

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics



DIRECTION POST-GRADUATION ET RECHERCHE

Mémoire présenté par :

Walid MAHERZI
Ingénieur d'état en travaux publics

Pour l'obtention du titre de :
Magistère en génie civil

Thème

***Caractérisation des composites fibres-
ciments. Application au cas du renforcement
de poutres en flexion simple***

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

<i>Mr Said KENAI</i>	<i>Professeur, université Blida</i>	<i>Président</i>
<i>Mr Mohamed HADID</i>	<i>Maître de conférences, ENSTP</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mr Mohamed AMIEUR</i>	<i>Maître de conférences, ENSTP</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mr Mohamed TAKI</i>	<i>Maître de conférences, ENSTP</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Mr Mebarek Boutamine</i>	<i>Ingénieur expert, enseignant ENSTP</i>	<i>Invité</i>

Sommaire

Introduction :	3
Première partie : Bilan bibliographique	5
Chapitre I : Généralités sur les composites	5
1- Notion de composite :	5
2- Les renforts (fibres):	7
3- Caractéristiques spéc.fiques et intrinsèques d'un composite :	11
Chapitre 2 : Les composites fibres - ciment.	14
1- Définition :	14
2-1- Le TRC à l'échelle microscopique :	14
2-2- Le TRC à l'échelle macroscopique (Caractérisation des composite fibres – ciment) :	16
2-3- Facteurs influençant le comportement des composites fibres – ciment :	19
2-4- Estimation de l'espacement des fissures :	22
2.5. Essais de caractérisation des composites TRC :	25
Conclusion de la première partie :	28
Deuxième partie : Approche expérimentale : Caractérisation des TRC.	29
Chapitre trois : Caractérisation des composites TRC à la traction.	29
1- Conception de l'essai :	29
2- Exploitation des résultats :	31
3- Correction des éprouvettes :	32
4- Matériaux utilisés :	33
5- Configurations retenues :	35
6- Résultats des essais de traction :	37
7- Conclusion:	62
Application : Renforcement de poutres soumises à la flexion simple par des plaques composite.	64
Chapitre quatre : Essais sur éléments structuraux sollicités en flexion simple.	64
1- Etude expérimentale de poutres renforcées par du TRC en flexion simple :	64
1-1- Définition des corps d'épreuves :	64
1-2- Caractéristiques des matériaux :	65
1-3- Préparation des poutres renforcées :	66
1-4- Instrumentation des poutres :	70
1-5- Résultats des essais :	71
➤ Etude de la rigidité flexionnelle :	74
➤ Modes de rupture par peeling c _{ff} :	76
➤ La représentation du diagramme Navier – Bernoulli :	79
2- Calcul prévisionnel de la résistance d'une poutre renforcée :	80
2-1- Résistance en flexion d'une poutre renforcée par du TRC (aspect théorique):	80
2-2- Résultats :	84
Conclusion générale :	86
❖ REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE:	88
Annexe 1 :	90
Histogrammes des différentes configurations d'essais.	90
Annexe 2 :	102
Théorie de calcul des poutres renforcées par du composite.	102

❖ Introduction :

Les éléments de structures en béton armé (poutres, poteaux...) font l'objet de dommages structuraux de gravité variable nécessitant souvent des travaux de réparation et de réhabilitation, afin que la structure assure la fonction pour laquelle elle est conçue.

Ce constat a conduit à la mise en place de plusieurs techniques de réparation et de réhabilitation : chemisage, béton projeté... etc. et plus récemment la réhabilitation en utilisant les matériaux composites à matrices polymères PRF. Ces dix dernières années ce type de renforcement a connu un grand succès du fait des avantages qu'il offre : légèreté, grande rigidité, facilité de mise en œuvre...etc. Par contre cette solution n'est pas sans inconvénients. Parmi les points faibles on peut citer : le comportement vis-à-vis de la température et de l'humidité très médiocre, une piètre tenue au feu, une faible compatibilité avec les critères de développement durable, et enfin, le coût par fois prohibitif qui incite à considérer des solutions alternatives et / ou complémentaires.

Ainsi, il semble judicieux et nécessaire d'entamer une phase de réflexion pour palier à ces incohérences. Les renforts fibres – ciment (fibres longues) semblent constituer une première réponse, dont il importe de valider l'utilité et les performances. Les avantages, a priori, à mettre à leur crédit sont : un comportement au feu amélioré, une meilleure adéquation avec les normes environnementales et une réduction du coût significative. Néanmoins, compte tenu du niveau de connaissance balbutiant, il importe dans un premier temps de procéder à une caractérisation ambitieuse en tentant de mettre en évidence les paramètres qui affectent le comportement du TRC, en vue de son optimisation dans l'optique de renforcement et / ou réparation de poutres vis-à-vis du moment fléchissant.

De ce qui précède, nous allons, à travers notre travail, mettre en évidence la loi de comportement et les paramètres essentiels affectant les TRC. Pour cela on suivra la démarche suivante:

- Concevoir un essai de traction, de mise en œuvre aisée, adapté aux matériaux fissurants.
- Procéder à la caractérisation du composite TRC afin de définir une loi de comportement.
- Apprécier l'influence de quelques paramètres sur le comportement du TRC : types de fibres, nombre de couches, épaisseur du renfort...etc.
- Considérer une application qui consiste à renforcer les éléments de poutres vis-à-vis du moment fléchissant par du TRC.

Caractérisation des composites fibres-ciment

Pour cela nous allons suivre le plan de travail suivant, en premier lieu faire un état de l'art, qui consiste à présenter ce qui a été fait jusqu'à présent concernant les composites et leur application dans le domaine du génie civil, surtout pour ce qui est la réparation des structures endommagées. En deuxième partie, nous allons nous consacrer à l'étude expérimentale du composite fibre-ciment 'TRC'; nous allons d'abord faire une étude de caractérisation en traction, dans le but de comprendre son comportement et de définir une loi de comportement générale en traction des TRC, et cela en faisant varier la nature des fibres. La seconde partie de l'étude expérimentale, sera consacrée à l'étude de faisabilité d'un éventuel renforcement d'éléments structuraux sollicités en flexion simple par du TRC, et après comparé cette alternative avec les autres méthodes classiques de réparation des structures de génie civil.

Pour résumer notre travail sera organisé de la façon suivante :

- **Caractérisation des composites fibres - ciment (TRC):**

- 1- Enrichir la base de données expérimentale (relativement insuffisante)

- 2-Mieux saisir le comportement des TRC.(aspects micro et macroscopique)

- 3-Adapter un essai de traction compatible avec les TRC.

- 4-Evaluer les performances des composites TRC vis-à-vis de la traction.

- 5-Evaluation de l'influence des paramètres déterminants (nombre et diamètre des filaments, adhérence, épaisseur du composite...etc)

- **Application au cas de poutres fléchies renforcées par TRC :**

- 1-Etude de la faisabilité technologique et mécanique du procédé de réparation avec TRC

- 2-Positionnement de cette solution par rapport à d'autres solutions existantes (CFRP, NSN...)

- 3-Actualisation des méthodes de dimensionnement ou de prévision

Première partie : Bilan bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les composites

Avant d'entamer l'étude détaillée des TRC, il serait commode de considérer sommairement les composites dans leurs généralités : définition, constituants, caractéristiques mécaniques. Cette étape nous permettra de situer les TRC, de point de vue composant.

1- Notion de composite :

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (Figure 1.1) mais ayant une forte capacité d'adhésion, nécessaire pour l'échange des efforts.

Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés mécaniques que les éléments seuls ne possèdent pas. Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière d'une façon considérable, tant sur le plan du comportement mécanique que sur le plan des caractéristiques physiques (légèreté, rigidité...etc.), explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs : aéronautique, sport, militaire, construction...etc.

En général, un matériau composite est un arrangement de fibres – continues ou non, arrangées d'une manière aléatoire ou bien selon une certaine logique géométrique - d'un matériau résistant appelé le renfort (les fibres), qui sont noyées dans une matrice, dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice conserve la disposition géométrique des fibres et leur transmet les sollicitations auxquelles est soumise la pièce.

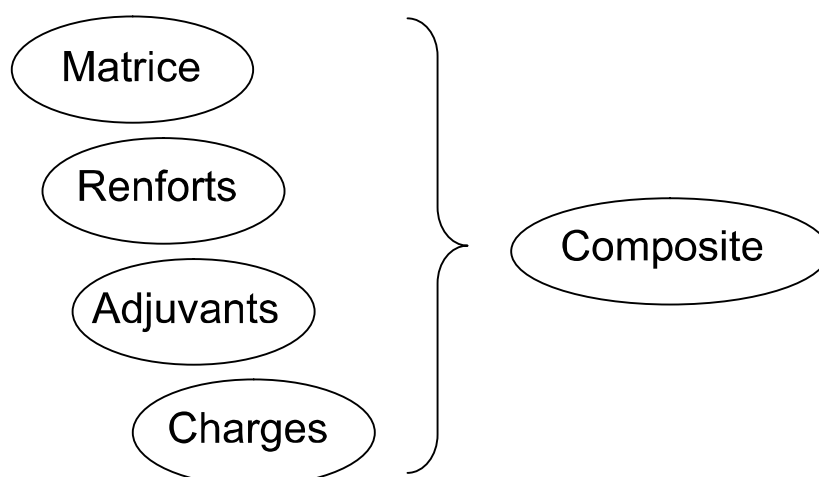


Figure 1.1. Composants des composites.

1-1- Les matrices : La matrice a pour principal rôle de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi la protection du renfort vis-à-vis des diverses conditions environnementales qui

peuvent être préjudiciables pour la durabilité de ce dernier (composite) : la variation de humidités, et de la température. Ces caractéristiques mécaniques sont nettement inférieures à celle du renfort.

1-2-Types de matrices utilisées :

Il existe une multitude de matrice qu'on peut classer en deux grandes familles : -La famille des matrices organiques et -la famille des matrices minérales (inorganiques) ; la première comporte deux types qui sont les matrices thermoplastiques et les matrices thermodurcissables, la deuxième famille regroupe les matrices céramiques et les matrices métalliques (Figure 1.2).

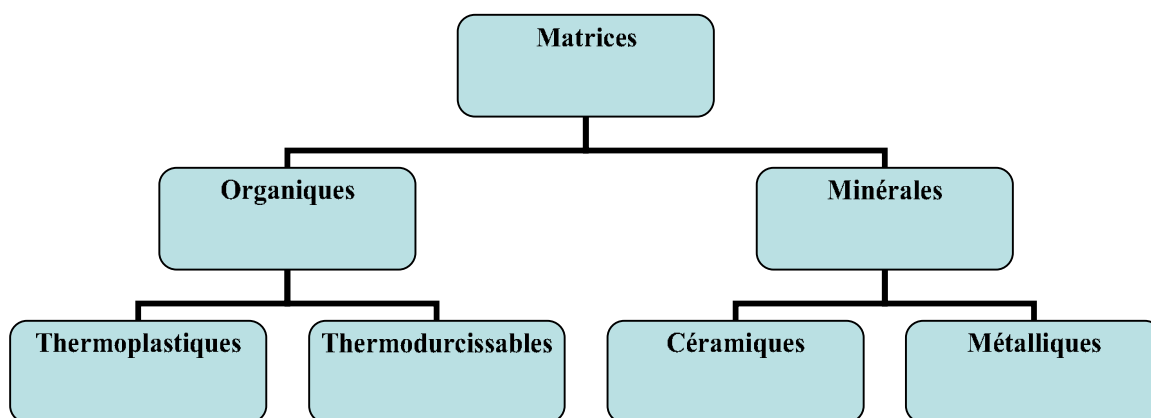


Figure 1.2 : Les familles de matrice

1-2-a/ Matrices organiques ou résineuses : Elles regroupent les matrices thermoplastiques et les matrices thermodurcissables (polyester, phénoliques...).

-Matrices thermoplastiques : Cette appellation vient du fait que ce type de matériaux se ramollit au dessus d'une certaine température appelée température de transition vitreuse T_g et redevient solide au dessous de cette même température, ce qui lui permet de conserver toujours sa réversibilité. Cette propriété rend les matrices **thermoplastiques recyclables**.

Cette dépendance à la température est due principalement à la composition moléculaire des matériaux thermoplastiques et aux liaisons qui les forment ; sous l'effet de la chaleur les liaisons faibles rompent et les chaînes moléculaires s'éloignent, ce qui donne au matériau un aspect visqueux.

-Matrices thermodurcissables : Contrairement aux thermoplastiques, le réseau moléculaire des matrices thermodurcissables est formé par de liaisons covalentes de haute énergie, ce qui leur donne leur aspect irréversible ; les produits finis ne pourront plus être fondus par un chauffage éventuel. Les thermodurcissables sont des matériaux assez rigides dont leur comportement dépend peu de la température ; une fois durcis ils deviennent infusibles et insolubles.

1-2-b/ Matrices minérales : Elles comportent deux types de matériaux, soit de type céramiques soit de type métalliques.

-Matrices céramiques : Utilisées exclusivement pour des applications de hautes technicités, telles que spatial, militaire et le nucléaire, grâce à leur très grande résistance à la température. Leurs principaux constituants sont le carbure de silicium et le carbone.

-Matrices métalliques : Matrices de types alliages : aluminium, magnésium, zinc, nickel...etc.

2- Les renforts (fibres):

3-

Le choix des renforts (nature, dosage, leur distribution, courtes ou bien longues) est déterminant pour les résistances du mélange fibre-matrice. Pour la classification des renforts (ou fibres) il existe deux classifications ; une classification selon la nature chimique de la fibre et la classification selon la géométrie du renfort (Figure 1.3).

2-1-Classification selon la nature chimique : On distingue deux grandes familles qui sont la famille des renforts organiques dont les plus connus sont l'aramide et le polyester, et la famille des fibres inorganiques constituer par deux principaux type de fibres ; les fibres de nature chimique minérale (les fibres céramiques et les fibres métalliques) et les fibres de nature végétale telles que les fibres de chanvre. Dans ce qui suit nous allons présenter les principaux types de fibres utilisés dans le domaine qui nous concerne, qui est le domaine du génie civil.

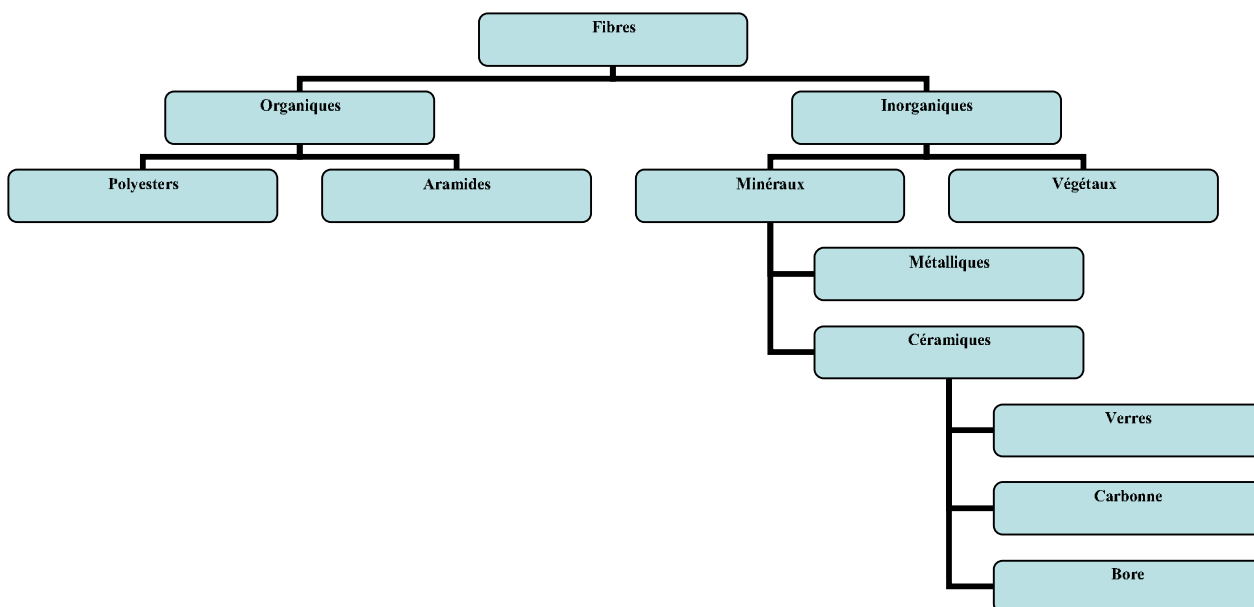


Figure 1.3 : Types de fibre

-Fibres de verre : qui sont les plus utilisées étant données leurs propriétés mécaniques très importantes, ainsi que leur isotropie, sans oublier leur coût de revient très raisonnable. Les filaments sont obtenus par filage de verre (silice + carbone de sodium et de calcium) en fusion à plus de 1000°C. Il existe plusieurs types de fibres de verres, résumés dans le tableau 1.1 :

Type	Caractéristiques générales
E	à usage générale
D	hautes propriétés diélectriques
A	haute teneur en alcali
C	bonne résistance chimique
R, S	haute résistance mécanique

Tableau 1.1.Nuances des fibres de verre.

Les fibres de verre offrent beaucoup d'avantages pour une utilisation en renforts pour les matrices cimentaires (mortier ou béton). Parmi ces avantages on peut citer :

- Une grande résistance à la traction allant jusqu'à 1700 MPa.
- Un module d'élasticité élevé.
- Insensible à la rouille, incombustible et une bonne adhérence à la matrice cimentaire.

-Fibres de carbone : Elles ont des propriétés mécaniques comparables aux fibres de verres ; une grande résistance mécanique, d'autant plus que leur masse volumique est faible. Elles présentent cependant une anisotropie suivant les axes principaux.

-Fibres d'Aramide ou de Kevlar (polyamide aromatique): Caractérisées par leur faible masse volumique et leurs prix de revient inférieur à celui des fibres de carbone (4 à 6 fois), elles présentent toutefois diverses faiblesses, qui sont :

- Une résistance faible à la compression, à la flexion et au flambement.
- Une sensibilité au cisaillement inter laminaire.

Il existe d'autres types de fibres (Bore, carbure de silicium, alpha quartz, alumine) mais leur utilisation est infime dans le domaine du génie civil.

2-2- Selon l'armure textile : A partir des fils, on réalise des textiles unidirectionnel ou multidirectionnel, selon une certaine géométrie, et plus généralement suivant deux directions perpendiculaires : une direction dite de chaîne et une autre dite de trame.

Il existe trois types de surfaces de renforts textiles :

- Les unidirectionnels.
- Les bidirectionnels.
- Les tridimensionnels.

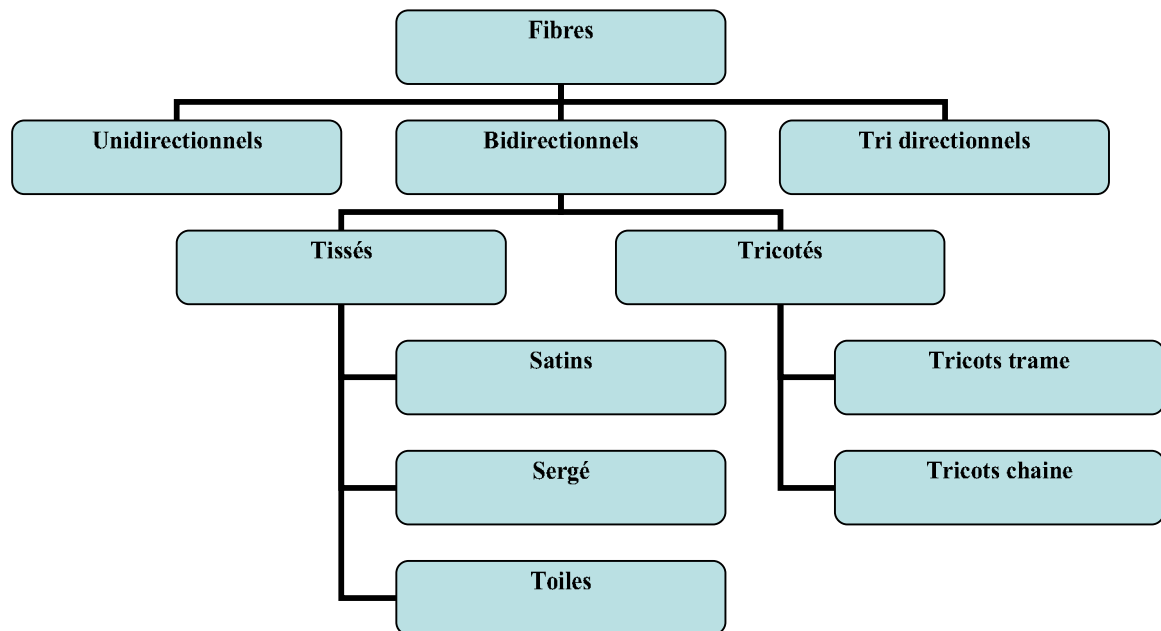


Figure 1.4 : Types de fibres selon la géométrie du textile.

-Les unidirectionnels (plis unidirectionnels) : C'est la première famille des renforts textiles, ce sont des fibres orientées selon une direction principale, c'est ce qui explique l'anisotropie totale des composites fibres – ciment.

- Les bidirectionnels : Cette famille regroupe principalement deux types d'armures textiles :

a- Les tissés : Ce type d'armure consiste à croiser, à angle droit, un ensemble de fils parallèles (chaîne) avec un second ensemble de fils appelés trame. Il existe un nombre important d'armures possibles, qui dépendent du nombre de croisement des fils dans les deux directions (chaîne, trame) comme le montre la figure 1.1. Les plus répandues sont : les toiles, les sergés et les satins, qui sont représentés dans les figures suivantes.

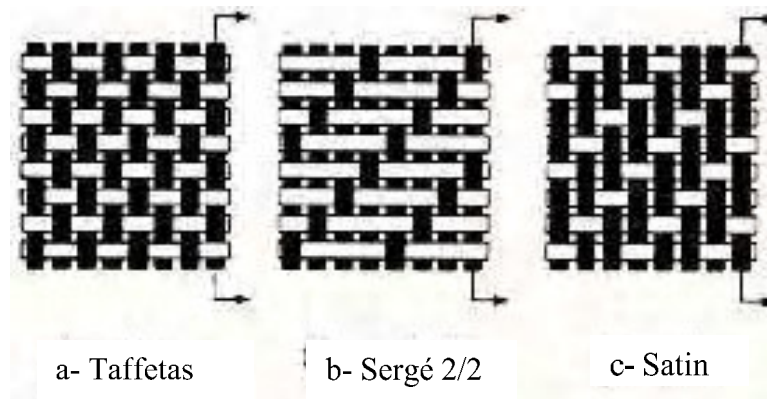


Figure 1.5. Différents types de renforts textiles bidirectionnels.

b- Les tricotés : A partir d'un ou plusieurs fils, et suivant un procédé de tricotage bien spécifique, on produit des boucles de fils (mailles) ; une série de mailles disposées côte à côte est appelée rangée, une série de mailles imbriquées les unes au-dessus des autres est appelée colonne (Fig.1.2).

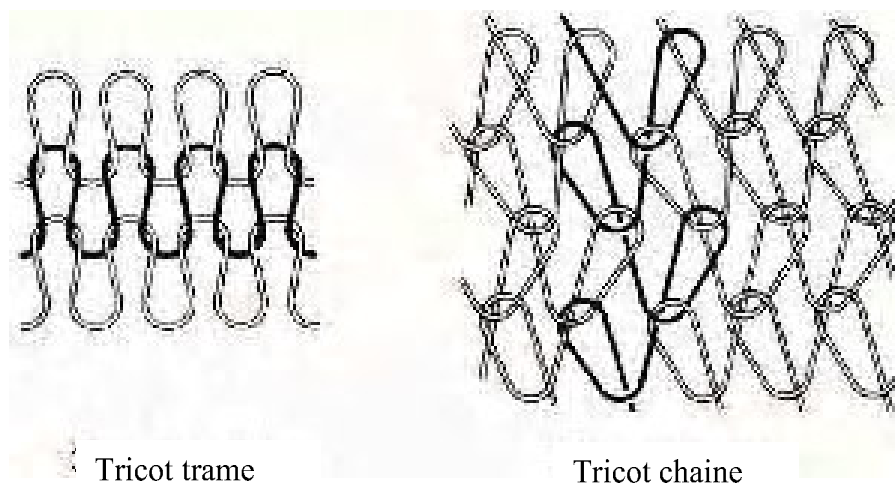


Figure 1.6. Types de tricot.

-Les tridimensionnels : ils sont constitués par des fibres orientées selon plusieurs directions, ce qui leur donne une ampleur volumique (Fig.1.3), seulement leur utilisation est très restreinte par rapport aux autres types de géométrie.

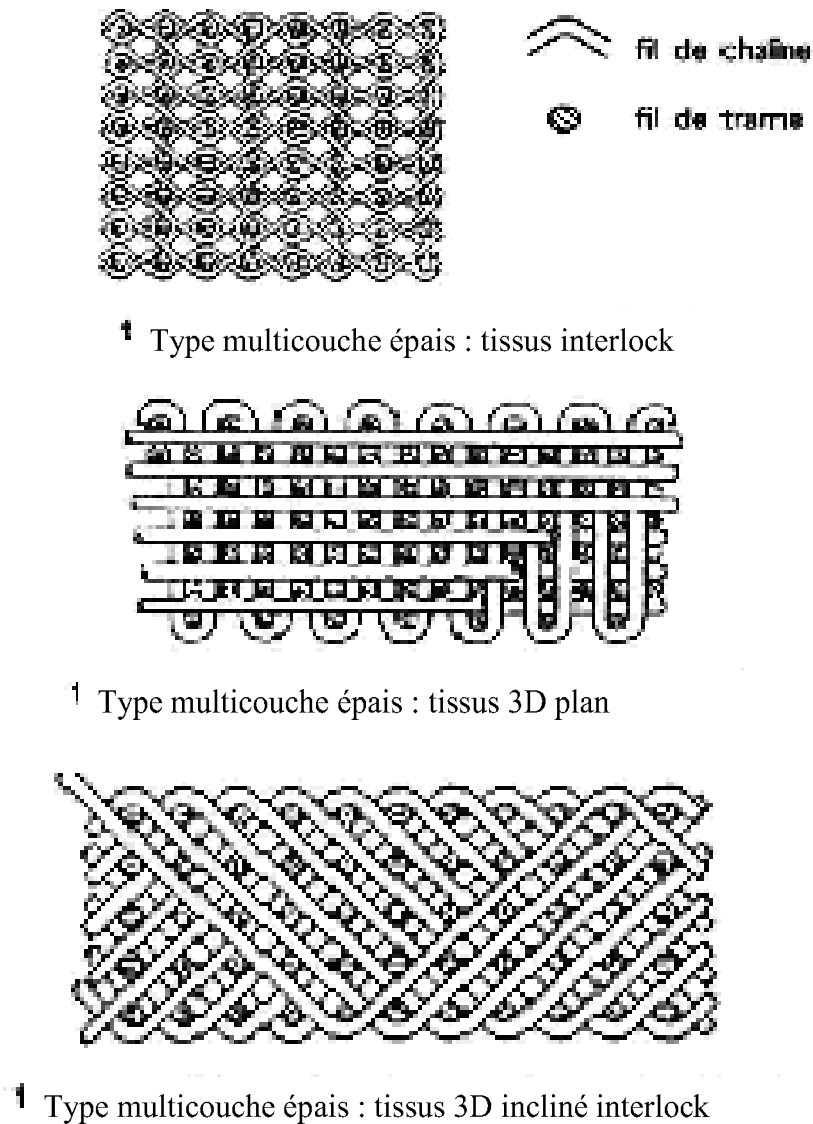


Figure 1.7. Différents types de tissus tridimensionnels (sources sciences de l'ingénieur).

4- Caractéristiques spécifiques et intrinsèques d'un composite :

La caractérisation d'un matériau composite est l'une des étapes les plus délicates et les plus fastidieuses dans l'étude des composites, du fait, premièrement, de l'hétérogénéité très prononcée de ce type de matériau, deuxièmement, c'est un matériau dont les caractéristiques dépendent d'une multitude de facteurs, tels que : type des fibres, type des matrices, les imperfections de mises en œuvre...etc.

Par ailleurs il existe, au-delà des méthodes expérimentales, une méthode analytique qui est basée sur des principes de la mécanique des multi-matériaux et qui permet de quantifier d'une manière plus au moins précise les paramètres d'un composite en fonction des paramètres de ces composants, cette méthode porte le nom de « Loi des mélanges ».

Caractérisation des composites fibres-ciment

Pour pouvoir utiliser cette méthode il importe de définir des grandeurs qui tiennent compte de ces composantes, qui sont citées ci-après :

a/ Teneur en masse de renfort : C'est le rapport :

$$M_f = \frac{\text{Masse du renfort}}{\text{masse totale du composite}}$$

De même on peut définir la teneur en matrice :

$$M_m = \frac{\text{Masse de la matrice}}{\text{masse totale du composite}}$$

b/ Teneur en volume de renfort : C'est le rapport :

$$V_f = \frac{\text{volume du renfort}}{\text{volume total du composite}}$$

De même on définit la teneur en volume de la matrice :

$$V_m = \frac{\text{volume de la matrice}}{\text{volume total du composite}}$$

c/ Masse volumique d'un composite : Exprimée par la relation :

$$\rho = \frac{\text{masse du renfort} + \text{masse de la matrice}}{\text{volume total du composite}}$$

Ou bien par la relation :

$$\rho = \rho_f \times V_f + \rho_m \times V_m$$

Avec : ρ : Masse volumique du composite (Kg/m^3), ρ_f : masse volumique des fibres (Kg/m^3), ρ_m : masse volumique de la matrice (Kg/m^3), V_f : taux volumique des fibres (%), V_m : taux volumique de la matrice (%).

d/ L'épaisseur du renforts : Elle définit l'épaisseur d'un renforts textiles en tenant compte de la masse du renforts par mètre carré, et elle est exprimée par la relation suivante :

$$h = \frac{M_{of}}{V_f \times \rho_f}$$

avec M_{of} est la masse du renfort par mètre carré (Kg/m^2).

Caractérisation des composites fibres-ciment

On donne quelques exemples dans le tableau 1.2 :

	M_f (%)	h (mm)
verre 'E'	34	0,125
verre 'R'	68	0,175
kevlar	65	0,13
carbone 'H.R'	68	0,13

Tab.1.2. caractéristiques des différents types de fibres.

Il existe plusieurs méthodes de caractérisation des composite fibres – matrice, parmi ces méthodes on peut évoquer :

- Les méthodes expérimentales.
- Les méthodes déductives ou bien lois des mélanges, qui, à partir des caractéristiques de chacun des composants, nous permettent de déduire le comportement de l'ensemble renfort - matrice.

A priori les résultats obtenus à partir de ces méthodes, le plus souvent ne convergent pas, et cela est dû principalement aux raisons déjà évoquées, à savoir l'anisotropie des matériaux entrants dans l'élaboration du matériau composite, l'imperfection de mise en œuvre...etc.

Ce qui justifie le recours aux méthodes de recoupement entre les résultats obtenus avec les différentes méthodes de caractérisation – du moins avec la méthode expérimentale et la méthode numérique - afin d'aboutir à des résultats exploitables.

Chapitre 2 : Les composites fibres - ciment.

1-Définition :

Un composite fibres-ciment est un matériau plutôt récent si on le considère dans sa configuration fibres textiles longues, notamment dans le cas d'application aux structures. Il est mis en place par le mélange, dans des proportions bien définies de : i) matrice cimentaire de granulométrie très fine, inférieure à 1mm, ii) et de renfort sous formes de fibres unidirectionnelles ou bien de tissus bidirectionnels. Sachant que le composite fibres-ciment est un nouveau matériau, il n'existe pas d'essais normalisés qui permettent de le caractériser. Néanmoins, plusieurs compagnes de recherche ont été menées afin de définir une loi de comportement en traction du composite fibre-ciment, sur la base d'essais existant, qui permettaient la caractérisation des composites à matrices polymère.

La caractérisation du composite fibres-ciment se focalise sur l'étude de son comportement en traction, sachant que le composite va être sollicité en traction notamment dans le cas de renforcement de poutres travaillant en flexion simple.

2-1-Le TRC à l'échelle microscopique :

Dans l'étude microscopique des composites TRC, les notions de filaments et d'adhérence se révèlent déterminants. Les filaments, d'une dimension de l'ordre du micromètre (de 10 à 20 μm), sont les constituants fondamentaux du composite TRC. Un fil (Ph.3.1), comporte entre 700 et 2000 filaments, ce qui lui donne une grande résistance. L'adhérence, existe sous deux formes : adhérence filament – filament et l'adhérence filament – mortier. Ces deux niveaux d'adhérence contribuent avec des proportions différentes à l'adhérence globale. L'adhérence filament –mortier est celle qui conditionne le plus le comportement du TRC et qui suscite beaucoup d'attention lors des études de l'adhérence (C.Butenweg et al. 2004, R.Ortlepp et al. 2006).

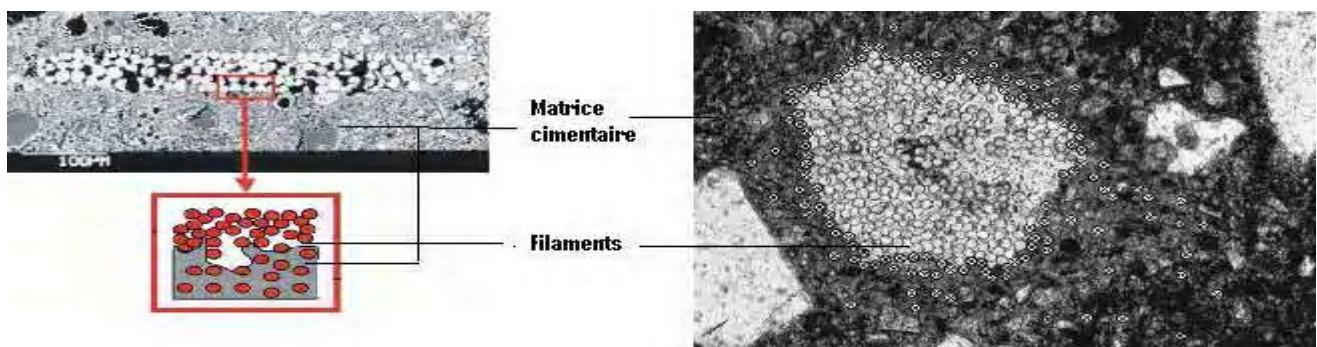


Figure 2.1. pénétration du mortier entre les filaments (science direct).

Caractérisation des composites fibres-ciment

Il existe plusieurs techniques pour la détermination de l'adhérence fibre – mortier, notamment l'essai pull – out (Photo 2.2), qui s'appuie sur une exploitation en contrainte moyenne, et qui permet de quantifier l'adhérence, en calculant la contrainte de cisaillement à l'interface fibre - matrice à partir de la formule suivante :

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{\pi \cdot d_f \cdot l_e}$$

Avec : P_{\max} : charge max atteinte dans l'essai Pull – out, d_f : diamètre de la fibre, l_e : longueur du fil noyée dans le mortier.

Dans l'étude du comportement des TRC, on parle peu de l'adhérence filament - filament car elle est suffisamment métrisable, notamment dans la phase de manufacturing, où on intervient d'une façon rigoureuse quant au traitement de surface des filaments : opération d'ensimage.

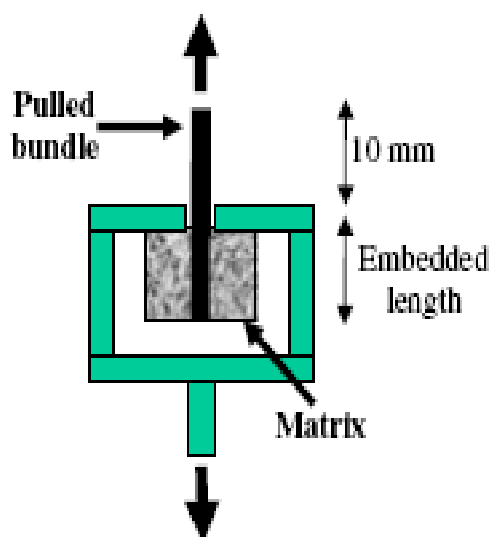
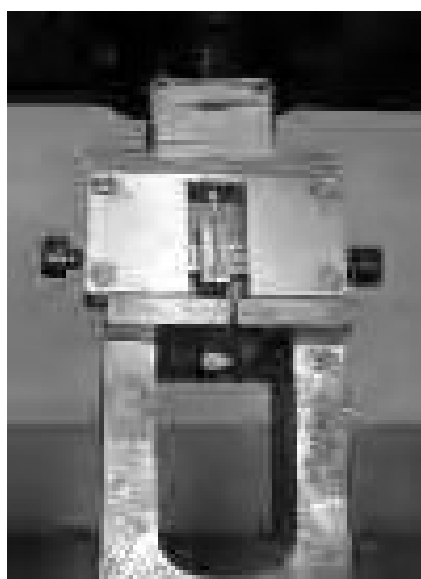


Photo2.2. Dispositif d'essai pull-out

Il existe une autre méthode qui nous permet de déterminer la valeur de la contrainte de cisaillement à l'interface fibre – mortier, à partir de l'essai de traction directe, et qui s'appuie sur la connaissance de l'espacement des fissures et de la contrainte de traction qui amorce la première fissure (voir paragraphe 4, deuxième partie du rapport).

2-2-Le TRC à l'échelle macroscopique (Caractérisation des composite fibres – ciment) :

Dans cette partie, on s'intéresse surtout au comportement mécanique du composite : contraintes et efforts repris par une section du composite TRC, déformations et modes de ruptures correspondant.

Pour ce qui est du comportement mécanique, les campagnes de recherche, notamment celle d'U.Haubler **et al. 2007**, qui ont été menées jusque-là visaient à définir une loi de comportement du composite vis-à-vis de la traction, sans donner une importance très particulière au type ou à la forme de fibres utilisées, sachant que les travaux recensés utilisent des fibres de verre unidirectionnelles principalement. Chose qui mérite d'être notée c'est les corps d'épreuve utilisés par les différentes équipes de recherche, de deux géométrie différentes : en haltère ou bien en rectangle.

Tout les travaux, menés à ce jour, notamment ceux de **J.Hegger et al. 2008**, d'**U.Haubler et al. 2007** et de **H.Cuypers et al. 2006**, qui ont travaillé sur l'aspect caractérisation mécanique des TRC ont eu pour valeur fixe : type de fibres, type de matrice, épaisseur du TRC et le taux de fibre utilisé. Ces travaux de recherche menés dans l'optique de caractériser les composites fibres – ciment ont donné pratiquement les mêmes résultats, que ce soit pour les essais sur éprouvettes en rectangles ou les essais avec des éprouvettes en haltères, la loi de comportement des composites fibres – ciment est tri linéaire.

Dans ce paragraphe nous avons répertorié les principaux résultats obtenus par les différents chercheurs qui ont travaillé à ce jour sur les TRC.

2.2.1. Loi de comportement des TRC :

Les résultats des essais obtenus par U.Haubler et al. (2007), qui ont utilisé des éprouvettes rectangulaires, sont représentés dans le graphe 2.1.

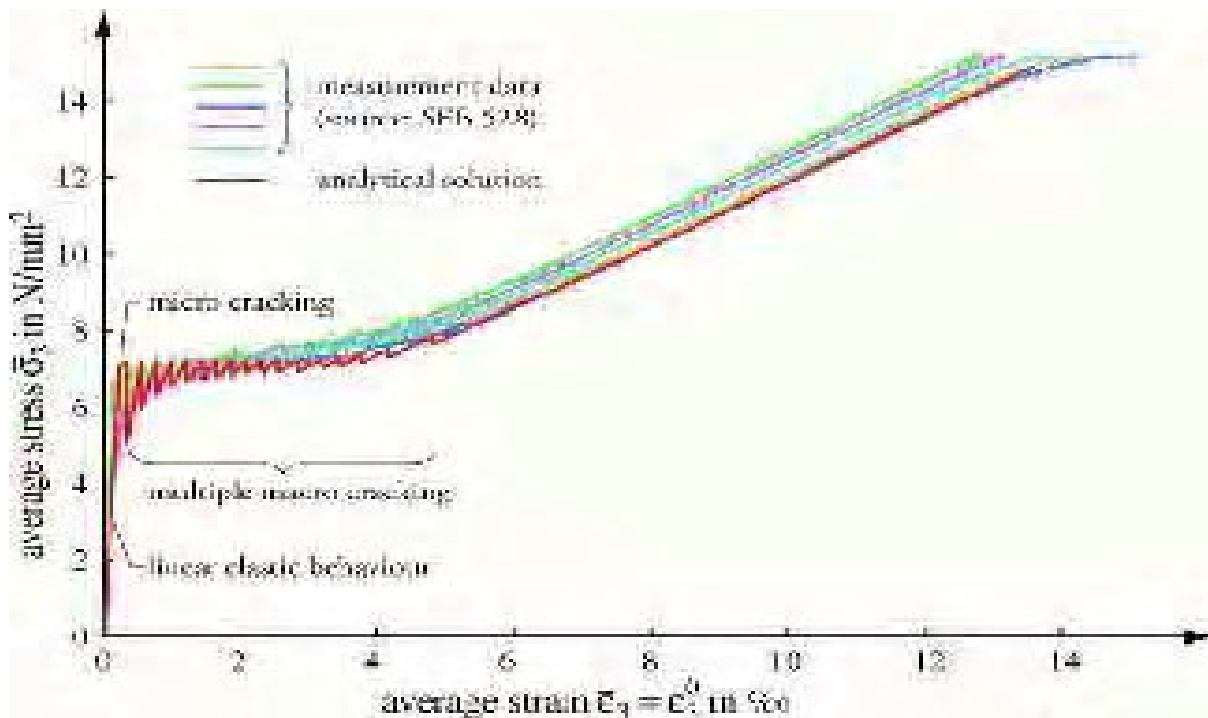
L'utilisation des éprouvettes rectangulaires, offre une meilleure répartition des contraintes à l'intérieur du composite, d'une façon plus ou moins homogène. Par ailleurs le risque d'avoir des fissurations hors de la zone instrumentée est fort probable, ce qui peut engendrer des mesures non représentatives de la réalité.

La loi de comportement obtenue est répartie en trois phases linéaires 'graphe tri-linéaire' (Graphe 2.1). Pour l'interprétation de ce graphique, les deux chercheurs interprètent le comportement selon chaque partie indépendamment.

-1^{ère} partie du graphe : matériau sain, pas de fissuration du TRC jusqu'à dépassement de la contrainte admissible du mortier (comportement élastique linéaire).

-2^{ème} partie du graphe : partie très brève, diminution très significative de la rigidité, apparition des premières fissures, dues principalement à la non homogénéité de la distribution des contraintes à l'intérieur du TRC et aussi dans chaque fil (problème d'adhérence et d'imprégnation).

-3^{ème} partie du graphe : Mise en action substantielle des fibres, augmentation de la rigidité mais qui reste inférieure à la rigidité des fibres seules, stabilisation des fissures.



Graphe2.1. Contraintes-déformations des éprouvettes testées (science direct 2007)

H.Cuypers et al. (2006) analysent la même courbe contraintes – déformations du composite en donnant une estimation analytique de la rigidité, de la contrainte et de la déformation du composite dans chaque phase :

-Zone 1 de pré fissuration : C'est la partie linéaire où le composite ne laisse apparaître aucune fissuration 'composite sain' et la rigidité peut être calculée par la loi des mélanges suivante :

$$E_{cl} = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

La rigidité peut être diminuée par différents facteurs, par exemple : L'imperfection de l'adhésion fibres – ciment, le non alignement des fibres, l'air et le vide à l'intérieur du composite...etc, seulement dans ce modèle on ne prend pas en considération tout ces facteurs.

-Zone 2 de multi fissuration : C'est la partie critique où les premières fissures apparaissent dans le matériau, caractérisée par une contrainte σ_{mu} qui correspond à l'apparition de la première fissure. Par la suite la multiplication et la propagation des fissures est imminente tout le long et à travers la matrice. Une autre contrainte σ_{mc} caractérise le matériau composite, elle correspond à l'apparition de la dernière fissure et sa propagation dans le sens transversal. Elle peut calculer par la formule suivante :

$$\sigma_{mc} = \frac{E_{c1} \cdot \sigma_{mu}}{E_m}$$

Où E_m : rigidité de la matrice. E_{c1} : rigidité de la zone1.

Pour ce qui est de l'estimation de la déformation à la fin de la zone 2, Cooper et Kelly (1971) donnent la formule suivante :

$$\varepsilon_{mc} = (1 + 0.666\alpha) \cdot \frac{\sigma_{mu}}{E_m} \quad \text{Où : } \alpha = \frac{E_m \cdot V_m}{E_f \cdot V_f}$$

-Zone 3 : stabilisation de la fissuration : pas de nouvelles fissures qui apparaissent, par contre les ouvertures des fissures continues à augmentée jusqu'à rupture et la rigidité du composite peut être calculée par la formule suivante :

$$E_{c1} = E_f \cdot V_f$$

A partir de cette relation, on voit que la rigidité du composite, dans cette zone, ne dépend que des caractéristiques des fibres, ce qui signifie que la matrice dans la zone 3 ne travaille pas et que ce sont les fibres qui reprennent la totalité de l'effort de traction.

1.2.2. Figure de fissuration :

Selon **S.Holler et al (2004)** et **M.Richter et al (2006)**, qui ont travaillé sur l'influence de la fissuration sur le comportement des TRC. Leurs résultats sont très comparables, bien que les deux études ont été menés avec deux formes d'éprouvettes différentes (rectangulaire, haltère), on constate qu'il y a toujours trois phases dans la loi de comportement (figure 2.2). Chaque phase est caractérisée par un état de fissuration distinct, qu'on peut décrire comme suit : **1^{ère} phase** : composite sain, **2^{ème} phase** : apparition des fissurations et la **3^{ème} phase** : stabilisation des fissures. Ces résultats ont été confrontés aux résultats obtenus par un calcul éléments finis qui tient compte de l'adhérence : i)

filament – matrice, ii) filament – filament, ce qui a permis de valider la conformité de l’essai et des résultats obtenus.

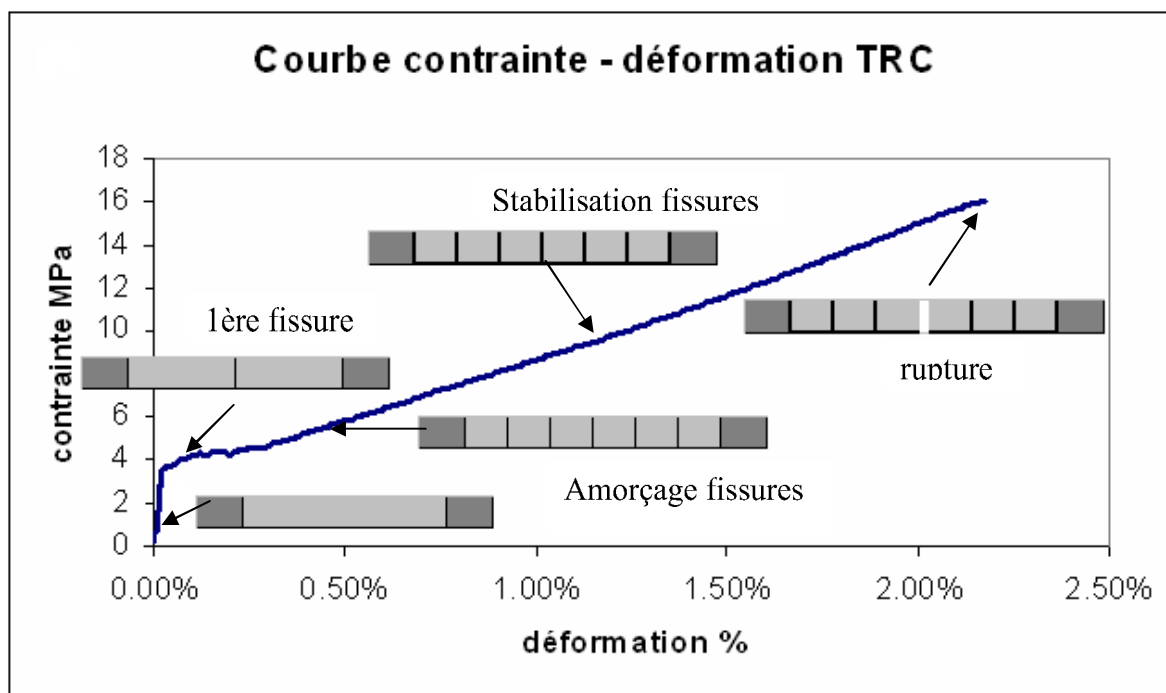


Figure 2.2. Etats de fissuration des éprouvettes dans chaque phase de l’essai

• **Conclusion :**

Comme conclusion de cette partie, on notera que :

- Les TRC ont un comportement tri linéaire, caractérisé par trois phases.
- Le figure et les mécanismes de fissuration sont différents d’une phase à une autre.
- L’amorçage de la première fissure fait chuter considérablement la rigidité du TRC.
- Presque toutes les fissures finales du TRC sont amorcées dans la deuxième phase.

2-3-Facteurs influençant le comportement des composites fibres – ciment :

Le comportement des composites fibres – ciment est conditionné par plusieurs facteurs, qui jouent un rôle déterminant pour tout ce qui est performances mécaniques. Pour cela il était indispensable de les identifier et de déterminer d’une façon précise leurs impacts sur le comportement du composite fibres – ciment.

A/Influence de l’adhérence filament - matrice :

L’adhérence est le premier facteur qui conditionne le comportement du TRC. Selon **U.Haubler et J.Harting (2007)** il y a deux types d’adhérence : i) adhérence entre filament et le mortier, ii)

adhérence inter - filament. L'adhérence est un facteur qui peut affecter jusqu'à 75% le taux de travail du composite. Cette adhérence est conditionnée principalement par : i) la viscosité du mortier ; plus le mortier est visqueux plus il est apte à pénétrer à l'intérieur des fibres et entre les filaments (Alva Peled et al. 2008), ii) le deuxième facteur est l'état de surface des fibres, qui peut être amélioré par l'utilisation d'une résine d'imprégnation.

B/Influence du ratio E/C dans le mortier :

La quantité d'eau dans le mortier joue sur l'adhérence d'une manière significative. Selon Alva Peled et al. (2008) qui ont utilisé des fibres en polypropylène, le rapport E/C influence considérablement le comportement du TRC, car il touche à la viscosité de la matrice et par voie de conséquence sur la pénétration du mortier à l'intérieur du fil (figure 3.1), ce qui rend la contrainte tangentielle filament – matrice plus importante. Par exemple, les deux cas présentés, pour un rapport E/C égal à 0.4, la contrainte tangentielle entre les filaments et le mortier est de 2MPa et pour un rapport E/C égal à 0.5, la contrainte tangentielle de 4.2MPa, ce qui montre l'importance du ratio E/C pour ce qui adhérence du composite.

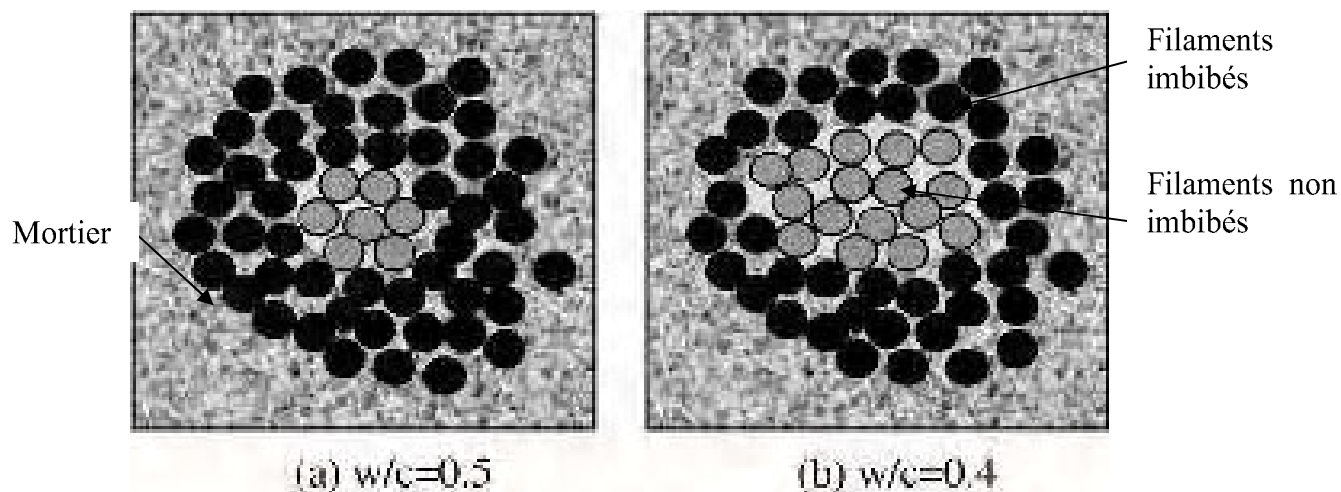


Figure 3.1 Pénétration du mortier en fonction du ratio E/C

C/Influence de la disposition géométrique du renfort dans la matrice :

J.Hegger et al. 2008 ont essayé de montrer l'influence de la géométrie du textile de renfort, nombre de fils, du nombre de couches, de leurs orientations et de leurs tailles (figure 3.3.a), qui jouent un rôle déterminant quant aux comportements et performances du TRC, les résultats sont présentés dans la figure 3.3.b. Les tissus de renfort verre AR en tricot et le carbone ont le meilleur comportement

Caractérisation des composites fibres-ciment

avec une contrainte ultime de l'ordre de 800 MPa et une déformation ultime de l'ordre 7‰ pour le verre AR.

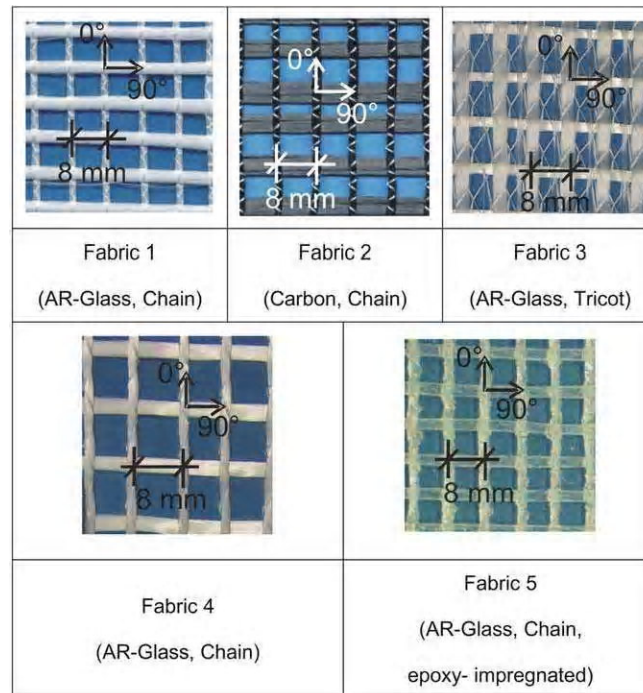


Fig. 1. Textile fabrics made of AR-glass and carbon.

Figure 3.2.a type et géométrie des renforts textiles.

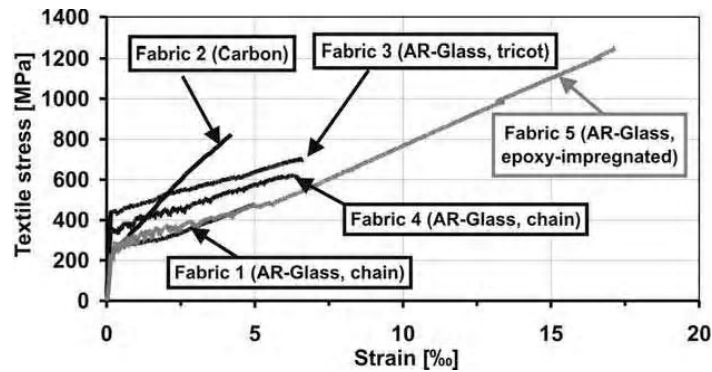


Figure 3.3.b lois de comportement TRC selon plusieurs configurations.

D/Influence de la nature des matériaux utilisés :

La nature des matériaux utilisés et leurs propriétés mécaniques respectives (rigidité, contraintes de rupture, déformation ultime...etc) jouent un rôle important les caractéristiques du TRC, sans parler de l'influence de l'imprégnation avec des résines époxy, où on a une contrainte ultime, du verre AR imprégné d'époxy figure 3.3, égale à 1200MPa et une déformation ultime de 17‰.

2-4-Estimation de l'espace des fissures :

L'une des caractéristiques révélatrices du comportement mécanique du composite est la fissuration, qui se manifeste par ces deux mécanismes : l'amorçage et la propagation. Ces deux mécanismes sont conditionnés par plusieurs facteurs, les plus importants sont : la longueur d'ancrage et l'adhérence matrice – filaments. Il existe plusieurs théories qui nous permettent d'estimer l'espace entre les fissures qui peuvent apparaître sous un chargement donné.

Selon *Kreller* (1990), l'espace entre fissures (Figure 3.4.1) peut être calculé par la relation suivante :

$$S_{cm}(\xi) = \frac{1}{\xi} \cdot (2,0 - 0,69 \cdot \xi) \cdot l_e \left(\frac{\xi}{2} \right)$$

Avec : ξ variable statistique calculée à partir de différents cas de contraintes pour le cas béton armé et $0 \leq \xi \leq 1$, l_e : la zone de transfert

Cette approximation qui se base sur une approche semi probabiliste pour l'estimation de l'espace des fissures, a été tiré des principes de calcul de béton armé d'où sa vulnérabilité pour le cas des fibres – ciment. En effet, en béton armé on considère que nous avons une adhérence parfaite entre béton et acier, alors que dans le cas du composite fibres – ciment on est loin d'avoir une parfaite adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire, dû à la nature filamentaire des fibres et à la viscosité de la matrice.

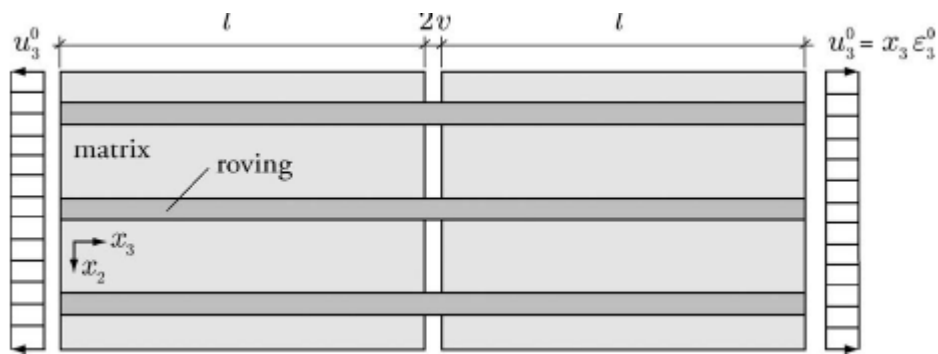


Figure 3.4.1. Ouverture de fissures dans un TRC à fibres unidirectionnelles (science direct).

D'autre part, *U.Haubler-Combe et al.* (2006) ont proposé une deuxième formule pour l'estimation de l'espace des fissures. Cette approche est plus déterministe car elle utilise des grandeurs qui sont liées directement aux matériaux dont le composite est formé. Cette formule adopte l'expression suivante :

$$I_c = \frac{A_c}{n_y \cdot C} \cdot \frac{f_{ct}}{\tau_{mean}}$$

$$\text{Où : } \tau_{mean} = \gamma \cdot \tau_{max}$$

Avec n_y : nombre de fils, C : circonférence du fil, A_c : section du spécimen, σ_c : contraintes dans le mortier.

A partir de cette relation *U.Haubler-Combe et al.* (2006) considère que l'espacement final entre fissures 'a' peut être encadré par :

$$I_c \leq a \leq 2 I_c$$

$$I_c = \frac{3.78}{\gamma} mm$$

Où γ est un paramètre qui traduit le degré d'adhérence entre la matrice et les filaments : il vaut 0 s'il n'y a aucun contact et il vaut 1 dans le cas de l'adhérence parfaite entre matrice et filaments. Réciproquement, en connaissant l'espacement des fissures, on peut déterminer le degré d'adhérence.

Cette approche a été mise en place en considérant un seul filament avec une adhérence quasi-parfaite, ce qui fait la faiblesse de cette méthode d'estimation de l'espacement entre fissures. Aussi les approches restent limitées si on considère le fait qu'elles ne prennent en compte l'état de contrainte et de déformation pour le calcul de l'espacement des fissures.

Un troisième modèle, plus complet, permet d'approcher d'une façon analytique la valeur de l'espacement ; c'est le modèle ACK. Le modèle **ACK** adopte les hypothèses suivantes :

- la fibre est toujours capable de supporter le chargement appliqué dans son axe longitudinal.
- L'adhérence fibre – matrice est fragile.
- L'effort de cisaillement à l'interface fibre – matrice est constant le long de la fibre.
- L'effet de Poisson est négligé.
- La charge est reprise par l'ensemble des fibres.
- La contrainte normale est uniformément répartie dans le sens transversal de la matrice.

Etant donné le fait que la loi de comportement du composite fibres – ciment est répartie en trois parties, chaque partie fait référence à un état de contrainte et de déformation donné, ce qui engendre

par voie de conséquence des états de fissurations différents. Le modèle ACK prend en considération cette particularité du composite fibres – ciment pour le calcul de l'espacement des fissures.

-Zone 1 : de pré fissuration : C'est la partie linéaire où la contrainte admissible du mortier n'est pas encore atteinte 'composite sain'.

-Zone 2 : de multi fissuration : C'est la partie critique où la contrainte admissible du mortier est atteinte, ce qui engendre les premières fissures qui se propagent par la suite. Aussi, plus de 95% (*Jens Harting et al. (2008)*) des fissures finales s'amorcent dans cette phase de l'essai.

L'espacement probable des fissures δ peut être alors calculé par la formule suivante :

$$\delta = \frac{V_m \cdot r \cdot \sigma_{mu}}{V_f \cdot 2 \cdot \tau}$$

Où V_m taux volumique de la matrice, V_f taux volumique des fibres, r : rayon de la fibre. τ : Contrainte de cisaillement à l'interface fibre – ciment issu d'essai pull-out.

Selon *H. Cuypers et al. (2006)* δ , l'espacement réel entre fissures, peut être encadré dans l'intervalle δ et 2δ et l'apparition d'une nouvelle fissure ne peut se faire que dans cet espace. Par ailleurs, *Curtin WA (1999)* considère que l'espacement réel entre fissures est assimilé au problème géométrique d'un parking de voiture où l'espacement entre deux voitures de longueur δ est :

$$X = 1.337 \cdot \delta.$$

-Zone 3 : de post fissuration : cette phase est caractérisée par la stabilisation des fissures et par l'augmentation graduelle des ouvertures des fissures existantes jusqu'à rupture.

2.5. Essais de caractérisation des composites TRC :

La caractérisation des composites fibres-ciment est l'une des étapes les plus importantes dans leur étude, car à partir de la connaissance des caractéristiques mécaniques d'un matériau, on peut définir son champ et ces limites d'utilisation, et optimiser au mieux son comportement avec la structure à renforcée.

Il existe plusieurs types d'essais normalisés qui nous permettent de connaître le comportement d'un composite en traction et de déterminer les constantes instantanées de ce dernier. Une courbe représentant les contraintes en fonction des déformations, $\sigma = f(\varepsilon)$, permet de définir les principales constantes de l'ingénieur, qui sont le module de Young E , le coefficient de Poisson ν et le module de cisaillement G , ainsi que les caractéristiques singulières du matériau qui sont la limite d'élasticité, la contrainte ultime et la déformation de rupture.

Ces essais ont été mis en place et développés pour la caractérisation des composites à base de matrices polymère, qui jusqu'alors sont les plus utilisés dans le monde. Néanmoins on va s'inspirer de ces essais pour mettre en place des essais de caractérisation des composites à matrices minérales et spécialement à matrice cimentaire, sachant que jusqu'à maintenant il n'existe pas de norme d'essai de caractérisation des composites fibres-ciment.

Aujourd'hui, pour la caractérisation des composites TRC, on utilise l'essai de traction directe, qui semble le plus adapté à ce type de composite à 'caractère fissurant'.

2.5.1-Eprouvettes sous formes rectangulaires :

Ce type d'éprouvettes, utilisés pour les essais sur composites à matrices polymères, est utilisé principalement pour la facilité qu'il offre du point de vue de sa mise en œuvre, de la facilité d'exploitation des résultats et de leurs fiabilités.

U.Haubler et al. (2007) ont utilisé des éprouvettes de forme rectangulaire (Figure 3.5.b) (500×100×8) pour la caractérisation d'un composite fibres – ciment qui a la constitution suivante : i) matrice cimentaire à granulométrie très fine (inférieur à 1mm), ii) fibres de renfort en verre Alcali-Résistant (ARG310) avec 800 filaments par fibre et une masse volumique de 2,817g/cm³. Les caractéristiques mécaniques de la matrice et du renfort sont récapitulés dans la figure 3.5.a.

	Matrice cimentaire	filament
Module de Young E (MPa)	30000	80000
Contraintes max (MPa)	7	2270
Déformations max	0.23×10^{-3}	28×10^{-3}

Figure 3.5.a : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés (science direct, U.H et J.H, 2007)

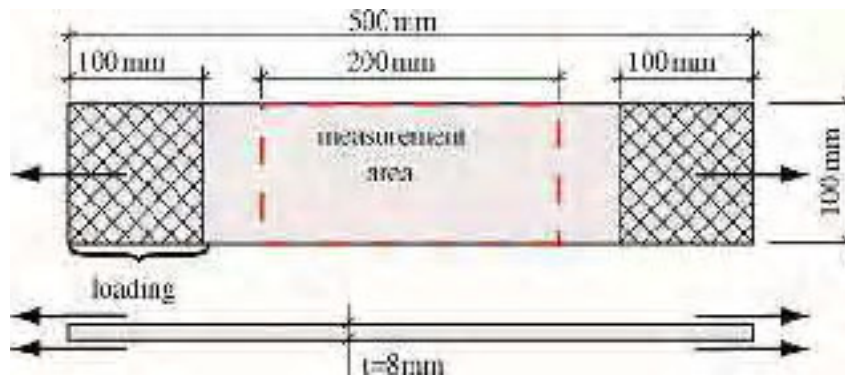


Figure 3.5.b Eprouvettes en rectangle (science direct, U.H et J.H, 2007)

Dans cet essai, *U.Haubler et al. (2007)* ont pu disposer trois couches de fils dans une épaisseur de 8mm du composite, dans chaque couche il y a 6 fils de verre AR d'un diamètre de 0.110mm² chacun, ce qui correspond à un taux de renfort de 3%. Par ailleurs la zone instrumentée est de 200 mm. L'objet de leurs essais été axé sur la détermination d'une loi de comportement du TRC et de comprendre les mécanismes de fissuration et de rupture en traction de ce nouveau matériau, en ayant fixé le type de matrice, le type de fibre, le nombre de couche et l'épaisseur des éprouvettes.

2.5.2-Eprouvettes sous formes d'haltères :

Il y a un autre type d'éprouvette d'essai de traction qu'on peut utiliser, ces éprouvettes ont la forme d'un haltère. L'avantage de ce type d'éprouvette est que leur forme permet de concentrer les contraintes dans la zone centrale lors du chargement. Par conséquent l'apparition des premières fissures et la rupture de l'éprouvette sera dans la zone centrale, ce qui permet d'avoir des mesures bien représentatives. Par contre la mise en œuvre de ce type d'éprouvettes reste assez fastidieuse. Dans leurs études expérimentales *S.Holler et al. (2004)* ont adopté cette forme d'éprouvette afin de caractériser et observer le comportement en traction du composite fibre – ciment en tenant compte de l'influence de la quantité de tissus à l'intérieur du TRC. Ils ont utilisé comme renforts deux types de

Caractérisation des composites fibres-ciment

verre unidirectionnel (2400 tex, 4800 tex). Les spécimens utilisés (Figure 3.6) avaient une longueur de 60 cm avec une zone instrumentée de 40 cm, d'une épaisseur de 1 cm et d'une largeur de 10 cm. Les résultats de leurs travaux sont détaillés dans le paragraphe suivant.

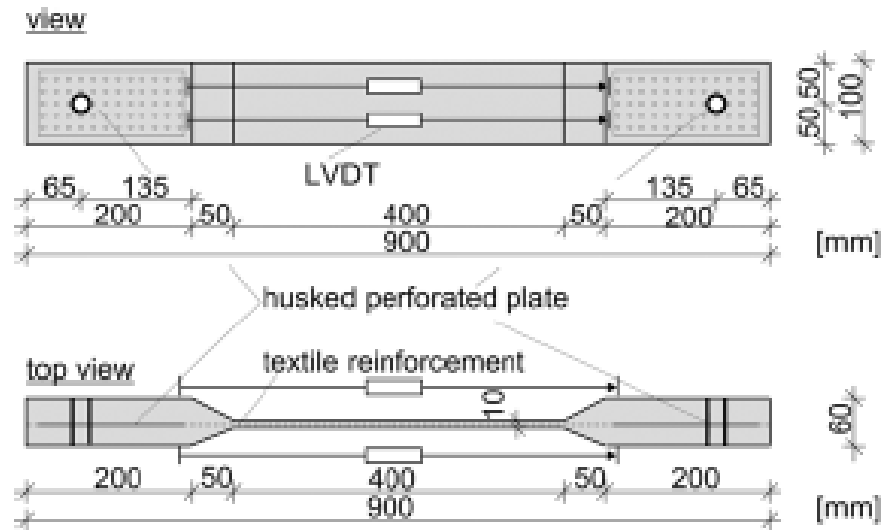


Figure 3.6 Eprouvette sous forme d'altère (*science direct J.Hegger, 2008*).

➤ **Conclusion de la première partie :**

A travers cette première partie, nous avons pu voir, d'une manière synthétique, ce qui a été fait jusqu'à présent en ce qui concerne l'étude et la caractérisation des composites TRC. Seulement, il reste à bien mettre en lumière les paramètres déterminants et de quantifier leurs impacts sur le comportement de ce nouveau matériau composite. Pour cela nous allons, dans la deuxième partie, mener une campagne d'essai qui aura pour buts principaux :

- Eprouver l'essai de traction : mise en œuvre, instrumentation de mesure, exploitation des résultats...etc.
- Evaluation des performances du composite vis-à-vis de la traction pour différents types de matériaux.
- Identification des mécanismes gouvernant le comportement du TRC.
- Evaluation de l'influence des paramètres déterminants (nombre et diamètre des filaments, adhérence, épaisseur du composite...etc)

Deuxième partie : Approche expérimentale : Caractérisation des TRC.

Dans cette deuxième partie, nous allons faire des essais de caractérisation en traction directe sur des éprouvettes de composite TRC, dans le but de :

- Définir une loi de comportement en traction du TRC.
- Connaître l'influence des différents facteurs sur son comportement.
- Etude de la fissuration avec ces deux aspects : amorçage et propagation.

L'essai qu'on réalisera sera un essai de traction directe, dans lequel on utilisera des fibres de renforcement unidirectionnelles et une forme d'éprouvette rectangulaire.

Chapitre trois : Caractérisation des composites TRC à la traction.

1-Conception de l'essai :

Un des apports importants de mon travail a consisté à concevoir un essai de caractérisation de mise en œuvre relativement aisée, adapté au TRC, en s'inspirant des procédures d'essais existantes (FRP, TRC).

Pour ce faire, nous avons tenu compte des points suivants :

- Le souci d'éviter tout poinçonnement prématuré de l'éprouvette (dont la sollicitation s'effectue au moyen d'une tige traversante), nous a conduit à dimensionner des plaques d'aluminium, elles sont poncées et collées au substrat préalablement sablé.
- La nécessité d'éviter, ou du moins limiter, les efforts parasites, nous a conduit à dimensionner des rotules 3D aux extrémités.
- Le caractère fissurant (et donc hétérogène) du TRC, nous a conduit à retenir une longueur de mesure substantielle égale à 200mm.

- **Corps d'épreuve :**

L'essai de traction adopté s'appuie sur des corps d'épreuves rectangulaire. Ils ont les dimensions suivantes : 500x100x10mm, avec une zone instrumentée centrale de longueur 200 mm, avec des talents en aluminium (100x100x5) aux deux extrémités de l'éprouvette. L'utilisation de ce type d'éprouvettes est justifié par : i) La facilité de mise en œuvre, ii) La facilité de mise en place de l'instrumentation de mesure, iii) Une analogie avec la réalité.

L'essai est réalisé avec une machine de traction de capacité 5 tonnes. Pour l'instrumentation de mesure on utilise deux capteurs de déplacement (LVDT) (Figure 1.1), qu'on placera sur les deux

Caractérisation des composites fibres-ciment

facettes de l'éprouvette, ce qui nous permettra d'avoir deux lectures en déplacement, et de pouvoir calculer une moyenne de la déformation de l'éprouvette.

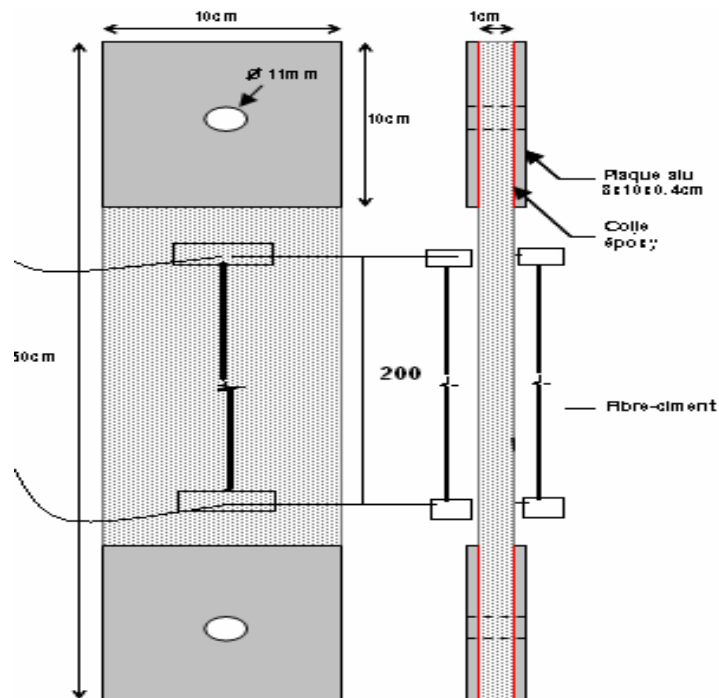


Figure 1.1. Figure du corps de l'éprouvette utilisée dans nos essais.



Photo de l'essai et de l'instrumentation utilisée.

2-Exploitation des résultats :

Les deux capteurs (LVDT ± 20 mm) placés sur les deux facettes de l'éprouvette, vont nous permettre de calculer une déformation moyenne. L'essai, de type monotone, est piloté en déplacement avec une vitesse de montée en charge de 1mm/mn. Les fissures apparentes sont systématiquement pointées (au moyen d'un feutre) en vue d'une évaluation (visuelle) de leur espacement.

L'exploitation des résultats recueillis sur la chaîne d'acquisition s'effectue en calculant le couple contrainte – déformation. Pour cela on utilisera les formules suivantes :

-Calcul des contraintes dans le composite :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{a \cdot b}$$

a et b : hauteur et largeur de l'éprouvette (Figure 2.1)

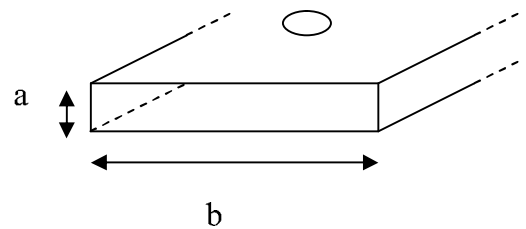


Figure 2.1 vue de côté de l'éprouvette

-Calcul de la déformation dans le composite :

$$\epsilon_c = \frac{\Delta l_c}{l_c}$$

Δl_c : allongement. l_c : distance entre capteurs (200mm).

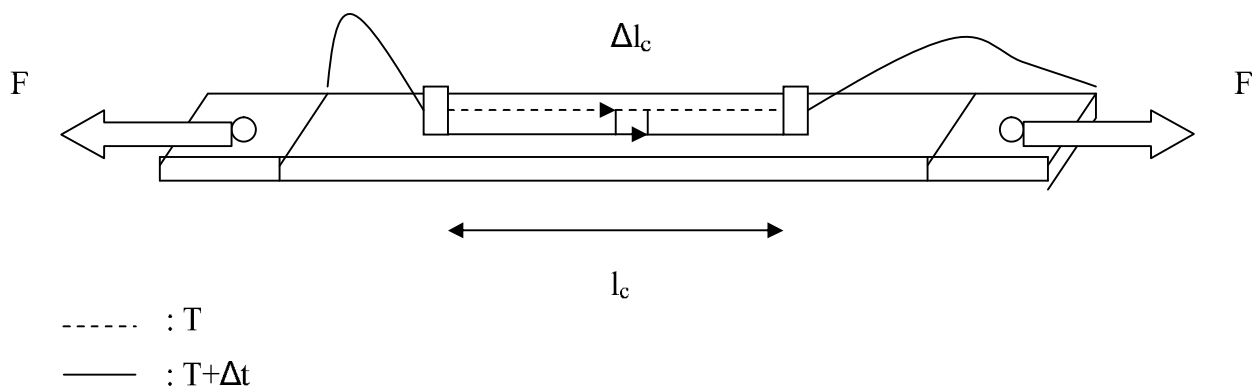


Figure 2.2 Eprouvette instrumentée

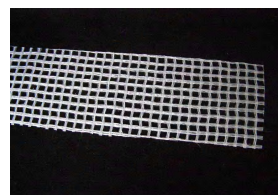
Une fois les couples contrainte – déformation calculés, on trace la courbe représentant les contraintes en fonction des déformations $\sigma=f(\epsilon)$.

Bien que ne représentant que très imparfaitement une déformation au sens mécanique, cette exploitation s'impose à nous, en tout cas dans un premier temps, afin de mener à bien des comparaisons valides et d'autant plus judicieuses que la fissuration sera « homogène ».

3-Confection des éprouvettes :

La préparation des éprouvettes se fait suivant les étapes ci-dessous :

- Préparation des moules : de dimension égale à celle des éprouvettes.
- Préparation des renforts textile: découper des morceaux de tissus de dimension 500x100mm.



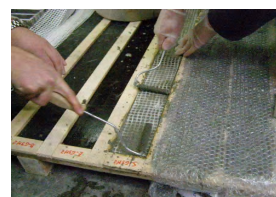
- Préparation du mortier.
- Mise en place de la première couche du mortier dans le moule.



- Mise de la première couche de tissus de renforts.



- Dérouler avec un dérouleur afin d'imprégner le tissu de mortier.



- Mettre une deuxième couche de mortier.



- Araser avec une taloche
- Mettre un film en plastique pour une meilleure cure.



4-Matériaux utilisés :

- **Matrices** : on a utilisé une matrice de type minérale : un mortier prêt à l'usage. ce mortier, qui est un mortier de réparation, il est constitué de :

- Liants hydrauliques.

- Résines de synthèse thixotrope.

- Charges de quartz.

- Fibres synthétiques.

Ces caractéristiques principales sont (tableau 4.1) :

Masse volumique 1.65kg/l

Teneur en chlore <0.01%

Granulométrie 0-0.8mm

La loi de comportement en traction du mortier est déduite à partir d'essais de traction sur trois éprouvettes différentes, où l'écart-type n'excède pas les 10% (figure 4.1).

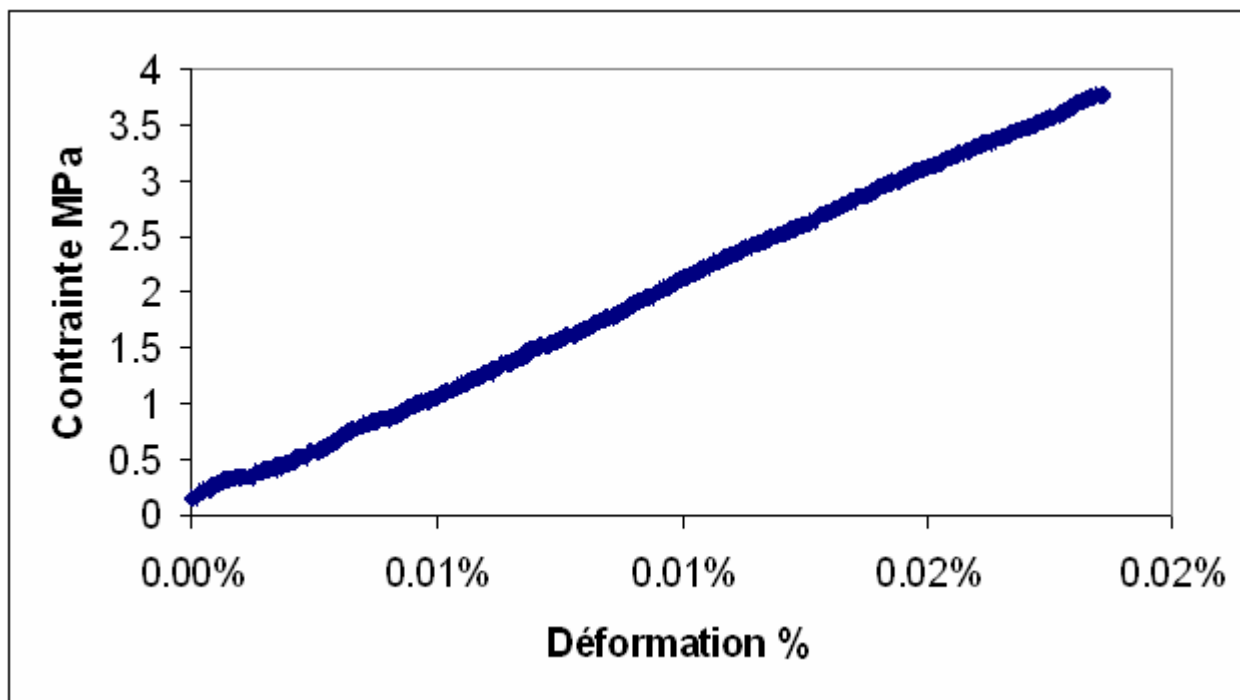


Figure 4.1 : Loi de comportement en traction et caractéristiques du mortier

Caractéristiques	mortier
Masse volumique Kg/l	1.65
Granulométrie mm	0-0.8
Volume eau l/Kg	1.157
Module de Young MPa	19105
ϵ_{u1} %	0.02
σ_{u1} MPa	3.77

Tableau 4.1. Caractéristiques du mortier utilisé.

- **Fibres :**

Pour les fibres de renforts, nous avons utilisés 4 types de fibres : Aramide, Basalte, verre E et le verre AR, afin d'étudié le comportement des différents types de fibre : organique (Aramide), minéraux (verre et basalte). Pour le verre on a choisi deux types de verre : le verre Alkali Résistant (AR) et le verre type E. Les caractéristiques de ces fibres sont résumées dans le tableau 4.2, ci-dessous :

Type de fibres	Aramide	Basalte	Verre AR	Verre E
Masse surfacique (g/m ²)	325	545	470	470
Couleur	Or	Brun brillant	Blanc	Blanc
Tex	1680	1680	1200	1200
Diamètres des filaments (µm)	12	13	17	17
Nombre filament par fil	4598	4598	1600	1600
Contrainte à la rupture d'un fil (MPa)	177,97	459,02	344,37	413,24
Déformation à Rupture %	4,5	3	3	3

Tableau 4.2 : Caractéristiques des fibres utilisées (Données fournisseur).

- **Résines d'imprégnation :**

On a utilisé deux types de résines d'imprégnation : l'époxy (polyépoxydes) et la synolite.

1. Les polyépoxydes : sont des résines therm durcissables présentant de bonnes propriétés mécaniques, une bonne tenue en température, un faible retrait.

Le terme exact est polyépoxyde mais il est admis de parler d'époxyde et, par abus de langage, d'époxy.

Caractérisation des composites fibres-ciment

Nous avons utilisé une résine époxy type **cycloaliphatiques**, qui a des propriétés mécaniques, électriques, et de résistance au vieillissement supérieures.

2. La synolite : la synolite est une résine de polyester insaturé de type orthophtalique, stabilisée au rayon UV, caractérisé par un faible retrait de polymérisation et une haute brillance après polymérisation.

5-Configurations retenues :

Afin de mieux connaître l'influence des différents paramètres et constituants du TRC, nous avons choisi de faire varier les paramètres suivants:

- Le type de tissu de renfort : Verre AR, Verre E, Basalte, Aramide, sachant que toute les fibres utilisées sont des unidirectionnelles.

- L'épaisseur du composite (5 ou 10mm).

- Le nombre de couches de tissu dans le composite (1, 2 ou 3).

- Avec imprégnation ou sans imprégnation des fibres et la nature de l'imprégnation : époxy, synolite.

Pour chaque configuration nous avons réalisé trois essais, et avons retenu comme résultat final la moyenne des trois essais, l'écart type n'excédant jamais les 10%.

Les configurations retenues sont résumés dans le tableau 5.1.





Renforts textiles				Matrices	
Matériaux de renfort	Géométrie du renfort	Nombre de couche	Imprégnation	Epaisseur du renfort (mm)	Types de matrice
Aramide 		1	sans	5/10	mortier
		2	sans	5/10	mortier
		3	sans	10	mortier
Basalte 		1	sans	5/10	mortier
		2	sans	5/10	mortier
		3	sans	10	mortier
Verre E 		1	sans	5/10	mortier
		2	sans	5/10	mortier
		3	avec époxy / avec synolite	10	mortier
Verre AR 		1	sans	5/10	mortier
		2	sans	5/10	mortier
		3	sans	10	mortier

Tableau 5.1 : Configuration d'essais retenue.

6-Résultats des essais de traction :

1. Analyse du graphe contrainte-déformation du TRC :

Toutes les courbes qu'on a tracées à partir des essais effectués, selon les configurations exposées, montrent d'une façon irrévocable que le composite fibres – ciment a un comportement tri-linéaire, similaire à celui du béton armé en traction, comme le montre la figure 5.1.1.

En outre, les principales caractéristiques qu'on a pu remarquer sont :

-Dans la première partie linéaire : pas de fissures apparentes mise à part les microfissures dues au retrait du mortier pendant sa cure.

Apparition de la première fissure une fois que la contrainte appliquée atteint la contrainte limite du mortier, et cette première fissure est souvent voisine des mors (mais dans la zone de mesure).

La rigidité du composite TRC est très comparable avec la rigidité du mortier seul, jusqu'à l'apparition de la première fissure, les filaments ne travaillent pas encore.

-Dans la deuxième partie linéaire : juste après l'apparition de la première fissure il s'en suit une apparition très rapide et « aléatoire » d'autres fissures. Cette apparition est accompagnée d'une chute brutale de la rigidité, due principalement à l'amorçage des fissures à travers la section des éprouvettes et à l'alignement progressif des fibres qui n'étaient pas parfaitement alignées lors de la mise en œuvre manuelle des éprouvettes.

-Dans la troisième partie : caractérisée par la fin de l'apparition de nouvelles fissures, augmentation de l'ouverture des fissures. Augmentation de la rigidité du composite et cela est dû à l'entrée en travail graduel des filaments. On remarque que cette rigidité est presque égale à la rigidité des fils. Cette différence entre les deux rigidités est due à l'influence de l'adhérence filaments – matrice et à l'adhérence filaments – filaments. La rupture intervient une fois qu'une fissure maîtresse se distingue par une ouverture plus importante que les autres fissures amorcées ; en général c'est la première fissure qui s'amorce dans la deuxième phase, près de la zone des mors.

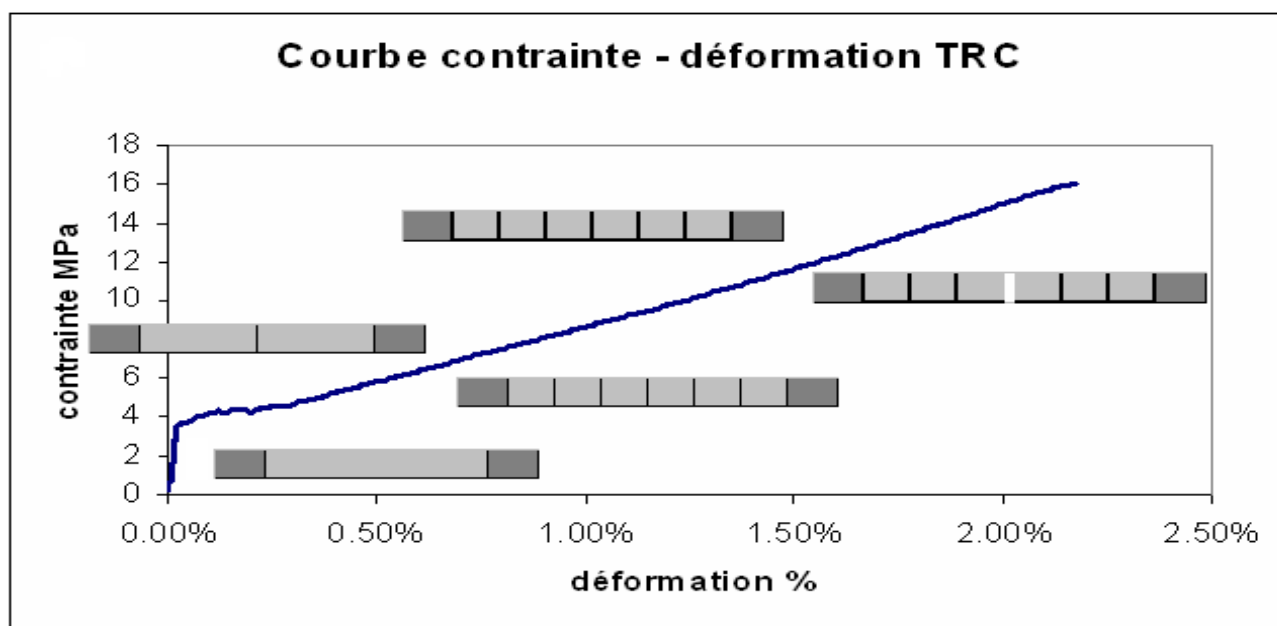


Figure 5.1.1 : loi de comportement du TRC (aramide) et de l'état de fissuration lors de l'essai.

2. Modes de rupture des éprouvettes :

Lors des essais de traction sur les éprouvettes de TRC, nous avons constaté que le comportement à la rupture été moins fragile par rapport aux éprouvettes sans renfort. avec une multiplication des microfissures, et nous avons remarqué aussi que la rupture dépendait étroitement de la nature des fibres utilisées comme renfort. Pour autant, il est difficile de se prononcer de manière tranchée et définitive quant aux modes de rupture obtenus. En effet, afin de cerner les modes de rupture plus finement il importe de recourir à un dispositif plus lourd avec notamment une caméra (en cours). Néanmoins quelques remarques et prudentes conclusions peuvent être dégagées à la lumière des observations visuelles, lesquelles seront confortées par un décompte du nombre de fissures et leurs espacements.

Les mesures effectuées sont résumés par le tableau 3.1 et la figure 3.1.

- **Fibres de verre :** Vue la faible ténacité des fibres de verre (type E, type AR), sachant que la ténacité est la faculté de pouvoir redistribuer l'effort sur le reste des filaments en cas de rupture d'une partie de filament, et qui permet au fil d'avoir une résistance suffisante à l'effort appliqué. La rupture constatée est une rupture par cassure brutale des fibres (Figure 5.2.1).



Figure 5.2.1 rupture des TRC à fibre de verre (E, AR).

- **Pour les fibres de basalte :** Rupture par délaminage au niveau des talents en aluminium (au niveau des mors) (Figure 5.2.2), qui peut être justifié par : i) la grande rigidité des fibres de basalte (15300 MPa), qui minimise le risque d'une rupture par cassure des fibres, ii) et à priori, la rupture par délaminage est due à une mauvaise adhérence des fibres de basalte au mortier.



Figure 5.2.2 rupture des TRC à fibre de basalte

- **Pour les fibres d'aramide :** rupture par glissement des fibres à l'intérieur de la matrice cimentaire accompagné d'une rupture des fibres, ce mode de rupture est justifié par : i) l'état de surface de ce type des fibres qui conditionne l'adhérence fibres – matrice, ii) ainsi que leur ténacité vis-à-vis d'une sollicitation de traction, et leur grande déformabilité.



Figure 5.2.3 rupture des TRC à fibre de verre (E, AR).

3. Détermination de l'influence des paramètres déterminants sur le comportement du TRC :

Le comportement du TRC est conditionné par plusieurs facteurs : épaisseur de la couche du renforts, le nombre de couche de textile, types de textiles utilisés...etc. Dans ce paragraphe nous allons définir d'une façon exacte l'influence de chaque paramètre.

➤ Influence de la nature du matériau (même nombre de couches) :

Afin de montrer l'influence de la nature des fibres sur le comportement mécanique du TRC, nous avons regroupé des résultats d'essais effectués sur des éprouvettes qui ont le même nombre de couche avec les différents types de renfort.

a/ Une couche :

Les résultats sont récapitulés dans le tableau 3.1 et la figure 3.1. On peut constater que les trois types de TRC ont le même comportement jusqu'à un niveau de contrainte égal à 3.2MPa, ce qui correspond à la limite élastique du mortier. Ensuite chaque type de TRC, adopte un comportement aléatoire. C'est le TRC à base d'aramide qui a la plus grande déformation ($\epsilon_{ult}=0.98\%$), ce qui peut être justifié par la grande déformabilité des fils d'aramide ($\epsilon_{ult}=4.5\%$). Le basalte a montré la meilleure tenue à l'effort de traction, avec une contrainte ultime égale à 5.42MPa.

	Déformation ultime %	Contrainte ultime MPa
Verre AR	0.02%	3.30
Basalte	0.67%	5.42
Aramide	0.98%	4.50
Verre E	0.93%	3.29

Tableau 3.1 Caractéristiques mécaniques des TRC à une couche testée.

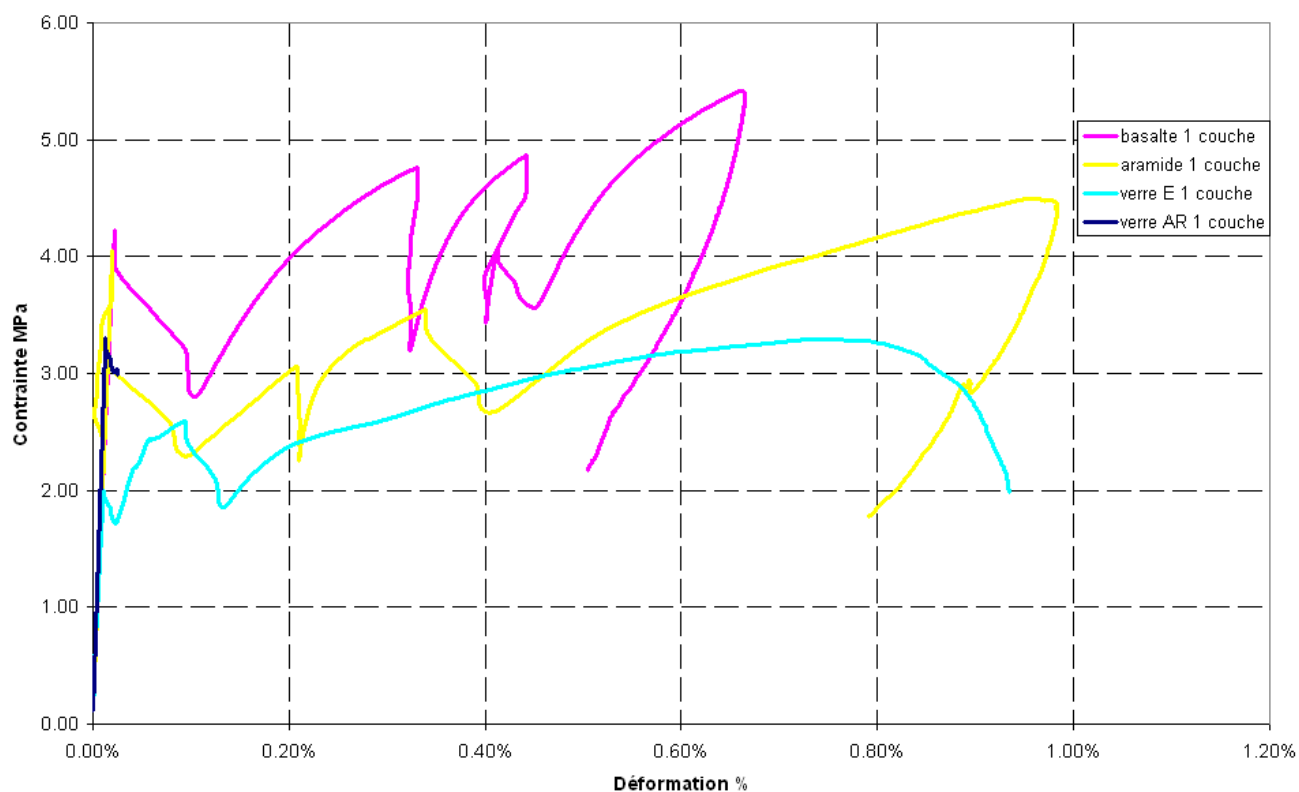


Figure 3.1 Loi de comportement des différentes configurations de TRC une couche de renfort.

b/ Deux couches de fibres :

Les lois de comportement des différentes configurations sont représentées dans la figure 3.2, et les résultats sont résumés dans le tableau 3.2 :

	Déformation ultime	Contraintes ultime MPa
Aramide 2 couches	1.86%	8.95
Basalte 2 couches	0.80%	9.65
Verre AR 2 couches	0.70%	7.41
Verre E 2 couches	0.90%	6.66

Tableau 3.2 Caractéristique mécaniques des TRC à deux couches.

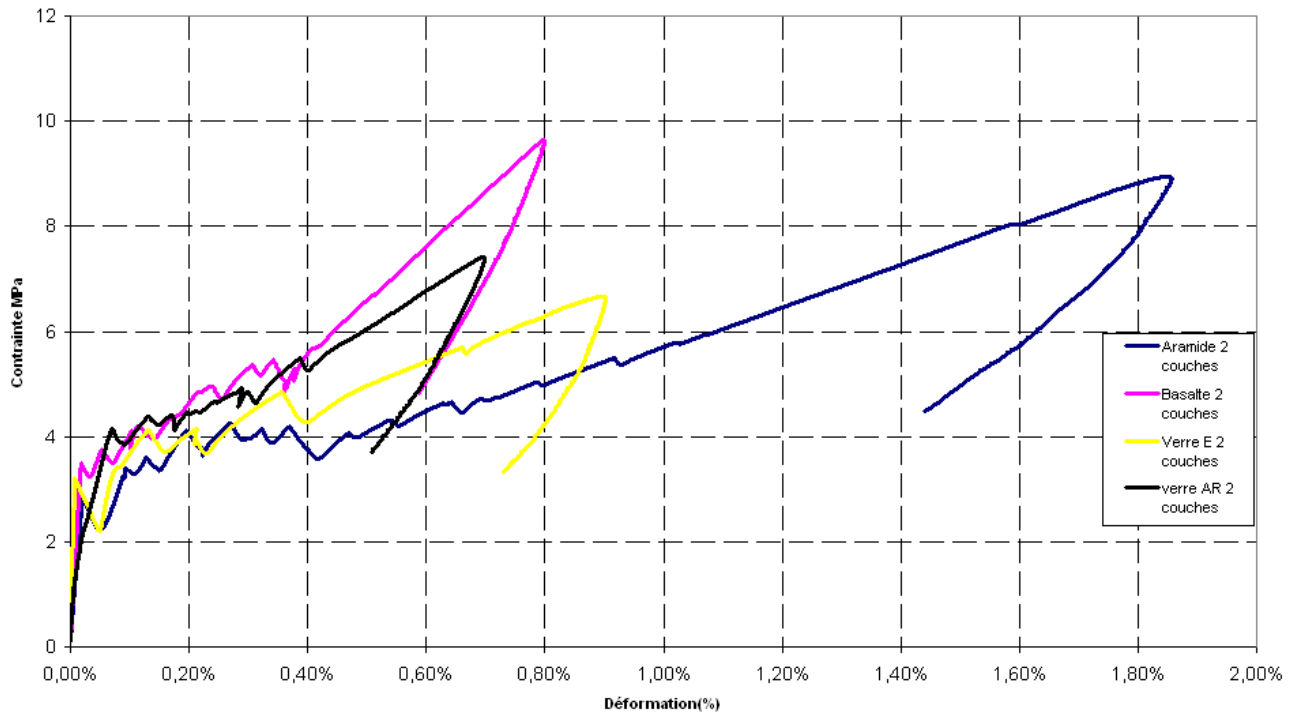


Figure 3.2 Loi de comportement des différentes configurations à 2 couches.

On remarque que pour les différentes configurations la loi de comportement adopte une allure tri linéaire, aussi il y a deux remarques très importantes qu'on peut noter. La première concerne la déformation enregistrée pour les différentes configurations, pour le basalte et le verre (AR et E), ils ont pratiquement la même déformation ultimes (0.90%), par contre pour l'aramide la déformation ultimes (1.86%), plus que le double de la déformation des autres types de fibre, ce qui peut être expliqué par la nature des fibres d'aramide, qui ont une grande déformabilité (une déformation ultime de 4.5%) par rapport aux autres fibres (une déformation ultime de 3%). La seconde remarque concerne la contrainte ultime, où on remarque que le basalte montre une meilleure résistance à la traction avec une contrainte ultime de 9.65MPa, ($\sigma_{\text{ultime fibre basalte}} = 459\text{MPa}$), l'aramide vient en deuxième position, légèrement devancé par le basalte (une différence de 0.7MPa), avec une contrainte ultime de 8.95, ($\sigma_{\text{ultime fibre aramide}} = 177\text{MPa}$). Cette différence peut être expliqué par le mode de transfert d'effort entre la matrice et les fibres : c'est-à-dire, bien qu'une fibre seule d'aramide résiste trois fois moins qu'une fibre de basalte, la résistance d'un TRC à base d'aramide est très proche de la résistance d'un TRC à base de basalte en terme de valeur, et ceci grâce à l'adhérence des fibres à la matrice, qui assure le transfert d'effort. L'aramide a donc une meilleure adhérence au mortier que le basalte.

c/Trois couches de renforts :

Le tableau 3.3 et le graphe 3.3 illustrent les résultats obtenus avec la disposition de 3 couches de renforts

	Déformation ultime	Contrainte ultime MPa
Aramide 3 couches	2.04%	14.93
Basalte 3 couches	0.65%	12.08
Verre AR 3 couches	0.96%	13.13

Tableau 3.3 Caractéristiques mécaniques des TRC à trois couches.

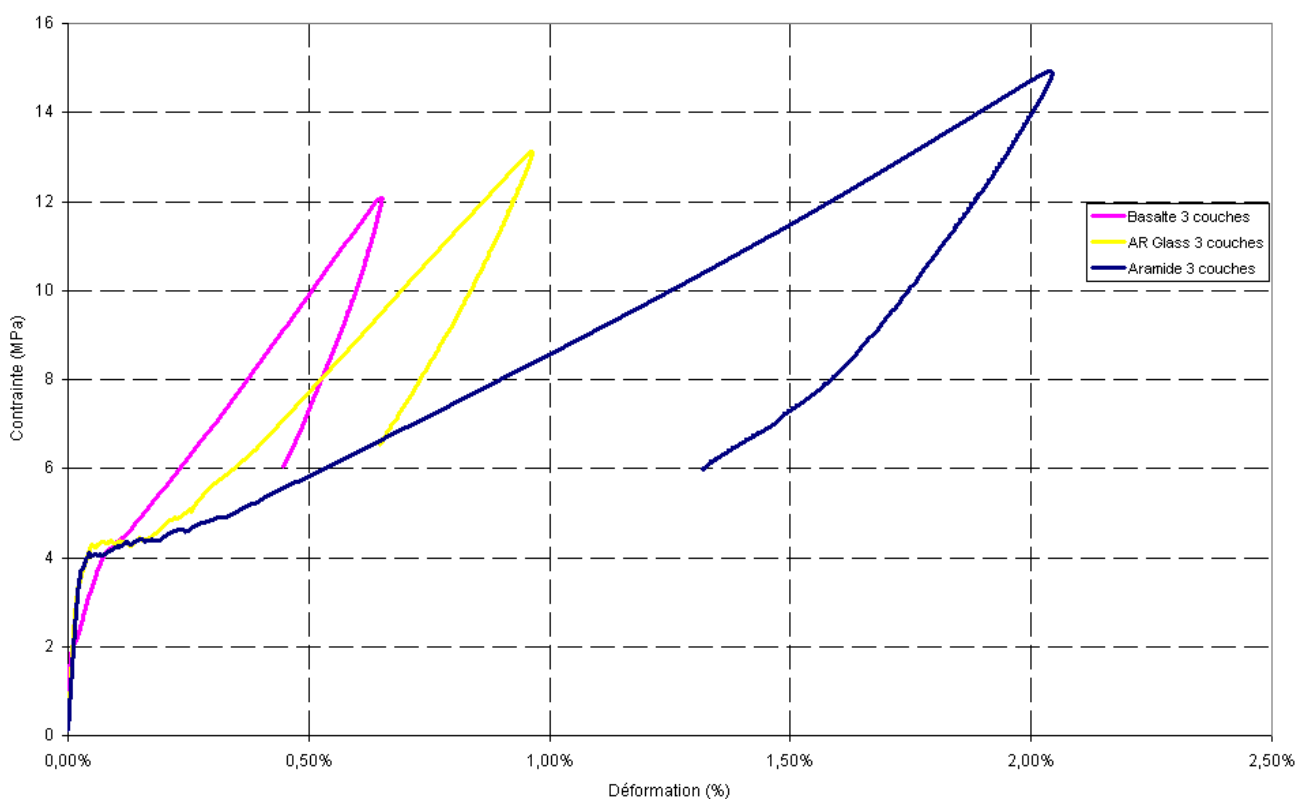


Figure 3.3 Loi de comportement des différentes configurations.

• **Commentaire :**

On constate que le TRC (trois couches) a le même comportement en traction que pour les deux couches. Par contre dans cet essai c'est l'aramide qui montre un meilleur comportement, en déformation ($\epsilon_{ult} = 2\%$) et en contrainte de traction ($\sigma_{ult} = 14.93 \text{ MPa}$), qui peut être expliqué, à priori, par une meilleure adhérence et un meilleur contact des fibres d'aramide au mortier en comparaison avec les autres fibres. L'adhérence fibre-matrice est conditionnée par l'armure textile des renforts et

la géométrie des ouvertures (mailles) du tissu de renfort, qui facilitent (ou empêchent) la pénétration du mortier et assure un meilleur transfert d'effort entre les fibres et le mortier.

Par ailleurs, pour la première phase linéaire. On remarque que les trois courbes se joignent, ce qui vérifie l'hypothèse que pour la première phase c'est le mortier seul qui travaille. De plus, on constate que la deuxième phase s'amorce pour un même niveau de charge, pour les trois courbes, ce niveau de chargement correspond à la limite élastique du mortier (± 4 MPa). Par contre, lors de cette deuxième phase, qui correspond à la phase d'amorçage des fissures, les trois types de TRC se distinguent par un comportement différent et qui dépend essentiellement du mode de fissuration, influencé lui-même par la déformabilité ou non des fibres utilisées dans chaque configuration.

C/ Taux de travail : Le taux de travail est le rapport entre la contrainte ultime de traction que le composite TRC peut reprendre et la contrainte ultime que peut supporter les fils seuls. Dans notre cas on considère 16 fils par couche, dont on somme leur rigidité, pour avoir la rigidité de l'ensemble, ce qui va nous permettre de calculer la contrainte que les 16 fils peuvent reprendre ensemble.

$$TT = \frac{\sigma_{ultimeTRC}}{\sigma_{ultimefibre}}, \text{ où } TT \text{ est le taux de travail.}$$

Les résultats sont présentés sur la figure 3.4

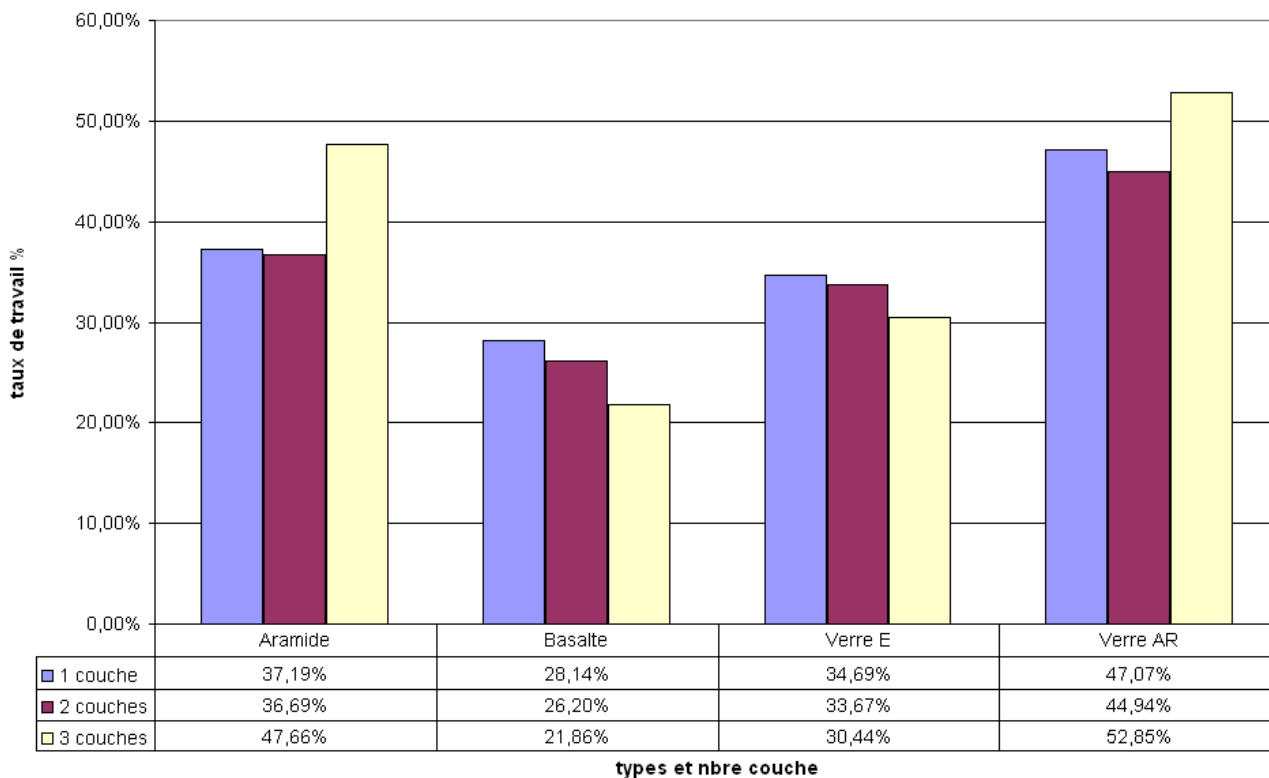


Figure 3.4 Taux de travail.

- **Conclusion :** De ce qui précède, on peut conclure que :

Le verre AR est celui qui a le meilleur taux de travail en contrainte (52% pour les trois couches). Cela peut être justifié par le fait que le verre AR dispose d'un état de surface (traitement par ensimage préalable) qui lui permet d'avoir un meilleur comportement chimique et mécanique (meilleure adhérence meilleur entre autre), vis-à-vis la matrice cimentaire. Les taux de travail du verre AR sont intimement influencés par l'armure textile qui conditionne la pénétration du mortier à travers les mailles du textile et, par conséquent la surface de contact fil - mortier. Par ailleurs l'aramide, par ses caractéristiques mécaniques optimales. Vient en deuxième position après le verre AR, du point de vue taux de travail, avec un taux égal à 47% pour trois couches de renfort disposées dans le TRC.

➤ **Influence du nombre de couches :**

Dans ce paragraphe nous allons mettre en évidence l'influence du nombre de couches textiles disposés sur le comportement du TRC, pour cela on va regrouper les résultats d'essais, pour une épaisseur donnée et un type de fibre donné, en faisant varier le nombre de couches.

- **Aramide :**

On notera pour cette configuration, que plus on augmente le nombre de couche plus on gagne en contrainte ultime et en déformation ultime (tableau 3.5, figure 3.5). Ainsi, on peut constater que lorsqu'on passe d'une couche à deux couche, on a respectivement 4.50, 8.95 MPa en contrainte ultime et 0.98, 1.86% en déformation ultime, la contrainte ultime évolue pratiquement linéairement pour atteindre, à trois couches de fibre, 14.93 MPa et 2.04 % en déformation.

	Déformation ultime%	Contrainte ultime MPa
Aramide 3 couches	2.04%	14.93
Aramide 2 couches	1.86%	8.95
Aramide 1 couche	0.98%	4.50

Tableau 3.5 Caractéristiques mécaniques des TRC à fibres d'aramide.

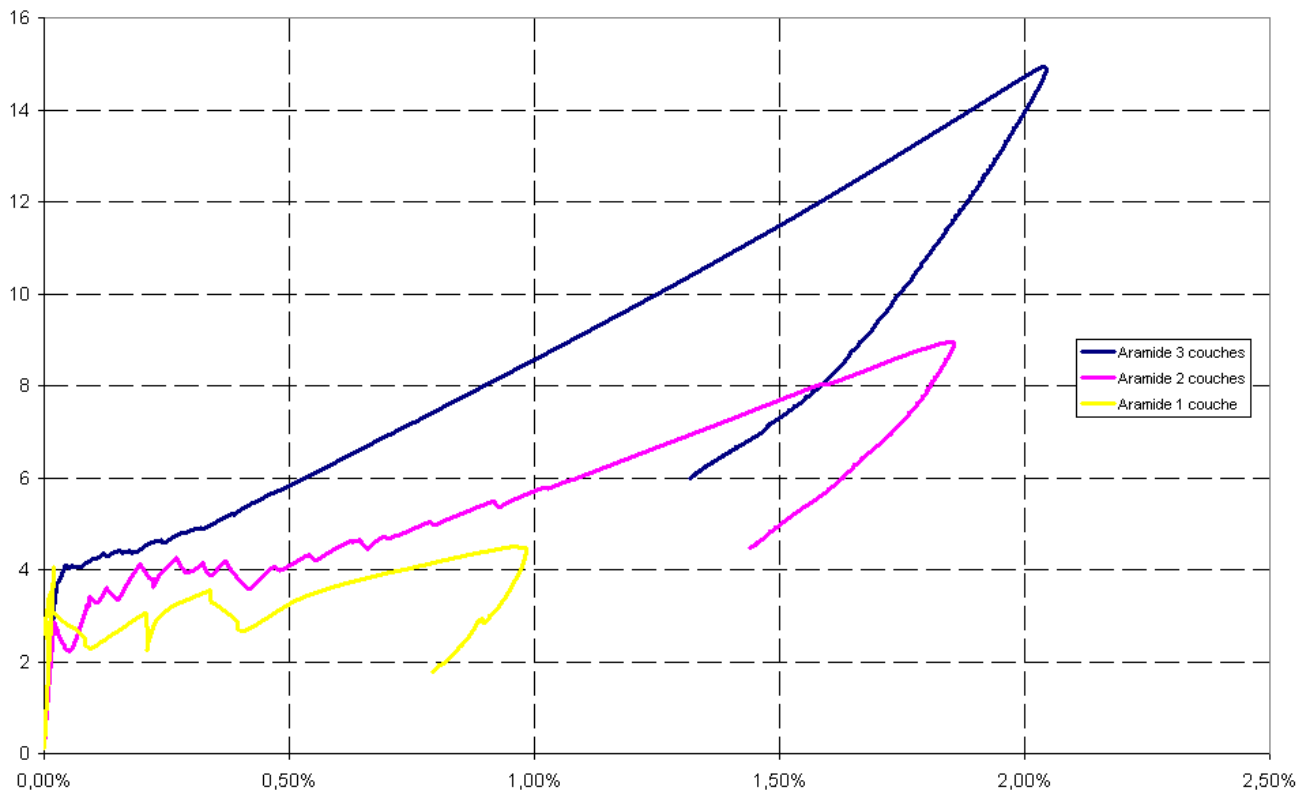


Figure 3.5 : Loïs de comportement des TRC à 1,2 et 3 couches d'aramide.



Figure 3.6 : Evolution de la contrainte ultime en fonction du nombre de couche.

- **Basalte :**

	Déformation %	Contrainte MPa
Basalte 1 couche 1cm	0.67%	5.42
Basalte 2 couches 1cm	1.30%	10.12
Basalte 3 couches	0.65%	12.08

Tableau 3.6 Caractéristiques mécaniques des TRC à fibres de basalte.

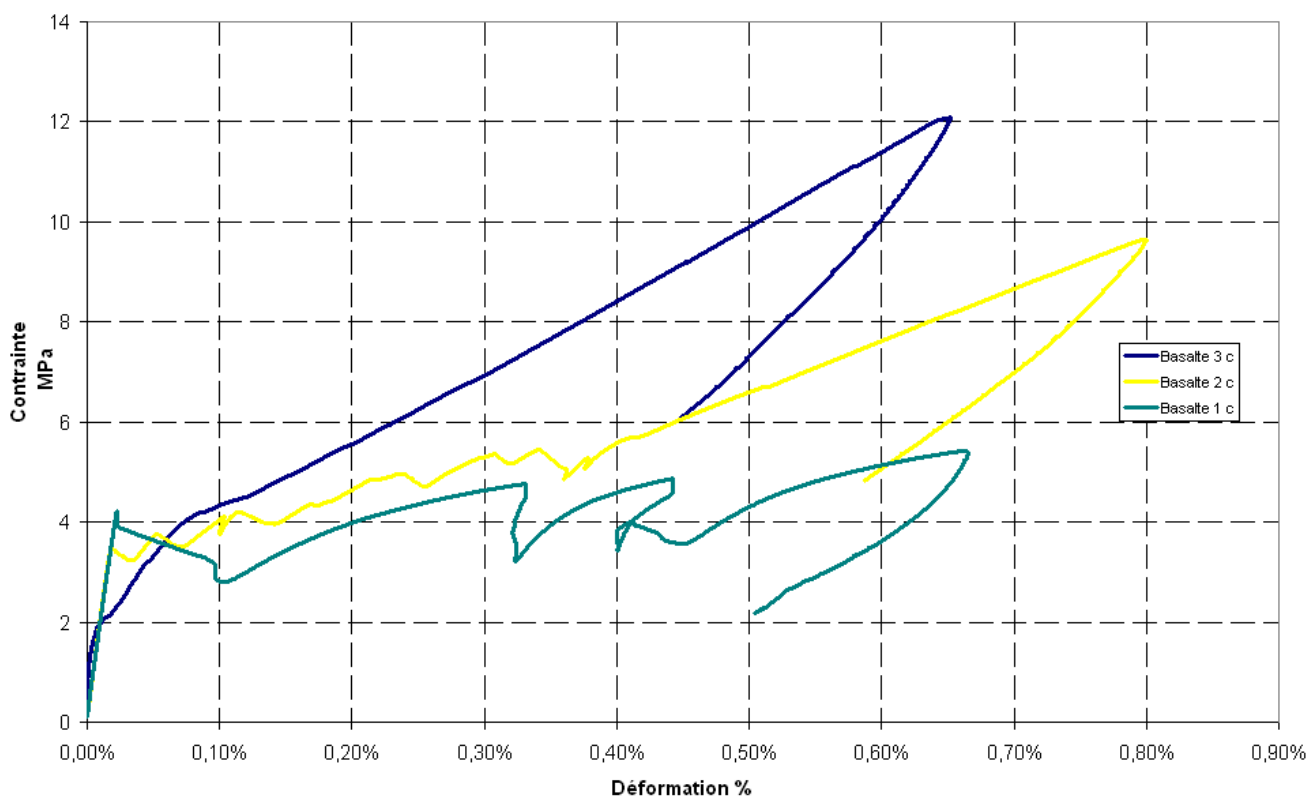


Figure 3.7 comportements du TRC (basalte : 1,2 et 3 couches).

- **Commentaire :**

Les TRC à base de Basalte ont le même comportement global que celui des TRC à base d'aramide (figure 3.7), sauf de point de vue fissuration. Le TRC à base de Basalte se fissure d'une façon plus brutale et la ruine intervient pour une déformation moindre, rapidement et selon une fissure maîtresse

proche des mors. Par ailleurs, nous avons constaté que la deuxième phase (phase de fissuration) est plus longue dans le cas des TRC à base d'aramide.

La déformation ultime du TRC (basalte) est maximale pour la configuration à deux couches (0.90%), alors que pour les configurations à trois couches et à une couche, elle est de 0.65% et 0.60% respectivement. La contrainte ultime, quant à elle, est max pour la configuration à 3 couches (12.08MPa), L'évolution de la contrainte en fonction du nombre de couche suit une allure linéaire ascendante comme le montre la figure 3.8.

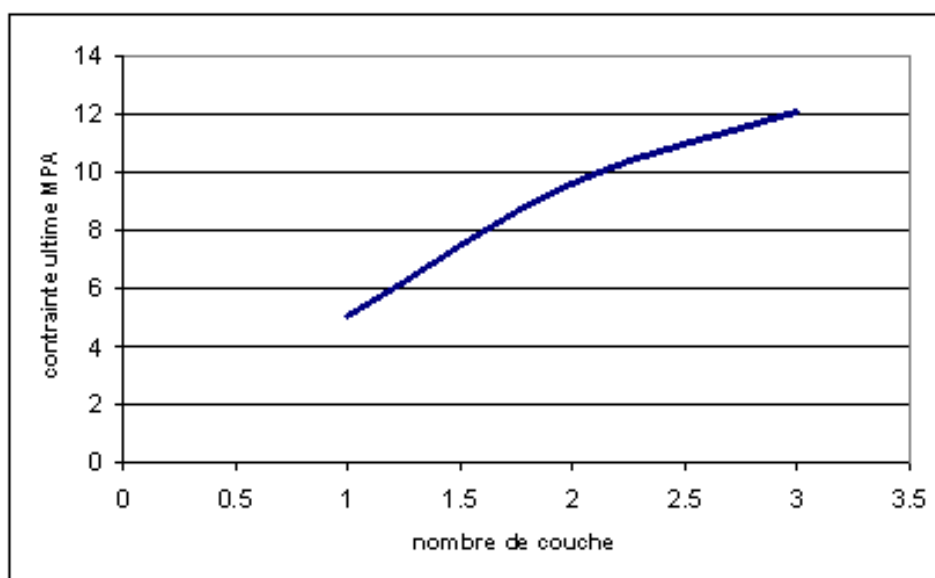


Figure 3.8 Evolution de la contrainte ultime en fonction du nombre de couche (basalte).

- **Verre AR :**

Les fibres de verre AR ont montré une grande capacité d'adaptation avec le mortier, au vue de leurs caractéristiques seul (par rapport à l'aramide et du basalte), et se qu'ils ont pu apporter au TRC, sauf dans le cas du TRC (verre AR) a une couche où l'apport est très médiocre et la résistance en traction du TRC atteint à peine la résistance du mortier seul (3.30MPa), alors qu'avec trois couches la résistance en traction du TRC atteint les 13.13MPa, ce qui n'est pas négligeable. En comparant avec le TRC à base de basalte qui a une résistance en traction de 12.08MPa, pour le même nombre de couche, alors que les caractéristiques mécaniques des fibres de basalte sont nettement supérieures à celles des fibres de verre AR.

	déformation %	contraintes MPa
Verre AR 1 C 1cm	0.02%	3.30
Verre AR 2 C 1cm	0.70%	7.41
Verre AR 3 C 1cm	0.96%	13.13

Tableau 3.7 Caractéristique mécaniques des TRC à fibres de Verre AR.

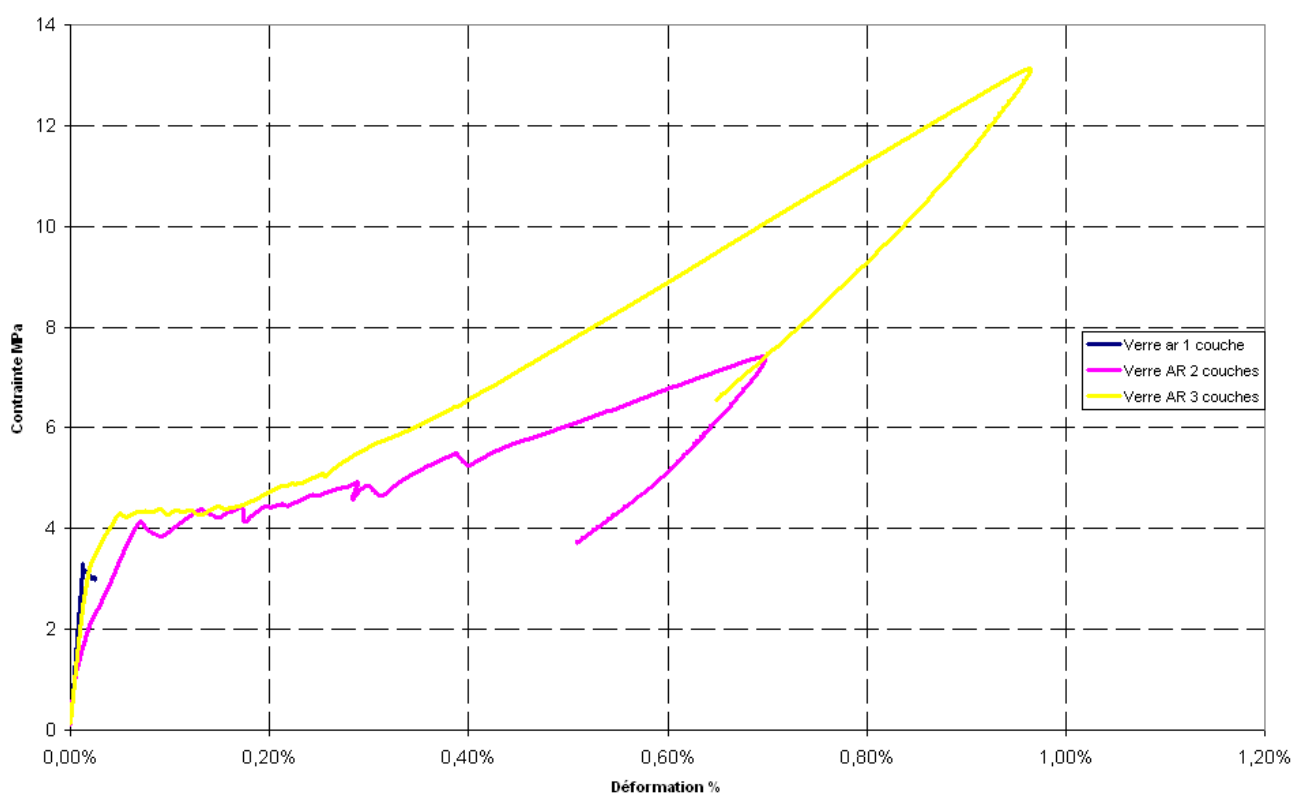


Figure 3.9 Comportements du TRC (Verre AR : 1,2 et 3 couches).

➤ **Influence de l'épaisseur du composite TRC :**

- **Aramide :**

Le graphe 3.10 (résultats récapitulés dans le tableau 3.8), nous permet de voir l'influence de l'épaisseur du TRC sur les caractéristiques mécaniques de ce dernier. En prenant l'exemple de l'aramide 1 couche, on passe d'une résistance en traction de 4.50MPa à 9.14MPa, pour des épaisseurs de 5 et 10mm, c'est-à-dire un gain en résistance de 100%, ceci peut être expliqué par une

division de la section du TRC en deux, l'effort étant repris par la moitié de la section de base, donc la contrainte à l'intérieur du TRC sera le double. L'effort repris par les deux configurations reste donc le même. Cela traduit bien le fait que c'est les fibres qui travaillent et reprennent la majeure partie de la charge appliquée. En diminuant la section du TRC, on diminue le taux volumique de la matrice et en contrepartie, on augmente le taux volumique des fibres. Ces remarques sont valables pour les autres configurations et les autres types de fibres, sauf pour le basalte. On notera qu'on a pas pu disposer plus de deux couches dans une épaisseur de 5mm.

	Déformation ultime %	Contrainte ultime MPa
Aramide 1 couche 5mm	2.23%	9.14
Aramide 2 couches 5mm	2.29%	19.18
Aramide 3 couches 1cm	2.04%	14.93
Aramide 1 couche 1cm	0.98%	4.50
Aramide 2 couches 1cm	1.86%	8.95

Tableau 3.8 Caractéristiques mécaniques des TRC à fibres d'aramide.

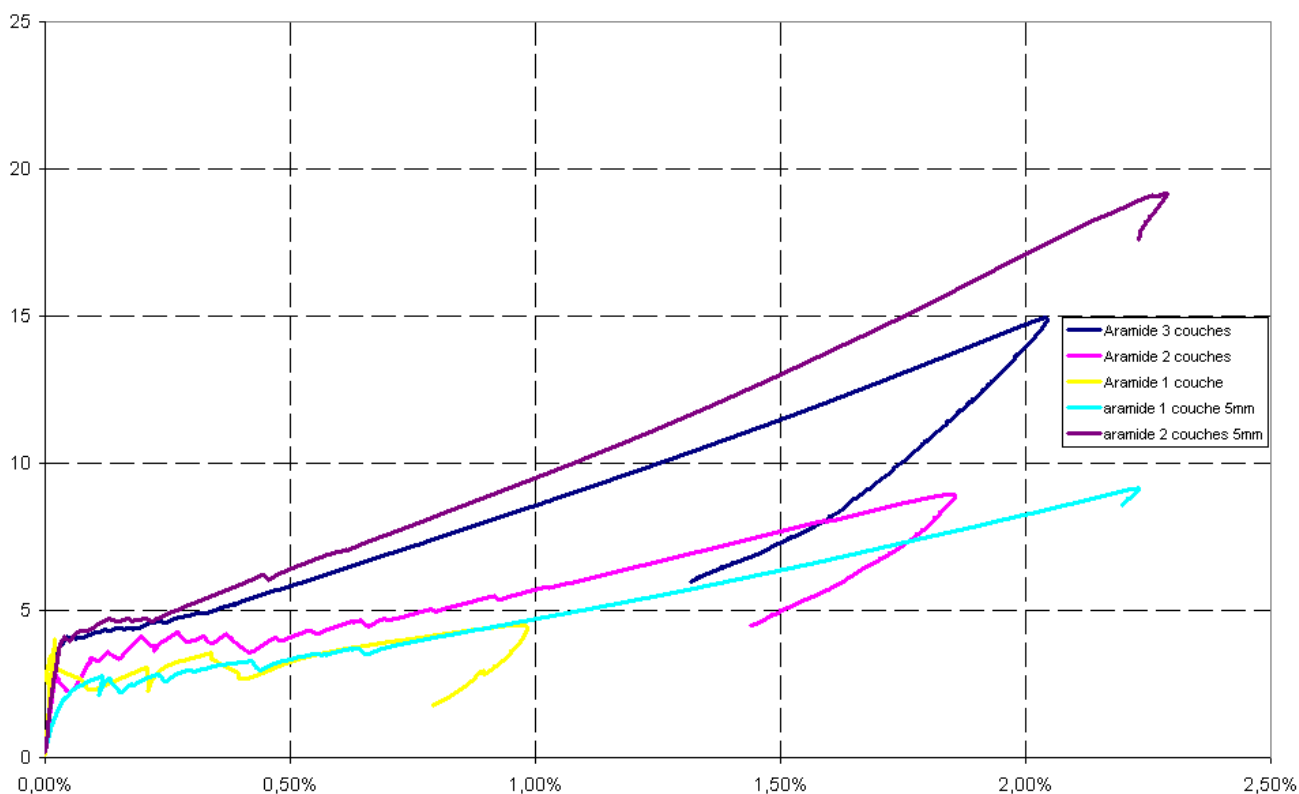


Figure 3.10 : Comportements du TRC à base d'aramide : 5 et 10 mm.

- **Basalte :**

On notera que le gain entre les configurations de 5mm et 1 cm dans la configuration une couche de renfort, n'est pas exactement de 100%, mais de 65%, figure 3.11 (récapitulatif des résultats tableau 3.9), et les résistances en traction des configurations 5mm et 1cm deux couches sont presque identiques (9.95MPa et 10.12MPa respectivement). Cela peut être expliqué par le fait qu'il y a d'autres facteurs qui conditionne la résistance entre les deux configurations, parmi lesquels figure l'adhérence. On a vu que l'état de surface du basalte, n'offre pas le meilleur comportement lorsqu'il est associé au mortier.

	déformations %	contraintes MPa
Basalte 1 couche 5mm	0.91%	8.96
Basalte 2 couche 5mm	2.43%	9.85
Basalte 1 couche 1cm	0.67%	5.42
Basalte 2 couches 1cm	1.30%	10.12
Basalte 3 couches 1 cm	0.65%	12.08

Tableau 3.9 Caractéristique mécaniques des TRC à fibres de basalte

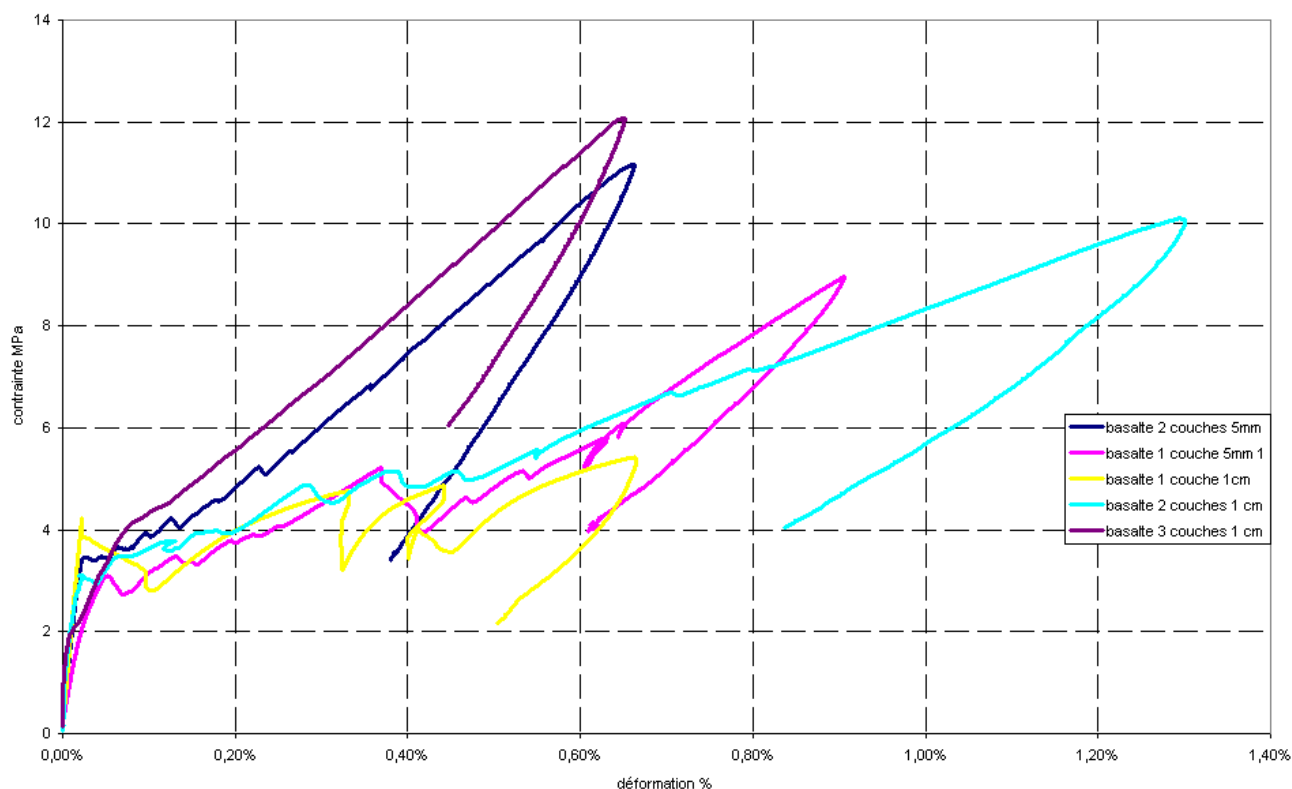


Figure 3.11 : Comportements du TRC à base de basalte : 5 et 10 mm.

- **Verre AR :**

Pour la déformation ultime, les résultats semblent aléatoires (tableau 3.10 ; figure 3.12). Entre les TRC 10 et 5mm on a un gain de 16% dans le cas des deux couches. Le taux de matrice dans le TRC influence la fissuration et par conséquent influence la déformation enregistrée par les capteurs, qui prennent en considération l'ouverture des fissures dans la déformation. Pour les contraintes on reste dans le contexte déjà vu dans le cas de l'aramide : la contrainte ultime double en divisant la section par deux, sans que l'effort qui provoque la rupture ne change, que se soit pour les 10mm ou bien les 5mm.

	Déformation ultime %	Contrainte ultime MPa
verre AR 1 C 5mm	0.75%	6.06
verre AR 2 C 5mm	0.81%	11.30
verre AR 1 C 1cm	0.02%	3.30
verre AR 2 C 1cm	0.70%	7.41
verre AR 3 C 1cm	0.96%	13.13

Tableau 3.10 Caractéristique mécaniques des TRC à fibres de verre AR

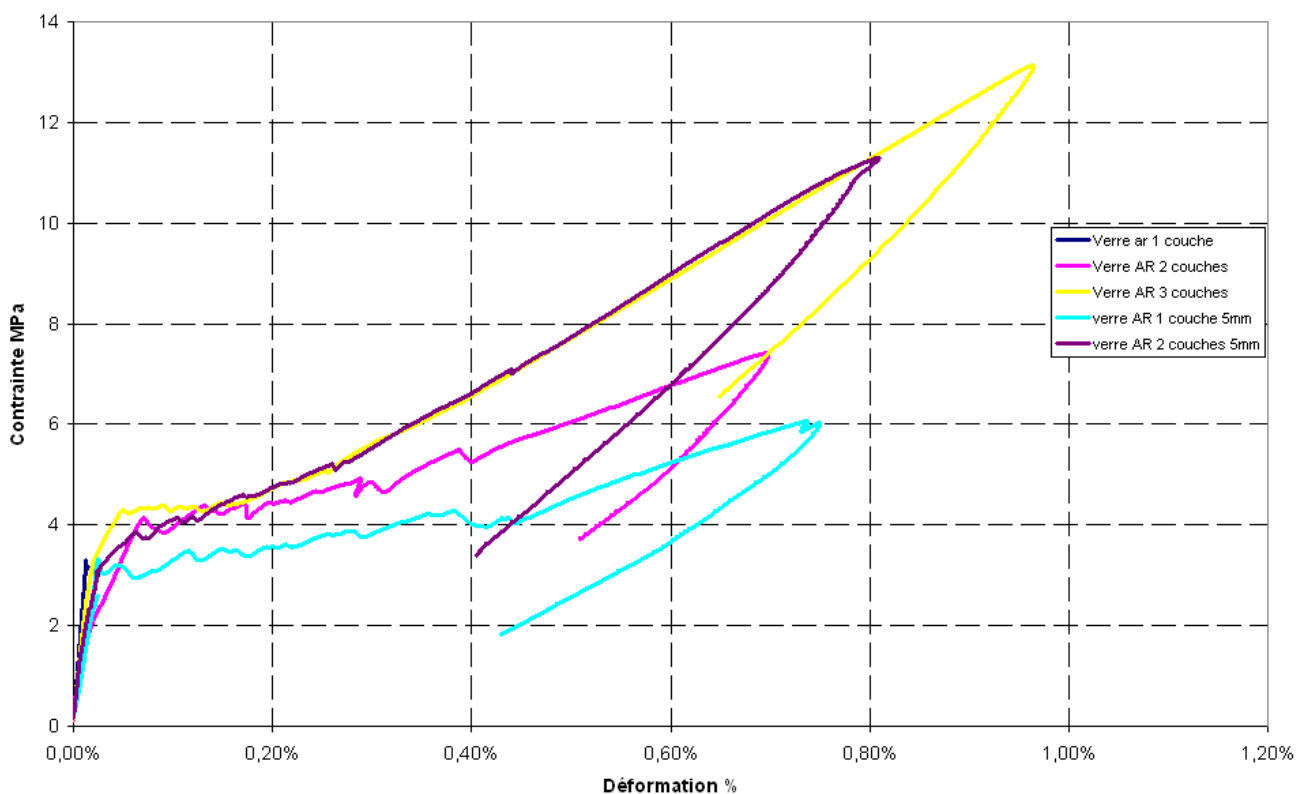


Figure 3.12 comportements du TRC à base de Verre AR : 5 et 10 mm.

- **Verre E :**

Les remarques déjà évoquées pour le verre AR sont valables ici, avec des valeurs de déformations ultimes et contraintes ultimes moins importantes que celle du verre AR (tableau 3.11 ; figure 3.13)

	Déformation ultime %	Contraintes ultime MPa
verre E 1 C 5mm	0.76%	7.01
verre E 2 C 5mm	0.59%	11.55
verre E 1 C 1cm	0.86%	3.29
verre E 2 C 1cm	0.90%	6.66

Tableau 3.11 Caractéristique mécaniques des TRC à fibres verre E.

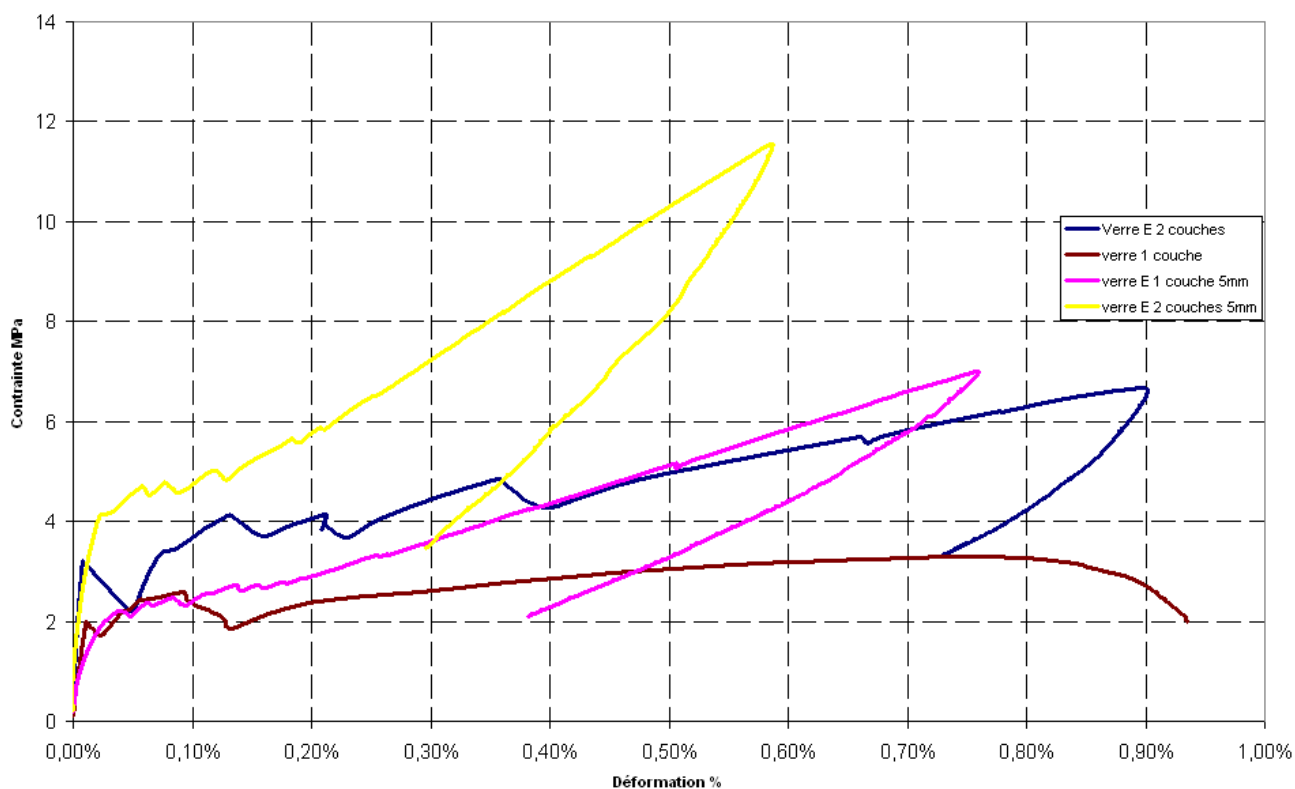


Figure 3.13 Comportements du TRC à base de Verre E : 5 et 10 mm.

➤ **Influence de l'imprégnation sur le comportement :**

Dans cette partie nous allons voir l'influence de l'adhérence fibres – matrice sur le comportement du TRC, à travers l'utilisation de résines d'imprégnation qui permettent d'augmenter le contact fibres – matrice, et par conséquent d'augmenter l'adhérence fibres – ciment. Nous avons opté pour les deux résines : Epoxyde et la Synolite.

	Déformation ultime %	Contrainte ultime MPa
Verre E 3 C N. Imprégné	1.63%	9.10
Verre E 3 C+ Synolite 40 Jours	0.72%	11.89
Verre E 3 C+ Synolite 15 Jours	0.33%	5.97
Verre E 3 C+époxy	0.85%	16.77

Tableau 3.13 Caractéristiques mécaniques des TRC à fibres imprégnées.

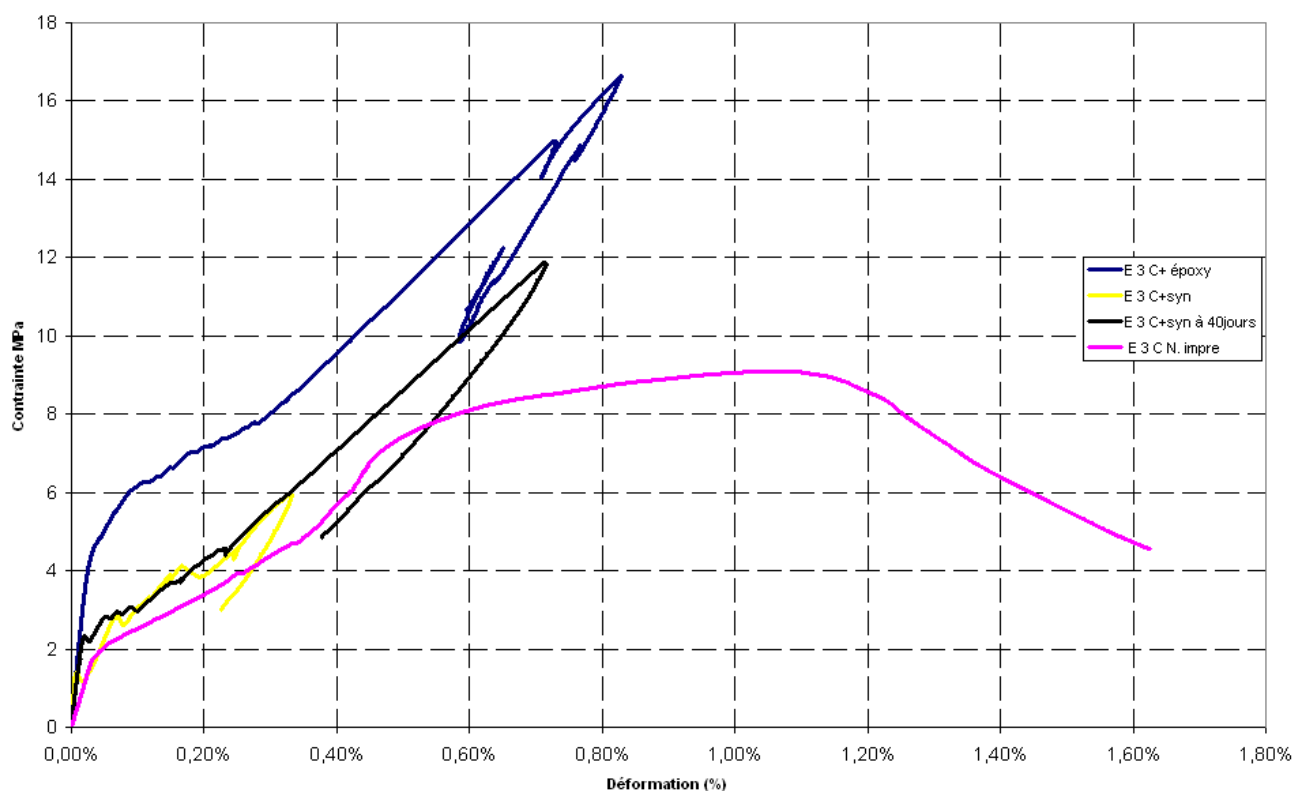


Figure 3.15 Comportement des TRC à fibres imprégnées.

On peut considérer deux niveaux de comparaison dans cette partie :

- i) Le type de l'imprégnation : nous constatons que l'application de l'époxy sur les fibres juste avant de les noyer dans le mortier nous permet d'avoir une résistance ultime en traction du TRC de 16.77MPa (tableau 3.13 ; figure 3.15), alors que l'utilisation de la synolite ne permet d'obtenir qu'une contrainte ultime de 5.97MPa.
- ii) La durée de cure de la résine : nous avons testé des éprouvettes qui contenaient des fibres imprégnés de synolite, à 15 et 40 jours. Les contraintes sont : 5.97MPa et 11.69MPa respectivement.

L'histogramme (figure 3.16), montre les gains en contraintes, exprimés en pourcentage, du TRC à renforts textiles pré imprégnés par rapport au TRC à renforts non imprégnés.

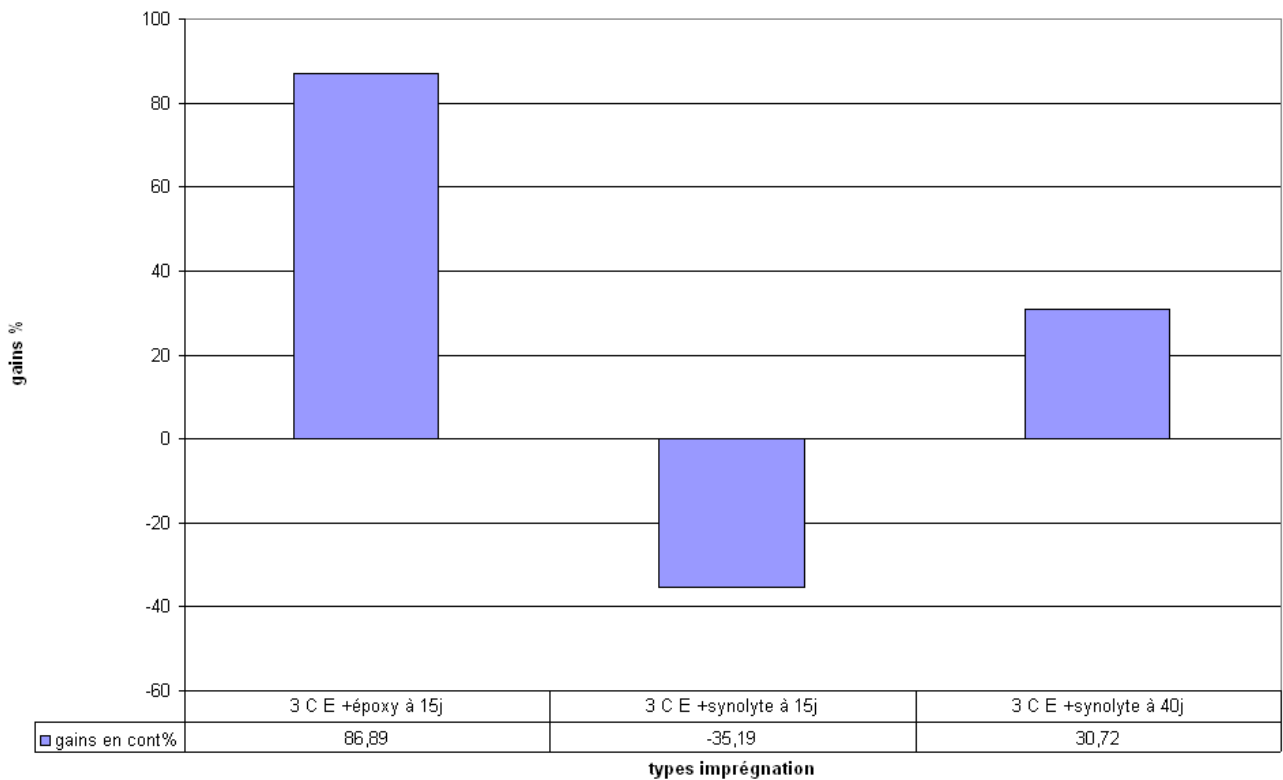


Figure 3.16 Gains de résistance par imprégnation du renfort Verre E

• **Commentaire :**

Pour les éprouvettes avec des fibres imprégnées d'époxy, les gains en résistance à la traction sont de l'ordre de 86% par rapport au composite TRC à fibres non imprégnés, et cela dès le quinzième jour de cure. Ceci est expliqué par le fait que la résine époxy a pénétrée dans les fibres et entre les filaments, ce qui permet d'avoir plus de contact filaments – filaments et filaments - mortier, donc

plus d'adhérence, ce qui influe positivement sur le mode de travail du TRC. Par ailleurs, pour les TRC à fibres imprégnées de synolite, on constate une perte de l'ordre de 35% en résistance par rapport au TRC à fibres non imprégnées au bout du quinzième jour de cure. D'autre part, pour une durée de cure plus importante (40 jours), on constate que le composite présente un gain en résistance de l'ordre de 30%. Cela peut être expliqué par le fait que la résine synolite n'a pas durci au bout de 15 jours (état visqueux), ce qui affecte l'adhérence et engendre un glissement des filaments les uns par rapport aux autres. Par conséquent on constate une diminution de la résistance du TRC. Au bout de 40 jours de cure, on enregistre un gain en contrainte de rupture de 30%, ce qui peut être expliqué par le fait que la résine a durci et offre une meilleure adhérence entre les fibres et le mortier, et un meilleur transfert d'efforts.

Pour les taux de travail du verre E, on constate que plus on augmente le nombre de couches, plus on perd en taux de travail (figure 3.17) ; ce qui peut être justifié par le fait que plus on augmente le taux des fibres dans le TRC, plus on a une densification des fibres, moins la pénétration du mortier entre les mailles du textiles est facile, ce qui diminue la surface de contact et par conséquent l'adhérence et ce qui affecte les performances du TRC. Par ailleurs l'utilisation d'une résine d'imprégnation telle que l'époxy, nous permet d'atteindre des taux doublés, que l'on peut expliquer aussi par le fait que la résine pénètre entre les filaments et permet ainsi à augmenter le nombre de filaments qui travaillent.

Caractérisation des composites fibres-ciment

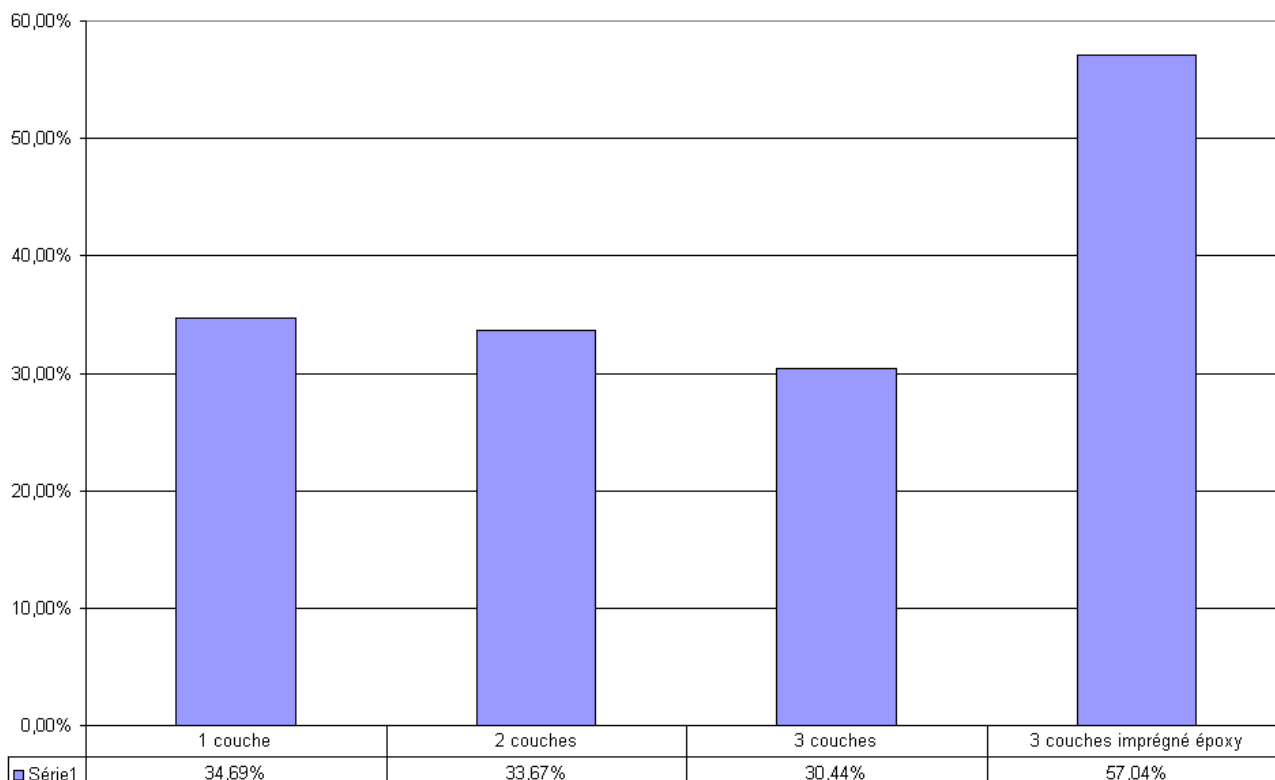


Figure 3.17 taux de travail du verre E

➤ Tableau récapitulatif :

Renforts deux couches	Contraintes ultimes MPa	Déformations ultimes	Gains en contrainte/1 couche %	Gains en déformation/1couche %
Aramide	8.88	1.86.10 ⁻³	100.9	86
Basalte	9.59	8.10 ⁻³	91.41	33.33
Verre E	6.6	9.02.10 ⁻³	85.39	-33.33
Verre AR	7.37	7.10 ⁻³	89.46	160.5
Renforts trois couches	Contraintes ultimes Mpa	Déformation ultimes %	Gains en contrainte/2 couches %	Gains en déformation/2couches %
Verre AR	13	9.62.10 ⁻³	76.4	37.42
Verre E + epoxy	16.6	8.27.10 ⁻³	151.51	- 8.31

Verre E + Synolite	5,83	3,31,10	- 11,36	- 63,30
Aramide	17,3	9,10	94,88	384
Basalte	12	6,44,10	25,13	-19,5

Tableau 3.14. Résultats des essais de caractérisation.

➤ **Les taux de travail des différents types de fibres :**



Les taux de travail des fibres « noyées » dans du mortier, nous permettent de constater le degré auquel les fibres associées à la matrice cimentaire travaillent par rapport à la capacité de résistance du renfort. Le tableau 3.15 récapitule nos résultats :

Type de renforts	Résistance sur 10cm d'une couche de fils	Résistance sur 10cm de deux couches de fils	Résistance sur 10cm de trois couches de fils	Résistance max du composite une couche renfort	Résistance max du composite deux couches renfort	Résistance max du composite trois couches renfort	Taux de travaux une couche renfort	Taux de travaux deux couches renfort	Taux de travaux trois couches renfort
Aramide	12,10	24,2	36,3	4,5	8,88	17,3	37,19 %	36,69 %	47,66 %
Basalte	18,30	36,6	54,9	5,15	9,59	12	28,14 %	26,20 %	21,86 %
Verre E	9,80	19,6	29,4	3,4	6,6	8,95	34,69 %	33,67 %	30,44 %
Verre AR	8,20	16,4	24,6	3,86	7,37	13	47,07 %	44,94 %	52,85 %

Tableau 3.15. Taux de travail des différents types de fibre.

L'histogramme de la figure 3.18 nous permet de voir d'une façon claire que les taux de travail sont les plus importants pour l'aramide et le verre AR, et plus on augmente le nombre de couches, pour ces derniers, plus les taux de travail sont importants. Au contraire, pour le verre E et le basalte, le taux de travail « chute » en augmentant le nombre de couche.

Une justification apparaît comme la plus logique, c'est que, pour le verre E et le basalte, plus on augmente le nombre de couches, plus on rend la pénétration du mortier entre les filaments difficile, générant moins de contacts filaments – mortier, par conséquent empêche les filaments de travailler.

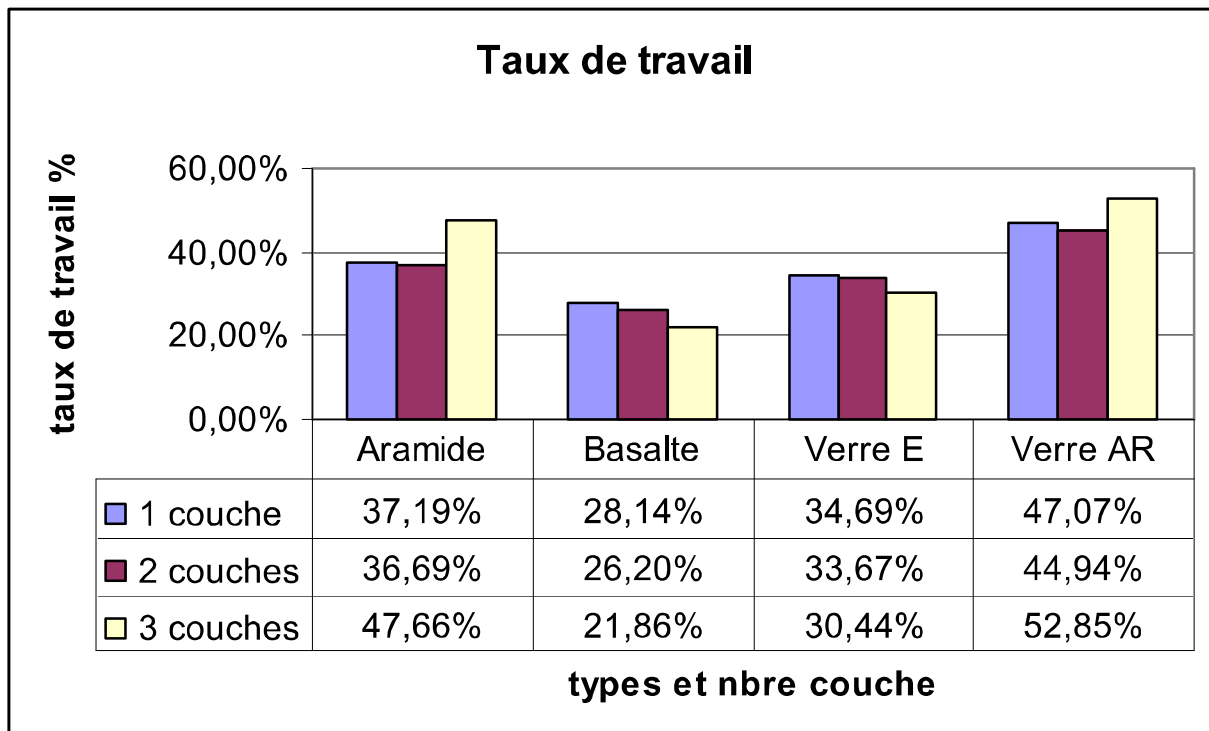


Figure 3.18 Taux de travail des différents types de fibre.

4-Etude de l'amorçage et de l'espacement des fissures :

L'étude de l'ouverture et de l'espacement des fissures est une étape très importante dans l'étude du comportement des matériaux composites. Lors de nos essais, nous avons pu relever manuellement l'espacement des fissures visibles à la rupture de certaines éprouvettes afin de faire une comparaison et de tirer des conclusions sur le comportement des TRC. Les résultats sont dans le tableau 4.1 :

L'écart - type nous permet de connaître le degré de représentativité de la moyenne par rapport aux lectures.

La figure 4.1 résume d'une façon synthétique l'espacement des fissures dans chaque type d'essais. Nous avons remarqué que pour les éprouvettes avec un renfort d'aramide et de basalte l'espacement est réduit par rapport aux éprouvettes avec un renfort de verre. Cela peut être expliqué par le fait qu'à partir d'un certain taux de fibres (aramide, basalte) le composite fibre – ciment est influencé par le mode de déformation des fibres et a un comportement multi fissurant, qui traduit la distribution homogène des contraintes à l'intérieur du composite.

Epaisseurs renforts	Types renforts	Nombre couches	Espacement moyen (cm)	Ecart-types
5mm	Aramide	1 couche	1,70	0,62
		2 couches	0,51	0,09
	Verre E	1 couche	1,22	0,49
		2 couches	1,40	0,43
	Basalte	1 couche	1,72	0,74
		2 couches	1,75	0,57
	Verre AR	1 couche	2,50	0,92
		2 couches	1,39	0,54
10mm	Aramide	1 couche	6,87	1,25
		2 couches	0,96	0,35
		3 couches	0,76	0,29
	Verre E	2 couches	1,85	0,39
		3 couches	1,97	0,49
	Basalte	1 couche	6,40	0,36
		2 couches	2,28	0,54
		3 couches	1,31	0,25
	Verre AR	2 couches	1,67	0,68
		3 couches	1,06	0,41

Tableau 4.1. Espacement des fissures pour les différents types de TRC.

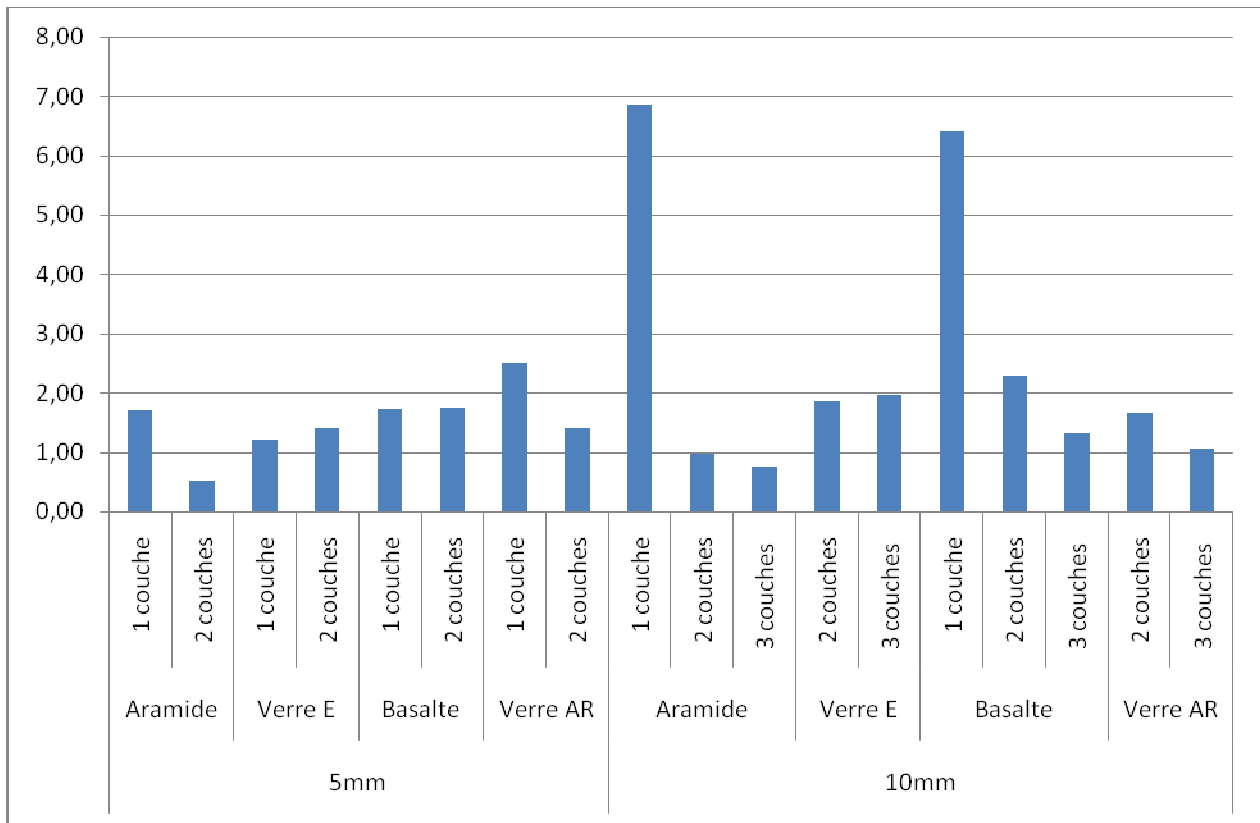


Figure 4.1 Espacement des fissures selon l'épaisseur et le type de renfort.

5-Estimation de l'adhérence filaments – mortier :

Le taux de travail des composite TRC est conditionné par l'adhérence filaments – mortier, caractérisée elle-même par la contrainte de cisaillement à l'interface fils – mortier, qui peut être déterminé par l'essai Pull – out ou bien à partir de la formule ci-dessous et des résultats obtenus dans le paragraphe précédent, on peut donner une estimation de cette contrainte :

$$\delta = \frac{V_m \cdot r \cdot \sigma_{mu}}{V_f \cdot 2 \cdot \tau}$$

Où V_m : taux volumique de la matrice, V_f : taux volumique des fibres, r : rayon de la fibre. τ : Contrainte de cisaillement à l'interface fibre – ciment, σ_{mu} : contrainte qui correspond à l'apparition de la première fissure.

Soit :

$$\tau = \frac{V_m \cdot r \cdot \sigma_{mu}}{V_f \cdot 2 \cdot \delta}$$

Nous allons utiliser cette formule pour le calcul de la contrainte de cisaillement fil - mortier des éprouvettes qui ont les écarts – types les plus faibles.

Les résultats sont répertoriés dans le tableau 5.1 :

Type fibres	Nbre couches	section du fil (m ²)	rayon de la fibre (m)	taux volumique fibres	taux volumique matrice	contrainte σ_{mu} (MPa)	espacement des fissures (cm)	contraintes de cisaillement (MPa)
Aramid e	2	3,33E-05	0,0032545	6,65%	93,35%	2,77	0,96	6.58
	3			9,98%	90,02%	3,91	0,76	7.55
Basalte	2	3,90E-05	0,00352425	7,81%	92,19%	3,47	2,28	3.16
	3			11,71%	88,29%	3,26	1,31	3.30
Verre AR	2	2,23E-05	0,00266494	4,65%	95,35%	4,08	1,67	6.68
	3			6,97%	93,03%	4,28	1,06	7.18

Tableau 5.1. Contraintes de cisaillement à l'interface fibres- ciment.

D'après le tableau ci-dessus, on constate que la contrainte de cisaillement fibre -mortier est quasiment doublée pour l'aramide et le verre AR, par rapport au basalte, chose qui peut être justifiée par le fait que la pénétration du mortier entre les filaments de l'aramide et du verre AR est la meilleure. Cela permet d'avoir une grande surface de contact entre les filaments et le mortier et par voie de conséquence, une meilleure adhérence.

7-Conclusion:

A travers cette étude de caractérisation du composite TRC, conçu selon plusieurs configurations, nous avons pu relever les conclusions suivantes :

-Quelque soit le type de fibre utilisée, la loi de comportement du TRC est de type tri linéaire (trois phases).

-Les trois phases qui caractérisent le comportement des TRC sont :

a/ Phase linéaire élastique : où le mortier reprend l'effort appliqué au TRC, jusqu'à ce qu'il est atteint sa limite élastique.

b/Phase non linéaire : qu'on peut résumer en deux partie ; une première partie où le processus d'amorçage des fissures est enclenché une fois la limite élastique du mortier atteinte. Dans notre cas elle est de l'ordre de 4MPa. On peut noter aussi que plus de 90% des fissures finales et visibles sont

amorçées à cette étape. L'ouverture des fissures est accompagnée d'une chute brutale de la rigidité du TRC. Une deuxième partie est à considérer : c'est la partie où les fibres entre en phase de travail, et cela est dû essentiellement à l'ouverture des fissures, qui permettent entre autre d'aligner les fibres qui ne l'été pas et de permettre leur entrée en travail.

-L'amorçage des fissures et leur propagation dans les TRC sont influencés, principalement par trois paramètres : i) Diamètre des filaments, ii) contact fil-mortier, iii) niveau de déformation des fibres utilisées.

- Plus la section du fil est importante, plus le taux de travail est important, car la section du fil influence directement la section de contact. De plus, nous avons noté que plus le diamètre est petit, plus le réseau de fissures étaient dense et les ouvertures restreintes.

-Pour les fibres de verre, nous avons remarqué que pour un même diamètre de fils (5.3mm), le taux de travail diffère. Cela nous permet de trancher quant au rôle que l'adhérence joue dans le taux de travail des fibres.

-Le TRC (aramide 3 couches) à montré le meilleur comportement en traction par rapport aux autres types de fibres, avec une contrainte ultime, pour une épaisseur de renfort de 1cm, égale à 14.93MPa et une déformation ultime égale à 0.93%.

-L'application de la résine époxyde sur les fibres nous permet d'avoir des gains de résistance à l'effort de traction de l'ordre de 86%.

-Le taux de travail des fibres de verre AR trois couches est de l'ordre de 52% et pour l'aramide trois couches il est de l'ordre de 47%. On peut dire que le verre présente le meilleur taux de travail parmi tous les types de fibres testés.

-Enfin le composite multi fissurant TRC à fibres d'aramide, prouve qu'il a la faculté de bien amorcé la charge appliquée et de la répartir le long de la section.

De ce qui précède, nous pouvons conclure que l'aramide est la fibre qui correspond le mieux à une application pour le renforcement de poutres sujettes à la flexion simple, donc nous allons utiliser un TRC d'épaisseur 1cm, avec trois couches d'aramide imprégnés de résine type époxyde.

Application : Renforcement de poutres soumises à la flexion simple par des plaques composite.

L'utilisation du composite pour le renforcement et la réparation des structures du génie civil connaît un essor important ces dernières années, aux vues des avantages qu'offre ce type de réparation sur le plan de la mise en œuvre comme sur le plan des gains de résistance.

Selon la sollicitation appliquée le composite peut être optimisé pour reprendre les contraintes dues à l'effort tranchant ou bien dû au moment fléchissant suivant des dispositions différentes.

Chapitre quatre : Essais sur éléments structuraux sollicités en flexion simple.

1-Etude expérimentale de poutres renforcées par du TRC en flexion simple :

Dans cette partie nous allons tester 3 poutres en béton armé renforcées par du TRC, en flexion à 4 points. Dans chaque poutre nous allons utiliser un type de renforcement. Les résultats de ces essais, seront confrontés avec les résultats d'un calcul analytique qu'on fera par la suite.

1-1- Définition des corps d'épreuves :

Les poutres béton armé qu'on utilise ont la particularité d'être sous-armées dans le sens longitudinale, afin d'atteindre rapidement la phase de plastification des aciers. Elles sont surarmées dans le sens transversal afin de ne pas avoir une rupture par dépassement d'effort tranchant. Ainsi ce mode de ferrailage engendre une rupture due en premier à la plastification des barres longitudinales, ensuite par écrasement du béton dans la partie comprimée de la section des poutres.

1-1-1-Géométrie des corps d'épreuve :

Les éprouvettes sont des poutres de 2m30 de longueur, de hauteur 28 cm et de largeur 15cm, dont le figure 1. La portée entre appuis extrême est de 2m et une portée entre appuis centraux de 67cm.

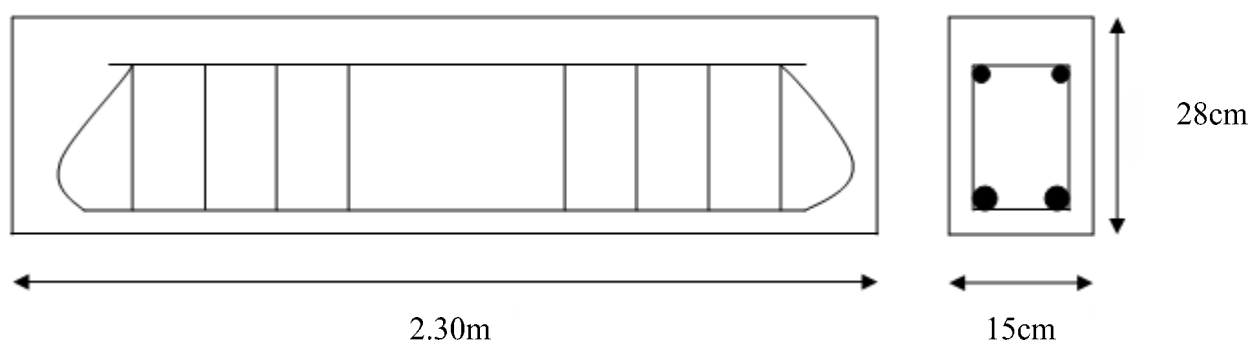


Figure 1 : Corps d'épreuve.

1-1-2-Mode de renforcement :

Le renforcement des trois poutres ce fait à l'intrados de ces dernières, en disposant une couche de TRC d'épaisseur 1cm, sur une longueur centrée de 1m80 et une largeur de 10cm. On utilisera comme renforts : un TRC de trois couches d'aramide imprégnés de colle époxyde, un TRC de trois couches d'aramide imprégnés de colle époxyde + 2 joncs de carbone (figure 2).

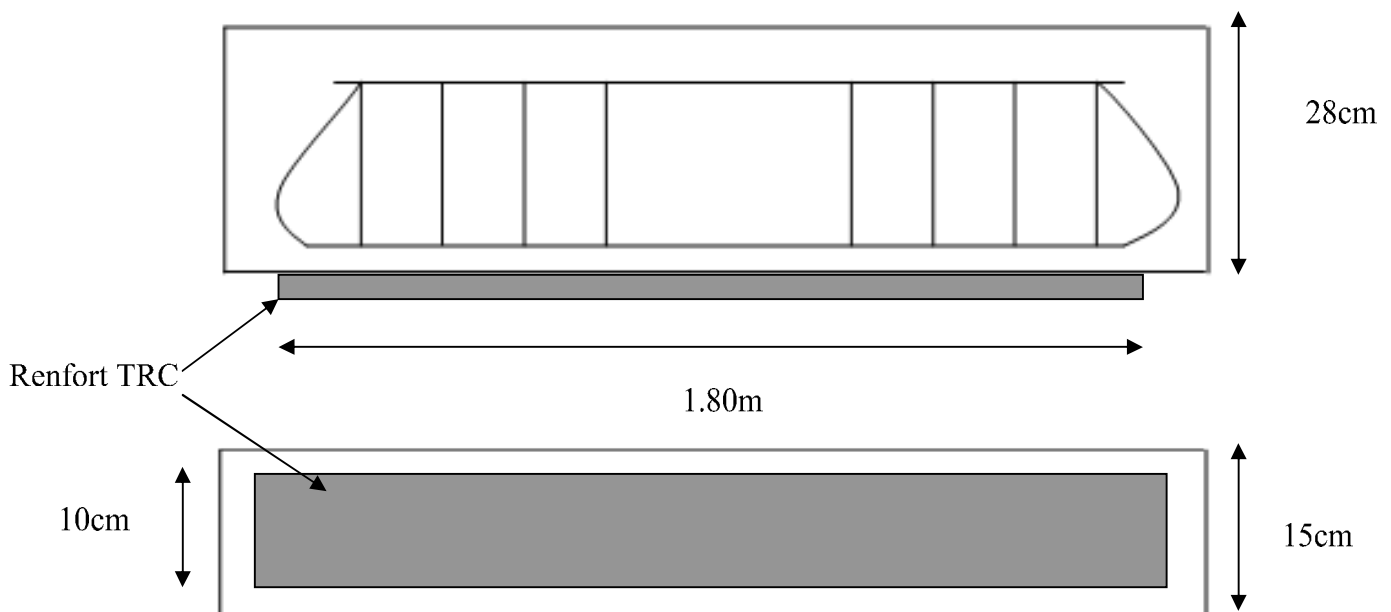


Figure 2 : Renforcement d'une poutre à l'intrados par une plaque de TRC.

1-2- Caractéristiques des matériaux :

1-2-a-Béton :

Dosage et propriétés mécaniques du béton

Ciment CPA 52,5 (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	Sable roulé 0/4 (kg/m ³)	Gravier roulé 10/20 (kg/m ³)
350	192	850	1020

Les propriétés mécaniques du béton sont les suivantes :

- Résistance moyenne en compression uni axiale: $f_{cm} = 31.28$ MPa (3 éprouvettes)
- Résistance moyenne en traction uni axiale : $f_{tm} = 0,6+0,06 \cdot \sqrt{f_{cm}} = 2.47$ MPa (méthode BAEL91)

1-2-b-Armatures :

Les caractéristiques mécaniques des armatures longitudinales utilisées sont les suivantes :

HA12 :

- Limite d'élasticité: $f_y = 400$ MPa (Donnée fabricant)
- Module d'Young : $E_s = 210$ GPa (Donnée fabricant)

1-2-c-Matériaux de renforcement :

On a opté pour l'aramide comme tissu de renfort pour les qualités mécaniques qu'il offre par rapport aux autres types de renforts. Ce type de fibres sera associé dans un second temps à des joncs de carbone. Le tableau ci-dessous résume leurs caractéristiques :

Types+nbre de couches	Module de Young E 1 couche (MPa)	Contraintes max d'un fil (N/mm ²)	Nbres filaments par fil	Nbres fils par couches de 10 cm de largeur	sections des fils	Taux volumiques des fibres couche 10mm	Résistance à la traction (Mpa)	Module de Young (Mpa)
Aramide 1	63 217	178	4598	16	3.33E-05	3.33%	27.76	21375
Aramide 2				32	6.65E-05	6.65%		
Aramide 3				48	9.98E-05	9.98%		

Tableau 1.2.1 Caractéristiques des fibres d'aramide et du TRC.

Caractéristiques	Valeurs
Diamètre nominal	7,5 mm
Poids linéaire	72 g ± 5%
Section minimale garantie	44 mm ²
Section des fibres	26 mm ²
Résistance en traction moyenne	2300 MPa
Module d'élasticité en traction moyen	130 GPa
Résistance en traction caractéristique	1800 MPa
Déformation ultime moyenne	1,8 %

Tableau 1.2.2. Caractéristiques des joncs de carbone.

1-3-Préparation des poutres renforcées :

Après avoir coulé et laisser durcir les poutres pendant plus de 28 jours, on applique le renforcement TRC de la manière suivante :

Caractérisation des composites fibres-ciment

- Sablage de l'intrados des poutres.
- Mettre un cadre en baguettes de bois qui servira de moule pour le TRC de dimension 1800x100x10 mm.

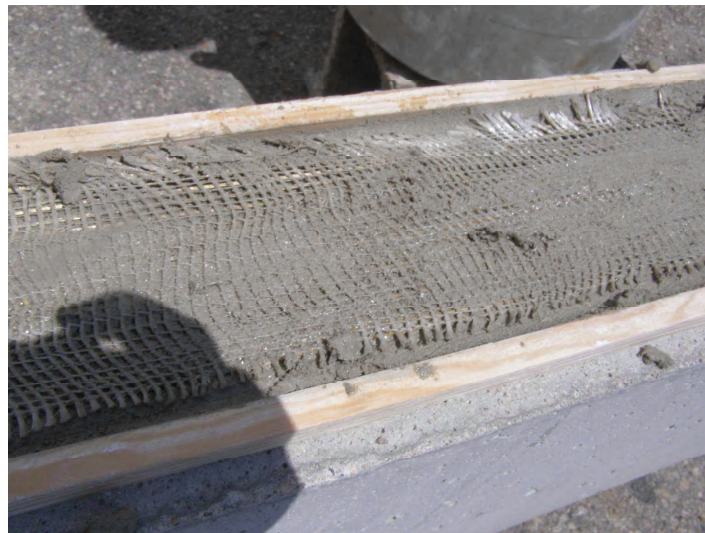


- On applique la première couche de mortier d'épaisseur 3mm.



- On dispose la première couche de fibre unidirectionnelle d'aramide imprégné d'époxy, puis une deuxième couche mortier de 3mm et ainsi de suite jusqu'à la troisième couche de fibre.

Caractérisation des composites fibres-ciment



- On arase avec une truelle les bordures du moule et on dispose le tissu drainant.



Caractérisation des composites fibres-ciment

- On met une bande d'un tissu drainant qui assurera la bonne répartition de l'air sur toute la surface.



- On met le film en poly - éthane et on l'accroche avec du mastic sur les bords de la poutre de telle sorte que l'étanchéité soit parfaite.



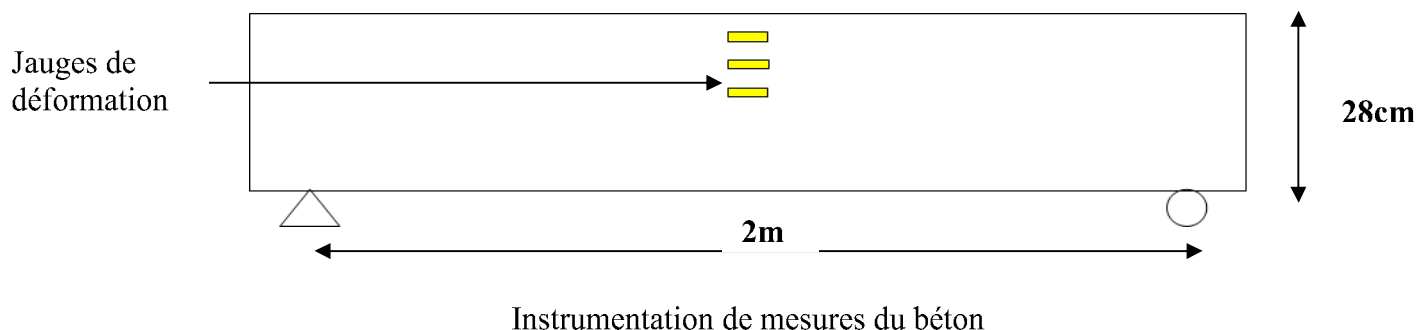
- On branche la pompe à vide, qui va assurer une cure sous vide, et va entre autre augmenter l'adhérence mortier – ancien béton.



Après un mois de cure, l'application de cette technique de collage s'est avérée défectueuse, et la plaque de TRC s'est détachée du substrat, donc nous avons eu recours à la technique de collage avec une résine époxyde.

1-4-Instrumentation des poutres :

Il y a deux niveaux d'instrumentation de mesure qu'on utilisera dans nos essais (figure 1.4): i) Instrumentation des barres d'aciers et qui va être noyée dans le béton ; se sont des jauges de déformation placées à mi-travée sur les barres longitudinales, ii) Instrumentation superficielle du béton : on collera trois jauges de déformation à mi-travée sur la partie comprimée du béton, tout les 3 cm et on mettra aussi une autre jauge de déformation sur la couche de renfort TRC.



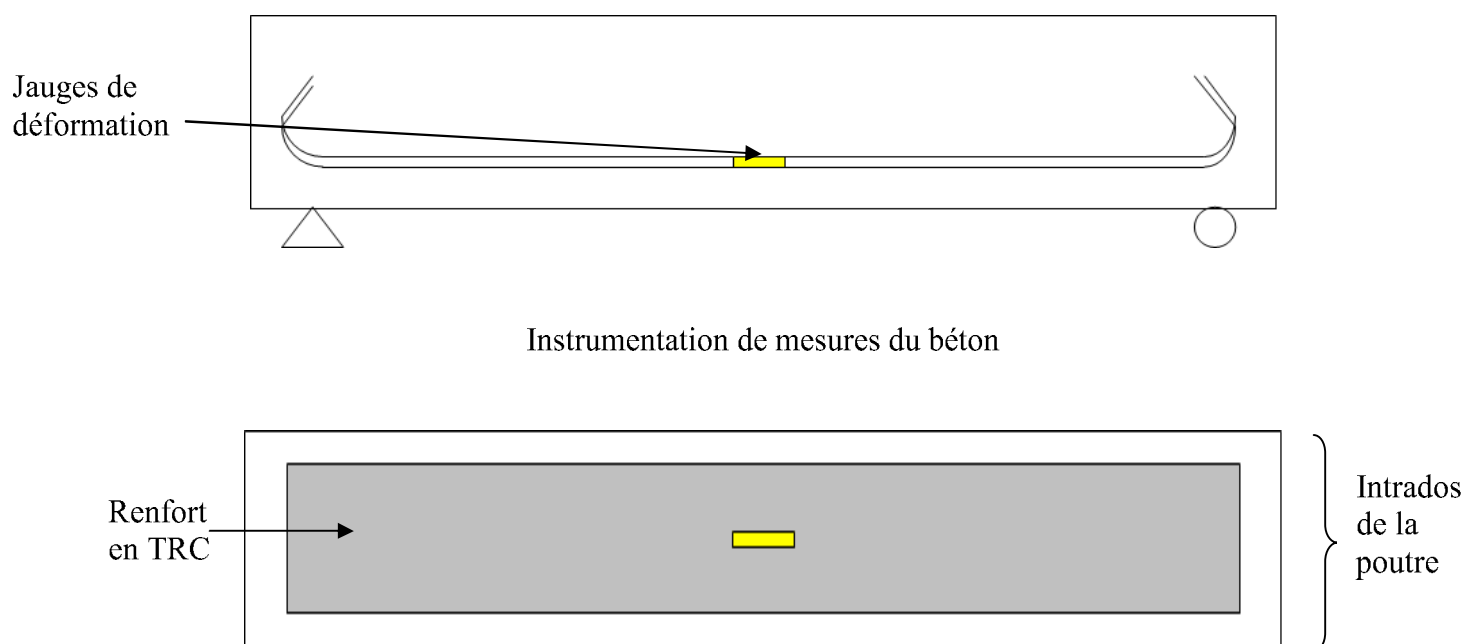


Figure 1.4. Instrumentation de mesures du TRC.

1-5-Résultats des essais :

Suite aux essais sur des poutres renforcées par du TRC, nous avons pu relever les résultats suivants, dont on fera l'analyse et l'interprétation :

- **Représentation charge-flèche :**

Le graphe charge – flèche de la figure 1.5.1, montre que le comportement en flexion simple des poutres testées correspond au figure suivant : i) Une première partie linéaire qui traduit un comportement élastique de la poutre renforcée. Cette partie linéaire a pour limite la contrainte élastique des aciers tendus : lors de cette phase l'acier seul travail et reprend la plus grande partie de l'effort auquel la poutre renforcée est soumise, ii) une deuxième partie où la poutre renforcée adopte un comportement non linéaire et qui correspond à la plastification des barres d'aciers. Leurs apport en terme de résistance est diminué. C'est la plaque de TRC qui va subvenir à ce déficit et les efforts seront transmis à travers le joint de colle.

La rupture de la poutre renforcée par du TRC aramide seul est intervenue au milieu de la poutre, pour une charge égale à 115 kN, suite à la propagation d'une fissure verticale due au dépassement du moment fléchissant ultime, figure 1.5.3. La ruine est de type ductile. On a remarqué aussi que cette rupture a été précédée par un léger décollement de la plaque du TRC, dû aux contraintes de

cisaillement à l'interface TRC - joint de colle. Ce décollement du TRC diminue le taux de travail de la plaque du TRC et précipite la rupture de la poutre.

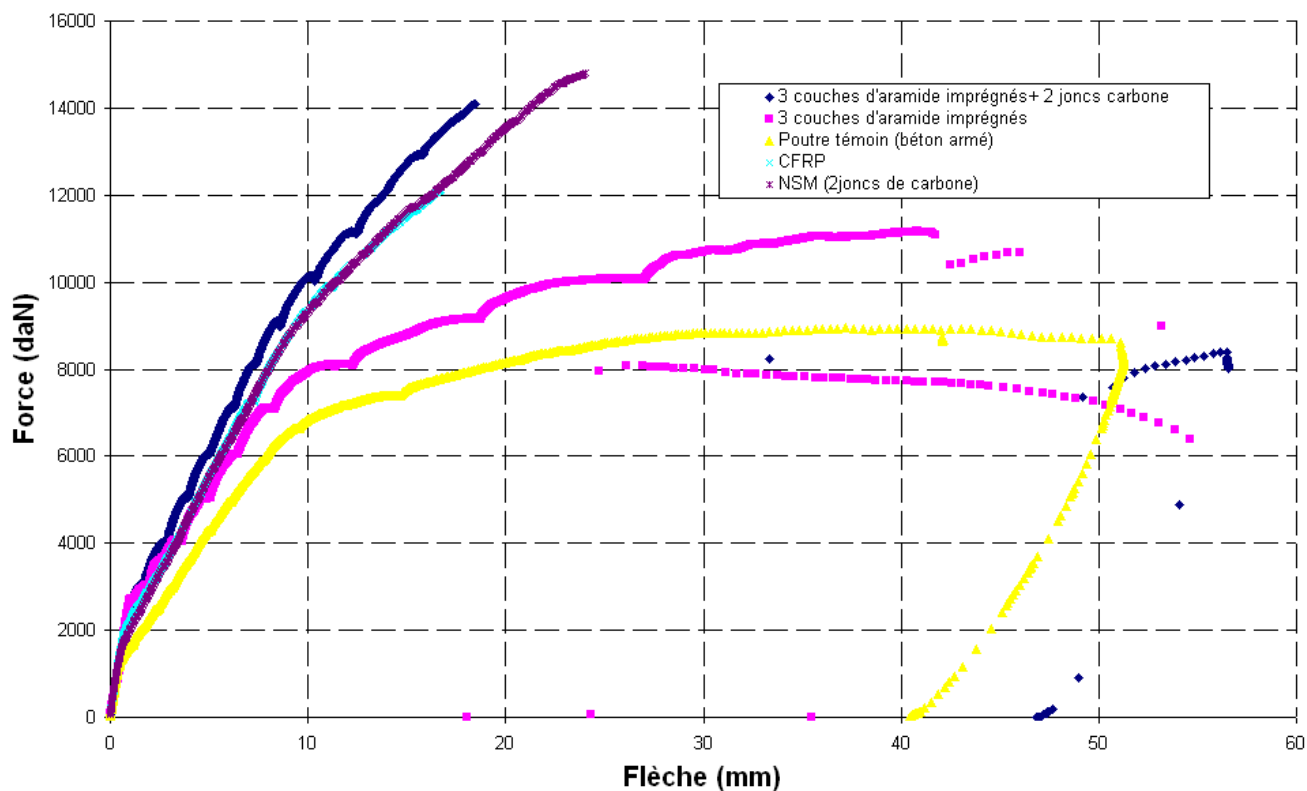
Ce que nous pouvons remarquer sur la courbe 1.5.1, est que la rigidité, au début, est constante jusqu'à un certain seuil où elle commence à diminuer. Cet aspect est commun pour toutes les poutres testées. Les différences sont constatées, surtout dans la deuxième partie, où, par exemple, la poutre renforcée par du TRC aramide seul, a un comportement pratiquement linéaire, ce qui correspond à une rigidité constante, jusqu'à la charge de 8000daN. A partir de cette limite la rigidité baisse brutalement, courbe 1.5.4, jusqu'à un niveau de chargement de 10000daN, où elle redevient constante.

La rupture de la poutre renforcée par du TRC aramide+joncs de carbone est atteinte pour un niveau de charge égal à 140 kN, et la rupture est de type peeling off. Par ailleurs nous avons constaté que les fissures induites par l'effort tranchant ne sont pas nombreuses, ni très importantes, et cela peut être justifié par le fait que les poutres qu'on a conçu sont sur dimensionnés vis-à-vis de l'effort tranchant, c'est-à-dire que l'espacement des cadres est réduit, ce qui permet de bloquer la fissuration oblique.

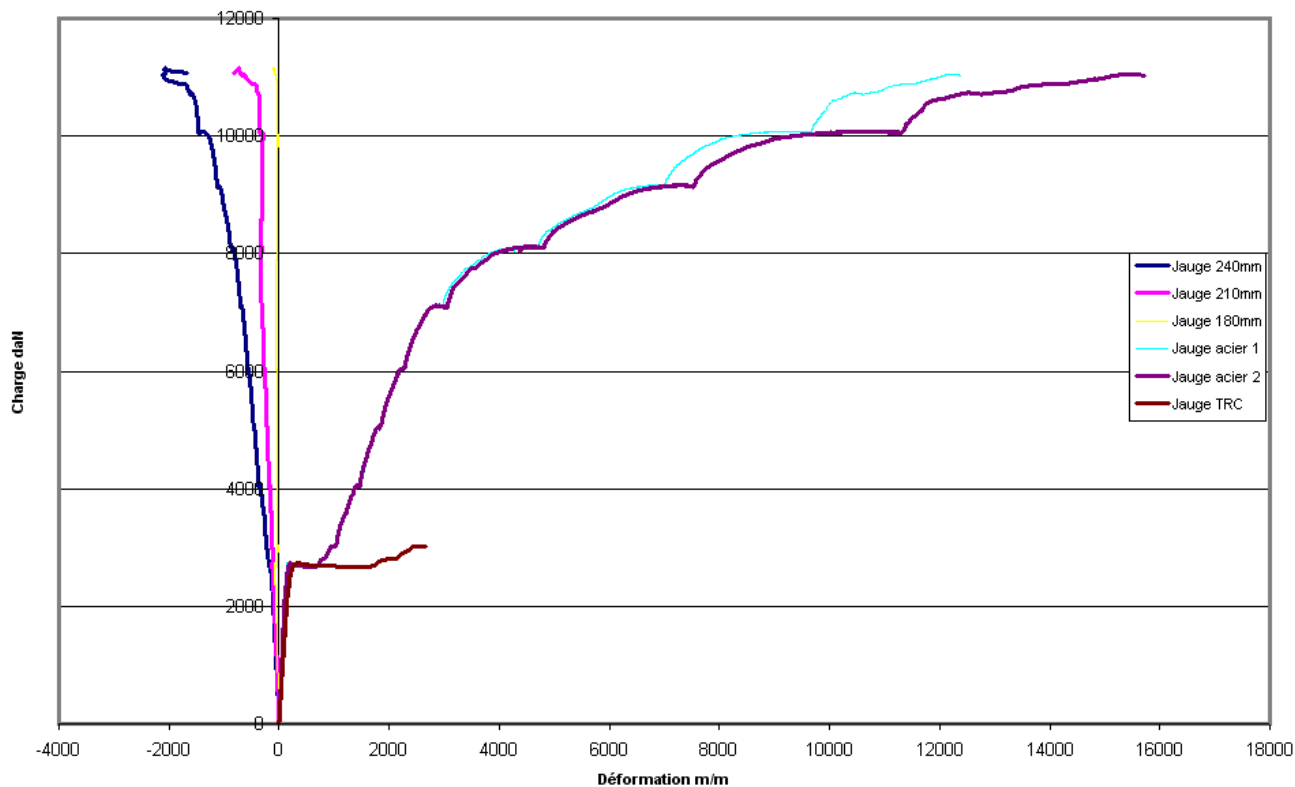
Quant à la poutre renforcée au TRC aramide seul, la ruine est atteinte pour une contrainte égale à 115 kN et une flèche ultime égale à 42mm. La figure 1.5.3 nous permet de constater que la ruine a bien été atteinte par plastification des aciers, et même par leurs ruptures. La figure 1.5.2 nous permet de voir aussi que même le TRC à rompu. Ce qui nous ramène (même si c'est par abus de langage), à dire que la ruine de la poutre renforcée par du TRC (aramide seul) est survenue après épuisement de toute la capacité portante des barres d'aciers et de la plaque de TRC.

A partir de ces résultats, nous pouvons dire que nous avons un gain dans la charge ultime de l'ordre de 21.73 % de la poutre renforcée au TRC aramide + joncs par rapport à la poutre renforcée au TRC aramide seul, et une perte en flèche maximale de l'ordre de 54%. Donc l'emploi des joncs nous permet donc d'avoir des gains en résistance. Par contre on passe d'un mode de rupture ductile à un mode de rupture fragile, caractérisé par la diminution de la flèche ultime de 42mm pour le TRC Aramide seul à 19mm pour le TRC Aramide + joncs. Ce qui nous ramène à dire que l'emploi du TRC aramide seul est très recommandé dans le cas de l'ELS, où on préfère avoir des rigidités stables et constantes avec l'évolution de la charge.

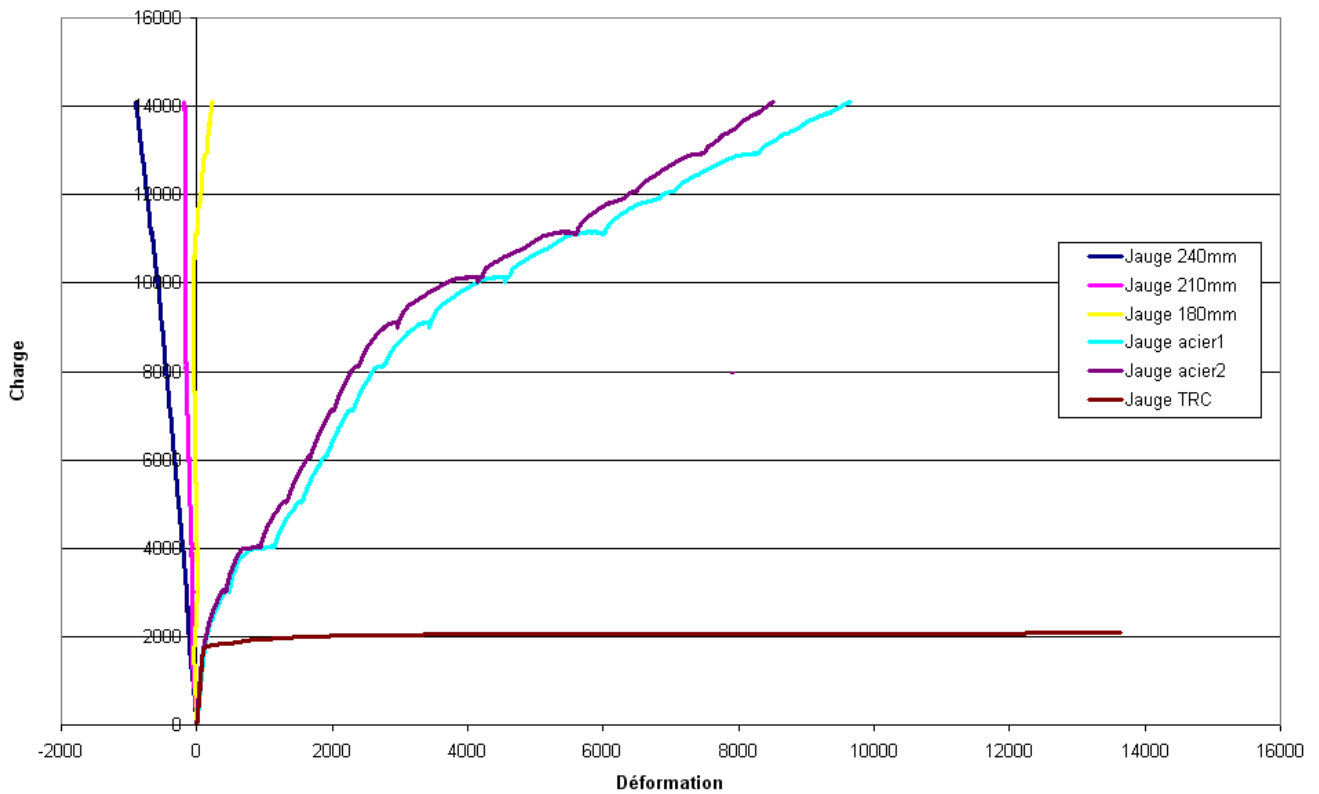
Caractérisation des composites fibres-ciment



Courbe 1.5.1 représentation de la force en fonction de la flèche.



Courbe 1.5.2 Etat de déformation dans la poutre renforcée par du TRC aramide seul



Courbe 1.5.3 Etat de déformation dans la poutre renforcée par du TRC aramide+2 joncs carbone.

➤ **Etude de la rigidité flexionnelle :**

Afin de faire la représentation graphique de la rigidité flexionnelle de la poutre en fonction de sa hauteur, nous devons au préalable faire le calcul de certains paramètres indispensables. La rigidité flexionnelle se calcule par la formule suivante :

$$EI_{\text{exp}} = \frac{M}{\phi}$$

Où : M est le moment fléchissant (N.m), Φ est la courbure de la poutre (m^{-1}).

Le moment peut être calculé par :

$$M = \frac{F.a}{2}$$

Où : F la force appliquée, a le bras de levier entre le point d'application de la force et l'appui le plus proche (essai flexion quatre points).

La courbure est donnée par la formule suivante :

$$\phi = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d}$$

Où : ϵ_c : déformation du béton comprimé au niveau de la fibre comprimée, ϵ_s : déformation de l'acier tendus, d : hauteur utile de la poutre.

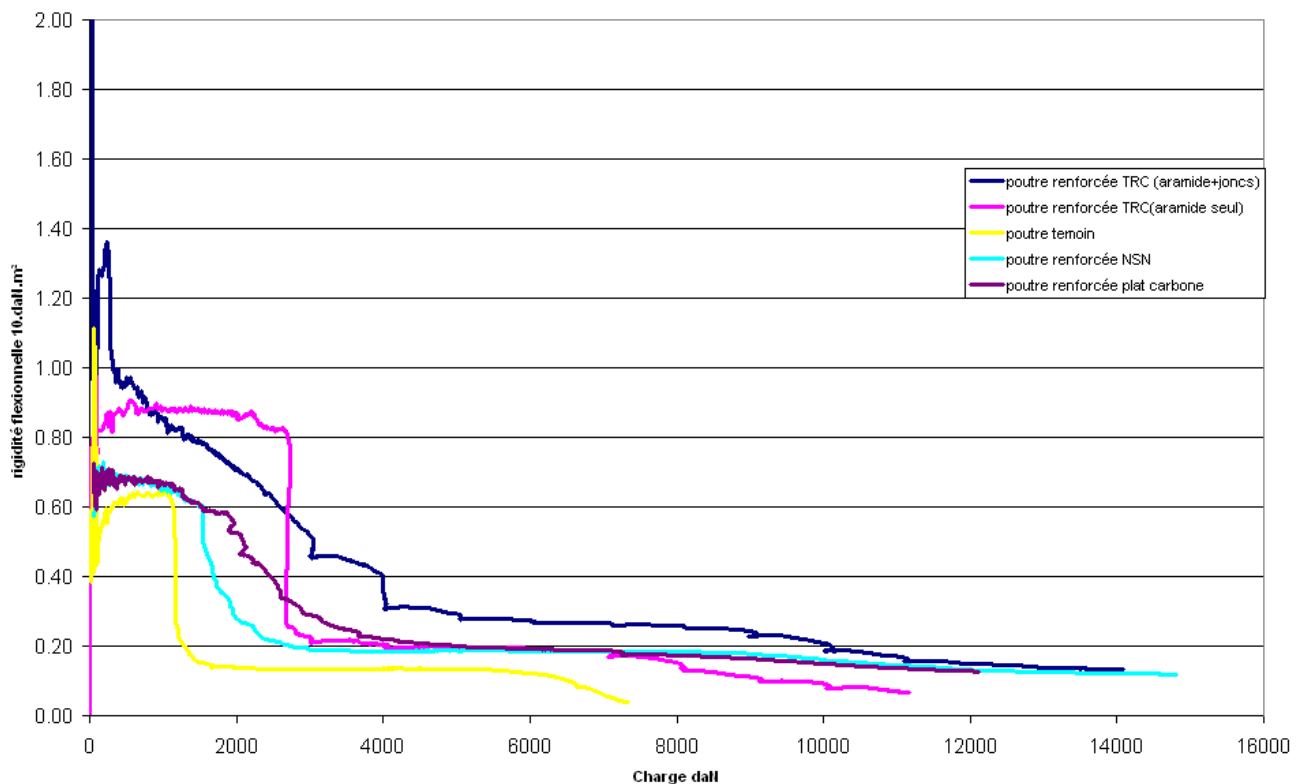
Pour les poutres renforcées la formule de la courbure devient :

$$\phi = \frac{\epsilon_c + \epsilon_f}{h}$$

Où : ϵ_f est la déformation du TRC, h : distance entre la fibre supérieur comprimée et le TRC.

- **Commentaire :**

Les courbes 1.5.4 montrent l'évolution de la rigidité flexionnelle des poutres testées en fonction des niveaux de chargement. Après une première phase plus ou moins longue, où la rigidité de la poutre est constante, il y a une baisse brutale et rapide de la rigidité. Cette baisse rapide correspond à la phase de fissuration de la poutre : la poutre perd de sa résistance. Une fois le processus de fissuration amorcé et stabilisé, la rigidité se stabilise à un seuil, jusqu'à la ruine.



Courbe 1.5.4 Représentation des rigidités des différentes poutres testées.

➤ **Modes de rupture par peeling off:**

Le mode de rupture de la poutre renforcée par TRC aramide + joncs carbone est de type peeling off, figure 1.5.3, c'est-à-dire qu'il se produit par une fissuration du mortier compris entre l'acier tendu et le TRC. Le mécanisme de rupture par peeling off peut être décrit selon les étapes suivantes :

-sous l'effet de l'effort de traction dans la partie inférieure de la poutre, le béton se fissure verticalement.

-une fois les fissures verticales amorcées, elles se propagent verticalement, jusqu'à ce qu'elles atteignent les armatures tendues.

-ensuite une fissure horizontale s'amorce, à l'interface aciers tendus – béton.

-la propagation de cette fissure provoque la rupture par cisaillement de la partie du béton entre le composite et les aciers tendus.



Figure 1.5.1 rupture au milieu de la poutre renforcée par TRC (aramide seul)



Figure 1.5.2.décollement de la plaque de TRC (aramide 3 couches).

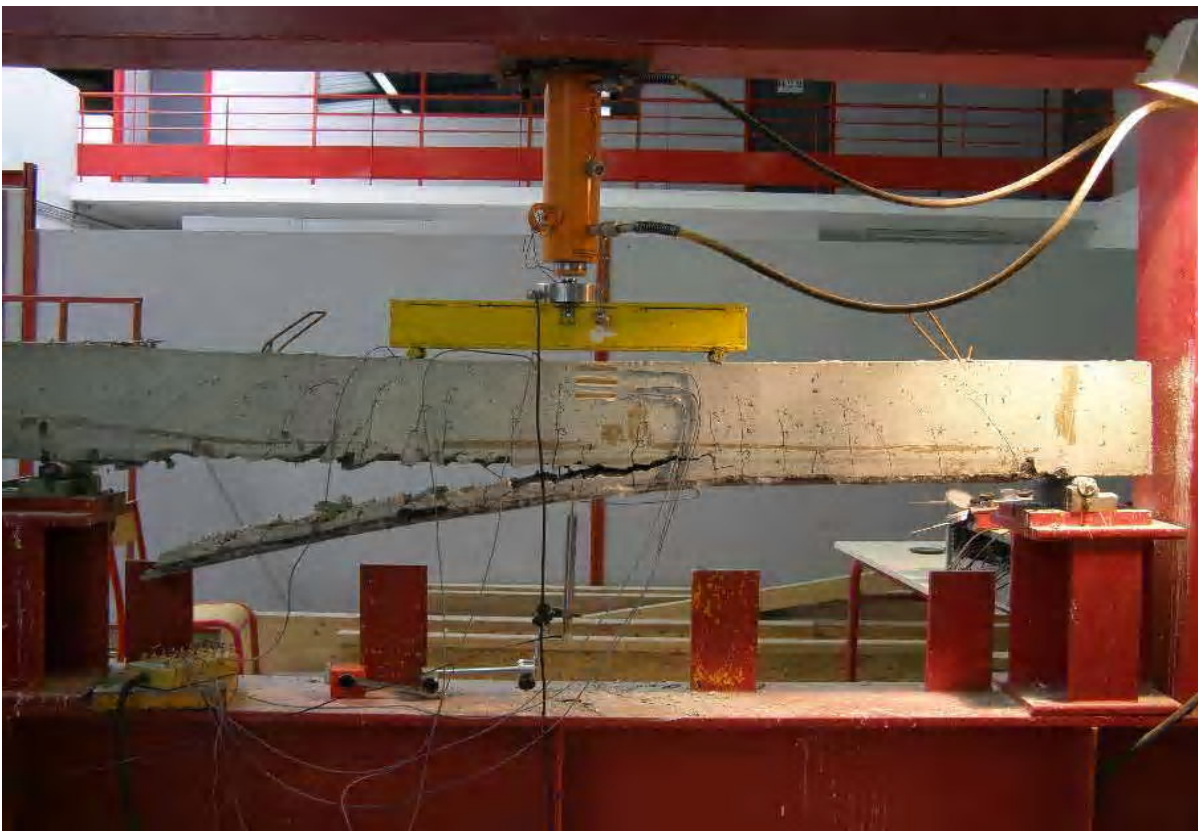


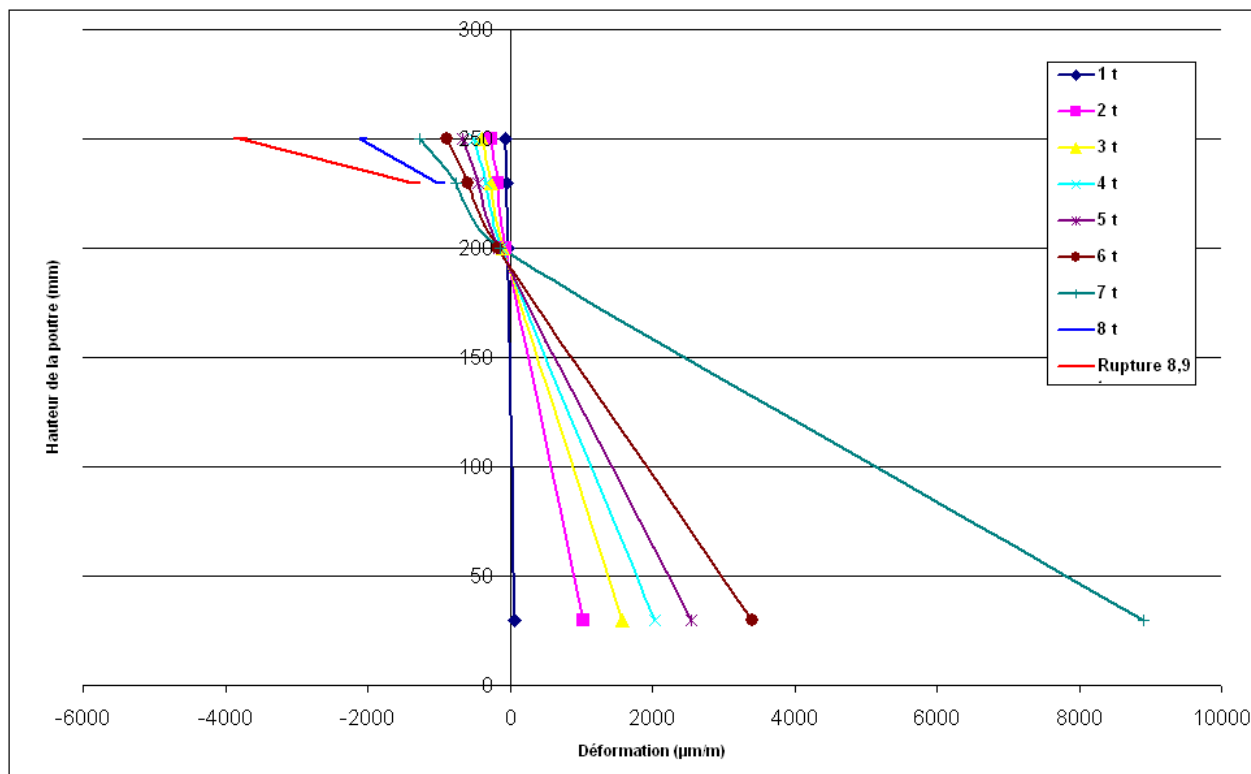
Figure 1.5.3.rupture par peeling off



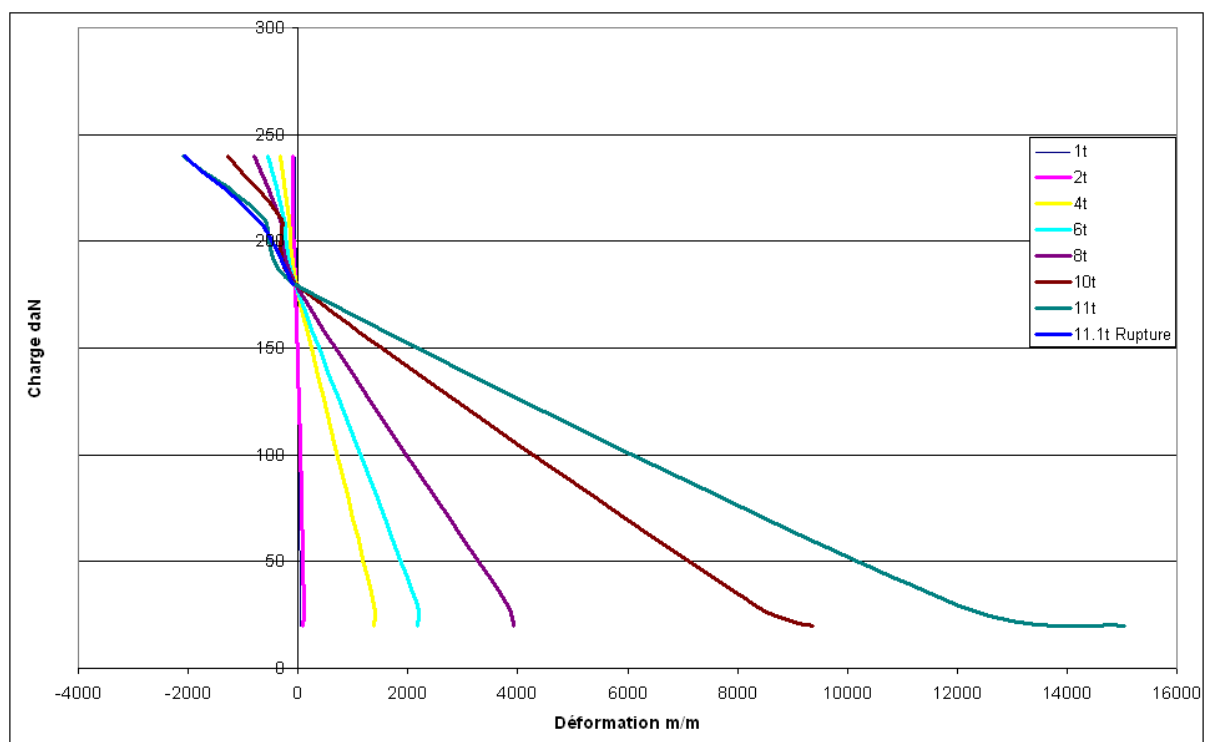
Figure 1.5.4 Décollement de la plaque TRC (aramide + joncs carbone)

➤ **La représentation du diagramme Navier – Bernoulli :**

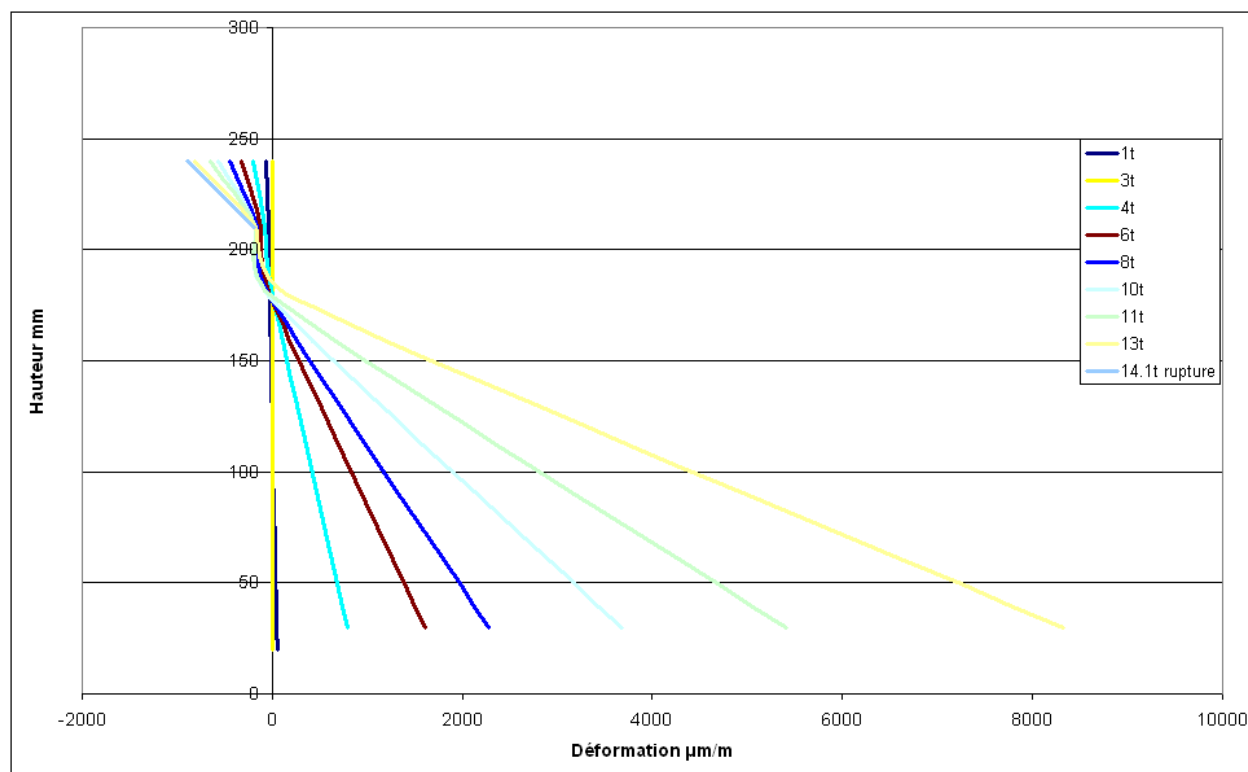
La représentation de N-B nous permet d'évaluer l'évolution de la déformation le long de la hauteur de la poutre. Les remarques qu'on peut tirer des courbes 1.5.7, 1.5.8 et 1.5.9 sont les suivantes :



Courbe 1.5.5. Diagramme de Navier de la poutre témoin



Courbe 1.5.6. Diagramme de Navier de la poutre renforcée par TRC (Aramide seul)



Courbe 1.5.7. Diagramme de Navier de la poutre renforcée par TRC (Aramide + 2 joncs de carbone)

2-Calcul prévisionnel de la résistance d'une poutre renforcée :

Dans cette partie nous aurons à déterminer et à prédire, selon des formules et méthodes qui existent dans la littérature, le comportement en flexion de poutres renforcées par du TRC en intrados. En premier lieu nous aurons à définir le moment fléchissant ultime de la poutre renforcée, en second lieu nous aurons à prédire une relation entre la charge appliquée et la flèche maximale au centre de la poutre. Pour cela on se basera sur les travaux de S.Agouzoul, 1999 et le manuel de l'AFGC.

2-1-Résistance en flexion d'une poutre renforcée par du TRC (aspect théorique):

2-1-1-Hypothèse de calcul : On utilisera les hypothèses de calcul d'une poutre en béton armé : les déformations des différents matériaux constituant la poutre sont faibles et varient linéairement le long de la poutre, les sections droites restent droites après déformation, l'adhérence entre le béton et l'acier est parfaite et la résistance du béton en traction est négligée. On rajoute à ces hypothèses, des hypothèses relatives à la plaque de TRC : on suppose une adhérence parfaite entre la plaque de TRC et le substrat.

2-1-2-Calcul du moment résistant ultime de la poutre renforcée :

La figure 2.1 illustre les paramètres géométriques de la poutre à considérer, et le figure 2.2 illustre la distribution des déformations et des forces internes dans une section transversale de la poutre étudiée.

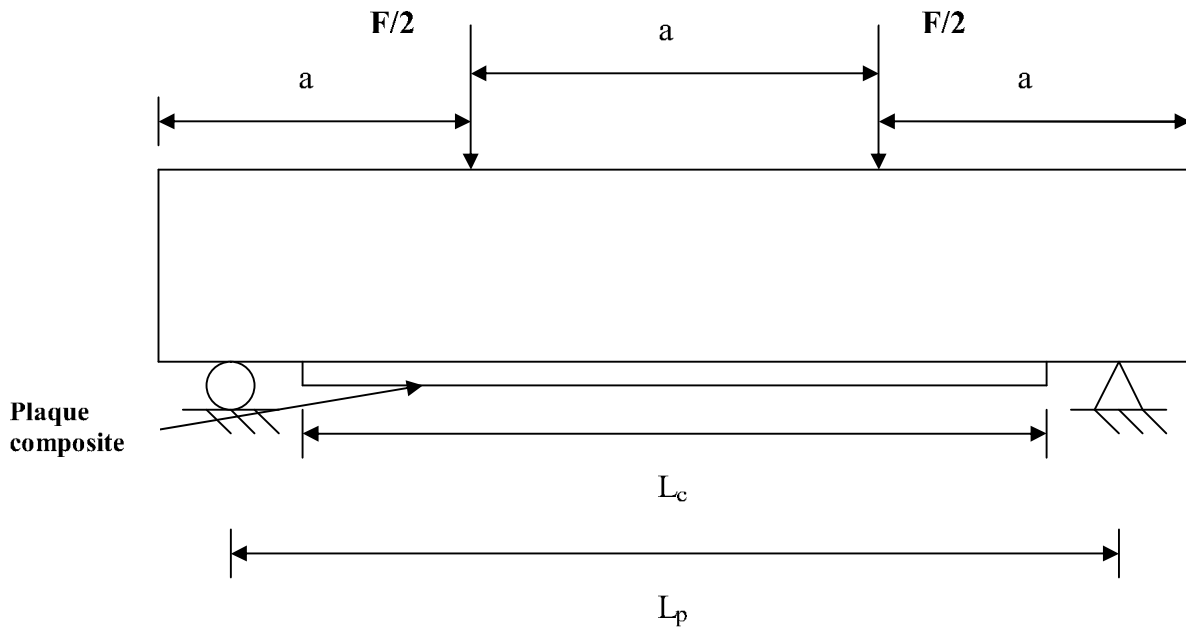


Figure 2.1 : poutre renforcée par du TRC.

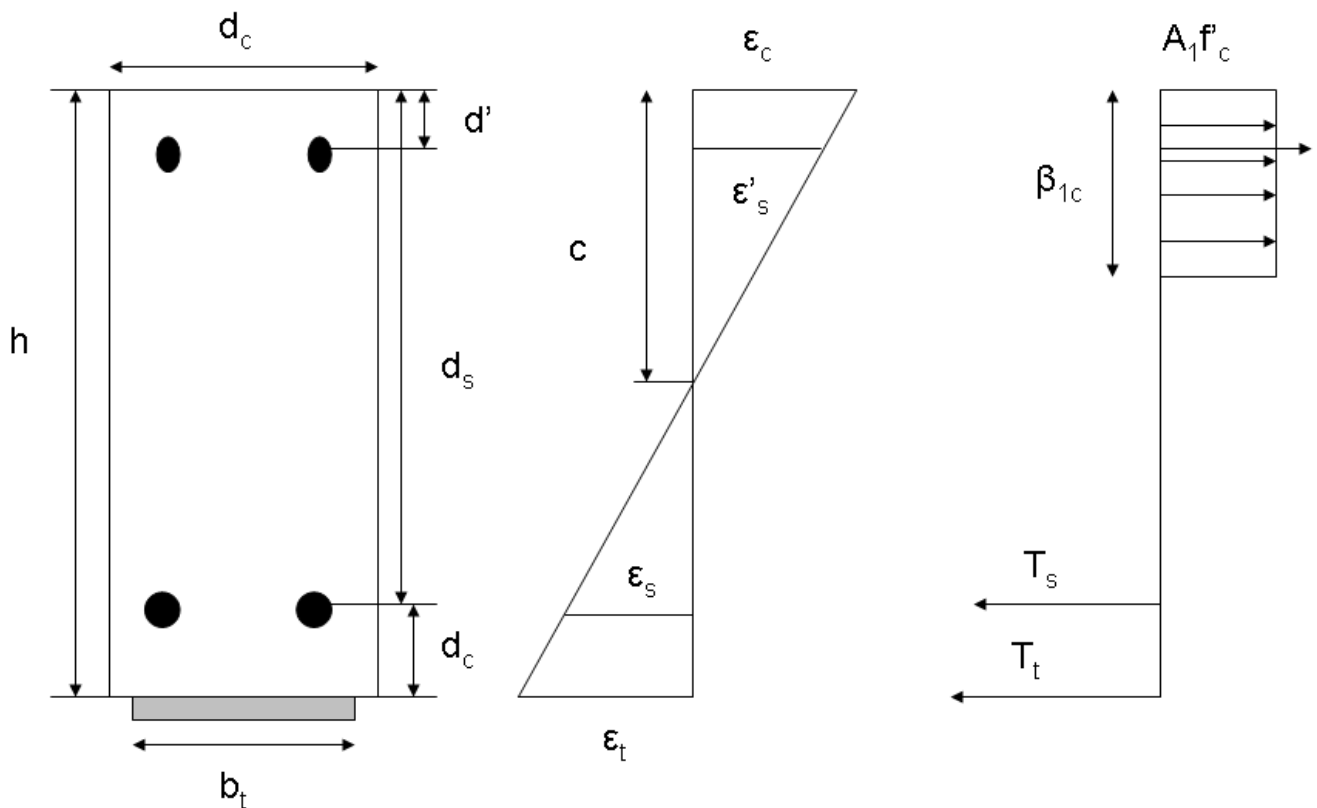


Figure 2.2 : distribution des déformations et des forces internes

Le mode de rupture le plus probable est celui provoqué par la plastification des armatures d'aciers en traction, suivie d'une rupture du béton en compression. Aussi le comportement non linéaire du béton sera modélisé par un bloc rectangulaire équivalent. On utilisera les paramètres α_1 , β_1 pour calculer les dimensions du rectangle équivalent.

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 \cdot f'_c \quad 2.1$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 \cdot f'_c \quad 2.2$$

Où f'_c est la résistance en compression du béton.

A partir de la figure 3.2. on peut trouver une relation simple entre les déformations dans les aciers tendus, dans les l'acier comprimé et dans la plaque de TRC en fonction de la déformation du béton .

$$\epsilon_s = \epsilon_c \cdot \frac{d_s - c}{c} \quad 2.3$$

$$\epsilon'_s = \epsilon_c \cdot \frac{c - d'}{c} \quad 2.4$$

$$\epsilon_t = \epsilon_c \cdot \frac{d_t - c}{c} \quad 2.5$$

Où :

C : distance entre la fibre extrême du béton en compression et l'axe neutre.

d_s : profondeur des aciers en traction.

d' : position des armatures comprimées par rapport à la face supérieure de la poutre.

d_t : la profondeur de la plaque du TRC.

Les forces internes peuvent être exprimées :

$$C_s = A'_s \cdot E_s \cdot \epsilon'_s \quad 2.6$$

$$C_c = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b_c \cdot \quad 2.7$$

$$T_s = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s \quad 2.8$$

$$T_t = A_t \cdot E_t \cdot \epsilon_t \quad 2.9$$

En appliquant le principe d'équilibre des forces sur la section représentée, on a :

$$C_s + C_c = T_s + T_t \quad 2.10$$

On remplace les équations (3.6, 3.7, 3.8, 3.9) dans l'équation 3.10, on obtient la relation suivante :

$$\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b_c + A'_s \cdot E_s \cdot \epsilon'_s = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s + A_t \cdot E_t \cdot \epsilon_t \quad 2.11$$

Comme on l'a déjà annoncé, le mode de rupture de la poutre est une rupture par plastification des armatures d'aciers en traction, suivie d'une rupture par écrasement du béton en compression. On suppose donc que les armatures ont atteint la limite élastique de l'acier, d'où :

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad 2.12$$

Où f_y : est la limite élastique de l'acier.

En remplaçant (2.3), (2.4), (2.5) et (2.12) dans l'équation 2.11, on obtient :

$$\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b_c + A'_s \cdot E_s \cdot \epsilon_c \cdot \frac{c-d'}{c} = A_s \cdot f_y + A_t \cdot E_t \cdot \epsilon_c \cdot \frac{d_p - c}{c} \quad 2.13$$

En faisant des simplifications et regroupant en C, on obtient une équation du second degré de la forme:

$$\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b_c \cdot c^2 + (A'_s \cdot E_s \cdot \epsilon_c - A_s \cdot f_y + A_t \cdot E_t \cdot \epsilon_c) \cdot c - (A_t \cdot E_t \cdot d_t + A'_s \cdot E_s \cdot d') \cdot \epsilon_c = 0$$

2.14

La résolution de l'équation donne la position de l'axe neutre :

$$c = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot D}}{2 \cdot A} \quad 2.15$$

Avant de passer au calcul du moment ultime il faut s'assurer que la plastification des armatures en traction est atteinte. On calcul donc à l'aide de l'équation 2.13 la déformation dans les barres d'aciers, avec une déformation ultime du béton. Cette valeur sera comparée à la limite élastique des aciers tendus.

Une fois que l'hypothèse du mode de rupture est vérifié, on calcule le moment de flexion ultime de la poutre :

$$M_r = C_c \cdot \left(c - \frac{c \cdot \beta_1}{2} \right) + C_s \cdot (d_s - c) + T_s \cdot (d_s - c) + T_t \cdot (d_t - c) \quad 2.16$$

En remplaçant (2.6), (2.7), (2.9) et (2.12) dans (2.16), on obtient le moment résistant M_r :

$$M_r = C_c \cdot \left(c - \frac{c \cdot \beta_1}{2} \right) + A_s \cdot f_y \cdot (d_s - c) + A'_s \cdot E_s \cdot \epsilon_c \cdot \frac{(c - d')^2}{c} + A_t \cdot E_t \cdot \epsilon_c \cdot \frac{(d_t - c)^2}{c} \quad 2.17$$

2-2-Résultats :

Le calcul du moment ultime des poutres par la méthode analytique nous permettra de comparer et d'estimer la fiabilité des résultats obtenus. Nous donnerons d'abord les caractéristiques des matériaux utilisés (tableau 2.2.1), et ensuite on donnera les résultats des calculs faits à partir des formules précédentes (tableau 2.2.2).

Poutre	Armatures	Plaque TRC
L=2.3m	As= 0.00090m ²	L=1.80m
h=0.25m	A's=0.0004m ²	h=10mm
bc=0.15m	ds=0.23m	b=100mm
Béton	Acier	TRC
f _c =31MPa	f _y =400MPa	E _t =564MPa
ε _c =0.0035	E _s =210GPa	ε _{ult} =0.09

Tableau 2.2.1 : Caractéristiques de la poutre et des matériaux utilisés.

Configurations essais	Moment ultime (da N .m)	
	Résultats analytiques	Résultats expérimentaux
Poutre témoin	3345.75	3427.96
Poutre renforcée TRC (aramide)	5101	4278.96
Poutre renforcée TRC (aramide+joncs)	5900	5401.17

Tableau 2.2.2.Confrontation des résultats analytiques et expérimentaux.

❖ **Conclusion générale :**

Notre travail était réparti en deux grandes parties : une première partie est consacrée au volet de la caractérisation du matériau composite type TRC. Pour cela nous avons sélectionné certain type de matériau pour la confection de ce dernier. Pour les fibres nous avons choisi 4 types de fibres longues et unidirectionnelles (Aramide, basalte, verre AR et verre E). La matrice, quant à elle, était une matrice minérale, et plus exactement un mortier de réparation.

Une fois nos matériaux sélectionnés, nous avons mis en place les configurations selon lesquelles nous allons confectionner nos corps d'épreuve. Nos choix de configurations étaient principalement conçus, afin de mettre en évidence l'influence de certains paramètres sur le comportement des TRC, tel que : le nombre de couche, l'épaisseur du renfort, la nature des fibres, l'imprégnation...etc.

L'analyse des résultats expérimentaux permet de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Le comportement des TRC est un comportement à deux phases : une phase linéaire qui correspond au non dépassement de la contrainte limite du mortier, une phase non linéaire qui correspond à l'entrée en travail des fibres.
- ✓ La phase non linéaire est partagée en deux parties : une première partie où plus de 90% des fissures s'amorcent, la deuxième partie correspond à la propagation des fissures et c'est la phase où les fibres travaillent.
- ✓ La rupture des TRC peut être soit par :
 - Pool-out (exemple de l'aramide).
 - Cassure des fibres (exemple du verre).
 - Délaminage (exemple du basalte).
- ✓ La rupture intervient toujours suivant une fissure maitresse, qui se distingue des autres fissures à la fin de la phase non linéaire.
- ✓ La déformation du TRC dépend de la déformation des fibres qui entrent dans sa composition : plus les fibres sont déformables, plus la déformation ultime des TRC est importante.
- ✓ L'utilisation d'une résine d'imprégnation, telle que l'époxy, permet d'avoir des gains en taux de travail considérables.
- ✓ L'adhérence fibre – mortier est le facteur le plus déterminant quant au taux de travail des TRC.
- ✓ Le rapport E/C ou bien l'utilisation d'une résine d'imprégnation l'améliore considérablement.

La deuxième partie de notre travail était de faire une application sur des éléments structuraux (essais flexion 4 points), à savoir des poutres de béton armé. Nous avons opté, en première configuration, pour un TRC à base de fibre d'Aramide imprégnés d'époxy. Dans la deuxième configuration, nous avons ajouté, au TRC à base d'aramide, deux jonses de carbone.

Les résultats obtenus étaient très concluant, avec des performances de travail très améliorées par rapport aux autres solutions qui existent (FRPC, NSN). Le renforcement des poutres par du TRC aramide seul permet d'avoir un mode de rupture ductile. On peut dire que l'utilisation des TRC aramide seul s'avère très intéressante dans le cas de l'ELS.

Ce travail a permis de définir le comportement en traction du composite fibre ciment, à travers une loi de comportement tri linéaire. Une première phase élastique où la matrice cimentaire travaille seule, jusqu'à sa limite de rupture. La deuxième phase où la courbe adopte une allure en *dents de sille*, caractérisée par l'apparition des fissures, se comportement correspond à l'entrée en travail progressive des fibres de renfort. La dernière phase est linéaire jusqu'à la rupture, où les fibres reprennent à 90% l'effort appliqué.

L'utilisation des TRC comme renforcement de poutres sollicités en flexion simple, est plus précisément pour reprendre les efforts dus au moment fléchissant parait une bonne solution, surtout en le comparant avec les méthodes utilisées aujourd'hui pour le renforcement des structures (coûts, comportement mécanique, mise en œuvre).

Comme perspective à ce travail, il serait intéressant de faire une étude sur le renforcement d'éléments structuraux sollicités en effort tranchant, sachant qu'une structure soumise à la flexion simple, est sujette aux deux effets du moment fléchissant et de l'effort tranchant en même temps. Ainsi une modèle théorique pour prédire le comportement d'un élément structurel, par un calcul prévisionnel parait aussi intéressant dans la mesure où il permettra de valider l'étude expérimentale.

❖ REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE:

AGOUZOUL S. (1999), renforcement en flexion des poutres béton armé par des plaques PRF. *Rapport de stage de maitrise*. Université de Sherbrooke.

BENDJEDDOU et al (2006). Damaged RC beams repaired by boarding of CFRPlaminates. *Cement and concrete composites*, Elseiver

CUYPPERS et al (2006). Stochastic matrix-cracking model for textile reinforced cementitious composites under tensile loading. *Cement and concrete composites*, Elseiver.

FERRIER E. (1999), Comportement de l'interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermostimulé et en fatigue oligocyclique : application au calcul prévisionnel de la durabilité de poutres BA renforcées / *.thèse université Lyon 1*, France.

FERRIER E (2008-2009), *cours Métriaux et multi matériaux*, master MEGA LYON.

GRAD W. et al (2007). Analysis of textile reinforced concrete structures under consideration of non traditional uncertainty models. *Cement and concrete composites*, Elseiver

ORTLEPP R. et al (2006), A new approche for evaluating bond capacity of TRC strengthening, *cement and concrete composites*, Elseiver.

HAMELIN P. (2008-2009), *cours Métriaux et multi matériaux*, master MEGA LYON.

HARTING J. et al (2008). Influence of bond properties on the behaviour of textile reinforced concrete. *Cement and concrete composites*, Elseiver.

HAUBLER U et al (2007). Bond and failure mechanisms of TRC under uniaxial tensile loading. *Cement and concrete composites*, Elseiver.

HOLLER S. et al (2004). Computational model of textile reinforced concrete structures, ***cement and concrete composites***, Elseiver.

PELED A. et al (2008). Bonding characteristics of multifilaments polymer yarns and cement matrices. ***Cement and concrete composites***, Elseiver

RICHTER M. (2006). On the non linear elastic properties of TRC under tensile loading damage and cracking. ***Cement and concrete composites***, Elseiver

TONG L. et BANNISTER M.K. (2002), 3D Fibre Reinforced Polymer Composite, *édition Elseiver*.

VALERY V. et MOROZOV E. (2001), Mechanics and Analyse of Composite Structures, *édition Elseiver*

YEHIA N. (2007). Fracture mechanisms approach for flexural strengthening of reinforced concrete beams. ***Cement and concrete composites***, Elseiver.

Annexe 1 :

Histogrammes des différentes configurations d'essais.

➤ **Influence de la nature des fibres :**

-Les deux couches :

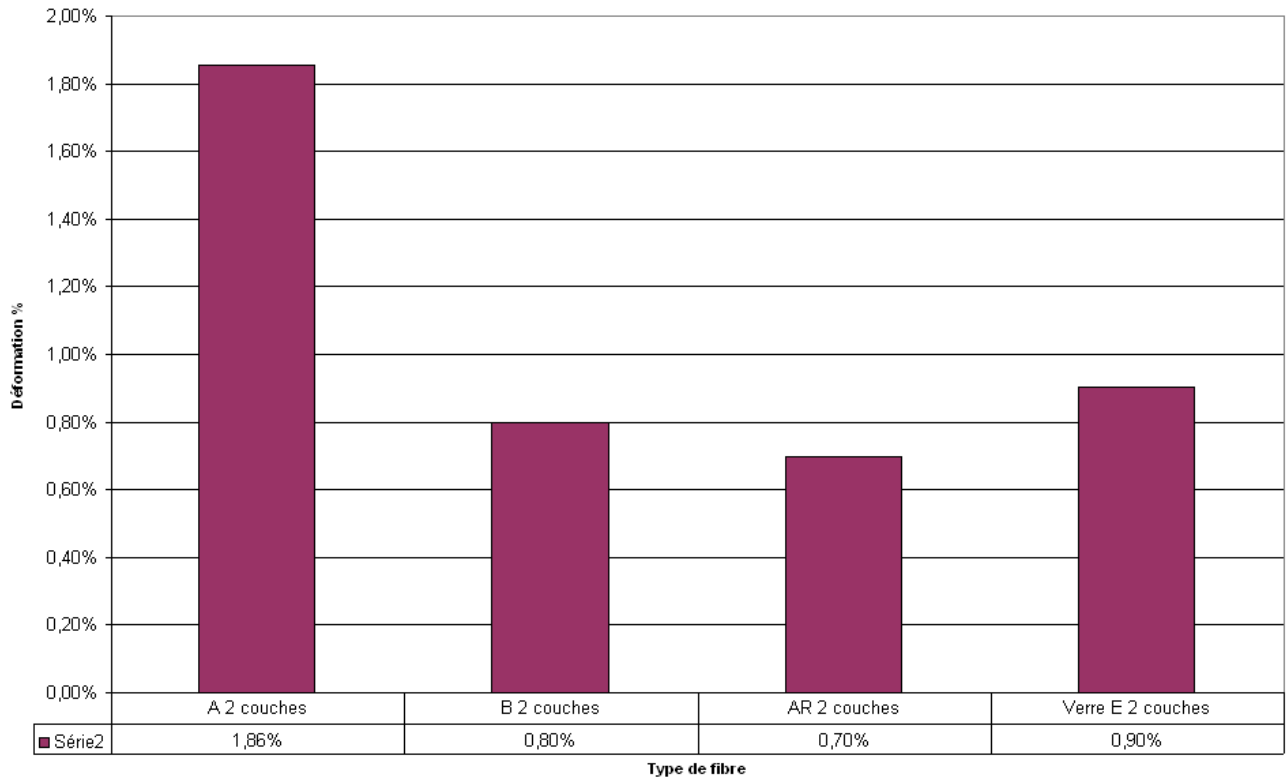


Figure 5.3.1 déformations ultimes (2 couches de fibres)

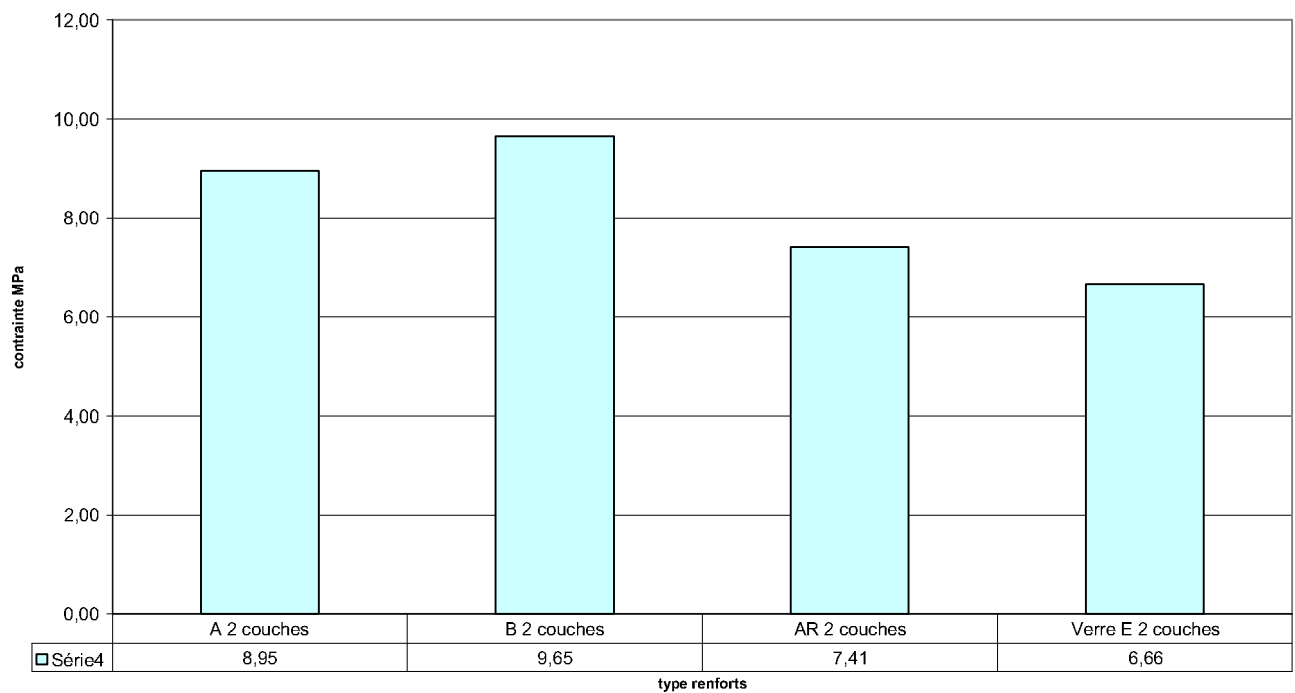


Figure 5.3.2 : Contraintes ultimes (2 couches de fibres)

-Les trois couches :

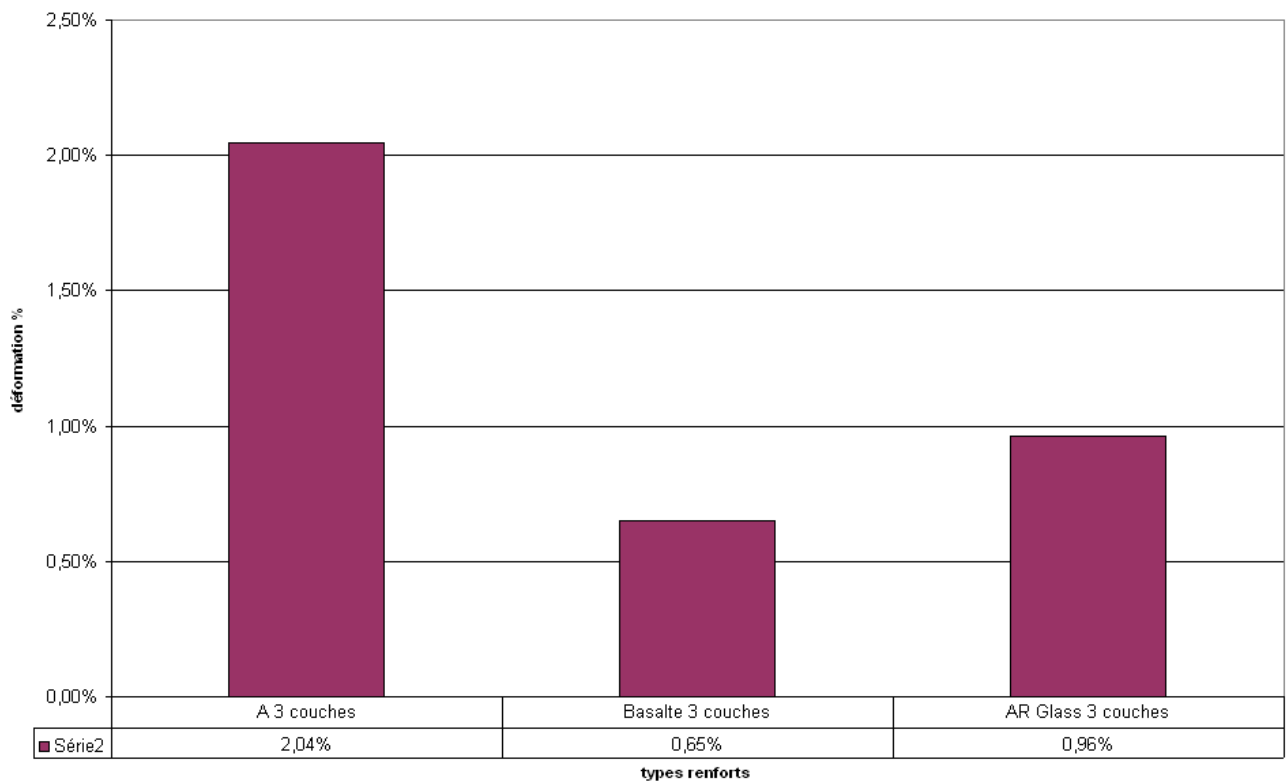


Figure 5.3.4 Déformations ultimes (3 couches de fibres)

Caractérisation des composites fibres-ciment

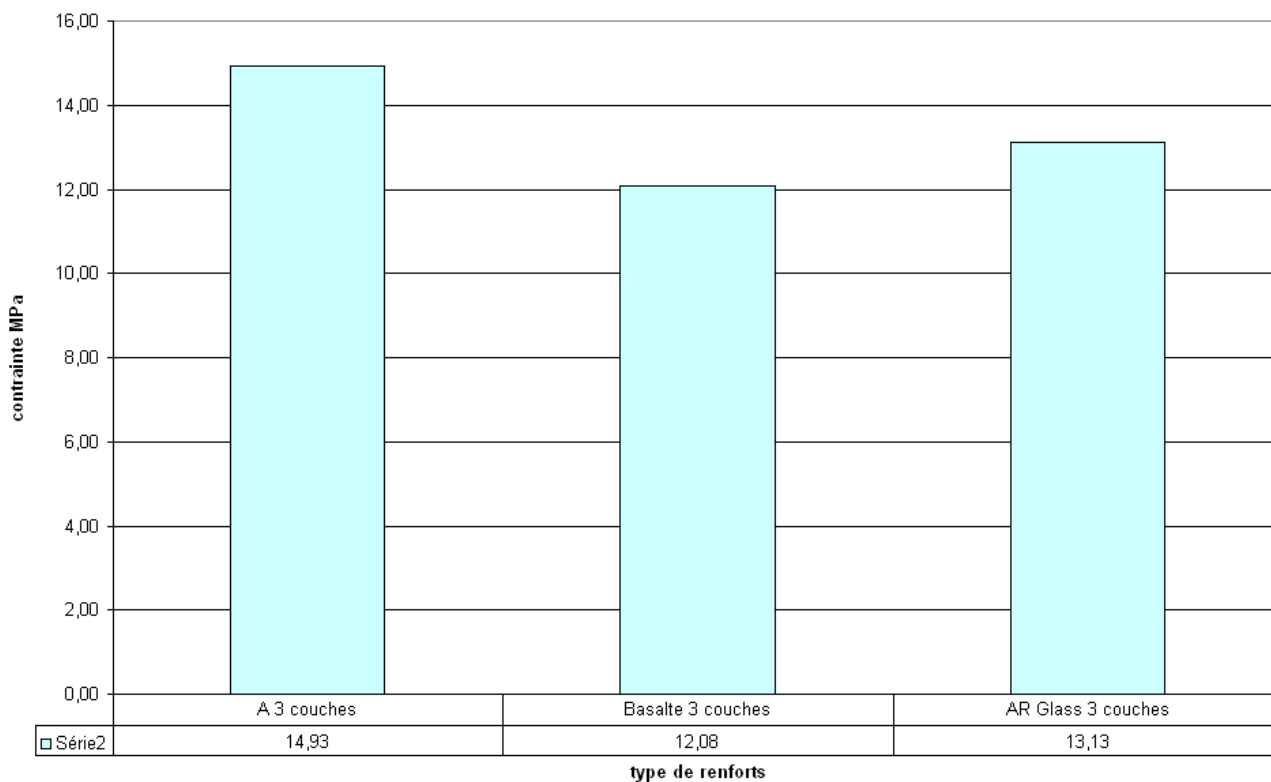


Figure 5.3.5. Contraintes ultimes (3 couches de fibres)

➤ . Influence du nombre de couche :

-Aramide :

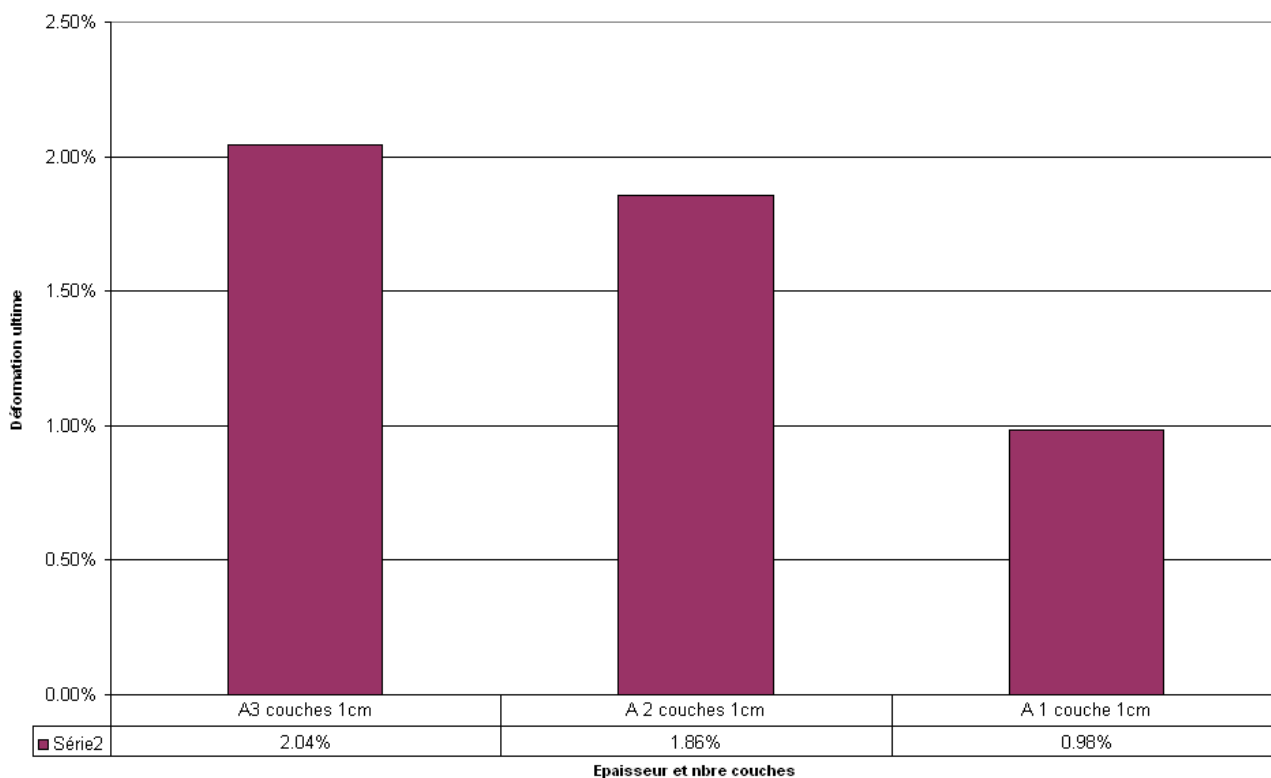


Figure 5.3.8 déformation ultime de l'aramide (1,2 et 3 couches)

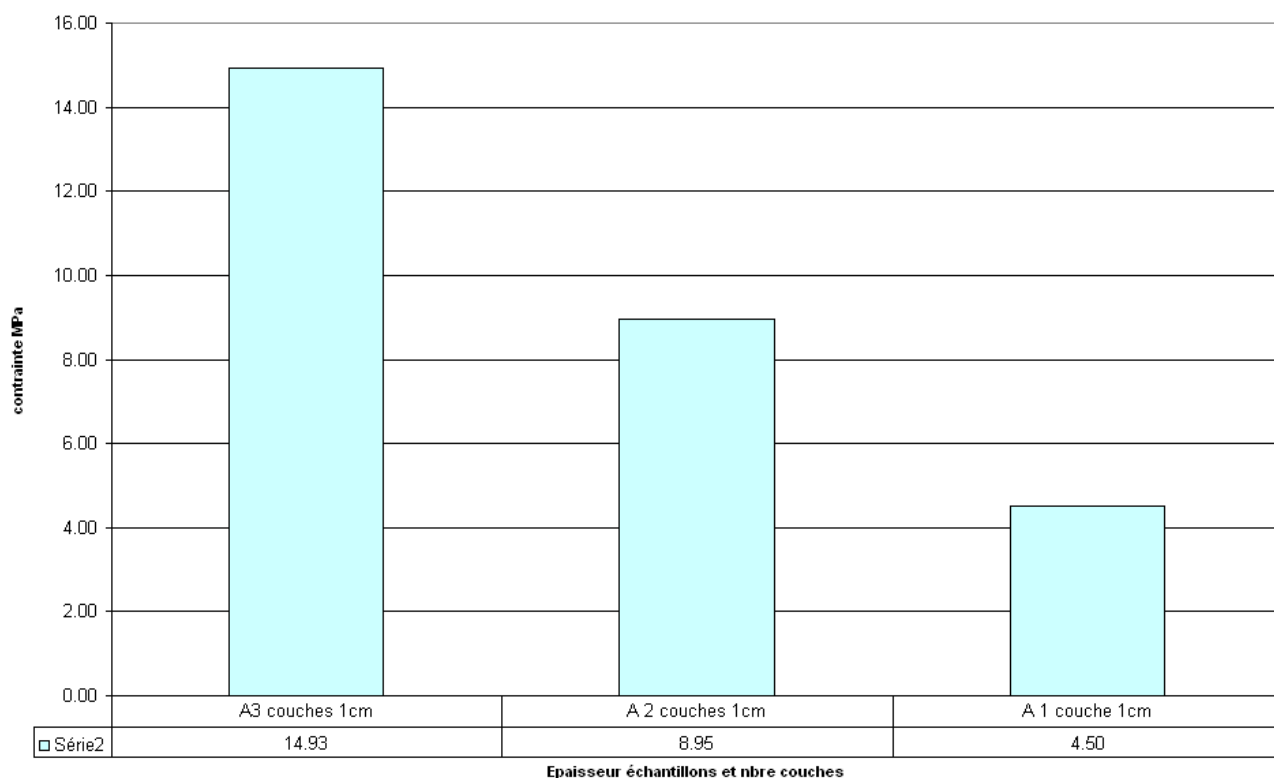


Figure 5.3.9 contrainte ultime du TRC (aramide : 1,2 et 3 couches)

-Basalte :

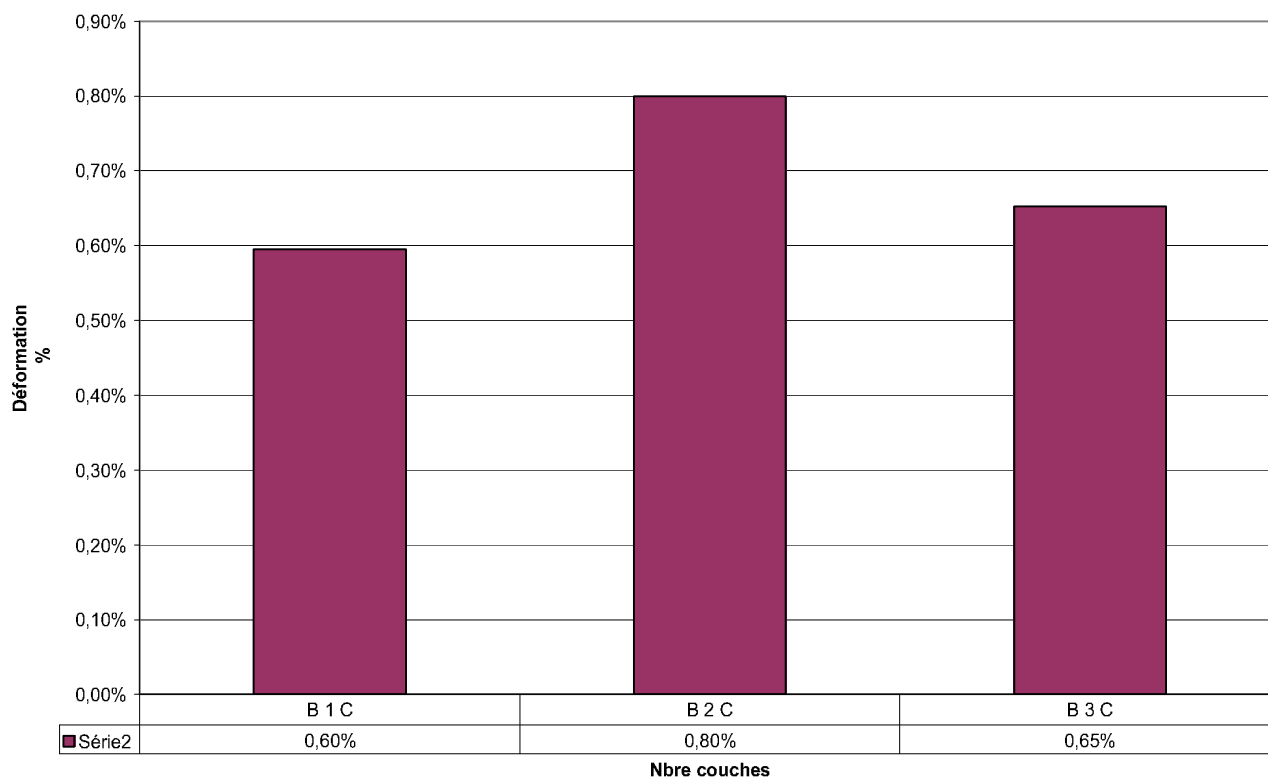


Figure 5.3.12 déformations ultimes (basalte)

Caractérisation des composites fibres-ciment

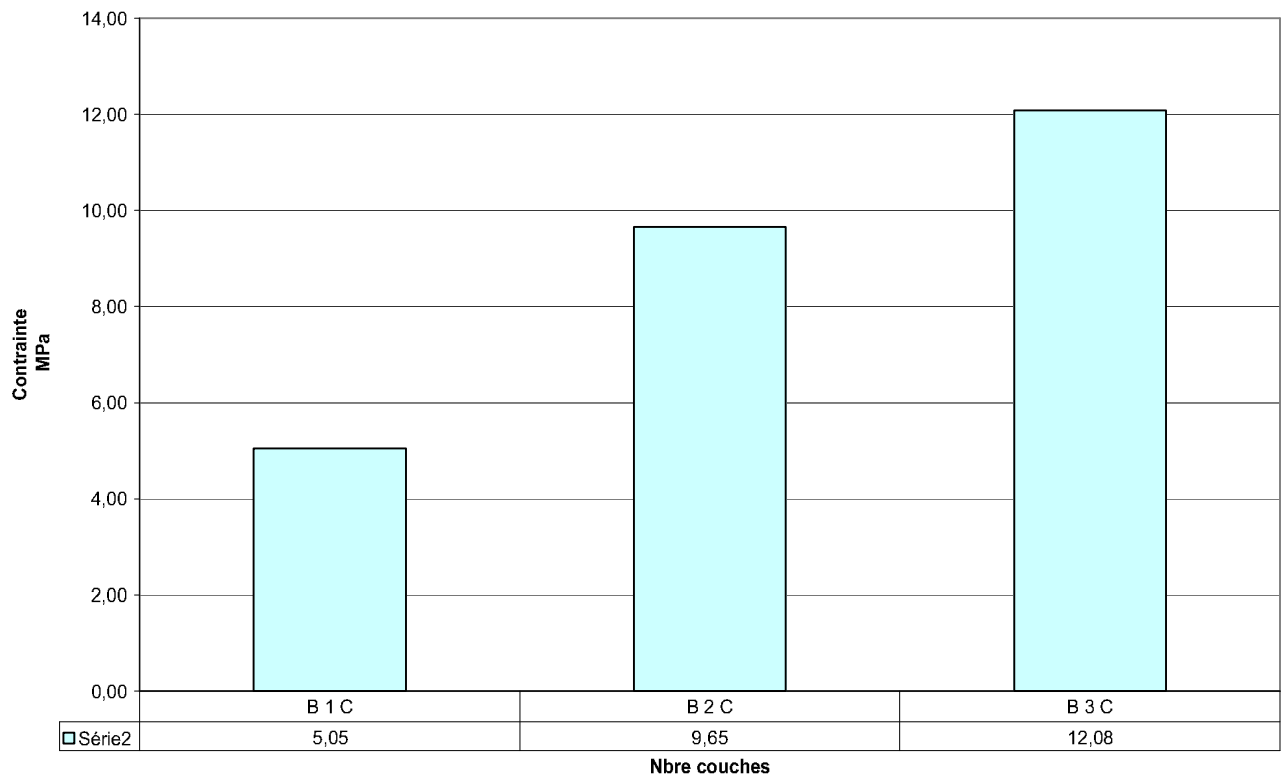


Figure 5.3.13 contraintes ultimes (Basalte)

-Verre AR :

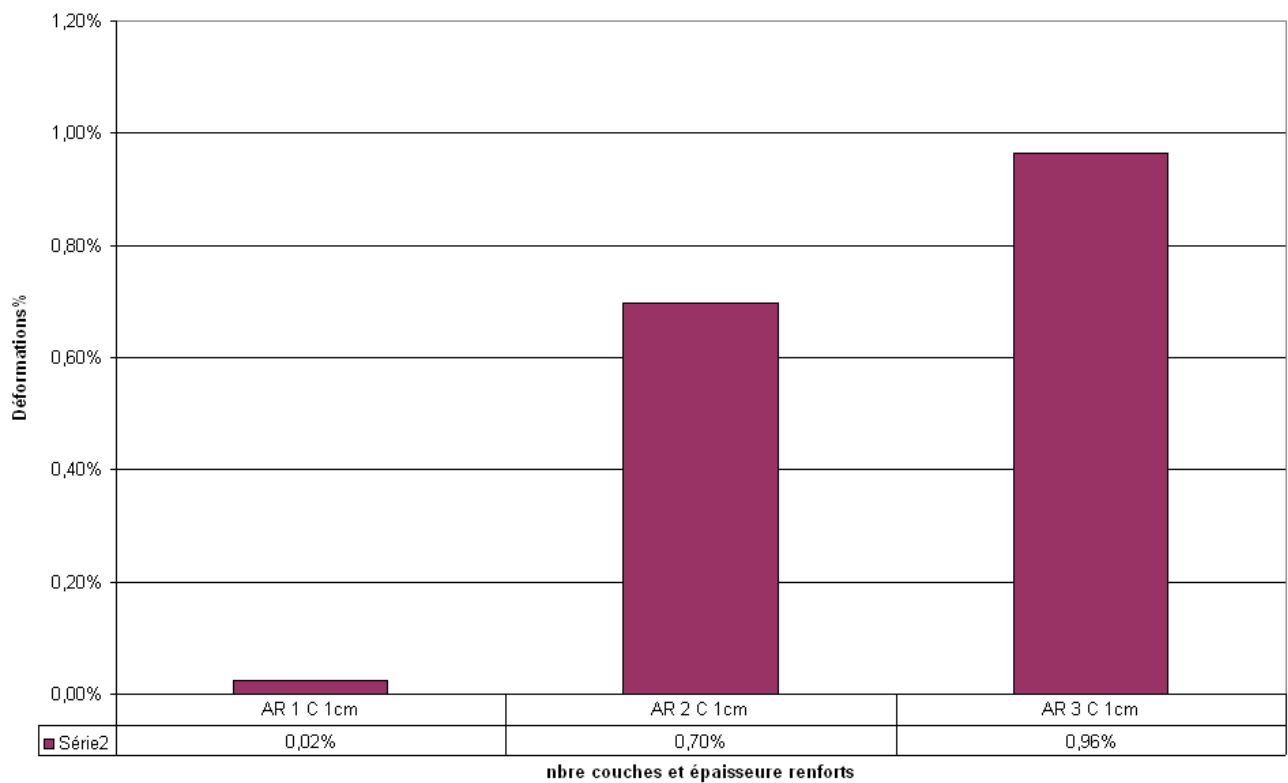


Figure 5.3.16 déformation ultime (Verre AR)

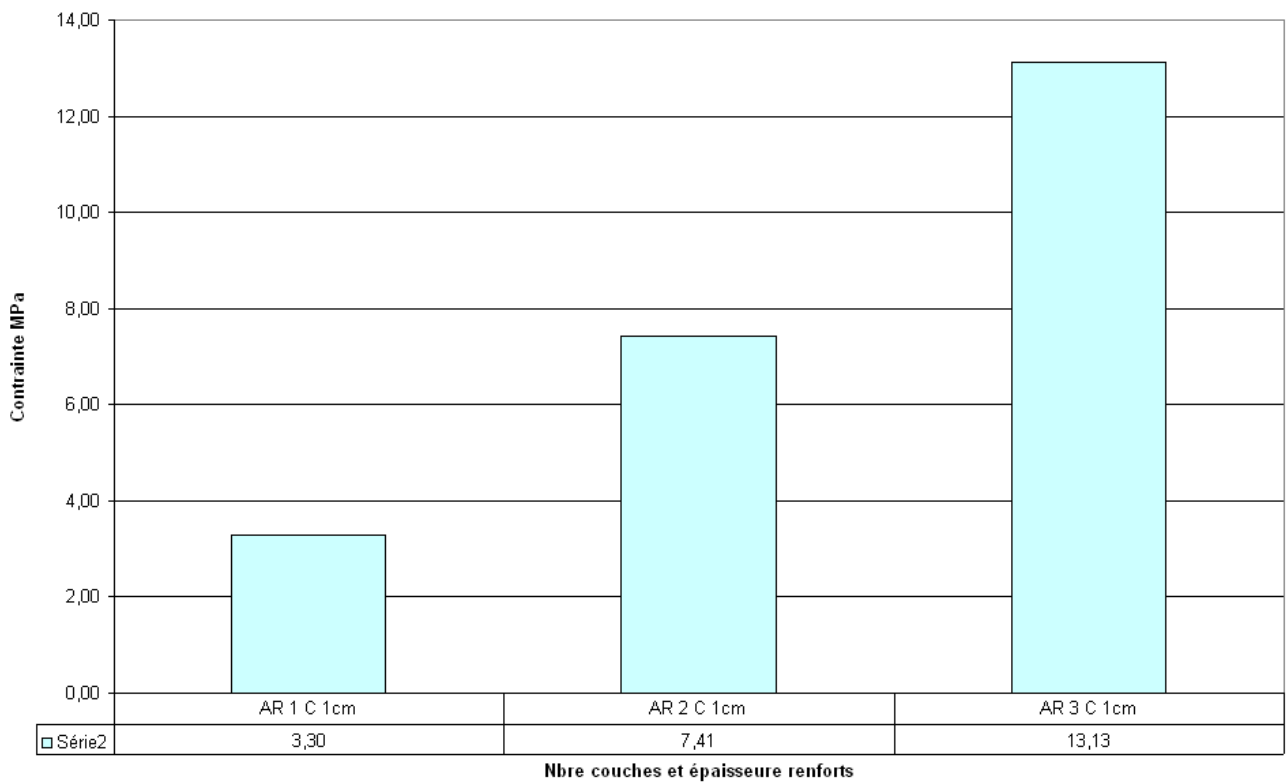


Figure 5.3.17 contrainte ultime (Verre AR)

- **Influence de l'épaisseur du TRC :**
 - Aramide :

Caractérisation des composites fibres-ciment

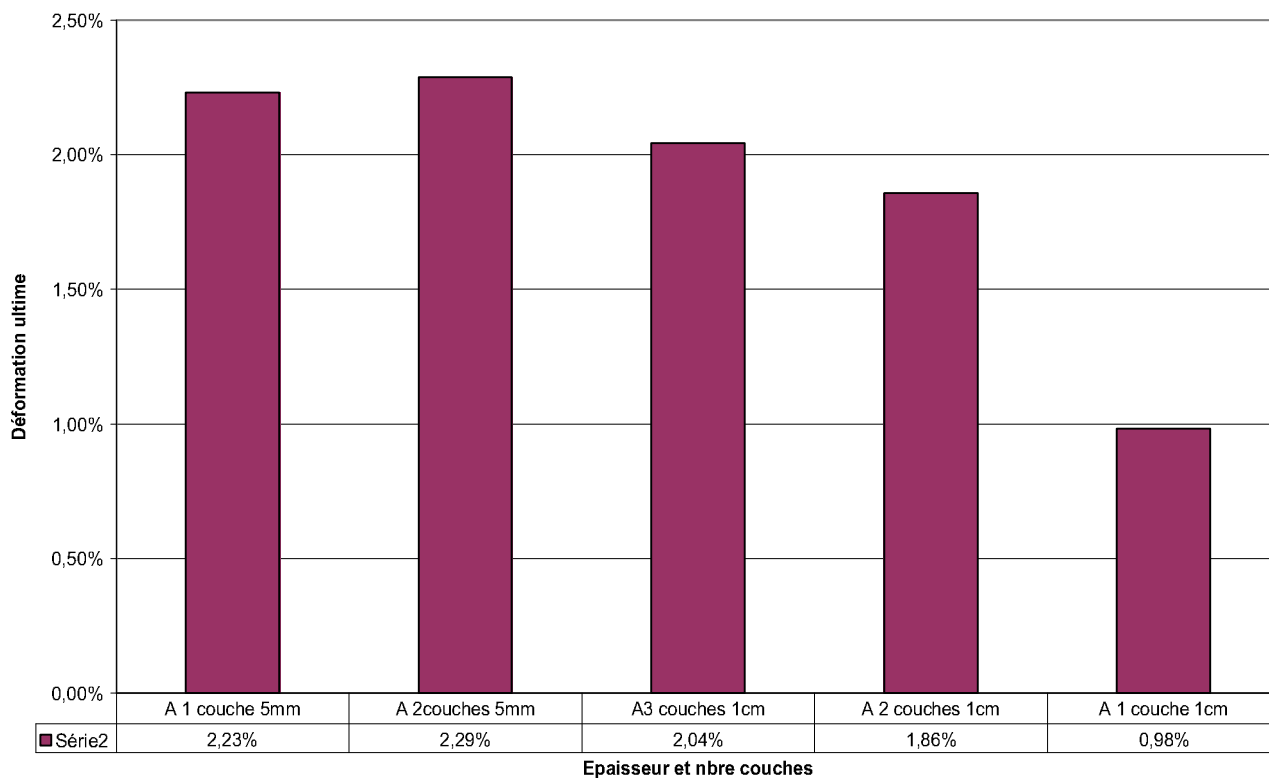


Figure 5.3.19 déformations ultimes (Aramide)

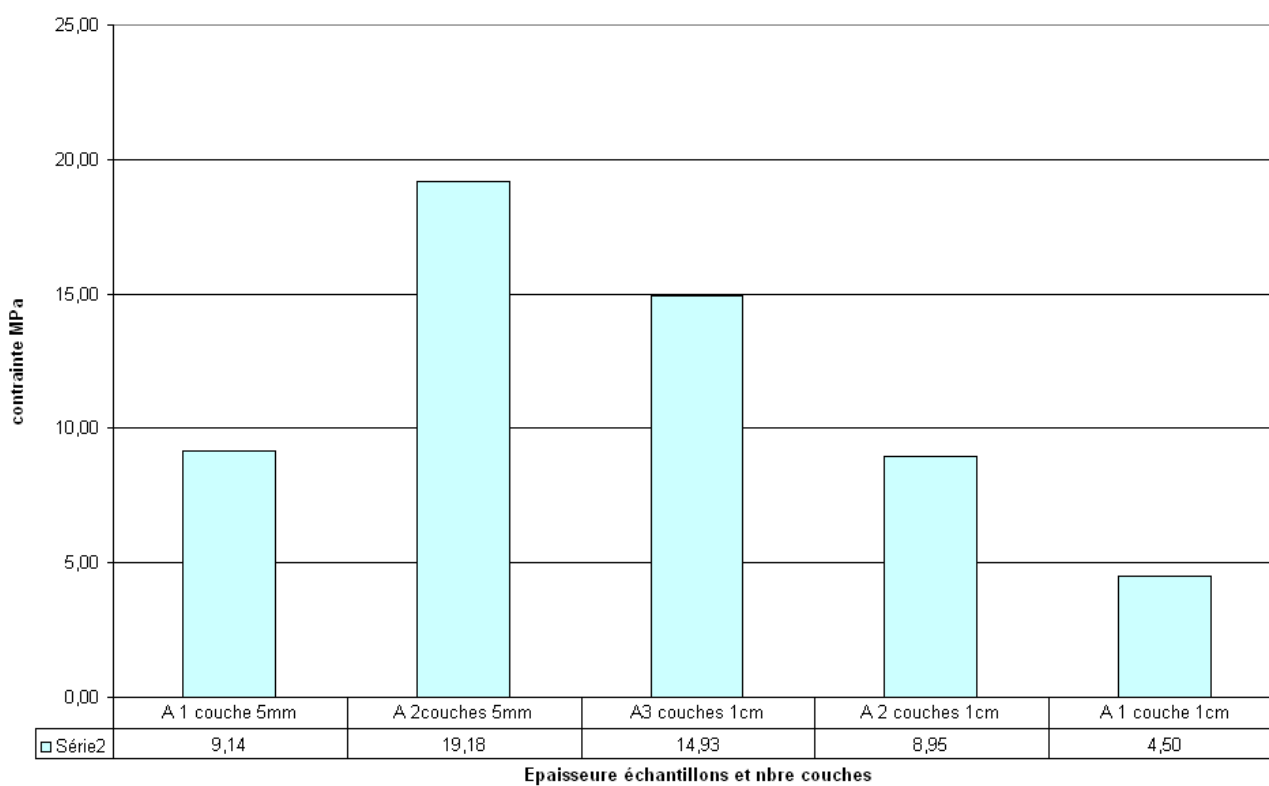


Figure 5.3.20 : contrainte ultime (Aramide)

-Basalte :

Caractérisation des composites fibres-ciment

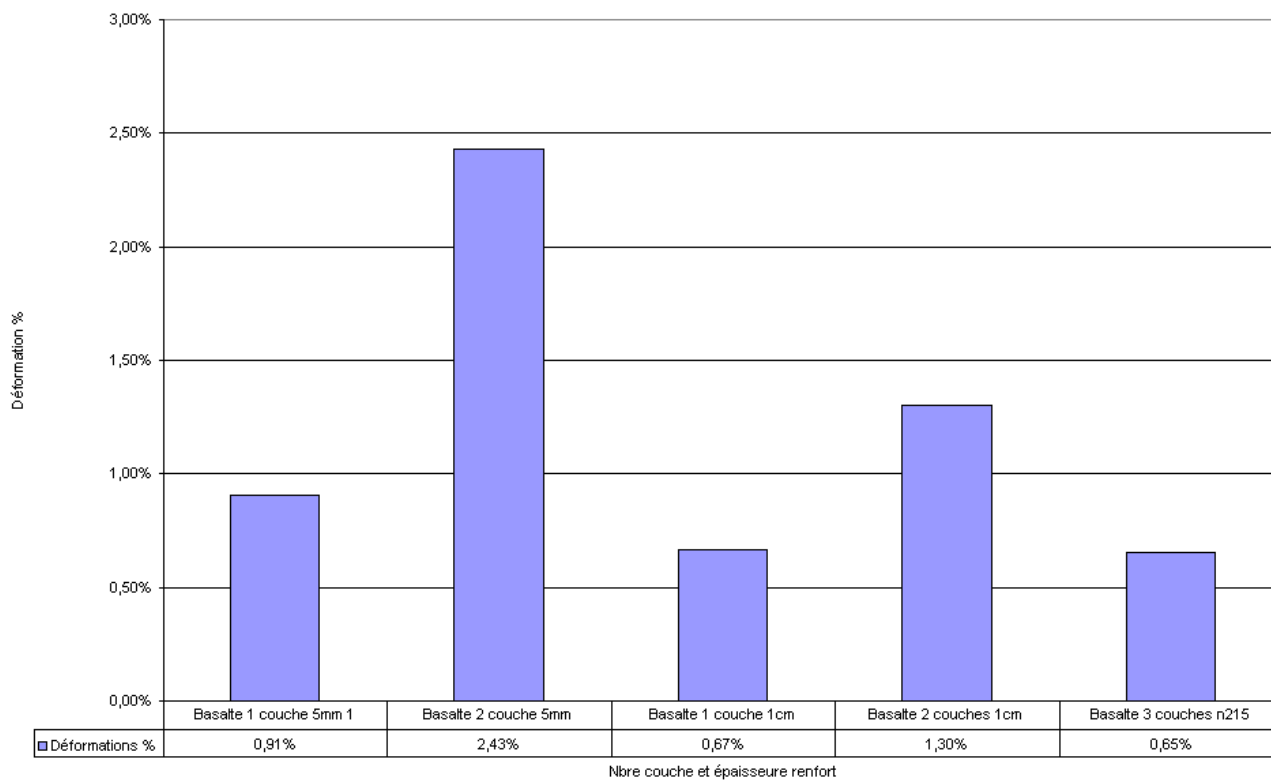


Figure 5.3.22 déformations ultimes (Basalte : 5 et 10mm)

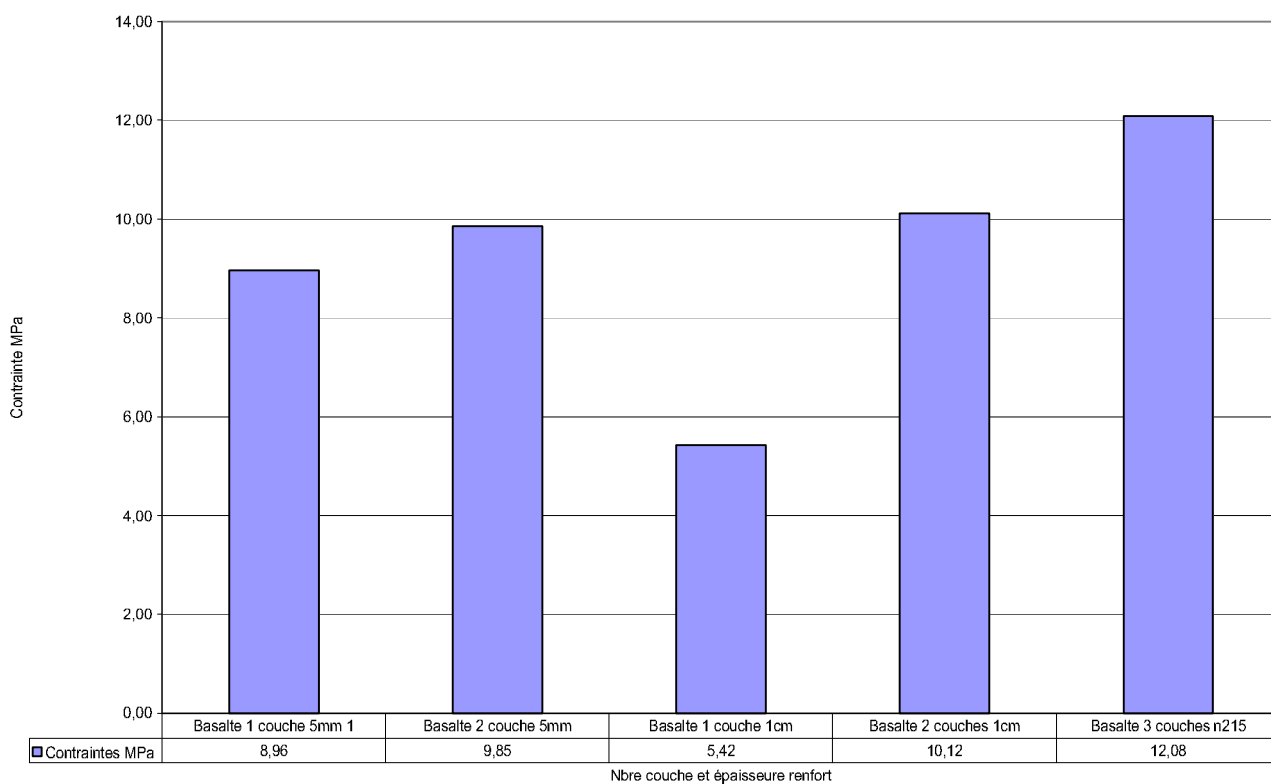


Figure 5.3.23 contraintes ultimes (Basalte : 5 et 10mm)

-Verre AR :

Caractérisation des composites fibres-ciment

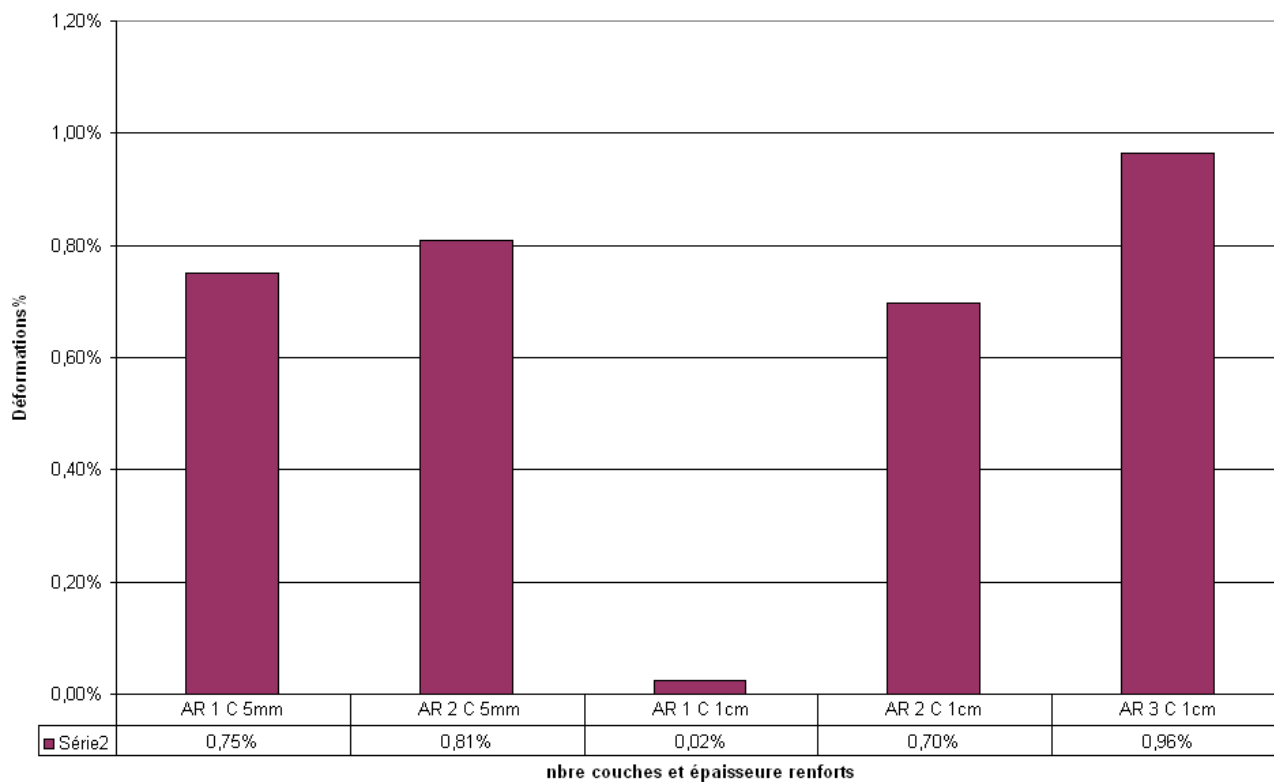


Figure 5.3.25 déformations ultimes (Verre AR)

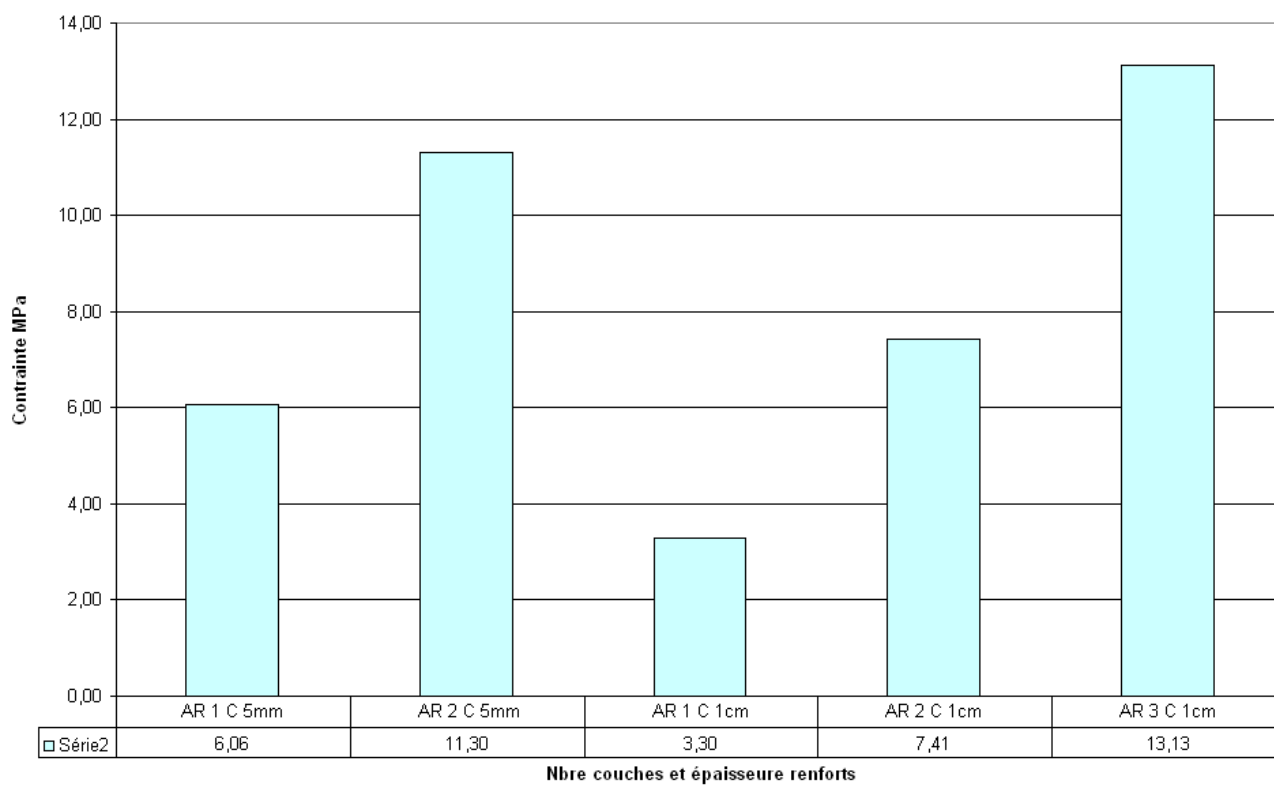


Figure 5.3.26 contraintes ultimes (Verre AR)

-Verre E :

Caractérisation des composites fibres-ciment

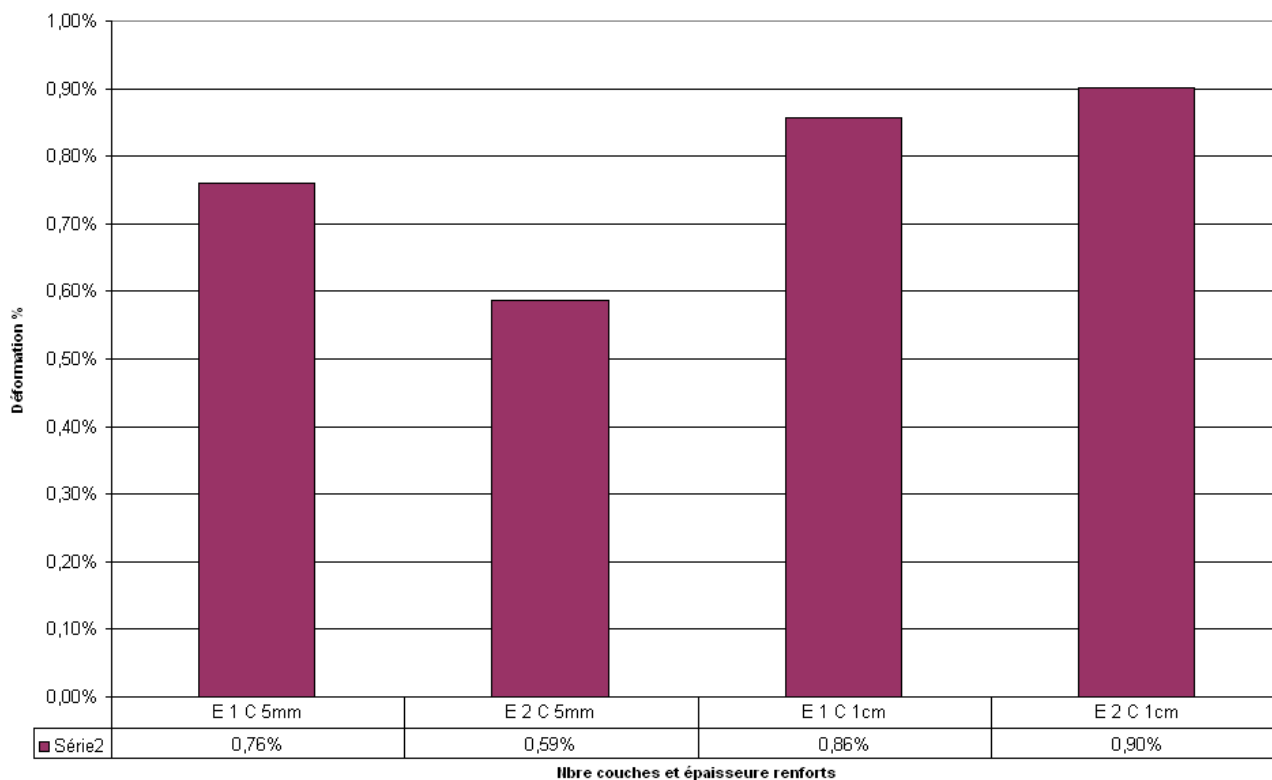


Figure 5.3.28 déformations ultimes (Verre E)

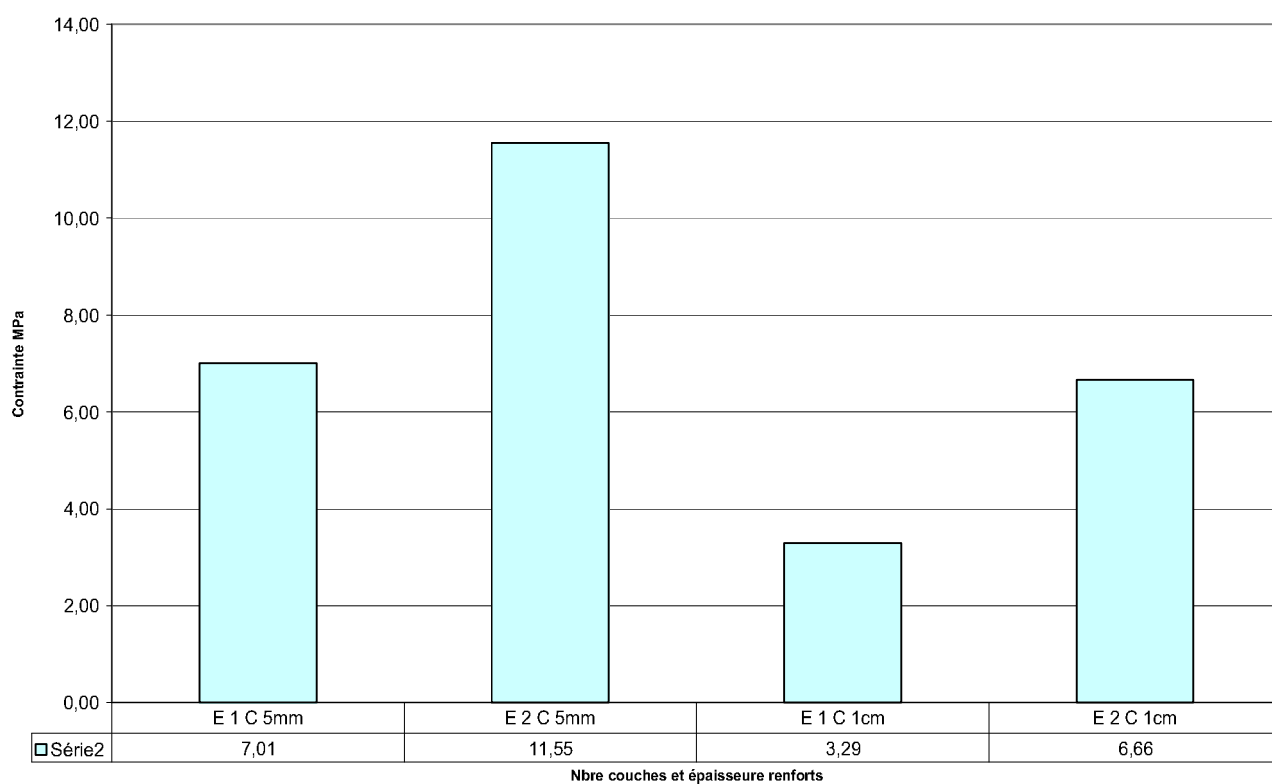


Figure 5.3.29 contraintes ultimes (Verre E)

➤ Influence de l'imprégnation des fibres :

Caractérisation des composites fibres-ciment

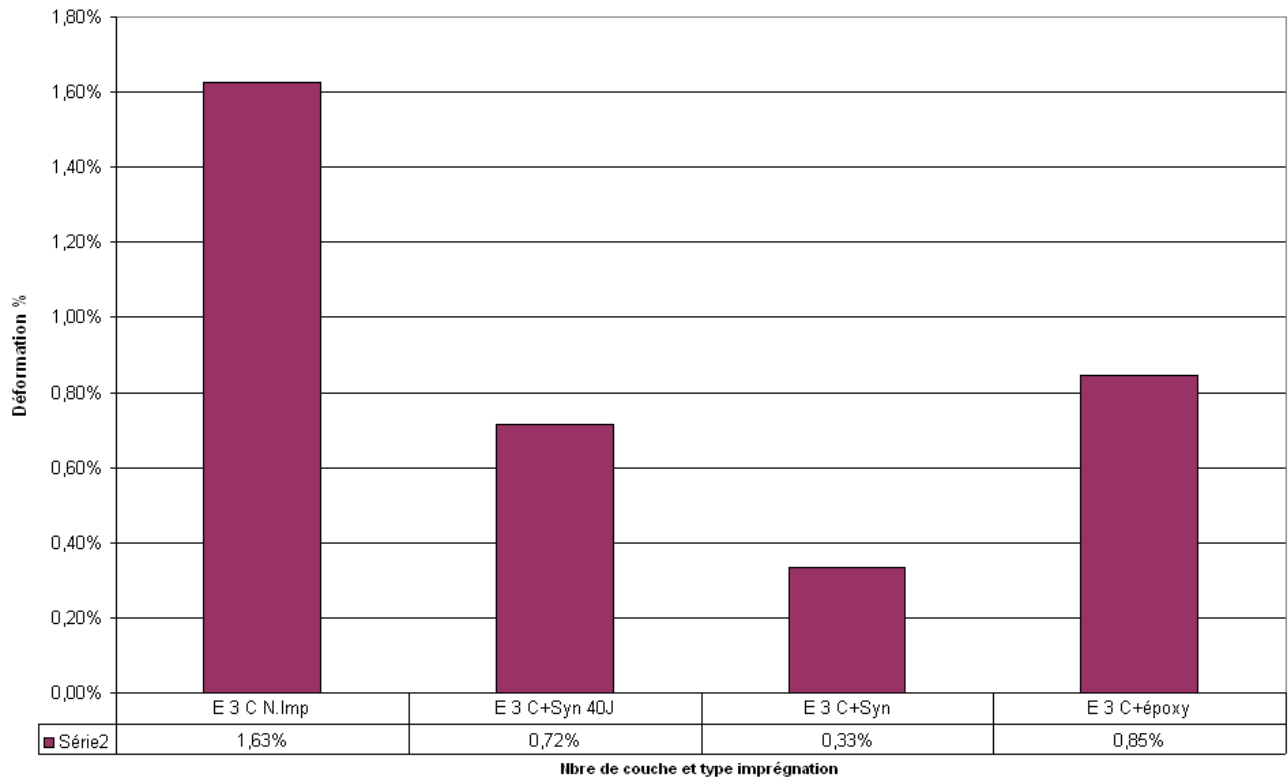


Figure 5.3.31 déformations ultimes

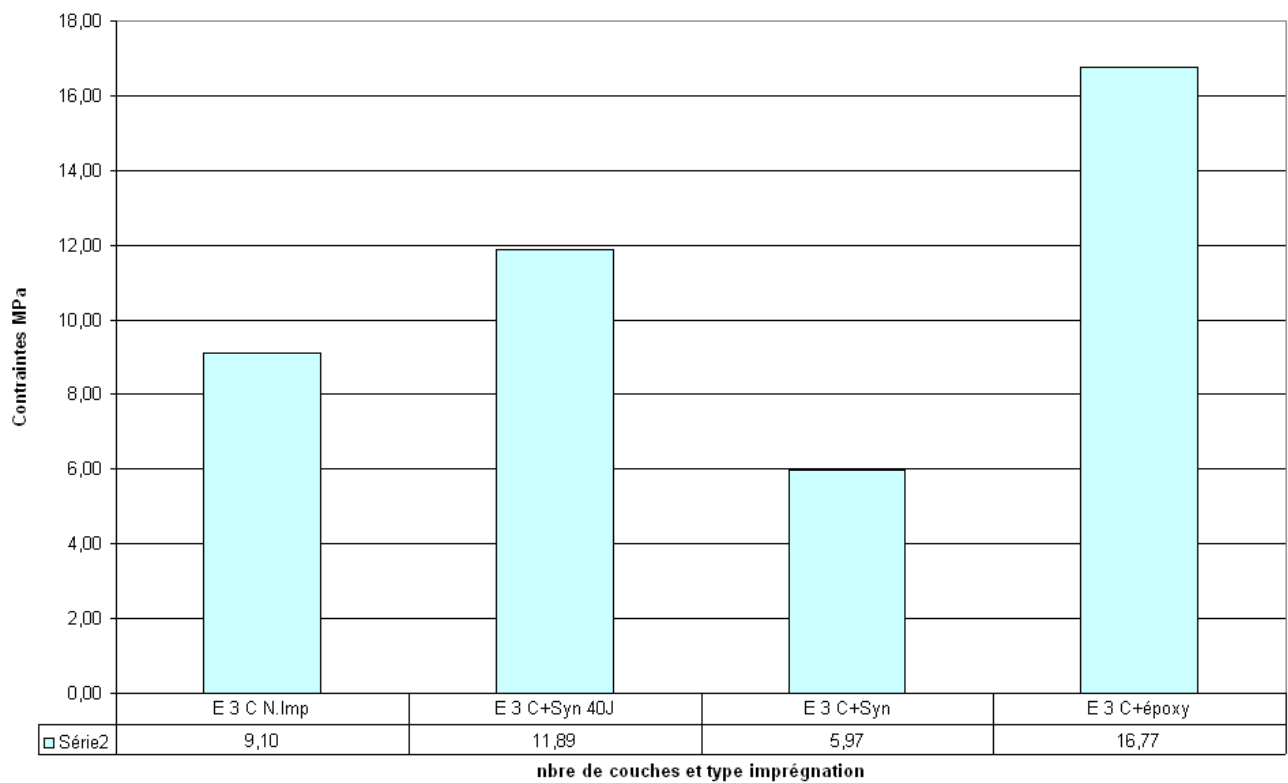


Figure 5.3.32 contraintes ultimes

Annexe 2 :

Théorie de calcul des poutres renforcées par du composite.

➤ **Fondement théorique du calcul d'une poutre renforcée par du composite :**

1-Hypothèses de calcul : Le calcul des pièces structurelles renforcées par du composite est basé sur des hypothèses utilisées pour le calcul béton armé et qui sont vérifiées et valables. Les principales hypothèses sont :

-Les sections droites restent droites après déformations.

-Le béton tendu est négligé.

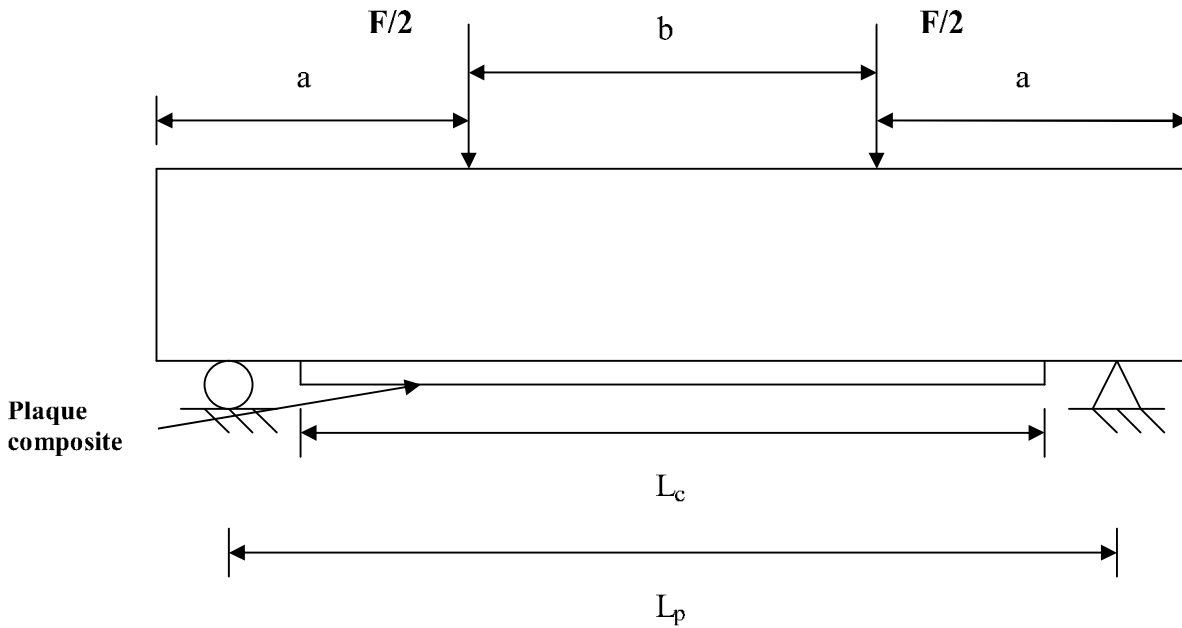
-Le non glissement des barres d'aciers, conséquence de l'adhérence parfaite entre acier et béton.

En plus de ces hypothèses, il faut considérer l'apport de la plaque de renforcement en résistance et une adhérence parfaite entre la plaque composite et la poutre. Aussi il y a à considérer deux états qui tiennent compte du comportement des matériaux : i) ELS : les matériaux ont un comportement élastique, ii) ELU : comportement ultime des matériaux béton armé et composite.

2- Résistance en flexion d'une poutre renforcée par du composite :

L'étude de la résistance en flexion d'une poutre se fera sur une poutre en flexion à 4 points, chargée en deux points symétriques par rapport aux deux appuis. La rupture est sensée être provoquer par la plastification des aciers en premier lieu, suivie par une rupture du béton en compression.

:



Poutre renforcée avec une plaque composite en intrados

- **Dans le cas de l'ELS :**

E. Ferrier et al (1999) proposent le figure à l'ELS suivant pour la détermination des contraintes dans chaque matériau constituant la poutre, en considérant le moment que la poutre doit reprendre. Pour l'application des principes du calcul béton armé on doit homogénéiser la section renforcée, en utilisant les coefficients d'équivalences : $N_s=15$ et $N_c=9$, l'inertie de la section équivalente est alors

$$I = I_c + N_s \cdot I_s + N_c \cdot I_{cf}$$

$$I = \frac{b \cdot X^3}{3} + N_s \cdot A_s \cdot (d - X)^2 + N_s \cdot A'_s \cdot (d' - X)^2 + N_c \cdot A_{cf} \cdot (H - X)^2$$

Où : I_c I_s I_{cf} : inerties des béton, aciers et composite respectivement, A_s A_{cf} : sections aciers et du composite respectivement. B, d, d', H : caractéristiques géométriques de la section (voir la figure).

La détermination de l'axe neutre de la poutre est donnée par la formule :

$$X = \frac{\sqrt{A^2 + 2 \cdot b \cdot B} - A}{B}$$

Avec : $A = N_s \cdot A_s + N_s \cdot A_s' + N_c \cdot A_{cf}$, et $B = N_s \cdot A_s \cdot d + N_s \cdot A_s' \cdot d' + N_c \cdot A_{cf} \cdot h$.

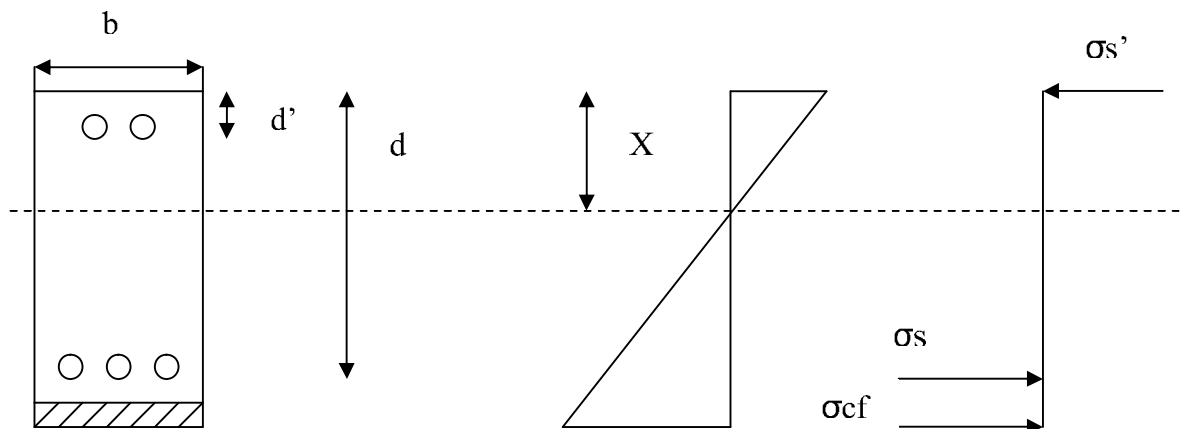
D'où les relations pour calculer les contraintes sont :

-Dans le béton : $\sigma_c = \frac{M \cdot X}{I}$

-Dans l'acier : $\sigma_s = \frac{M \cdot (d - X) \cdot N_s}{I}$

Dans le composite : $\sigma_{cf} = \frac{M \cdot (h - X) \cdot N_{cf}}{I}$

Le calcul des contraintes dans chaque matériau permet, entre autres, de vérifier l'état de contraintes dans chaque matériau.



Section rectangulaire renforcée soumise à la flexion simple

- **Dans le cas de l'ELU :**

Pour le cas de l'ELU, Ferrier et al (1999) propose de faire un calcul d'équilibre de section en considérant les états limites de déformations de chaque matériau, ceci permet de définir trois pivots A, B et C. En suite on définit les résistances limites de chaque matériau selon les formules suivantes :

Caractérisation des composites fibres-ciment

-Dans le béton : $f_{bu} = \frac{\alpha \cdot f_{bk}}{\gamma_b}$

-Dans l'acier : $f_{au} = \frac{f_{ak}}{\gamma_s}$

-Dans le composite : $f_c = \frac{E_c \cdot \epsilon_c}{\gamma_c}$

f_{bu} , f_{au} , f_c : contraintes ultimes du béton, de l'acier et du composite.

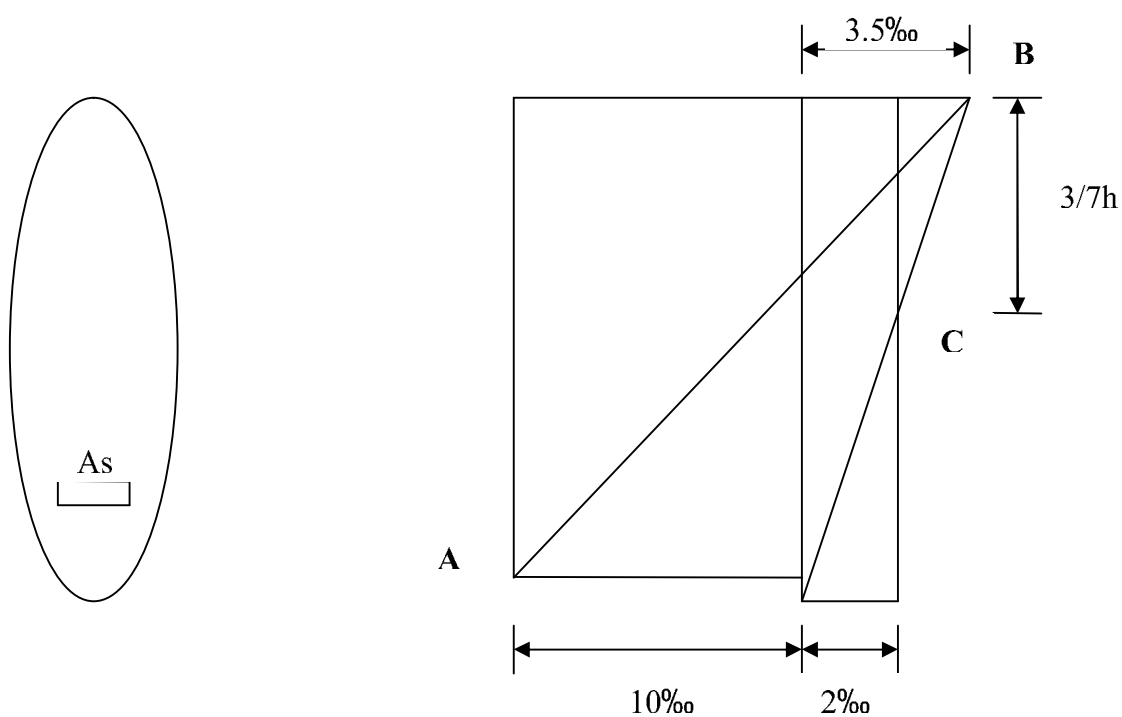


Diagramme des déformations à l'ELU

