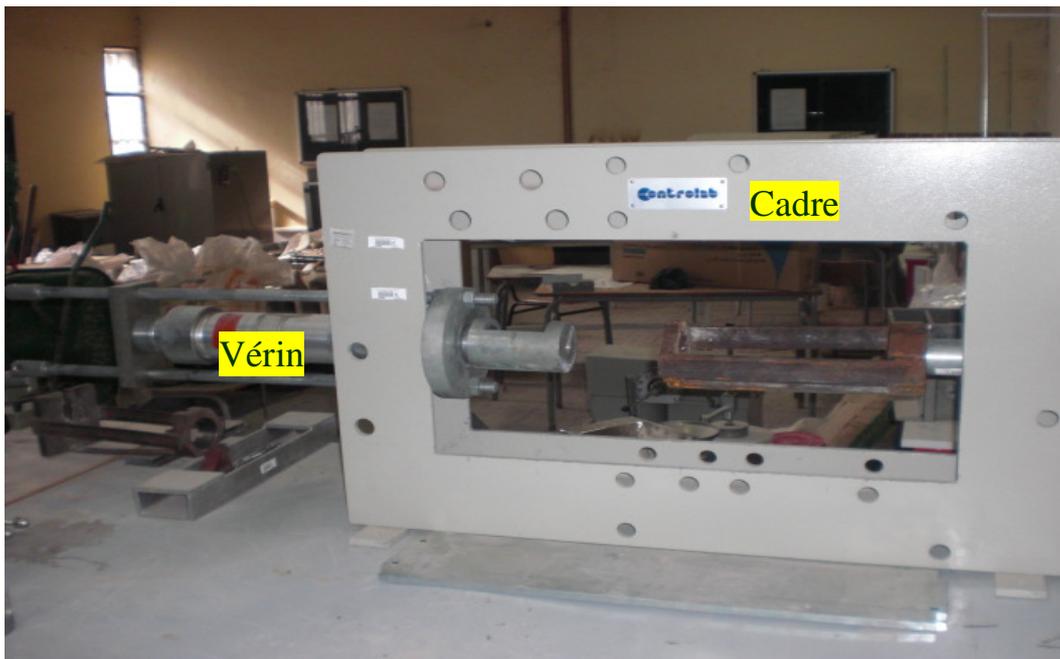
Grâce à un cadre métallique comportant différents perçages et un vérin hydraulique d'une capacité de 160KN ,nous pouvons effectuer des essais de compression, flexion, traction, cisaillement, arrachement sur des échantillons de matériaux.

La mise en charge se fait grâce à une pompe manuelle ou une pompe électrique

Un pupitre de commande permet de gérer les essais.

Des périphériques (pont d'extensométrie, capteur de déplacement, carte d'acquisition avec PC et logiciel) peuvent également être installés pour mieux exploiter les capacités du portique

### Unité de base



L'unité de base se compose de :

- d'un cadre en acier indéformable sur lequel se déplace le vérin en fonction de l'essai,
- d'un vérin standard de 160KN et de 160mm de course.

### Pupitre de commande

Le pupitre de commande existe en deux versions :

- Une version électrique qui permet de appliquer la force avec une vitesse constante grâce à un cadencemètre intégré,
- Une version manuelle qui permet à l'opérateur de ressentir l'effort à développer pour conduire l'essai.

Ces deux versions ont en commun l'afficheur.

Celui-ci indique constamment à l'opérateur au cours de l'essai la valeur instantanée de la force (grâce à un capteur de pression inséré dans le circuit hydraulique). Il dispose de trois échelles de force : 5, 40, et 160KN

Pupitre de commande



Pupitre avec pompe électrique



**Vérin standart**

Vérin standart

Les deux pupitres disposent de sorties analogiques pour suivre l'évolution de la force du vérin ou du déplacement (si capteur de déplacement) sur une imprimante par exemple.

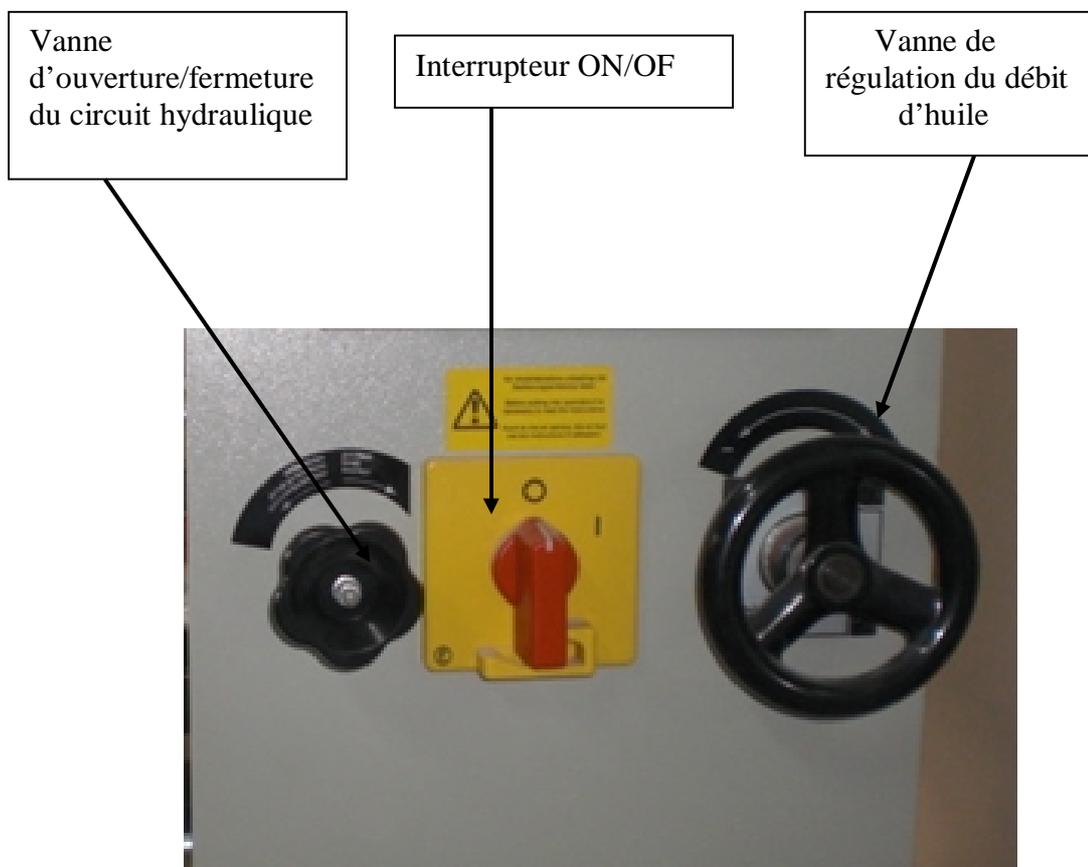
### Pompe

La pompe existe en deux versions :

- Version manuelle
- Version électrique :

Le groupe de pompage électrique assure la mise en charge de l'élément à tester avec une vitesse d'application de la force réglable.

Le fonctionnement du groupe hydraulique est assuré par trois commandes :



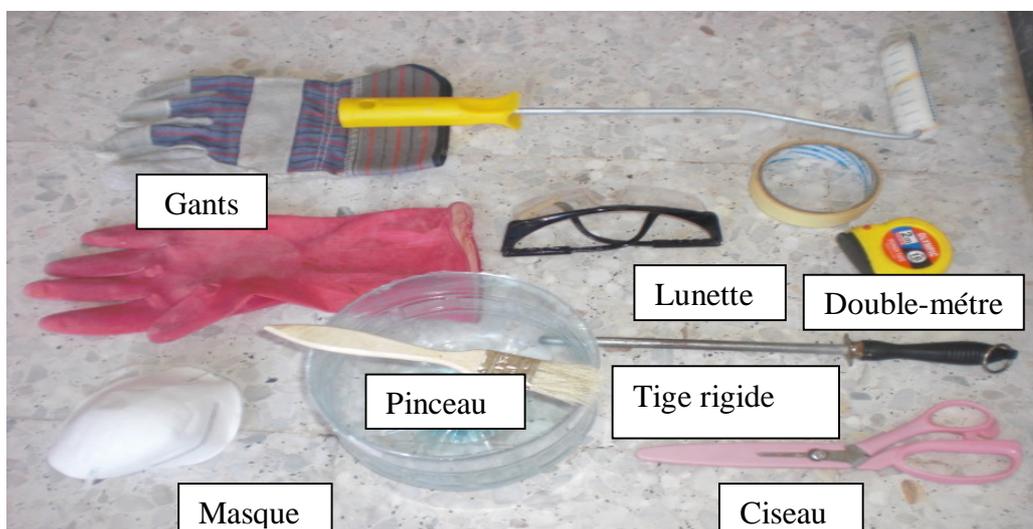
Les essais réalisables avec le portique sont :

- Essais de compression sur prismes 4\*4\*16(mortier normal)
- Essai de flexion simple
- Essai de flexion pure
- Essai de traction sur acier
- Essai de cisaillement sur bois
- Essai de flexion sur poutre encastrée

Pour le cas de notre travail le Portique Didactique va être utilisé pour l'arrachement d'armature habillée par matériau composite et scellée dans le béton

En plus du Portique Didactique on a le matériel suivant :

- Une balance (pour la pesée de la résine et du durcisseur )
- un support en verre épais (pour travailler et préparer dessus)
- des pinceaux (pour le collage)
- des gants en plastiques
- une barre rigide pour mélanger
- un film nylon (pour protéger le lieu de travail, des chutes de colle)
- Des masques et lunettes (la colle est nocive pour les yeux et les poumons)
- Un ciseau pour découper le tissu
- Un double mètre
- Le diluant pour laver les pinceaux et les accessoires à la fin de chaque travail



### II.3- EPROUVETTES D'ESSAI

On aura à préparer des éprouvettes en béton de forme cylindrique, avec des moules en PVC100 et de longueur 25cm

-des barres HA, de différents diamètres seront découpées en morceaux de 25cm et confinées par le tissu de fibre de carbone (TFC), sur la longueur à ancrer dans le béton.

-des barres témoins non confinées (sans protection) et d'autres confinées par une, deux ou trois couches de TFC

On aura à faire à : -8 barres HA10 avec ancrage de 10cm	]	sans protection
	]	1 couche
	]	2 couches
	]	3 couches

Donc :  $8 \times 4 = 8 \times 4 = 32$  *épreuve avec barres HA10, ancrées à 10cm*

*32 éprouvettes avec barres HA10, ancrées à 12cm*

*32 éprouvettes avec barres HA10, ancrées à 14cm*

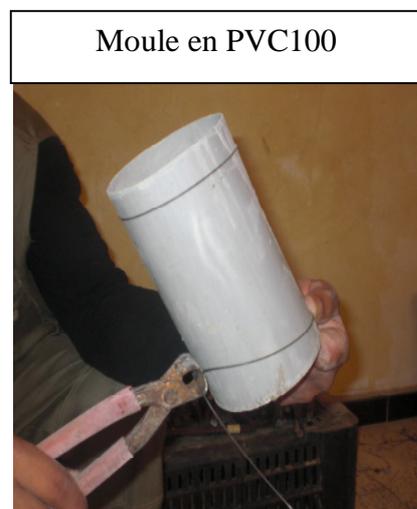
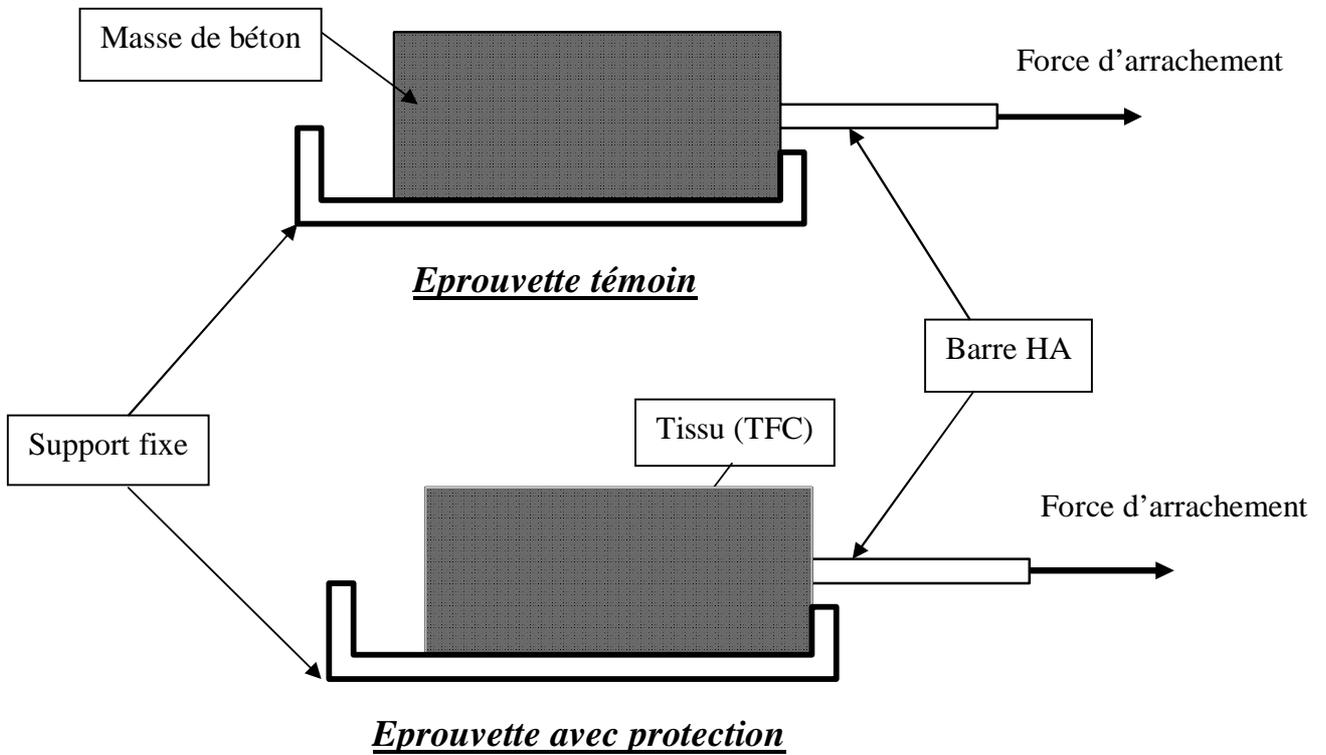
- Soit : *96 éprouvettes avec barres HA10*

De même pour les barres HA12 et HA14, on aura : *96 éprouvettes avec barres HA12*

*96 éprouvettes avec barres HA14*

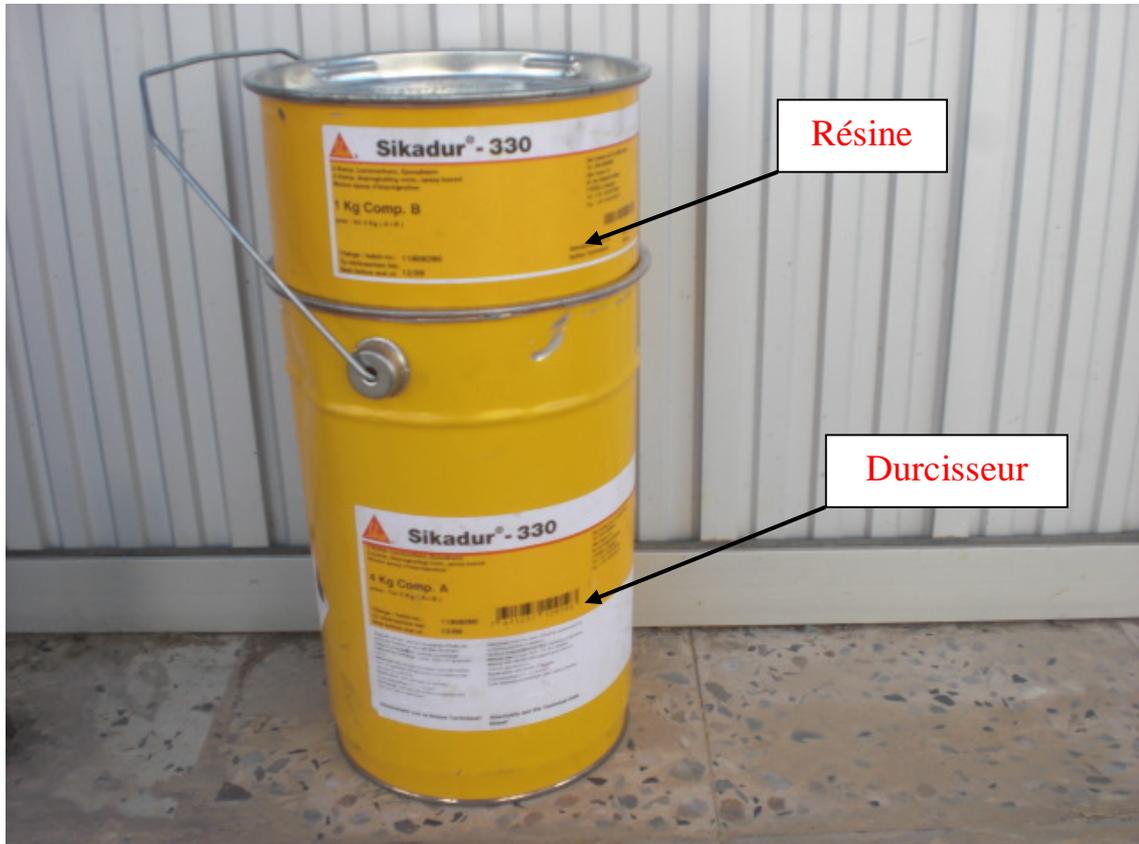
Donc en total on aura à faire à : *288 éprouvettes* dont le schéma est le suivant :

**Eprouvettes d'essai**



## II.4-MATERIAUX UTILISES

### II.4.1- La colle (Sikadur-330)



Pour obtenir la colle, on devrait faire le mélange d'une *résine* et d'un *durcisseur*.

Une portion de résine contre quatre portions de durcisseur.

En poids un Kilogramme de résine avec quatre kilogrammes de durcisseur pour obtenir cinq kilogrammes de colle.

#### Remarque :

On prépare de petites quantités de colle parceque, en grandes quantités cette dernière risque de durcir avant même de terminer le collage.

Pour préparer 1Kg de colle on suit les étapes suivantes :



1-Preparer la balance



2- Peser 200g de Résine



3- Peser 800g de durcisseur



4 - Faire mélanger l'ensemble (résine +durcisseur) dans un récipient avec une tige rigide



5-Mélanger jusqu'à obtenir une pâte grise claire : *c'est la colle finie*

#### II.4.2-Les barres d'acier :

Les barres utilisées sont en acier *Haute –Adhérence* (Acier HA anciennement dénommés TOR).

Les barres sont utilisées sous différents diamètres :  $\Phi 10$  ;  $\Phi 12$  ;  $\Phi 14$

Et sous forme de morceaux de 25 cm de long. Pour chaque diamètre on découpe **96 morceaux**, donc, en total on aura **288 morceaux** de 25 cm de long.

*Tableau II.1: Découpage des barres*

Barres HA10			Barres HA12			Barres HA14		
A=10cm	A=12cm	A=14cm	A=10cm	A=12cm	A=14cm	A=10cm	A=12cm	A=14cm
4*8=32 barres								
32*3=96 barres			32*3=96 barres			32*3=96 barres		

Donc :  **$3*96=288$  barres** (à découper)

A : Ancrage de l'armature dans la masse de béton.



Morceaux de barres d'Acier de 25cm de long

### **II.4.3- Le tissu de fibre de carbone (TFC)**

La technique de réparation des structures par collage d'armatures de renfort a connu depuis peu un perfectionnement décisif : il s'agit de la substitution aux tôles d'acier traditionnelles de tissus composites souples a base de fibres de carbone, en abrégé TFC.

Les avantages du TFC sont nombreux :

- Résistance et module élastique élevés.
- Insensibilité a la corrosion.
- Légèreté.
- Grande souplesse de mise en œuvre sur des surfaces de toute forme et de toute nature.
- Excellente résistance a la fatigue et a l'abrasion.

Pour toutes ces raisons, le TFC est promis a un brillant avenir dans le domaine du bâtiment et dans celui du génie civil

Le TFC est un composite a base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique applique a froid dans le but d'être intègré par adhérence au support pour équilibrer les tractions induites dans la section.

Grâce au recherche menées ces dernières décennies sur l'usage de matériaux composite dans le génie civil ,cette technique de renforcement a été développé par un groupement de partenaires industriels Français.Elle met en œuvre le collage d'un tissu mince de fibres de carbone(TFC) a l'aide d'une résine thixotrope de base epoxy.La grande originalité du procédé est que le collage se fait a froid et sans pression de placage grâce a la mise au point d'une fibre et d'une colle spécialement étudiées pour les applications de BTP. En plus des propriétés exceptionnelles des matériaux composites, la technique offre une simplicité de mise en œuvre et une maniabilité qui permettent d'envisager le plus grand nombre d'application dans les conditions les plus variées.

La mise au point de cette nouvelle technique de réparation vient apporter aux problèmes de renforcement d'ouvrages une solution fiable et définitive, d'un encombrement très réduit pour des performances optimum.

Insensible à la corrosion, le TFC possède des propriétés exceptionnelles de résistance aux agressions chimiques.

De nombreuses applications ont à ce jour été réalisées tant dans le domaine du bâtiment que dans celui des ouvrages d'art.

**Définition :**

On appelle composite TFC, l'ensemble du tissu matricé dans la résine de synthèse.

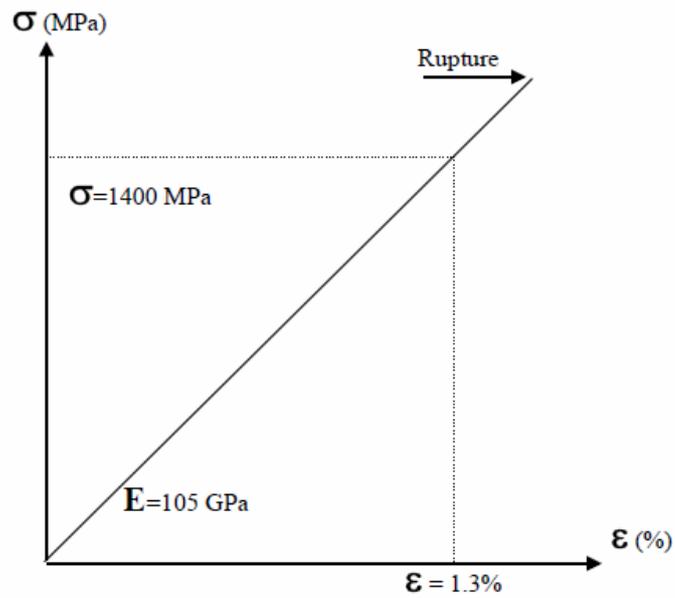
Le composite obtenu par la fabrication in situ est constitué d'environ de 40% de tissu et de 60% de résine. Ces proportions peuvent varier à l'exécution dans une fourchette de plus ou moins 7% selon les conditions d'application sur le chantier (température ambiante, surface spécifique du support ....etc.)

Les caractéristiques annoncées dans le tableau ci-dessous sont les caractéristiques minimales garanties. Elles concernent le tissu imprégné qui constitue le corps du composite, donc la section effective résistante.

**II.5-CARACTERISTIQUES MECANQUES DU COMPOSITE (section effective)**

**. Propriétés du TFC®**

<b>Propriétés</b>	<b>TFC Freyssinet</b>
<b>Module d'élasticité (MPa)</b>	105 000
<b>Allongement à la rupture (MPa)</b>	1,3%
<b>Résistance à la rupture par traction (MPa)</b>	1400
<b>Largeur</b>	75, 150, 200, 300 mm
<b>Epaisseur</b>	0,43



- Loi de comportement du TFC<sup>®</sup>

Valeurs de contraintes et allongement garanties à la rupture

- Propriétés du Tissu Sika Wrap

Propriétés	Wrap
Module d'élasticité (MPa)	230 000
Allongement à la rupture (MPa)	1,5%
Résistance à la rupture par traction (MPa)	3500
Largeur	305 ou 610 mm
Epaisseur	0,13 mm

## II.6 -PREPARATION DU TFC

Le travail consiste à faire confiner la barre d'acier d'une ou de plusieurs couches de tissu (TFC). Donc on est emmené à découper des morceaux de tissu de surfaces égales aux surfaces extérieures des barres considérées et selon le nombre de couches.



Découpage du tissu en morceaux rectangulaires, de surfaces calculées (en fonction de la surface de la barre et du nombre de couches de confinement)

Tableau II.2 découpage du tissu (TFC), en cm<sup>2</sup>

Ancrage	Barres HA10			Barres HA12			Barres HA14		
	A=10cm	A=12cm	A=14cm	A=10cm	A=12cm	A=14cm	A=10cm	A=12cm	A=14cm
1 couche	36.5	43.68	50.96	42.68	51.216	59.752	48.96	58.752	68.544
2couches	67.8	81.36	94.92	80.36	96.432	112.504	92.92	111.504	130.088
3couches	99.2	119.04	138.88	118.04	141.648	165.256	136.88	164.256	191.632

Exemple de calcul :

Pour une barre HA10, d'Ancrage dans la masse de béton égale a 10cm et protégée d'une seule couche de tissu. La surface de ce dernier est :

$$S = (2\pi R + 0.5) * L_a = (2 * 3.14 * 0.5 + 0.5) * 10 = 36.5 \text{ cm}^2$$

Avec  $L_a$  : la longueur d'ancrage,  
+0.5 cm : la longueur de recouvrement.

La même barre et le même ancrage mais confinée par 2 couches :

$$S = (4\pi R + 0.5) * L_a = (4 * 3.14 * 0.5 + 0.5) * 10 = 67.8 \text{ cm}^2$$

La même barre et le même ancrage mais confinée par 3 couches :

$$S = (6\pi R + 0.5) * L_a = (6 * 3.14 * 0.5 + 0.5) * 10 = 99.2 \text{ cm}^2$$

Donc on aura à découper :

-8 morceaux de 36.4cm<sup>2</sup>, soit une surface de 291.2cm<sup>2</sup>

-8 morceaux rectangulaires de 67.8cm<sup>2</sup>, soit une surface de 542.4cm<sup>2</sup>

-8 morceaux rectangulaires de 99.2cm<sup>2</sup>, soit une surface de 793.6cm<sup>2</sup>

-8 morceaux rectangulaires de 43.68cm<sup>2</sup>, soit une surface de 349.44cm<sup>2</sup>

-8 morceaux rectangulaires de 81.36cm<sup>2</sup>, soit une surface de 650.88cm<sup>2</sup>

-8 morceaux rectangulaires de 119.04cm<sup>2</sup>, soit une surface de 952.32cm<sup>2</sup>

-8morceaux rectangulaires de  $50.96\text{cm}^2$ , soit une surface de  $407.68\text{cm}^2$

-8morceaux rectangulaires de  $94.92\text{cm}^2$ , soit une surface de  $759.36\text{cm}^2$

-8morceaux rectangulaires de  $138.88\text{cm}^2$ , soit une surface de  $1111.04\text{cm}^2$

Donc pour le confinement des barres T10, il nous faut :

$$(291.2+542.4+793.6+349.44+650.88+952.32+407.68+759.36+1111.04)=\mathbf{5857.92\text{cm}^2}$$

De même pour les barres T12, il nous faut :  **$6943.104\text{cm}^2$**

Et pour les barres T14, il nous faut :  **$8028.288\text{cm}^2$**

Donc on aura a découper 216 morceaux, soit une surface de :  **$20829.312\text{cm}^2$**

## II.7-DIFFERENTS ETAPES DE PROTECTION DES BARRES



1-Appliquer à l'aide d'un pinceau une couche mince de colle sur toute la longueur de la barre, à habiller par tissu de fibre de carbone, et à sceller dans le béton.

2-Ajuster le TFC avec la barre de façon que le tissu ne déborde pas la partie à sceller



3-Faire rouler attentivement le TFC (tissu de fibre de carbone) autour de la barre



4-Faire appuyer légèrement la barre contre le tissu tout en continuant à la faire rouler Jusqu'à obtenir la première couche de protection

5-Appliquer une couche mince de colle sur la couche de tissu obtenu



6-Continuer a faire rouler le tissu autour de la barre, en appuyant légèrement dessus, Jusqu'à obtenir la deuxième couche.



7-Appuyer à l'aide des doigts sur le tissu jusqu'à ce qu'on voit la colle déborde le tissu.

8-Essuyer le tissu de la colle débordée en tendant ce premier légèrement



9-Produit fini : barre habillée par couches de matériaux composites (tissu de fibre de carbone)



## II.8-COULAGE DU BETON

Les éprouvettes d'essais ont été fabriquées dans un atelier et la composition du béton utilisé dans notre étude est détaillée comme suit :

Selon **Bolomey** on a pour  $1\text{m}^3$  de béton

**Tableau II.3- Composition du béton**

	Les quantités pour $1\text{m}^3$ de béton	
	En masse (Kg)	En volume apparent ( $\text{dm}^3$ )
Ciment	350	350
Sable fin	821	547
Gravier 3/8 et 5/15	954	658
Eau de gâchage	193	193
	2318	

Pour les barres T10 on a utilisé un béton un peu raide, (avec une petite diminution de la quantité d'eau). Un béton vibré (mais difficilement maniable).

Pour les barres T12 on a utilisé un béton normal avec une légère augmentation de la quantité de ciment

Pour les barres T14 le béton utilisé est un peu fluide (avec une légère augmentation de la quantité d'eau)

Le sable utilisé est un sable fin provenant de Ben Azzouz Wilaya de Skikda

Le gravier utilisé est un gravier 3/8 provenant de la carrière d'Essafia Wilaya de Skikda

Le ciment utilisé est un ciment CPJ provenant de l'usine Hadjar Essoud

L'eau de gâchage est l'eau du robinet

**Le moule** : on a utilisé des troncs de PVC de diamètre 100 mm, et de longueur 25 cm



-Ensuite le moule est découpé longitudinalement, puis rassembler de nouveau avec du fil d'attache, pour pouvoir décoffrer à la fin.



-A l'aide du fil d'attache exécuter une croix qui sert comme support à la barre, et pour pouvoir centrer cette dernière dans la masse de béton.



-Ajuster la barre au centre du moule, puis la fixer dans cette position à l'aide de la croix



-Faire couler attentivement le béton dans le moule tout en gardant la barre centrée

-Faire vibrer le béton à l'aide d'une barre tout en maintenant la barre fixe.  
Et c'est l'opération la plus délicate



-A l'aide d'une barre, enlever le surplus du béton



**-Produit fini** : Armature habillée par matériau composite et scellée dans le béton



## II.9-INSTALLATION DE L'APPAREIL :

Visser le nouveau support sur le filetage fixe de l'appareil, et visser le support d'origine sur le vérin qui est mobile. La partie fixe contient la masse de béton tandis que la partie mobile, elle contient les mors qui fixent l'armature sur le vérin.



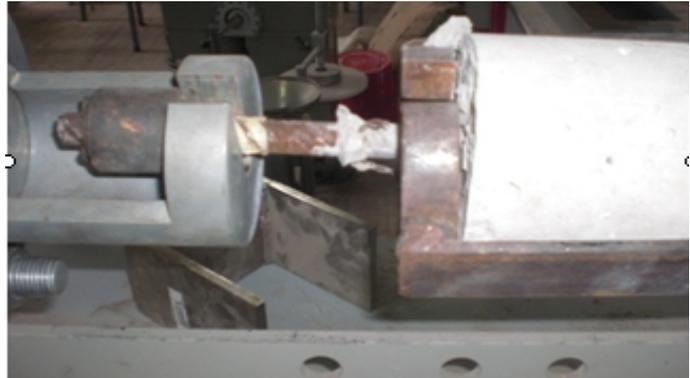
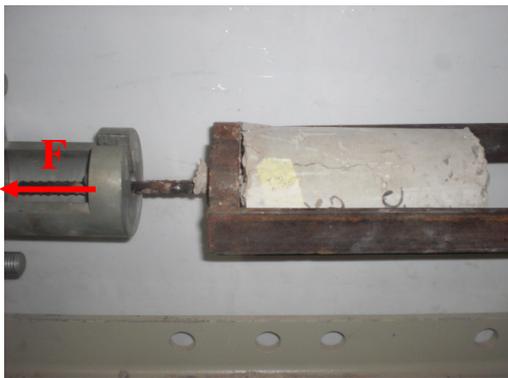
Support fixe  
contenant l'éprouvette

Support mobile  
contenant les mors



Mettre en marche l'appareil :

Le vérin est équipé d'un piston qui se met en mouvement lent, et uniforme, ainsi une force  $F$  est appliquée sur l'armature. Cette force tend à arracher cette dernière de la masse de béton. Sur le pupitre on lit la force maximale d'arrachement ( $P_{ic}$ )



## II.10. CONCLUSIONS:

- 1-La colle Sikadur330 est très nuisible pour les yeux et pour les poumons, et on recommande de préparer de petites quantités. Car pendant son utilisation pour des durées de temps assez grandes, la colle dégage une très forte chaleur et durcit brusquement.
- 2-Pour éviter les moments parasites, au cours de l'arrachement de l'armature de la masse de béton, on devrait centrer cette dernière dans le moule et la fixer dans cette position jusqu'à la prise du béton; et c'était l'opération la plus délicate.
- 3-Lorsque la force d'arrachement n'est pas parfaitement parallèle à la barre, on aura à faire à d'autres forces, autre que la force de frottements entre le béton et l'acier qui définit généralement l'adhérence. C'est pour cela qu'on devrait être attentive, et veiller à ce que l'éprouvette soit bien positionnée dans le support qui a été fabriqué (ainsi que les mors) spécialement pour ces essais.

## CHAPITRE III

# Résultats et analyses

### III.1-RESULTATS D'ESSAIS

#### - III.1.1,Force d'arrachement-Glisement pour les barres T10

a-Ancrage : 10 cm

Sans couches de protection (TFC)

Tableau III.1-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A10cm, SP

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	8.56	9.00	8.45	8.23	8.40	8.32	8.26	8.22
Glissement (mm)	0.52	0.54	0.58	0.53	0.53	0.56	0.57	0.57

Force d'arrachement moyenne (KN) : **8.43KN**

Glissement moyen : 0.55mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{843}{3.14 * 1.0 * 10} = 26.84 \text{ daN/cm}^2$$



Surface extérieure non fissurée



Enlèvement d'un petit cône de béton

Mode d'endommagement : On observe un glissement de la barre sans que le béton ne soit fissuré, avec arrachement d'un petit cône de béton.

**-Barres T10**

b-Ancrage : 10 cm

Avec une couche de protection (TFC)

**Tableau III.2-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A10cm, PIC**

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	11.50	11.48	11.38	11.35	11.51	11.37	11.45	11.24
Glissement (mm)	0.60	0.59	0.56	0.57	0.57	0.58	0.60	0.57

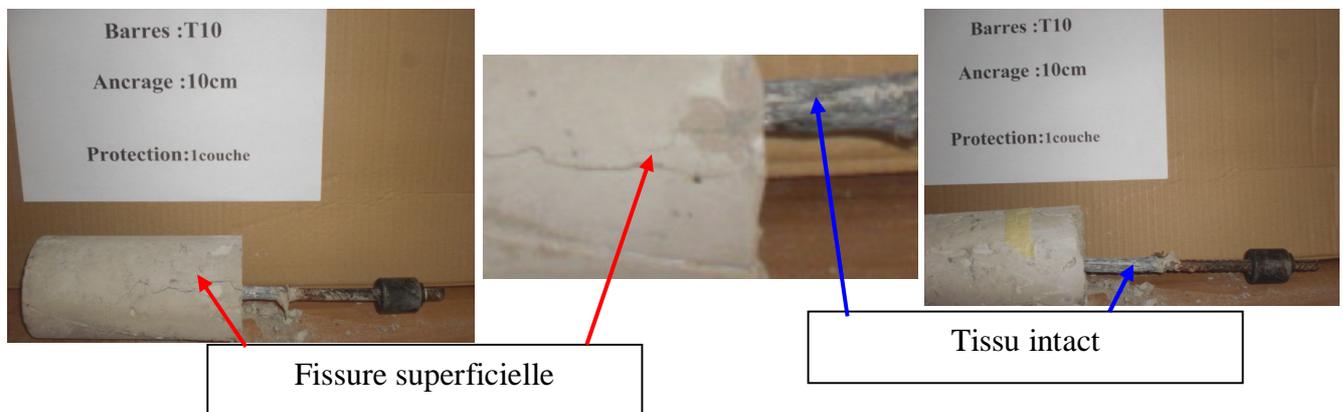
Force d'arrachement moyenne (KN) : **11.41KN**

Glissement moyen : 0.58mm

Contrainte tangentielle :

$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1141}{3.14 * 1.086 * 10} = 33.46 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 10+2*0.43=10.86\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



**Mode d'endommagement :**

On observe un glissement de la barre sans que le tissu ne soit abîmé, ni décollé, avec une légère fissure superficielle dans la masse du béton et un arrachement d'un petit cône de béton.

**-Barres T10**

c-Ancrage : 10 cm

Avec deux couches de protection (TFC)

*Tableau III.3-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A10cm,P2C*

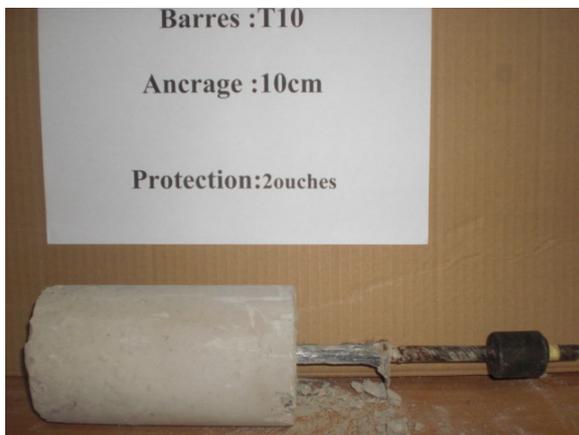
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	11.00	11.15	11.09	11.12	10.98	11.05	11.10	10.91
Glissement (mm)	0.44	0.46	0.50	0.41	0.42	0.46	0.45	0.46

Force d'arrachement moyenne (KN) : **11.05KN**

Glissement moyen : 0.45mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1105}{3.14 * 1.172 * 10} = 30.02 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 10+4*0.43=11.72\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Tissu intact et enlèvement d'un très petit cône de béton

**Mode d'endommagement :**

Pour la majorité des barres T10 avec deux couches de protection, on observe un glissement des barres sans que le tissu ne soit abîmé et avec de légères fissures sur la longueur de l'ancrage.

**-Barres T10**

d-Ancrage : 10 cm

Avec trois couches de protection (TFC)

*Tableau III.4-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A10cm, P3C*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	10.50	10.45	10.50	10.42	10.51	10.49	10.47	10.50
Glissement (mm)	0.50	0.48	0.53	0.52	0.51	0.54	0.48	0.52

Force d'arrachement moyenne (KN) : **10.48KN**

Glissement moyen : 0.51mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1048}{3.14 * 1.258 * 10} = 26.53 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 10+6*0.43=12.58\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Mode d'endommagement :

On observe un glissement des barres T10, (avec trois couches de protection) dans la masse de béton sans que celui-ci ne se fissure ; avec un petit déchirement du tissu dû a une insuffisance de colle.

**-Barres T10**

e-Ancrage : 12 cm

sans couches de protection (TFC)

*Tableau III.5-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A12cm, SP*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	10.16	10.21	10.15	10.20	10.14	10.22	10.15	10.13
Glissement (mm)	0.58	0.57	0.60	0.61	0.61	0.59	0.60	0.56

Force d'arrachement moyenne (KN) : **10.17KN**

Glissement moyen : 0.59mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi \phi L} = \frac{1017}{3.14 * 1.0 * 12} = 26.99 \text{ daN/cm}^2$$



Fissure profonde et destruction légère de la masse de béton

Mode d'endommagement :

On observe un glissement de la barre T10 (ancrage 12cm) avec une fissure profonde et très visible (épaisse) accompagnée d'une petite destruction sur le bout de la masse de béton.

**-Barres T10**

f-Ancrage : 12 cm

Avec une couche de protection (TFC)

*Tableau. III.6-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A12cm, PIC*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	11.90	11.98	11.99	11.89	12.00	12.03	11.87	11.94
Glissement (mm)	0.48	0.50	0.47	0.48	0.49	0.50	0.46	0.46

Force d'arrachement moyenne (KN) : **11.95KN**

Glissement moyen : 0.48mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1195}{3.14 * 1.086 * 12} = 29.20 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 10+2*0.43=10.86\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Fissure tout le long de l'ancrage



Tissu intact

**Mode d'endommagement :**

On observe un glissement de l'ensemble (barre+tissu) dans la masse de béton sans qu'il y ait déchirement dans le tissu. On constate aussi une fissure sur la partie d'ancrage, avec une petite destruction sur le bout de la masse de béton

**-Barres T10**

g-Ancrage : 12 cm

Avec deux couches de protection (TFC)

*Tableau III.7-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A12cm, P2C*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	11.56	11.60	11.58	11.50	11.49	11.58	11.55	11.54
Glissement (mm)	0.50	0.49	0.53	0.54	0.52	0.52	0.53	0.53

Force d'arrachement moyenne (KN) : **11.55KN**

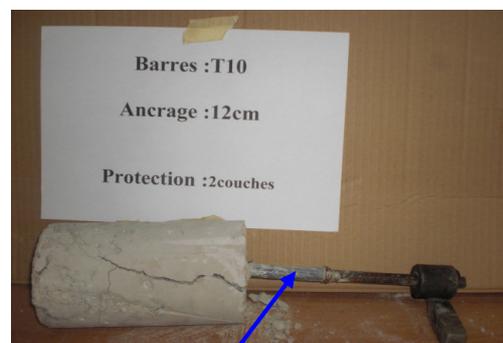
Glissement moyen : 0.52mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1155}{3.14 * 1.172 * 12} = 26.15 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 10 + 4 * 0.43 = 11.72 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Fissure profonde, seulement sur la longueur d'ancrage



Tissu intact

Mode d'endommagement :

Glissement de l'ensemble (barre+tissu) dans la masse de béton .On observe une fissure profonde tout le long de la longueur d'ancrage, mais le tissu reste intact.

**-Barres T10**

h-Ancrage : 12 cm

Avec trois couches de protection (TFC)

*Tableau III.8-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A12cm, P3C*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	10.90	10.98	11.01	10.95	10.95	11.03	10.89	10.89
Glissement (mm)	0.55	0.57	0.56	0.54	0.58	0.57	0.56	0.55

Force d'arrachement moyenne (KN) : **10.95KN**

Glissement moyen : 0.56mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1095}{3.14 * 1.258 * 12} = 23.10 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 10+6*0.43=12.58\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Léger déchirement du tissu

Mode d'endommagement :

On observe un glissement de l'ensemble (barre + tissu), avec une petite destruction sous forme de cône au bout de la masse de béton .Aussi l'apparition d'une fissure assez profonde, et un léger déchirement du tissu.

**-Barres T10**

i-Ancrage : 14 cm

sans couches de protection (TFC)

*Tableau III.9-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A14cm, SP*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	11.80	11.85	11.84	11.82	11.83	11.79	11.86	11.77
Glissement (mm)	0.50	0.60	0.51	0.48	0.49	0.47	0.50	0.45

Force d'arrachement moyenne (KN) : **11.82KN**

Glissement moyen : 0.50mm

Contrainte tangentielle :

$$\tau = \frac{F}{\pi \phi L} = \frac{1182}{3.14 * 1.0 * 14} = 26.91 \text{ daN/cm}^2$$



Fissure profonde et épaisse

**Mode d'endommagement :**

Glissement de la barre dans la masse de béton. On observe aussi une fissure profonde et épaisse tout le long de cette dernière.

**-Barres T10**

j-Ancrage : 14 cm

Avec une couche de protection (TFC)

*Tableau III.10-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A14cm, PIC*

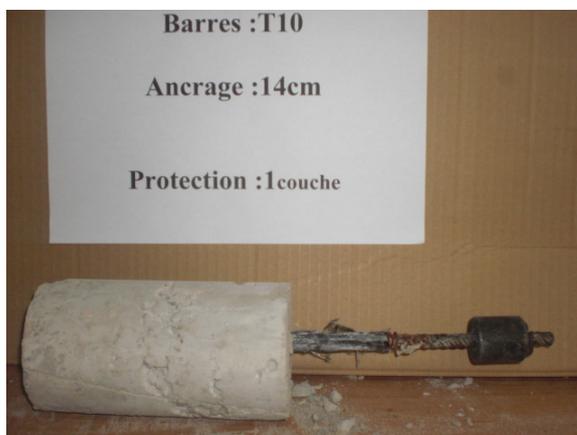
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	12.20	12.15	12.10	12.01	12.12	12.05	12.10	12.15
Glissement (mm)	0.46	0.47	0.50	0.48	0.49	0.51	0.47	0.46

Force d'arrachement moyenne (KN) : **12.11KN**

Glissement moyen : 0.48mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1211}{3.14 * 1.086 * 14} = 25.36 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 10+2*0.43=10.86\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Léger déchirement du tissu

**Mode d'endommagement :**

Glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton sans qu'il y ait ni fissures ni arrachement de cône de béton, mais on observe un petit déchirement sur le tissu dû à un manque de colle.

**-Barres T10**

k-Ancrage : 14 cm

Avec deux couches de protection (TFC)

*Tableau III.11-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A14cm, P2C*

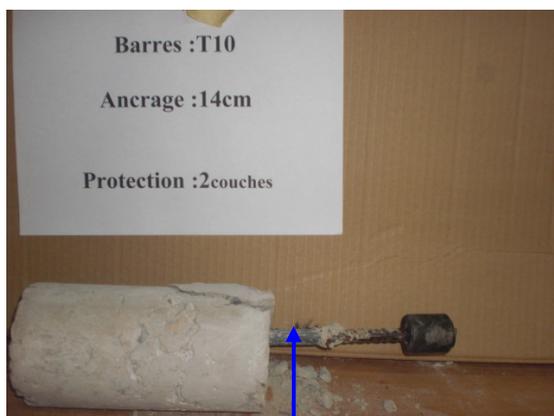
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	11.65	11.68	11.70	1169	11.60	11.62	11.70	11.64
Glissement (mm)	0.45	0.40	0.42	0.42	0.41	0.40	0.39	0.39

Force d'arrachement moyenne (KN) : **11.66KN**

Glissement moyen : 0.41mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1166}{3.14 * 1.172 * 14} = 22.63 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 10 + 4 * 0.43 = 11.72 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Tissu intact



Arrachement d'un morceau de béton

Mode d'endommagement :

On observe un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton sans que le tissu ne soit abîmé. On constate aussi une destruction, ou un arrachement d'un morceau de béton suite à une profonde fissure.

**-Barres T10**

l-Ancrage : 14 cm

Avec trois couches de protection (TFC)

*Tableau III.12-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA10, A1cm,P3C*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	11.22	11.23	11.22	11.18	11.21	11.24	11.25	11.21
Glissement (mm)	0.40	0.39	0.37	0.37	0.38	0.40	0.37	0.36

Force d'arrachement moyenne (KN) : **11.22KN**

Glissement moyen :0.38mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1122}{3.14 * 1.258 * 14} = 20.28 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 10+6*0.43=12.58\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Petite déchirure

Mode d'endommagement :

On constate une légère déchirure au niveau du tissu, ainsi qu'une légère fissure qui tend à être invisible. Et tout l'ensemble (barre et tissu) glisse dans la masse de béton.

**- III.1.2. Force d'arrachement-Glisement pour les barres T12**

a-Ancrage : 10 cm

sans couches de protection (TFC)

**Tableau III.13-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A10cm, SP**

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	12.00	12.10	12.20	12.15	12.02	12.08	12.09	12.08
Glissement (mm)	0.38	0.39	0.37	0.40	0.34	0.35	0.38	0.35

Force d'arrachement moyenne (KN) : **12.09KN**

Glissement moyen : 0.37mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1209}{3.14 * 1.2 * 10} = 32.08 daN / cm^2$$



Fissure profonde le long de l'ancrage

Mode d'endommagement :

On constate un glissement de la barre dans la masse de béton avec arrachement d'un petit cône, et apparition d'une fissure profonde le long de l'ancrage seulement.

**-Barres T12**

b-Ancrage : 10 cm

Avec une couche de protection (TFC)

*Tableau III.14-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A10cmPIC*

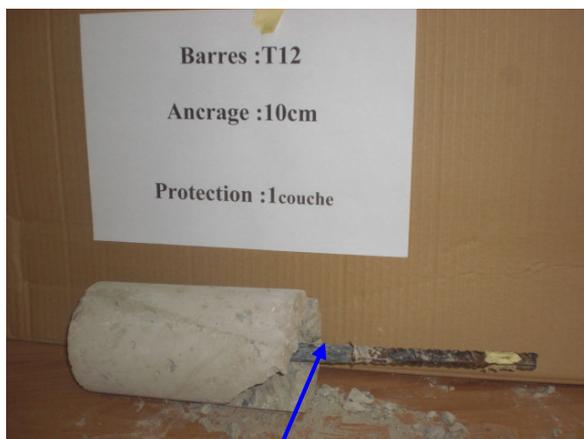
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	13.50	13.50	13.54	13.48	13.51	13.55	13.59	13.49
Glissement (mm)	0.45	0.43	0.40	0.43	0.41	0.40	0.44	0.40

Force d'arrachement moyenne (KN) : **13.52KN**

Glissement moyen : 0.42mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1352}{3.14 * 1.286 * 10} = 33.48 \text{daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 12+2*0.43=12.86\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Tissu intact



Arrachement d'un cône et destruction de l'échantillon

Mode d'endommagement :

On constate un glissement de l'ensemble ( barre + tissu) dans la masse de béton avec arrachement d'un cône et destruction du bout de l'échantillon, avec apparition d'une fissure . tandis que le tissu est resté intact.

**-Barres T12**

c-Ancrage : 10 cm

Avec deux couches de protection (TFC)

*Tableau III.15-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A10cm, P2C*

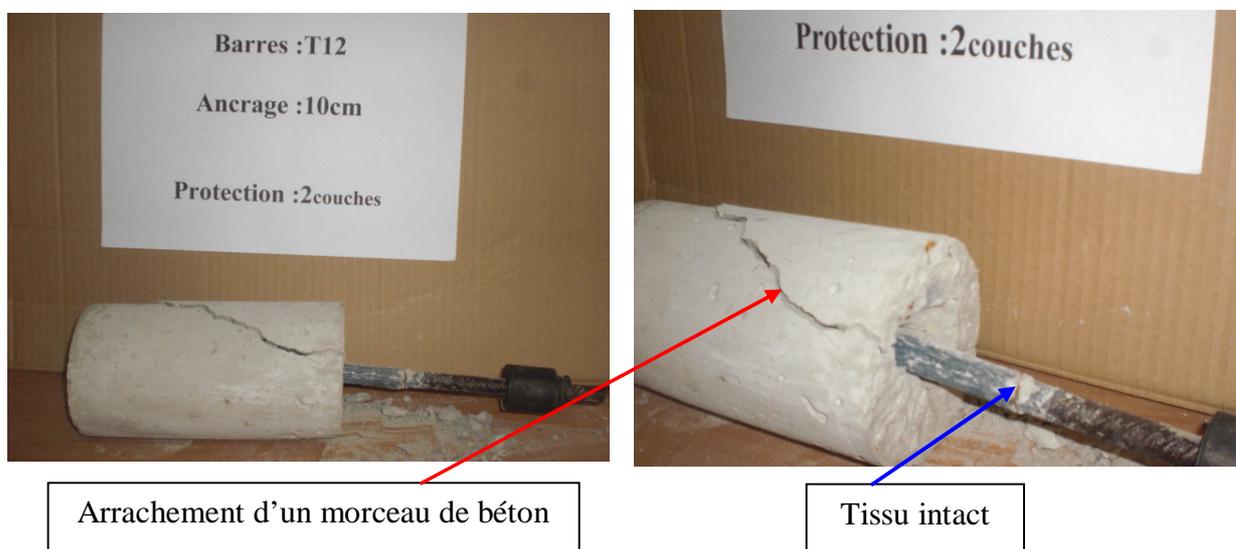
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	12.97	13.02	13.00	13.05	13.00	13.01	13.00	12.95
Glissement (mm)	0.46	0.48	0.46	0.49	0.48	0.45	0.45	0.49

Force d'arrachement moyenne (KN) : **13.00KN**

Glissement moyen : 0.47mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1300}{3.14 * 1.372 * 10} = 30.17 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 12 + 4 * 0.43 = 13.72 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



**Mode d'endommagement :**

Glissement de l'ensemble dans la masse de béton, avec une fissure épaisse et profonde le long de l'échantillon, avec un arrachement d'un morceau de béton. Mais le tissu reste intact et recouvert d'une couche mince de béton.

**-Barres T12**

d-Ancrage : 10 cm

Avec trois couches de protection (TFC)

Tableau III.16-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A10cm, P3C

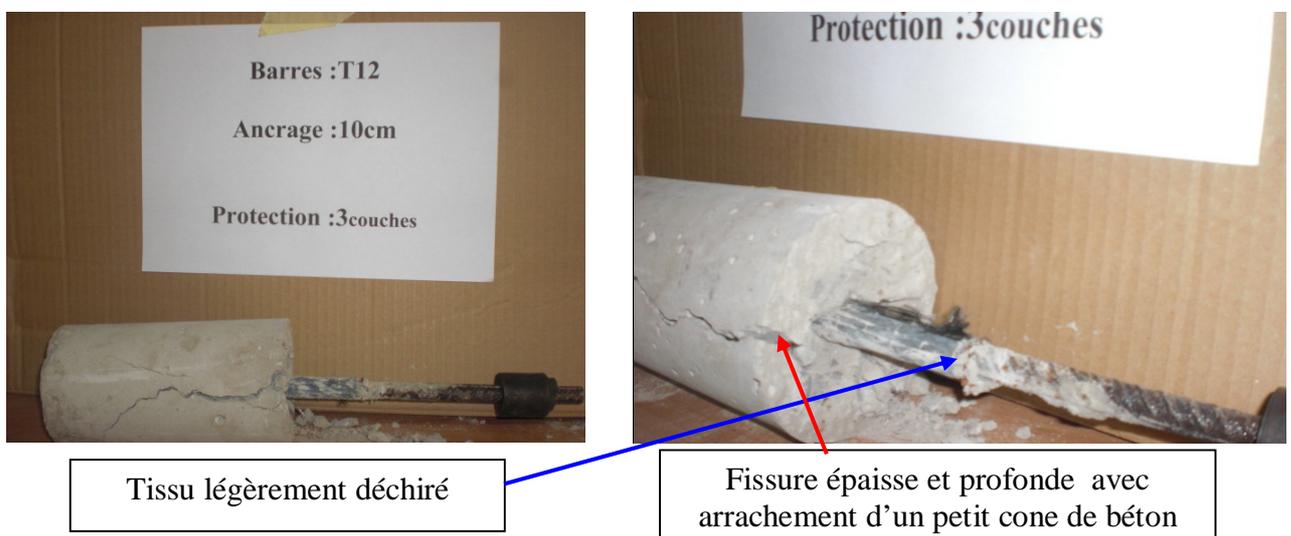
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	12.40	12.35	12.37	12.39	12.40	12.34	12.35	12.36
Glissement (mm)	0.40	0.31	0.38	0.39	0.39	0.38	0.39	0.40

Force d'arrachement moyenne (KN) : **12.37KN**

Glissement moyen : 0.39mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1237}{3.14 * 1.458 * 10} = 27.02 daN/cm^2$$

(Avec  $\phi = 12+6*0.43=14.58mm$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



**Mode d'endommagement :**

On remarque un glissement de l'ensemble dans la masse de béton , avec une fissure épaisse et profonde le long de l'échantillon et avec un arrachement d'un petit cône de béton .Mais le tissu reste presque intact avec seulement une très petite déchirure .

**-Barres T12**

e-Ancrage : 12 cm

sans couches de protection (TFC)

**Tableau III.17-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A12cm, SP**

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	14.56	14.54	14.58	14.51	14.53	14.54	14.56	14.50
Glissement (mm)	0.34	0.35	0.36	0.36	0.35	0.37	0.34	0.33

Force d'arrachement moyenne (KN) : **14.54KN**

Glissement moyen : 0.35mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1454}{3.14 * 1.2 * 12} = 32.15 \text{ daN/cm}^2$$



Fissure le long de l'ancrage

**Mode d'endommagement :**

On remarque un glissement de la barre dans la masse de béton, avec une fissure épaisse et profonde le long de l'ancrage avec un arrachement d'un petit cône de béton.

**-Barres T12**

f-Ancrage : 12 cm

Avec une couche de protection (TFC)

*Tableau III.18-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA1, A12cm, PIC*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	15.98	16.10	16.04	15.96	16.02	15.95	15.97	15.98
Glissement (mm)	0.45	0.46	0.45	0.43	0.42	0.44	0.45	0.42

Force d'arrachement moyenne (KN) : **16.00KN**

Glissement moyen : 0.44mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1600}{3.14 * 1.286 * 12} = 33.03 \text{daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 12+2*0.43=12.86\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Mode d'endommagement :

On remarque un glissement de l'ensemble dans la masse de béton, avec un éclatement de cette dernière, et un arrachement d'un petit cone de béton .Mais le tissu reste intact et recouvert d'une couche fine de béton.

**-Barres T12**

g-Ancrage : 12 cm

Avec deux couches de protection (TFC)

**Tableau III.19-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA1, A12cm, P2C**

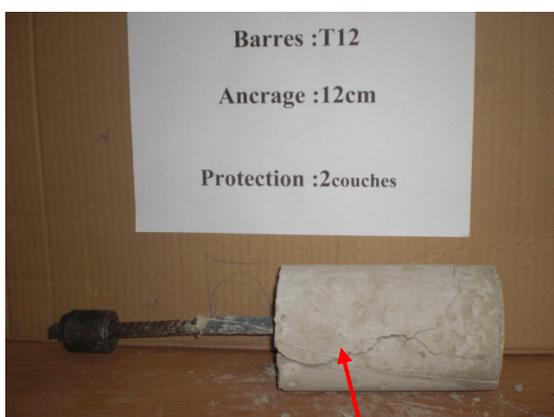
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	15.34	15.33	15.34	15.31	15.30	15.31	15.30	15.33
Glissement (mm)	0.52	0.52	0.51	0.50	0.50	0.52	0.51	0.50

Force d'arrachement moyenne (KN) : **15.32KN**

Glissement moyen : 0.51mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1532}{3.14 * 1.372 * 12} = 29.63 \text{daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 12+4*0.43=13.72\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Fissure épaisse le long de l'ancrage



Tissu intact

**Mode d'endommagement :**

Glissement de l'ensemble (barre + tissu ) dans la masse de béton, avec l'apparition d'une fissure épaisse le long de l'ancrage et fine sur la partie restante et un arrachement d'un petit cône de béton .Mais le tissu reste intact et recouvert d'une couche fine de béton.

**-Barres T12**

h-Ancrage : 12 cm

Avec trois couches de protection (TFC)

Tableau III.20-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A12cm, P3C

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	14.80	14.76	14.76	14.79	14.78	14.78	14.77	14.80
Glissement (mm)	0.47	0.47	0.48	0.48	0.46	0.45	0.48	0.47

Force d'arrachement moyenne (KN) : **14.78KN**

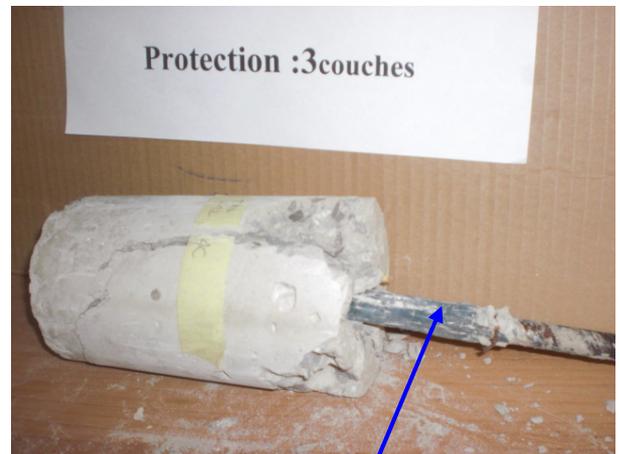
Glissement moyen : 0.47mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1478}{3.14 * 1.458 * 12} = 26.92 daN/cm^2$$

(Avec  $\phi = 12+6*0.43=14.58mm$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Eclatement de la masse de béton



Tissu intact et recouvert d'une couche fine de béton

**Mode d'endommagement :**

Eclatement de la masse de béton, et glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans cette dernière sans que le tissu ne soit abîmé, ni soit décollé de la barre.

**-Barres T12**

i-Ancrage : 14 cm

sans couches de protection (TFC)

**Tableau III.21-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A14cm, SP**

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	17.03	17.05	16.98	16.99	17.00	17.01	16.98	16.96
Glissement (mm)	0.40	0.38	0.39	0.39	0.38	0.37	0.37	0.36

Force d'arrachement moyenne (KN) : **17.00KN**

Glissement moyen : 0.38mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1700}{3.14 * 1.2 * 14} = 32.23 daN/cm^2$$



Barre recouverte d'une couche fine de beton



Fissure très fine le long de la masse de béton

**Mode d'endommagement :**

On constate un glissement de la barre dans la masse de béton, avec arrachement de petits morceaux de béton. On voit aussi une très très fine fissure (qui tend à être invisible) tout le long de l'échantillon.

**-Barres T12**

j-Ancrage : 14 cm

Avec une couche de protection (TFC)

*Tableau III.22-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A14cm,PIC*

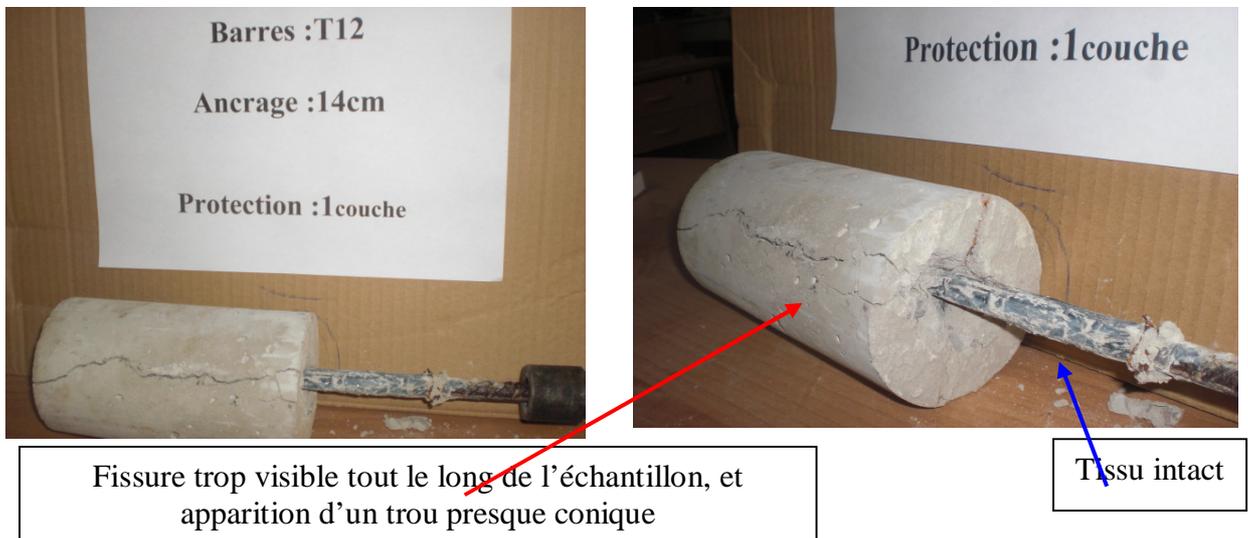
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	18.20	18.15	18.21	18.17	18.16	18.15	18.17	18.15
Glissement (mm)	0.45	0.43	0.46	0.46	0.46	0.44	0.45	0.45

Force d'arrachement moyenne (KN) : **18.17KN**

Glissement moyen : 0.45mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1817}{3.14 * 1.286 * 14} = 32.15 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 12+2*0.43=12.86\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



**Mode d'endommagement :**

Glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, et apparition d'une fissure épaisse (très visible) tout le long de l'échantillon, aussi on observe un arrachement de petits morceaux de béton au voisinage du contact : barre – béton .En ce qui concerne le tissu il apparaît intact

**-Barres T12**

k-Ancrage : 14 cm

Avec deux couches de protection (TFC)

*Tableau III.23-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A14cm,P2C*

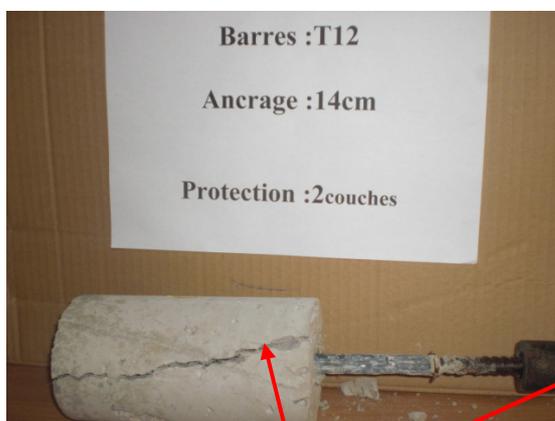
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	17.85	17.78	17.79	17.80	17.82	17.81	17.80	17.77
Glissement (mm)	0.42	0.41	0.40	0.39	0.40	0.41	0.38	0.39

Force d'arrachement moyenne (KN) : **17.80KN**

Glissement moyen : 0.40mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1780}{3.14 * 1.372 * 14} = 29.52 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 12 + 4 * 0.43 = 13.72 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Fissure trop épaisse et très profonde tout le long de l'échantillon



Tissu intact, recouvert d'une couche fine de béton

**Mode d'endommagement :**

On voit toujours glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure trop épaisse et très profonde tout le long de l'échantillon qui tend a partager longitudinalement ce dernier en deux parties. Tandis que le tissu est resté intact sans déchirure et sans qu'il ne soit décollé de la barre

**-Barres T12**

l-Ancrage : 14 cm

Avec trois couches de protection (TFC)

*Tableau III.24-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA12, A14cm, P3C*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	17.19	17.20	17.18	17.21	17.22	17.18	17.20	17.22
Glissement (mm)	0.42	0.42	0.41	0.40	0.43	0.42	0.43	0.43

Force d'arrachement moyenne (KN) : **17.20KN**

Glissement moyen : 0.42mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1720}{3.14 * 1.458 * 14} = 26.85 \text{daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 12 + 6 * 0.43 = 14.58 \text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Fissure épaisse et profonde sur la partie d'ancrage et mince sur la partie restante



Tissu intact recouvert d'une couche fine de béton, et bien collé sur la

Mode d'endommagement :

On voit toujours un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure trop épaisse et très profonde sur la longueur d'ancrage et devient de plus en plus fine le long de l'échantillon, aussi il y a destruction du bout de la masse de béton, avec apparition d'un petit trou conique. Tandis que le tissu est resté intact sans déchirure et sans qu'il ne soit décollé de la barre .

**- III.1.3. Force d'arrachement-Glisement pour les barres T14**

a-Ancrage : 10 cm

sans couches de protection (TFC)

**Tableau III.25-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A10cm, SP**

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	12.20	12.18	12.20	12.20	12.21	12.20	12.23	12.18
Glissement (mm)	0.55	0.56	0.57	0.56	0.57	0.55	0.57	0.55

Force d'arrachement moyenne (KN) : **12.20KN**

Glissement moyen : 0.56mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1220}{3.14*1.4*10} = 27.75 \text{ daN/cm}^2$$



Fissure épaisse et profonde sur la longueur d'ancrage



Apparition d'un petit trou conique

Mode d'endommagement :

On voit un glissement de la barre dans la masse de béton et recouverte d'une couche fine de béton, avec apparition d'une fissure trop épaisse et très profonde surtout sur la longueur d'ancrage et devient de plus en plus fine le long de l'échantillon, aussi il y a destruction du bout de la masse de béton, avec apparition d'un petit trou conique

**-Barres T14**

b-Ancrage : 10 cm

Avec une couche de protection (TFC)

*Tableau III.26-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A10cm, PIC*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	13.80	13.80	13.81	13.78	13.78	13.79	13.78	13.78
Glissement (mm)	0.50	0.51	0.49	0.48	0.49	0.52	0.50	0.51

Force d'arrachement moyenne (KN) : **13.79KN**

Glissement moyen : 0.50mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1379}{3.14 * 1.486 * 10} = 29.55 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 14 + 2 * 0.43 = 14.86 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Mode d'endommagement :

On constate un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure très fine qui tend à être invisible sur la longueur d'ancrage et disparaît sur l'autre partie de l'échantillon, aussi il y a destruction du bout de la masse de béton, avec apparition d'un petit trou conique. Tandis que le tissu est resté intact sans déchirure et sans qu'il ne soit décollé de la barre et recouvert d'une couche fine de béton.

**-Barres T14**

c-Ancrage : 10 cm

Avec deux couches de protection (TFC)

Tableau III.27-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A10cm, P2C

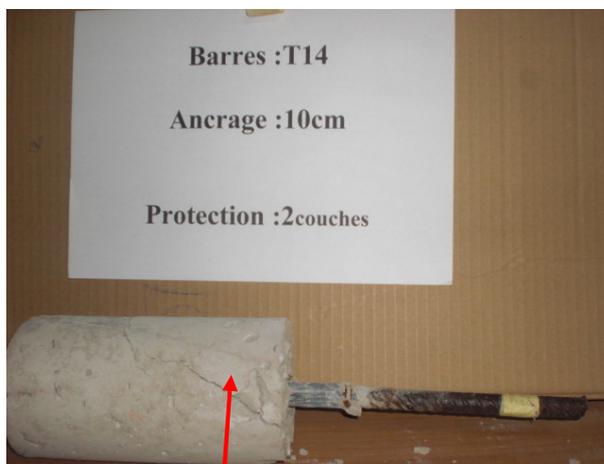
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	13.35	13.37	13.34	13.36	13.34	13.35	13.34	13.35
Glissement (mm)	0.49	0.49	0.48	0.48	0.47	0.49	0.47	0.47

Force d'arrachement moyenne (KN) : **13.35KN**

Glissement moyen : 0.48mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1335}{3.14 * 15.72 * 10} = 27.04 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 14 + 4 * 0.43 = 15.72 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Fissure peu profonde sur la longueur d'ancrage seulement



Tissu intact

**Mode d'endommagement :**

On voit toujours un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure plus ou moins épaisse et peu profonde sur la longueur d'ancrage et devient de plus en plus fine le long de l'échantillon, aussi il y a destruction du bout de la masse de béton, avec apparition d'un petit trou conique. Tandis que le tissu est resté intact sans déchirure et sans qu'il ne soit décollé de la barre.

**-Barres T14**

d-Ancrage : 10 cm

Avec trois couches de protection (TFC)

*Tableau III.28-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A10cm, P3C*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	12.99	13.00	12.97	12.98	12.97	12.98	12.97	12.98
Glissement (mm)	0.45	0.45	0.47	0.46	0.44	0.44	0.45	0.44

Force d'arrachement moyenne (KN) : **12.98KN**

Glissement moyen : 0.45mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1298}{3.14 * 1.658 * 10} = 24.93 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 14 + 6 * 0.43 = 16.58 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



**Mode d'endommagement :**

Glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure épaisse et profonde sur la longueur d'ancrage et disparaît sur l'autre bout de l'échantillon ,aussi il y a destruction du bout de la masse de béton, avec apparition d'un petit trou conique. La fissure se prolonge de l'autre de l'échantillon et tend à le faire découper longitudinalement en deux. Tandis que le tissu est resté intact sans déchirure et sans qu'il ne soit décollé de la barre

**-Barres T14**

e-Ancrage : 12 cm

sans couches de protection (TFC)

*Tableau III.29-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A12cm, SP*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	14.60	14.58	14.59	14.60	14.56	14.57	14.58	14.56
Glissement (mm)	0.38	0.38	0.38	0.36	0.36	0.38	0.36	0.36

Force d'arrachement moyenne (KN) : **14.58KN**

Glissement moyen : 0.37mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1458}{3.14 * 1.4 * 12} = 27.63 \text{ daN/cm}^2$$



Fissure épaisse le long de l'ancrage seulement



Trou presque conique

Mode d'endommagement :

On constate un glissement de la barre dans la masse de béton, avec arrachement de petits morceaux de béton qui cèdent la place à un trou presque conique . On voit aussi une fissure plus ou moins épaisse et peu profonde tout le long de l'ancrage,et devient de plus en plus invisible jusqu'à ce qu'elle disparaisse sur l'autre moitié de l'échantillon .

**-Barres T14**

f-Ancrage : 12 cm

Avec une couche de protection (TFC)

*Tableau III.30-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A12cm, PIC*

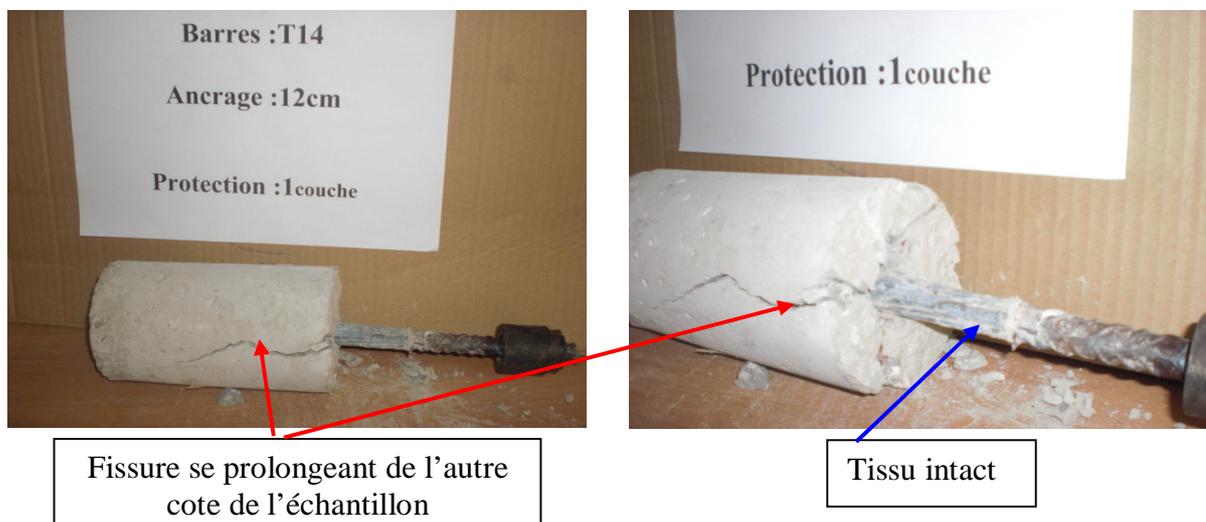
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	15.90	15.89	15.87	15.90	15.89	15.88	15.88	15.91
Glissement (mm)	0.40	0.40	0.38	0.39	0.42	0.41	0.39	0.41

Force d'arrachement moyenne (KN) : **15.89KN**

Glissement moyen : 0.40mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1589}{3.14 * 1.486 * 12} = 28.37 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 14 + 2 * 0.43 = 14.86 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Mode d'endommagement :

On constate un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure trop épaisse et très profonde sur la longueur d'ancrage et devient de plus en plus fine sur l'autre bout de l'échantillon. La fissure se prolonge de l'autre cote de l'échantillon et tend à le faire partager longitudinalement en deux .Aussi il y a destruction du bout de la masse de béton, avec apparition d'un petit trou conique.Tandis que le tissu est resté intact sans déchirure et sans qu'il ne soit décollé de la barre.

**-Barres T14**

g-Ancrage : 12 cm

Avec deux couches de protection (TFC)

*Tableau III.31-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A12cm, P2C*

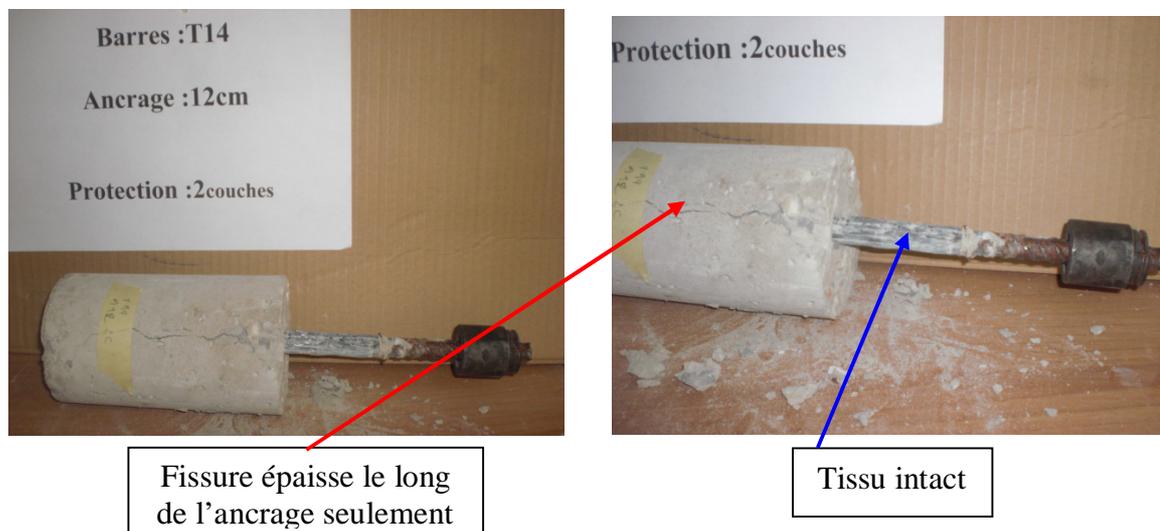
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	15.70	15.68	15.67	15.67	15.70	15.69	15.66	15.67
Glissement (mm)	0.43	0.41	0.41	0.42	0.40	0.43	0.43	0.42

Force d'arrachement moyenne (KN) : **15.68KN**

Glissement moyen : 0.42mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1568}{3.14 * 1.572 * 12} = 26.48 daN/cm^2$$

(Avec  $\phi = 14 + 4 * 0.43 = 15.72mm$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Mode d'endommagement :

Le tissu est resté intact sans déchirure et sans qu'il ne soit décollé de la barre, recouvert d'une couche fine de béton. Et on observe toujours un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure épaisse et peu profonde sur la longueur d'ancrage et disparaît de plus en plus le long de l'échantillon, aussi il y a destruction du bout de la masse de béton, avec apparition d'un petit trou conique.

**-Barres T14**

h-Ancrage : 12 cm

Avec trois couches de protection (TFC)

Tableau III.32-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A12cm, P3C

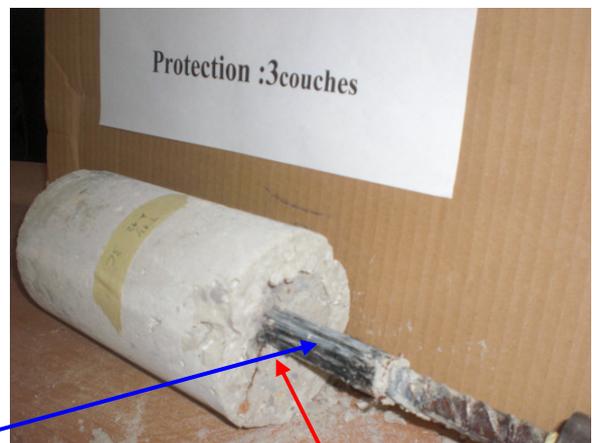
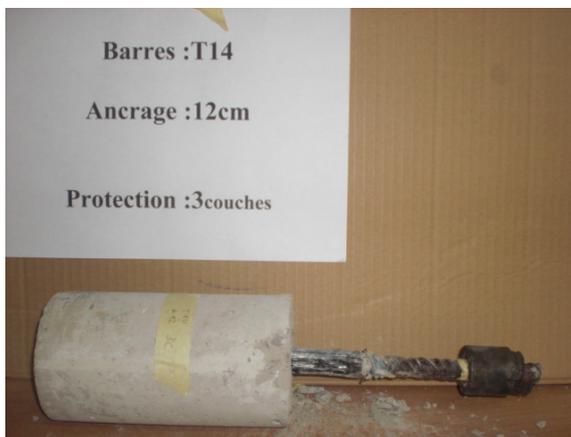
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	14.55	14.56	14.57	14.56	14.57	14.56	14.57	14.54
Glissement (mm)	0.36	0.35	0.37	0.34	0.34	0.35	0.36	0.33

Force d'arrachement moyenne (KN) : **14.56KN**

Glissement moyen : 0.35mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1456}{3.14 * 1.658 * 12} = 23.32 daN/ cm^2$$

(Avec  $\phi = 14+6*0.43=16.58mm$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Tissu intact

Destruction en forme de trou conique

**Mode d'endommagement :**

Glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure qui tend à être invisible sur la longueur d'ancrage et devient vraiment invisible le long de l'échantillon, aussi il y a destruction du bout de la masse de béton, avec apparition

d'un petit trou conique. Tandis que le tissu est resté intact sans déchirure et sans qu'il ne soit abîmé ni décollé de la barre

**-Barres T14**

i-Ancrage : 14 cm

sans couches de protection (TFC)

*Tableau III.33-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A14cm, SP*

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	16.80	16.82	16.83	16.80	16.80	16.81	16.82	16.80
Glissement (mm)	0.56	0.54	0.53	0.55	0.55	0.57	0.56	0.54

Force d'arrachement moyenne (KN) : **16.81KN**

Glissement moyen : 0.55mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1681}{3.14 * 1.4 * 14} = 27.32 \text{ daN/cm}^2$$



Fissure très fine

Mode d'endommagement :

On constate un glissement de la barre dans la masse de béton, avec arrachement de très petits morceaux de béton. On voit aussi une très très fine fissure (qui tend à être invisible) tout le long de l'échantillon. et elle est plus apparente sur l'avant.

**-Barre T14**

j-Ancrage : 14 cm

Avec une couche de protection (TFC)

**Tableau III.34-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A1cm, PIC**

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	17.81	17.82	17.83	17.80	17.82	17.80	17.80	17.80
Glissement (mm)	0.44	0.45	0.45	0.46	0.46	0.44	0.45	0.45

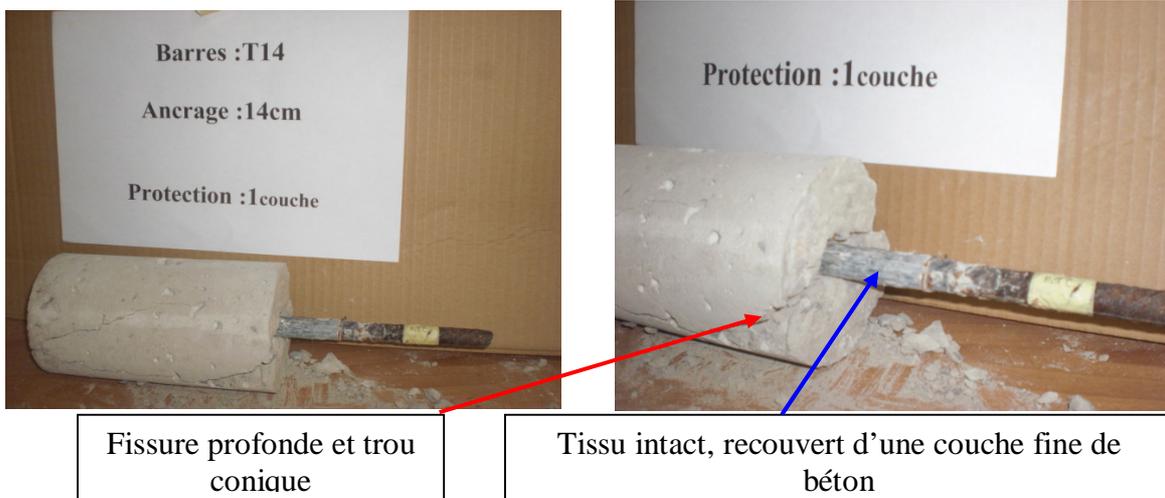
Force d'arrachement moyenne (KN) : **17.81KN**

Glissement moyen : 0.45mm

Contrainte tangentielle :

$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1781}{3.14 * 1.486 * 14} = 27.27 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 14 + 2 * 0.43 = 14.86 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



**Mode d'endommagement :**

Le tissu reste intact sans déchirement et sans qu'il ne soit abîmé ni décollé de la barre.

On constate aussi un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton , avec apparition d'une fissure trop épaisse et très profonde sur la longueur d'ancrage et qui tend à partager longitudinalement la masse en deux ,et elle devient de plus en plus fine le long de l'échantillon ,aussi il y a destruction du bout de la masse de béton, avec apparition d'un petit trou conique.

**-Barres T14**

k-Ancrage : 14 cm

Avec deux couches de protection (TFC)

*Tableau III.35-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A14cm, P2C*

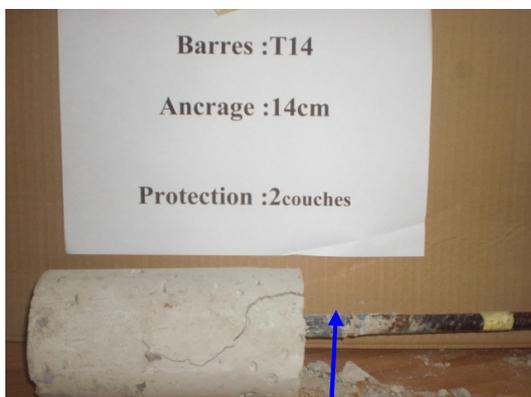
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	17.60	17.52	17.55	17.54	17.58	17.54	17.56	17.59
Glissement (mm)	0.40	0.35	0.35	0.36	0.36	0.38	0.37	0.39

Force d'arrachement moyenne (KN) : **17.56KN**

Glissement moyen : 0.37mm

Contrainte tangentielle :  $\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1756}{3.14 * 1.572 * 14} = 25.42 \text{daN/cm}^2$

(Avec  $\phi = 14+4*0.43=15.72\text{mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Tissu intact



Fissure apparente le long de l'ancrage

**Mode d'endommagement :**

Le tissu reste intact sans déchirure et sans qu'il ne soit abîmé ni décollé de la barre.

On voit toujours un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure plus ou moins épaisse et peu profonde sur la longueur d'ancrage et devient de plus en plus fine sur l'autre moitié de l'échantillon. Aussi, il y a destruction du bout de la masse de béton, avec arrachement de très petits morceaux de béton et formation d'un petit trou conique.

**-Barres T14**

l-Ancrage : 14 cm

Avec trois couches de protection (TFC)

*Tableau III.36-Force d'arrachement, Glissement pour barres HA14, A14cm, P3C*

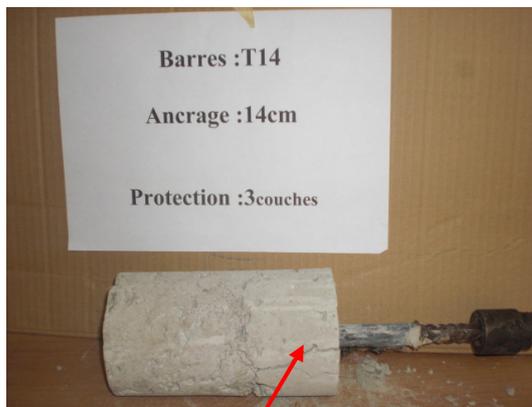
N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
Forces d'arrachement (Pic) KN	16.19	16.17	16.14	16.13	16.14	16.15	16.15	16.13
Glissement (mm)	0.49	0.48	0.52	0.51	0.50	0.48	0.52	0.50

Force d'arrachement moyenne (KN) : **16.15KN**

Glissement moyen : 0.50mm

Contrainte tangentielle : 
$$\tau = \frac{F}{\pi\phi L} = \frac{1615}{3.14 * 1.658 * 14} = 22.15 \text{ daN/cm}^2$$

(Avec  $\phi = 14 + 6 * 0.43 = 16.58 \text{ mm}$  (0.43 épaisseur moyenne du tissu de carbone))



Fissure profonde et épaisse le long de l'ancrage



La dernière couche du tissu est un peu déchirée

Mode d'endommagement :

On voit toujours un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition d'une fissure trop épaisse et très profonde sur la longueur d'ancrage et devient de plus en plus fine sur l'autre moitié de l'échantillon, aussi il y a destruction du bout de la masse, avec arrachement de petits morceaux de béton et formation d'un petit trou conique. Tandis que le tissu est resté presque intact sans déchirement et sans qu'il ne soit abîmé ni décollé de la barre (on voit une très petite déchirure sur la dernière couche du tissu).

### III.2-TABLEAUX RECAPITULATIFS

#### III.2.1-BARRES T10

Tableau III.37- Valeurs de la force d'arrachement et de la contrainte d'adhérence Pour les barres HA10

	T10, A10		T10, A12		T10, A14	
	F <sub>max</sub> (KN)	τ(daN/cm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (KN)	τ(daN/cm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (KN)	τ(daN/cm <sup>2</sup> )
Sans Protection (SP)	8.43	26.84	10.17	26.99	11.82	26.91
Protection : 1Couche (P1C)	11.41	33.46	11.95	29.20	12.11	25.36
Protection :2Couches (P2C)	11.05	30.02	11.55	26.15	11.66	22.63
Protection :3Couches (P3C)	10.48	26.53	10.95	23.10	11.22	20.28

#### III.2.2-BARRES T12

Tableau III.38 - Valeurs de la force d'arrachement et de la contrainte d'adhérence Pour les barres HA12

	T12, A10		T12, A12		T12, A14	
	F <sub>max</sub> (KN)	τ(daN/cm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (KN)	τ(daN/cm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (KN)	τ(daN/cm <sup>2</sup> )
Sans Protection (SP)	12.09	32.08	14.54	32.15	17.00	32.23
Protection : 1Couche (P1C)	13.52	33.48	16.00	33.03	18.17	32.15
Protection :2Couches (P2C)	13.00	30.17	15.32	29.63	17.80	29.52
Protection :3Couches (P3C)	12.37	27.02	14.78	26.92	17.20	26.85

#### III.2.3-BARRES T14

Tableau III.39- Valeurs de la force d'arrachement et de la contrainte d'adhérence Pour les barres HA14

	T14, A10		T14, A12		T14, A14	
	F <sub>max</sub> (KN)	τ(daN/cm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (KN)	τ(daN/cm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (KN)	τ(daN/cm <sup>2</sup> )
Sans Protection (SP)	12.20	27.75	14.58	27.63	16.81	27.32
Protection : 1Couche (P1C)	13.79	29.55	15.89	28.37	17.81	27.27
Protection :2Couches (P2C)	13.35	27.04	15.68	26.48	17.56	25.42
Protection :3Couches (P3C)	12.98	24.93	14.56	23.32	16.15	22.15

**TABLEAU RECAPITULATIF**

**III.3-VALEURS MOYENNES EN MPA DE L'ADHERENCE A LA RUPTURE DE DIFFERENTES BARRES**

(T10, T12, T14) scellées dans des masses de béton dont les coulées sont différentes.

*Tableau III.40- Valeurs moyennes de l'adhérence*

Nbre de couches de TFC	Diamètre des barres (mm)		
	10	12	14
Sans couche de protection (SP)	2.691	3.215	2.756
Avec une couche de TFC (P1C)	2.934	3.288	2.839
Avec deux couches de TFC(P2C)	2.626	2.977	2.631
Avec trois couches de TFC(P3C)	2.330	2.693	2.346

### III.4- REPRESENTATION GRAPHIQUE

#### III.4.1- Evolution de la force d'arrachement

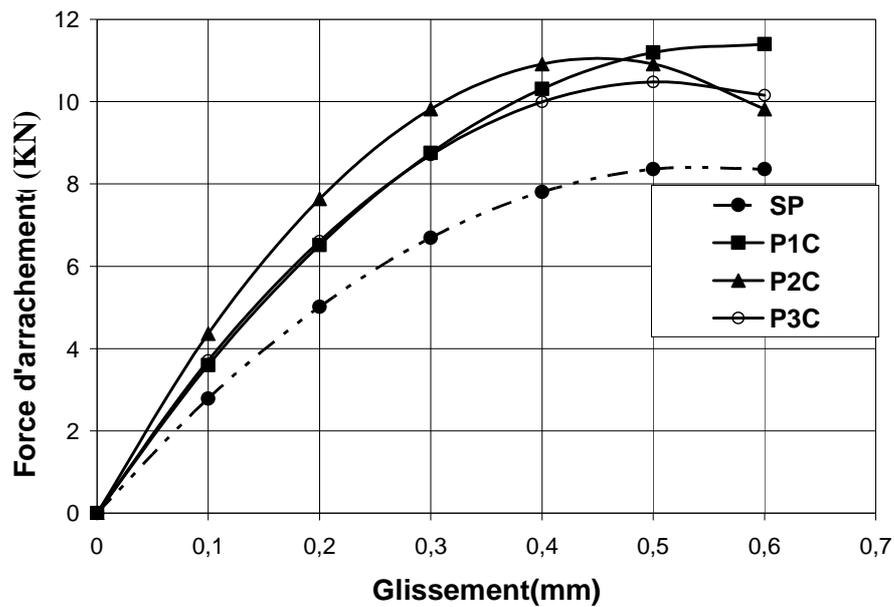
##### - a. Barres T10

SP (Sans Protection par tissu de fibre de carbone)

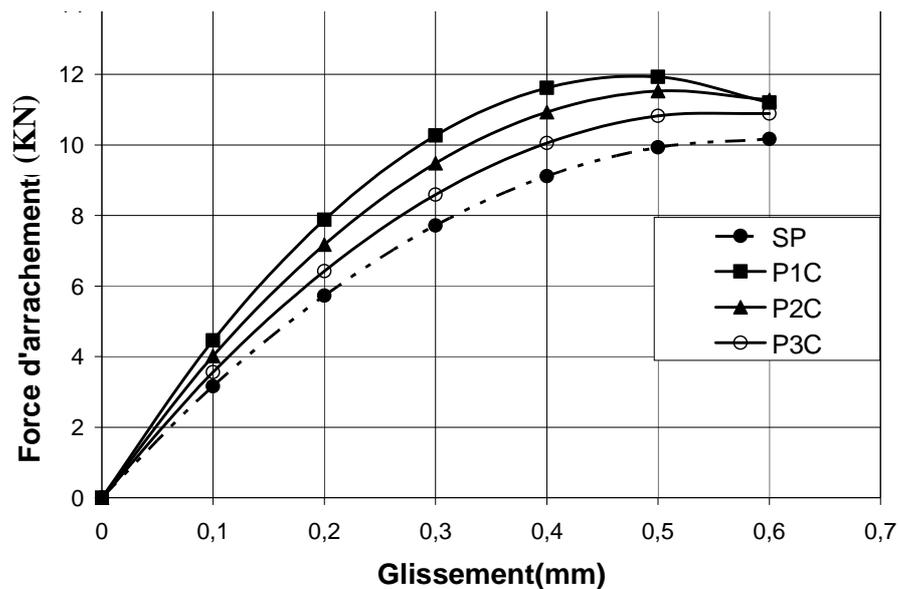
P 1C (Protection avec une couche de TFC)

P 2C (Protection avec deux couches de TFC)

P 3C (Protection avec trois couches de TFC)



FigIII.1.- Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T10, Ancrage 10cm



FigIII.2.- Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T10, Ancrage 12cm

**-Barres T10**

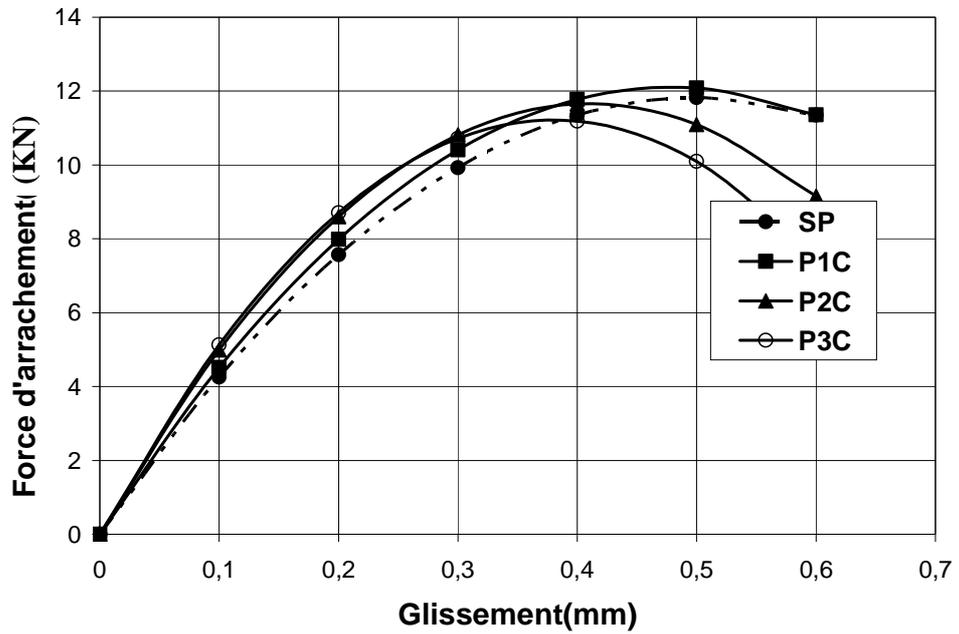
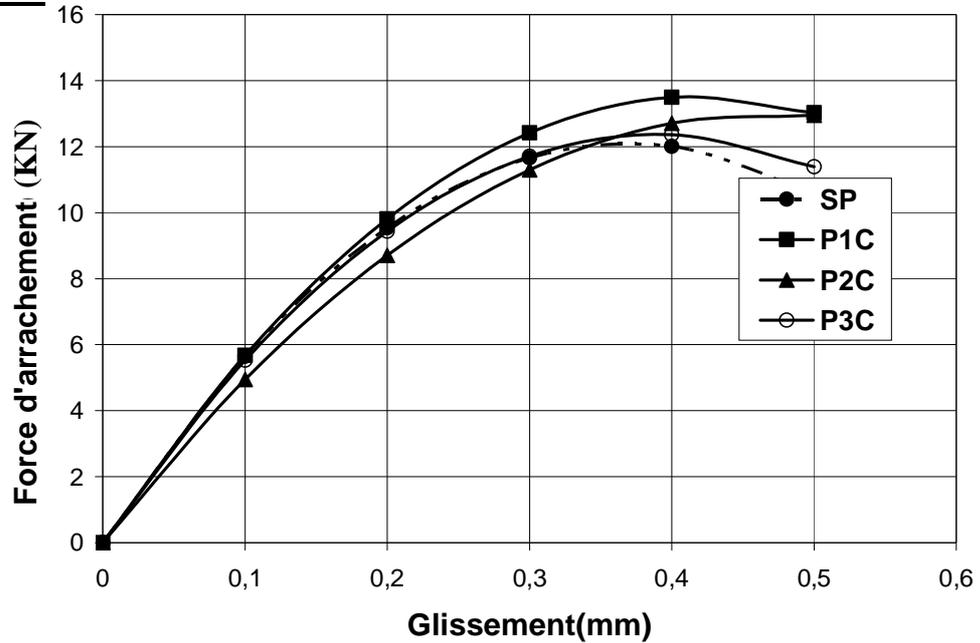


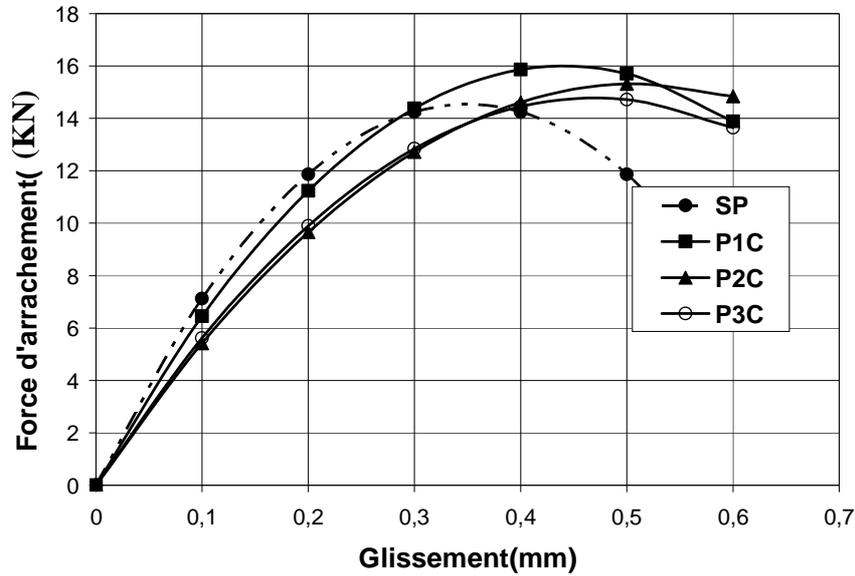
Fig.III.3- Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T10, Ancrage 14cm

**-b.Barres T12**

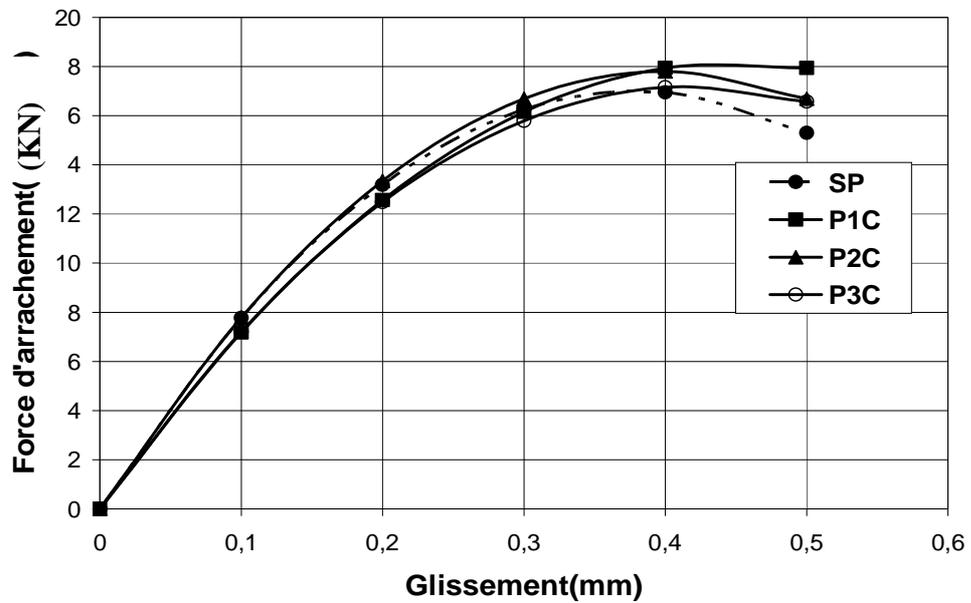


FigIII.4.- Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T12, Ancrage 10cm

**-Barres T12**

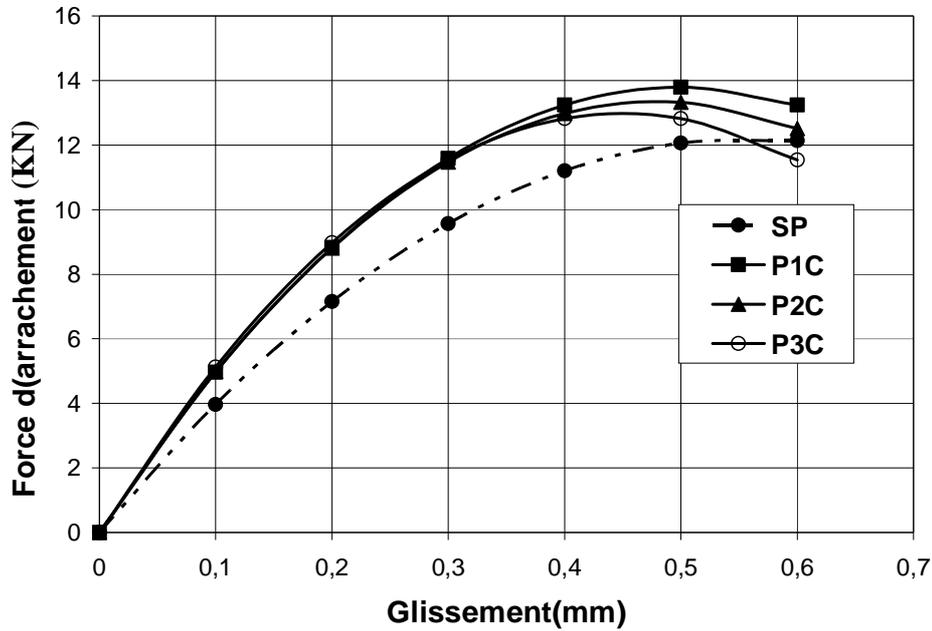


FigIII.5.- Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T12, Ancrage 12cm

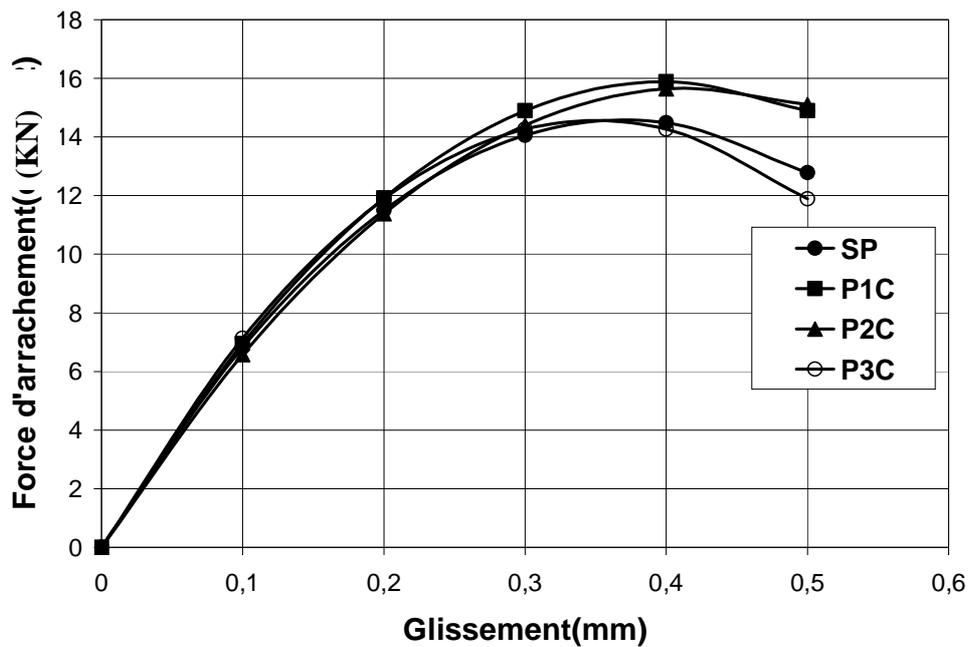


FigIII.6.- Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T12, Ancrage 14cm

-c.Barres T14

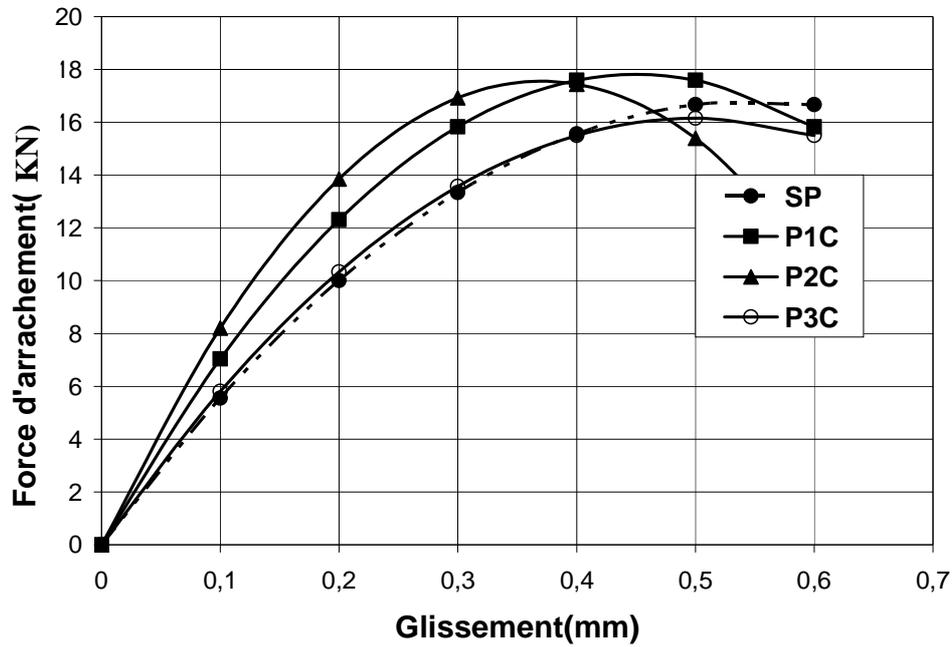


FigIII.7.- Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T14, Ancrage 10cm



FigIII.8.- Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T14, Ancrage 12cm

**-Barres T14**



FigIII.9.- Evolution de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres T14, Ancrage 14cm

**III.4.2. Variation d'adhérence**

**-a. Barres T10, Ancrage 10cm**

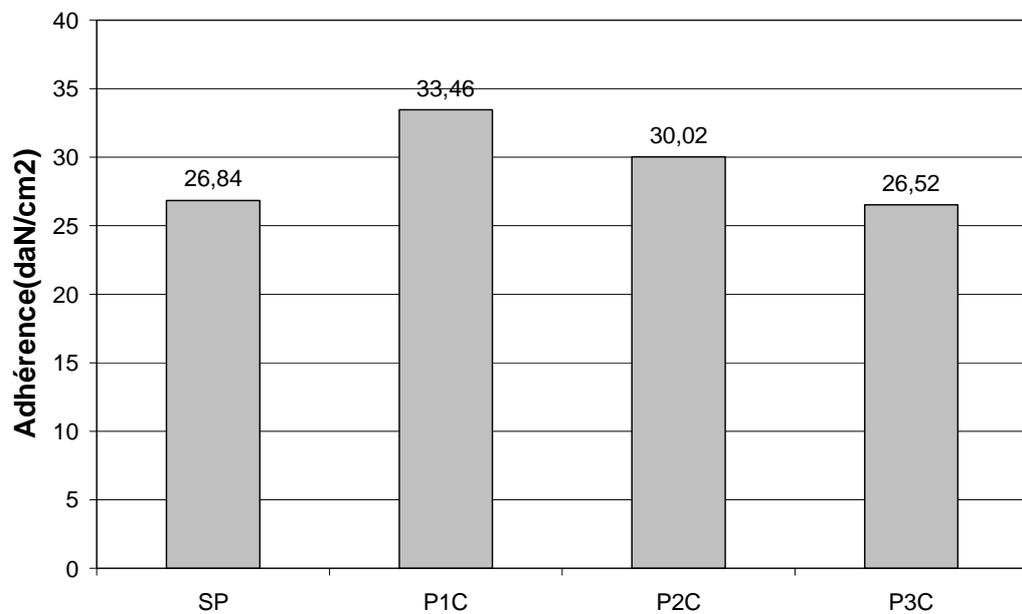
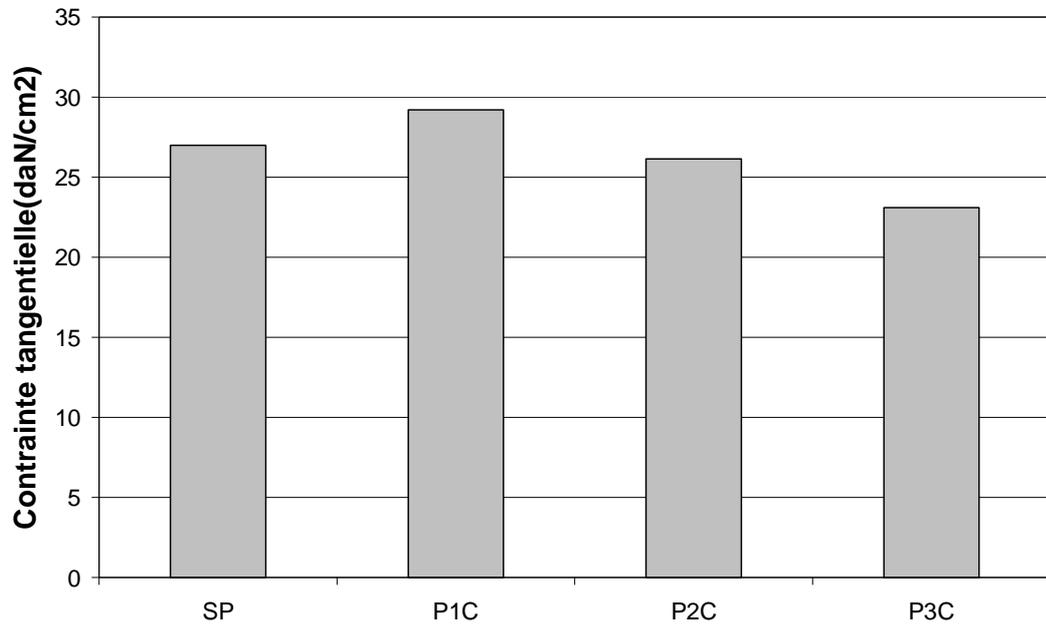


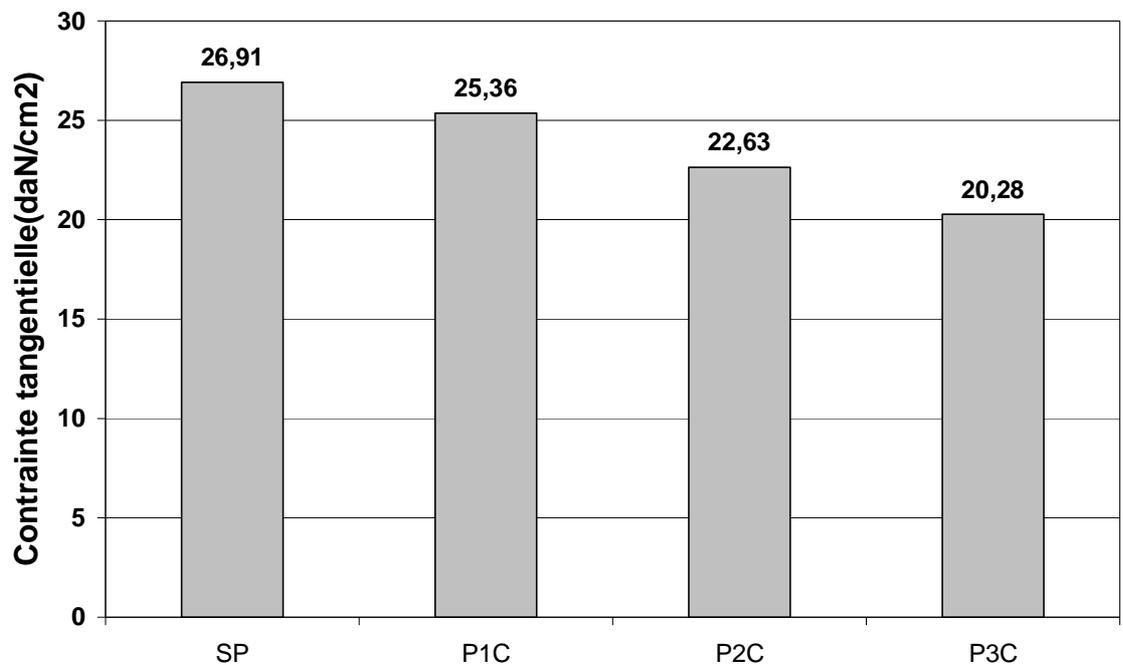
Fig.III.10-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T10,A10cm)

**-b.BarresT10, Ancrage 12cm**



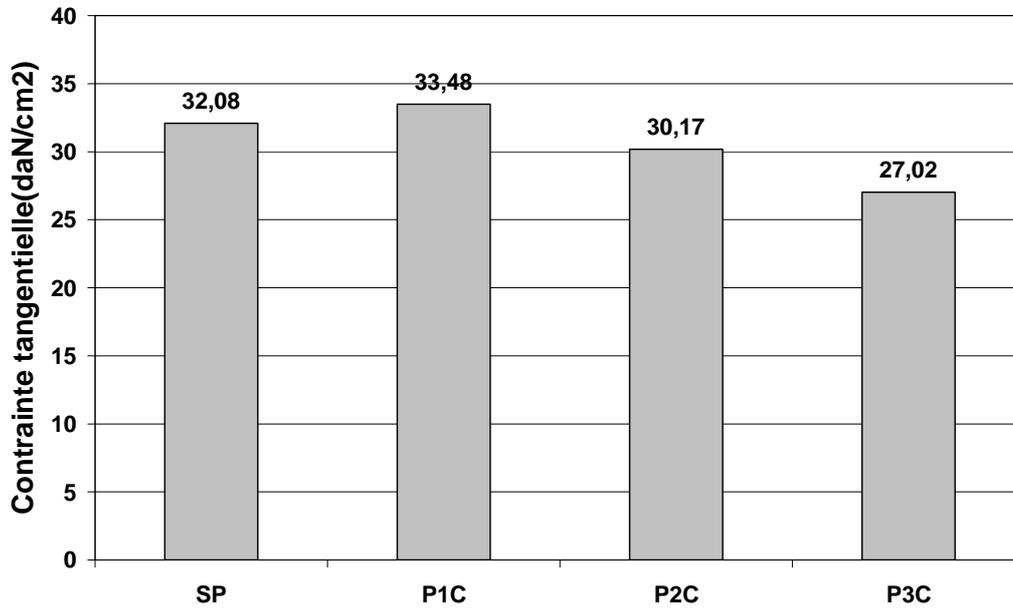
FigIII.11-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T10,A12cm)

**-c.BarresT10, Ancrage 14cm**



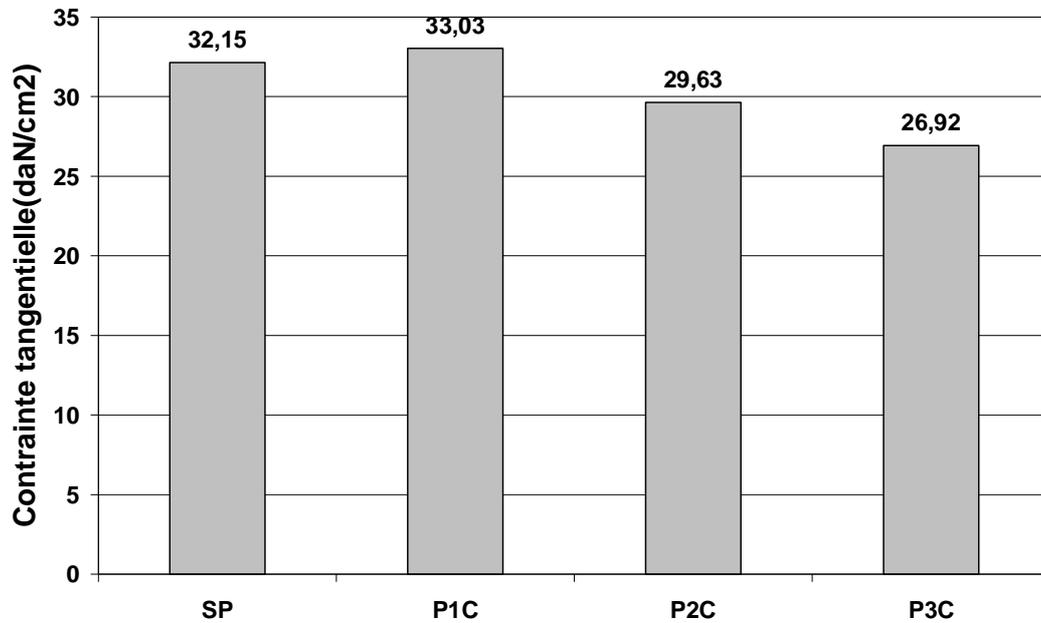
FigIII.12-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T10,A14cm)

**-d.BarresT12, Ancrage 10cm**



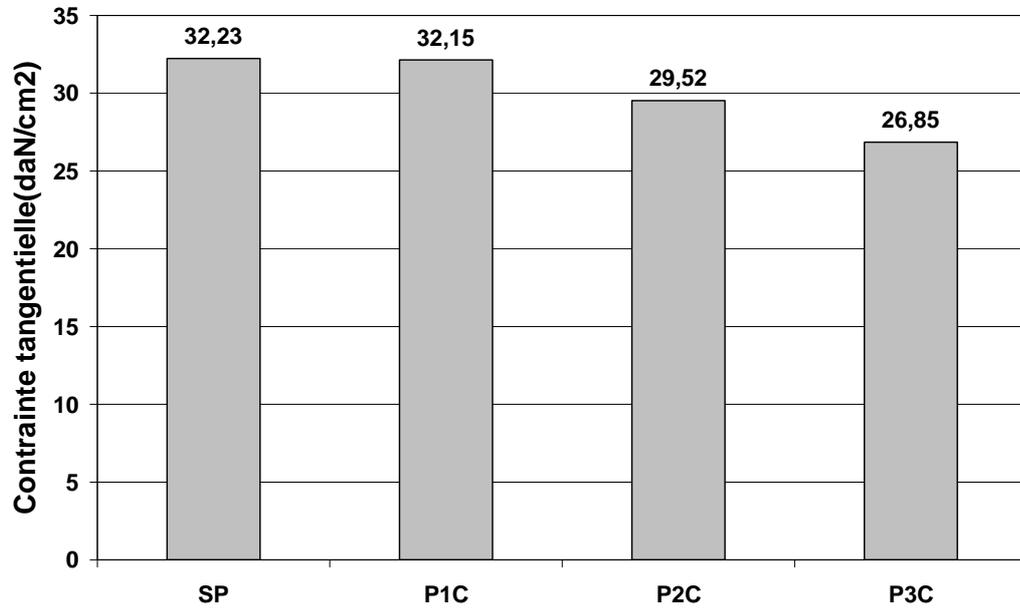
FigIII.13-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T12,A10cm)

**-e.BarresT12, Ancrage 12cm**



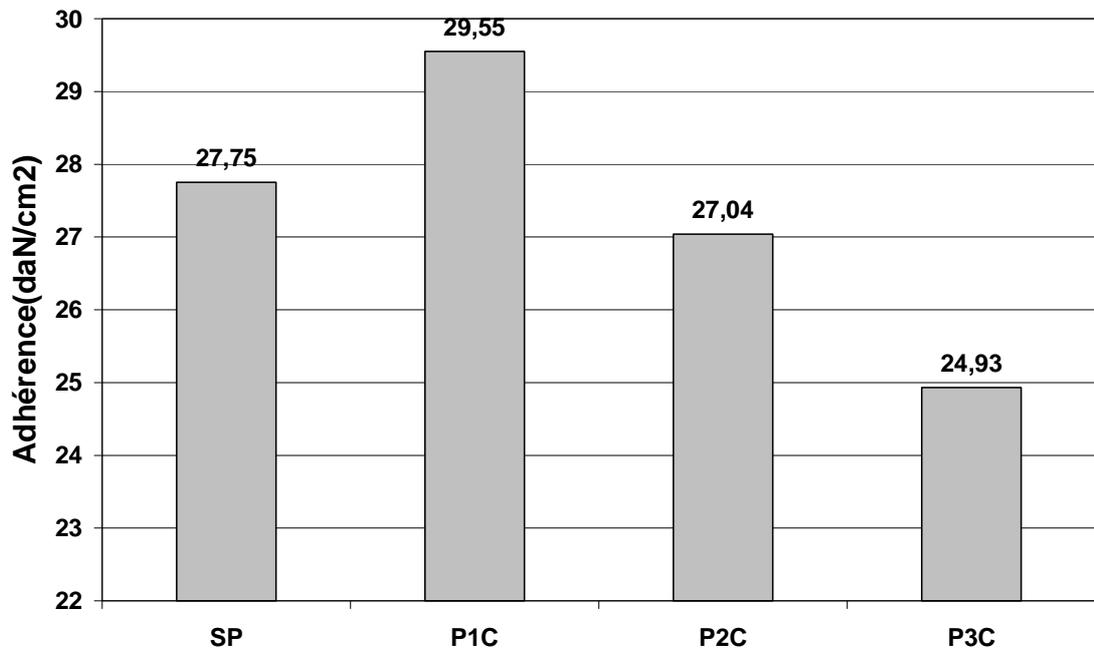
FigIII.14 -Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T12,A12cm)

**-f.BarresT12, Ancrage 14cm**



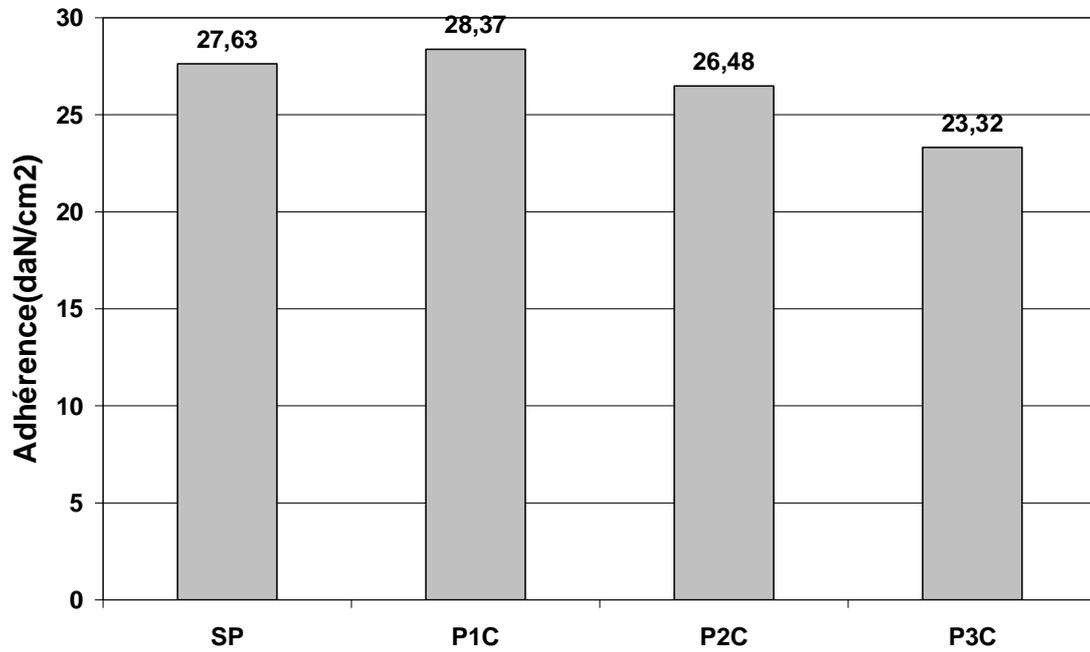
FigIII.15-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T12,A14cm)

**-g.BarresT14, Ancrage 10cm**



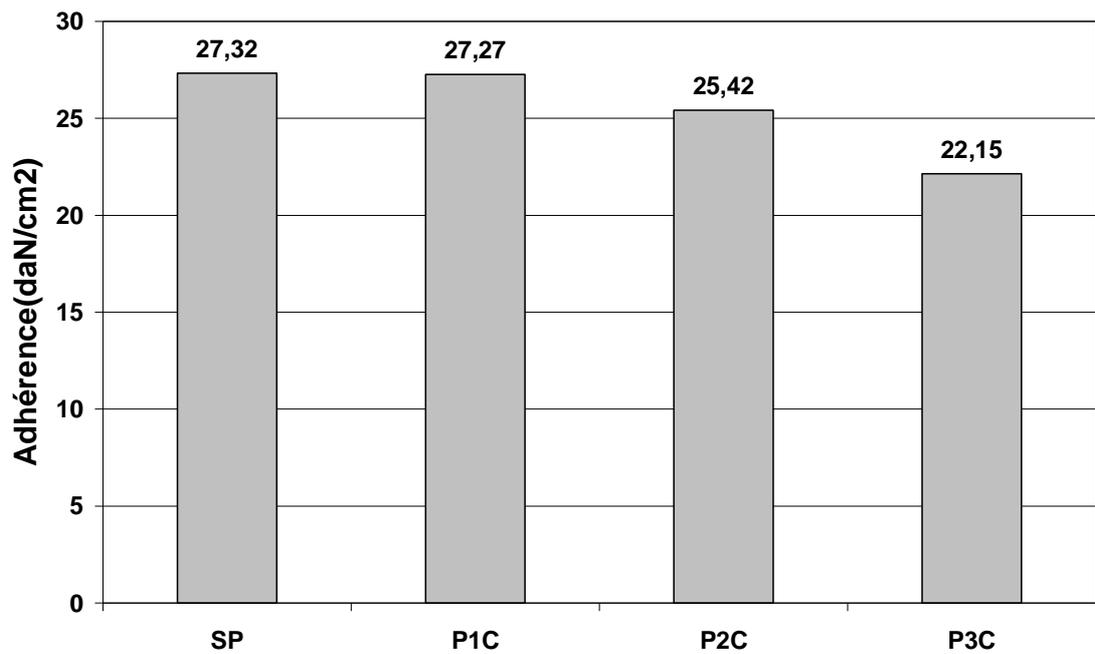
FigIII.16-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T14,A10cm)

**-h.BarresT14, Ancrage 12cm**



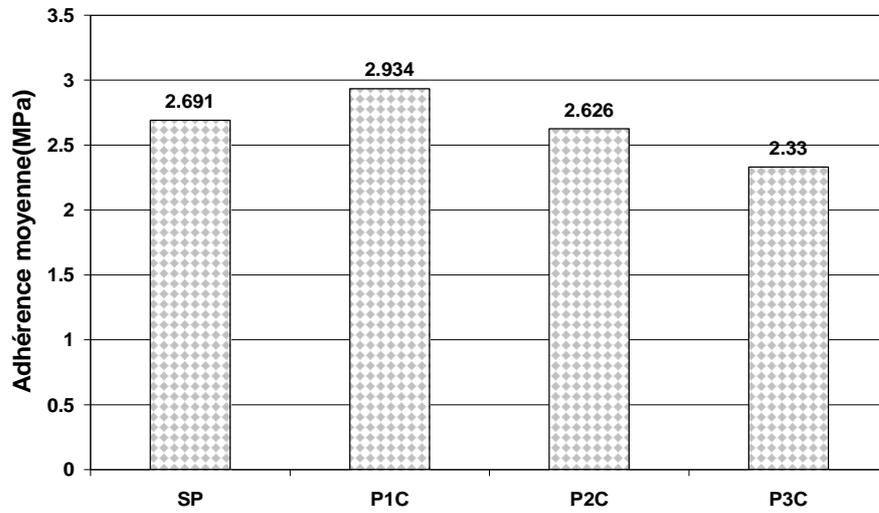
FigIII.17-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T14,A12cm)

**-i.BarresT14, Ancrage 14cm**

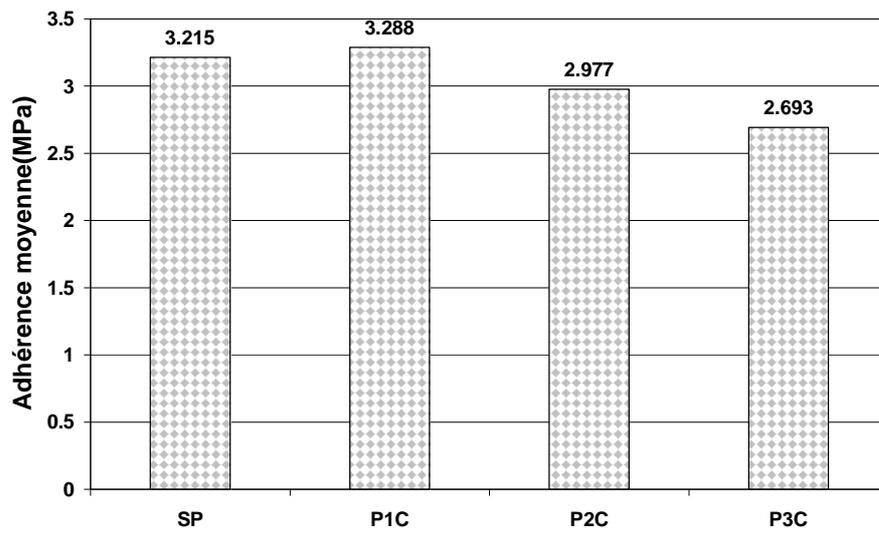


FigIII18.-Variation de la contrainte tangentielle en fonction du nombre de couches de protection(T14,A14cm)

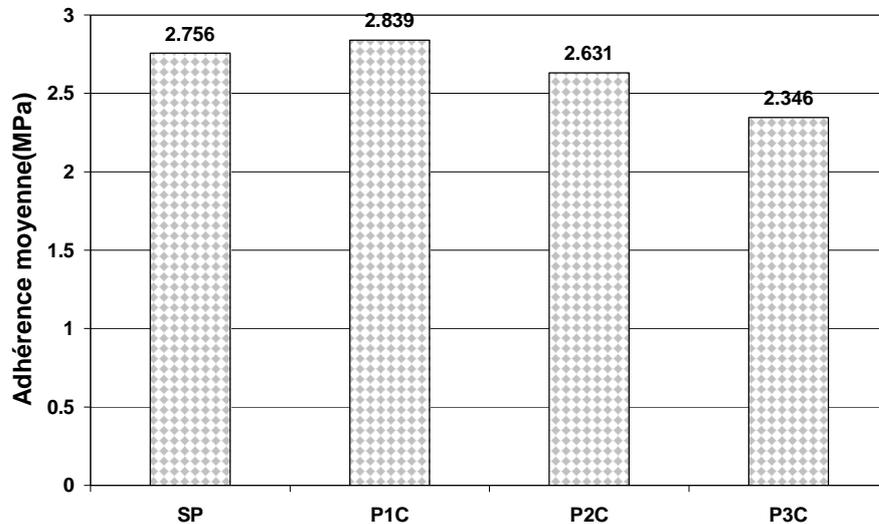
**III.4.3- Variation de l'adhérence moyenne en fonction du nombre de couches de protection**



FigIII.19- Barres T10

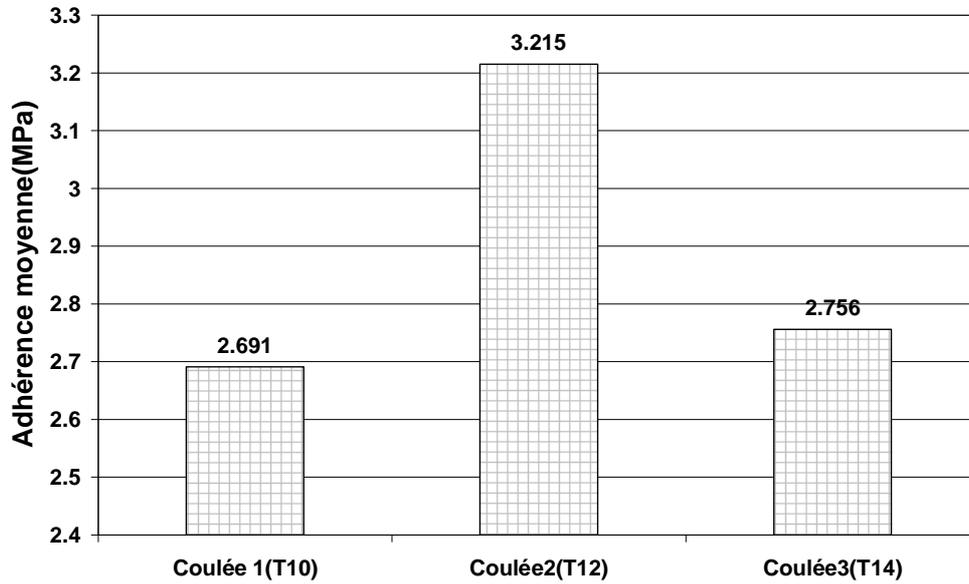


FigIII.20- Barres T12

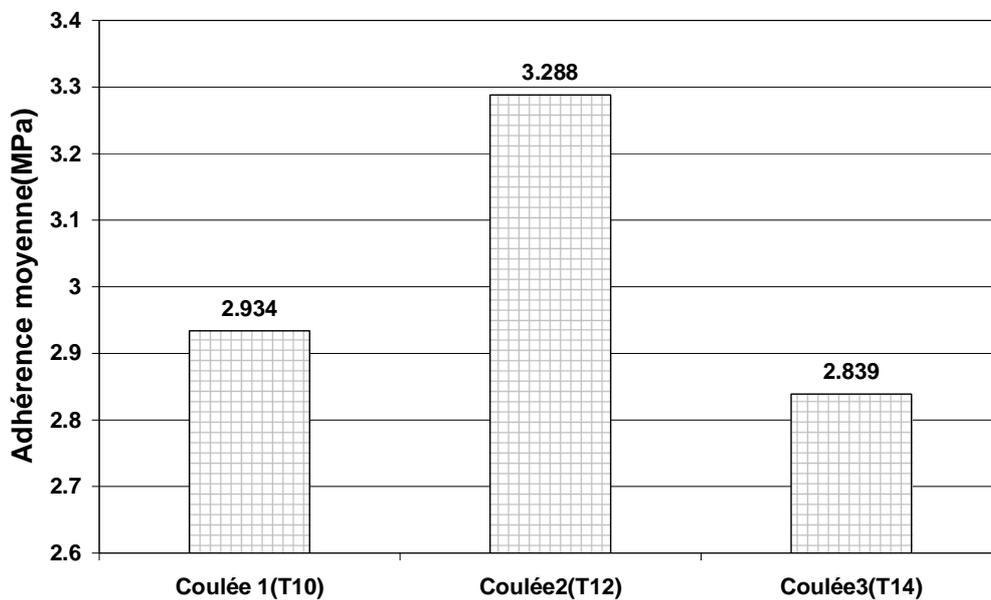


FigIII.21- Barres T14

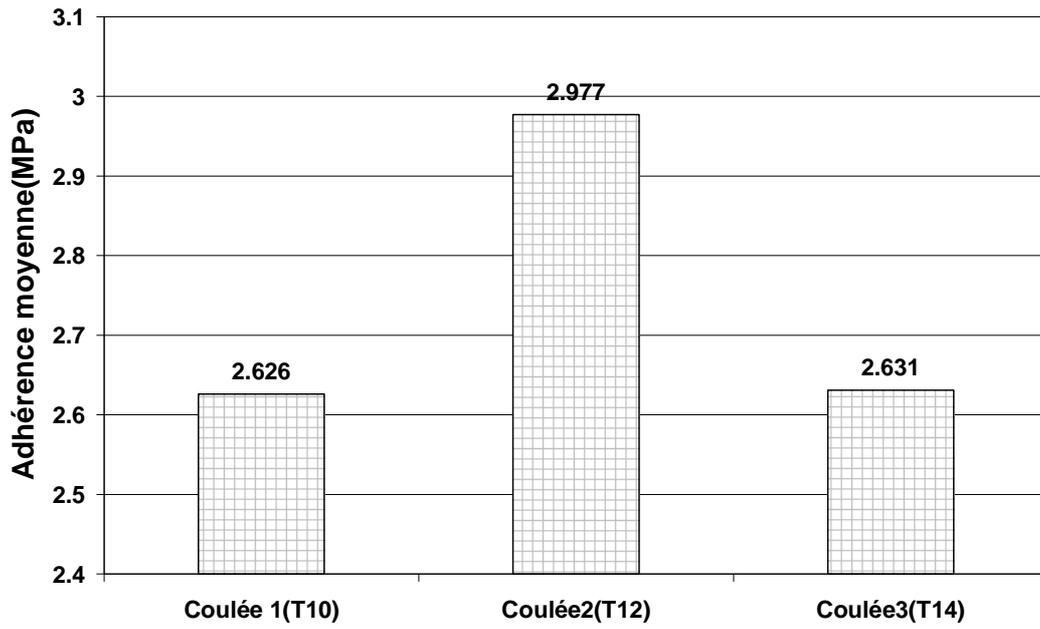
**III.4.4 Variation de l'adhérence moyenne en fonction de différentes coulées de béton**



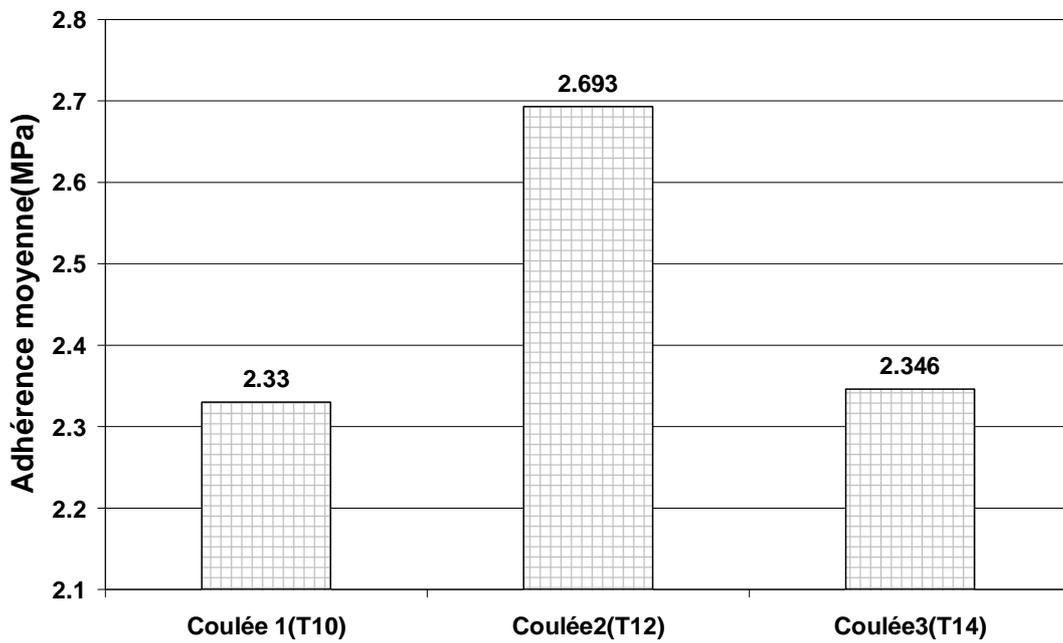
FigIII.22- SP (sans couches de protection)



FigIII.23- PIC (Avec une couche de protection de TFC)



FigIII.24- P2C (Avec deux couches de protection de TFC)



FigIII.25- P3C (Avec trois couches de protection de TFC)

## VI-CONCLUSION GENERALE:

- Vu sa bonne insensibilité à la corrosion, le tissu de fibre de carbone peut être une bonne solution de protection d'armature, ses inconvénients sont son coût très élevé et la dégradation de l'adhérence entre le béton et les armatures de gros diamètres, habillées de tissu de fibre de carbone. Les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial

- Grâce à la colle Sikadur 330, le tissu de fibre de carbone est fortement lié à l'armature d'acier ; ce qui permet de dire que l'adhérence tissu-armature est presque parfait.

- Le mode d'endommagement ou de rupture est toujours un glissement de l'ensemble (barre + tissu) dans la masse de béton, avec apparition de fissures épaisses et profondes sur la longueur d'ancrage et deviennent de plus en plus fines et parfois invisibles même sur l'autre moitié de l'échantillon. Il y a aussi destruction du bout de la masse de béton, avec arrachement de petits cônes, tandis que le tissu est resté presque intact sans déchirement et sans qu'il ne soit abîmé ni décollé de la barre.

- On constate aussi, que l'adhérence peut augmenter considérablement lors de protection des barres de faibles diamètres ( $\Phi 10$ ) ; et avec une couche seulement de TFC.

Et augmente légèrement dans le cas des barres de diamètre supérieur protégées par une seule couche

- On constate aussi que l'adhérence diminue, avec l'augmentation de nombre de couches de TFC, cela est expliqué comme suit :

Pour les barres HA, l'adhérence est la résultante d'une force de frottement de la surface latérale comprise entre deux nervures, et d'une force de butée de ces dernières. Et lorsque le nombre de couches (TFC) de protection augmente, les nervures disparaissent. Par conséquent la force de butée disparaît, ce qui conduit à la diminution de l'adhérence.

- La contrainte d'adhérence maximale moyenne pour les différentes barres (HA10, HA12, HA14), pour trois coulées différentes est respectivement de 2.691MPa, 3.215MPa, 2.756MPa pour un glissement moyen de 0,5 mm. Cette contrainte est presque conforme à la valeur trouvée dans la réglementation française (BAEL91) pour des armatures à haute adhérence de béton armé, qui est comprise entre 2.43MPa et 3.24MPa pour des résistances de béton à la compression après 28 jours ( $f_{c28}$ ), comprise entre 20MPa et 30MPa
- Lors des essais d'arrachement, on observe dans tout les cas que l'ensemble : armature tissu, glisse dans la masse de béton, avec apparition de fissures uniquement sur la longueur d'ancrage, et parfois on observe des éclatements de béton.

## RÉFÉRENCES

- [A1] AL-SULAIMANI G.J., KALEEMULLAH M., BASUNDUL I.A., RASHEEDUZZAFAR, *Influence of corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete Members*, ACI Structural Journal, Vol. 87, n°2, March-April 1990, pp. 220-231.
- [A2] ANDRADE, C., ALONSO, C., *Corrosion rate monitoring in the laboratory and onsite*, Construction and Buildings Materials, Vol.10, n°5, 1996, pp. 315-328.
- [A3] AUYEUNG, Y., BALAGRU, P., CHUNG, L., *Bond behavior of corroded reinforcement bars*, ACI Materials Journal, Vol. 97, n°2, 2000, pp. 14-220.
- [A4] ABRAMS D.A: *“Tests of Bond Between Concrete and Steel»*. University of Illinois Bulletin, Vol. XI, No.15, December 1913
- [B1] BARTHELEMY, J. *Matériaux composites*, Edition Le Moniteur, 1999.
- [B2] BRUGGELING A. S. G. : *"Structural Concrete- Theory and its Application"*.Published by A.A Balkema, Rotterdam, 1991
- [C1] Christian Joris.  
Cours de Béton Armé
- [C2] CABRERA, J.G., *Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion*, Cement and Concrete Composites, Vol. 18, 1996, pp. 47-59
- [C3] CORONELLI, D., *Corrosion cracking and bond strength modeling for corroded bars in reinforced concrete*, ACI Structural Journal, Vol. 99, n°3, 2002, pp. 267-276.
- [C4] CHIHANI, D., *Expertise du complexe de fabrication d'engrais ASMIDAL*, Agence de Annaba, CTC\Est, 2000.
- [C5] CEB: *"Bond Action and Bond Behaviour of Reinforcement-State of the Art Report"*.Bulletin d'information No.188, Juin 1988
- [C6] C.A.R.M.A.  
GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES – CARMA –Actualisation octobre 2006

[D1] DEKOSTER, M.

*,Etude du comportement mécanique des structures en béton armé dégradé par la corrosion,*

Thèse de Doctorat, Spécialité génie civil, université de Lille 1, France, Mai 2003.

[D2] Dunod A.et J.

Matériaux - Tome 2. Microstructure et mise en oeuvre -  
chapitre 25 - (1991)

[E1] ELIGEHAUSEN R., POPOV E. and BERTERO V. :

*"Local Bond Stress Slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations"*  
Earthquake Engineering Research Centre, UCB/EERC-83/23, October 1983

[G1] GÜNTHER G. and MEHLHORN G. :

*"Local Bond between Reinforcing Steel and Concrete"*.IABSE Colloquium, pp. 141-146,  
Stuttgart, 1991

[G2] GERALD H.

Cours de Béton Armé. Grenoble

Consultable sur l'adresse Email: gerald.hivin@ujf-greoble.fr

[J1] JOCELYNE J. (SETRA),

Responsable des publications au sein de l'AFGC et GUY T.(CEBTTP), Animateur du  
groupe de travail AFGC / CEFRACOR (Centre Français de l'Anti-  
Corrosion). *"Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion"*, Novembre 2003

[K1] KAKU T.,YAMADA M, IIZUKA S. and ZHANG J. :

*A Proposal of Bond Strength Equation for R.C.Members including High Strength  
Concrete Level"?* CEB-RTU International conference "Bond in Concrete-from Research to  
Practice", Proceedings Topics 3-7,Riga, October 1992

[L1] LACROIX, R., CLEMENT, J.L.

(dir.), *Propriétés des bétons arme et précontraints*, Hermes Science publications, 2002.

[L2] LAHNERT B. J., HOUDE J. and GERSTLE K. H. :

*"Direct Measurement of Slip between Steel and Concrete"*. ACI Journal, Title No.83-  
86,pp.974-982, November-December 1986

[L3] LOSBERG A. and OLSSON P. A. :

*"Bond Fealure of Deformed Reinforcing Bars Based on the Longitudinal Splitting Effect of  
the Bars"*. ACI Journal,Title No. 76-1, January 1979

[L4] LORRAIN M. et KHELAFI H. :

*"Sur la résistance de la liaison armature- béton de haute résistance"*. ITBTP, No.470,  
Série: Béton 260, Décembre 1988

- [M1] Mouglin. J.P.  
Cours de béton armé. BAEL91.  
Calcul des éléments simples et des structures de bâtiments.. Edition Eyrolles, 1992.
- [M2] MOLINA, F.J., ALONSO, C., ANDRADE, S.  
, *Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2 - Numerical model*, Materials and Structures, Vol. 26, 1993, pp. 532- 548.
- [M3] MARTIN H. and NOAKOWSKI P.:  
"Verbundverhalten von Betonstählen-  
Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen".Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Helf 319, 1981
- [M4] MIRZA S. and HOUDE J. :"*Study of Bond Stress-Slip Relationships in Reinforced Concrete*". ACI Journal Title No.76-2, January 1979
- [M5] MAILVAGANAM N.P,  
Repair and protection of concrete structures, CRC Press, Boca Raton, FL, 1992.
- [M6] MAURICE R. Hermes  
Technologie des composites- ISBN 2-86601-455-3  
(1995)
- [N1] NILSON H. A. :  
"*International Measurement of Bond Slip*".ACI journal, Title No.69-41,July 1972
- [P1] PERCHAT, J  
Règlements étrangers de béton armé, Etude comparatives des codes CEB-BSI-DIN-ACI,  
Cour du CHEC, Editions Eyrolles, 1982.
- [P2] PARK, R., PAULAY, T.,  
*Reinforced concrete structures*, John Wiley & Sons, New-York, 1975.
- [P3] PLAUT, E.  
« *Attention chute de pierre* », Revue Ouvrages d'art n°31, Bulletin diffusé par la SETRA,  
Décembre 1998, Consultable sur le site <http://www.setra.fr>
- [R1] Renaud H., Letertre. F  
Ouvrages de béton armé Edition Foucher, 1978.
- [R2] REHM G.:  
"*Über die Grundlagen des Verbundes Zwischen Stahl Und Beton*"-  
*The Basic Principles Of Bond between Steel and Concrete*" Translation No 134,  
London, Cement and Concrete Association from (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 138, Berlin), 1961
- [R3] RILEM :  
"*Essai portant sur l'adhérence des armatures du béton. 1. Essai par flexion*".  
Recommandation RILEM/CEB/FIP-RC5, Matériaux et Constructions, Vol. 6, No 32, 1978

[R4] RILEM :

"Essai portant sur l'adhérence des armatures du béton. 1. Essai par flexion".  
Recommandation RILEM/CEB/FIP-RC6, Matériaux et Constructions, Vol. 6, No 32, 1978

[R5] RAHARINAIVO A., ARLIGIE G., CHAUSSADENT T., GRIMALDI G., POLLET V. et TACHE G.,

La corrosion et la protection des aciers dans le béton, Presse Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1998.

[S1] SALIGER R.

« Acier à haute résistance dans le béton armé ». Association Internationale des ponts et Charpentes, deuxième congrès, Berlin-Munich, 1-11 Octobre 1936

[T1] TUUTTI, K.

*Corrosion of steel in concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Ed., Stockholm, 1982.

[T2] TEPFERS R. :

"Cracking of concrete Cover along Anchored Deformed Reinforcing Bars". Magazine of Concrete Research, Vol.31, No. 106, March 1979

[T3] TASSIOS T. :

"Properties of Bond Between Concrete and Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Actions". CEB Symposium, Structural Concrete und Seismic Actions, vol. 1, State of the Art Report, Rome, Avril 1979

[V1] VANDEWALLE L. and MORTELMANS F.:

"The Bond Stress Between a Reinforcement Bar and Concrete is it Theoretically Predictable?". Materials and Structures, Vol. 21, pp. 179-181, 1988

[V2] VANDERWALLE L. :

" Theoretical Prediction of the Ultimate Bond Strength Between a Reinforcement Bar and Concrete". CEB –RTU international conference "bond in concrete- from research to practice", proceedings topics 1,2, Riga, October 1992

[Z1] ZHIMING T. and ZHIMAN Y. :

"Bond Behaviour of Deformed Bars in High Strength Concrete". CEB-RTU International Conference "Bond in Concrete –From Research to Practice"; Proceedings Topics 3-7, Riga, October 1992

#### • Sites Internet

[Net01]. [http:// www.concretecorrosion.net](http://www.concretecorrosion.net)

[Net02]. <http://www.partner.eu.com>

[Net03]. <http://www.sika.com>