

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil

Laboratoire : LaMoMS, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou

MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Sujet :

**" ETUDE PARAMETRIQUE DES MODELES DE
CONFINEMENT D'UN CYLINDRE EN BETON "**

Présenté par :

Promoteur : Pr. K. AIT TAHAR

TRIAA Tayeb

TIZI-OUZOU - 2011-

Created with

 **nitro**PDF professional

download the free trial online at nitropdf.com/professional

INTRODUCTION GENERALE

Depuis les Grecs et les Romains, les premiers utilisateurs du matériau 'béton', il a été considéré comme le matériau de construction des ouvrages de génie civil par excellence.

L'utilisation répandue du béton dans la construction provient de sa disponibilité et de son bas prix comparé à d'autres matériaux. L'économie, l'efficacité, la résistance et la rigidité du béton font de lui un matériau très populaire.

La plus grande partie des ouvrages de génie civil est conçue pour durer 100 ans en moyenne, mais le béton est un matériau relativement fragile, puisque environ 30% des ouvrages nécessitent une réparation pour assurer la sécurité des usagers avant d'arriver à leur limite de vie utile. De cela, l'idée d'introduire quelques barres en acier à l'intérieur du béton surgit et le problème de faible résistance en traction du béton fut ainsi résolu.

Malgré cette alternative, un ouvrage nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers. Cette maintenance consiste à les protéger, en assurant une meilleure étanchéité et en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance, dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages.

Une des techniques de réparation qui a été utilisée consiste à placer des plaques en acier à l'extérieur des structures endommagées, malheureusement cette technique présente un inconvénient majeur, qui est la difficulté de manipulation des plaques en acier, compte tenu de leur poids, ainsi que le problème de corrosion.

Depuis plusieurs années, la réfection et le renforcement des ouvrages en béton armé prennent de plus en plus de l'importance dans la construction. Plusieurs facteurs font, qu'il peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage : la corrosion des armatures, la fissuration du béton, des changements d'affectation qui imposent de nouvelles charges, un mauvais dimensionnement, l'évolution de normes, des accidents (choc contre un élément de structure),

l'endommagement par un tremblement de terre, la prolongation de la durée de vie d'un ouvrage, ...etc.

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

Les matériaux composites utilisés pour le renforcement des structures, apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue au choc et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique et phonique et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique.

Toutes les études réalisées dans domaine de renforcement ou de confinement des structures en béton cherchent non seulement à trouver une solution à un problème déjà existant mais aussi, à mener vers un endommagement progressif, sans perte de résistance significative pour éviter la rupture brutale.

Beaucoup d'observations ont montré que la rupture des colonnes, peut avoir comme conséquence l'effondrement total des structures, particulièrement pendant des tremblements de terre. Ainsi, la résistance et la ductilité des colonnes sont les paramètres les plus importants dans n'importe quelle structure. Plusieurs chercheurs ont rapporté que le confinement de béton par FRP a comme conséquence une croissance significative de la résistance et de la ductilité

L'objectif principal de notre travail est de faire une analyse paramétrique des modèles de confinement des cylindres en béton, à base d'un programme d'analyse développé en langage DELPHI.

Cette étude est constituée de quatre principaux chapitres :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les matériaux composites, le matériau béton et ses différentes composantes nécessaires à sa fabrication. On y trouve également, l'essentiel des pathologies affectant les ouvrages en béton, classées en fonction de leur origine chimique, physique ou mécanique.

- Le deuxième chapitre est totalement consacré aux différents développements des modèles de confinement des colonnes de béton, confinés par différentes techniques et matériaux.
- Le troisième chapitre est consacré au développement d'un programme de calcul paramétrique des modèles de confinement des cylindres en béton et à la présentation des différents résultats.
- Le quatrième chapitre présente l'analyse des différents résultats obtenus selon l'application de tous les modèles de confinement, utilisés dans notre étude et leurs confrontations. L'effet du type de renfort sur le taux de confinement procuré au béton est analysé en considérant le modèle développé pour le cas d'un confinement avec des grilles métalliques incorporées dans la matrice béton.

Une conclusion générale et des perspectives terminent notre travail

1.1- INTRODUCTION

Les ouvrages en béton subissent, au cours de leur vie de service, des modifications structurelles importantes selon leurs importances, leurs exploitations et leurs positions environnementales (zones humide, saline, sismique, etc.). Ces modifications sont, entre autres : Le vieillissement des matériaux, la corrosion des aciers, les accidents, etc.

Dans la plupart des cas, ces modifications sont néfastes à la stabilité des ouvrages. Faute de financement pour des constructions nouvelles, la conservation du patrimoine, la réhabilitation et la durabilité sont aujourd'hui les concepts à la mode, dans le domaine du génie civil. Inévitablement dans un tel contexte de dégradation, de déclassements prématurés des ouvrages existants et d'augmentation de la charge d'exploitation dans le cas des ponts-routes, on assiste à un intérêt accru porté au développement des techniques de réparation et de renforcement, ce qui amène les maîtres d'ouvrages à prévoir et à développer de nombreuses techniques de renforcements et de réparations. [1].

Depuis le début des années 80, des programmes d'évaluation et des expertises ont été lancés partout dans le monde et les résultats montrent toujours que l'état des ouvrages est inquiétant.

Avant de procéder à toute réparation, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes des dégradations, lorsque celles-ci n'apparaissent pas de façon évidente. En effet, cette étape est nécessaire pour le choix de la réparation optimale qui peut être définie comme la réparation la plus durable et la plus économique.

L'objet du présent paragraphe est de présenter une synthèse bibliographique des différents travaux dans le domaine de notre étude. Dans la première partie, on présente le matériau béton et ses différentes composantes nécessaires à sa fabrication. Ensuite, on présentera l'essentiel des pathologies affectant les ouvrages en béton, en les classant en fonction de leur origine chimique, physique ou mécanique et sans avoir, toutefois, l'ambition d'être exhaustif, tant les situations des ouvrages existants peuvent être diverses. Par la suite, nous citerons les différentes méthodes de renforcements et de réparations, et plus particulièrement le renforcement par des matériaux composites.

1.2- LE BETON

Un bref historique du béton ainsi que ses principaux composants sont décrits dans ce chapitre.

I.2. I. UN PEU D'HISTOIRE

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Il est formulé en fonction de l'usage auquel il est destiné et utilisé, essentiellement pour la construction d'ouvrages de génie civil et d'architecture.

Vers 2600 avant JC, les Assyriens et les Babyloniens ont employé l'argile comme un matériau liant, c'est à dire comme le ciment. Les Egyptiens ont utilisé un ciment à base de chaux et de gypse.

En 1756, un ingénieur anglais, John SMEATON a fait le premier béton moderne (ciment hydraulique) en utilisant l'addition de gravillons naturels ressemblants aux graviers et d'un mélange de briques pulvérisées comme ciment.

En 1824, un inventeur anglais, Joseph ASPDIN a inventé le Ciment Portland qui est le matériau le plus utilisé à ce jour pour la production de béton. Ce premier ciment artificiel a été créé par le brûlage simultané d'argile et de roches calcaires. Le processus de brûlage change les propriétés chimiques de ces matériaux, et de cette façon, ASPDIN a créé un ciment avec une résistance à la compression très supérieure à celle des mortiers de chaux qui étaient utilisés jusqu'alors. Le seul inconvénient de ce matériau nouveau est sa faible résistance à la traction.

En 1849, un jardinier parisien, Joseph MONIER a inventé le béton armé à partir de l'idée de renforcer les bacs à fleurs qu'il construisait en béton en y incorporant des barres en fer. Cette nouvelle invention a été brevetée en 1867. Cette armature métallique permet au béton de supporter les contraintes de traction.

En 1928, un ingénieur français, Eugène FREYSSINET a inventé le béton précontraint par fils adhérents. Sans son invention, largement utilisée par ses successeurs dans le monde entier, de nombreux ouvrages contemporains (par exemple : Figure 1-1) n'auraient pu être construits ou le seraient différemment.



Figure I.1. *Pont de Normandie avec 856 mètres de travée centrale. I – Etude bibliographique*

II.2.2. COMPOSANTS

Une proportion précise des composants du béton est fondamentale pour obtenir les caractéristiques mécaniques visées pour la structure finale. Ces composants sont énoncés ci-dessous:

I.2.2. I. CIMENT

Le ciment joue le rôle de liant dans le béton hydraulique. Il est lui-même composé de clinker, associé à des constituants secondaires tels que, le laitier de haut fourneau : un résidu minéral issu de la préparation de la fonte à partir du minerai de fer et du coke métallurgique, de cendres volantes ou de fillers calcaires (granulats fins obtenus par broyage de roches).

Suivant la proportion de ces éléments, cinq types de ciment sont possibles : le ciment Portland, le ciment Portland composé, le ciment de haut fourneau, le ciment de haut-fourneau à haute teneur en laitier, le ciment aux laitiers et le ciment aux cendres.

Le ciment Portland est utilisé dans la préparation des bétons armés. Le ciment Portland composé est, quant à lui, destiné aux travaux de dallage et aux routes. Les autres types de ciment sont réservés aux travaux ne nécessitant pas une résistance particulière à la chaleur. Ils sont tous indiqués pour les travaux souterrains et les ouvrages massifs en eaux agressives.

I.2.2.2. EAU DE GACHAGE

Il est important de respecter les proportions de tous les composants, spécialement de l'eau de gâchage. Par exemple, trop d'eau augmente la porosité du béton et modifie ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

L'association ciment – eau génère des réactions extrêmement complexes. Silicates et aluminates se développent pendant la phase d'hydratation. Ils forment alors un gel cristallin qui marque le début du phénomène de "prise".

Au cours de la phase de durcissement, qui peut durer plusieurs mois, la multiplication des microcristaux augmentent les résistances mécaniques. Le béton se transforme, alors, en une véritable roche composite.

1.2.2.3. GRANULATS

Les granulats se caractérisent par les propriétés intrinsèques de la roche dont ils sont issus : coloration, caractéristiques mécaniques et physico-chimiques. Ils vont influencer directement les propriétés esthétiques, mécaniques et la durabilité du béton. Le granulats est généralement composé de sable, de gravier, de pierres concassées, de galets ou de cailloux.

Les granulats sont également traités mécaniquement pour adapter leur forme, leur granulométrie et leurs propriétés. Ces traitements influencent très fortement les caractéristiques, comme la demande en eau, l'ouvrabilité et la résistance mécanique du béton.

1.2.2.4. ADJUVANTS

Les adjuvants sont incorporés au béton en faible quantité (moins de 10 kg/m³). Les réducteurs d'eau vont permettre soit d'utiliser moins d'eau pour une qualité égale, soit de réaliser un béton très fluide avec une quantité d'eau moindre. Les super plastifiants ou fluidifiants possèdent des propriétés similaires à celles des réducteurs d'eau, mais avec une efficacité beaucoup plus importante. Ils permettent des fluidités extrêmes et sont utilisés pour produire des bétons autoplaçants et autonivelants.

D'autres adjuvants autorisent la modification de la prise et du durcissement comme les accélérateurs de prise. Ils vont permettre de décoffrer plus rapidement lors de températures faibles. Au contraire des retardateurs qui sont utilisés pour maintenir l'ouvrabilité du béton sur une plus grande durée. A savoir également que : les hydrofuges de masse rendent les bétons imperméables aux liquides, les entraîneurs d'air vont quant à eux le rendre insensible au gel et aux produits dégivrants.

I.3. PATHOLOGIES AFFECTANT LES OUVRAGES EN BETON

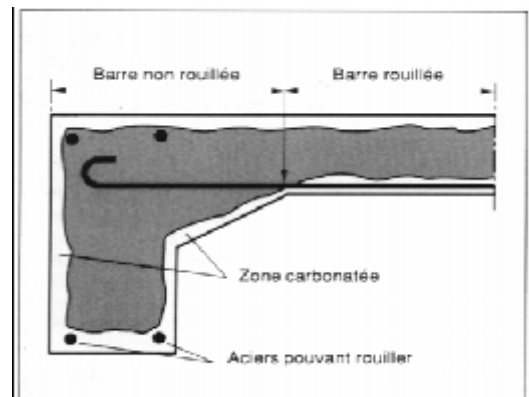
I.3.1- PATHOLOGIES D'ORIGINE CHIMIQUE

a - Carbonatation et corrosion des aciers

Il est important de retenir que le béton est un matériau basique et que, pour cette raison, il est vulnérable aux attaques acides et, plus particulièrement, à celles faisant intervenir des acides forts. La carbonatation est une réaction chimique entre la chaux du béton et le dioxyde de carbone de l'air, qui a pour effet d'abaisser le pH de la phase interstitielle du béton.



(a) carbonatation d'une pièce de structure



(b) Corrosion des armatures

Figure I.2. *Carbonatation du béton et conséquences sur la structure*

Les conséquences de cette réaction chimique sont très dommageables pour les armatures qui se trouvent à un pH, où elles ne sont plus passivées et peuvent alors se corroder (figure I.2) [2].

b- Réactions sulfatiques

Les réactions sulfatiques sont provoquées par l'action des sulfates provenant du milieu extérieur (eaux souterraines, remblais contenant des sulfates, pluies acides), avec la chaux et les aluminates du ciment. Le produit final de la réaction est l'ettringite, dont le développement au sein du béton provoque une expansion, qui altère les caractéristiques mécaniques du béton. La chaîne de réactions chimiques aboutissant à la formation d'ettringite est bien connue, en effet, on connaît les équations chimiques qui décrivent l'oxydation des sulfures de fer, l'hydrolyse des sulfates ferreux, ainsi que l'attaque des différents constituants de la pâte de ciment par les ions sulfates. Cette chaîne est présentée dans les travaux de Deloye F.X [3].

c- Alkali-réaction

Les alcali-réactions sont des réactions chimiques entre certaines formes de silice ou de silicate contenus dans les granulats et les alcalins du béton. Les mécanismes de l'alcali-réactions sont complexes et font toujours l'objet de travaux de recherche. Les principales conséquences de cette réaction consistent en la formation d'un gel expansif, entraînant un gonflement du béton.

Ce gonflement engendre à son tour des contraintes internes au sein de la structure. Il en résulte une expansion de la structure, ainsi qu'une création de fissures de différentes formes (Figure I3). Outre le gonflement et la fissuration, l'alcali-réaction a pour conséquence de diminuer les propriétés mécaniques du béton. [4].

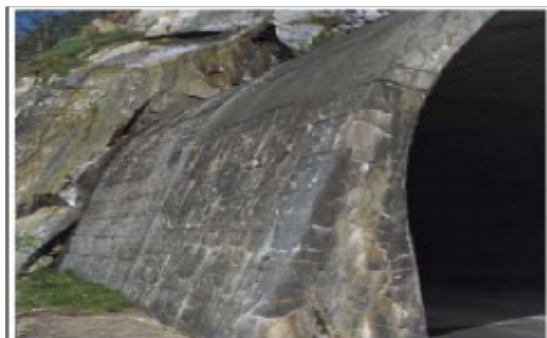


Figure I.3 : *Entrée d'un tunnel. Fissurations grossières dues*

1.3.2- PATHOLOGIES D'ORIGINE PHYSIQUE

a- Retrait

Le retrait est un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein du béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement. Il correspond à l'action du départ de l'eau excédentaire du béton vers l'extérieur de l'élément de structure. Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle.

Les différents types de fissures de retrait peuvent être classés, suivant leur ordre chronologique d'apparition, en trois types [5]:

Fissures apparaissant une ou deux heures après le bétonnage : ces fissures sont provoquées par le tassement du béton frais. Elles sont relativement profondes et ouvertes et affectent les surfaces

horizontales provoquant un gradient vertical de l'ensemble des caractéristiques physiques et mécaniques.

Fissures apparaissant juste après le décoffrage : ces fissures affectent aussi bien les surfaces horizontales que les parements verticaux. Ces fissures sont généralement fines et peu profondes, mais elles peuvent être plus ouvertes lorsque le retrait thermique en est la cause.

Fissures apparaissant plusieurs jours ou plusieurs mois après le décoffrage : Ces fissures sont créées par le retrait à long terme. Ce retrait résulte du départ de l'eau en raison de la mise en équilibre hygrométrique de la structure en béton avec son milieu extérieur.

b- Gel-dégel

L'eau infiltrée dans le béton augmente de 9 % en volume lors du gel. Cette augmentation de volume engendre des contraintes internes créant ainsi des fissurations [6]. La succession des cycles d'humidification et de gel élargit peu à peu ces micro-fissures qui engendreront la destruction en surface du béton, sous la forme de plaquettes



Figure I.4. *Dégradation d'un ouvrage soumis au gel dégel*

La dégradation par gel-dégel est amplifiée par des chocs thermiques. En effet, la chaleur de fusion de la glace est de 80 cal/kg. Cette chaleur est empruntée au voisinage immédiat du lieu où se trouve la glace, cette couche se trouve alors soumise à une chute brutale de température qui passe en dessous de 0°C, et l'on aboutit à des sollicitations dans le béton de type choc thermique. L'une des méthodes les plus employées pour pallier les problèmes de gel-dégel est l'emploi, au

moment de la mise en œuvre, d'adjuvant tels que des entraîneurs d'air. La principale fonction de ces entraîneurs d'air est de créer des vides permettant de compenser le gonflement du béton.

1.3.3. PATHOLOGIES D'ORIGINE MECANIQUE

a- Les chocs

Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Il s'agit le plus souvent d'action accidentelle de type mécanique qui se concrétise par des chocs [7]. Les chocs les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs de bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière. Ces chocs peuvent créer des épaufrures, des éclats important de béton, voir même des ruptures d'acier.

b- Délaminage

L'action conjuguée des sollicitations climatiques, et du trafic circulant directement sur le béton des hourdis de ponts a provoqué des délaminages du béton sur un nombre considérable d'ouvrages d'art. Dans les cas les plus graves, cette pathologie aboutit à la chute de plaque de béton et à la création de trous dans les tabliers de ponts.

D'autres types de pathologie peuvent être rencontrés dans les ouvrages en béton, telles que celles dues aux erreurs de conception ou encore les erreurs d'exécution qui peuvent intervenir dès la fabrication du béton et se poursuivre jusqu'à la mise en service finale de l'ouvrage (Figure I5)

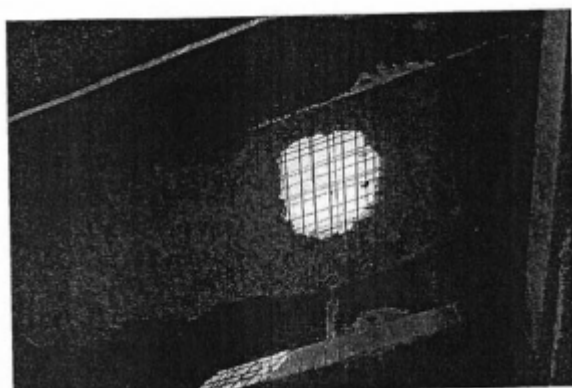


Figure I. 5. Délaminage du béton d'un hourdis de pont engendrant la formation d'un trou

I.4. METHODES DE RENFORT ET DE REPARATION DES CONSTRUCTIONS

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe du renforcement ou de la réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème du renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation).

Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir la notion de PROTECTION de l'ouvrage visant à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, la notion de REPARATION visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de RENFORCEMENT ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structure vis-à-vis de conditions d'exploitations modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes technologies de réparation et de maintenance des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années.

I.4. I. LA NECESSITE D'UN RENFORT

Les causes qui conduisent à un renfort structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas devant être considéré comme un cas particulier. Les plus fréquents sont :

- *Accroissement des charges qui sollicitent la structure* : Changement d'usage de la structure (ex : bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial), augmentation du niveau d'activité dans la structure (ex : anciens ponts soumis au trafic actuel), installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.

- *Défauts dans le projet ou dans l'exécution* : Armature insuffisante ou mal placée, mauvais matériaux, dimensions insuffisantes des éléments structuraux.

- *Rénovation des structures anciennes* : Prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres), connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que

des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou période, vieillissement des matériaux avec perte des caractéristiques initiales.

- *Changement de la forme de la structure* : Suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul, ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.
- *Dégâts dans la structure* : Corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton, impacts contre la structure, incendies.
- *Nécessité d'améliorer les conditions en service* : Diminuer les déformations et flèches, réduire la contrainte dans les armatures, diminuer l'ouverture des fissures.

Parmi les nombreuses procédures, les plus courantes sont :

- *Incorporation de profils en acier* : il s'agit de construire une structure parallèle à celle déjà existante qui supporte les charges. Ce type de structure demande beaucoup d'espace, il est seulement viable pour de grands renforcements.
- *Collage d'éléments préfabriqués* : cette méthode nécessite des ouvrages spéciaux associés.
- *Addition d'armatures en acier sans augmentation de la section en béton* : cette technique est normalement employée pour le remplacement d'une ancienne armature, en cas de corrosion.
- *Augmentation de la section en béton avec ou sans addition d'armature en acier*. Le béton peut être coulé ou projeté.
- *Adjonction de platines en acier*. L'acier collé au béton augmente la section structurelle résistante. On l'utilise dans les poutres, dalles, murs, piliers.
- *Adjonction de lamelles ou bandes de matériaux composites*. Le concept est le même que dans le cas précédent, à la différence que l'élément résistant incorporé est fait de lamelles de matériaux composites, habituellement, de résine époxy et de fibres de carbone.

a- Adjonction d'armature complémentaire:

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage) (Figure I6).

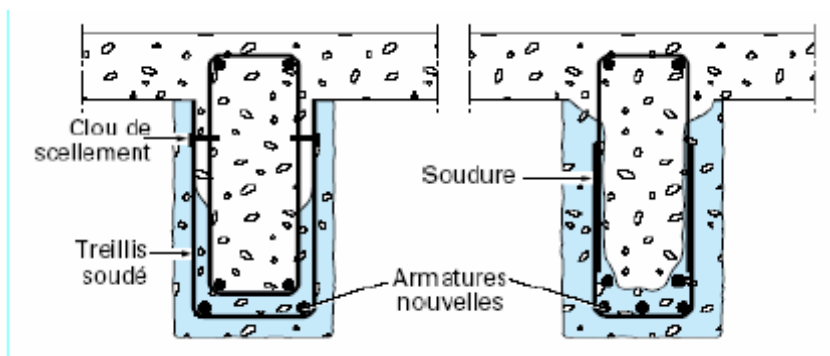


Figure I. 6. *Réparation de poutre par adjonction d'armature*

b- Béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défailantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée. Dans le premier cas, la grande vitesse de projection (80 à 100 m/s) fait que le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages, car il permet d'obtenir un béton très compact. Dans le second cas, la faible vitesse de projection (10 à 40 m/s) rend indispensable l'exécution préalable d'une couche d'accrochage. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond (Figure I7). Une description détaillée de cette technique est donnée dans l'ouvrage de Resse [8].

Selon Resse, les travaux de réparation par béton projeté se regroupent en deux catégories : les réparations superficielles et les réparations profondes. Grâce à son adhérence au support, à ses caractéristiques très proches de celles du béton coffré, aux possibilités de mise en place et d'enrobage d'armatures de renfort qu'il procure, le béton projeté permet de réaliser économiquement de telles réparations.

La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité).

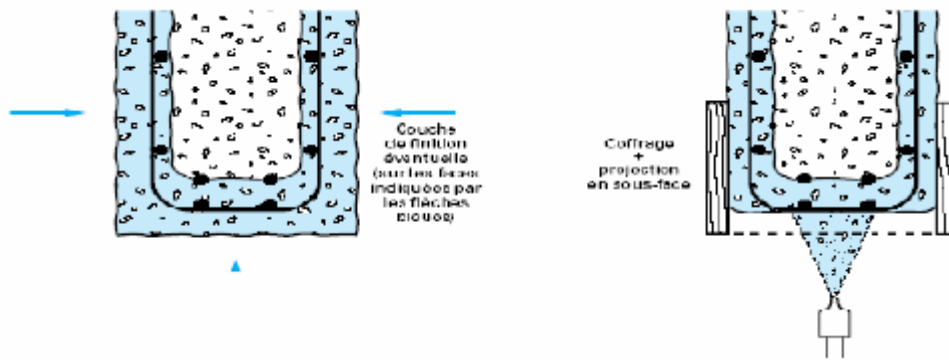


Figure I.7. Réparation de poutre par béton projeté

C - Tôles collées

Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connu sous le nom de procédé 'l'Hermitte', consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. Ainsi, L'Hermitte [9] s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier.

Selon Theillout J. N [10], trois problèmes mécaniques se posent, lors de l'utilisation de tôles extérieures collées au béton pour le renforcement des structures :

- la mise en flexion locale de la tôle au voisinage des fissures qu'elle recouvre,
- la répartition des efforts repris par les tôles dans le cas d'utilisation d'empilement,
- la répartition des déformations entre les aciers internes au béton et les aciers collés extérieurement.

L'acier de renfort est constitué, dans la plupart des cas, de tôle d'acier de nuance E24, d'épaisseur de 3 à 5 mm.

Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir toute leur préparation en usine (découpage, sablage...).

La mise en place des tôles nécessite une très bonne préparation de chantier ainsi qu'une excellente coordination des équipes. Le collage impose un dispositif de serrage pouvant être un étaielement, un serrage par serre-joint ou un serrage par vérins plats. L'emploi de ce mode de réparation est particulièrement limité à cause de sa mise en œuvre difficile et onéreuse.

Ce procédé consiste en un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles, la réalisation du placage,

etc., doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées ou à des laboratoires du fait de la difficulté de la mise en œuvre de cette technique, certains procédés font d'ailleurs l'objet de brevets (ex. : brevet UTI-L'HERMITE, inventeur de la technique)

Dans les locaux devant présenter, du fait de leur destination, une certaine résistance au feu, l'étude mécanique des renforcements doit être complétée par celle de l'isolation thermique permettant de soustraire la colle aux effets des incendies dans les conditions requises.

La colle utilisée est, généralement, une résine époxyde. Son épaisseur est de 0,5 à 1 mm. Les tôles d'acier, de qualité courante, ont une épaisseur limitée à 3 mm [11]. Toutefois, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés :

- sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien quotidien) ;
- impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur ;
- nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine ;
- impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.



Figure I.8. *Renforcement d'un viaduc par tôles collées*

d- Précontrainte additionnelle

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus et qui consistent en l'ajout de matière (béton ou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de résistance dans des ouvrages existants, en vue, soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel

état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures de précontrainte (câble ou barres).

La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiter une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoirs, bâtiment). Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs. (Figure I9). En revanche, la mise en œuvre de tout ce qui concerne la protection définitive des armatures, nécessite un niveau particulier de qualité. De plus, le recours à des unités de plus en plus puissantes pour en limiter le nombre implique une étude particulièrement soignée des zones d'ancrage, très fortement sollicitées [2].

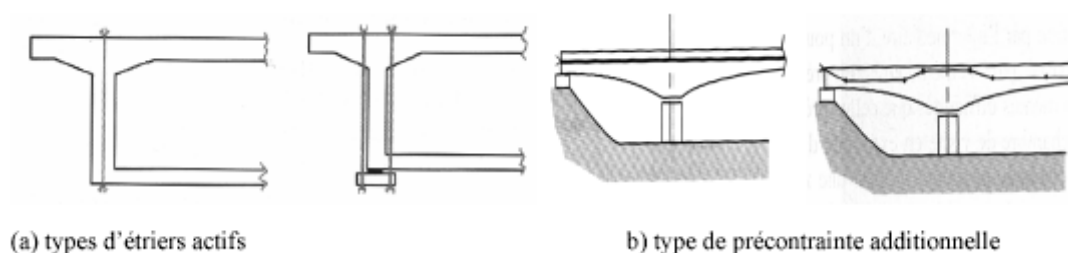


Figure I.9. *Différents types de réparation par précontrainte Additionnelle.*

1.5. MATERIAUX COMPOSITES

1.5.1- INTRODUCTION

Les composites sont très anciens : bois (composite naturel), torchis, béton (agrégats et pâte de ciment), béton armé, bois contre-plaqué (sandwichs), lamifiés décoratifs par exemple.

Le développement des technologies dans le domaine de la production de fils et fibres d'origine organique, céramique ou métallique et dans le domaine de la transformation des matières plastiques a permis une évolution rapide de l'utilisation de structures en matériaux composites.

Cette évolution est notamment due aux propriétés de résistances, de rigidité et de faible poids des matériaux composites par rapport à celle des matériaux conventionnels. Cependant l'optimisation de la conception de telles structures nécessite d'appréhender le comportement du matériau composite.

Dans le cas des structures dites à haute performances mécaniques, ces dernières se présentent généralement sous forme de poutre, de plaque ou de coque. L'épaisseur est obtenue par superposition de couches ou de strates élémentaires réalisant un stratifié multicouche. Ces couches sont constituées d'une matrice renforcée essentiellement par des fibres présentant des caractéristiques mécaniques élevées.

Ces fibres sont soit alignées parallèlement (fibres unidirectionnelles) soit croisées (tissus) ou orientées aléatoirement (mats). Ce renfort confère généralement au matériau une très forte anisotropie mécanique.

Il apparaît donc nécessaire pour faire face au développement sans cesse croissant de ces matériaux de concevoir des outils de calcul performants prenant en compte leur comportement spécifique [12,13].

La connaissance, aussi précisément que possible, des caractéristiques géométriques et mécaniques d'un mélange « renfort + matrice » qui est la structure de base des pièces composites, est primordiale.

Les caractéristiques mécaniques du mélange renfort/matrice peuvent être estimées à partir des caractéristiques de chacun des constituants [14].

Ces nouvelles exigences imposent le développement de nouvelles techniques de mise en œuvre et d'élaboration de nouveaux matériaux.

Les matériaux composites à base de résine de synthèse se définissent essentiellement par leurs deux constituants de base : la matrice et le renfort

Le renfort assure la résistance mécanique, il est généralement constitué de fibres de verre, de carbone et d'autres suivant destination.

La matrice, pour l'essentiel en résine moulable ou malléable, assure trois fonctions principales :

- la répartition de la charge mécanique sur tous les renforts;
- le lien entre renforts pour assurer une homogénéisation de l'ensemble ;
- la protection des renforts vis à vis du milieu extérieur.

Ces deux constituants principaux reçoivent des additifs ou charges qui en modifient l'aspect ou les caractéristiques : pigments coloration, agent anti UV, isolation thermique ou acoustique...

L'identité du matériau composite permet de renseigner sur ses caractéristiques techniques.

1.5.2- DEFINITIONS ET PROPRIETES

Un matériau composite est une combinaison de deux ou plusieurs matériaux distincts à l'échelle macroscopique, dans le but de produire un matériau possédant des propriétés qui excèdent celles de ses constituants [14].

En fait, un matériau composite est constitué de deux phases inertes l'une par rapport à l'autre : la matrice et le matériau de renfort, lequel se présente le plus souvent sous forme de fibres. La matrice, généralement ductile mais possédant une résistance et une rigidité faibles, sert de milieu de transfert des efforts vers les fibres, plus rigides et plus résistantes [15] (Figure I10).

En utilisant un ensemble de fibres plutôt qu'un seul élément de dimension équivalente, on obtient une meilleure résistance, puisqu'on a moins de chance de faire face à une rupture soudaine causée par un défaut. On y observe de plus une diminution de la propagation des fissures en comparaison avec une tige constituée d'un seul élément [16].

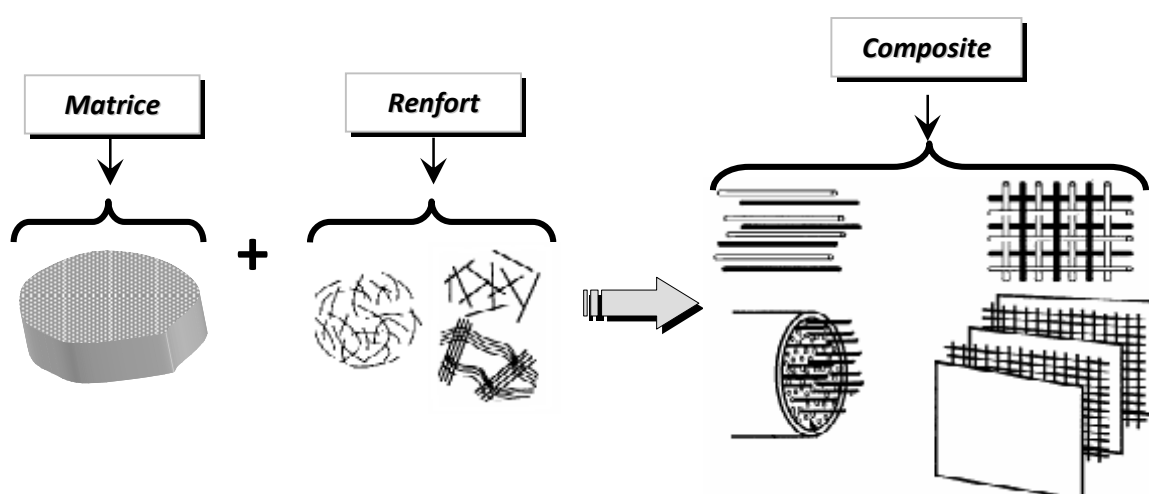


Figure .I10. *Constituants d'un matériau composite*

Les matériaux composites se caractérisent par le fait que leur comportement est linéaire élastique jusqu'à la rupture, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de déformations plastiques irréversibles avant la rupture. Ceux-ci ne présentent donc pas un comportement ductile, que l'on définit comme étant l'aptitude d'un matériau à subir de grandes déformations plastiques avant la rupture.

En général, les matériaux composites présentent une excellente résistance en tension et une grande rigidité. Ces propriétés mécaniques peuvent toutefois être variables, puisqu'elles sont étroitement liées aux caractéristiques propres des fibres et de la matrice du composite ainsi qu'à leurs proportions respectives [17]. D'autre part, leur masse volumique est environ quatre fois

inférieure à celle de l'acier, ce qui en facilite la manipulation et l'installation en chantier. Par surcroît, le problème de corrosion ne se pose pas [18].

1.5.2.1- Les renforts

Le comportement des matériaux composites dépend principalement du pourcentage de fibres et des propriétés mécaniques des constituants. Ce sont les renforts fibreux qui donnent aux composites leurs propriétés hautement directionnelles, leur imposant un comportement anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture. Les renforts les plus utilisés sont les fibres de verre, d'aramide et de carbone.

Le tableau I.1 récapitule les principales propriétés des fibres et le graphe de la Figure I16 compare la résistance en traction de différents types de fibres.

Les paragraphes qui suivent décrivent les principales caractéristiques de ces trois types de fibres.

- Fibres de verre

Les fibres de verre sont les renforts les plus utilisés, surtout en Amérique du Nord, parce qu'elles offrent des performances mécaniques intéressantes et que leur coût est relativement bas.

Elles présentent également une bonne résistance à l'humidité et à la corrosion. Il en existe cinq catégories (C, D, E, R et S), le verre E étant le plus répandu. Les composites à base de fibres de verre possèdent une résistance mécanique relativement élevée. Cependant, leurs applications structurales sont souvent limitées par leur faible module d'élasticité. De plus, certaines limites à l'utilisation de ces fibres sont imposées afin d'éviter les réactions alcali-granulats avec le béton.

- Fibres d'aramide

Les fibres d'aramide, qui ont une masse volumique très faible, sont celles qui possèdent la plus grande résistance spécifique. Elles sont souvent mieux connues sous le nom commercial de « Kevlar », lequel est fabriqué en trois catégories (29,49 et 149). Les composites à base de fibres d'aramide résistent bien aux chocs et à la fatigue. Ils ont par contre une faible résistance à la compression et leur coût est très élevé.

- Fibres de carbone

Les fibres de carbone, grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques, sont celles qui possèdent le plus grand potentiel d'applications en génie des structures. Ces fibres sont composées de plus

de 90 % de carbone. Dans la fibre, les groupes d'atomes de carbone sont liés de façon continue dans la direction de la fibre. Elles peuvent être classées en plusieurs grades selon leurs propriétés mécaniques et en deux types selon la longueur des fibres (courtes et continues). Les fibres continues sont utilisées pour fabriquer, entre autres, des tendons de précontrainte et des câbles de suspension [19].

Les composites a base de fibres de carbone ont tendance à être moins fiables sous des charges de compression. La résistance et le module en compression sont généralement plus faibles que les propriétés en tension Les propriétés en compression sont également plus sensibles aux défauts de fabrication, donc nécessitent un contrôle de qualité plus strict. Par conséquent, ces composites seront le plus souvent utilisés de manière à ce qu'ils soient sollicités en tension.

Le coût des fibres de carbone est très élevé et il est peu probable qu'il connaisse une baisse radicale avec les techniques de fabrication actuelles. Cependant, ces dernières peuvent être utilisées avantageusement pour la réparation ou le renforcement d'ouvrages existants. En effet, dans les travaux de réhabilitation, étant donné la faible quantité de matériaux utilisés, le coût élevé du produit est souvent compensé par une réduction significative des coûts de main-d'oeuvre et des inconvénients liés aux travaux de construction [19].

Tableau I.1 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [20]

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	Mv	E	G	k	C_r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5 \cdot 10^{-5}$
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3 \cdot 10^{-5}$
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08 \cdot 10^{-3}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02 \cdot 10^{-3}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2 \cdot 10^{-3}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4 \cdot 10^{-5}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

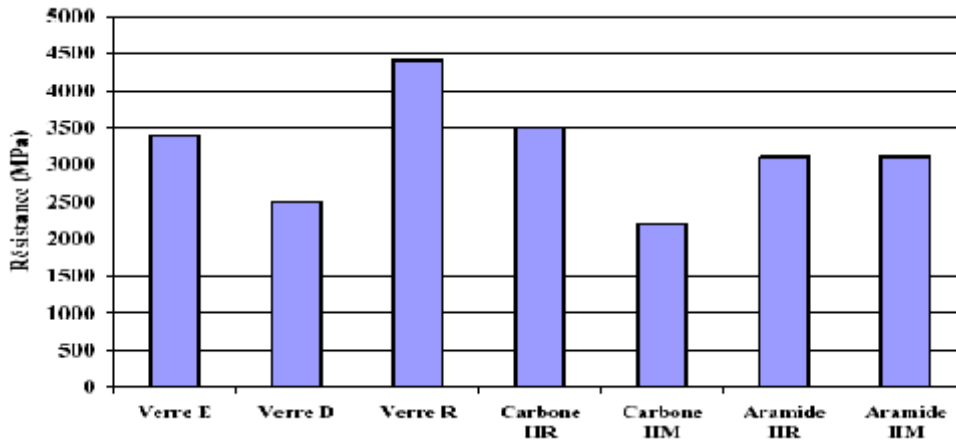


Figure I.11. *Histogramme des propriétés en traction des fibres [21]*

I.5.2.2- Les matrice

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

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

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

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.

- La structure des TD à la forme d'un réseau tridimensionnel qui se ponte (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
Etat de base	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	réduit
Mouillabilité renforts	difficile	aisée
Moulage	chauffage + refroidissement	chauffage continu
Cycle	court	long
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite	bonne
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	émanation pour "méthode humide"

Tableau I.2. *Principales différences entre matrices TP et TD [20]*

1.5.2.3- Les charges et additifs

Différents produits peuvent être incorporés dans la résine, pour lui conférer des caractéristiques particulières. Les quantités de produits peuvent varier de quelques dizaines de pourcentage dans le cas de charges à quelques pourcentages et moins dans le cas d'additifs. Les propriétés particulières qui peuvent généralement être améliorées portent sur les résistances mécaniques (compression) et les propriétés de mise en œuvre (tixotropie). Nous pouvons ainsi, citer en exemple les charges renforçantes qui se présentent sous formes sphériques (microbilles de verres) ou non sphériques (écailles de mica), les charges non renforçantes, qui ont pour rôle de diminuer le coût de la résine et peuvent contribuer à l'augmentation de certaines propriétés (masse volumique, dureté, module d'élasticité).

Les additifs interviennent comme lubrifiants, colorants ou agents anti-ultraviolets.

Il est important de noter que l'ensemble de ces ajouts modifient les propriétés physiques et mécaniques des résines.

- Matériaux composites à renforts hybrides :

Les matériaux composites à renforts hybrides, sont issus de la combinaison de deux ou plusieurs fibres dans une même matrice. Cette procédure permet d'accroître l'étendue des propriétés des composites. Des spécifications de design peuvent ainsi être rencontrées à un coût plus économique que les composites à hautes performances ou encore les composites conventionnels.

Le carbone possède une haute résistance en tension et un haut module d'élasticité, mais sa résistance à l'impact est faible. Par contre, l'aramide possède une bonne résistance à l'impact mais un faible module d'élasticité, comparé au carbone. Une combinaison de ces matériaux sous une même matrice, permet de mettre à profit les meilleures qualités de chacune de ces fibres, ainsi un hybride contenant 50% de carbone et 50% d'aramide démontre une résistance à la flexion trois fois supérieure à l'aramide seul [22].

L'hybride le plus rencontré dans les barres d'armature est le verre-carbone. Si des matériaux de propriétés mécaniques, un peu plus faibles que le carbone peuvent être utilisés, un utilisateur peut grandement tirer profit du coût de celui-ci en y ajoutant du verre. Si par contre pour une utilisation donnée, le verre démontre une trop grande flèche, des fibres de carbone à haut module d'élasticité peuvent être combiné au verre. Les fibres de carbone augmentent aussi la résistance à la fatigue, la rigidité en torsion sans oublier d'ajouter son effet conducteur.

En tension, la rupture débute à partir des fibres possédant la plus faible capacité d'élongation et se poursuit jusqu'aux fibres les plus élastiques. En résumé, la rupture finale du matériau se produit lorsque les fibres possédant la plus grande capacité d'étirement (module d'élasticité le plus faible) se rompt, donnant ainsi une relation contrainte déformation non linéaire [23].

1.5.3- AVANTAGES ET INCONVENANTS

Les matériaux composites sont peu utilisés ou recommandés par les ingénieurs à cause de l'absence de normes de design détaillées et des coûts relativement élevés des produits. Pourtant, dans les applications traditionnelles, les matériaux ne représentent que 20% des coûts, alors que la main-d'œuvre en représente 80 % [16]. Ainsi, si l'on considère le coût total des travaux, il peut être possible de faire des économies sur la main-d'œuvre, puisque les matériaux composites sont plus faciles à mettre en place que l'acier. L'utilisation des matériaux composites peut donc devenir compétitive sur le marché, puisque les coûts élevés reliés directement à l'achat des matériaux peuvent être compensés par des coûts moindres en main- d'œuvre.

Nous présentons dans ce qui suit un bref résumé des avantages et des inconvénients liés à l'utilisation des composites comme matériaux de construction.

- Avantages :

- Rapport résistance-poids très élevé.
- Très grande rigidité.
- Résistance a la fatigue.
- Résistance à la corrosion.
- Facilité de mise en place.
- Possibilité d'optimisation (choix de renforcement, direction).
- Multifonctionnalité (résistance mécanique, résistance à l'eau et a la corrosion, etc.).

- Inconvénients :

- Coût relativement élevé du produit de base jusqu'à 10 fois le coût de l'acier, pour une masse identique).
- Connaissances limitées sur leurs propriétés à long terme, notamment en ce qui concerne l'adhérence à l'interface béton-composite.
- Manque de ductilité.
- Absence de normes de design.

1.5.4- DOMAINE D'APPLICATION DES MATERIAUX COMPOSITES

Les matériaux composites peuvent être utilisés sous la forme de câbles de précontrainte, de barres d'armature, de profilés ou de laminés. Dans le cas de renforcements externes d'éléments en béton armé, deux types de laminés existent et sont utilisés : (a) des feuilles de composites flexibles qui peuvent se présenter sous la forme de fibres sèches ou de fibres pré imprégnées, et (b) des plaques rigides qui sont produites par pultrusion. Les laminés sont généralement constitués de fibres continues longitudinales à base de verre, de carbone ou d'aramide liées par une matrice de résine d'époxy. Le choix de l'un ou l'autre des types de laminés dépend généralement des considérations pratiques, reliées précisément à l'élément qui doit être renforcé.

Étant donné leurs nombreuses qualités, les matériaux composites représentent probablement le produit de l'avenir dans le cas du renforcement des structures, où les quelques inconvénients sus mentionnés peuvent être compensés par une utilisation judicieuse des performances mécaniques très intéressantes.

1.6- REPARATION D'OUVRAGE PAR MATERIAUX COMPOSITES

1.6.1- Introduction

Il a été mentionné précédemment, que les enjeux économiques ont été à l'origine de la prise de conscience de l'importance de la maintenance et, ainsi, au développement des techniques de réhabilitation. Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, etc.). En même temps, la rentabilité d'une opération de maintenance est conditionnée par sa durabilité, et donc, par la baisse des fréquences d'intervention.

La recherche dans le domaine de réhabilitation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de maintenance des ouvrages. Aussi, le génie civil, est un domaine qui nécessite trop de main d'œuvre, le coût de cette main d'œuvre dans les pays développés est devenu assez élevé de telle sorte que le prix de la matière première ne joue plus le rôle du "critère économique primordial".

Ceci implique que le prix des composites ne peut plus être considéré comme un handicap, surtout aux applications de réparation et de renforcement [24].

Depuis leurs premières applications en génie civil, il y a maintenant 20 ans, l'intérêt des composites s'est généralisé sur l'ensemble de la communauté internationale, groupes industriels

et laboratoires de recherche, et s'est particulièrement accentuée ces dernières années si l'on juge par l'importance du nombre de publications et colloques internationaux qui traitent quotidiennement de ce sujet.

Les matériaux composites utilisés en génie civil sont essentiellement des tissus en fibres de carbone, voir en fibre de verre pour certaines applications. Il reste évident que les résines adéquates doivent être utilisées pour optimiser l'emploi des fibres. Plusieurs procédés de renforcements sont apparus au cours de ces quinze dernières années. Les principales techniques utilisent directement les fibres sous formes de fil continu et d'autres font appel à des semi-produits plus ou moins sophistiqués, tels que les tissus secs, les tissus préimprégnés ou des produits pultrudés.

1.6.2- Réparation par le collage de feuilles ou de plaque en composite

Certaines propriétés des matériaux composites ont conduit les spécialistes du secteur à les considérer pour le renforcement d'ouvrages d'art. En effet, il est intéressant de remplacer le renforcement traditionnel par des matériaux composites relativement inertes à l'oxydation.

Les expériences menées jusqu'à présent utilisent des matériaux composites en fibres de verre, en fibres de carbone ou en fibres d'aramide [25-28]. Les matériaux composites utilisés pour le renforcement de poutres se présentent, généralement, sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préalablement fabriquées. Les comportements observés avec ce type de renforcement sont plus performants que ceux des poutres renforcées par des tôles en acier. Ainsi, l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des composites : la rigidité (pour les fibres en carbone), la résistance mécanique, la résistance à la corrosion et l'étanchéité. De plus, ces matériaux permettent une conception du renfort plus adaptée au besoin de la structure, grâce à des procédés qui se prêtent bien à la notion de réparation. Le matériau est fabriqué en même temps que la structure, les directions de renfort sont complètement paramétrables.

La Figure I12 présente les différentes configurations de collage de matériaux composites sur une poutre, chaque configuration est prévue pour un objectif particulier et la Figure I13, montre le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués Sika® CarboDur®.

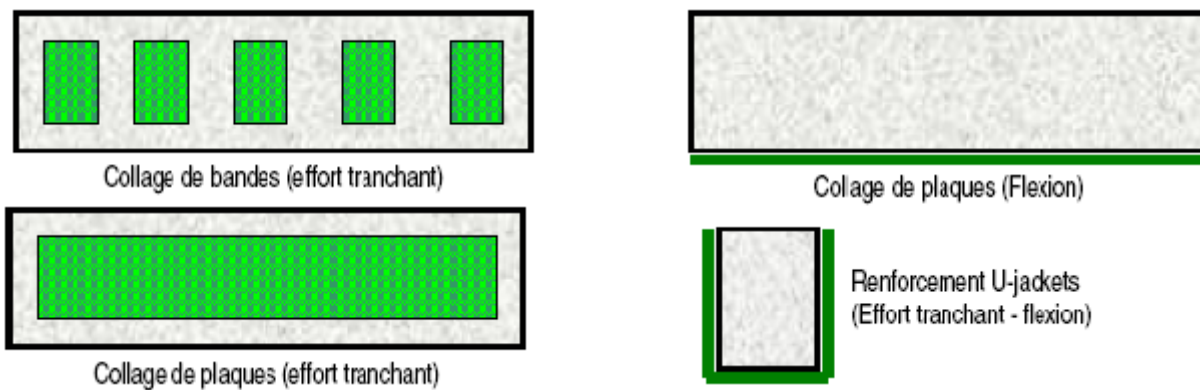


Figure I.12. *Les différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites [29].*

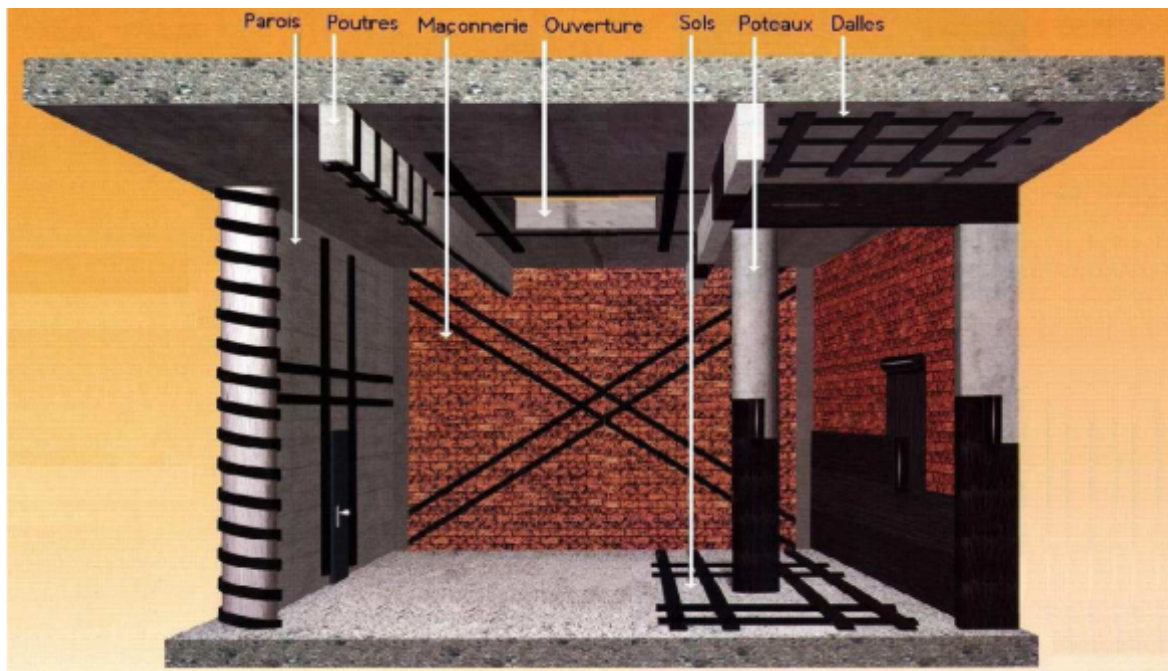


Figure I.13. *Systèmes de renforcement Sika ® CarboDur ® [30].*

CONCLUSION DU CHAPITRE

L'étude bibliographique concernant le renforcement des structures nous a permis de conclure que :

- Il existe plusieurs facteurs pouvant jouer un rôle important dans les différents processus de dégradation du béton. Dans de nombreux cas, les dégâts résultent de la combinaison de divers mécanismes élémentaires (chimiques, physiques et mécaniques). Donc le recours au renforcement est plus que nécessaire.
- La diversité des matériaux composites mérite d'effectuer des investigations dans le choix des constituants (fibres, matrices), afin d'avoir les meilleures qualités, qui permettent d'améliorer l'efficacité du renforcement et de la réhabilitation des structures en béton.
- Le renforcement de béton par matériaux composites, permet d'éviter tous les inconvénients mentionnés au cours de renforcement par les autres méthodes, en effet, les composites confèrent aux structures renforcées des performances mécaniques intéressantes.

L'analyse critique et objective de cette recherche bibliographique nous conduit à s'intéresser au problème de confinement des cylindres en béton par des grilles métalliques.

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE CONFINEMENT DES CYLINDRES EN BETON PAR LES MATERIAUX COMPOSITES

II.1- INTRODUCTION

Le confinement des colonnes de béton se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone et d'aramide Les différents composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné. Dans ce chapitre on présente l'apport que confère le confinement au béton et son influence sur le comportement mécanique. Le mécanisme de confinement des colonnes de béton renforcé ainsi que les divers facteurs affectant le comportement du béton confiné sont discutés et les études antérieures sur le confinement et le renforcement de béton à l'aide des matériaux composites et les modèles proposés y sont présentés.

II.2.- COMPORTEMENT DE BÉTON NON CONFINÉ EN COMPRESSION

Bien que le béton soit constitué de matériaux élastiques et fragiles [1] (granulats, pâte de ciment), son comportement en compression, que l'on traduit principalement par une relation contrainte-déformation, est non linéaire et présente une certaine pseudo-ductilité liée à la microfissuration du matériau. En effet, lorsque le béton est soumis à des contraintes supérieures à 40% de sa résistance en compression, la microfissuration s'initie et tend à se propager parallèlement au chargement lors de son augmentation [2]. La relation contrainte-déformation tend alors à se courber graduellement, traduisant une perte de rigidité, jusqu'à une augmentation plus rapide des déformations au-delà d'une contrainte de 70 à 80% de la résistance en compression qui mène à la rupture par fissuration parallèle à l'axe de chargement. La figure II.1 illustre la relation contrainte-déformation (σ - ϵ) du béton en compression [3]

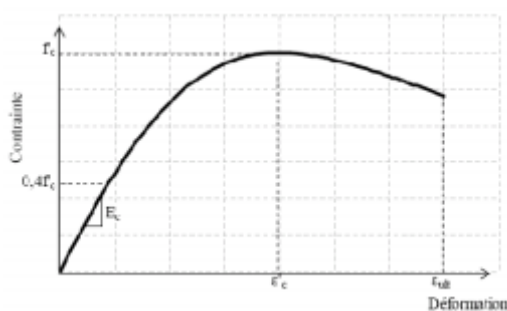


Figure II.1: Loi de comportement du béton en compression sous chargement statique [3]

Une certaine résistance subsiste après la rupture et se traduit par une branche descendante dont l'allure dépend des conditions et procédures de l'essai, jusqu'à la déformation ultime du matériau, généralement admise à 0.0035. Cette valeur n'est en réalité pas constante, elle tend à diminuer avec l'augmentation de la résistance ultime [4].

La réponse du béton à la compression uniaxiale est déterminée habituellement en chargeant des cylindres de béton dont le rapport entre la hauteur et le diamètre est de 2. La **figure II.2** montre les courbes contraintes – déformations obtenues sur des cylindres en béton chargés en compression uniaxiale.

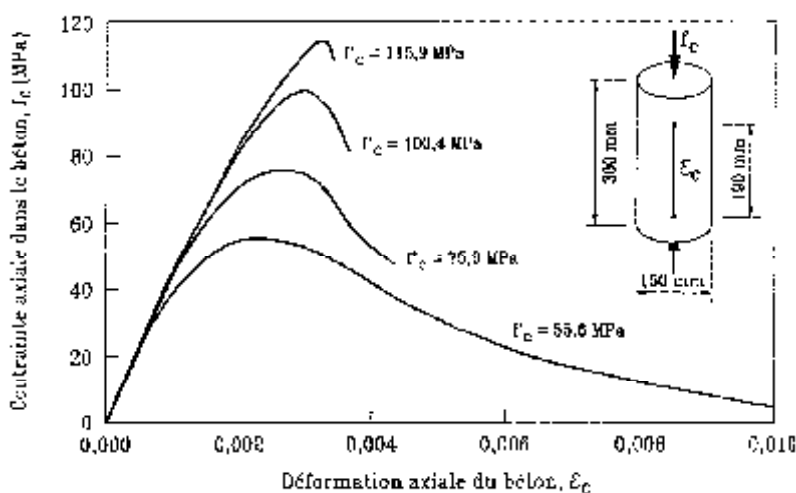


Figure II.2.: Courbes contrainte-déformation pour des bétons de différentes résistances [5]

En observant les courbes contraintes déformations des bétons à haute performances illustrées par la **figure II.2**, on remarque que, plus la résistance augmente, plus la courbe descendante devient abrupte, tandis que la rigidité et la linéarité initiale de la courbe augmentent. On peut donc s'attendre à observer un comportement plus fragile des poteaux en béton à haute performance. De plus, à cause de la plus faible expansion latérale des BHP, l'acier transversal serait sollicité plus tardivement, ce qui entraînerait une diminution de l'efficacité du confinement.

Sheikh, Shah et Khoury (1994) [6], ont observé que pour une charge axiale constante, les poteaux en BHP présentaient une ductilité inférieure à ceux construits en béton ordinaire.

L'augmentation de la résistance de 33 à 54 MPa a entraîné une baisse de la ductilité structurale de l'ordre de 30 %. En comparant deux paires de poteaux construits avec du béton de 50 et 100 MPa, **Azizinamini et al (1994) [7]**, ont observé que le déplacement maximal du poteau de 100 MPa était d'environ 25 % inférieur à celui du poteau construit avec du béton moins résistant. Cependant, en comparant la ductilité calculée en utilisant le déplacement élastique corrigé en fonction des résultats expérimentaux, ils arrivèrent à la conclusion qu'une augmentation de la résistance n'entraînait pas nécessairement une diminution de la ductilité.

II.3- COMPORTEMENT DU BETON CONFINE

Plusieurs auteurs ont prouvé que le confinement des colonnes en béton chargées axialement augmente la résistance et la ductilité de ces colonnes d'une quantité considérable.

Lorsque le béton est soumis à une compression axiale, celui-ci se déforme latéralement. Cette déformation produit une fissuration qui augmente avec l'accroissement de la charge et qui conduit finalement à la rupture du béton. Si le béton est retenu latéralement de façon à réduire cette déformation, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène est communément appelé confinement du béton **[8]**. Le confinement du béton qui consiste à empêcher ces déformations, peut être réalisé soit par une enveloppe externe, soit par un faible espacement entre les étriers.

La figure II.3 présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Cette figure met en évidence les différences de comportement entre ces deux bétons. Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton: la résistance en compression $f_{cc} > f_{co}$ et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression $\epsilon_{cc} > \epsilon_{co}$.

Le confinement augmente considérablement le pouvoir absorbant d'énergie du béton. Ainsi dans des régions sismiques, le renfort est fourni pour confiner le béton et par conséquent pour augmenter la ductilité des colonnes et des poutres **[9]**.

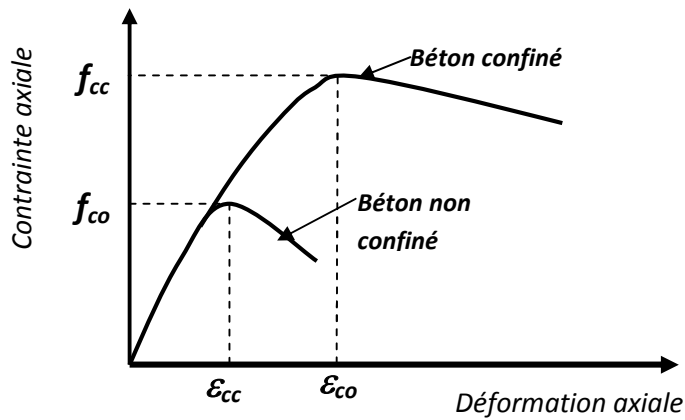


Figure II.3: Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné

La **figure II.4** montre l'effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton. **Richart, Brantzaeg et Brown [10]**, ont signalé que la pression de confinement latérale augmente considérablement la force et la rigidité des cylindres de béton et augmente la contrainte à laquelle l'effort maximal est atteint. Les pressions de confinement latérales réduisent la tendance à l'augmentation interne de la fissuration et minimise la propagation de ces fissures, de ce fait on aura une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné.

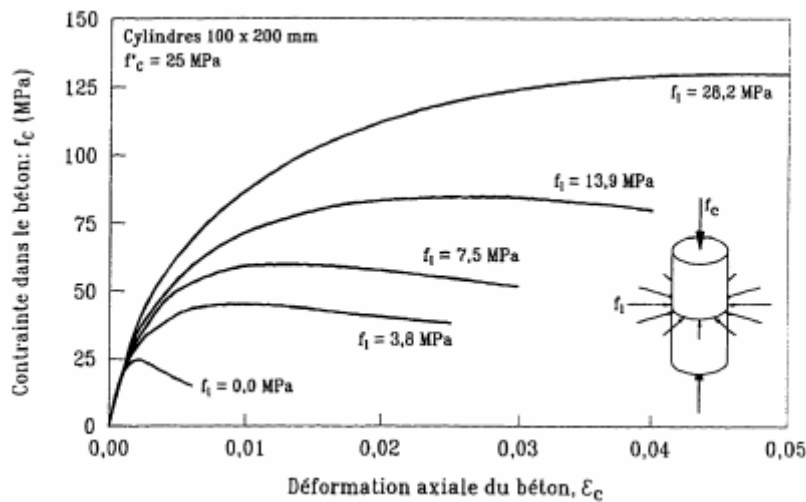


Figure II.4: Effet de la pression de confinement, [5]

La plupart des recherches sur le confinement du béton se sont inspirées du modèle de **Richart et al (1928) [10]**, qui a été développé pour des cylindres soumis à une pression hydraulique, **Richart et al** ont remarqué que la résistance en compression du béton confiné f_{cc} augmentait en fonction de la pression appliquée. Pour cela, ils ont proposé le modèle suivant :

$$f_{cc} = f_{co} + K_1 f_l \quad \dots\dots\dots \text{(II.1)}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1 + K_2 \frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad \dots\dots\dots \text{(II.2)}$$

$$K_2 = 5K_1 \quad \dots\dots\dots \text{(II.3)}$$

Où : k_1 : Coefficient d'efficacité de confinement et s'est avéré de beaucoup d'essais être approximativement égal à 4.1.

f_l : Pression latérale de confinement.

II.4- MECHANISME DE CONFINEMENT

Dans la pratique, les colonnes sont confinées par un renfort latéral, généralement sous forme de spirales en acier étroitement aligné ou d'enveloppes. Pour un faible effort appliqué au béton, le renfort latéral est à peine soumis à une contrainte, ainsi le béton présente le comportement d'un béton non confiné. Quand les efforts approchent de la résistance uniaxiale, la fissuration interne s'intensifie et provoque des déformations latérales élevées.

Le renfort latéral, applique alors une réaction d'emprisonnement au béton et par conséquent le béton présente le comportement d'un béton confiné [11].

Les enveloppes circulaires, en raison de leur forme, fournissent une pression d'emprisonnement uniforme et continue autour de la circonférence (figure II.5.b). Cependant, dans le cas d'enveloppes sous forme carré ou rectangulaire, la pression d'emprisonnement s'applique

uniquement aux coins (figure II.5.a), de ce fait une partie du noyau de béton demeurer non confinée [12-14].

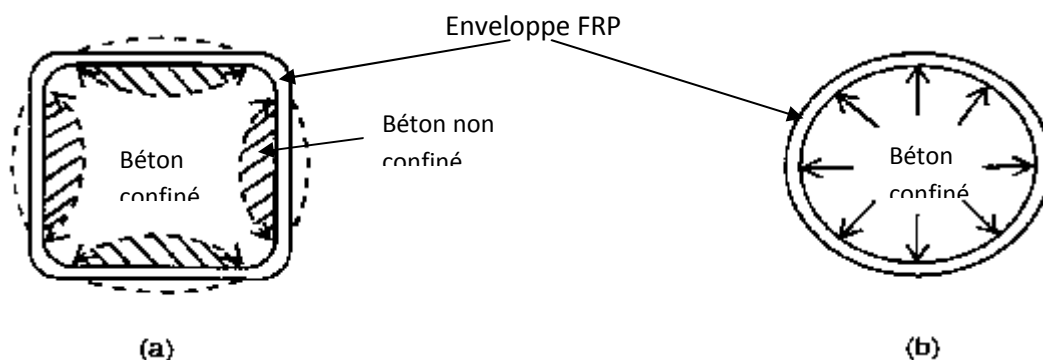


Figure II.5: Mécanisme de confinement du béton [12] (a) Section rectangulaire, (b) Section circulaire

II.5- LES POLYMERES RENFORCES PAR DES FIBRES (PRF)

Le terme "polymère renforcés par des fibres" (appelé FRP d'après la traduction anglaise « fiber reinforced plastics ») sont en voie d'être considérés comme une alternative préférable aux plaques d'acier pour le renforcement externe de certaines membrures en béton armé. On appelle aussi les FRP matériaux composites renforcés de fibres [15].

PRF se rapporte à divers types de matériaux composés de fibres continues noyées dans une matrice en polymère. Ces matériaux, fabriqués à partir de millions de fibres continues organiques et inorganiques assemblées et collées à la résine, ont des avantages incontestables par rapport aux aciers traditionnels : par exemple, une haute résistance à la traction, une excellente résistance à la corrosion, un poids volumique bas et un module d'élasticité faible, d'excellentes performances sous tension et un coefficient de dilatation thermique que l'on peut estimer d'avance. En raison de leur très haute résistance à la corrosion, leur légèreté (qui facilite leur usage dans les processus de construction) et le fait qu'ils puissent être fabriqués sur mesure pour répondre aux besoins d'un ouvrage donné, ils ont déjà été employés dans d'importants travaux au niveau international.

C'est au milieu des années 1950 que sont apparus les premiers produits PRF utilisés comme renforcement du béton [16]. Il s'agissait surtout de plaques et de coques à base d'éléments

tubulaires coudés. L'introduction de ces matériaux en structures de génie civil a progressé à une Vitesse rapide ces dernières années [17]. Actuellement, les PRFs les plus utilisés en génie civil, y compris dans le béton armé, sont les suivants : les polymères renforcés par des fibres de verre (GFRP), les polymères de tissu-renforcé de carbone (CFRP), et les polymères de tissu-renforcé d'aramide (AFRP) [18]. La forme la plus courante de fibre renforcée porte le nom de stratifié. Les stratifiés se composent de feuilles de fibres qui se chevauchent, en alternance avec la matrice, en nombre suffisant pour obtenir la largeur désirée. L'orientation des fibres doit être maîtrisée avec exactitude pour chaque plan afin de donner au stratifié les propriétés physiques et mécaniques requises. La qualité du composite dépend des matériaux utilisés pour sa préparation, de la manière dont la première charge dispose les éléments et de l'interaction entre les divers éléments. Les critères les plus déterminants pour le comportement des fibres sont : l'orientation, la longueur, la forme et la composition des fibres, ainsi que les propriétés mécaniques de la résine employée pour la matrice et pour réaliser l'adhérence entre la matrice et les fibres.

Le confinement des colonnes est une technique bien établie pour améliorer le comportement à la compression et la flexion. Avec les enveloppes de tissu-renforcé de polymère, la couche d'emprisonnement est très mince et est appliquée directement sur la surface de la colonne. Les feuilles de FRP peuvent être manipulées et coupées avec peu d'effort et les enveloppes composées sont flexibles et épousent facilement n'importe quelle forme ou géométrie de colonne [17].

❖ Paramètres influençant la performance des PRF

Les paramètres suivants influencent la performance des FRP [15] :

- Durée d'application de la charge.

Généralement, la courbe contrainte-déformation d'un FRP est approximativement linéaire. Cependant, avec une charge soutenue, la courbe devient légèrement non linéaire. Comme pour le béton, des déformations à long terme dans le FRP, causées par le fluage peuvent devenir significatives. Ces déformations sont dépendantes de la charge appliquée et des types de résine et de fibres utilisés.

- Résistance à la fatigue

Ces matériaux présentent normalement une bonne résistance à la fatigue. Par contre, étant dépendantes de l'amplitude des contraintes, les fibres de carbone peuvent perdre environ jusqu'à 20 % de leur résistance statique, lorsqu'elles sont soumises à un million de cycles. Cette perte est beaucoup plus grande pour les autres types de fibres, pouvant s'élever à 60 % dans le cas des fibres aramides ou même atteindre 75 % pour les fibres de verre.

- Effets de l'environnement.

Les effets environnementaux peuvent dégrader les matrices à base de polymères, ce qui peut mener à une perte de résistance ou à une rupture du FRP. Les causes de cette détérioration sont les rayons X ou gamma, la dégradation chimique, mécanique ou biologique.

- Température.

Puisque chaque fibre et chaque matrice a un coefficient de dilatation thermique spécifique, les fluctuations thermiques peuvent affaiblir le matériau. De plus, l'exposition à des températures élevées peut faire changer la couleur des laminés.

- Absorption d'eau.

L'absorption d'eau a un effet sur le laminé et peut modifier les propriétés mécaniques de la résine, telles que la réduction du module élastique du composite et la diminution de la résistance jusqu'à 25-30 %. Ce paramètre dépend directement du type de résine utilisé.

- Feu

Les matrices de polymères sont très sensibles au feu et, selon leur composition chimique, des fumées toxiques peuvent se produire. Cependant, des additifs ignifugeants peuvent être utilisés pour contrecarrer cette faiblesse.

❖ Confinement des colonnes de béton par des PRF

L'utilisation de PRF en tant que renfort externe pour les structures en béton, telles que les colonnes, est très répandue en Europe, au Japon et en Amérique du nord [19]. Des colonnes de

béton ont été déjà renforcées avec succès en utilisant des enveloppes PRF [20], cependant, les PRF sont employées dans les nouvelles constructions, impliquant le confinement des colonnes en béton. La recherche a prouvé que les tubes de PRF ont le potentiel de remplacer l'acier conventionnel [21]. L'action de confinement du tube est créée par la contrainte passive à la dilatation transversale du béton sous la compression uniaxiale. Le tube de PRF met le béton sous la compression triaxiale, un effort qui augmente la résistance à la compression du béton confiné par suppression des fissures initiales dans le noyau du béton. Des tubes préfabriqués de PRF peuvent être utilisés en tant que coffrage permanent pour confiner des colonnes et pour agir en tant qu'enveloppe protectrice contre les effets de l'environnement durs. Ainsi les avantages potentiels d'employer les PRFs pour confiner le béton sont tout à fait attractifs à plus d'un titre.

II.6- ETUDES ANTERIEURES SUR LE CONFINEMENT DE BETON PAR LES MATERIAUX COMPOSITES

Le phénomène de confinement du béton a été le sujet d'un certain nombre de travaux au cours des 100 dernières années. Cette partie présente une revue de littérature des résultats de travaux antérieurs liés à la réhabilitation et le renforcement de colonnes en béton par les matériaux composites ainsi la présentation des différents modèles développés en conséquence.

L'idée d'augmenter la capacité en compression des colonnes en béton armé (BA) n'est pas nouvelle. Au début du 20^{ème} siècle, les ingénieurs ont observé que les colonnes de béton avec un renforcement longitudinal développent des fissures longitudinales et une déformation latérale importante, sous une grande charge de compression. En 1903 **Considere** [22], a suggéré l'utilisation d'un renfort transversal afin de ralentir la déformation latérale. Il a effectué un programme expérimental et a trouvé que des cercles circonférentiels, une fois placés à un espacement approprié, augmentent considérablement la résistance et la ductilité des colonnes de béton.

En 1928-29, Richart et autres [10, 23], ont effectué une série d'essais utilisant la pression hydraulique pour le confinement des colonnes de béton circulaires. Ces colonnes étaient ainsi

soumises aux efforts de compression triaxiaux. Ils ont observé que l'augmentation de la résistance était directement proportionnelle à la force de pression de confinement.

Plus tard en 1930 et 1933, **ACI** a dirigé une recherche approfondie et a développé des expressions pour la résistance à la compression des colonnes renforcées avec de l'acier longitudinal et latéral. Après cela, beaucoup de chercheurs ont effectué des travaux dans ce secteur et ont proposé des modèles pour prédire le comportement des colonnes de béton confinées. Cette recherche a été également faite sur des colonnes renforcées par des enveloppes en acier et des tubes en acier remplis de béton.

Les matériaux composites à base de fibres (FRP) ne sont utilisés pour le confinement du béton que depuis le début des années 1980. Avec le progrès dans le domaine des matériaux composites, plusieurs études ont été effectuées sur le confinement des colonnes de béton avec des FRPs [24, 25, 26]. Ils ont constaté que les colonnes confinées avec des FRPs montrent une augmentation considérable de la résistance à la compression et la ductilité par rapport aux méthodes de confinement conventionnelles.

Les travaux effectués par de nombreux chercheurs pour étudier le comportement des colonnes de béton confinées, sont présentés par ordre chronologique comme suit :

Kurt (1978) [25], a suggéré l'utilisation des pipes en plastique : chlorure polyvinyle (PVC), et styrène de butadiène d'acrylonitrile (ABS), rempli de béton. L'étude a été réalisée pour évaluer l'augmentation de la résistance des colonnes courtes et longues.

Les diamètres des pipes s'étendent de 38 mm à 100 mm et les longueurs varient de 200 mm à 1450 mm. La résistance de béton à 28 jours était 20.6 MPa. Les spécimens ont été examinés sous une charge de compression axiale.

Il a constaté que la résistance ultime des colonnes de béton a augmenté en raison de l'emprisonnement fourni par les pipes en plastique (PVC et ABS). La résistance des colonnes courtes a augmenté 3.3 fois la pression d'éclat des tubes. Il a également observé une augmentation de ductilité. L'augmentation de la résistance et de la ductilité des colonnes intermédiaires était

inférieure à celles des colonnes courtes. Aucune conclusion n'a été tirée pour les colonnes longues.

Fardis et Khalili (1981) [26], ont réalisé des essais de compression sur des cylindres de béton de 76×150 mm et de 76×150 mm. Quatre types différents de FRP ont été employés. Les chercheurs ont constaté que la rupture s'est produite quand la contrainte latérale du béton sous l'action combinée de la charge axiale et de la pression de confinement a atteint la contrainte de rupture du FRP. Ils ont également conclu, que l'enveloppe en FRP augmente non seulement la résistance de béton, mais augmente également la ductilité.

Fardis et Khalili (1982) [27], ont proposé les équations suivantes pour calculer la contrainte du béton confiné par FRP.

$$f_{cc} = f_{co} + K_1 f_l \quad \dots\dots\dots (II.4)$$

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 3.7 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.86} \right] \quad \dots\dots\dots (II.5)$$

Où f_{cc} et f_{co} : Résistances respectivement de béton confiné et non confiné

f_l : Pression latérale de confinement donnée par la formule suivante : .

$$f_l = \frac{2 f_{frp} t_{frp}}{d} \quad \dots\dots\dots (II.6)$$

Où f_{frp} est la contrainte de traction dans l'enveloppe de FRP, t_{frp} est l'épaisseur de l'enveloppe de FRP et d le diamètre de la section de béton confiné (**figure II.6**).

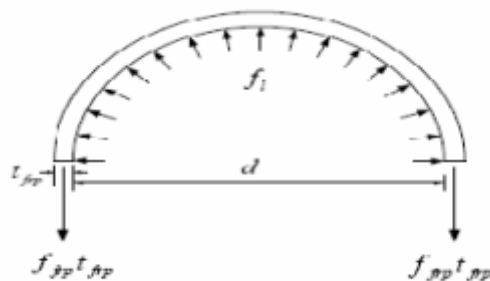


Figure II.6: Pression de confinement latérale due à l'enveloppe de FRP

Katsumata et al (1988) [28], ont présenté les résultats d'une investigation expérimentale sur le comportement sismique des colonnes renforcées à l'aide de CFRP. Deux séries de dix modèles réduits de colonnes aux coins arrondis, de section carrée 200 x 200 mm, sont mises à l'essai afin d'évaluer l'efficacité de l'interface entre le béton et le CFRP. Dans la première série, un isolant est appliqué entre le béton et le matériau composite, alors que dans la deuxième série le matériau composite est collé directement sur la surface à l'aide d'une résine époxyde. Suite aux essais, les observations suivantes ont été formulées :

- Le déplacement ultime ainsi que la capacité d'absorption d'énergie ont augmenté de façon linéaire avec la quantité de CFRP.
- La résistance sismique des colonnes renforcées à l'aide de CFRP était proche de celle des colonnes confinées à l'aide de frettes hélicoïdales.
- Pour une même quantité de CFRP, le déplacement ultime était très similaire dans les deux séries,

Dans le but d'adapter le modèle de confinement proposé par **Ahmed et Shah (1982) [29]**, au béton confiné à l'aide de spirales en FRP, **Ahmed et al (1991) [30]** entreprennent 33 essais de compression uniaxiale sur des cylindres en béton de dimensions 102mm x 204 mm, confinés à l'aide de spirales en FRP. Ils proposent, sur la base de ces essais, une expression pour le calcul de la contrainte maximale et de la déformation correspondante d'un béton confiné à l'aide de spirales en FRP.

Priestley et al (1992) [31], ont conduit une investigation sur l'utilisation d'un système d'enveloppe (jacket) composé de matériaux FRP à base de fibres de verre (GFRP) collés en surface à l'aide d'époxy pour améliorer la performance en flexion et en cisaillement des piles de pont en béton situées dans des régions sismiques. Ils présentent tout d'abord des modèles de design simples développés plus tôt (**Priestley 1991) [32]** pour le calcul de la ductilité et du cisaillement résultant de la réhabilitation ou du renforcement en question. Sept piles de pont sont réhabilitées à l'aide du système décrit plus haut et sont mises à l'essai pour valider les modèles. Trois piles sont renforcées au niveau de la zone de rotule plastique avant d'être testées en flexion, alors que les quatre autres piles sont renforcées sur toute leur longueur avant d'être soumise à des

essais de flexion en courbure double. Les résultats expérimentaux ont montré que le système de matériaux GFRP collés, peut empêcher la rupture prématurée par insuffisance de longueur de chevauchement dans la zone de rotule plastique. Ils ont également montré que le système procure une augmentation appréciable de la résistance au cisaillement aux piles et aux colonnes qui présentent des insuffisances en matière de cisaillement.

Saadatmanesh et autres (1994) [33], ont mené une analyse paramétrique portant sur le comportement des colonnes circulaires et rectangulaires renforcées à l'aide de lamelles en matériaux composites à base de fibres de verre et de carbone, collées en surface. Ils modélisent le confinement procuré par les lamelles à l'aide du modèle de **Mander et al [34] (1988)**. Quatre paramètres sont considérés en particulier: la résistance du béton, l'épaisseur de la lamelle en FRP, l'espacement des lamelles et les propriétés du matériau des lamelles.

Ils ont utilisé le modèle de contrainte-déformation proposé par **Mander et autres (1988) [34]** pour calculer le gain de résistance et de ductilité des colonnes de béton extérieurement confinées au moyen de courroies composés de fibres haute résistance. La contrainte à la compression maximale du béton confiné f_{cc} et la déformation axiale qui correspond à cette contrainte ε_{cc} , proposés par **Mander et autres (1988) [34]** sont données par les relations suivantes :

$$f_{cc} = f_{co} \left[2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{co}}} - 1.254 - 2 \frac{f_l}{f_{co}} \right] \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left[\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right] \right] \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

où : ε_{cc} et ε_{co} sont les déformations qui correspondent aux contraintes de compression maximale du béton confiné et non confiné, respectivement. Le modèle contrainte-déformation obtenu à partir des équations **II.7** et **II.8** est présenté par la **figure II.7**.

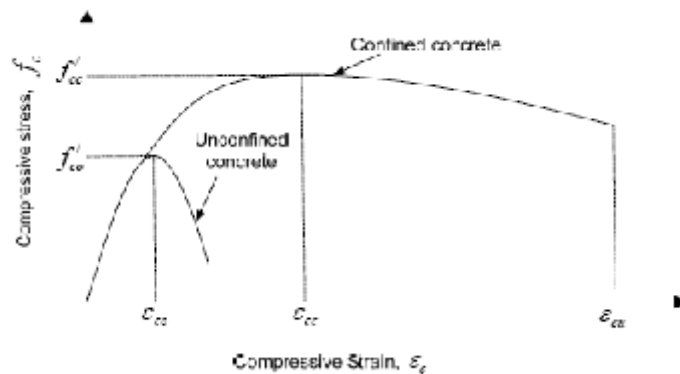


Figure. II.7: *Modèle de contrainte-déformation de Mander et autres (1988) [34] utilisé par Saadatmanesh et autres (1994) [33].*

Les résultats ont indiqué que la résistance et la ductilité des colonnes de béton peuvent être sensiblement améliorées en enveloppant les courroies composées de fibre de haute résistance autour des colonnes. Cependant, le taux d'accroissement dans la charge axiale ultime, la ductilité, et le moment maximum ont diminué pour augmenter la résistance à la compression de béton. L'étude a prouvé que pour des volumes égaux de courroies, l'augmentation de la charge axiale ultime et de ductilité était plus grande avec la fibre de carbone que pour la fibre de verre (E).

Nanni et Bradford (1995) [35], ont étudié le comportement de cylindres en béton de dimensions 150 mm x 300 mm, confinés à l'aide de trois types d'enveloppes en matériaux composites: des câbles précontraints en aramide, des plaques hybrides en verre aramide, et un enroulement filamentaire fibres de verre. Pour la première série d'essais, 16 échantillons sont testés avec comme paramètres d'étude, le diamètre et l'espacement des câbles. La deuxième et troisième série compte 4 et 15 échantillons, respectivement. Les cylindres de la troisième série sont coulés avec une tige centrale leur permettant d'être placés sur une machine d'enroulement filamenteux pour être enroulés avec 1, 2, 4, ou 8 épaisseurs de fibres de verre du type E et de résine Inylester (ou polyester pour quelques-uns des spécimens).

Ils ont observés que, le confinement du béton avec FRP a augmenté deux propriétés mécaniques, à savoir la résistance et la ductilité du béton. L'efficacité de confinement de FRP semble dépendre directement de la technique de fabrication dans le cas du système formé des plaques du verre-aramide FRP. Les auteurs concluent qu'en général la réponse contrainte-déformation du béton enveloppé de matériau composite pourrait être modélisée par une simple courbe bilinéaire.

le point de cassure de la courbe étant celui correspondant à la contrainte du béton non confiné pour une déformation de 0.003. Ils n'ont cependant pas développé de modèles de confinement particuliers. Les résultats d'essais sont également comparés aux modèles de **Mander et autres (1988) [34]** et **Fardis et Khalili (1982) [27]**, lesquels ont grossièrement sous-estimé les déformations ultimes, mais ont prédit raisonnablement bien la résistance des bétons confinés.

Kargahi (1995) [36], ont évalué la résistance des CFFT sous compression uni-axiale. Dans l'ensemble, 12 échantillons cylindriques sont mis à l'essai, dont 9 CFFT et trois cylindres de contrôle en béton, sans tube, de dimensions 150 x 300 mm. Les tubes sont à base de filaments en fibres de verre type E avec une résine de polyester enroulés à un angle de $\pm 75^0$ par rapport à l'axe longitudinal du tube. Trois épaisseurs de tube sont produites: 1.85 mm, 3.30 mm et 6.00 mm. Une augmentation de la résistance du béton de l'ordre de 2.5 à 3.5 fois la résistance du béton non confiné est rapportée. Par ailleurs, des cylindres sont également soumis à des essais de traction par fendage (Split test) afin d'évaluer l'amélioration de la résistance à la traction des CFFT. L'auteur conclut que le tube FRP améliore la résistance à la traction du béton plutôt en contenant le béton fissuré qu'en le confinant. Enfin, une étude paramétrique est entreprise par l'auteur sur l'effet de l'épaisseur du tube, l'angle d'enroulement, et l'action du composite sur la résistance de confinement de la colonne. L'analyse est basée sur le modèle de confinement de **Mander et autres (1988) [34]**. Les conclusions suivantes ont été formulées:

- 1- La résistance en compression augmente avec l'épaisseur du tube;
- 2- La présence de l'action composite améliore plus la résistance en flexion que celle en compression;
- 3- La résistance en compression uniaxiale diminue quand l'angle d'enroulement augmente;
- 4- La résistance en flexion est maximale quand l'angle d'enroulement est égal à $\pm 45^0$

Saadatmenash et al (1996) [37], ont étudié le comportement sismique de colonnes en béton armé conçu conformément aux normes en vigueur avant 1971 et réhabilitées à l'aide d'un confinement unidirectionnel assuré par des lamelles en GFRP pré-imprégnées.

Dix modèles de colonnes à l'échelle 1/5, dont 5 circulaires et 5 rectangulaires, sont mis à l'essai. Les paramètres suivants ont été étudiés :

- (a) la forme de la section (circulaire et rectangulaire);
- (b) le pourcentage d'armature longitudinale;
- (c) les détails de l'armature dans la zone plastique;
- (d) le type de confinement (actif ou passif).

Les modèles circulaires sont de 305 mm de diamètre, alors que les modèles rectangulaires ont une section de 241 x 368 mm. Les modèles sont réhabilités à l'aide de lamelles sur une longueur de 635 mm au-dessus du niveau de la fondation (zone plastique). Ils sont, ensuite soumis à un chargement cyclique horizontal, en plus d'une force statique de compression simulant les charges de gravité. Les résultats ont montré que, la réhabilitation à l'aide de lamelles GFRP pré-imprégnées améliore grandement la ductilité des colonnes.

Elle permet également de contrôler le flambement de l'armature longitudinale dans la zone plastique, ainsi que la rupture par manque d'adhérence dans les zones de recouvrement d'armature. Les observations suivantes ont également été énoncées:

- Des colonnes de pont ayant des recouvrements d'armature dans la zone plastique potentielle et construits avant la mise en vigueur des nouvelles normes de design ont cédé prématurément à un niveau de ductilité bas variant entre 1.2 et 1.5 ;
- L'utilisation de barres longitudinales continues traversant une zone plastique améliore le comportement de la colonne empêchant une rupture de l'adhérence. La rupture de la colonne dans ce cas est due au flambement des barres longitudinales par insuffisance de support latéral dans la zone plastique ;
- La réhabilitation de colonnes à l'aide de FRP extérieurement collés améliore de façon significative non seulement la capacité en flexion mais aussi la ductilité. Jusqu'à un facteur de ductilité de 6, des courbes d'hystérésis stables sans dégradation significative due à des problèmes d'ancrage ou de flambement sont atteintes ;
- L'amélioration obtenue grâce à la technique de confinement actif par FRP, comparé à celui passif, ne semble pas justifier le coût additionnel associé au confinement actif.

Picher et al. (1996) [38], ont examiné l'effet de l'orientation des fibres de confinement sur le comportement des cylindres en béton confinés à l'aide de FRP. Ils ont évalué également les méthodes d'application de FRP sur les colonnes courtes de sections carrées et rectangulaires. Vingt-sept colonnes courtes sont enveloppées à l'aide de FRP de différentes orientations comme suit: quinze cylindres 152 x 304 mm, huit prismes carrés 152 x 152 x 500 mm et quatre prismes rectangulaires 252 x 203 x 500 mm.

Les observations suivantes sont énoncées:

- Le confinement en FRP procure aux cylindres une ductilité et une résistance à la compression accrues;
- Cette technique de confinement en FRP est également efficace pour les colonnes rectangulaires pour autant que leurs coins soient arrondis avant application du FRP, par exemple, l'augmentation de la capacité en compression due au confinement a atteint 20% pour les sections carrées;
- Bien que la rigidité axiale diminue avec l'angle d'orientation, la ductilité reste quasiment constante;
- Aucune amélioration du mode de rupture n'a été observée due à la variation de l'angle d'orientation du FRP.

Mastrapa (1997) [39], a étudié l'effet de l'adhérence. Il met à l'essai 32 cylindres de béton de dimensions 150 x 300 mm, 16 de ces cylindres sont enveloppés à l'aide de 1, 3, 5 ou 7 épaisseurs de tissu FRP à base de fibres de verre du type S, alors que les 16 autres spécimens sont confectionnés à l'aide de tubes GFRP type S ayant les mêmes épaisseurs et remplis du même béton que les premiers cylindres. Les essais de la première moitié sont réalisés en deux séries: dans la première série, les épaisseurs de l'enveloppe sont collées, une couche à la fois, avec un recouvrement d'environ 17% du périmètre du cylindre, alors que dans la seconde série les épaisseurs sont appliquées en continu avec un recouvrement final de 32% du périmètre du cylindre. Les résultats de ces travaux ont permis de conclure que la fabrication de l'enveloppe en FRP n'affecte pas de façon significative la résistance de colonnes confinées sous charges axiales.

Pico (1997) [40], a étudié l'effet de la section de CFFT, en mettant à l'essai de compression axiale 9 spécimens de dimensions carrées 150 x 150 x 300 mm constitués de tubes carrés en FRP remplis de béton. Aucune adhérence n'est pourvue entre le béton et le tube en FRP. Une augmentation marginale de la résistance à la compression est observée indépendamment de l'épaisseur de l'enveloppe. Les paramètres qui contrôlent le plus le confinement sont : le rayon de courbure du coin de l'échantillon et la pression de confinement.

El Echary (1997) [41], a évalué les effets des rapports, longueur sur diamètre (L/D) et diamètre sur épaisseur (D/t) sur le comportement des CFFT. Un total de 24 CFFT circulaires ($D_{\text{interieur}}=145$ mm) avec trois épaisseurs de tube différentes (6, 10, et 14 plis) et 4 longueurs différentes (300 mm, 457 mm, 610 mm et 762mm) sont mises à l'essai. Aucun flambement n'a été observé durant les essais. L'analyse des résultats d'essais indique que l'excentricité maximale est dans l'intervalle de 10-12% de la largeur de la section. La réduction de la capacité n'est pas significative. Il a, par conséquent, conclu que pour un rapport L/D de 5:1, l'effet d'élançement est négligeable.

Monti et Spoelstra (1997) [42], ont proposé un modèle de confinement pour des colonnes circulaires enveloppées dans un matériau FRP. La procédure est approximativement la même que celle proposée par **Ahmad et Shah (1982)**. Pour une certaine déformation axiale ε_{ci} on suppose une valeur de pression de confinement (f_{ri}). La contrainte axiale f_{ci} est alors calculée moyennant le modèle de **Mander et al. (1988) [34]** pour un confinement actif. La déformation latérale ε_r quant à elle, est calculée à l'aide de l'expression développée par **Pantazopoulou (1995) [43]**. Avec ε_r et la relation constitutive de l'enveloppe, une nouvelle valeur de f_r est calculée et comparée avec la valeur précédente. La procédure est répétée jusqu'à ce que f_r converge à une valeur stable.

Lavergne et Labossière (1997) [44], ont entrepris une investigation expérimentale sur deux modèles de colonnes circulaires de dimensions 300 x 2150 mm renforcées à l'aide de matériau FRP extérieurement collé. Trois essais sont entrepris sur ces deux spécimens. Le premier modèle (F) est d'abord testé sans enveloppe en FRP comme référence. Il est ensuite réparé à l'aide de matériau composite unidirectionnel de type CFRP (F*) collé autour de la zone plastique et mis à

l'essai de nouveau. Le deuxième modèle (D) est renforcé avec du matériau CFRP de la même manière que le modèle (F*) mais contrairement à ce dernier, il ne fut pas testé avant renforcement. Tous les modèles sont soumis à un chargement horizontal alterné en plus d'une charge statique de compression (gravité) constante. Les observations suivantes sont énoncées:

- Les colonnes avec des recouvrements d'armatures situés dans la zone plastique et conçues selon les anciennes normes (20 ans et plus) subissent une rupture à un niveau faible de ductilité (facteur de ductilité = 1.5). Ceci est due à une rupture prématurée de l'adhérence au niveau des armatures d'attente et à une insuffisance de l'armature transversale et de la longueur de développement des barres longitudinales.

- Les colonnes en béton armé, réhabilitées à l'aide de matériau CFRP dans la zone plastique, montrent une petite augmentation de résistance mais une amélioration appréciable de ductilité. Une courbe d'hystérésis stable jusqu'à un facteur de ductilité de 8.0 est atteinte.

- Les colonnes en béton armé présentant des dommages initiaux et réhabilitées à l'aide de matériau CFRP dans la région plastique, ont vu leur résistance excéder la résistance initiale avant le dommage et leur ductilité grandement améliorée.

- L'application d'une épaisseur de FRP dans la direction verticale n'améliore pas la résistance en flexion de la colonne mais semble atténuer le développement des fissures horizontales.

Haroun et al (1997) [45], ont développé des essais cycliques sur des colonnes de pont réhabilités à l'aide d'enveloppes en matériau CFRP extérieurement collées. Six modèles réduits à 50 % sont considérés pour évaluer l'efficacité du confinement procuré par le CFRP quant à l'amélioration du chevauchement d'armature et de la résistance au cisaillement comme suit: Trois modèles 610x3430 mm avec une longueur de chevauchement d'armature de 380 mm sont réhabilités manuellement à l'aide de feuilles en CFRP, alors que les 3 autres modèles, de dimensions 610x2440 mm, sont armés de barres continues et sont réhabilités de fils en CFRP enroulés à l'aide d'une machine cette fois-ci. Tous les modèles sont soumis à un chargement cyclique horizontal, en plus d'une charge de compression axiale constante. Les modèles de référence avec et sans chevauchement d'armature longitudinale développent une ductilité maximale de 1.5 et 2, respectivement, alors que les modèles réhabilités développent une ductilité maximale de 6 à 10

avec une courbe d'hystérésis stable. Les résultats ont montré également que la rigidité latérale des colonnes n'a pas changé suite à l'ajout de l'enveloppe en CFRP, et par conséquent, les propriétés cycliques ne changent pas quand on utilise cette méthode de réhabilitation et de renforcement.

Hosotani et autres (1997) [46], ont étudié l'effet du confinement de cylindres en béton à l'aide de feuilles en CFRP (carbon fiber sheets (CFS)) sur le comportement sismique. Ils

ont conduit des essais en compression sur des cylindres 600 x 200 mm (10 circulaires et 12 carrés de section équivalente) pour évaluer la relation contrainte-déformation sous confinement à l'aide de CFS. Les paramètres considérés dans les essais sont : la forme de l'échantillon, la quantité et le type de CFS (module d'élasticité normal et élevé). Trois séries de spécimens sont considérées: (a) N (cylindres sans confinement), (b) S (cylindres confinés à l'aide de CFS de module normal 230 GPa), et (c) H (cylindres confinés à l'aide de CFS de module élevé - 392 GPa). Tous les spécimens sont soumis à un chargement axial en déplacement contrôlé appliqué à un taux de 0.2 mm/min. Les conclusions suivantes sont énoncées suite à ces essais:

1. Pour un pourcentage en fibres de carbone de 0.05 à 0.15%, la contrainte axiale maximale du béton, f_{cc} et la déformation axiale correspondante, ε_{cc} n'augmentent pas avec le pourcentage de fibres de carbone et sont quasi-indépendants de la forme de la section des spécimens. Toutefois, le taux de détérioration de la contrainte axiale du béton après le pic diminue et la déformation axiale à la rupture du CFS augmente avec le pourcentage de fibres de carbone.

2. Pour un pourcentage en fibres de carbone supérieur à environ 1%, la contrainte axiale du béton continue d'augmenter et subit un changement du taux de croissance à partir d'une déformation axiale de 3000 à 3500 μ jusqu'à la rupture du CFS.

3. La déformation de circonférence du CFS correspondant au pic de la contrainte axiale du béton ε_{CFS} est de l'ordre de 1100 à 2500 μ pour un pourcentage de fibres de carbone de 0.056 à 0.16%, alors que celle correspondant au point de changement entre le premier et le deuxième taux, ε_{CFT} est de l'ordre de 1800 à 1900 μ pour un pourcentage de fibres de carbone de 1.336%; ainsi, ε_{CFS} et ε_{CFT} sont proches.

Miyauchi et autres (1997) [47], ont entrepris des essais de compression uniaxiale sur des colonnes en béton renforcées à l'aide de CFS. Pour évaluer cette technique de renforcement. Ils tiennent compte de la résistance en compression du béton (30 et 50 MPa), du nombre de couches de CFS (1,2 et 3 couches) et des dimensions de la colonne (100 x 200 mm et 150 x 300 mm). Les résultats montrent que: (a) la résistance en compression du béton renforcé à l'aide de CFS augmente linéairement avec le nombre de couches de CFS, mais pas avec la résistance en compression du béton non confiné et les dimensions de l'échantillon; (b) la déformation axiale correspondant à la contrainte maximale du béton confiné à l'aide de CFS augmente de façon exponentielle avec le nombre de couches de CFS et est influencée par la résistance du béton non confiné. Sur la base de ces résultats, une relation contrainte-déformation pour le béton renforcé est proposée pour effectuer une analyse en temps réel de piles de pont renforcés à l'aide de CFS et soumis à des forces sismiques. Cette relation consiste en une parabole et une ligne droite tangente à la parabole. Les résultats analytiques montrent que les piles de ponts existants, renforcés à l'aide de deux couches de CFS, pourraient résister à un tremblement de terre d'une force égale à celle du tremblement de terre de Southern Hyogo Prefecture.

Mirmiran et Shahawy (1997) [48], ont effectué des essais de compression uniaxiale sur un total de trente spécimens cylindrique de 152.5×305 mm, 24 spécimens sous forme de tubes en FRP remplis du béton et 6 spécimens de béton témoin. La résistance de béton témoin varie entre 29.6 et 32MPa. Trois enveloppes avec épaisseurs différent ont été examinées : 6 plis (1.3 mm), 10 plis (2.1 mm) et 14 plis (3 mm).

Les tubes de FRP se sont composés de fibres verre type E continues et de la résine polyester. Les résistances des tubes de FRP se sont étendues de 524 MPa à 641 MPa. Pour empêcher l'interaction entre l'enveloppe et le béton dans la direction axiale, une cannelure épaisse de 5 millimètres a été coupée des deux côtés de chaque spécimen à enIron 19 mm de la surface d'extrémité. De divers arrangements des jauges ont été employés pour enregistrer toutes les lectures possibles de contrainte et déformation.

La rupture des spécimens composites a été généralement marquée par la rupture de la fibre de verre près de la mi-hauteur du spécimen. Les chercheurs ont rapporté que la rupture de cisaillement était le mode de rupture primaire. Ils ont noté qu'à la courbe contrainte déformation de béton confiné par FRP est une fonction bilinéaire sans la branche descendante (**figure II.8**).

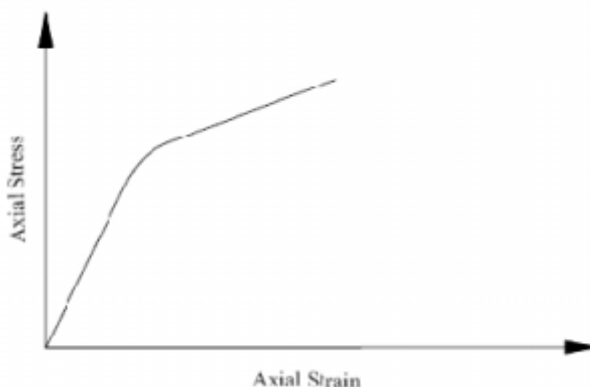


Figure II.8: Courbe contrainte déformation de béton confiné par FRP (Mirmiran and Shahawy, 1997) [48].

La courbe de la **figure II.8** est composée de trois régions. Dans la première région, le comportement est semblable au béton témoin, puisque l'expansion latérale du noyau est insignifiante. Avec l'augmentation des microfissures, une zone de transition est se développe où le tube exerce une pression latérale sur le noyau provoquant la dégradation de rigidité du béton. En fin, une troisième région est identifiée dans laquelle le tube est entièrement activé et la rigidité est généralement stabilisée à un taux constant. L'allure de la courbe dans cette région dépend principalement de la rigidité du tube.

Les chercheurs ont observé une croissance significative de la résistance et la ductilité du béton renforcé par FRP. Ils ont appliqué différents modèles de confinement existant pour le béton confiné par l'acier sur les spécimens confiné par FRP, et conclu que ces modèles donnent des résultats acceptables pour le béton renforcé par l'acier, mais surestiment la résistance du béton confiné par FRP. Pour cela ils ont souligné le besoin de développer de nouveaux modèles spécifiques pour les colonnes confinées par FRP.

Samaan et autres (1998) [49], ont proposé un modèle simple pour estimer l'allure bilinéaire de la courbe contrainte-déformation du béton confiné par FRP dans les directions axiales et latérales. Afin d'examiner le comportement de béton confiné, Samaan et autres, ont pris en considération la variation volumétrique de béton. La **figure II.9** montre que les contraintes volumétriques en béton confiné par l'acier deviennent instables une fois le tube en acier atteint son point de rendement maximal. Cependant, le tube de FRP raccourcit l'expansion latérale du noyau de béton après que la résistance ultime de béton non confiné est atteinte. Il renverse la direction de la réponse volumétrique du noyau de béton avec une contraction de large volume. La différence de comportement a été prononcée dans la réponse de taux de dilatation des deux mécanismes de confinement. Le taux de dilatation μ , est défini comme taux de changement des contraintes latérales (radiales) par rapport aux contraintes axiales selon l'équation suivante :

$$\mu = -\frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_c} \quad (\text{II.9})$$

Avec ε_c : la déformation axiale et ε_r : La déformation latérale (radiale).

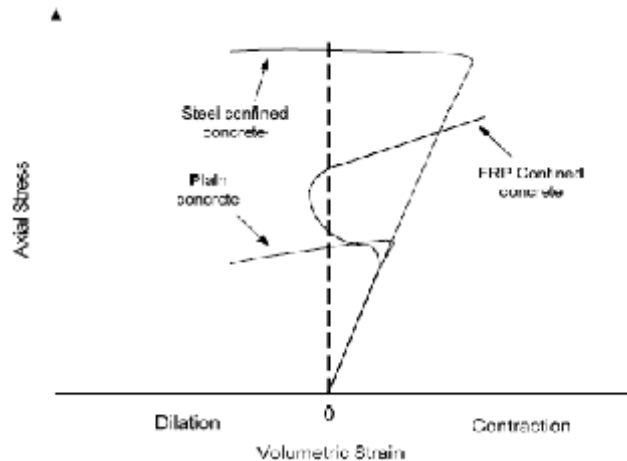


Figure II.9: Réponse volumétrique de béton confiné par FRP, béton confiné par acier et béton non confiné (Samaan et autres, 1998) [49]

Samaan et autres (1998) [49], ont proposé un simple modèle pour calculer la réponse bilinéaire du béton confiné par FRP dans les directions axiales et latérales. Le modèle est basé sur la corrélation entre le taux de dilatation (expansion) de béton, l'enveloppe FRP et le noyau du béton. Les courbes contrainte-déformation prévues sont adéquates avec les résultats de leur étude. La

résistance à la compression du béton confiné f_{cc} et la déformation ε_{cc} correspondant à la contrainte maximale de béton confiné, proposé par **Samaan et autres (1998) [49]** sont données par :

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 6 \frac{f_l^{0.7}}{f_{co}} \right] \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{f_{cc} - 0.872 f_{co} - 0.371 f_l - 6.258}{245.61 f_{co}^{0.2} + 1.3456 \left(\frac{E_{frp} t_{frp}}{d} \right)} \dots\dots\dots(\text{II.11})$$

Où : E_{frp} est le module d'élasticité de tube en FRP.

d : le diamètre du noyau de béton.

Mirmiran et autres (1998) [50], ont entrepris une étude expérimentale sur des cylindres courts et des spécimens carrés de béton, confinés par FRP. Ils ont étudié trois aspects ; 1) la forme de la section transversale, 2) la longueur de colonne par rapport au diamètre et 3) le lien d'interface entre le noyau et l'enveloppe. Une série d'essais de compression uniaxiale a été effectuée sur un total de 12 spécimens de $152.5 \times 152.5 \times 305$ mm et 30 spécimens cylindrique de 152.5×305 mm. Trois épaisseurs différentes de tube de 1.45 mm, de 2.21 mm et de 2.97 mm ont été examinées pour les deux sections transversales. Les tubes utilisés sont des filaments de fibres de verre (E) continues avec la résine de polyester employée comme matrice. Les tubes dans tous les spécimens ont été cannelés à 19 mm des deux extrémités. Les diamètres intérieurs de tous les tubes étaient de 145 mm. Des rapports diamètre/épaisseur des tubes examinés était 100, 65 et 50 pour des épaisseurs de tube de 1.45 mm, 2.21 mm et 2.97 mm, respectivement. Afin de déterminer les effets de longueur par rapports au diamètre, des rapports de 2:1 à 5:1 ont été examinés.

Mirmiran et autres (1998) [50], ont étudié la réponse volumétrique des sections carrées et circulaires, qui a été défini comme le changement de volume par rapport au volume unitaire de béton, calculé comme suit :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_c + 2\varepsilon_r \dots\dots\dots(\text{II.11})$$

Où ε_v : Déformation volumétrique

Ils ont constaté que tous les spécimens, indépendamment de leur forme, restent compacts sous la charge axiale jusqu'à ce qu'ils atteignent un niveau d'effort critique. En ce moment ils commencent à augmenter volumétriquement. Tandis que pour le béton témoin il ne persiste pas au delà de ce point, Il a été conclu que l'inversion de la contrainte volumétrique est une fonction des matériaux de tube et pas de la forme de la section transversale. Dans le cas des sections transversales carrées, le rayon faisant le coin de tube affecte l'efficacité de confinement et se sont avérés moins efficaces que les sections circulaires. Les chercheurs ont défini un rapport modifié de confinement « **modified confinement ratio** » (MCR) en fonction du rayon faisant le coin et de la résistance de cercle de l'enveloppe, il est donné par :

$$MCR = \left(\frac{2R}{D} \right) \frac{f_l}{f_{co}} \dots\dots\dots(\text{II.12})$$

Où R = rayon faisant le coin et D = dimension intérieure de tube.

Mirmiran et autres ont proposé le rapport suivant pour les spécimens enveloppés de fibres

$$\frac{f_{cu}}{f_{cc}} = 0.169 \ln MCR + 1.32 \quad \text{Pour } MCR > 0.15 \quad \dots\dots\dots(\text{II.13})$$

Où f_{cu} : Contrainte ultime de béton confiné

Pour des valeurs de MCR moins de 0.15, l'enveloppe n'est pas très efficace pour renforcer le noyau du béton. L'effet de la longueur par rapport au diamètre dans la marge de 2:1 et de 5:1 n'est pas significatif pour la résistance ou la ductilité de la section.

La **figure II.10** montre les nervures intérieures de cisaillement employées par **Mirmiran et autres (1998) [50]** pour leurs tubes de FRP utilisés au lien d'interface d'étude entre le noyau et l'enveloppe. Les nervures longitudinales et transversales étaient de 42 mm et de 19 mm, respectivement, et de 6.4 mm d'épaisseur. Les nervures étaient faites d'une pâte spéciale de polyester. Ils ont constaté que les nervures aident à améliorer la capacité de charge du tube en distribuant l'effort de pression autour de la circonférence du tube. Les renforts longitudinaux aident le tube à résister aux charges axiales et latérales. Ils divisent également l'enveloppe en petits panneaux, augmentant de ce fait la résistance à la compression, et aident pour arrêter la croissance des fissures en supportant les charges de tension que l'enveloppe ne peut pas supporter. Les nervures transversales redistribuent les efforts autour des discontinuités structurales, fournissent des contraintes d'extrémité pour les nervures longitudinales.

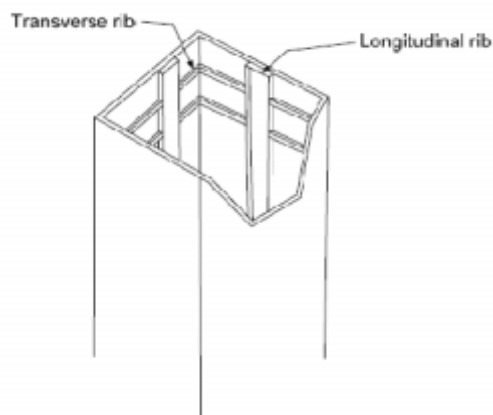


Figure II.10: Tube de FRP avec des nervures (Mirmiran et autres, 1998) [50].

Toutanji (1999) [51], a présenté les résultats d'une étude expérimentale et analytique sur des colonnes de béton extérieurement enveloppées par des composites en FRP. Il a examiné un total de 18 spécimens cylindrique de 76×305 mm qui inclus 12 spécimens de béton enveloppés par FRP et six spécimens de béton témoin sous la compression uniaxiale. Trois types de feuilles de FRP ont été employés, deux carbonées et un verre, qui sont collées avec de

La résine époxyde. La résistance à la compression moyenne de béton est de 30 MPa approximativement.

Les résultats d'essai ont prouvé que le confinement externe du béton par les feuilles composées de FRP peut de manière significative augmenter le pouvoir absorbant de résistance, de ductilité et d'énergie des spécimens. La résistance à la compression axiale des spécimens confinés avec la fibre de carbone était plus haute que celle de ceux confinés avec des fibres de verre. Cela est dû au fait que la pression latérale développée par les fibres de carbone est plus élevée que celle développée par les fibres de verre. **Toutanji** a proposé les équations **II.14** et **II.15** pour calculer la contrainte à la compression maximale (f_{cc}) et la déformation maximale (ε_{cc}) de béton confiné par FRP.

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.85} \right] \dots\dots\dots(\text{II.14})$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + (310.57 \varepsilon_{frp} + 1.9) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots(\text{II.15})$$

Où ε_{frp} est la contrainte de rupture de FRP.

De ses essais, **Toutanji [1991] [51]** a développé un modèle pour définir le comportement contrainte-déformation (axiale et latérale) du béton confiné avec des feuilles en FRP. Le modèle proposé se compose de deux régions distinctes. Dans la première région, le comportement est semblable à celui du béton témoin, puisque l'expansion latérale du béton est insignifiante. Dans la deuxième région, qui dépend principalement de la rigidité de FRP, ce dernier est entièrement activée. Dans cette région, la rigidité est généralement stabilisée. Les courbes contrainte-déformation des colonnes confinées par FRP donné par le modèle de Toutanji, ont été confrontées avec celles obtenues expérimentalement. Une comparaison avec d'autres essais obtenus à partir de la littérature et celui du modèle développé a donné des résultats acceptables, mais le modèle a généralement surestimé l'effort axial des colonnes de béton emballées par FRP.

Saafi et autres (1999) [21], Ont conduit des études expérimentales et analytiques pour évaluer les performances des colonnes de béton confinées avec des tubes de CFRP et de GFRP. Les variables d'essai ont inclus le type de fibres, l'épaisseur du tube et la résistance à la compression

du béton. Trente cylindres de béton (18 tubes en FRP remplis du béton et 12 cylindres de béton témoin) ont été examinés dans la compression. Tous les spécimens sont des colonnes courtes de 435 mm d'hauteur et 152.4 mm de diamètre. Les épaisseurs des tubes de GFRP examinés étaient 0.8, 1.6 et 2.4 mm et les épaisseurs des tubes de CFRP utilisés étaient de 0.11, 0.23 et 0.55 mm. La résistance à la compression moyenne du béton moyenne est de 38 MPa à 28 jours. Du côté externe des tubes de FRP remplis par béton, des jauges de contrainte ont été attachées à l'hauteur des spécimens pour mesurer la contrainte longitudinale et latérale pendant le chargement. Deux LVDTs ont été également reliés aux blocs en acier qui transfèrent la charge au béton. Ils ont constaté que les colonnes renforcées par les tissus en fibres de carbone ou en fibres de verre montrent une croissance significative de la résistance et la ductilité, comparées à celles des spécimens non confinés. Le taux d'accroissement dépend de l'épaisseur de tube, des propriétés mécaniques du tube composite et de la résistance du béton témoin. Des bruits de fissuration ont été entendus pendant l'étape moyenne du chargement. Le mode de rupture des spécimens composites a été généralement marqué par la rupture du tube de fibre avec l'éclatement le long de mi-hauteur du spécimen (**Figure 2.11**). Dans le cas des tubes de fibre de carbone, la rupture était plus soudaine et a été accompagnée de la rupture simultanée du tube composite et de l'écrasement du noyau de béton.

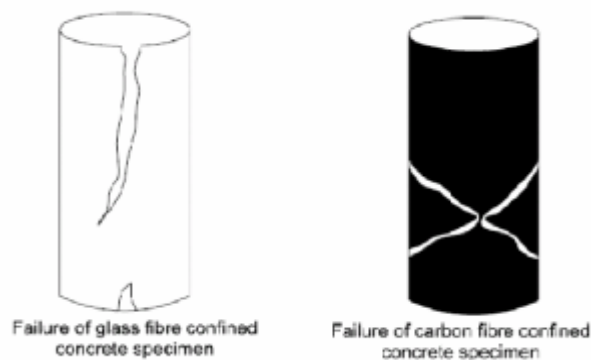


Figure II.11: Modes de rupture des spécimens (Saafi et autres, 1999) [21].

La courbe contrainte-déformation du béton confiné par les tubes en FRP présente une allure bilinéaire dans les directions axiales et latérales (**Figure II.12**). Dans la première zone linéaire, le béton a principalement pris la charge axiale et la pente du béton confiné était identique que la

pente pour le béton non confiné. Aux niveaux d'effort près de l'effort ultime du béton non confiné, une zone de transition apparaisse dans la deuxième partie de la zone bilinéaire. La deuxième pente est fonction de la rigidité du tube en FRP. Le point de courbure entre les deux pentes a eu lieu aux niveaux d'effort légèrement plus haut que la résistance du noyau de béton non confiné.

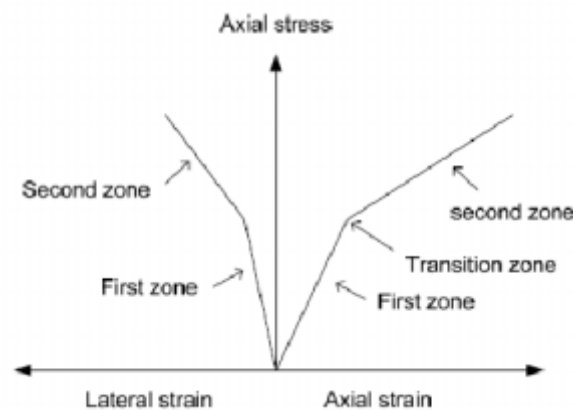


Figure II.12: Courbes contrainte-déformation simplifiées de béton confiné par FRP (Saafi et autres, 1999) [21].

Selon **Saafi et autres (1999) [21]**, la résistance à la compression maximale de béton confiné par FRP peut être calculé d’après l’équation suivante :

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.84} \right] \dots\dots\dots (II.16)$$

Miyauchi et autres (1999) [52], ont entrepris une étude expérimentale sur des cylindres de béton normaux et de haute résistance confinés par des feuilles de CFRP. Les cylindres sont circulaires, de 100 mm ou de 150 mm de diamètre avec une hauteur de 200 mm ou 300 mm, respectivement. La résistance à la compression du béton s’étendue de 20 à 100 MPa. Des feuilles de fibre de carbone présentent une résistance à la traction ultime de 3481 MPa et un module d’élasticité de

230.5 GPa, ont été enveloppées sur la circonférence des cylindres avec une, deux ou trois couches. Tous les cylindres renforcé par la feuille de CFRP sont rompue par la rupture de tension de la feuille à l' mi-hauteur du spécimen. La résistance à la compression et la ductilité du béton confiné par la feuille de CFRP ont augmenté. D'après les résultats d'essai Ils ont conclu qu'une pression de confinement plus élevée est exigée pour que le béton de haute résistance obtienne le même niveau de ductilité que le béton d'une résistance normale. Miyauchi et autres ont proposé les II.17 et II.18 pour déterminer la résistance à la compression et la déformation qui correspond à cette résistance de béton confiné.

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2.98 \frac{f_l}{f_{co}} \right] \dots\dots\dots(\text{II.17})$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + (15.81 - 0.093) f_{co} \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{(0.246 + 0.0064 f_{co})} \right] \dots\dots\dots(\text{II.18})$$

Rochette et Labossière (2000) [53], ont présenté les résultats d'un projet de recherche sur le confinement des colonnes de béton carrées et rectangulaires avec des matériaux composites. Des spécimens à échelle réduite confinés avec des feuilles de fibre de carbone (continu) et d'aramide (bidirectionnelle tissé) ont été examinés dans la compression uniaxiale. Les modèles de colonne ont été faits de béton normal d'une résistance de 40 MPa en Iron. L'objectif de l'étude était d'évaluer l'influence des paramètres suivants sur la résistance des colonnes ; 1) l'effet de la rigidité de confinement ; et 2) la forme de la section.

La variation de confinement a été obtenue en enveloppant les sections avec différents nombres de feuilles composites. L'effet de la forme de section sur la résistance axiale a été évalué en examinant différents rayons faisant le coin ; selon le rayon choisi, les sections varient de la forme rectangulaire à la forme circulaire (**figure II.13**).

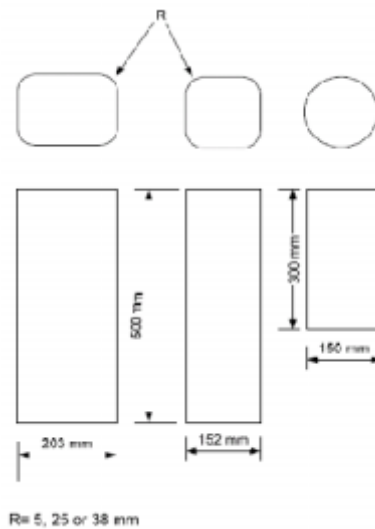


Figure II.13: Dimensions des spécimens d'essai : rectangulaire, carré, et circulaire (Rochette et autres, 2000) [53].

Les spécimens carrés ont une section transversale de 152×152 mm avec une hauteur de 500 mm. Des cylindres ont été également examinés pour achever l'étude. Ceux-ci incluent trois cylindres identiques 100×200 mm confinés avec un emballage fait de deux plis de fibres de carbone. Quatre cylindres additionnels avec des dimensions de 150×300 mm ont été également enveloppés avec des fibres d'aramide utilisant différents nombres de plis dans chaque cas. Les sections rectangulaires ont une section transversale de 152×203 mm et différents rayons faisant le coin ont été enveloppés par trois, quatre ou cinq plis de fibre de carbone.

Ils ont constatés que pour un nombre donné de couches (plis), l'effet de confinement est directement proportionnel à la forme de la section. **Rochette et Labossière (2000) [53]** ont suggéré que le rapport du rayon faisant le coin à la longueur latérale d'une section carrée qui peut prendre des valeurs entre 0 et 0.5, puisse être employé pour estimer le confinement par enveloppe composite du béton. Le confinement le plus efficace a été obtenu pour les sections circulaires. Les chercheurs ont recommandé que les bords de section doivent toujours être arrondis suffisamment pour empêcher la rupture prématurée des fibres dans l'enveloppe par des fragments de la section de béton. Ils ont observé que le confinement excessif mène aux ruptures soudaines et explosives.

Chaallal et Shahawy (2000) [54], ont présenté les résultats d'une recherche expérimentale sur les performances des poutres-colonnes de béton armé renforcées avec un matériau composite CFRP (bidirectionnel) extérieurement appliqué. Le moment externe a été appliqué aux spécimens par des croisillons qui ont été moulés en tant qu'élément de colonnes. Les spécimens d'essai choisis pour l'étude ont une section rectangulaire de 200×300 mm et une longueur totale de 3500 mm (**figure II.14**). Six séries d'essais ont été réalisées sur les spécimens. Les cinq premières séries, avec des excentricités de 0, 75, 150, 300, et 400 mm, ont été exécutées sous une charge combinée (compression axiale et flexion). La sixième série a été examinée dans la flexion pure quatre points.

Les résultats des essais de **Chaallal et de Shahawy [54]** indiquent que la capacité de résistance de poutres-columns s'améliore de manière significative en raison de l'action combinée longitudinale et transversale du tissu composite bidirectionnel. Les fibres de CFRP longitudinales ont contribué de manière significative à la résistance en flexion, tandis que les fibres transversales ont augmenté la capacité de compression par l'action de confinement. Sous la combinaison de la force axiale et de moment de flexion, un gain de 70% dans la capacité de moment a été atteint. L'augmentation de la déformation à la compression due à l'effet de confinement varie de 49% à 166%. Le confinement transversal a été engagé dans la zone de compression au début de chargement. Les auteurs ont proposé un procédé de conception, basé sur la résistance du béton confiné dans la zone de compression, en même temps qu'un rapport efficace de confinement cela prend en considération la forme rectangulaire des poutres-colonnes.

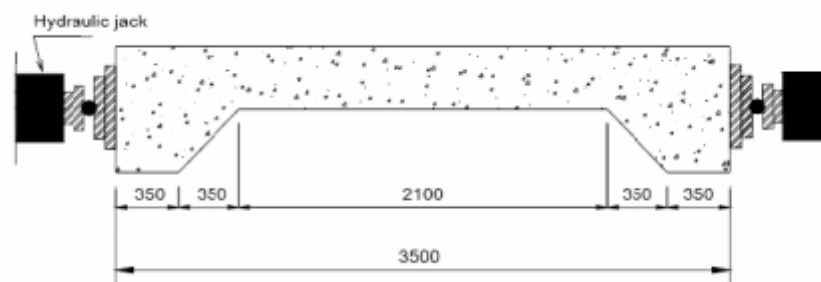


Figure II.14: Dimensions de spécimen en millimètres (Chaallal et Shahawy, 2000) [54].

M. Shahawy et autres (2000) [55], ont réalisé des essais de compression axiale sur un total de 45 cylindres de béton confinés par fibres de carbone et 10 cylindre de béton non confiné avec un diamètre de 152.5 mm et une hauteur de 305 mm. Le programme expérimental a inclus deux paramètres : résistance de béton et nombre de couches des enveloppes en carbone. Deux résistances de béton 20.7 MPa et 41.4 MPa ont été employées. Les spécimens de 20.7 MPa ont été enveloppés avec 1, 2, 3, 4, ou 5 couches de tissu, alors que les spécimens de 41.4 MPa étaient enveloppés avec 1, 2, 3, ou 4 couches. Pour chaque béton et nombre de couches, cinq échantillons identiques ont été réalisés.

De leurs travaux, les auteurs ont constaté que l'enveloppe a augmenté, de manière significative la résistance et la ductilité du béton en raccourcissant sa dilatation latérale. Un modèle de confinement qui a été à l'origine développé pour les tubes FRP en verre remplis de béton a montré la bonne concordance avec les résultats d'essai. Les conclusions suivantes ont été développées :

- Le même modèle de confinement peut être appliqué aux tubes FRP remplis de béton et aux cylindres de béton enveloppés par des fibres, parce que l'adhérence entre le béton et l'enveloppe ne semble pas affecter le confinement significativement.
- Le même modèle de confinement peut être appliqué aux deux types de fibres en carbone et en verre, tant que le modèle tient compte de la tendance de dilatation du béton en fonction de la rigidité de l'enveloppe.



(a)



(b)

Figure II.15: (a) instrumentation ; et (b) mode de rupture des spécimens de béton enveloppés par des fibres de carbone [55].

Mirmiran et autres (2001) [56], ont examiné sept tubes de FRP remplis de béton sous la compression uniaxiale. Les tubes sont des filaments enroulés avec les fibres de verre type E continues sous un angle de $\pm 75^\circ$ par rapport à l'axe longitudinal du tube. Les tubes ont des diamètres de noyau de 147 mm et des épaisseurs de paroi de 3.68 mm. Deux des spécimens étaient de 813 mm de longueur et les cinq autres étaient de 1370, 1650, 2270, 2590, et 2740 mm de longueur. Les tubes ont été remplis de béton d'une résistance à la compression de l'ordre de 22.4 MPa.

Ils ont constaté que l'élanement de la colonne n'affecte pas la rigidité du système hybride. Cependant, il réduit la résistance maximale et la déformation maximale de la colonne considérablement. Les auteurs ont observé que la rupture peut ne pas être à la mi-hauteur et il dépend de l'excentricité de la charge, de l'alignement de la colonne et, en particulier, de l'importance de courbure qui est développée selon la colonne.

Huei-Jeng Lin et Chin-Ting Chen (2001) [57], ont étudié la résistance des cylindres en béton confinés par des matériaux composites selon trois manières différentes. En premier lieu c'était l'essai de résistance sur un cylindre de béton renforcé par différents nombres de couches de matériaux composites en fibres de verre ou en fibres de carbone. Les phénomènes mécaniques de la rupture et le rapport entre la résistance de cylindre et le nombre de couches du composite sont étudiés.

Le deuxième ensemble d'expériences est concentré sur la résistance d'un cylindre de béton confiné à la fois par les fibres de verre et les fibres de carbone.

Le troisième c'est l'étude de la résistance de cylindre en confinant partiellement le cylindre avec des matériaux composites en fibres de carbone et en fibres de verre.

Deux types d'éprouvettes de dimensions 120×240 mm et 100×200 mm ont été employés dans les expériences.

Une ou deux couches de matériau composite en fibre de verre ou en fibres de carbone ont été alors enroulées autour des cylindres. **La figure II.16** présente un diagramme typique contrainte-déformation d'un cylindre de béton confiné.

Au début et pendant que l'effort axial agit sur le cylindre de béton confiné, le béton soutient le chargement. La similitude dans la pente initiale de la courbe entre le cylindre de béton confiné et non confiné indique que la pression de confinement au début sera faible. Après que la contrainte dépasse le point f_{co} , la courbe contrainte-déformation aura une pente de plus en plus petite qui se développe linéairement en approchant la rupture finale. Les figures II.17 et II.18 montrent les phénomènes de rupture des cylindres de béton enveloppés par des matériaux composites (fibres de verre et fibres de carbone).

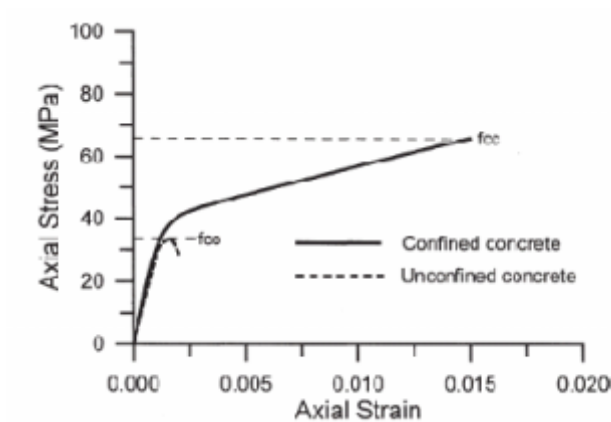


Figure II.16: Diagramme typique contrainte-déformation de béton confiné, [57].



Figure II.17: Mode de rupture des cylindres enveloppés avec fibres de verre

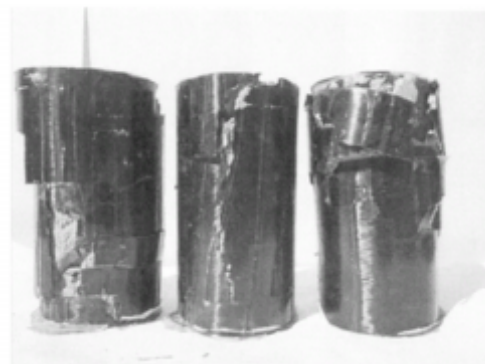


Figure II.18: Mode de rupture des cylindres enveloppés avec fibres de carbone

Huei-Jeng Lin et Chin-Ting Chen [57], ont étudié aussi des cylindres enveloppés avec trois couches de matériau composite en fibres de verre et en fibres de carbone. Le confinement a suivi deux modèles. Dans le premier modèle, une couche en fibres de verre et deux couches en fibres de carbone ont été employées, alors que le deuxième modèle a employait deux couches en fibres de verre et une couche en fibres de carbone. En Totalité six empilements ont été adoptés : G/C/C, C/G/C, C/C/G, G/G/C, G/C/G et C/G/G.

La figure II.19 représente schématiquement les ordres d'empilement.

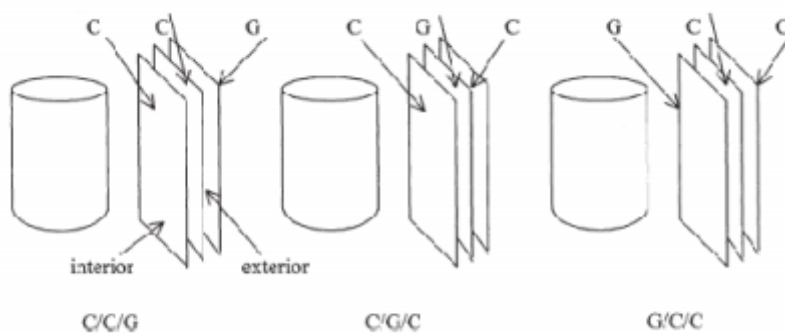


Figure II.19: Ordres d'empilement (C: carbone, G: glass).

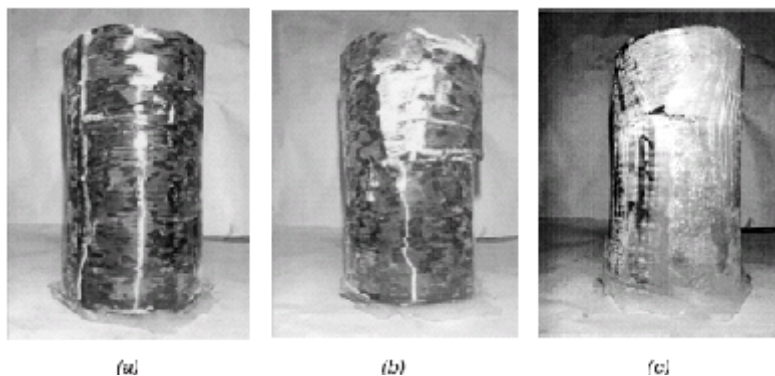


Figure II.20: Mode de rupture des cylindres enveloppés par : (a) G/C/C; (b) C/G/C et (c) C/C/G.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, **Huei-Jeng Lin et Chin-Ting Chen [57]**, ont conclu ce qui suit :

1. l'augmentation de la résistance des spécimens de béton confiné est proportionnelle au nombre de couches du matériau composite. Ce phénomène est le même que celui discuté par **Hanna et Jones [1997]**.

II. dans le cas ou on emploie deux ou plusieurs matériaux composite différents pour envelopper le cylindre de béton, l'effet de l'ordre d'empilement doit être pris en considération. Ils recommandent de confiner le cylindre de béton tout d'abord avec le matériau composite le plus ductile.

3. La résistance d'un cylindre de béton confiné renforcé par différents matériaux composites dans des régions distinctes, est inférieure celle d'un cylindre renforcé par un seul matériau composite, ainsi, ce genre de renfort n'est pas recommandé.

Ces auteurs ont proposé un modèle simple de rupture qui dérive de l'observation des phénomènes expérimentaux. Les résultats du modèle simple et d'autres modèles développés jusqu'ici sont analysés et comparés aux données expérimentales. Les résultats comparatifs démontrent que le modèle proposé correspond plus étroitement aux expériences que les autres modèles.

Fam et Rizkalla (2001a) [58], ont examiné 12 cylindres tubulaires hybrides d'un rapport longueur par rapport au diamètre de 2:1 sous la compression axiale. Les essais ont été réalisés pour étudier les effets de la structure en stratifié, l'effet de la configuration de la section en coupe, effet de l'état de GFRP tube/interface béton, effet des tailles de trou et l'effet de l'épaisseur des tubes. La résistance à la compression de béton varié de 37 à 58 MPa.

L'étude a décrit le comportement des tubes de GFRP remplis de béton axialement chargés ainsi que l'effets bénéfiques de confinement dans des applications pratiques et des conditions de charge réalistes. Pour évaluer l'effet bénéfique de comportement sur toute la portance des cylindres, le comportement axial mesuré (charge-déformation) a été comparé à celui obtenu par la superposition du comportement axial du tube creux de GFRP et du noyau de béton témoin (**figure II.21**). L'étude expérimentale a étudié trois aspects :

- 1) tubes de GFRP partiellement remplis avec des trous intérieurs ;
- II) un tube dans un système de tube;
- 3) sections composites entières où le tube et le noyau sont collés pour résister à la charge totale axiale appliquée.

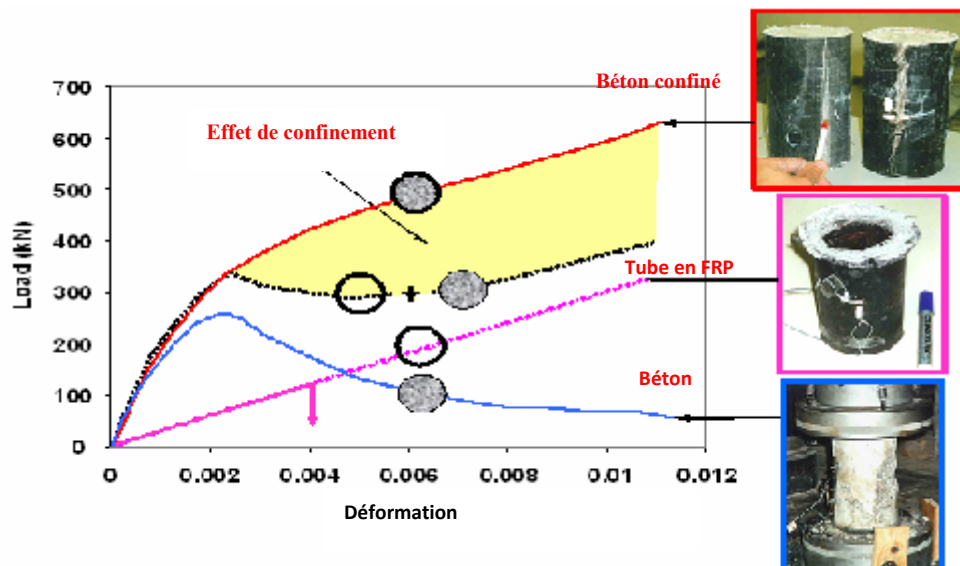


Figure II.21: Effet de confinement sur le comportement du béton (Fam et Rizkalla, 2001a) [58].

Une structure en stratifié a été conçue pour fournir la résistance dans la direction axiale et circulaire. Une interface entre le béton et les tubes a été réalisée en appliquant une couche mince d'époxyde à la surface des tubes et du sable de pulvérisation postérieur de silice sur l'époxyde visqueux. L'étude a montré que l'effet de confinement est fortement dépendant des conditions de frontière, la structure en stratifié du tube et la taille du trou central.

Le tube est biaxialement chargé sous l'effet de la compression axiale et la contrainte de traction, donc le matériau est régi par la résistance biaxiale de l'enveloppe. En outre, le chargement du tube cause l'expansion latérale, résultat d'une faible pression de confinement appliquée au béton.

Les essais de **Fam et de Rizkalla** ont prouvé que les tubes de GFRP complètement remplis de béton fournissent le confinement le plus efficace. Bien qu'un trou intérieur offre l'économie en matériau et réduit son propre poids, il réduit l'effet de confinement quoiqu'un niveau élevé de ductilité soit maintenu. **Fam et Rizkalla** ont également prouvé que les tubes de GFRP fournissent une résistance de béton confinée semblable à celle donnée par les tubes en acier de plus petite épaisseur de paroi du tube. Cependant, un niveau plus bas de ductilité est atteint. La courbe contrainte-déformation du béton confiné par GFRP était approximativement bilinéaire avec la zone de transition près de la résistance maximale du béton témoin. Un changement de pente se produit quand le béton augmente de volume, produisant une plus grande tension latérale que celle

du tube. La pente de la deuxième branche est régie par la rigidité du tube aussi bien que la taille intérieure de trou. La condition d'interface entre le tube et le béton a un effet insignifiant sur le comportement quand le noyau de béton et le tube sont axialement chargés. La résistance ultime du cylindre a été régie par la rupture de l'enveloppe de GFRP. À la différence d'un tube en acier, les tubes de GFRP sont rompus d'une façon fragile.

Fam et Rizkalla (2001b) [59], ont fourni un modèle analytique pour calculer le comportement des colonnes de béton circulaires axialement chargées et confinées par des tubes de FRP. Le modèle proposé est une prolongation du modèle de confinement de **Mander et autres (1988)** pour le béton confiné par un renfort en acier. Le modèle est capable de prévoir les réponses axiales et latérales de contrainte-déformation du béton sous la pression de confinement croissante. Le modèle explique tous les deux, totalement remplis et les tubes partiellement remplis (avec les trous centraux). Le modèle a été appliqué avec succès à différentes colonnes chargées dans la compression et examinées par de divers chercheurs. Une bonne corrélation avec des résultats expérimentaux a été rapportée.

Une étude paramétrique par **Fam et Rizkalla (2001b) [59]** a montré que l'augmentation de la rigidité du tube de FRP dans la direction circulaire, en orientant les fibres à la direction de cercle ou en augmentant l'épaisseur de tube, produit une augmentation de la résistance de béton confiné. L'augmentation de la résistance et la rigidité du FRP dans la direction longitudinale du tube réduit l'efficacité de confinement pour la même épaisseur de tube. En outre, la fourniture des trous intérieurs a réduit l'efficacité de confinement. L'étude également indiquée qu'ignorant l'effort de compression axial développé dans le tube surestimerait de manière significative la résistance du béton confiné.

Lam et Teng (2002) [60], ont présenté une étude complète sur les modèles de résistance à la compression du béton confiné avec FRP. Des modèles existants pour le béton confiné avec FRP ont été comparés aux données expérimentales disponibles rassemblées d'une recherche étendue de la littérature. De leur étude ils ont constaté ce qui suit :

- Les résultats existants montrent une grande déférence en termes d'efficacité de confinement de FRP. Ceci implique que les modèles de résistance basés sur des essais

limités sont susceptibles d'être incertains. La résistance de béton non confiné, le diamètre de spécimen, le rapport longueur-diamètre et le type de fibre présentent peu d'effet sur l'efficacité de confinement de FRP. Une cause principale pour l'éparpillement des résultats est l'inexactitude dans les propriétés des matériaux utilisées. Les variations inhérentes de la résistance de béton non confiné, mènent également à un certain éparpillement dans les essais à de bas rapports de confinement.

- Les résultats des essais montrent une relation linéaire entre la résistance du béton confiné et la pression de confinement latérale fournie par FRP. Par conséquent, la complexité en représentant la relation dans beaucoup de modèles existants semble être inutile.

Lam et Teng ont proposé les équations **II.19** et **II.20** pour déterminer la résistance à la compression axiale du béton confiné par FRP (f_{cc}) et la déformation au pic (ϵ_{cc}).

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2 \frac{f_l}{f_{co}} \right] \dots\dots\dots (II.19)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[2 + K_2 \frac{f_l}{f_{co}} \right] \quad K_{II}=15 \text{ pour CFRP} \dots\dots\dots (II.20)$$

Teng et Lam (2002) [60], ont effectué des essais sur des colonnes de béton elliptiques courtes confinées avec le CFRP. Un total de 20 spécimens de colonne dans cinq séries ont été préparés à partir de cinq bétons. Chaque série est composée d'un spécimen circulaire et trois spécimens elliptiques préparés à partir de la même série de béton. Les colonnes circulaires étaient de 152 mm de diamètre et de 608 mm de hauteur. La section et la taille de trois spécimens elliptiques étaient presque identique que ceux pour les spécimens circulaires, avec les rapports nominaux de a/b (représentés sur la figure II.22) étant 5/4, 5/3, et 5/2, respectivement. La résistance à la compression de cube moyen était de l'ordre de 47 MPa.

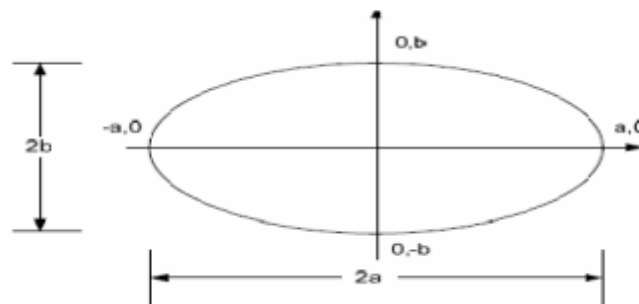


Figure II.22: la section elliptique d'un spécimen

Teng et Lam ont employé deux types de feuilles de fibre, avec leur épaisseur étant de 0.165 mm et de 0.11 mm. Ils ont noté que la résistance à la compression axiale du béton confiné par FRP dans les spécimens elliptiques est régie par la quantité de confinement et le rapport a/b. Le confinement par FRP devient fortement moins efficace tant que la section est devenue plus elliptique mais des gains substantiels de résistance de confinement par FRP pourraient encore être réalisés même pour les colonnes fortement elliptiques. Les chercheurs ont proposé que la résistance à la compression du béton confiné par FRP dans les spécimens elliptiques puisse être prévue utilisant la forme commune de modèles de résistance pour le béton confiné par FRP dans les spécimens circulaires, en remplaçant la pression de confinement f_l par une pression de confinement efficace f_l' . Cette dernière a été exprimée comme produit d'un facteur de forme, expliquant l'effet de la forme de la section, et la pression de confinement des colonnes circulaires équivalentes avec le même rapport volumétrique de FRP. **Teng et lam** ont suggéré une simple relation (**équation II.21**) pour la détermination de la pression de confinement efficace des spécimens examinés dans leur étude, ceux avec un rapport de confinement efficace égal ou moins de 0.11 montre une branche descendante dans la courbe de contrainte-déformation, alors que les autres spécimens montraient une courbe bilinéaire monotonique croissante.

$$f_l' = \left(\frac{b}{a}\right)^2 f_l \dots\dots\dots(\text{II.21})$$

Pour les spécimens postérieurs, une augmentation du rapport de confinement efficace provoque une augmentation de la déformation ultime. **Teng et Lam** ont proposé que la résistance de compression du béton confiné par FRP des colonnes elliptiques puisse être calculée d'après l'équation suivante :

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{f_l}{f_{co}} \right] \dots\dots\dots(\text{II.22})$$

Karabinis et Rousakis (2002) [61], ont présenté une étude effectuée sur 22 spécimens cylindriques avec des dimensions de 200 × 320 mm. Dix-huit (18) des spécimens ont été confinés

par une feuille continue de fibres de carbone FRPC avec une largeur de 300 mm. Dans chaque triade de spécimens identiques, une, deux et trois couches de feuille de carbone ont été appliquées.

Pour la construction des spécimens du béton, deux mélanges ont été employés avec une résistance de 38.5 MPa et 35.7 MPa, respectivement.

Les cylindres enveloppés sont conservés dans des conditions de laboratoire pendant plus de 12 jours après le coulage, ensuite ont été examinés à 56 jours.

Les recherches de **Karabinis et Rousakis**, indiquent que les feuilles en fibres de carbone peuvent effectivement augmenter la résistance et la ductilité du béton. La rigidité de matériau composite est le paramètre de conception principal.

La rupture des spécimens enveloppés était très bruyante suivi d'une rupture « explosive » de la feuille de fibre de carbone. La rupture a commencé au mi hauteur des spécimens avec un développement soudain ou progressif dans les bandes de la feuille du carbone (**figure II.23.a**). Une rupture prématurée s'est produite dans quelques spécimens dus à la rupture locale de la feuille (**figure II.23.b**). Dans quelques spécimens ils ont observé une rupture au niveau de chevauchement (**figure II.24.c**).

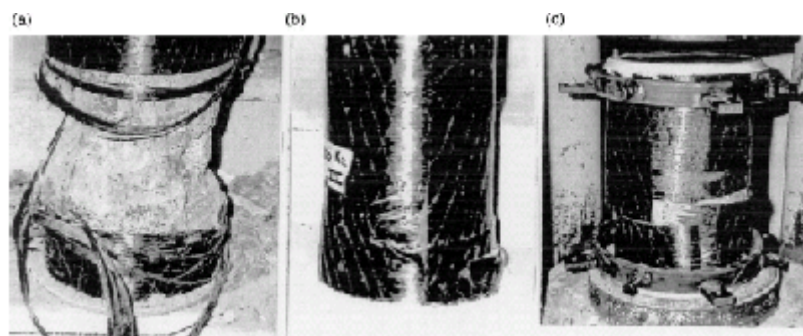


Figure II.23: Mode de rupture des spécimens (Karabinis et Rousakis)[61].

Ils ont proposé un modèle simple basé sur la théorie de plasticité pour la prévision du comportement contrainte-déformation des colonnes cylindriques confinées par FRP. Les prévisions du modèle sont comparées avec les données expérimentaux et trois modèles existants. De la comparaison ils ont observé la corrélation satisfaisante des résultats expérimentaux et analytiques.

Fam et autres (2003) [62], ont présenté les résultats d'essai d'un programme expérimental et ils ont proposé un modèle analytique pour décrire le comportement des tubes de FRP remplis du béton soumis à la combinaison de l'effort axial et l'effort de flexion. Le programme expérimental a inclus 10 spécimens soumis aux charges axiales excentriques, deux spécimens examinés sous les charges axiales concentriques et deux sont examinés en flexion. Le tube de GFRP était le renfort unique utilisé dans les directions longitudinales et circulaires. La résistance de béton de cylindre s'est étendue de 60 à 67 MPa. Deux types différents de structures en stratifié ont été employés pour les tubes de GFRP. Le type I : tubes avec des pourcentages presque égaux de fibre par le volume orienté à 3° et à 88° par rapport à la direction longitudinale. Le type II : tubes avec 70 % des fibres orientées à $\pm 34^\circ$ et 30 % orientées à 80° à la direction axiale. Le diamètre extérieur et l'épaisseur de paroi des tubes de GFRP utilisés étaient de 326/320 mm et de 6.4/5.96 mm pour le type I et le type II respectivement.

Trois mécanismes de confinement du béton ont été examinés (**figure II.24**), y compris de limite supérieure de modèle de confinement complet indépendant de l'excentricité de la charge ($e = 0$), de limite inférieure de modèle non confiné ($e = \alpha$) et d'un modèle variable de confinement expliquant les changements progressifs de l'état de contrainte biaxiale développé dans le tube comme l'excentricité de charge change ($e = \text{général}$).

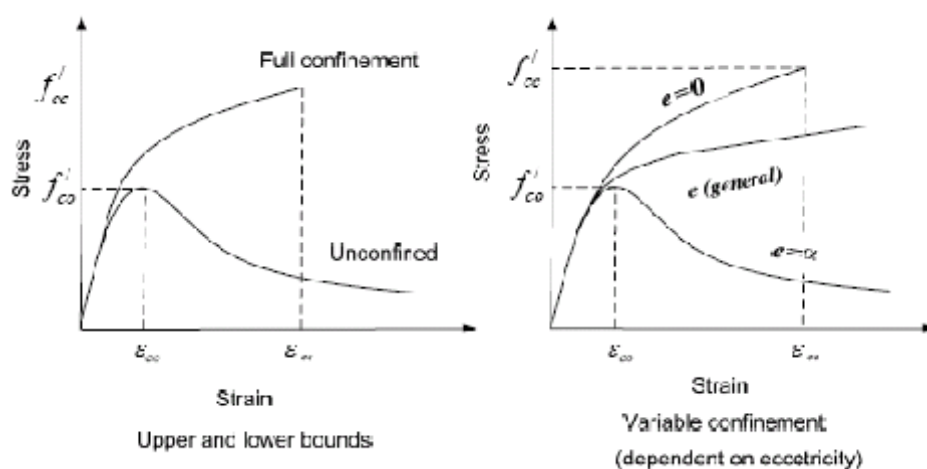


Figure II.24: Mécanisme de Confinement du béton (Fam et autres, 2003) [62].

La théorie des stratifiés, utilisant l'approche de rupture ultime des stratifiés, a été adoptée pour refléter la réduction progressive de la rigidité du tube dû à la rupture progressive du stratifié. Un

modèle analytique utilisant une approche de couche par couche a été développé. Les courbes d'interaction des tubes de FRP remplis de béton avec des rapports de diamètre- épaisseur modérés sont semblables à celle de béton armé. À mesure que la charge axiale accrue, la capacité de moment augmente également et la rupture est régie par la rupture du tube de FRP. Cependant, un point d'équilibré est atteint, au delà la capacité de moment est réduite en augmentant la charge axiale et la rupture est régie par l'écrasement du béton. L'étude a prouvé que le modèle variable de confinement du béton fournit les meilleures prévisions des courbes d'interaction. Les tubes de type I avec un module élastique élevé dans la direction circulaire et un coefficient de Poisson sensiblement inférieur par rapport aux tubes de type II, en conséquence un meilleur confinement. Pour le béton remplis et les tubes épais, l'augmentation du rapport des fibres dans la direction axiale provoque une augmentation de manière significative la résistance à la flexion. Basé sur une étude paramétrique, **Fam et autres** ont constaté que la résistance axiale des tubes épais remplis de béton augmente en augmentant la quantité de fibre dans la direction axiale plutôt que dans la direction circulaire. Dans des tubes épais, la contribution de la rigidité axiale du tube est plus significative que le gain de confinement du béton.

Chaallal et autres (2003) [63], ont présenté un modèle de confinement pour décrire le comportement des colonnes de béton rectangulaires avec FRP collé extérieurement, soumis à l'effort axial. La dérivation du modèle proposé a été basée sur les résultats expérimentaux étendus impliquant des essais sur 90 spécimens rectangulaires représentant deux résistances de béton (21 MPa et 41MPa), et cinq nombres différents des couches de FRP (0, 1, 2, 3 et 4). Les résultats d'essai ont prouvé que le confinement fourni par le FRP améliore la portance et la ductilité des colonnes rectangulaires. Le perfectionnement de la résistance et de la ductilité des colonnes confinées a été régi par le rapport de la rigidité de l'enveloppe de FRP dans la direction latérale à la rigidité axiale des colonnes. Le gain dans l'exécution (Résistance et ductilité) due à l'emballage, par rapport au spécimen non confiné, était relativement plus grand pour les colonnes de béton enveloppées de 21 MPa que pour les colonnes de béton enveloppées correspond a 41 MPa.

Les auteurs ont proposé un modèle trilineaire dans les directions axiales et latérales (**figure II.25**). Les coordonnées des points définissant les modèles étaient déterminées en termes de

coefficient de confinement, contrainte ultime et déformation ultime de béton non confiné. La procédure pour déterminer les points sont présentés en détail dans **Chaallal et autres (2003) [63]**.

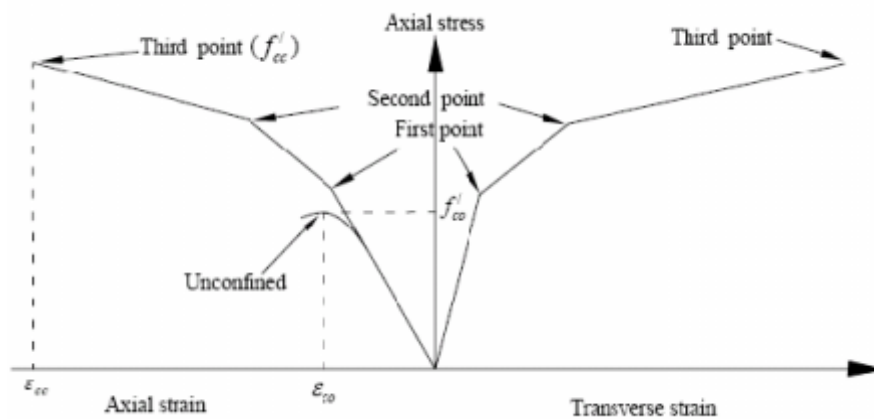


Figure II.25: *Modèle trilineaire de contrainte-déformation dans les directions axiales et latérales (Chaallal et autres, 2003) [63].*

Dans la comparaison du modèle avec les essais, Ils ont observé quelques différences en valeurs de déformation axiales et transversales ultimes pour des spécimens ayant un rapport de plus court à un plus long côté de la section transversale égal a 0.5. Ils ont suggéré aussi que l'utilisation du modèle soit limitée aux colonnes avec des rapports s'étendant de 0.6 à 1.0.

Xiao et Wu (2003) [64], Présentent les résultats expérimentaux d'un programme de recherche pour étudier le comportement contrainte-déformation du béton confiné par divers types d'enveloppes composites de tissu-renforcé du polymère (FRP) : enveloppe de CFRP et GFRP type E. Un total de 143 cylindres de béton standard avec un diamètre de 152 mm et une hauteur de 300 mm, ont été examinés sous le chargement uniaxial de compression. L'impact des différents paramètres de conception comprenant la résistance de béton non confiné, types de composites aussi bien que l'épaisseur de l'enveloppe (nombre de plis) ont été considérés dans cette étude.

Pour chaque combinaison des paramètres d'essai, trois spécimens identiques ont été fabriqués et examinés.

L'échec correspondant à la rupture de l'enveloppe composite était très explosif. Pour quelques spécimens, la rupture d'enveloppe a été accompagnée d'un léger décollement des couches. Les déformations de tension axiales enregistrées de l'enveloppe à la rupture s'étendent de 0.007 à 0.01 pour le CFRP et 0.01-0.018 pour GFRP. Les déformations réduites de rupture des enveloppes peuvent être attribuées à plusieurs facteurs comprenant :

- le développement des fissures de béton,
- le décollement des plis.

Les déformations axiales ultimes du béton correspondant à la rupture varient considérablement de 0.005 à 0.03, avec une tendance d'augmentation pour des spécimens confiné par une enveloppe de résistance la moins faible et une épaisseur la plus élevée (un plus grand nombre de plis). Bien que l'objectif principal de la recherche de **Xiao and Wu [64]** est le développement d'un modèle unifié capable de décrire la relation contrainte-déformation du béton.

Matthys et autres (2005) [65], ont présenté les résultats de huit colonnes à grande échelle axialement chargées confinées par FRP. Les colonnes étaient de 400 mm en diamètre et 2 m de hauteur (**Figure II.26**). Les variables considérées dans le programme expérimental ont inclus le type de FRP (CFRP, GFRP, et polymère de tissu-renforcé hybride contenant une combinaison des fibres en verre et de carbone), l'enveloppement complet ou partiel et l'orientation de fibre (circulaire et hélicoïdal). La déformation de rupture des FRP circonférentielles et l'effet de l'augmentation de l'action de confinement ont été étudiés. Un des objectifs principaux de l'étude est la comparaison des différents modèles existants de résistance à la compression aux essais expérimentaux rassemblés en cette étude. Une révision d'un modèle existant s'est développée précédemment par l'auteur (**Toutanji, 1999**) [51] a été présentée. Le modèle a été mis à jour pour adresser la déformation efficace de rupture de FRP attribuée aux concentrations de contrainte localisées près de la rupture dû aux déformations non homogènes du béton endommagé.

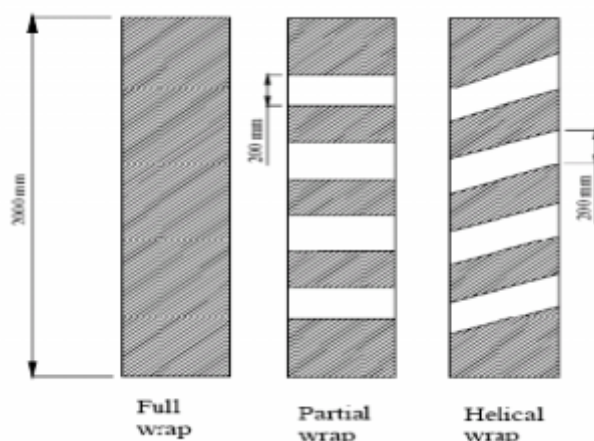


Figure II.26: Dimensions de colonne et configuration d'enveloppe (Matthys et autres, 2005) [65].

Une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux prévus par les modèles existants a montré que les modèles disponibles ont été développés et basés sur les cylindres de petite taille, certains ont prévu la résistance ultime des colonnes à grande échelle assez exactement. Basé sur les essais effectués sur les colonnes à grande échelle enveloppées, et la vérification analytique effectuée, ils ont constaté que le confinement du béton au moyen d'enveloppe de FRP est une technique efficace pour augmenter la résistance et la ductilité. Cependant, la configuration de l'enveloppe a une influence considérable sur l'efficacité de confinement fourni par FRP. Dans le cas des colonnes avec enveloppement partiel, une pression de confinement relativement faible a été obtenue comme une section du béton non confiné, ayant pour résultat une augmentation faible de résistance. L'enveloppement hélicoïdal a montré une augmentation faible de résistance et de déformation axiales à la rupture, comparé à l'enveloppement circulaire. C'est dû au fait que les fibres ne sont plus alignées d'une manière optimale pour retenir l'expansion latérale du béton. **La figure II.27** montre la rupture d'une colonne partiellement enveloppée examinée par **Maathys et autres (2005)**.



Figure II.27: Rupture de colonne partiellement enveloppée (Maathys et autres, 2005) [65].

Maathys et autres ont noté qu'en plus de l'influence de l'enveloppement partiel et l'orientation des fibres sur l'efficacité de confinement, l'augmentation de résistance dépend de la quantité et de la résistance à la traction de l'enveloppe de FRP. Basé sur la recherche de **Maathys et autres. Toutanji (2005) [66]**, a proposé l'expression révisée suivante pour la résistance à la compression du béton confiné.

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2.3 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.85} \right] \dots\dots\dots (II.23)$$

Quatre modèles, par **Samaan et autres (1998) [49]**, **Miyauchi et autres (1999) [52]**, **Saafi et autres (1999) [21]**, et **Toutanji (2005) [66]**, ont été évalués pour prévoir la résistance ultime du béton confiné par FRP. Les erreurs entre les résistances ultimes prévues obtenues par ces modèles et les résultats expérimentaux sont moins de 10%. Les modèles de **Fardis et Khalili (1982) [27]** ainsi que **Lam et Teng (2002) [60]** se sont avérés que la résistance ultime est sous-estimer jusqu'à 20%. D'une notre part, le modèle de **Mander et autres (1988) [34]** à surestimer la résistance ultime.

Bisby et autres (2005) [67], ont évalué plusieurs modèles de confinement précédemment développés pour le béton confiné par FRP, en ce basant sur les résultats d'essai disponibles. La base de données a inclus des essais sur 200 cylindres de béton enveloppés par FRP issu de 20 sources différentes. Selon les chercheurs, en raison de la variabilité inhérente des essais, il a

semblé impossible de développer un modèle empirique avec moins de 14% d'erreur pour la résistance ultime et de 35% d'erreur pour la déformation ultime. Ils ont recommandé que la taille de spécimen à une influence sur l'efficacité de confinement, plus profondément ils ont essayé de voir si les équations empiriques actuellement utilisées de confinement s'appliquent strictement pour toutes les colonnes. Etant donné la variabilité observée dans la base de données expérimentale en ce qui concerne la contrainte ultime, ils ont considéré imprudent de compter une augmentation de la capacité de contrainte axiale du FRP de béton confiné. Les auteurs ont recommandé davantage de recherches dans ce secteur.

Carey et Harries (2005) [68], ont examiné trois spécimens cylindriques de différentes tailles; des spécimens à échelle réduite avec un diamètre de 152 mm et une hauteur de 305 mm, des spécimens de tailles moyennes de diamètre de 254 mm et 762 mm de hauteur ; et des spécimens a grand échelle de 610 mm de diamètre et 1830 mm de hauteur. Ils ont observé que la taille des colonnes n'a pas affecté de manière significative le comportement axial contrainte-déformation. Les auteurs ont noté que la déformation à la rupture de l'enveloppe de FRP est sensiblement moins que la déformation a la rupture du matériau FRP déterminé par des essais de traction standard. Ils ont proposé un facteur de rendement d'enveloppe de 0.5 à 0.6 pour des colonnes confinées avec des matériaux de FRP de poids normal. L'enveloppe de FRP n'a pas été trouvée efficace dans le confinement du béton de haute résistance comparé au béton de résistance normale dû au comportement plus fragile du matériau de résistance élevé.

Hadi (2006) [69], a moulé et examiné neuf colonnes courtes avec des résistances de béton de 57 MPa. Les colonnes étaient de 205 mm de diamètre et de 925 mm de hauteur. Trois colonnes ont été renforcées avec des barres en acier longitudinales, trois étaient des colonnes de béton enveloppées avec trois couches de CFRP, et les autres trois colonnes ont été enveloppées avec trois couches de FRP de verre E. De chaque groupe, une colonne a été examinée sous un chargement concentrique (**Figure II.28**), un à 25 mm d'excentricité et un à 50 mm d'excentricité.



Figure II.28: L'installation expérimentale de colonne confinée par CFRP avec une charge concentrique (Hadi, 2006) [69].

Les essais ont montré qu'en comparaison avec des colonnes de béton armé intérieurement, les colonnes confinées par FRP présentent une capacité de charge plus élevée et une ductilité plus élevée sous un chargement concentrique et excentrique.

Harajli et autres (2006) [70], ont étudié par des moyens expérimentaux et analytiques le comportement contrainte-déformation des colonnes de béton confiné par FRP avec une emphase particulière sur les sections rectangulaires des colonnes. Les variables d'essai ont inclus le rapport volumétrique des enveloppes de FRP, le rapport de la section de colonne et du renfort en acier longitudinal et latéral.

Les résultats d'essai de **Harajli et autres** ont montré que le confinement des colonnes rectangulaires avec des enveloppes en FRP mène à l'amélioration substantielle de la résistance axiale et de la ductilité des colonnes soumises en compression. Pour des sections de colonne carrée sans renfort longitudinal, les augmentations de la résistance axiale étaient de 154, 213, et 230 % pour les spécimens confinés avec une, deux, et trois enveloppes de CFRP, respectivement. L'amélioration de la résistance axiale et de la ductilité de colonne dues au confinement par des enveloppes en FRP est devenue moins significative à mesure que la section de colonne augmentait. Pour les colonnes de béton armé, le confinement externe par des enveloppes en FRP a empêché la rupture prématurée à la compression de la couverture de béton et de la boucle des

barres en acier longitudinales qui se produit normalement dans les colonnes confinées par l'acier en utilisant des moyens traditionnels. Ceci a fourni une augmentation substantielle de la résistance axiale.

Ils ont conclu qu'indépendamment du rapport de la section de la colonne ou du module élastique des enveloppes en FRP, la courbe contrainte-déformation des colonnes confinées par FRP montre un changement distinct du comportement au delà d'une déformation latérale approximativement de 0.002.

Almusallam (2007) [71], a étudié le comportement de 54 cylindres de béton chargés concentriquement confinés avec des enveloppes en GFRP. La résistance du béton s'est étendue de 40 à 100 MPa. La résistance à la traction et le module d'élasticité des stratifiés de GFRP était de 540 MPa et 27 GPa, respectivement. Les spécimens ont été confinés par une et trois enveloppes en GFRP. L'étude a montré que la résistance à la compression et la ductilité du béton confiné a augmenté avec le nombre des plis. Cependant, le confinement par GFRP était moins efficace pour le béton de haute résistance comparé au béton conventionnel. **Almusallam** a proposé l'équation **II.24** pour prévoir la loi de comportement contrainte-déformation sous chargement axial du béton confiné par FRP.

$$f_c = \frac{(E_a - E_b)}{\left[1 + \left(\frac{E_a - E_b}{f_o}\right)^n\right]^{1/n}} + E_b \varepsilon_c \quad \dots\dots\dots (II.24)$$

Où E_a et E_b sont la première et deuxième pente des courbes contrainte-déformation (**voir figure II.29**), f_o est l'interception de la deuxième pente sur l'axe d'effort et n est un paramètre qui décide de la courbure dans la zone de transition et sa valeur s'étend de 2 à 4.

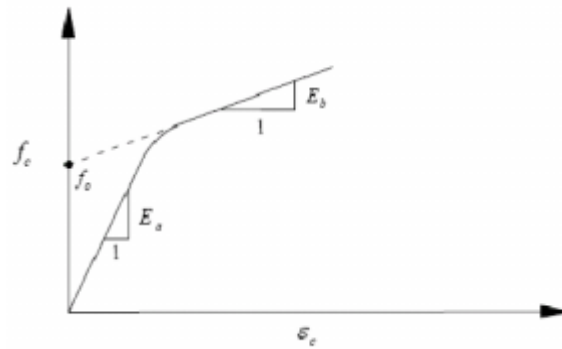


Figure II.29 : Paramètres de modèle bilinéaire de confinement (Almusallam, 2007) [71].

Youssef et autres (2007) [72], ont examiné 87 spécimens de béton confinés par FRP avec des résistances de béton s'étendant de 28 à 34 MPa. Le CFRP et les GFRP ont été employés pour confiner les spécimens de forme rectangulaire (254 × 381mm en coupe et 762 mm de hauteur), de forme circulaire (406 mm de diamètre et 813 mm de hauteur) et de forme carrée (381 mm de coupe et 762 millimètres de hauteur) ainsi que des petits cylindres (152mm de diamètre et 305 mm de hauteur).

Les résultats ont prouvé que le comportement contrainte-déformation du béton confiné par FRP est bilinéaire. Le modèle proposé par **Mander et autres (1988)** s'est avéré pour surestimer la résistance du béton confinée et le modèle de **Samaan et autres (1998)** a surestimé la déformation ultime du béton confinée.

Youssef et autres, ont proposé les équations suivantes pour prévoir la contrainte et la déformation maximales de béton confiné pour les spécimens circulaires.

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2.25 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{1.25} \right] \dots\dots\dots (II.25)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.003368 + 0.2590 \cdot \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right) \left(\frac{f_{frp}}{E_{frp}} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (II.26)$$

En Plus des travaux antérieurs réalisés dans les années précédentes, **l'année 2008** a connue un mouvement scientifique intensif vu les divers travaux réalisés sur le renforcement et le confinement des structures en béton et cela par plusieurs techniques expérimentale

En 2008, Pedram Sadeghian et autres (2008) [73], présentent les résultats d'une analyse numérique des cylindres de béton confiné par des enveloppes composites. Les spécimens ont été soumis à la compression uniaxiale et l'analyse a été effectuée suivant une méthode non linéaire d'élément fini. De divers paramètres tels que l'épaisseur d'enveloppe, l'orientation des fibres et la résistance du béton ont été considérées.

Trois épaisseurs différentes d'enveloppe (0.9, 1.8, et 2.7 mm), une orientation de fibre de 0°, 15°, 30° et 45°, pour des résistances de béton qui s'étend de 20 à 40 MPa ont été étudiées.

Le logiciel ANSYS d'élément fini a été employé pour la modélisation 3D des cylindres confinés par des enveloppes en CFRP. Tous les cylindres étaient de même dimension 150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur ont été soumis à la compression uniaxiale.

En raison de la géométrie et du chargement symétrique, seulement 1/8 de chaque spécimen (quart supérieur) est modélisé. Ce dernier est composé de trois parts : noyau de béton, FRP et la liaison d'interface entre eux.

Les résultats d'analyse par éléments finis étaient en bon accord avec des données expérimentales présentées par d'autres chercheurs. Ils ont démontré le perfectionnement significatif dans la résistance à la compression, la rigidité, et la ductilité des cylindres de béton confiné par CFRP-comparés aux cylindres de béton non confiné. La réponse contrainte-déformation des cylindres a été considérablement affectée par des paramètres d'analyse.

G. WU et autres (2008) [74], ont étudié le comportement des cylindres de béton confinés avec un composite hybride de FRP. Un total de 35 spécimens cylindrique avec des dimensions de diamètre de 150 mm et de 300 mm de longueur ont été examinés, inclus trois cylindres de béton non confiné comme des spécimens témoins, 12 cylindres de béton confinés avec un même type de feuille de FRP et 20 spécimens confinés avec les feuilles hybrides de FRP. Les paramètres expérimentaux incluent les différents types de feuilles de FRP, le nombre de couches de feuilles de FRP et les différents genres d'hybridation avec deux ou trois types de composite de FRP.

Cinq différents types de composite en FRP ont été employés dans ce travail : CFRP de haute résistance (CF1) ; CFRP de haut module (CF7) ; FRP Aramide (AF) ; FRP Verre (GF) ; et FRP PBO (PF). Pour utiliser des feuilles de FRP à leur pleine capacité, des essais sur des feuilles de FRP ont été effectuées dans le laboratoire pour évaluer leurs propriétés mécaniques, les enveloppes de FRP ont été formées en imbibant une feuille continue de fibre utilisant la résine époxyde appropriée. Dix spécimens de chaque type de feuille de FRP ont été examinés.

Pour des cylindres confinés avec un seul type de feuilles de FRP, La longueur de recouvrement est de 100 mm (**figure II.31 (a)**). Pour des cylindres de béton confinés en FRP hybride, les endroits de recouvrement pour différentes feuilles de FRP sont considérés en tant que distribution suivant les indications du **figure II.31 (b) et (c)**. Huit jauges de déformation ont été installées pour mesurer la déformation des feuilles de FRP. Quatre des jauges ont été localisés à la mi-hauteur pour mesurer les déformations radiales du FRP. En outre, le déplacement axial des cylindres de béton confinés par FRP a été mesuré en utilisant deux capteurs volumétriques linéaires (LVDT) avec un taux d'effort axial de 10 kN/min.

La figure II.30 montre les détails de l'installation d'essai



Figure II.30: Installation d'essai (G. WU et autres (2008)), [74].

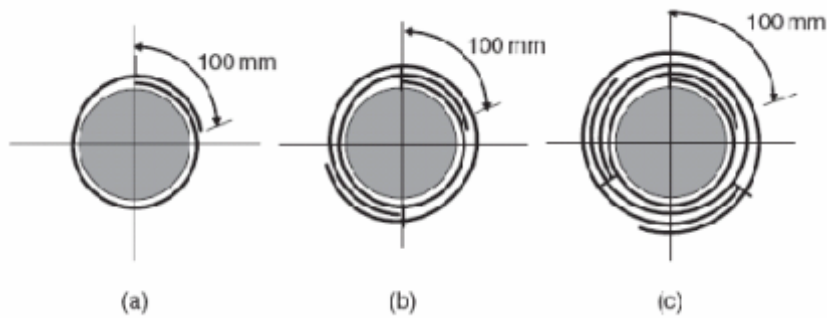


Figure II.31: Enveloppe de FRP: (a) Un seul type; (b) Deux types; (c) Trois types.

Cette étude réalisée sur les cylindres de béton confinés avec les composites hybrides de FRP indique que le confinement peut être efficace en augmentant la résistance, la ductilité et l'énergie de la capacité d'absorption des cylindres de béton.

Basé sur les investigations et les résultats expérimentaux et analytiques, **G. WU et autres** ont tiré les conclusions suivantes:

1. Pour les cylindres de béton confinés avec les feuilles hybrides de FRP, le rapport hybride est très important. Si le rapport de la résistance de confinement de la haute ductilité de la feuille de FRP à la basse ductilité est bas, l'hybridation peut être inefficace, et si le rapport est trop haut, l'hybridation ne sera pas économique.
2. La résistance ultime du béton confiné par FRP- peut être améliorée en ajoutant une feuille de haute résistance de FRP à une feuille de haute ductilité de FRP. Le coefficient de Poisson ultime du béton confiné par FRP- hybride peut être prévu par des équations pour les spécimens confinés seulement avec des feuilles de FRP de haute ductilité. En conséquence, la déformation ultime demeure la même que pour les spécimens confinés seulement avec une feuille FRP de haute ductilité.
3. Les modèles analytiques proposés pour prévoir la résistance ultime et la déformation des cylindres de béton confinés avec des composites hybrides de FRP montrent la bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Le modèle multilinéaire suggéré peut raisonnablement prévoir la relation contrainte-déformation des cylindres de béton confinés avec FRP hybride.

Togay Ozbakkaloglu et Deric J. Oehlers (2008) [75], Ont présenté les résultats d'une étude expérimentale sur le comportement des spécimens de béton carrés et rectangulaires renforcé par des tubes FRP (CFFTs) sous compression concentrique.

Les tubes de FRP ont été conçus en tant que renfort de confinement de colonne et étaient fabriqués en utilisant les feuilles continues de fibre de carbone avec des fibres orientées dans la direction de cercle. Un total de 23 colonnes ont été élaborées et testées sous chargement uniaxial. Les paramètres suivants ont été étudiés dans le programme expérimental :

1- Le rapport de la section transversale de colonne : Une section carrée et une section rectangulaire avec un rapport de section égal à 2.

II- L'épaisseur du tube de FRP : Trois ou cinq couches de fibres de carbone FRP.

3- Rayon faisant le coin de tube de FRP : Trois rayons faisant le coin différents: 10, 20 et 40 mm.

4- Résistance de béton : Deux mélanges de béton différents avec une résistances à la compression de 25 et 35 MPa.

Les résultats d'essai indiquent que le confinement par FRP mène à l'amélioration substantielle de la ductilité des colonnes rectangulaires et carrées. Le confinement fourni par le tube de FRP peut également améliorer la portance axiale des colonnes rectangulaires et carrées si l'efficacité de confinement du tube de FRP est suffisamment haute. Les résultats indiquent également que l'efficacité de confinement des tubes de FRP est plus haute dans les colonnes carrées que dans les colonnes rectangulaires, et dans les deux sections l'efficacité augmente avec le rayon du coin.

Le rayon faisant le coin à une influence direct sur la tendance de la deuxième branche de la courbe contrainte-déformation du béton confiné (**figure II.32**), et par conséquent, sur la résistance ultime du béton confiné. L'épaisseur de tube FRP à une influence significative sur la résistance ultime du béton confiné, cette dernière augmente avec l'épaisseur de tube. Pour un niveau donné de confinement, l'amélioration observée dans le comportement axial du béton diminue avec l'augmentation de la résistance de béton.

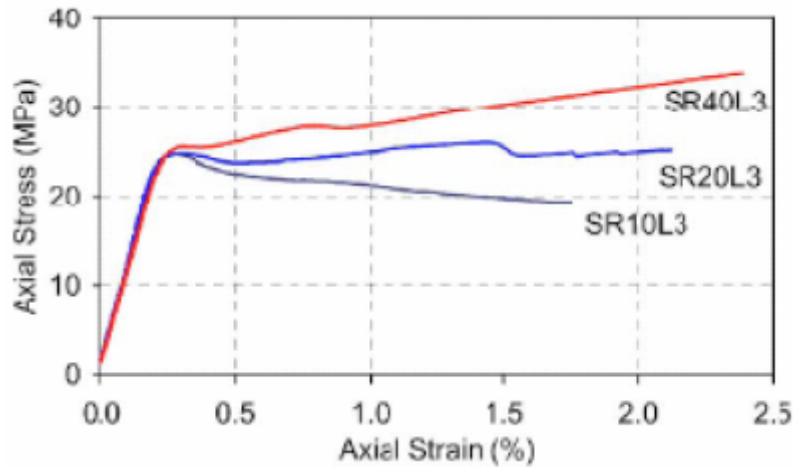


Figure II.32: Courbe contrainte-déformation des colonnes carrées avec trois couches et différents rayon de coins (Togay Ozbakkaloglu et Deric J. Oehlers (2008))

Riad Benzaid et autres (2008), [13], ont traité l'analyse des résultats expérimentaux en termes de résistance et de déformation, obtenues à partir des essais sur des colonnes en béton prismatique carrée, renforcés en extérieur par un composite en fibres de verre. Les paramètres considérés sont le nombre de couches de composite et le rayon faisant le coin. Un total de 21 prismes de dimension 100 x 100 x 300 mm ont été examinés sous compression uniaxiale. Ces derniers ont été divisés en 3 groupes représentatifs : Section R1 carrée tranchante, section R2 carrée avec un rayon faisant le coin égal à 8 mm, et section R3 carrée avec un rayon faisant le coin de 16 mm. Le rayon des coins a été garanti par le coffrage de béton.

A partir de leurs essais les auteurs ont conclu que :

1. Le confinement externe avec des FRP peut de manière significative augmenter la force des spécimens sous l'effort axial.
2. Le nombre de couches de matériaux de FRP et le rayon faisant le coin sont les paramètres principaux, ayant une influence significative sur le comportement des spécimens. Les résultats d'essai ont montrés que l'efficacité de confinement pourrait être augmentée en augmentant la rigidité de l'enveloppe externe appliquant des couches multiples et un bon rayon faisant le coin.

3. L'adhérence de FRP avec la surface de colonne augmente la capacité de charge et la ductilité axiales des colonnes. Les enveloppes FRP résistent à des déformations latérales dues à l'effort axial, ayant pour résultat un effort de confinement du noyau de béton, retardant la rupture et augmentant de ce fait la résistance à la compression et la déformation ultimes du béton.

4. Le rayon faisant le coin dans les colonnes carrées a affecté le comportement. Il détermine l'effet de concentration de contrainte. Un plus grand rayon peut augmenter la zone forte de contrainte et diminuer la concentration de contrainte. Ainsi la pression de confinement est réduite dans une section carrée, due à la concentration des efforts aux coins. Ce problème est résolu en employant une section carrée avec des coins circulaires.

F. Bentayeb, K. Ait tahar et A. Chateaneuf (2008) [76], ont réalisé une étude expérimentale et numérique d'une nouvelle technique de confinement, en intégrant une grille composite en fibres de verre de maille rectangulaire à l'intérieur de la matrice béton des spécimens cylindriques de dimensions 160 x 320 mm. La grille composite utilisée est faite de mailles avec des tailles alternées dans la direction horizontale de 2 à 3 cm et une épaisseur de 2 mm. Deux paramètres ont été étudiés la classe de béton et les propriétés de la grille.

Les paramètres géométriques de la grille sont donnés par la **figure 2.33** : l'épaisseur t_f et la largeur b_f du renfort dans la direction horizontale, s_f est la distance verticale entre deux renforts, le R_0 est le rayon de béton renforcé et e_p est la couche de béton autour de la grille. Pour la grille utilisée, les valeurs numériques sont : $b_f = 3$ mm, $s_f = 20$ mm, $t_f = 1$ mm, $R_0 = 75$ mm et $e_p = 10$ mm.

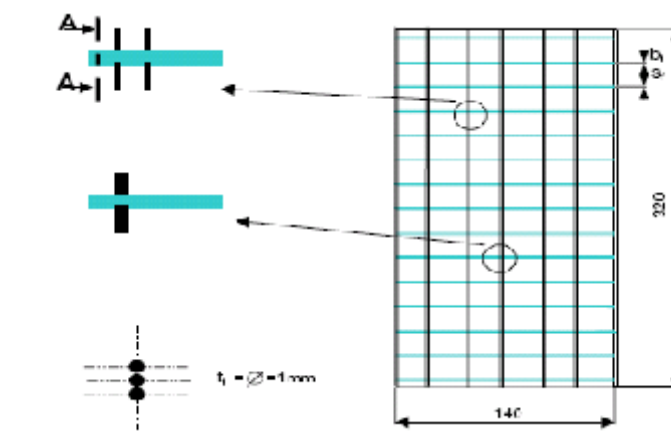


Figure II.33: Dimensions géométriques de la grille composite utilisée.

Dans cette étude, une nouvelle technique est donc proposée pour le renforcement par confinement des colonnes en béton. Elle apporte un gain en rigidité et résistance, elle présente un avantage certain en évitant l'effondrement brusque sous l'effet de charges accidentelles telles que les séismes [1]. Enfin elle permet d'éviter tout problème d'interface et de détachement du renfort de la structure renforcée.

Cette étude montre que la grille testée comme renfort offre un niveau de confinement acceptable, elle apporte un supplément de résistance de l'ordre de 20% qui nous place dans la zone des « strain hardening ». Ainsi, la classe du béton, la nature des fibres et la densité de la grille sont les paramètres qui influencent directement le confinement.

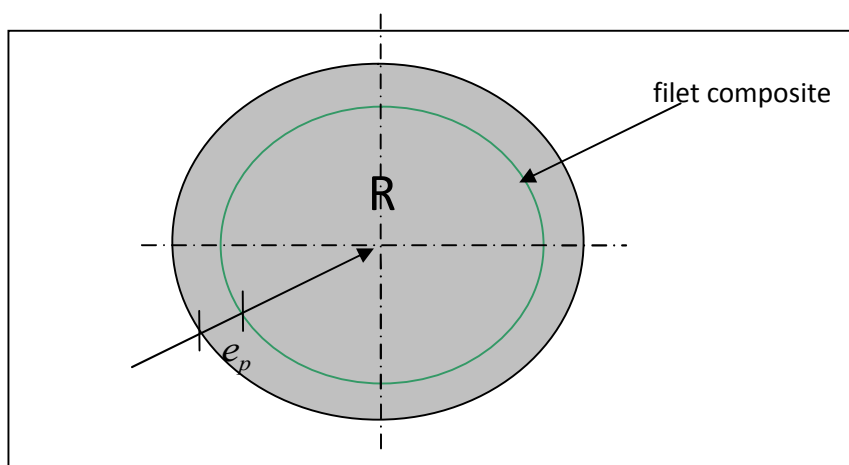


Figure II.34: Représentation du filet dans le béton

La figure II.35 montre le mode de rupture des spécimens de béton confiné et non confiné.

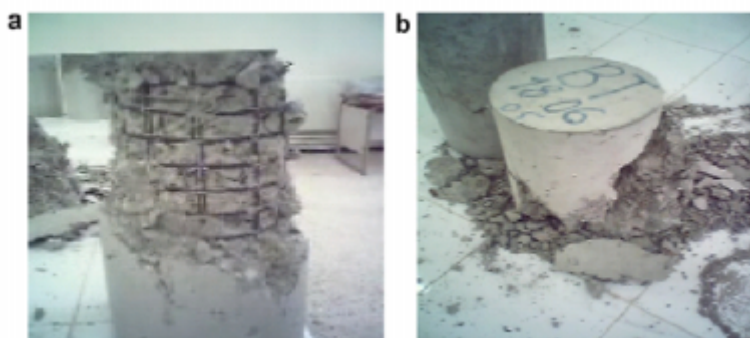


Figure II.35: Mode de rupture des spécimens, (a) béton confiné et (b) béton non confiné.

Le modèle de la résistance de confinement est donné alors par les expressions suivantes :

$$f'_{cu} = f'_{co} \left(0.75 + 2.5 \left(\frac{\varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot f_f}{f'_{co}} \right) \right) \dots\dots\dots(\text{II.27})$$

$$\varepsilon'_{cu} = \varepsilon_{cu} \left(1.3 + 6.3 \left(\frac{\varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot f_f}{f'_{co}} \right) \right) \dots\dots\dots(\text{II.28})$$

Où φ_1 et φ_2 sont les paramètres de la grille composite, données par les expressions suivantes:

$$\varphi_1 = 2 \cdot t_f \cdot b_f \cdot \left(1 - \frac{A_v}{A_b} \right)$$

$$\varphi_2 = (D(b_f + s_f))$$

II.7- CONCLUSION DU CHAPITRE

La détérioration des colonnes et les exigences de réhabilitation sismiques requièrent un renforcement des colonnes qui peut être procuré par un confinement additionnel, afin d'assurer une résistance et une capacité de déformation adéquate. Différents matériaux peuvent être utilisés soit les plaques d'acier, les câbles en composite et les feuilles en composite.

Pour les poteaux, l'effet de confinement fourni par l'enveloppe externe provient des forces de pression radiales générées par la courbure de l'enveloppe. Celle-ci étant soumise à des efforts de tension dus à la dilatation latérale du béton. Les enveloppes de matériaux composites appliquées aux colonnes augmentent le confinement du béton.

Jusqu'à ce jour, les expériences conduites par des chercheurs ont démontré une augmentation significative en ductilité et en résistance liée à l'utilisation d'enveloppe de composites.

Les bénéfices de cette technique de renforcement sont multiples :

- L'augmentation de la ductilité :
 - en raison du confinement, le béton se rompt à un plus haut niveau de déformation qu'un béton non confiné;
 - selon le degré de confinement, la déformation à la rupture du béton peut être augmentée plusieurs fois.

- L'augmentation de la résistance :
 - la pression latérale exercée par l'enveloppe de composites augmente la résistance en compression du noyau du béton et de la section de béton constituant l'enrobage; la capacité axiale et latérale de la colonne est, par conséquent, plus élevée.

- L'application aux colonnes de différentes géométries :
 - la flexibilité des composites permet d'envelopper les colonnes de différentes géométries sans diminution de leur moment d'inertie.

- La légèreté :
 - la faible densité des composites simplifie la construction et réduit les coûts de mise en œuvre.

- L'esthétique :
 - l'enveloppe de composites ne modifie pas l'apparence des colonnes ou des structures.

- La durabilité :
 - Certaines fibres, comme la fibre de carbone, résistent très bien aux variations de température, aux cycles de gel dégel et à l'humidité.

Enfin, toutes les techniques suscitées présentent le problème de continuité. Ceci nous amène à développer des recherches permettant d'améliorer la technique proposée par F. Bentayeb, K. Ait tahar et A. Chateauneuf (2008) [76], qui permet d'éviter tout problème d'interface et de détachement du renfort de la structure renforcée [77].

Chapitre III : DEVELOPPEMENT D'UN PROGRAMME DE CALCUL PARAMETRIQUE DU CONFINEMENT

III.1 Introduction :

L'étude paramétrique des modèles de confinement des cylindres de béton, est réalisée à partir d'un programme d'analyse développé en langage Delphi, qui nous permet non seulement d'analyser l'effet de varier les différents paramètres des modèles mais aussi de faire une confrontation entre les différents modèles .

Pour exploiter le programme il n'est pas demandé à l'utilisateur de maîtriser la programmation, ni le langage Delphi ni autres, il suffit de faire entrer les données dans le programme exécutable pour avoir les résultats.

III.2 Qu'est-ce que Delphi ?

Delphi est un environnement de programmation visuel orienté objet pour le développement rapide d'applications (RAD). En utilisant Delphi, on peut créer de puissantes applications pour Microsoft Windows, avec un minimum de programmation. Delphi fournit tous les outils nécessaires pour développer, tester et déployer des applications, notamment une importante bibliothèque de composants réutilisables, une suite d'outils de conception, des modèles d'applications et de fiches et des experts de programmation.

RAD veut dire Développement rapide d'application (Rapid Application Development). Ce terme décrit la nouvelle génération d'environnements de développement logiciel. Dans un environnement RAD, les programmeurs utilisent des outils plus intuitifs et visuels. Il est difficile de regarder un bout de code qui crée une fenêtre et de la visualiser, mais le RAD permet de créer la fenêtre en quelques clics.

Parmi ces nouvelles interfaces, plus simples et plus visuelles, la première à faire son apparition fut Visual Basic (ou VB). VB a mis la programmation — qui était jusque-là une pratique mystique réservée à quelques gourous — à la portée des simples mortels. Cette nouvelle interface permet, comme illustré dans la Fig. 1.1, au développeur de logiciel de construire "visuellement"

l'interface utilisateur à l'aide de la souris, au lieu de le faire en codant, puis en compilant pour vérifier le résultat.

Delphi marque une évolution dans les environnements de développement RAD. Il corrige grand nombre des défauts de VB, sans en ajouter trop.

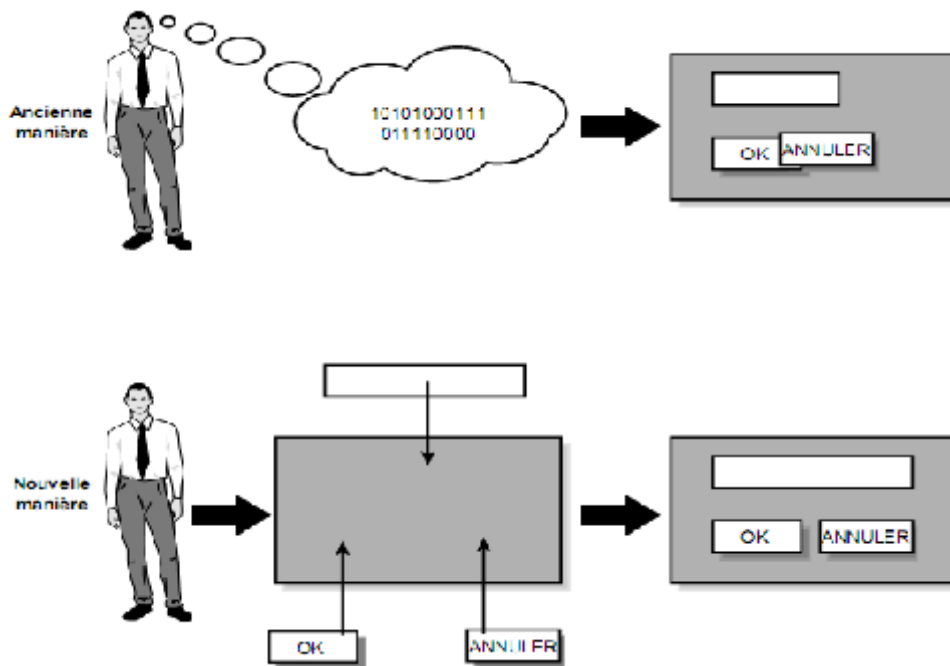


Figure III.1 L'ancienne approche et la nouvelle.

III.3 Description de programme :

III.3.1 Interface

Le programme d'étude paramétrique des modèles de confinement des cylindres en béton (PEPMCCB) est composé de plusieurs plateformes.

1. Page d'introduction :

Cette page donne le tableau résumant les différents modèles de confinement que le programme peut faire leur étude paramétrique avec ses relations (tableau III.1),

Table III.1 - Expressions des résistances et déformations axiales maximales

Auteur	Type de confinement	Résistance fcc	Déformation limite ε_{cc}
Fardis & Khalili (1981)	GFRP-encased Concrete	$f_{c0} \left[1 + 2.05 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right) \right]$	$0.002 \left[1 + 0.5 \left(\frac{E_f t_f}{D \cdot f_{c0}} \right) \right]$
Karbahari & Eckel (1993)	FRP-encased Concrete	$f_{c0} \left[1 + 2.1 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.87} \right]$	$0.002 \left[1 + 5 \left(\frac{2 \cdot t_f f_f}{D \cdot f_{c0}} \right) \right]$
Mirmiran & Shahawy (1997)*	GFRP-encased Concrete	$f_{c0} + 4.269 f_l^{0.587}$	-
Miyauchi et al (1997)**	CFRP-wrapped Concrete	$f_{c0} \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right) \right]$	$0.002 \left[1 + 10.6 \left(\frac{2 \cdot t_f f_f}{D \cdot f_{c0}} \right)^{0.373} \right]$
Samaan et al. (1998)*	GFRP-encased Concrete	$f_{c0} + 6.0 f_l^{0.7}$	$\frac{f_{cc} - 0.872 f_{c0} - 0.371 f_f - 6.258}{245.61 f_{c0}^{0.2} + 1.3456 \frac{E_f t_f}{D}}$
Saafi et al (1999)	GFRP and CFRP-encased concrete	$f_{c0} \left[1 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.84} \right]$	$\varepsilon_{c0} \left[1 + (537 \varepsilon_f + 2.6) \left(\frac{f_{cc}}{f_{c0}} - 1 \right) \right]$
Toutanji (1999)	CFRP and GFRP wrapped concrete	$f_{c0} \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.85} \right]$	$\varepsilon_{c0} \left[1 + (310.57 \varepsilon_f + 1.9) \left(\frac{f_{cc}}{f_{c0}} - 1 \right) \right]$
Ait tahar et al	Grilles Métallique	$f_{c0} \left[1 + \frac{\phi_s}{\phi_g} \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.72} \right]$	$\varepsilon_{c0} \left[1 + \left(\frac{\phi_s}{\phi_g} \right)^{0.75} \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right) \right]$

Avec :

*Unité en MPa, ** Equation de ε_{cc} est valable pour $f_{c0} = 30 \text{ MPa}$

Ce tableau va apparaître lorsque l'utilisateur lance le programme (figIII.2)

ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DE MÉTHODES DE CONFINEMENT DES CILINDRES EN RÉGION PAR FRET

Auteur	Type de confinement	Résistance f_{cr}	Déformation linéaire ϵ_{cr}
Fardis & Khalil (1982)	GFRP wrapped concrete	$f_{cr} \left[1 + 2.02 \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right) \right]$	$0.002 \left[1 + 0.5 \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right) \right]$
Karbhari & Zohel (1993)	FRP encased concrete	$f_{cr} \left[1 + 2.1 \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right)^{0.25} \right]$	$0.002 \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right) \right]$
Miravet & Slobodan (1997)*	GFRP encased concrete	$f_{cr} + 1.069 f_{cr}^{0.25}$	-
Miyazaki et al (1997)**	GFRP wrapped concrete	$f_{cr} \left[1 + 1.5 \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right) \right]$	$0.002 \left[1 + 1.25 \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right) \right]$
Samsan et al. (1998)*	GFRP encased concrete	$f_{cr} + 0.0 f_{cr}^{0.25}$	$f_{cr} - 0.072 f_{cr} - 0.071 f_{cr} - 0.150$ $0.46 f_{cr}^{0.25} + 1.24 f_{cr}^{0.25}$
Sagfi et al. (1995)	GFRP and CFRP wrapped concrete	$f_{cr} \left[1 + 3.2 \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right)^{0.25} \right]$	$\epsilon_{cr} \left[1 + (3.37 f_{cr} + 2.6) \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
Tezcanli (1999)	GFRP and GFRP wrapped concrete	$f_{cr} \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right)^{0.25} \right]$	$\epsilon_{cr} \left[1 + (1.15 f_{cr} + 1.4) \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$
Ali Taher et al	Grills	$f_{cr} \left[1 + \frac{3.6}{\Phi} \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right)^{0.25} \right]$	$\epsilon_{cr} \left[1 + \left(\frac{3.6}{\Phi} \right)^{0.25} \left(\frac{f_{cr}}{f_{co}} \right) \right]$

Figure N°III.2 : page introduction

2. Page courante :

Le PEPMCCB renferme huit (8) pages consacrées à l'étude paramétrique des modèles cités dans le tableau précédent, il est demandé à l'utilisateur de choisir un seul paramètre comme variable en marquant la case appropriée et de fixer les bornes de l'intervalle et le pas de variation. Les autres paramètres seront automatiquement constants.

Après que l'utilisateur lance le calcul en cliquant sur **Tracer** les résultats apparaîtront sous forme des graphes, ces derniers seront régénérer automatiquement lorsque l'utilisateur change les données sans sortir du programme

Exemple :

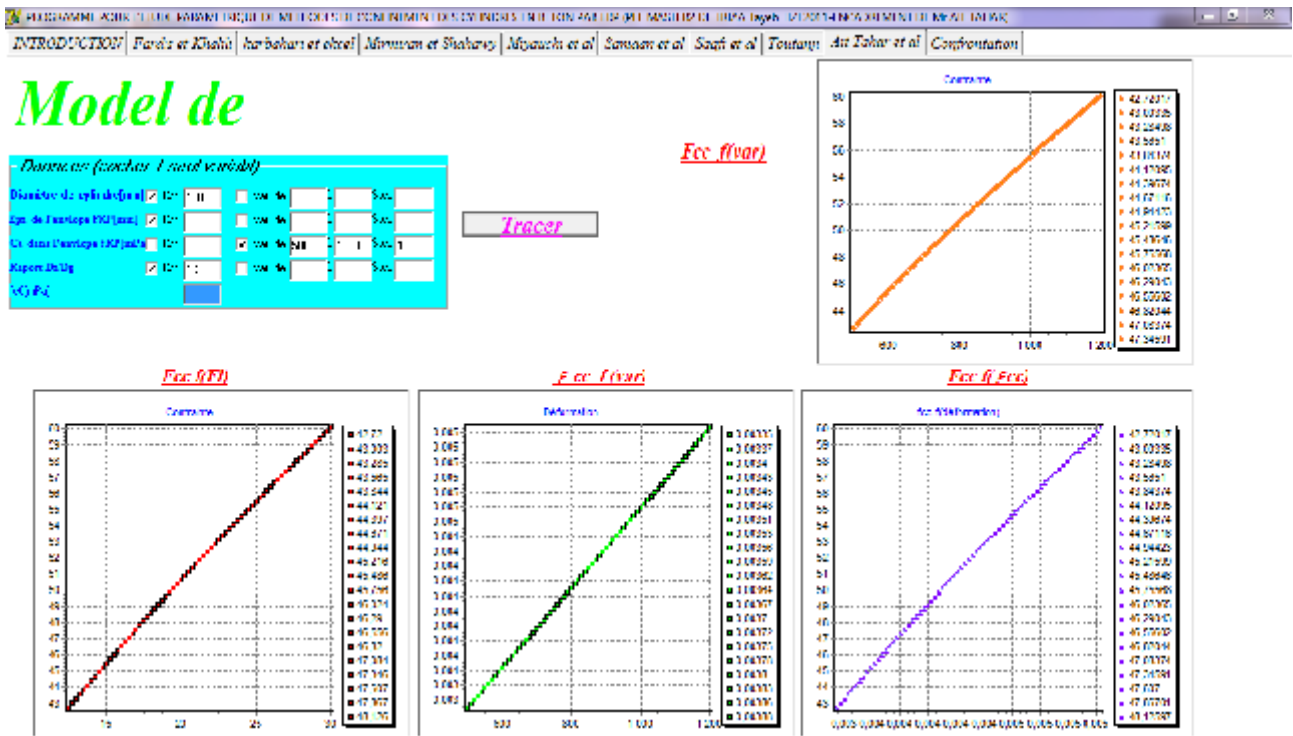


Figure N°III.3: page courante

3. Page confrontation :

Dans cette page, l'utilisateur peut comparer entre les différents modèles, les résultats apparaîtront sous forme d'histogrammes, donnant les pics des diagrammes de variation contrainte-déformation illustrés dans le troisième graphe.

Remarque :

- Les cases dont l'arrière plan sont en vert permettent à l'utilisateur de choisir la précision, et l'échèle de graphe.

Exemple :

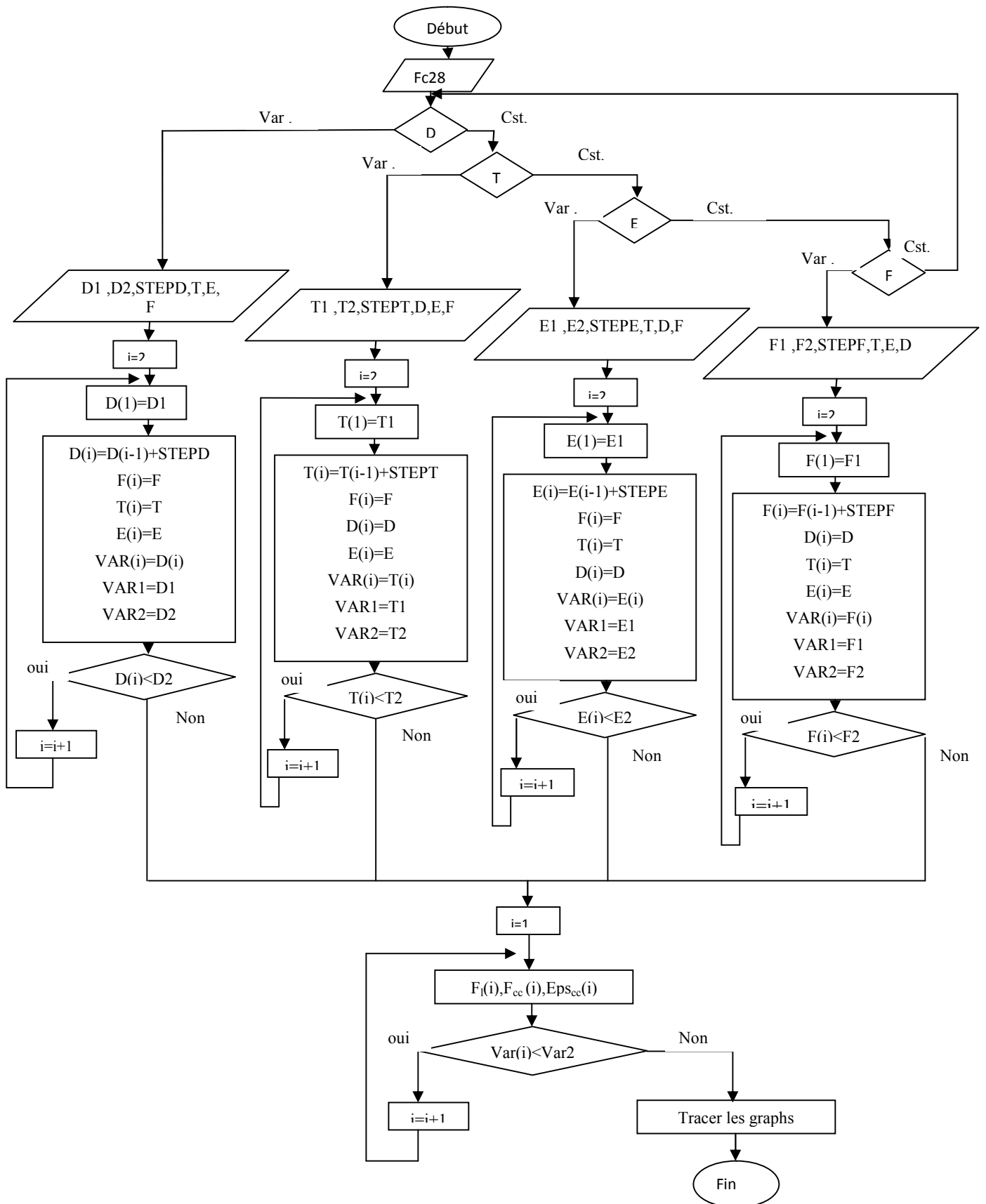


Figure III.5 Organigramme de calcul de modèle de Fardis et Khalili

Chapitre IV. PRESENTATION DES RESULTATS ET ANALYSE

IV. Modèles de confinements considérés

IV.1 .Modèle de Fardis et Khalili (1981)

En 1981, Fardis et Khalili entreprennent des essais de compression uni-axiale sur des cylindres en béton de dimensions Ø76 mm x 152 mm et Ø102 mm x 204 mm enveloppés dans différents tissus de matériaux composites à base de fibres de verre «PRFG». Ils rapportent une augmentation de la résistance en compression et une amélioration de la ductilité, grâce à l'effet du confinement. Dans un autre article (Fardis et Khalili 1982), les chercheurs proposent un modèle hyperbolique pour décrire la résistance en compression du béton confiné.

Fardis et Khalili (1982), ont proposé les équations suivantes pour calculer la contrainte du béton confiné par FRP

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 3.7 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.86} \right] \dots\dots\dots(IV.1)$$

Où f_{cc} et f_{co} : Résistances respectivement de béton confiné et non confiné

f_l : Pression latérale de confinement donnée par la formule suivante : .

$$f_l = \frac{2f_{frp}t_{frp}}{d} \dots\dots\dots(IV.2)$$

Où f_{frp} est la contrainte de traction dans l'enveloppe de FRP, t_{frp} est l'épaisseur de l'enveloppe de FRP et d le diamètre de la section de béton confiné (figure 2.6).

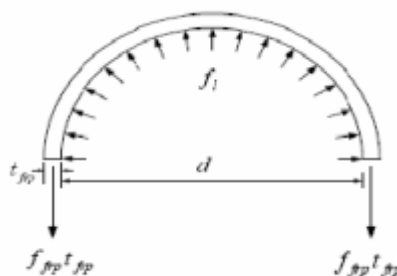


Figure IV.1.: Pression de confinement latérale due à l'enveloppe de FRP

Exemples d'application du programme de Modélisation :

- Données :

Diamètre de cylindre[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 70	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Eps. de l'enveloppe FRP[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 2	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Ct. dans l'enveloppe FRP[mF]	<input type="checkbox"/> Cst=	<input checked="" type="checkbox"/> Var. de	150	à	1000	Step	10
M. Elasticité E [mPa]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 76000	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
fc0[mPa]							25

- Résultat :

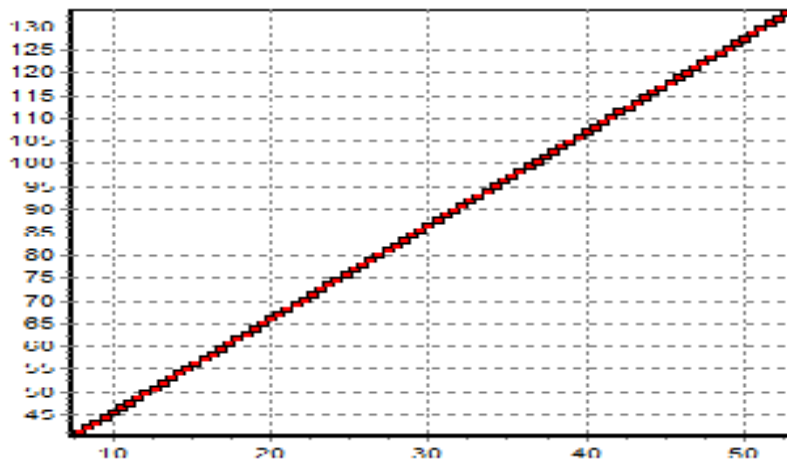


Figure IV.2. Variation de f_{cc} en fonction de la pression latérale de confinement

La figure IV. Montre que la variation de la résistance au pic (résistance ultime) du béton confiné en fonction de la pression latérale de confinement présente une pente moins raide et s'approche d'une droite linéaire. le modèle de Fardis donne des taux d'accroissement constants des résistances au pic correspondantes aux taux de la pression latérale , le modèle est stable.

VI .2.Modèle de Karbhari :

Comme plusieurs autres modèles celui de Karbhari a été inspiré du modèle de Richart et al. (1928) en modifiant la valeur du coefficient d'efficacité de confinement k_1 comme suit :

$$k_1 = 2,1 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{-0,13} \dots\dots\dots(IV.3)$$

Par conséquent le modèle de Karbhari est représenté par l'équation suivante :

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2,1 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0,87} \dots\dots\dots(IV.4)$$

Dans ce modèle la déformation axiale ϵ_{cc} correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «PRF» est calculée comme suit :

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} + 0,01 \cdot \frac{2f_{prf} \cdot t_{prf}}{d \cdot f'_{co}} \dots\dots\dots(IV.5)$$

• **Données:**

Diamètre de cylindre[mm] <input checked="" type="checkbox"/> Cst= 160	<input type="checkbox"/> Var. de _____ à _____ Step _____
Eps. de l'enveloppe FRP[mm] <input checked="" type="checkbox"/> Cst= 2	<input type="checkbox"/> Var. de _____ à _____ Step _____
Cont. dans l'enveloppe FRP <input type="checkbox"/> Cst= _____	<input checked="" type="checkbox"/> Var. de 150 à 1000 Step 10
fc0 [mPa]	25

• **Résultat :**

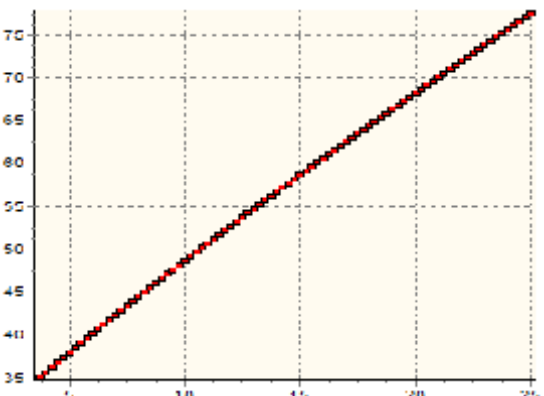


Figure. IV.3. Variation de f'_{cc} en fonction de la pression latérale de confinement

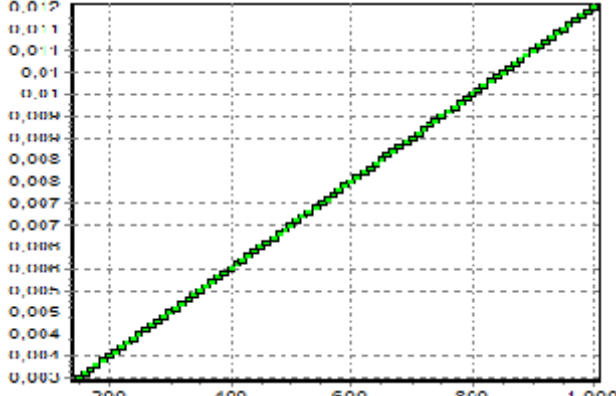


Figure. IV.4 variation de ϵ_{cc} en fonction de la contrainte de traction dans l'enveloppe frp

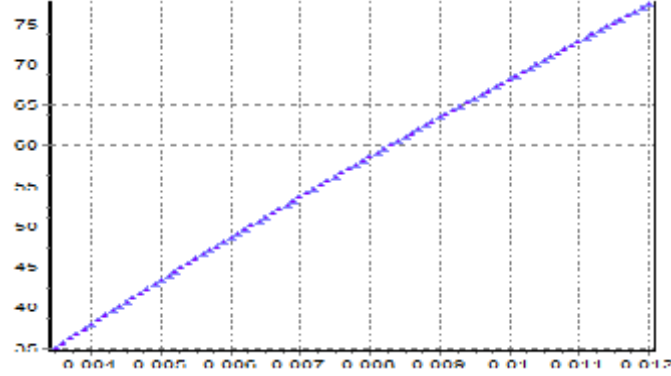


Figure IV.5 Variation des pics des f'_{cc} et ϵ_{cc} en fonction de la contrainte de traction dans l'enveloppe frp

VI.3. Modèle de Mirmiran et Shahawy (1997) :

En 1997 Mirmiran et Shahawy ont suggéré la formule suivante pour estimer la résistance à la compression d'un tube en «FRP» rempli de béton dans lequel le tube agit simultanément comme coffrage et comme confinement pour le béton:

$$f'_{cc} = f'_{co} + 4,269 f_l^{0,587} \dots\dots\dots(IV.6)$$

- **Données :**

Diamètre de cylindre[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 160	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Eps. de l'enveloppe FRP[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 2	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Ct. dans l'enveloppe FRP[m]	<input type="checkbox"/> Cst=	<input checked="" type="checkbox"/> Var. de	150	à	1000	Step	10
f_{c0} [MPa]	25						

- **Résultat :**

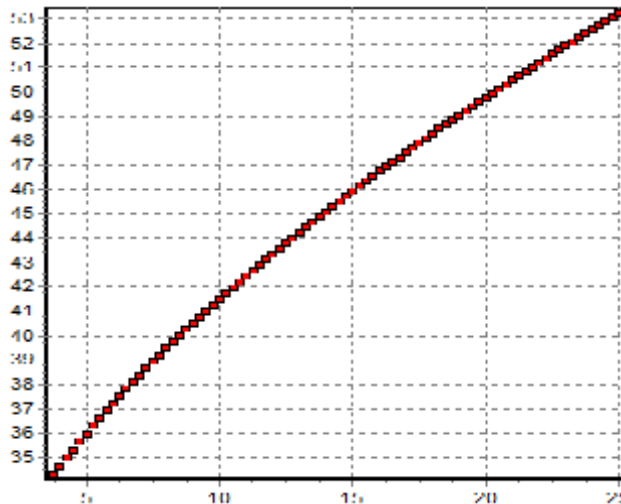


Figure IV.6. Variation de f'_{cc} en fonction de la pression latérale de confinement

VI.4. Modèle de Miyauchi et al. (1997)

Miyauchi et al. entreprennent des essais de compression uni-axiale sur des colonnes en béton renforcées à l'aide de tissus en fibres de carbone (CFS: carbon fiber sheets) pour évaluer cette technique de renforcement. Ils tiennent compte de la résistance en

compression du béton (30 et 50 MPa), du nombre de couches de CFS (1, 2 et 3 couches) et des dimensions de la colonne (Ø100 mm x 200 mm et Ø150 mm x 300 mm).

• **Données :**

Diamètre de cylindre[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 160	<input type="checkbox"/> Var. de [] à []	Step []
Eps. de l'enveloppe FRP[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 2	<input type="checkbox"/> Var. de [] à []	Step []
Ct. dans l'enveloppe FRP[m]	<input type="checkbox"/> Cst= []	<input checked="" type="checkbox"/> Var. de 150 à 1000	Step 10
f_{c0} [mPa]	25		

• **Résultat :**

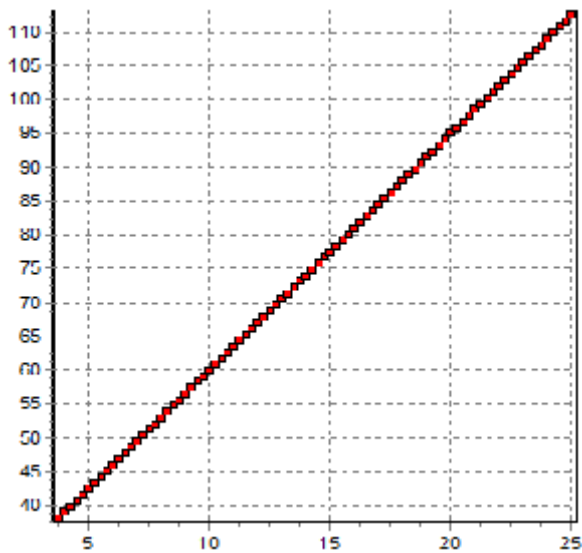


Figure IV.7 Variation de f_{cc} en fonction de la pression latérale de confinement

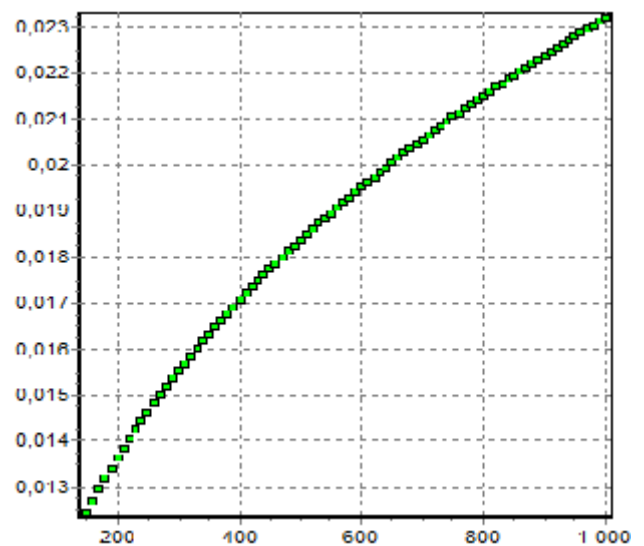


Figure IV.8. variation de ϵ_{cc} en fonction de la contrainte de traction dans l'enveloppe de frp

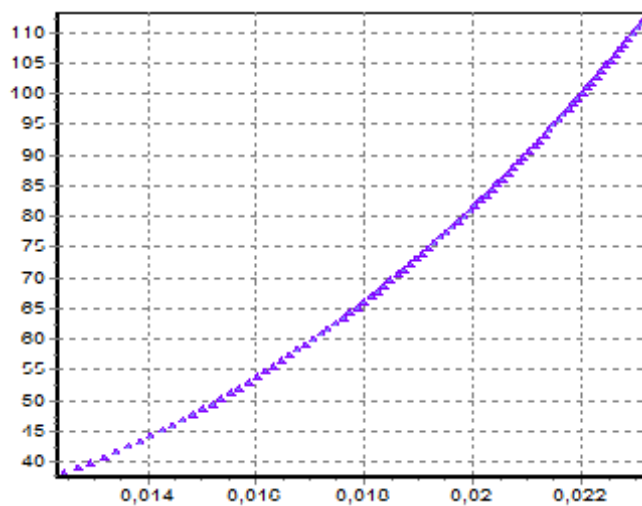


Figure IV.9 Variation des pics des f_{cc} et ϵ_{cc} en fonction de la contrainte de traction dans l'enveloppe de frp

VI .5.Modèle de Samaan et autres (1998) :

Samaan et autres ont proposé un simple modèle pour calculer la réponse bilinéaire du béton confiné par FRP dans les directions axiales et latérales. Le modèle est basé sur la corrélation entre le taux de dilatation (expansion) de béton, l'enveloppe FRP et le noyau du béton. Les courbes contrainte-déformation prévues sont adéquates avec les résultats de leur étude. La résistance à la compression du béton confiné f_{cc} et la déformation ϵ_{cc} correspondant à la contrainte maximale de béton confiné, proposé par Samaan et autres (1998) [49] sont données par :

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 6 \frac{f_l^{0.7}}{f_{co}} \right] \dots\dots\dots(IV.7)$$

$$\epsilon_{cc} = \frac{f_{cc} - 0.872f_{co} - 0.371f_l - 6.258}{245.61f_{co}^{0.2} + 1.3456 \left(\frac{E_{frp} t_{frp}}{d} \right)} \dots\dots\dots(IV.8)$$

Où : E_{frp} est le module d'élasticité de tube en FRP et d : le diamètre du noyau de béton.

• **Données :**

Diamètre de cylindre[mm]	<input type="checkbox"/> Cst= 160	<input type="checkbox"/> Var. de	<input type="text"/>	à	<input type="text"/>	Step	<input type="text"/>
Eps. de l'enveloppe FRP[mm]	<input type="checkbox"/> Cst= 2	<input type="checkbox"/> Var. de	<input type="text"/>	à	<input type="text"/>	Step	<input type="text"/>
Ct. dans l'enveloppe FRP[mPa]	<input type="checkbox"/> Cst=	<input type="checkbox"/> Var. de	150	à	1000	Step	10
M. Elasticité E f[mm]	<input type="checkbox"/> Cst= 76000	<input type="checkbox"/> Var. de	<input type="text"/>	à	<input type="text"/>	Step	<input type="text"/>
fc0[mPa]	<input type="checkbox"/> Cst= 25						

• **Résultat :**

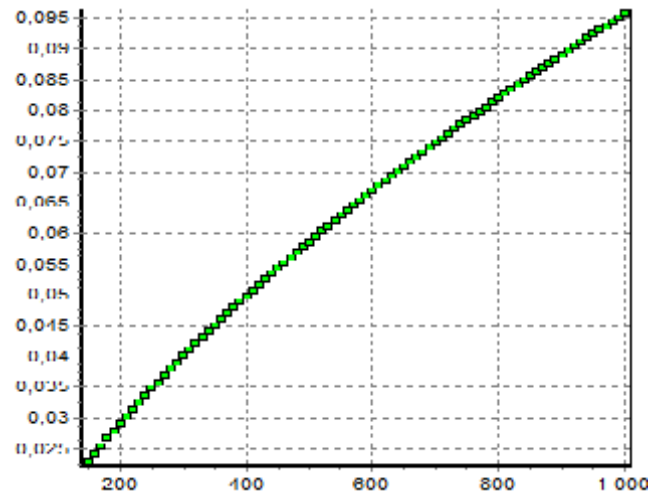
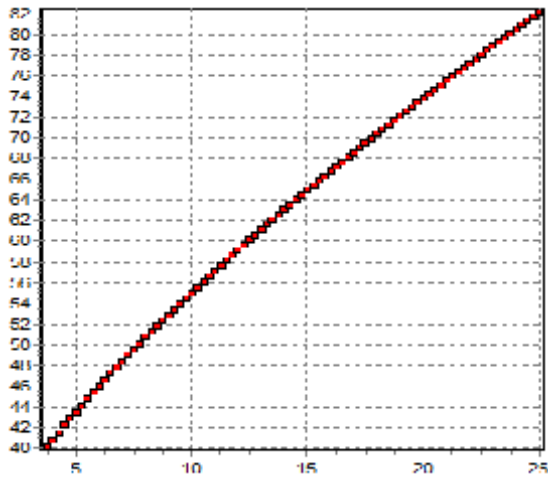


Figure IV.10 Variation de f_{cc} en fonction de la pression latérale de confinement

Figure IV.11 variation de ϵ_{cc} en fonction de la contrainte de traction dans

l'enveloppe de FRP

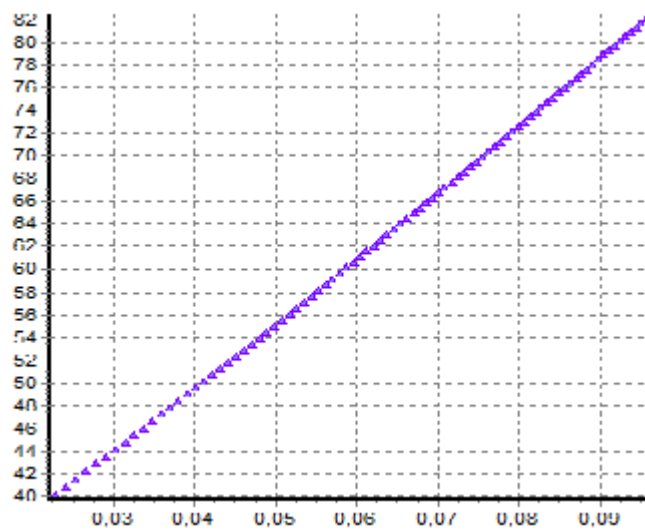


Figure IV.12 Variation des pics des f_{cc} et ϵ_{cc} en fonction de la contrainte de traction dans l'enveloppe de frp

VI.6. Modèle de Saafi et autres (1999):

Saafi et autres (1999), Ont conduit des études expérimentales et analytiques pour évaluer les performances des colonnes de béton confinées avec des tubes de CFRP et de GFRP. Les variables d'essai ont inclus le type de fibres, l'épaisseur du tube et la résistance à la compression du béton. Les épaisseurs des tubes de GFRP examinés étaient 0.8, 1.6 et 2.4 mm et les épaisseurs des tubes de CFRP utilisés étaient de 0.11, 0.23 et 0.55 mm. La résistance à la compression moyenne du béton moyenne est de 38 MPa à 28 jours.

Selon Saafi et autres (1999), la résistance à la compression maximale du béton confiné par FRP peut être calculée d'après l'équation suivante :

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.84} \right] \dots\dots\dots(IV.9)$$

L'expression de la déformation axiale ϵ_{cc} correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «PRF» est donnée comme suit :

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + (537 \epsilon_{fu} + 2,6) \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \dots\dots\dots(IV.10)$$

- **Données :**

Diamètre de cylindre[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 160	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Eps. de l'enveloppe FRP[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 2	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Ct. dans l'enveloppe FRP[mPa]	<input type="checkbox"/> Cst=	<input checked="" type="checkbox"/> Var. de	150	à	1000	Step	10
déf. à la repture de FRP	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 0,02	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
fc0[mPA]			25				

- **Résultat :**

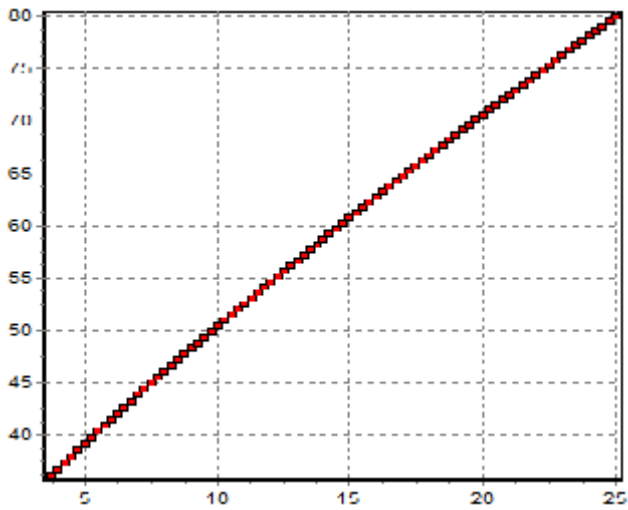


Figure IV.13 Variation de f_{cc} en fonction de la pression latérale de confinement

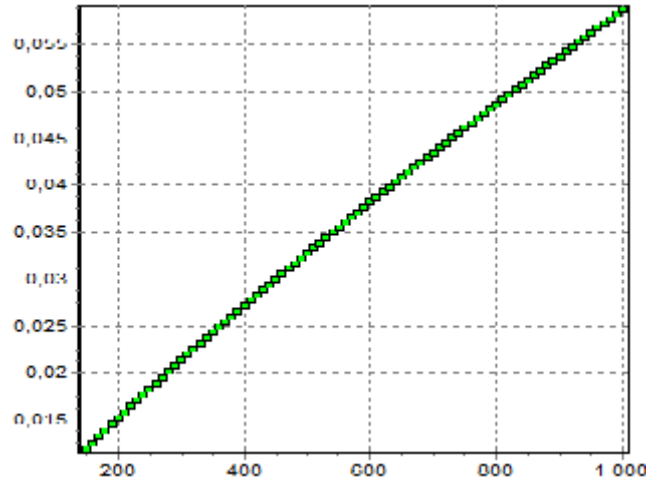


Figure IV.14 variation de ϵ_{cc} en fonction de la contrainte de traction dans l'enveloppe de frp

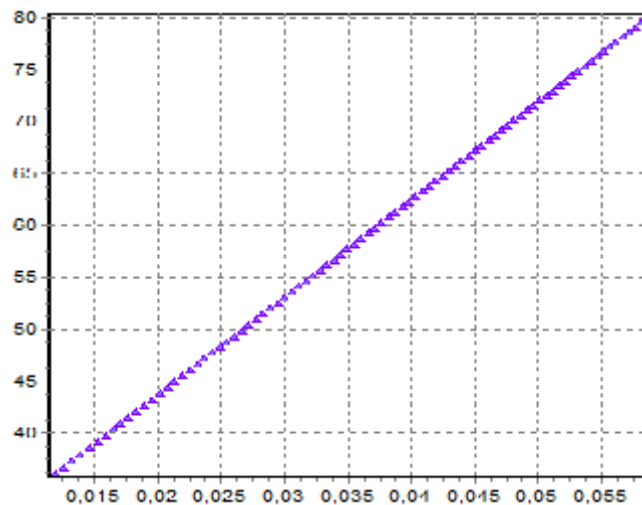


Figure IV.15. Variation des pics des f_{cc} et ϵ_{cc} en fonction de la contrainte de traction dans l'enveloppe de frp

VI.7. Modèle de Toutanji (1999):

Toutanji présente les résultats d'une étude expérimentale et analytique sur des colonnes de béton extérieurement enveloppées par des composites en FRP. Il a examiné un total de 18 spécimens cylindrique de 76×305 mm qui inclus 12 spécimens de béton enveloppés par FRP et six spécimens de béton témoin sous la compression uniaxiale. Trois types de feuilles de FRP ont été employés, deux carbonées et un verre, qui sont collées avec un type de résine époxyde. La résistance à la compression moyenne de béton est de 30 MPa approximativement.

Toutanji a proposé les équations 14 et 15 pour calculer la contrainte à la compression maximale (f_{cc}) et la déformation maximale (ϵ_{cc}) de béton confiné par FRP.

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.85} \right] \dots\dots\dots(IV.11)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + (310.57 \epsilon_{frp} + 1.9) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots(IV.12)$$

Où ϵ_{frp} est la déformation à la rupture de FRP.

• **Données :**

Diamètre de cylindre[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst=	160	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Eps. de l'enveloppe FRP[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst=	2	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Ct. dans l'enveloppe FRP[mPa]	<input type="checkbox"/> Cst=		<input checked="" type="checkbox"/> Var. de	150	à	1000	Step	10
def. à la rupture de FRP	<input checked="" type="checkbox"/> Cst=	0,01	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
f_{co} [mPa]								25

• **Résultat :**

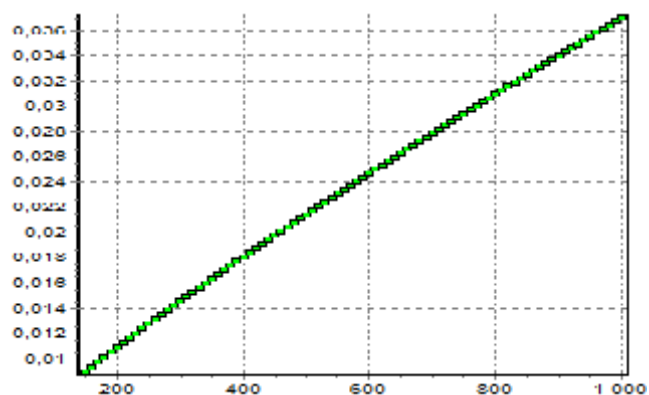
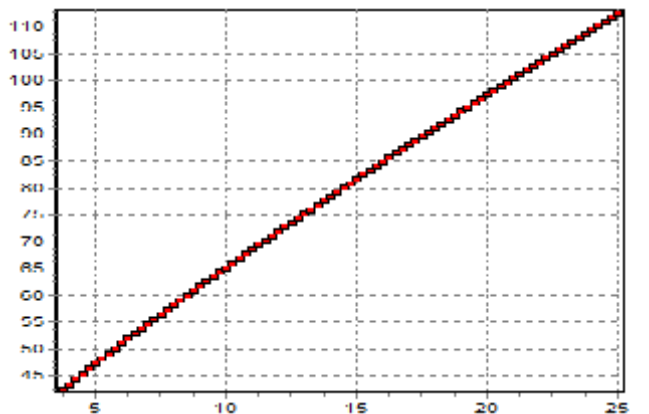


Figure IV.16 Variation de f_{cc} fonction de la pression latérale de confinement

Figure IV.17 variation de ϵ_{cc} fonction de la contrainte de traction dans l'enveloppe de frp

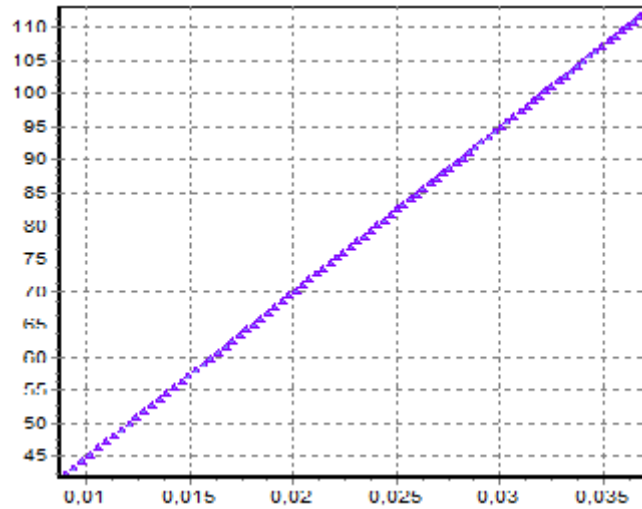


Figure IV.18. Variation des pics des f_{cc} et ϵ_{cc} fonction de la contrainte de traction dans l'enveloppe de frp

VI .8.Modèle de Ait tahar et al:

Ce modèle a été formulé sur la base des observations et résultats des différentes études expérimentales antérieures. Ce modèle est basé sur les résultats des déformations et des contraintes des colonnes de béton renforcé par grille métallique soumises à des essais de compression axiale, il tient compte de la position de la grille dans le spécimen, de la nature de la grille, ainsi que de sa contrainte de traction f_{tg} .

L'expression du modèle est donné par la relation suivante.

$$f_{cc} = f_{co} + K_1 f_l$$

$$= f_{co} \left[1 + \frac{\phi_s}{\phi_g} \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^\alpha \right] \dots\dots\dots (IV.13)$$

Avec :

α : paramètre non-linéaire de l'équation.

$\frac{\phi_s}{\phi_g}$: Rapport des diamètres respectivement du spécimen et de la grille.

Les expressions de la contrainte de confinement ainsi que celle de la déformation sont données respectivement par les formules (5.6) et (5.7) suivantes:

$$= f_{co} \left[1 + \frac{\phi_s}{\phi_g} \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right)^\alpha \right] = f_{co} \left[1 + 1,33 \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right)^{0,72} \right] \dots\dots\dots(\text{IV.14})$$

$$= \varepsilon_{co} \left[1 + \left(\frac{\phi_s}{\phi_g} \right)^\beta \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right) \right] = \varepsilon_{co} \left[1 + (1,33)^{0,75} \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right) \right] \dots\dots\dots(\text{IV.15})$$

a- Fonction de la pression dans l'enveloppe de FRP :

- **Données :**

Diamètre de cylindre[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 160	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Eps. de l'enveloppe FRP[mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 2	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
Ct. dans l'enveloppe FRP[mPa]	<input type="checkbox"/> Cst=	<input checked="" type="checkbox"/> Var. de	150	à	1000	Step	10
Raport D _s /D _e	<input checked="" type="checkbox"/> Cst= 1,33	<input type="checkbox"/> Var. de		à		Step	
f _{c0} [mPa]							23

- **Résultat :**

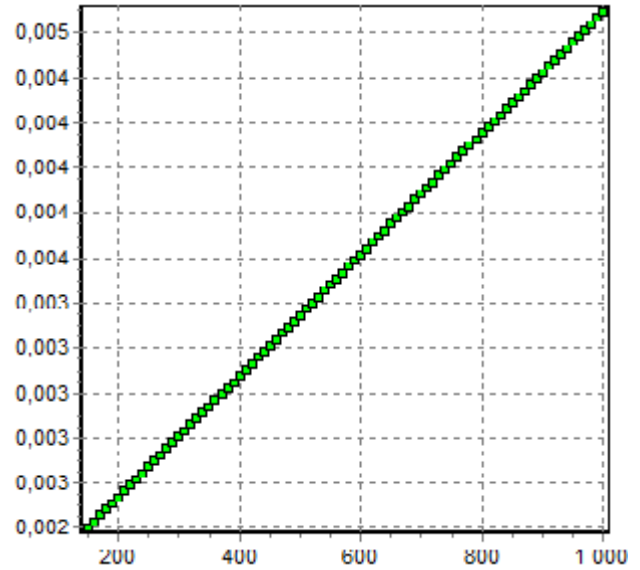
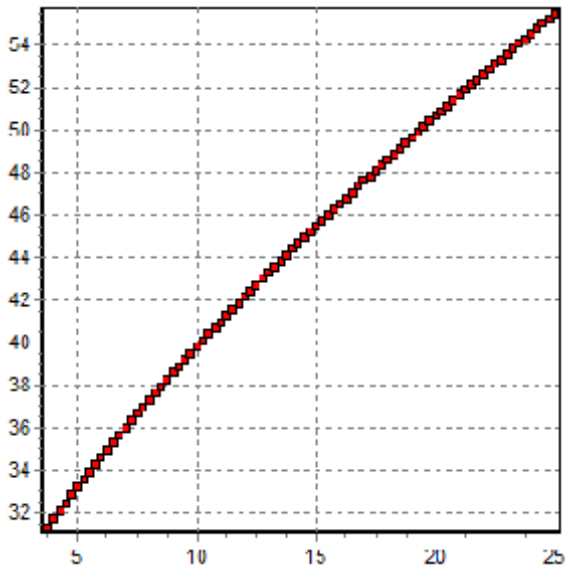


Figure IV.19 Variation de f_{cc} en ction de la pression latérale de confinement

Figure IV.20. Variation de ε_{cc} en ction de la contrainte de traction dans l'enveloppe de frp

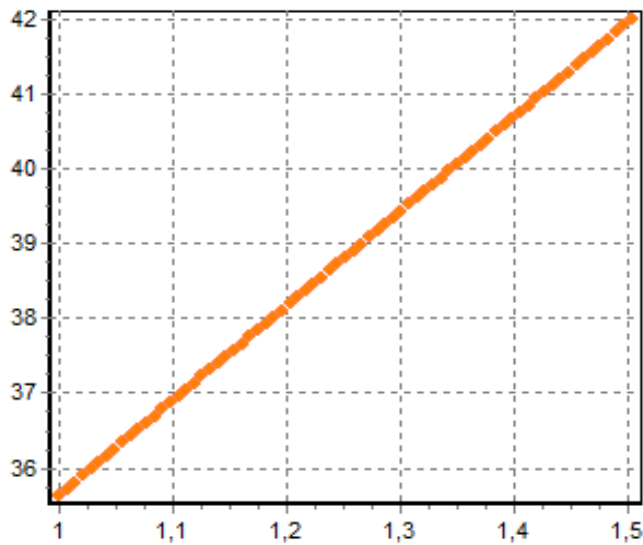


Figure IV.24. Variation de f_{cc} en fonction du rapport D_s / D_g

Confrontation :

Données :

Données (cocher 1 seul variable)

Diamètre de cylindre[mm]	100	M.Elast.de béton E_b [mPa]	33000
Eps. de l'enveloppe FRP[mm]	?	Precision	0,0001
Cont. dans l'enveloppe FRP[mPa]	120	Def Max (sur le graph.)	0,008
M. Elasticité E_s [mPa]	D'acier 210000	de verre /6000	de carbone 200000
Def à la rupture de FRP	0,01		
Raport D_s/D_g	1,33		
f_{c0} [mPa]	25		

FL- S

• **Résultat :**

La Figure IV.25 donne l'allure théorique du diagramme contrainte déformation, en utilisant la loi de **Sargin** présentée ci dessous

La contrainte σ est donnée par la relation :

$$\sigma = f_{cj} \frac{k_b \bar{\epsilon} - (k'_b - 1) \bar{\epsilon}^2}{1 + (k_b - 2) k'_b \bar{\epsilon}^2}$$

Où

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

$$K_b = \frac{E_{b0} \varepsilon_0}{f_{cj}}$$

K_b : paramètre ajustant la courbe ascendante :

f_{cj} : résistance à la compression du béton à j jours ;

ε_0 : déformation de pic correspondant à f_{cj} ;

E_{b0} : module élastique du béton à l'origine ;

$K_{b'}$ est un paramètre permettant d'ajuster la branche décroissante de la courbe :

- Pour $K_{b'} = 0$, le béton a un comportement élastique fragile et la branche descend brutalement.

- Pour $kb' = 1$, le béton a un comportement ductile et la branche est assez plate. En général, pour un béton normal, on peut prendre : $kb' = kb - 1$.

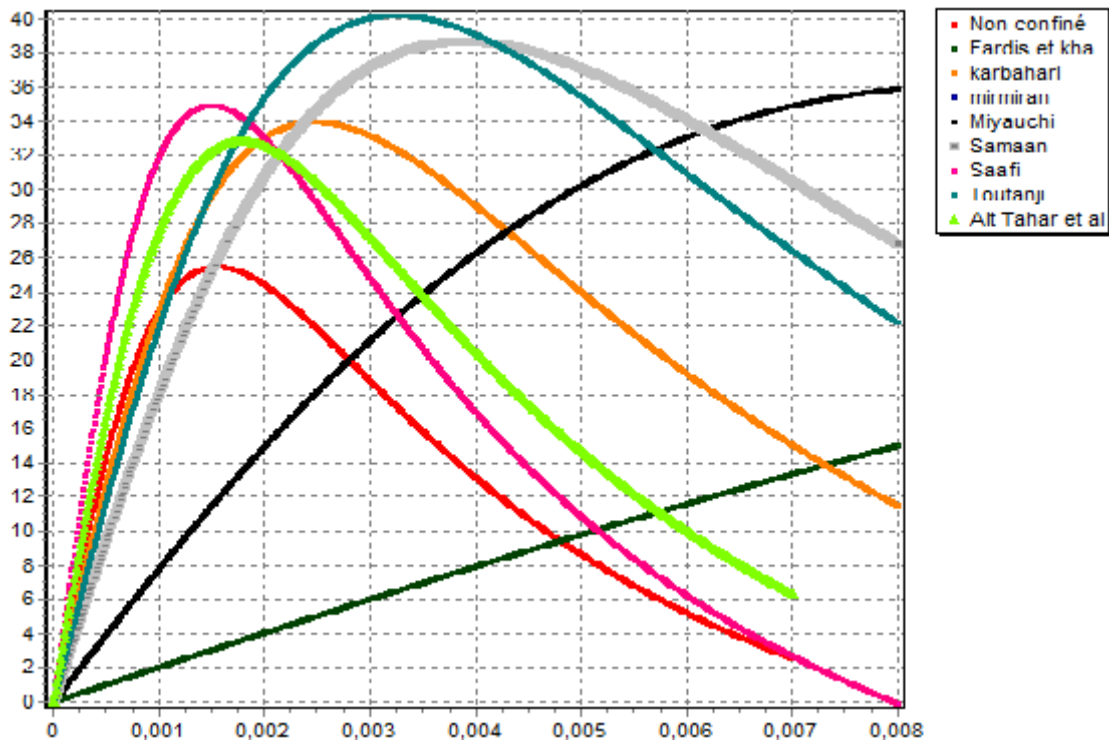


Figure IV.25; Variation de la contrainte en fonction de la déformation

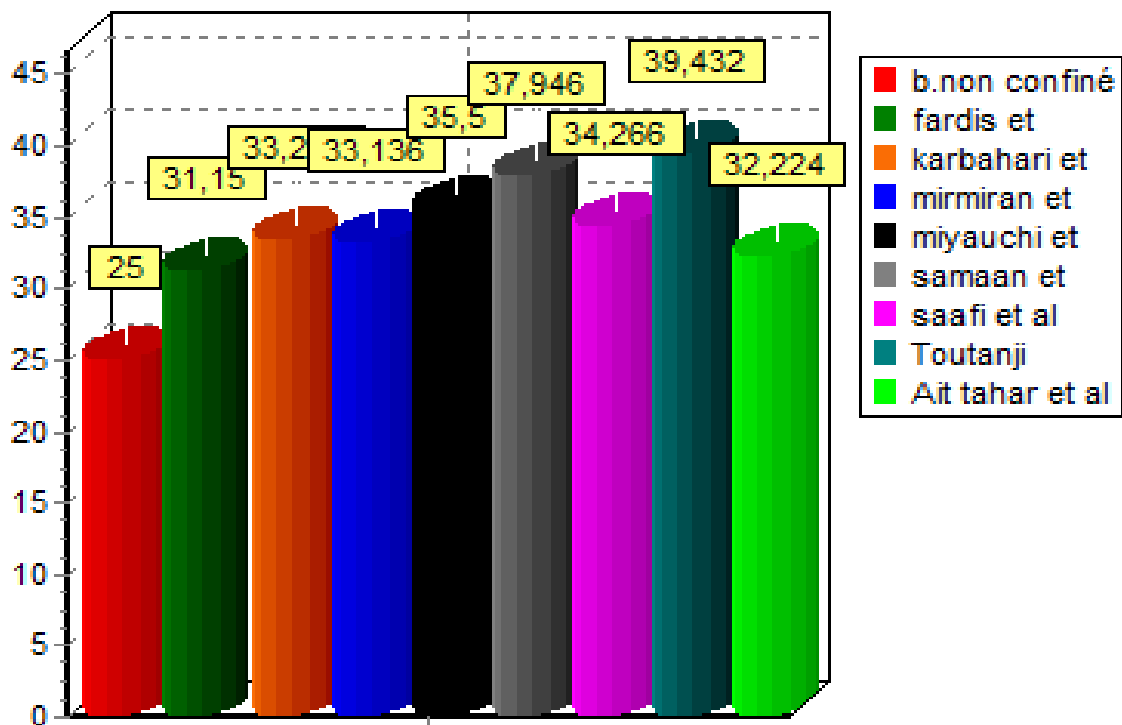


Figure IV.26 : Contraintes maximales f_{cc}

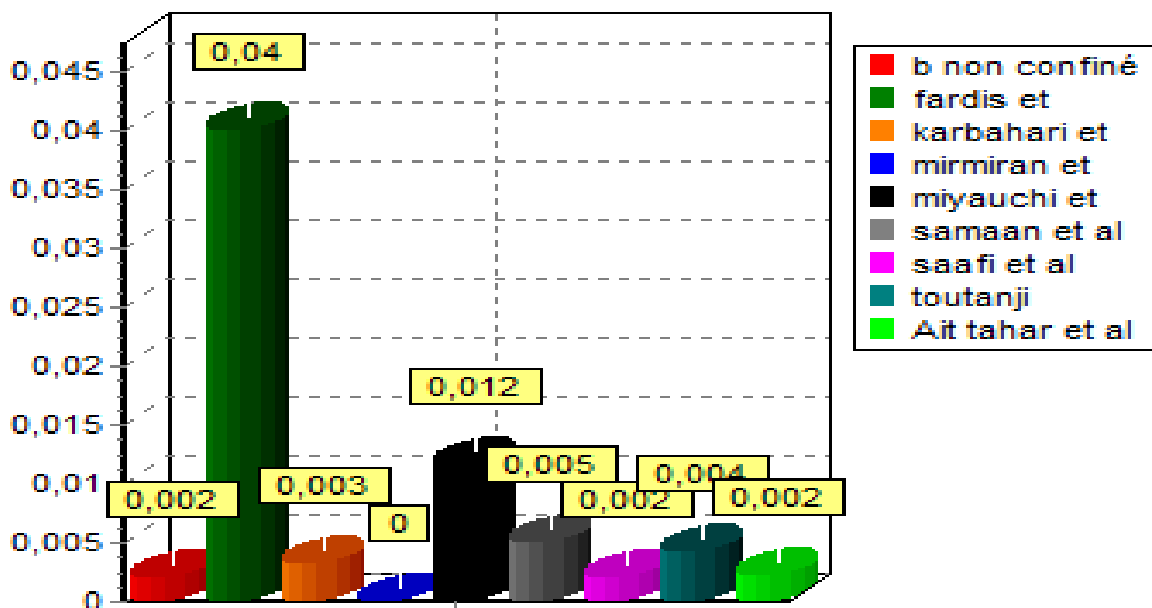


Figure IV.27 : Déformations maximales ϵ_{cc}

L'effet de type de FRP :

Application du modèle de **Ait tahar et al** avec plusieurs type de FRP

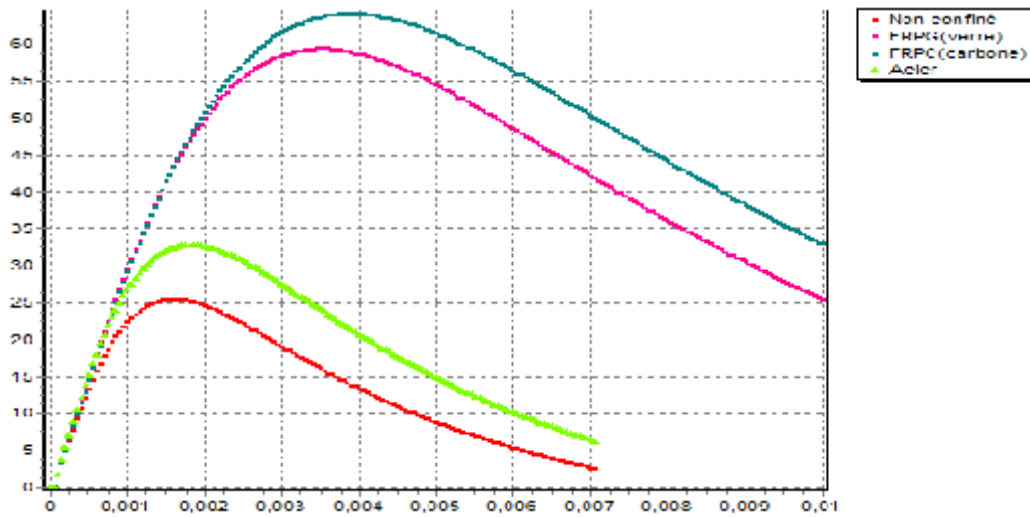


Figure IV.28 : Variation de la contrainte en fonction de la déformation

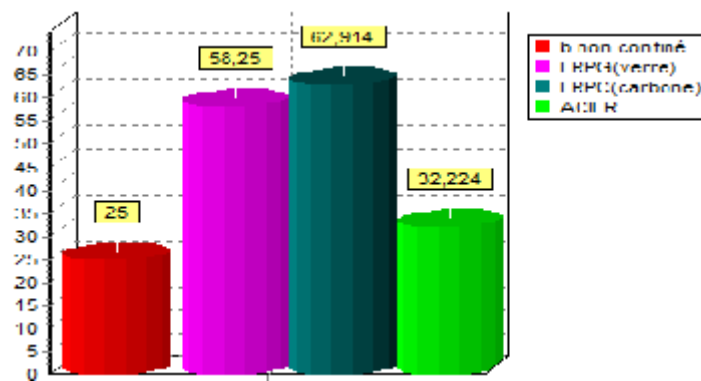


Figure IV.29 : Contraintes maximales f_{cc}

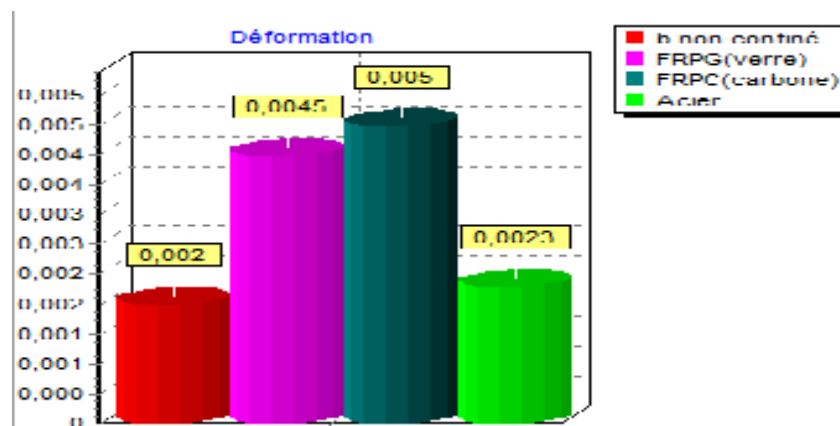


Figure IV.30 : Déformations maximales ϵ_{cc}

Conclusion du chapitre

Pour l'ensemble des modèles, l'augmentation de la pression du confinement entraîne à la fois une augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité des spécimens confinés avec des matériaux composites «PRF» par rapport aux spécimens non confinés. Cependant, les résultats se diffèrent d'un modèle à un autre. Tous les modèles dépendent du type de FRP utilisé et de la méthode de confinement utilisée. Aussi, pour la même technique de confinement utilisée, (procédé et matériaux) , les différents modèles ne donnent pas la même valeur des résistances au pic et des déformations ultimes correspondantes. Ceci peut être expliqué par la non prise en compte de certains paramètres tels que :

L'élançement géométrique L/D .

Les caractéristiques du béton non confiné.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail consiste à réaliser une analyse paramétrique de différents modèles de confinement existants dans la littérature actuelle, à travers la mise au point d'un programme d'analyse en langage Delphi. La confrontation des différents résultats obtenus par les différents modèles de confinement des cylindres en béton par différents matériaux (enveloppes, grilles, ...) a mis en évidence l'écart dans l'estimation des valeurs des résistances ultimes et des déformations axiales correspondantes. En effet, chaque modèle est restreint aux conditions et hypothèses admises par l'auteur et est fonction des conditions de réalisation, à savoir le type de renfort, la technique de confinement,

En effet, la modélisation des phénomènes gouvernant le comportement de ce matériau composite nécessite l'étude de certains paramètres (géométriques, rhéologiques...) afin d'en optimiser la durée de vie de tels éléments.

Des aspects de modélisation et théoriques ont été abordés dans notre démarche. Le modèle utilisé pour décrire le comportement du béton est un modèle couplé, pour lequel l'endommagement est lié à la déformation plastique par l'intermédiaire d'un critère. La grille métallique utilisée offre une résistance et une ductilité variées pouvant modifier le comportement du béton renforcé, à la compression axiale. En effet, l'introduction de la grille a une influence directe sur le mode de rupture. Nous observons aussi que lors de l'écrasement, les débris de béton restent emprisonnés à l'intérieur des grilles et le cœur de l'éprouvette reste sain. Ceci permet d'augmenter la durée de vie du béton confiné contrairement au béton témoin qui présente une rupture brutale. Ce qui est avantageux de point de vu sécurité.

Dans tous les cas, le confinement par des gilles permet une augmentation appréciable de la résistance et de la ductilité des colonnes. La résistance est améliorée de l'ordre de 40%, avec une meilleure ductilité, cela est dû à la conjugaison des performances mécaniques de la grille utilisée et son rôle qui consiste à confiner le béton, ce qui lui confère une plus grande réserve de résistance.

Perspectives

Au-delà des résultats encourageants que nous avons obtenus, il convient de préciser les perspectives futures qui concernent aussi bien les aspects modélisation qu'expérimentaux. Nous citons dans ce qui suit les points principaux :

- Prendre en compte l'échauffement thermique du matériau.
- Faire une étude de l'influence du maillage sur la réponse du matériau.
- Etudier les mécanismes de rupture à l'interface béton-grille.
- Analyser expérimentalement, en statique et en dynamique, l'influence du type de renfort sur le taux de confinement et optimiser cette technique.
- Généraliser cette technique de renforcement aux autres éléments de structure, tels que les fondations, les pieux, etc.