

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique
جامعة غرداية
Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de **Master**

En :Génie Civil

Spécialité :Structure

Par : Ziadi Djelloul Hicham

Ben Hamdoune Aïcha

Sujet

ETUDE DE REFORCEMENT PAR GRILLES MÉTALLIQUE (CHEMISAGE)

Soutenue publiquement, le 26 /09/ 2020, Devant le jury composé de :

Aziez Nadjib	Univ. Ghardaïa	Président
Nacer Amieur	Univ. Ghardaïa	Examineur
Yassin Rezma	Ingénieur CTC Ghardaïa	Encadreur
Hocine laroui	Chef d'agence CTC Ghardaïa	Invité

Année Universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS :

En premier lieu, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté, le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Nous remercions le président du comité d'arbitrage et les membres du jury pour leur acceptation d'assister à ces travaux.

Ensuite, nous remercions le président de l'université, Dr. **Lazhar Bashki**, et le chef du département, **Daheur Guesmiaet** l'ingénieur de la société (CTC) **Yassin Rezma** pour sa coopération avec nous dans ce travail.

En outre, nous tenons à remercier le professeur **Aziez Nadjib** pour son suivi et sa disponibilité, ses précieux conseils.

Sans oublier, nous tenons à exprimer nos remerciements ainsi que notre profonde gratitude au professeur et directeur du Centre des travaux publics, **Nacer Amieur** pour l'état de Ghardaïa, qui a grandement contribué à ce travail grâce aux compétences et connaissances étendues dans le domaine du renforcement avec des matériaux composites.

Dédicace :

Je dédie mes salutations et mon témoignage à ma famille, en particulier à ma mère, Gallia et mon frère Ibrahim.

Sans oublier mon ami Nadir Souilem sans oublier mes amis, chacun à son nom.

Ziadi DJELLOUL HICHAM

Dédicace

C'est avec une grande gratitude et des mots sincères, que je dédie ce modeste travail de fin d'étude à moi-même premièrement et à mes chers parents qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite.

A mon cher Père pour avoir toujours cru en moi pour ses nombreux sacrifices.

A ma chère Mère pour son soutien et ses encouragements.

J'espère qu'un jour je pourrai leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que dieu leur prête bonheur et longue vie.

Je dédie aussi de ce travail à ma sœur et mes Frères, a toute ma famille, a tous mes Professeurs, a tous mes amis et qui me sont chers.

AICHA Ben Hamdoune

Résumé :

Ce travail consiste en une analyse expérimentale et une modélisation de l'effet de la section et de diamètre de confinement de cylindres en béton par des grilles métalliques. L'utilisation du logiciel de modélisation statistique (JMP7) nous a permis d'établir des modèles mathématiques reliant les différents paramètres de confinement étudiés aux facteurs :section et diamètre. Les résultats montrent en général, l'effet positif de confinement et en particulier l'amélioration des déformations en fonction de la section et de diamètre des grilles d'une part, et d'autre part la diminution de la contrainte maximale et ultime et le module d'élasticité en fonction de l'augmentation de la contrainte maximale et ultime et le module d'élasticité en fonction de l'augmentation de la section et du diamètre de confinement.

Mot clés :renforcement, chemisage, contrainte, déformation.

Abstract:

This work is a modeling and experimental analysis of the effect of the section and diameter of reinforcement concrete cylinders by metal grids. The use of statistical modeling software (JMP7) allowed us to establish mathematical models linking the various studied parameters in reinforcement factors : section and diameter. The results generally show the positive effect of reinforcement and in particular the improvement of the deformations depending on the section and diameter of the one part of the grids. And on the other hand the decrease in the maximum stress and the ultimate and modulus of elasticity according to the increased diameter section of reinforcement.

Keywords : reinforcement, jacketing, strained, deformation.

ملخص

هذا العمل هو عبارة عن نمذجة و تحليل تجريبي لتأثير على القسم و اسطوانات ملموسة قطر الاحتواء عن طريق شبكات معدنية. يسمح استخدام البرمجيات النمذجة الاحصائية (JMP7) لنا لإنشاء النماذج الرياضية التي تربط بين مختلف المعلمات درس في الحبس العوامل القسم و القطر. اظهرت النتائج الاثر الإيجابي عموما من الاحتواء و على وجه الخصوص تحسين التشوهات تبعا للقسم و قطر جزء واحد من الشبكات. ومن ناحية اخرى انخفاض في الضغط الاقصى و النهائي و معامل المرونة وفقا لزيادة القطر المقطع و الاحتواء.

الكلمات المفتاحية : التعزيز, البطانة, الضغط , التشوه.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.

DEDICACES

RESUME

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES..... Error!

Bookmark not defined.

I.1. Introduction:Error! Bookmark not defined.

I.2. Les matériaux composites :Error! Bookmark not defined.

I.2-1. Les caractéristiques générales:Error! Bookmark not defined.

I.2.2. Avantages des matériaux composites :Error! Bookmark not defined.

I.2.3. Constitution des matériaux composites :Error! Bookmark not defined.

I.2.4. Applications des matériaux composites :Error! Bookmark not defined.

I.3. La matrice:Error! Bookmark not defined.

I.4. Les renforts :Error! Bookmark not defined.

I.4.1. Les différents types de fibres :	.....Error! Bookmark not defined.
I.4.2. Rôle des fibres :	.....Error! Bookmark not defined.
I.4.3. Propriétés mécaniques des fibres métalliques :	.....Error! Bookmark not defined.
I.5. Les dégradations des ouvrages en béton armé: I.5.1. Introduction :	Error! Bookmark not defined.
I.5.2. Les type de dégradations:	.....Error! Bookmark not defined.
I.5.2.1. Pathologies d'origine chimique:	.....Error! Bookmark not defined.
I.5.2.2. Pathologies d'origine physique:	.....Error! Bookmark not defined.
I.5.2.3. Pathologies d'origine mécanique:	.....Error! Bookmark not defined.
I.7. Conclusion :	.....Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE II : RENFORCEMENT DES STRUCTURES .. Error! Bookmark not defined.

II.1. Introduction :	..... Error! Bookmark not defined.
II.2. Notions sur le confinement:	..... Error! Bookmark not defined.
II.3. Etudes antérieures sur le confinement de béton par les matériaux composites:	Error! Bookmark not defined.
II.3.1 Les travaux effectués pour étudier le comportement des colonnes de béton confinées :	..... Error! Bookmark not defined.
II.3.2 Définition du module de confinement et de la contrainte de confinement: ..	Error! Bookmark not defined.
II.3.3 Comportement du béton confiné:	..... Error! Bookmark not defined.
II.3.4 Courbe contrainte-déformation type du béton confiné:	.....Error! Bookmark not defined.
II.3.5. Contrainte ultime et déformation ultime	Error! Bookmark not defined.
II.4. Revue littéraire des différents modèles de résistance du béton confiné.....	Error! Bookmark not defined.
II.6. Paramètres affectant le confinement:	..... Error! Bookmark not defined.
II.5. Les causes qui conduisent à renforcer les structures :	... Error! Bookmark not defined.
II.7. Méthodes de renforcement des structures en béton armé :	.....Error! Bookmark not defined.
II.8. Mise en œuvre des renforts composites:	..... Error! Bookmark not defined.
II.9. Avantages du confinement:	..... Error! Bookmark not defined.

II.10. Conclusion: Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE III : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALESError!
Bookmark not defined.

III.1. Introduction : Error! Bookmark not defined.

III.2. Matériaux utilises:..... Error! Bookmark not defined.

III.2.1. Ciment : Error! Bookmark not defined.

III.2.1.1. Essais prise de ciment : [62] Error! Bookmark not defined.

III.2.1.2. Essai de la consistance : [62]..... Error! Bookmark not defined.

III.2.2. Sable : Error! Bookmark not defined.

III.2.2.1. Module de finesse : [64] Error! Bookmark not defined.

III.2.2.2. Equivalente de sable : [65]..... Error! Bookmark not defined.

III.2.3. Gravier : Error! Bookmark not defined.

III.2.3.1. L'essai d'analyse granulométrique : [66]..... Error! Bookmark not defined.

III.2.3.2. Essai de coefficient d'aplatissement des granulats : [67].....Error! Bookmark not defined.

III.2.3.3. L'essai des masses volumiques : (absolue et apparente)Error! Bookmark not defined.

III.2.3.4. Essais de la propreté de gravier : [68]..... Error! Bookmark not defined.

III.2.4. Les résultats obtenus de sable et granulats : Error! Bookmark not defined.

III.2.5. L'eau : Error! Bookmark not defined.

III.2.6. Les adjuvants:..... Error! Bookmark not defined.

III.2.7. Grilles métalliques:..... Error! Bookmark not defined.

III.3. Méthodes expérimentales :..... Error! Bookmark not defined.

III.3.1. Présentation de technique de confinement par Grille Métallique :Error!
Bookmark not defined.

III.3.2. Formulation de la composition du Béton: Error! Bookmark not defined.

III.3.2.1. Méthode de Dreux-Gorisse :..... Error! Bookmark not defined.

III.3.2.2. Malaxage et mise en œuvre du béton : Error! Bookmark not defined.

III.3.3. Préparation des éprouvettes de béton: Error! Bookmark not defined.

III.3.4. Préparation de GM: Error! Bookmark not defined.

III.3.5. Les essais sur béton frais :..... Error! Bookmark not defined.

III.3.5.1. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams : [70]Error! Bookmark not defined.

III.3.6. Les essais sur béton durci : Error! Bookmark not defined.

III.3.6.1. Essai de compression: [71] [72]	Error! Bookmark not defined.
III.3.6.2. Essai au scléromètre : [73].....	Error! Bookmark not defined.
III.3.6.3. Essai ultrasonique : [74]	Error! Bookmark not defined.
III.4. Conclusion:	Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPREMONTAUX.....	Error! Bookmark not defined.
IV.1. Logiciel JMP :.....	Error! Bookmark not defined.
IV.1. Préparation résultats :.....	Error! Bookmark not defined.
IV.2. Résultats des réponses :.....	Error! Bookmark not defined.
IV.2.1. Réponse : contrainte de béton confiné (fcc) :.....	Error! Bookmark not defined.
IV.2.2. Réponse : déformation d'un béton confiné ϵ_{cc} :	Error! Bookmark not defined.
IV.2.3. Réponse : contrainte ultime de béton confiné (F_{cu}) :	Error! Bookmark not defined.
IV.2.4. Réponse : déformation ultime de béton confiné (ϵ_{cu}) :	Error! Bookmark not defined.
IV.2.5. Réponse : module d'élasticité (E) :	Error! Bookmark not defined.
IV.2. Conclusion :	Error! Bookmark not defined.

CONCLUSION GENERALE	Error! Bookmark not defined.
---------------------------	------------------------------

Annexe

Références

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Figure I- 1Les différents types de composites.....	Error! Bookmark not defined.
Figure I- 2.Différents constituants d'un matériau composite.	Error! Bookmark not defined.

Figure I- 3. Existence des trois zones caractéristiques (carbonatée, mixte, saine)Error! Bookmark not defined.

Figure I- 4. Dégradation des éléments d'un ouvrage par carbonatation. ...Error! Bookmark not defined.

Figure I- 5. Corrosion des armatures du béton armé..... Error! Bookmark not defined.

Figure I- 6. Corrosion des armatures. Error! Bookmark not defined.

Figure I- 7. Fissuration de peau du béton..... Error! Bookmark not defined.

Figure I- 8. Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou..... Error! Bookmark not defined.

Figure I- 9. Organigramme des différentes familles de matrice.Error! Bookmark not defined.

Figure I- 10. Organigramme des différentes familles de fibres.Error! Bookmark not defined.

Figure I- 11. Différents types de fibres métalliques..... Error! Bookmark not defined.

Figure I- 12. Les fibres de fonte amorphe..... Error! Bookmark not defined.

Figure I- 13. Fibre de polypropylène Error! Bookmark not defined.

Figure I- 14. Fibre de verre. Error! Bookmark not defined.

Figure I- 15. Histogramme des propriétés en traction des fibres.Error! Bookmark not defined.

Figure I- 16. (a et b). Illustration de l'apport du renfort par des fibresError! Bookmark not defined.

Figure I- 17. Différentes formes géométriques de fibres métalliques. .Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE II RENFORCEMENT DES STRUCTURES

Figure II- 1. Disposition des différents matériaux dans un poteau de section carrée Error! Bookmark not defined.

Figure II- 2. Exemple de confinement d'un élément: linéaire a) -cadre carré b)-spirale circulaire [20]..... Error! Bookmark not defined.

Figure II- 3. Courbe contrainte-déformation du béton confiné par[38]....Error! Bookmark not defined.

Figure II- 4. (a) Instrumentation (b) Mode de rupture des spécimens de béton enveloppés par des fibres de carbone [41]. Error! Bookmark not defined.

Figure II5 -. Réponse volumétrique de béton confiné par FRP, béton confiné par acier et béton non confinement [61]..... Error! Bookmark not defined.

Figure II- 6. Modèle tri-linéaire de contrainte-déformation dans les directions axiales et latérales [45]..... Error! Bookmark not defined.

Figure II- 7. Différent niveau de confinement [49]..... Error! Bookmark not defined.

Figure II- 8. Courbes contraintes-déformation d'un béton confiner et non confiner [46] Error! Bookmark not defined.

Figure II- 9. Effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton [47]. Error! Bookmark not defined.

Figure II- 10. Courbe contrainte - déformation d'un béton confiner par PRF [49]...	Error!
Bookmark not defined.	
Figure II- 11. Chemisage en béton armée	Error! Bookmark not defined.
Figure II- 12. Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier	Error! Bookmark not defined.
Figure II- 13. Conception du système multicouche	Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE III MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Figure III- 1. Essais de prise de ciment.....	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 2. Essai de la consistance.....	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 3. Essai de l'équivalent de sable.....	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 4 Equipements de l'analyse granulométrique.....	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 5. Un série de grilles.	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 6. L'essai de masse volumique.	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 7. L'essai de la propreté	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 8. courbe d'analyse granulometrique	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 9. Adjuvent SIKAPLAST BV 40+	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 10. Exemple de confinement proposé (intégration des grilles dans matrice de béton) et schéma explicatif.	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 11. Dosage de ciment.....	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 12. Courbe granulométrique.	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 13. Courbe référence Dreux Gorisse	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 14. Les étapes de confection d'un béton	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 15. Les sections des grilles métallique (a) 2.25 cm² (b) 9cm² (c) 20.25cm²	Error!
Bookmark not defined.	
Figure III- 16. L'essai d'affaissement.	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 17. Mode de préparation et mise en charge des spécimens.....	Error! Bookmark not defined.
not defined.	
Figure III- 18. Des éprouvettes après essais de compression .	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 19. L'essai de scléromètre	Error! Bookmark not defined.
Figure III- 20. L'essai d'ultrasonique.....	Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

Figure IV- 1.logo de logiciel JMP [75]	Error! Bookmark not defined.
Figure IV- 2. Diagramme de contrainte-déformation de la composition ..	Error! Bookmark not defined.
not defined.	
Figure IV- 3. Courbes de contraintes-déformation de toutes les compositions étudiées.	Error! Bookmark not defined.
Figure IV- 4. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de fcc (MPa).....	Error! Bookmark not defined.
Figure IV- 5. Variation de la réponse fcc en fonction de S et D (profileurs de prévision).	Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 6. Courbes isoréponses de la variation de la contrainte maximale fce (MPa) en fonction de S et de D Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 7. Graphique des valeurs observée en fonction des valeurs prévuesError! Bookmark not defined.

Figure IV- 8. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 9. Variation de la réponse fcu en fonction de S et D (profileurs de prévision). Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 10. Courbes isoréponses de la variation de la contrainte maximale fcu en fonction de S et de D..... Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 11. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la réponse ϵ_{cu} Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 12. Variation de la réponse ϵ_{cu} en fonction de S et D (profileurs de prévision). Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 13. Courbes isoréponses de la variation de la contrainte maximale feu (MPa) en fonction de S et de D. Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 14. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la réponse E (GPa)..... Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 15. Profileur de prévision de la réponse E..... Error! Bookmark not defined.

Figure IV- 16. Courbes isoréponses de la variation de la contrainte maximale E (GPa) en fonction de S et de D..... Error! Bookmark not defined.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Tableau-I. 1. Les différents types de composites Error! Bookmark not defined.

Tableau-I. 2. comparaison qualitative entre fibres. Error! Bookmark not defined.

Tableau-I. 3. Les caractéristique des fibres et renforts. Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE III MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Tableau-III1 .. composition chimique du ciment. Error! Bookmark not defined.

Tableau-III. 2. Propriétés physico-mécanique du ciment. Error! Bookmark not defined.

Tableau-III3 ..Propriétés physiques des granulats Error! Bookmark not defined.

Tableau-III. 4. Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale. des granulats Dmax Error! Bookmark not defined.

Tableau-III. 5. Valeur du terme correcteur K..... Error! Bookmark not defined.

Tableau-III. 6. Composition du béton Selon la formulation Dreux GorisseError! Bookmark not defined.

Tableau-III7 .. Varient de confinement Error! Bookmark not defined.

Tableau-III. 8. Niveau des facteurs : section et diamètre..... Error! Bookmark not defined.

Tableau-III. 9. La classe d'affaissement au cône d'Abrams .. Error! Bookmark not defined.

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

Tableau-IV. 1. Résultats issus de courbes contraintes-déformations de notre étude..Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 2. Résumé de l'ajustement de la réponse fcc..... Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 3. Paramètres issus de l'analyse de la variance de la réponse fcc.Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 4. Paramètres et coefficient du modèle établi Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 5. Résumé de l'ajustement de la réponse ϵ_{cc} Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 6. Paramètres issus de l'analyse de la variance de la réponse ϵ_{cc} Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 7. Résumé de l'ajustement de la réponse F_{cu} Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 8. Paramètres issus de l'analyse de la variance de la réponse F_{cu}Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 9. Paramètres et coefficients du modèle établi Estimations des coefficients Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 10. Résumé de l'ajustement de la réponse ϵ_{cu} .. Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 11. Paramètres issus de l'analyse de la variance de la réponse ϵ_{cu}Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 12. Paramètres et coefficient du modèle établi .. Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 13. Résumé de l'ajustement de la réponse E. Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 14. Analyse de la variance de la réponse E. Error! Bookmark not defined.

Tableau-IV. 15. Coefficient du modèle de la réponse E. Error! Bookmark not defined.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Le point de départ de toute défaillance d'une structure en béton, soumise à des sollicitations diverses, est provoqué par la naissance de fissures ; donc l'apparition de déformations permanentes et une diminution de la capacité portante de ces structures. Pour pallier à ceci, les études qui se poursuivent par maints chercheurs virent vers la proposition d'utilisation des matériaux nouveaux avec de nouvelles techniques de réalisation, tels que les matériaux composites.

Des techniques qui assurent un retour de rigidité et de résistance, ce qui permet évidemment une durabilité de tout ouvrage, telle est la préoccupation de nos ingénieurs-concepteurs, depuis plusieurs décennies, dans le souci primordial est d'améliorer les performances de ces solutions dans l'amélioration des performances du béton. Selon l'application visée, on fait appel à d'autres matériaux et d'autres techniques pour remédier à quelques faiblesses du béton.

Toutes les études réalisées dans le 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 d'effondrement total des structures, particulièrement pendant des tremblements de terre ou des attaques terroristes ou autres. Ainsi, la résistance et la ductilité des colonnes sont les paramétrés les plus importants dans n'importe quelle structure. Plusieurs chercheurs sont rapportés que le confinement de béton par arrangement approprié du renfort transversal a comme conséquence une croissance significative de la résistance et de la ductilité.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier expérimentalement et analytiquement le comportement des cylindres de béton confinés par des grilles métalliques, en faisant varier la disposition de la grille diamètre de la maille de la grille (section de confinement), pour ce faire, une modélisation par plan d'expérience a été menée en utilisant un plan factoriel complet.

Cette étude est constituée de quatre principaux chapitres :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les matériaux composites, les matériaux béton et ses différentes composantes nécessaires à sa fabrication.
- 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 à l'analyse des matériaux utilisés, la préparation des cylindres confinés par grilles métalliques, et les procédures des essais ainsi utilisés.
- Le quatrième chapitre analyse les résultats des essais du comportement contrainte-déformation des éprouvettes préparées, par logiciel JMP 7, présente les modèles mathématiques établis et une discussion des résultats trouvés.
- A la fin de ce travail, nous présentons une conclusion sur les résultats trouvés et on propose des perspectives pour les travaux ultérieurs.

CHAPITRE I :
GENERALITE SUR LES MATERIAUX
COMPOSITES

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

I.1. Introduction:

Les composites sont très anciens : bois (composite naturel), torchis, béton (agrégats et pâte de ciment), béton armé, bois contre-plaque (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 plastique 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 aux celles 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.

La connaissance, aussi précisément que possible, des caractéristique géométriques et mécaniques d'un mélange (renfort+ matrice) qui 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. 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 assure la résistance mécanique, il est généralement constitué de fibres de verre, de carbone et d'autres suivant destination, La matrice, essentiellement 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.

I.2. Les matériaux composites :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au **tableau (I.1)**. Un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort sous forme filamentaire et nécessite l'association intime d'au moins deux composants: le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison. Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.

Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice; ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés: les pigments de coloration, l'isolation thermique ou acoustique (1) (2).

Tableau-I. 1. Les différents types de composites

Type de composite	composite	Domaine d'application
--------------------------	------------------	------------------------------

1/Composites à matrice organique	-Résine/fibre cellulosique	-Imprimerie
- Papier	-Résine /copeaux	-bâtiment
-Carton	-Résine / tissus	
-Carreaux de fibres toiles enduites	-Elastomère	-Toitures
-Matériaux d'étanchéité et pneumatiques	-Caoutchouc/ acier	-Automobile
2Composites à matrice minérale	Ciment /sable /granulats	-Génie civil
-Bidon	Carbone / fibres	-Aviation
-Composite –carbone		-Espace
3/ Composites à matrice métallique	Aluminium /fibres de bore	-Aéro-spécial
	Aluminium /fibres de carbone	

I.2-1. Les caractéristiques générales:

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

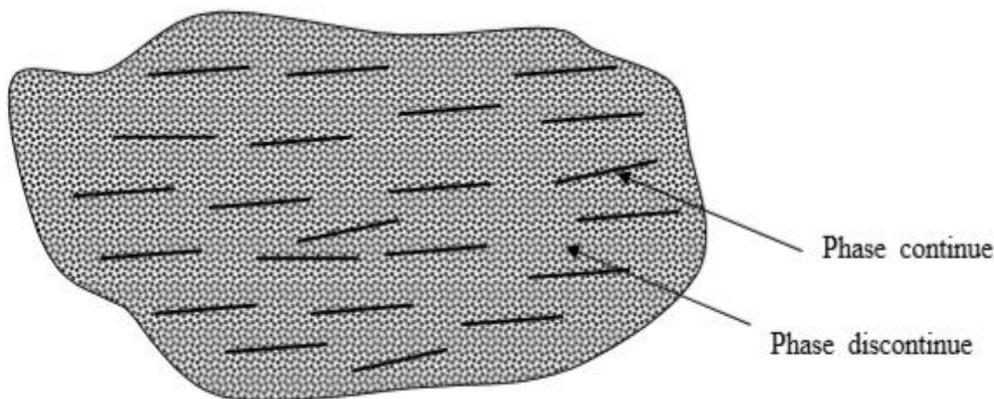


Figure I- 1 Les différents types de composites.

Les propriétés des matériaux composites résultent en:

- les propriétés des matériaux constituants.

- leurs distributions géométriques.
- leurs interactions.

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

- La nature des constituants et leurs propriétés.
- La géométrie du renfort, et sa distribution.
- La nature de l'interface: matrice-renfort.
- La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (son orientation).

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

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

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

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

Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées (3) (4).

I.2.2. Avantages des matériaux composites :

Les matériaux composites présentent des avantages tels que:

- Résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée.
- Poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier, pour une même résistance ultime le poids de PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) est inférieure de 10% au poids des platines d'aciers.

- Maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.
- La durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à la corrosion par rapport à celle des platines d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leur zones de fixation seront fissurées.
- Tenue au feu : la conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente à celle des platines d'aciers.
- La maintenance et entretien : le système de renforcement de matériaux composites n'exige pas un entretien, par contre le renforcement par les platines d'acier demande une maintenance périodique continue.
- Réduction du temps d'exécution et mise en œuvre : la préparation, le transport et la mise en œuvre des platines d'aciers prend un temps considérable par rapport à l'application des matériaux composites.

Le choix est porté sur les fibres de carbone en comparaison avec les fibres de verre et les fibres d'aramide **tableau (I.2) (5)**

Tableau-I. 2. comparaison qualitative entre fibres.

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

I.2.3. Constitution des matériaux composites :

Un matériau composite est constitué de deux phases : Une phase continue qui est la matrice, généralement ductile mais possédant une résistance et une rigidité faibles, assure la protection des fibres et le transfert des efforts vers ces dernières, plus rigides et plus résistantes. Son rôle consiste donc à maintenir les fibres en place, de transmettre et de distribuer les sollicitations mécaniques extérieures au renfort, de fournir un support latéral agissant contre le voilement des fibres sous compression et de les protéger contre l'abrasion mécanique et les conditions environnementales (**Figure I.2**).

Une phase discontinue constituée de renforts ou fibres qui assurent la fonction mécanique (résistance).

Le comportement mécanique des matériaux composites est gouverné par plusieurs facteurs principaux, tels que: le type et nature des fibres de renfort, le type de matrice, la fraction volumique des constituants. (3)

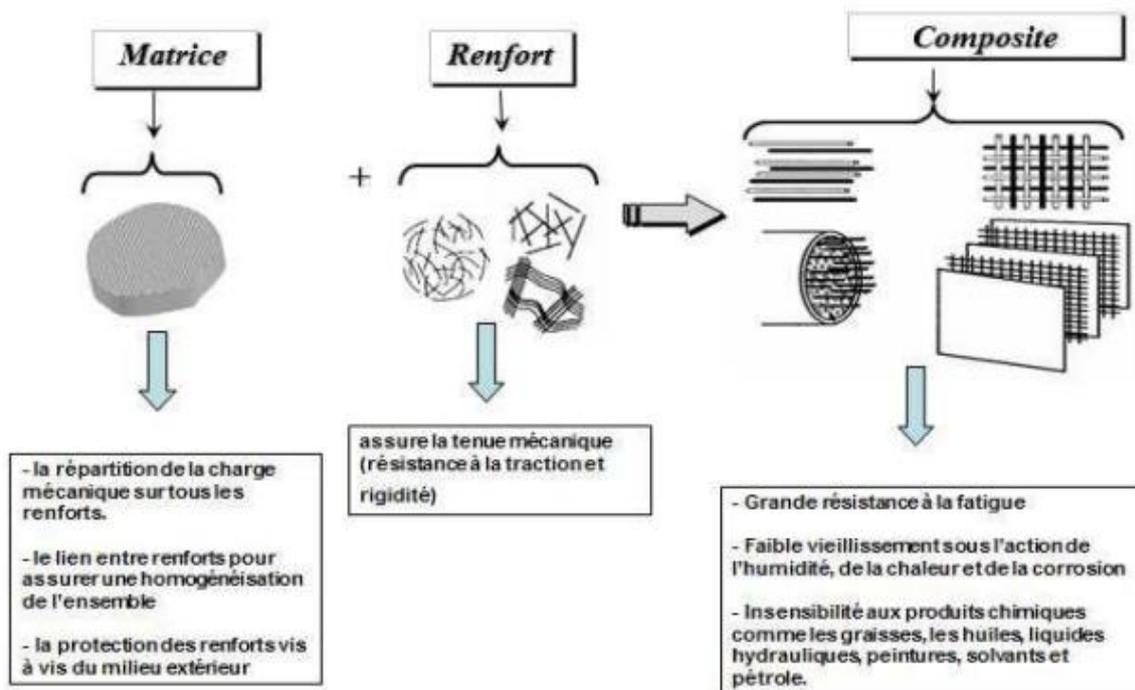


Figure I- 2. Différents constituants d'un matériau composite.

I.2.4. Applications des matériaux composites :

Parmi les multiples applications des matériaux composites dans l'ingénierie civile, nous pouvons citer.

- Construction d'édifices et d'ouvrage d'art léger, et Réalisation de formes complexes de grande portée.
- Renforcement structurel d'édifices existants, afin de respecter de nouvelle norme ou en prévision d'utilisation nouvelle d'un bâtiment (ajout d'étage, changement du type d'exploitation). Utilisation principalement dans ce cas de la fibre de carbone pour le renforcement de poutres, poteaux et dalles sous flexion et cisaillement.
- Utilisation de produits dérivés du béton avec ajouts de fibre, béton armé avec renfort en fibre de verre ou de carbone.
- Transmission et distribution d'électricité temporaire et durable, pylônes électriques modulables et déplaçables.
- Structures destinées aux réservations d'eau.
- Panneaux pour murs et planchers. (6)

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

I.3. La matrice:

La matrice composée elle-même d'une résine (polyester, époxy etc.), et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production.

D'un point de vue mécanique l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène et le composite est constitué de ce matériau homogène (la matrice) et d'un renfort.

Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis –vis des agressions extérieures.

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

La matrice a ainsi diverses fonctions: lier les fibres entre elles, transférer les charges mécaniques aux fibres, protéger les fibres de l'environnement extérieur, ainsi ce nouveau matériau modulable, présente des caractéristiques mécaniques spécifiques assez élevées (7).

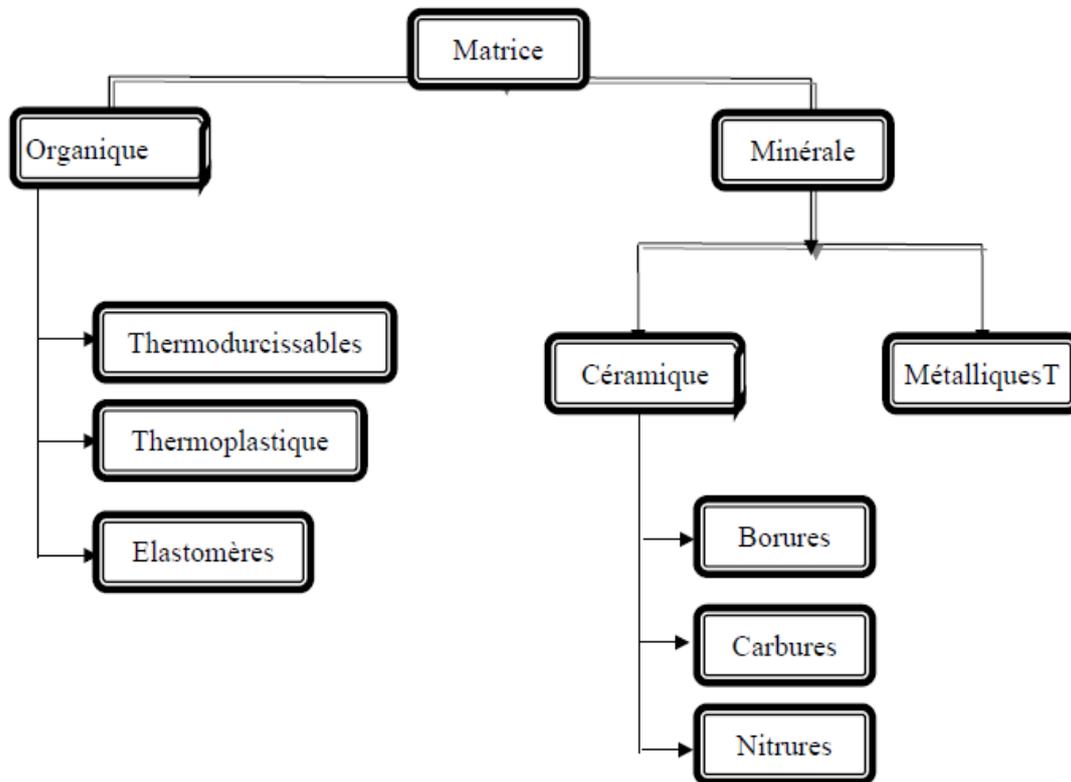


Figure I- 3. Organigramme des différentes familles de matrice (7).

I.4. Les renforts :

I.4.1. Les différents types de fibres :

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques : (8).

- Fibres minérales : verre, carbone.
- Fibres métalliques : acier, inox, fonte.
- Fibres organiques : polypropylène, acrylique.

- Fibres naturelles : Hévéa, Sisal ...

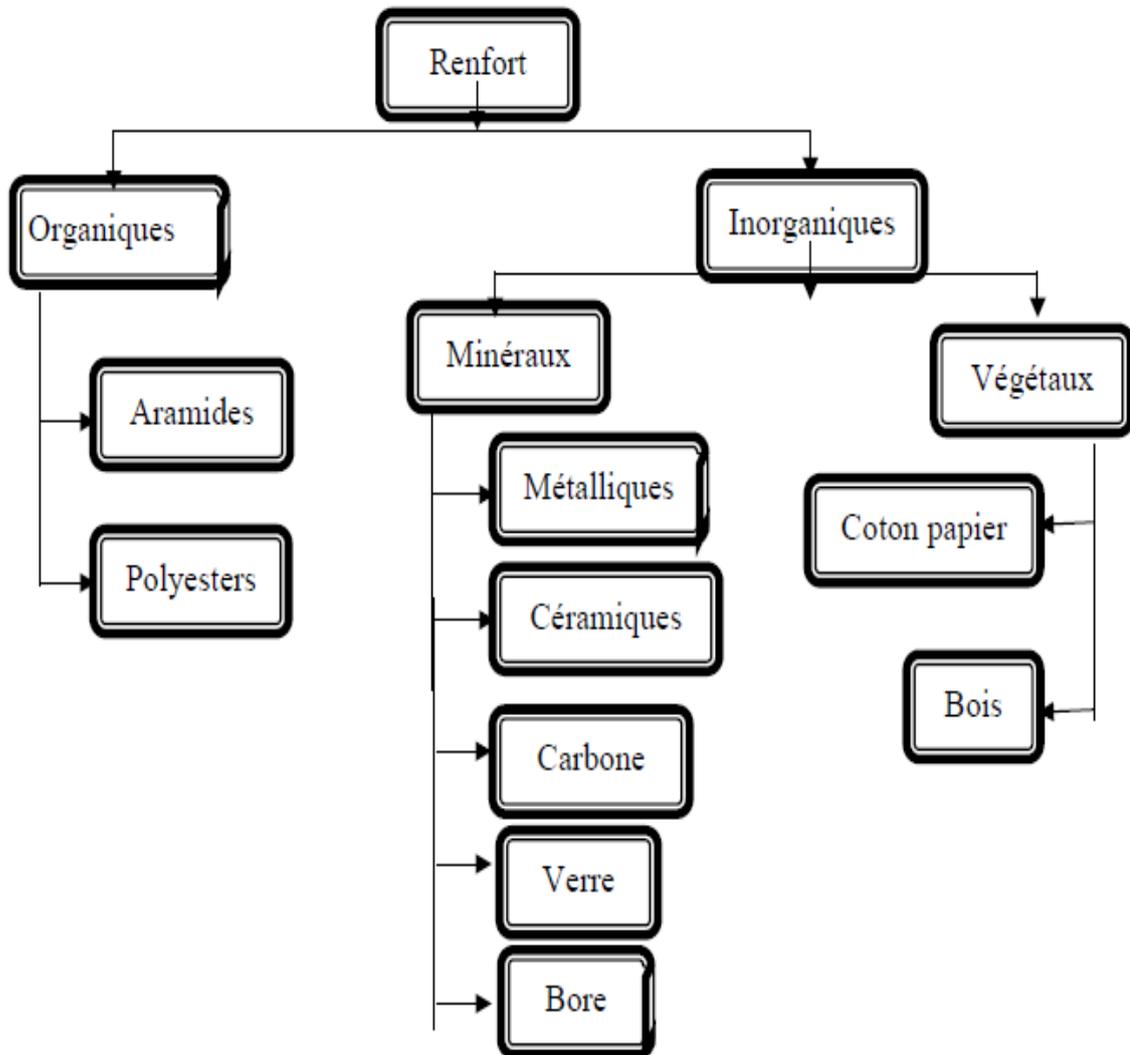


Figure I- 4. Organigramme des différentes familles de fibres (8).

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres.

a)Fibres métalliques :

Les fibres métalliques caractérisées par un module d'élasticité élevé, par conséquent, offre au béton une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité

appréciable, leurs formes et leurs dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités, en tête de clou) (8).



Figure I- 5. Différents types de fibres métalliques (8).

b)Fibres de fonte amorphe :

Ces types de fibres (**figure I.13**) sont obtenus par refroidissement brusque, d'un alliage métallique à base de fer, sont constituées de petits rubans de 1 à 3 mm de largeur, contribuent à la limitation des fissures sous chocs. (8).



Figure I- 6. Les fibres de fonte amorphe (8).

c)Les fibres de polypropylènes :

Les polypropylènes, sont des produits d'origine pétrolière, découverts en 1954, ce matériau de synthèse a connu une extension croissante dans l'industrie de textile où ils apportent les avantages suivants :

- Disponibilité à prix relativement faible.
- Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs

Augmentation notable de la résistance aux chocs Limite l'ouverture des fissures. Ces fibres sont fréquemment utilisées dans le bâtiment, en particulier dans réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façades, de tuyaux et pieux. (8).



Figure I- 7. Fibre de polypropylène (8).

d) Fibres de verre:

Les fibres de verre sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières chauffées aux environs de 1250°C. A cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir, soit des filaments continus, soit des fibres discontinues. Il existe deux procédés d'étirage : l'un mécanique et l'autre pneumatique (9).

Sous leur forme habituelle, sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Sous la forme de fibres de faible diamètre, le verre perd ce caractère, acquiert de bonnes caractéristiques mécaniques, et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faibles épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton.



Figure I- 8. Fibre de verre (9).

e) 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. (9).

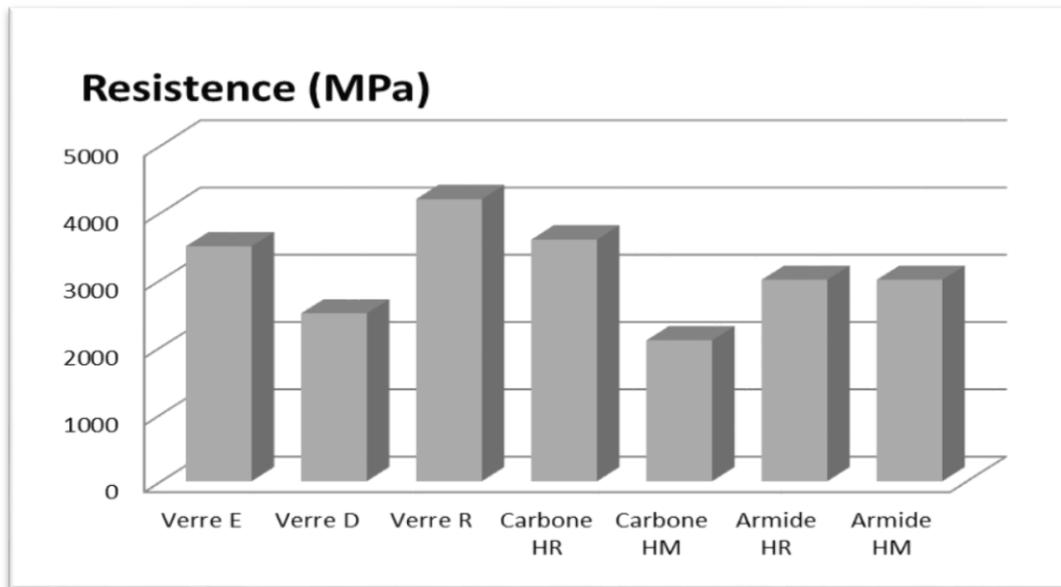


Figure I- 9. Histogramme des propriétés en traction des fibres.

Tableau-I. 3. Les caractéristiques des fibres et renforts.

Renfort	du Diamètre filament D	de Masse volumique Mv	de Module élastique longitudinale E	de Module cisaillement G	de Coefficient poisson K	de Contrainte rupture Cr	de Allongement rupture A	de Coefficient dilatation thermique α
Verre E	16	2600	74000	300000	0.25	2500	3.5	$0.5 \cdot 10^{-3}$
Verre R	10	2500	86000		0.2	3200	4	$0.3 \cdot 10^{-3}$
Carbone HM	6.5	1800	390000	200000	0.35	2500	0.6	$0.08 \cdot 10^{-3}$
Carbone HR	7	1750	230000	500000	0.3	3200	1.3	$0.02 \cdot 10^{-3}$
Kevlar 49	12	1450	130000	120000	0.4	2900	2.3	$-0.2 \cdot 10^{-3}$
Bore	100	2600	400000			3400	0.8	$0.4 \cdot 10^{-3}$

Silicate d'alumine	10	2600	200000			3000	1.5	$0.5 \cdot 10^{-3}$
Polyéthylène		960	100000			3000		

I.4.2. Rôle des fibres :

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Il n'a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la «**Figure I.16 (a)**».

La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes «**Figure I.16 (b)**».

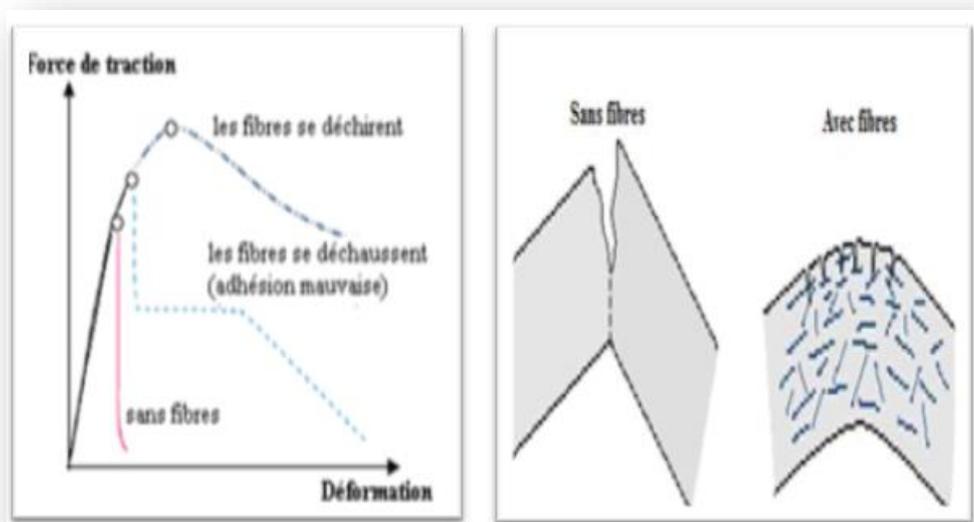


Figure I- 10. (a et b). Illustration de l'apport du renfort par des fibres

Pour bien comprendre le rôle joué par les fibres, il faut préciser que le terme « fibre » est ici réservé à des matériaux d'une longueur d'environ 60 mm (fibres courtes), par opposition aux armatures du béton armé (barres, rubans, treillis soudés).

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. Selon les caractéristiques présentées par les fibres, la rupture du béton évolue plus ou moins d'un comportement fragile vers un mode de type ductile. (8).

Selon les fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :

- ✓ La cohésion du béton frais.
- ✓ La déformabilité avant rupture (rupture ductile).
- ✓ La résistance aux chocs.
- ✓ La résistance à la fatigue.
- ✓ La résistance à l'usure.
- ✓ La résistance mécanique du béton aux jeunes âges.
- ✓ La réduction des conséquences du retrait par effet de couture des fissures et microfissures.

Grâce à leurs propriétés, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton avec comme conséquence une réduction des sections, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et de donner une plus grande liberté architecturale.

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation. Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- L'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides.
- Changent la structure du squelette granulaire.
- L'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration.
- La réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge.
- La réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur).
- L'augmentation de la résistance à la traction par flexion.

- L'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion.

I.4.3. Propriétés mécaniques des fibres métalliques :

Les fibres ont une influence importante sur le comportement mécanique du béton fibreux, leur incorporation peut augmenter les résistances, en traction, en flexion et particulièrement au cisaillement en résistant aux efforts de traction. Offrent plus de ductilité et de ténacité.

Leur géométrie est très variable «**Figure I.16**». Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre (8) et par frottement à l'interface avec la matrice.

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment.

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent.

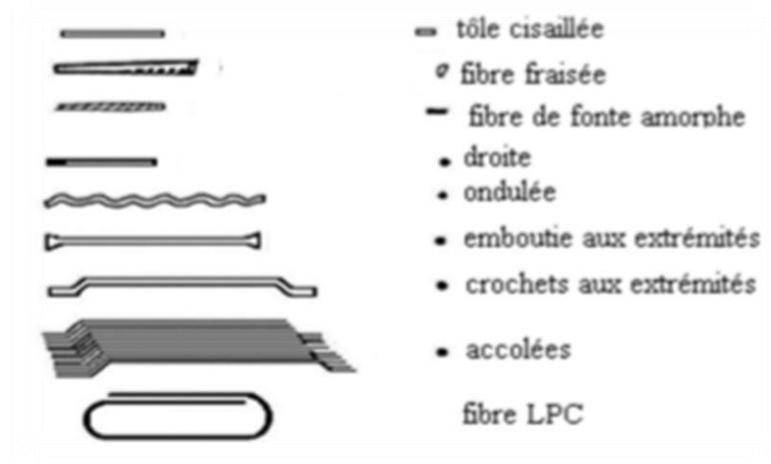


Figure I- 11. Différentes formes géométriques de fibres métalliques.

I.5. Les dégradations des ouvrages en béton armé:

I.5.1. Introduction :

Le béton armé est le matériau de base le plus utilisé dans le génie civil depuis plus d'un siècle. Il peut se dégrader et perdre une part de ses propriétés sous l'influence de causes multiples qui peuvent être liées à sa qualité originelle ou à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. Des pathologies apparentes ou cachées peuvent survenir. Afin de connaître leur nature, leur étendue et leur potentialité d'évolution, on établit un diagnostic nécessaire pour la prise des décisions relatives à la maintenance de l'ouvrage concerné.

I.5.2. Les type de dégradations:

I.5.2.1. Pathologies d'origine chimique:

a) Carbonatation:

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui affecte tous les bétons. La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO_2) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH , NaOH et $\text{Ca}(\text{OH})_2$] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes

dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 : (10) (11)



Les différentes zones caractéristiques depuis la surface extérieure (Figure I.3) :

Zone carbonatée dans laquelle la portlandite a totalement disparu.

Zone mixte où la quantité de carbonate de calcium décroît et celle de portlandite croît,

Zone saine dans laquelle aucune modification minéralogique n'est relevée. (12)

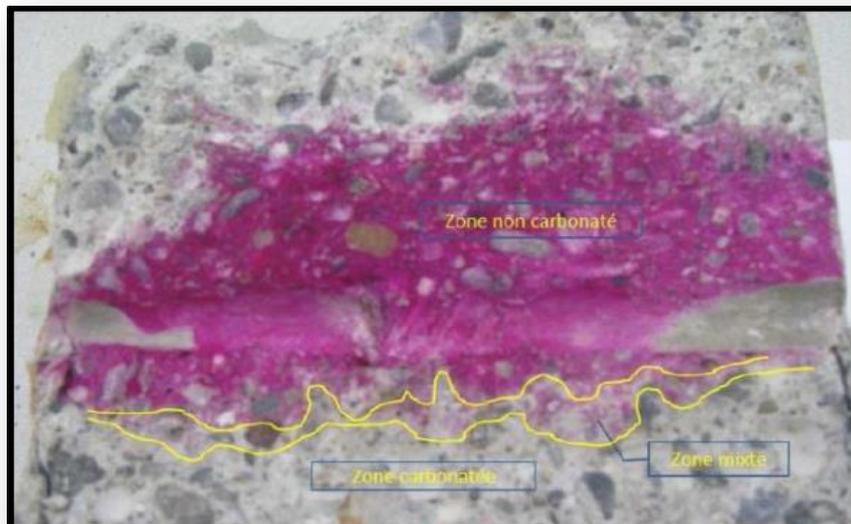


Figure I- 12. Existence des trois zones caractéristiques (carbonatée, mixte, saine) (12)

La carbonatation entraîne des problèmes de durabilité puis de résistance sur les structures en béton armé. Les barres d'acier, censées garantir cette résistance, gonflent sous l'effet de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage, les aciers sont alors mis à nu. (**Figure I.4**).



Figure I- 13. Dégradation des éléments d'un ouvrage par carbonatation.

Techniques d'investigation:

Les différentes techniques d'investigation sont:

- L'observation visuelle directe.
- Le prélèvement d'échantillons (carottes ou éclats).
- La détermination de l'âge du béton.
- Mesure du pH par contact avec des réactifs.
- Distance du front de carbonatation. (13)

b) Corrosion des aciers:

La corrosion des armatures est la dégradation la plus courante des ouvrages de génie civil. Cela représente 55% des dégradations observées lors de l'enquête réalisée par la British Cement Association (BCA, 1997) (14). Les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu'après un certain temps. Les défauts invisibles sont des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l'enrobage de béton (15)

Le processus de corrosion comporte deux étapes :

- La phase d'incubation de la corrosion correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage de béton, sans corroder les armatures. Il s'arrête lorsqu'au niveau des armatures, la teneur en agent agressif atteint un certain seuil. La **Figure I.5** ci-après illustre ces stades de dégradation par corrosion due à des agents agressifs venant du milieu environnant (15)

- La phase de propagation, correspond au développement de la corrosion. Figure I.5 et I.6 (15) (16).

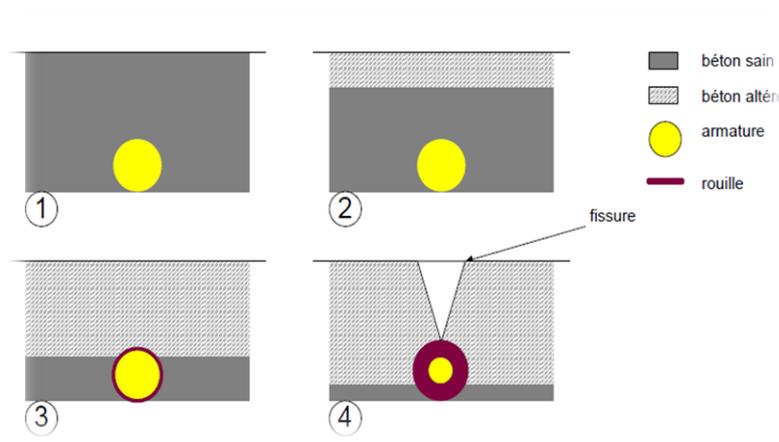


Figure I- 14. Corrosion des armatures du béton armé. (15)

(1) le béton sain, (2) un agent agressif pénètre progressivement, (3) lorsque sa teneur est assez forte, l'armature commence à se corroder, (4) et la rouille peut faire éclater l'enrobage (16).



Figure I- 15. Corrosion des armatures. (16).

I.5.2.2. 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. Le retrait est un processus relativement complexe. Il peut se décomposer en quatre types différents : plastique, de séchage, thermique, de carbonatation et endogène.



Figure I- 16. Fissuration de peau du béton (17).

b) Le retrait plastique (avant la prise):

Avant la prise, une partie d'eau du béton frais peut s'évaporer ou être absorbée par le support. Ce phénomène génère des tensions capillaires dans le matériau, qui se traduisent par une réduction du volume occupé par la pâte, c'est le retrait plastique. L'effet du retrait plastique sur le comportement mécanique des structures réparées par rechargements minces adhérents n'est pas considérable car le rechargement peut s'adapter aux variations dimensionnelles avant la prise du matériau. (17).

c) Le retrait thermique:

Le retrait thermique peut être la cause de pré fissuration du béton. La prise puis le durcissement du béton se font avec un dégagement de chaleur ; le matériau se contracte au cours de son refroidissement. A ce phénomène viennent s'ajouter des effets de masse, la température d'hydratation pouvant être plus élevée au sein d'une pièce massive et plus faible au voisinage des parois par échange thermique avec l'extérieur.

L'expérience montre que le retrait gêné, hydraulique et / ou thermique, peut provoquer la fissuration dans tous les éléments, mais particulièrement dans les murs et les dalles en fonction de la longueur, l'épaisseur, le ferrailage, l'hygrométrie ambiante et les conditions climatiques (ensoleillement, vent, pluie...). Le retrait hydraulique s'effectue sous l'action de l'évaporation d'une partie de l'eau de gâchage. (18).

I.5.2.3. Pathologies d'origine mécanique:

a) Délamination:

L'action conjuguée des sollicitations climatiques, des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton des hourdis de ponts provoqué des délaminations 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 (**figure I.8**). D'autres types de pathologie peuvent être rencontrés dans les ouvrages en béton, tel 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 (18).

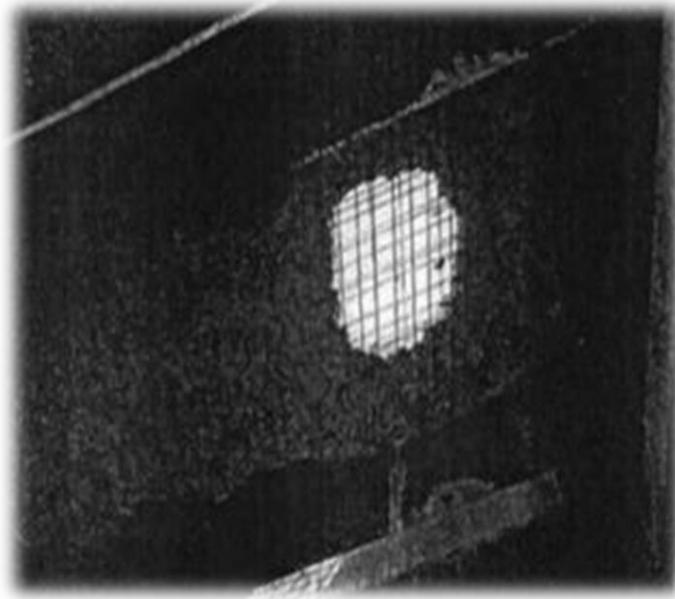


Figure I- 17. Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou (18).

I.7. Conclusion :

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. Différents types de renfort ont été cités dans ce chapitre dans le but d'illustrer leurs propriétés physiques et mécaniques. Malgré que ces fibres coûtent très chères par rapport à la matrice (béton), l'amélioration apportée par ces fibres est très importante. Donc, il sera très intéressant de chercher des fibres moins chères et en même temps efficaces de point de vue amélioration du comportement mécanique du matériau béton, tels que les grilles métalliques et plastiques.

Dans ce chapitre, nous avons défini les différentes pathologies du béton, Tous ces phénomènes affaiblissent les ouvrages et leur font perdre les caractéristiques mécaniques qui avaient été calculées lors de leur conception.

CHAPITRE II : RENFORCEMENT DES STRUCTURES

CHAPITRE II : RENFORCEMENT DES STRUCTURES

II.1. Introduction :

Les dégradations du béton entraînent des faiblesses qui nécessitent un renforcement de la structure pour améliorer les caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent afin d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage et lui conférer une certaine résistance pour mieux répondre aux nouvelles conditions de sollicitations.

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, parmi les méthodes curatives utilisées est le renforcement des structures en béton, Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter.

Les chercheurs ont introduit la notion de confinement du béton. Cette nouvelle technique se réalise à l'aide de matériaux composites à base de fibres de verres, de carbonées, métalliques et autres. Ce mécanisme de confinement affecte considérablement et forte heureusement dans le bon sens le comportement du béton. Dans cette section on présentera un aperçu sur le confinement et le renforcement du béton à l'aide des matériaux composites et les différentes techniques proposées.

II.2. Notions sur le confinement:

Le béton armé est un matériau composite constitué de deux éléments aux caractéristiques différentes: l'acier, travaillant aussi bien en traction qu'en compression en fonction des sollicitations, représenté sur la **Figure II.1** désigné par (A)

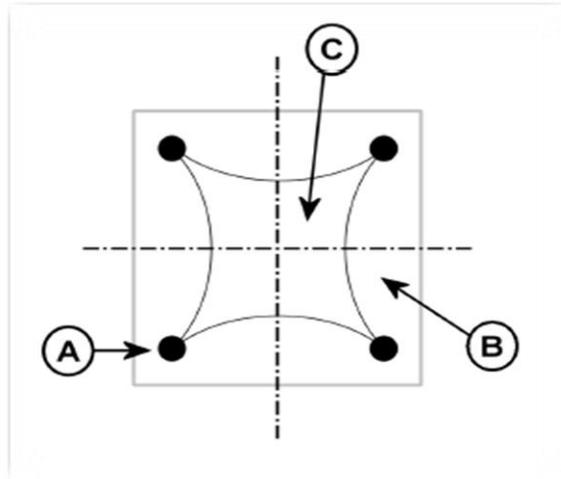


Figure II- 1. Disposition des différents matériaux dans un poteau de section carrée

Le béton, travaillant principalement en compression. Ses performances en traction sont très faibles et souvent considérées comme nulles. En compression, le béton peut se trouver sous «deux états de contraintes différents».

Le premier nommé «non confiné» (matériaux ne se trouvant pas à l'intérieur du volume sujet à l'emprise des armatures : étriers, barres longitudinales, **Figure II.1** désigné par (B), correspondant à un état uni-axial.

Le second nommé «confiné» (matériaux se trouvant dans le volume d'emprise des aciers, **Figure II.1** désigné par (C), correspondant à un état de contrainte triaxiale (20).

Le confinement du béton comprimé peut être réalisé aussi bien par des cadres carrés ou rectangulaires fermés qui produisent une pression latérale aux coins des cadres comme le montre la **Figure II.2.a**, que par des spirales continues très efficaces grâce à la distribution continue des contraintes latérales du confinement le long de la circonférence entière comme le montre la **Figure II.2.b**. En outre, il donne une expansion latérale du béton enclos par les cadres en produisant une déflexion en dehors du côté des cadres où les parties résidants dans la section en forme de flèche seront très larges que les sections entre les cadres, comme le montre la Figure II.2 (21).

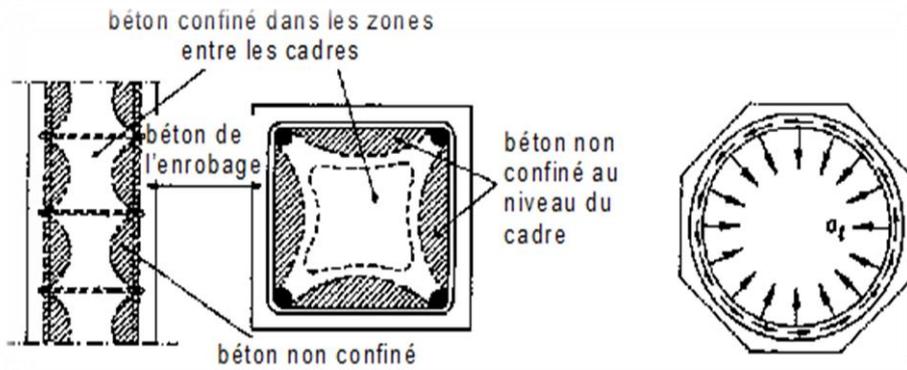


Figure II- 2. Exemple de confinement d'un élément: linéaire a) -cadre carré b)-spirale circulaire (21).

En pratique, l'état des contraintes en compression triaxiale dans les poteaux en béton armé, est équivalent à la résultante d'une pression hydrostatique lorsque les armatures transversales en forme de cadres fermés ou de spirales continues empêchent le gonflement latéral des matériaux de l'élément soumis à une compression axiale. Le béton subissant cette action favorable des armatures transversales est appelé béton confiné (21) (22).

II.3. Etudes antérieures sur le confinement de béton par les matériaux 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'objectif que visent toutes les recherches dans ce domaine est principalement l'amélioration de la capacité et le comportement mécanique en compression des éléments structuraux en béton armé. L'idée est très séduisante et déjà fort ancienne, l'empreinte laissée par le chercheur « Considère » en est une preuve; en 1903 il a suggéré l'utilisation d'un renfort transversal afin de ralentir la déformation latérale, tous les essais triaxiaux sur des cylindres de mortier de dimensions $\varnothing 80 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ démontrent que l'application d'une pression de confinement latérale constante sur des cylindres de mortier pouvait augmenter sensiblement leur résistance à la compression (23). Il proposa alors une relation permettant de prédire la résistance en compression de mortier confiné, relation qui fut plus tard adaptée au béton par (24) la série d'essais, qu'ils ont effectués en utilisant la pression hydraulique pour le confinement des

colonnes de béton circulaire, a confirmé que l'augmentation de la résistance était directement proportionnelle à la force de confinement. On peut citer l'utilisation de tubes en acier (25) (26) de frettes d'acier de différentes formes (27) (26) et autres (28) (29) (30) (24) (31).

Plus tard en 1930 et 1933, *ACI* 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 prévoir le comportement des colonnes de béton confinées. Ces premiers travaux ont inspiré plusieurs autres chercheurs tels que (32), (33) et (34).

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 FRP. Ils ont constaté que les colonnes confinées avec des FRP montrent une augmentation considérable de la résistance à la compression et la ductilité par rapport aux méthodes de confinement conventionnelles.

II.3.1 Les travaux effectués pour étudier le comportement des colonnes de béton confinées :

Fardis et Khalili (1981), 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 (35).

Katsumata et al (1988), 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 (36):

- 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 de 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) (37)**, au béton confiné à l'aide de spirales en FRP, **Ahmed et al (1991)** 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 (38).

En 1997 **Mirmiran et Shahawy**, ont effectué 30 essais de compression uni axiale sur spécimens cylindrique de dimensions ($\varnothing 152,5 \times 305$ 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. Les résistances des tubes de FRP se sont étendues de 524MPa à 641MPa. 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 (39).

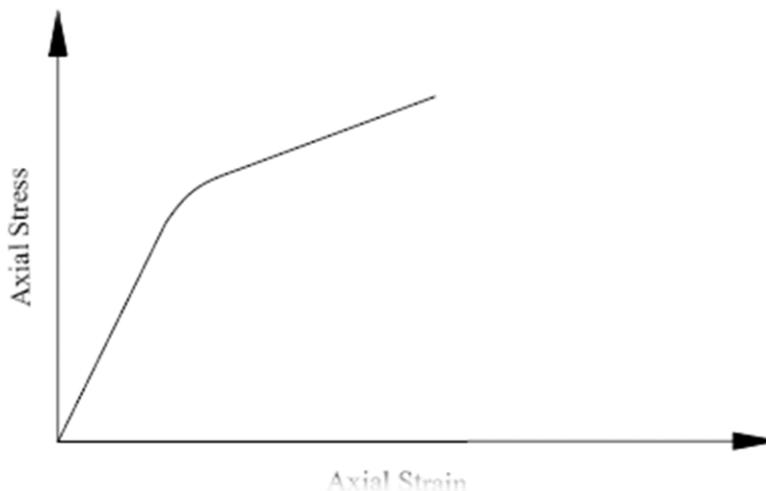


Figure II- 3. Courbe contrainte-déformation du béton confiné par (39).

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 $\varnothing 76 \times 305\text{mm}$ qui inclus 12 spécimens de béton enveloppés par FRP et six spécimens de béton témoin sous la compression uni axiale. 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 (40).

Picher et al. Examinent l'effet de l'orientation des fibres de confinement sur le comportement des cylindres en béton confinés à l'aide de «PRF». Les observations suivantes sont énoncées (41):

- 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.

En 1996, **Bavarian et al** étudient les effets de collage en surface de plaques en «PRF» sur les contraintes et les déformations de cylindres en béton. Les auteurs ont observé que la contrainte et la déformation ultimes ont doublé et triplé pour respectivement 4 épaisseurs de «PRF» en verre de type -S et 4 épaisseurs de Kevlar-29 (42).

Shahawy et al, ont réalisé des essais de compression axiaux Figure II.4, (a) Instrumentation; (b) Mode de rupture des spécimens de béton enveloppés par des fibres de carbone.) sur un total de 45 cylindres de béton confiné par fibres de carbone et 10 cylindre de béton non confiné avec un diamètre de 155mm et une hauteur de 305mm. 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 PRF en verre remplis de béton a montré la bonne concordance avec les résultats d'essai (43).

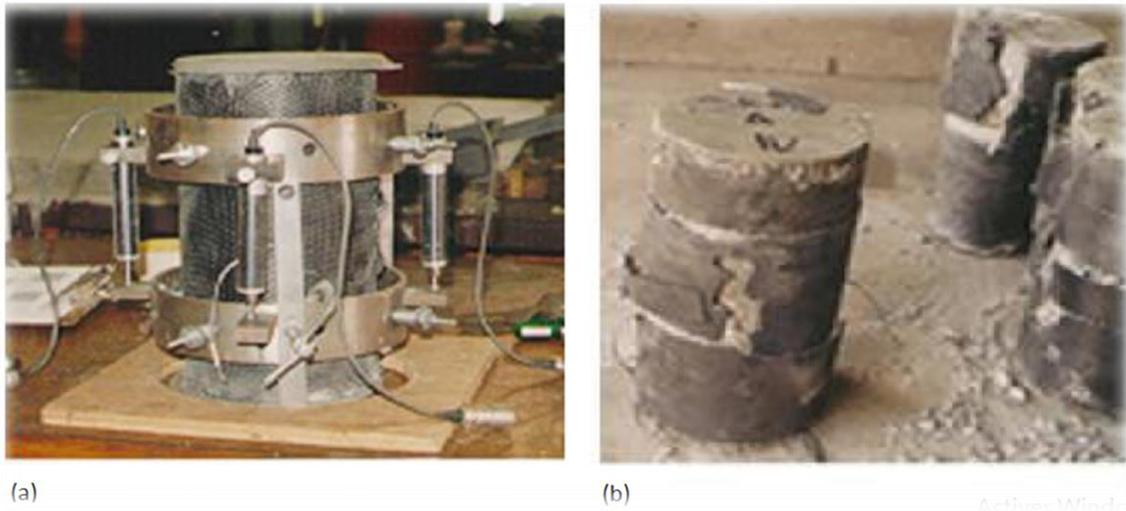


Figure II- 4. (a) Instrumentation (b) Mode de rupture des spécimens de béton enveloppés par des fibres de carbone (43).

Samaan et al. ont proposé un modèle simple pour prévoir l'allure bilinéaire de la courbe contrainte-déformation du béton confiné par PRF dans les directions axiales et latérales. Afin d'examiner le comportement de béton confiné, **Samaan et al.** ont pris en considération la variation volumétrique de béton. La Figure II.5 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. La différence de comportement a été prononcée dans la réponse de taux de dilatation des deux mécanismes de confinement. Réponse volumétrique de béton confiné par FRP, béton confiné par acier et béton non confiné (44).

Le taux de dilatation μ , est défini comme taux de changement des contraintes latérales (radiales) par rapport aux contraintes axiales selon l'équation suivante :

$$\mu = -\frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_c}$$

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

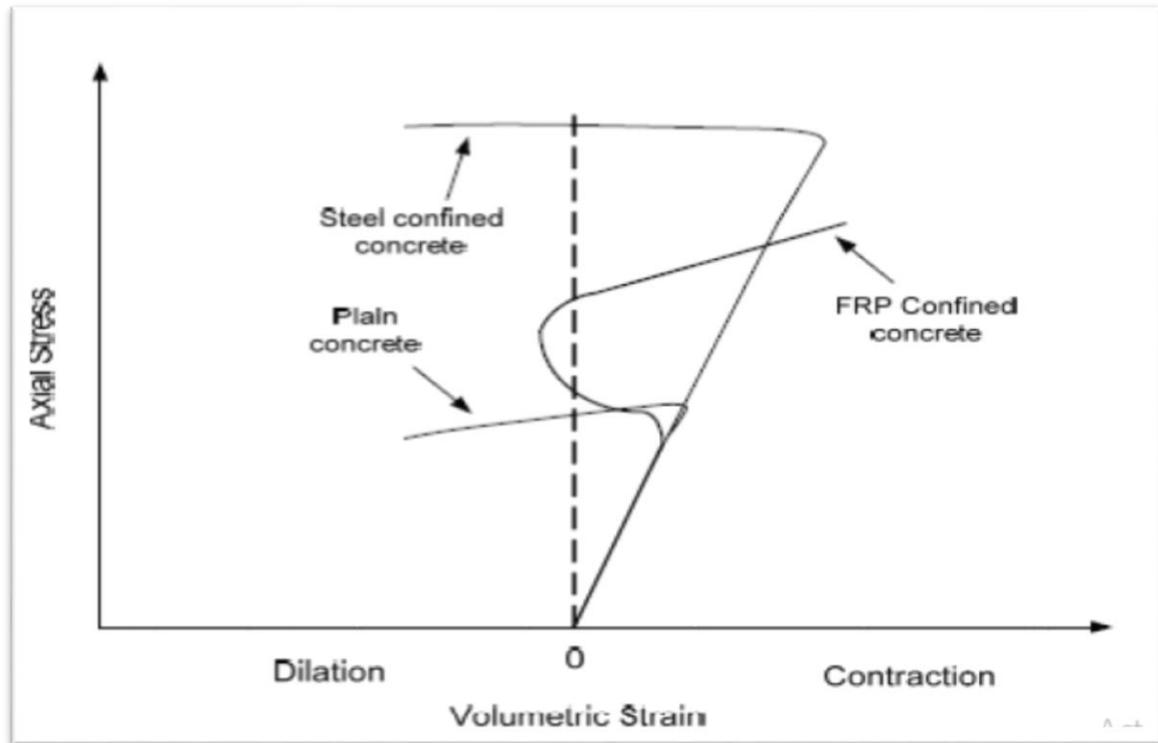


Figure II -5. Réponse volumétrique de béton confiné par FRP, béton confiné par acier et béton non confinement (44).

Kanatharana et Lu étudient le comportement de colonnes composées d'un noyau de béton et d'un enroulement ou d'un tube de «PRF», sous compression uni-axiale. Deux types de tube «PRFF» sont considérés dans cette étude, l'un à base d'enroulement filamenteux de «PRF» et l'autre à base de matériaux composites «PRF» putrides «PRFP». Des augmentations appréciables de la ductilité et de la résistance du béton sont observées dans le cas des spécimens «PRFF» mais pas dans celui des spécimens «PRFP» (45).

Abbasnia et Ziaadiny Ont présenté les résultats d'une série d'essais de compression axiale cyclique sur 10 spécimens prismatiques carrés (152 x 152 x 305 mm) avec un rayon de coins $R = 29$ mm. Les échantillons ont été soumis à divers modes de chargement cyclique pour examiner différents aspects du comportement cyclique du béton confiné avec des matériaux composites «PRF». Les résultats des essais ont montré que la courbe enveloppe de la courbe contrainte-déformation cyclique des spécimens prismatiques carrés en béton confinés avec des matériaux composites «PRF» est approximativement la même que la celle du même béton sous chargement axiale monotone (46).

Lam et Teng présentent des résultats expérimentaux réalisés sur 199 éprouvettes en béton. La résistance à la compression du béton non confiné était comprise entre 18 et 100MPa, les spécimens testés étaient confinés avec des «PRF» de carbone, de verre et d'aramide, dont le mode de rupture observé était par traction. La majorité des éprouvettes cylindriques en béton ont été confinés par stratification manuelle ou par enroulement filamenteuse, cependant il existe aussi un nombre important de tubes en «PRF» remplis avec du béton, la différence principale entre ces éprouvettes est que l'enveloppe en «PRF» est collée au béton avec la résine, ce qui n'est pas le cas des tubes en «PRF» remplis de béton (47).

Chaallal et al(2003), 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 étendue impliquant des essais sur 90 spécimens rectangulaires représentant deux résistances de béton (21MPa 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 (48).

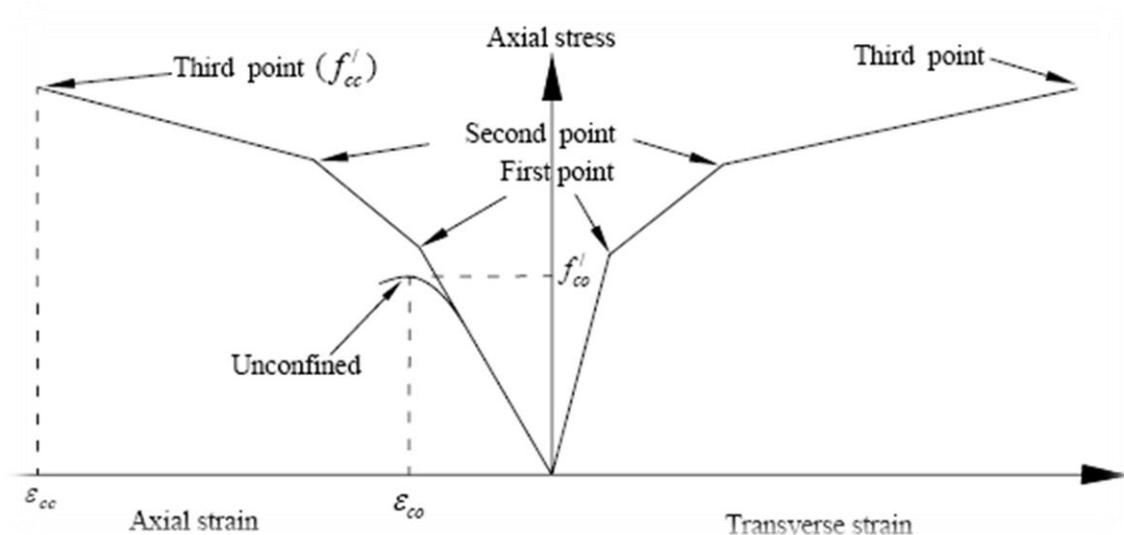


Figure II- 6. Modèle tri-linéaire de contrainte-déformation dans les directions axiales et latérales (48).

II.3.2 Définition du module de confinement et de la contrainte de confinement:

Le module de confinement E_I et la contrainte de confinement f_I , sont considérés comme les deux facteurs principaux affectant la capacité portante des cylindres en béton confinés par FR (49) P. Ils sont donnés par les équations suivantes :

$$E_I = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot f_f$$

$$f_I = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot f_f$$

Avec E le module d'élasticité du PRF, le f_r la résistance à la rupture en traction du PRF et le ρ_f la fraction volumique du PRF au béton, qui peut être déterminé comme suit:

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f}{D}$$

Pour les cylindres entièrement enveloppés (a) ou:

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{D(s_f + b_f)}$$

Pour les cylindres partiellement enveloppés (**Figure II.7**. Différent niveau de confinement) (b), où t_f l'épaisseur du FRP, D est le diamètre du cylindre en bâton; le b_f est la largeur de la bande du PRF, et le S_f est l'espacement vertical entre les bandes.

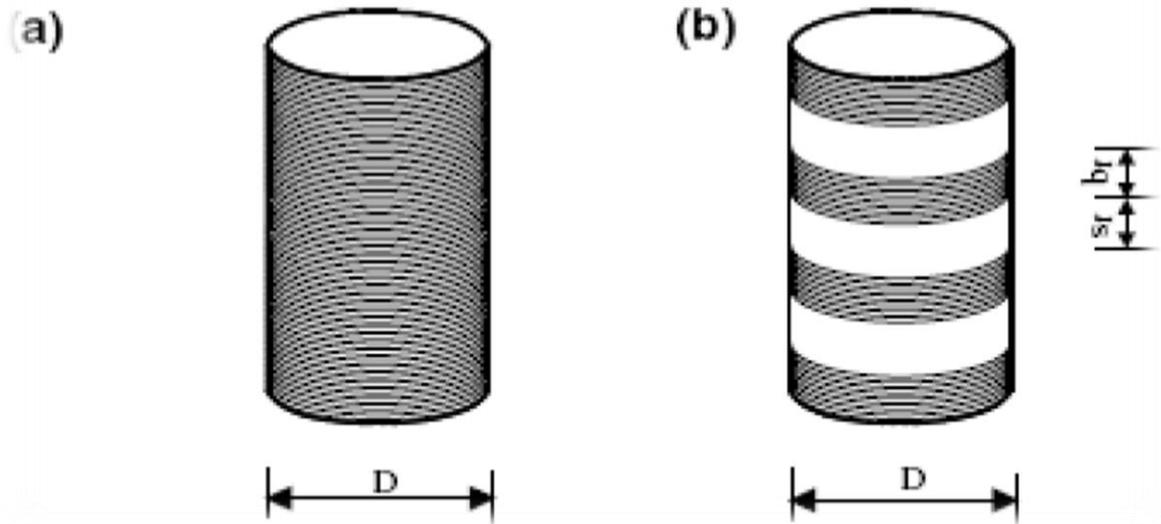


Figure II- 7. Différent niveau de confinement (49).

II.3.3 Comportement du béton confiné:

Dans le souci essentiel de déterminer un renforcement dans les structures de béton pour augmenter la capacité portante, la déformabilité (ductilité) ou pour améliorer le comportement de l'ouvrage à l'état de service (déformation, fissures, vibrations...), des recherches expérimentales ne cessent d'être entreprises par des spécialistes dans ce sens. Le confinement du béton se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone et d'aramide et autres. 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 du béton ainsi que les divers facteurs affectant son comportement sont discutés, les modèles proposés y sont aussi présentés. Ainsi la notion de béton confiné fut introduite dans le monde de génie des constructions interne de fissuration et minimise la propagation de ces fissures, de ce fait on aura une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confine.

La **Figure II.8** 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 $\epsilon_{cc} > \epsilon_{co}$; il augmente aussi de façon considérable le pouvoir absorbant d'énergie

du béton. Ainsi dans des régions séismiques, le renfort est fourni pour confiner le béton et par conséquent pour augmenter la ductilité des colonnes et des poutres Sheikh, S. A., et Uzumeri, S. M., May (50).

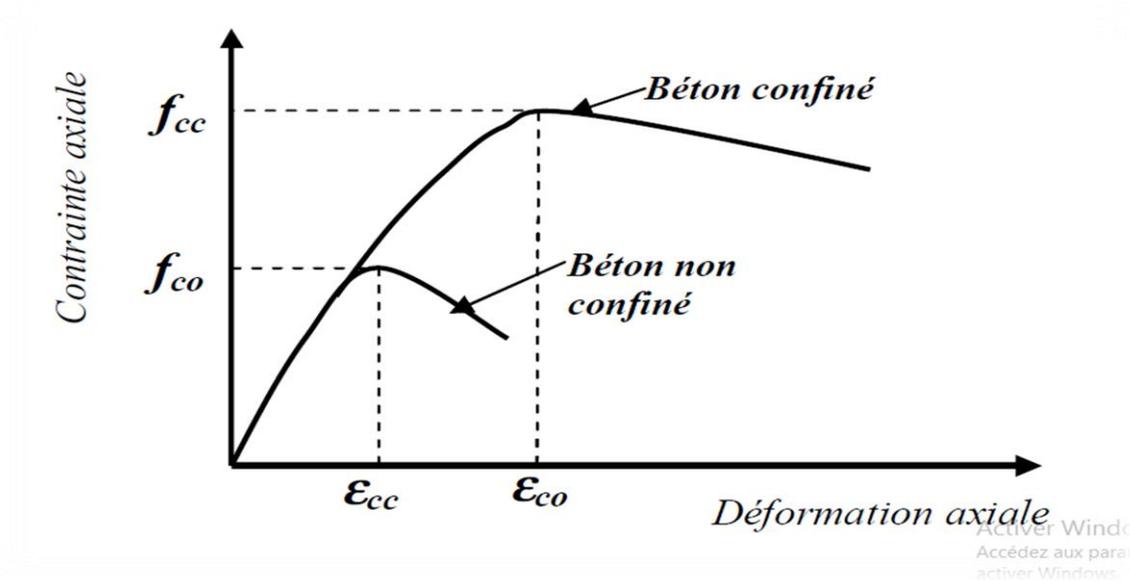


Figure II- 8. Courbes contraintes-déformation d'un béton confiner et non confiner (50).

Elle montre l'effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton (51), 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 atteint. Les pressions de confinement latérales réduisent la tendance pour l'augmentation interne de fissuration et minimisent la propagation de ces fissures, de ce fait on aura une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné.

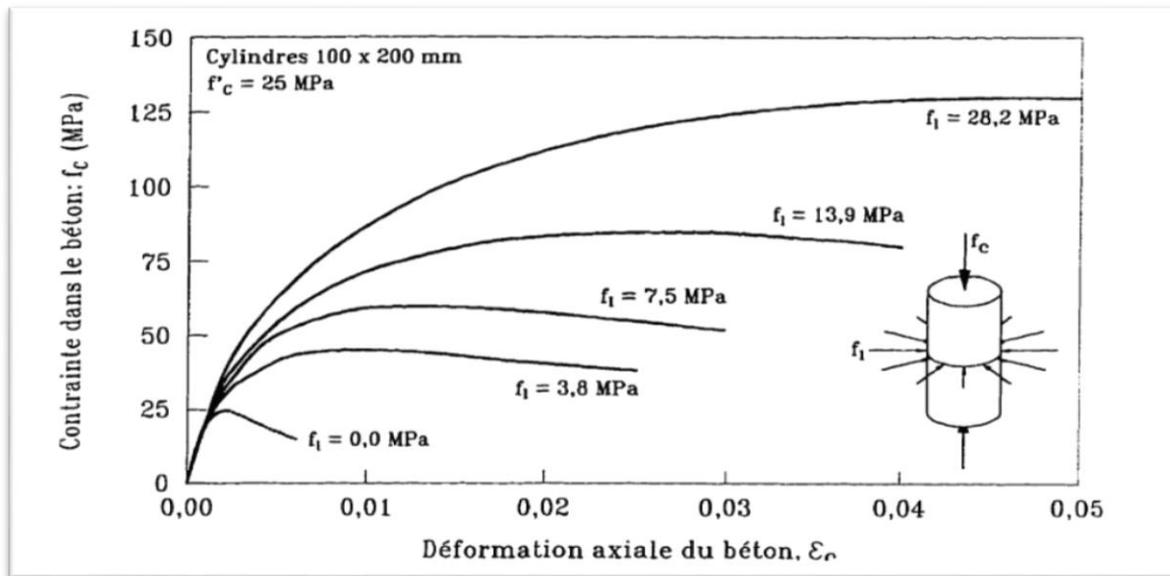


Figure II- 9. Effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton (51).

II.3.4 Courbe contrainte-déformation type du béton confiné:

La courbe contrainte déformation du béton confiné par PRF dépend en grande partie du pourcentage de la surface enveloppée. Pour des niveaux de contraintes faibles, la réponse du béton confiné est semblable à celle du béton non confiné, par contre lorsque la contrainte dépasse la limite de rupture du béton ordinaire, le PRF se trouve mobilisé et la courbe présente un deuxième tronçon linéaire ascendant jusqu'à la rupture du PRF. Ceci traduit le phénomène de confinement. Deux aspects du confinement apparaissent; lorsque le niveau de confinement est faible, les déformations engendrées avoisinent les déformations ordinaires, « **softening strain** » (49), et lorsque le confinement est élevé, nous sommes dans ce cas, en présence de grandes déformations, on parle alors de « **hardening strain** ».

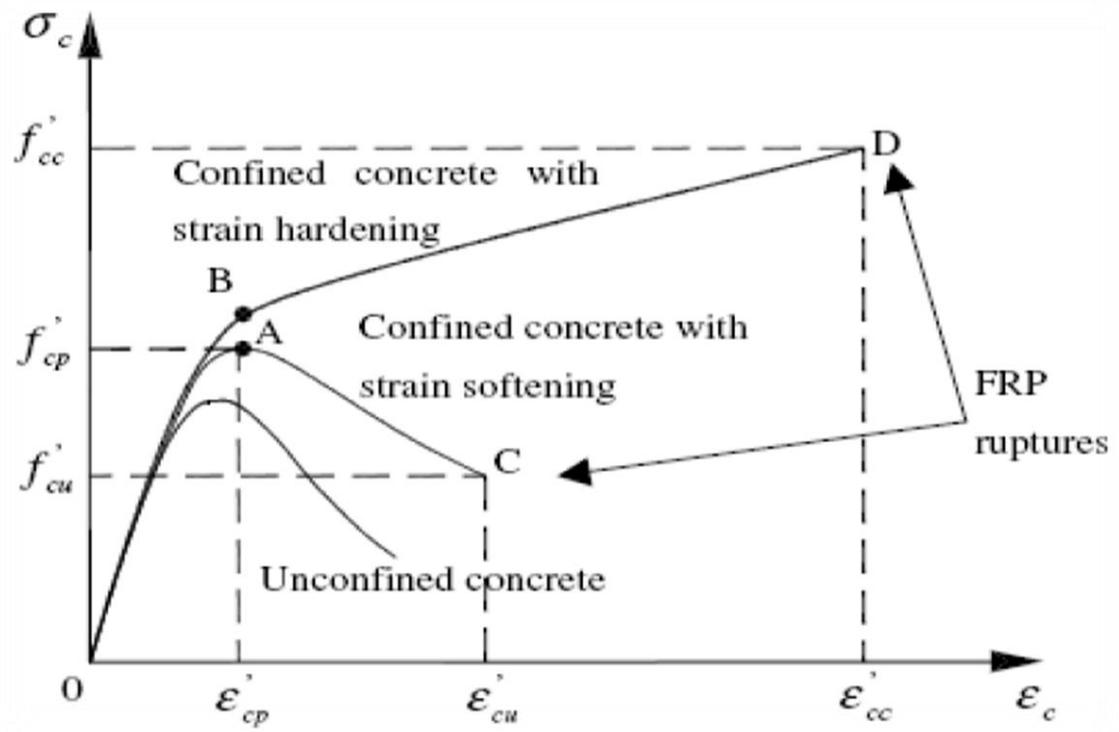


Figure II- 10. Courbe contrainte - déformation d'un béton confiner par PRF (49).

II.3.5. Contrainte ultime et déformation ultime

La rupture du cylindre entièrement confiné, est atteinte lorsque la charge appliquée provoque une contrainte limite donnée par l'équation suivante :

$$f'_{cu} = f'_{co} \left(0.75 + 2.5 \frac{f_I}{f'_{co}} \right)$$

La déformation ultime correspondante à cette contrainte est donnée par l'équation suivante :

$$\epsilon'_{cu} = \epsilon'_{co} \left(1.3 + 6.3 \frac{f_I}{f'_{co}} \right)$$

II.4. Revue littéraire des différents modèles de résistance du béton confiné

L'idée d'augmenter la capacité en compression des colonnes en béton armé (BA) n'est pas nouvelle. Au début du 20eme 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, Considère 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

Plusieurs chercheurs se sont inscrits dans le cadre de recherches expérimentales dans le but de développer cette nouvelle technique, jusqu'à ce jour, ces expériences ont apporté une révélation prometteuse quant à l'efficacité d'utilisation de ce procédé de confinement. Ainsi grâce à la conjugaison des performances mécaniques des composites et celles du béton on a pu constater, de façon très nette, une amélioration significative de la résistance et de la ductilité dans le comportement des structures dans le génie civil. La plupart de ces recherches sur le confinement du béton se sont inspirées du modèle de Macgregor .Ce modèle a été développé pour des cylindres soumis à une pression hydrostatique avec une valeur de $KI=4,1$, ces chercheurs 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 :

$$f_{cc} = + f_{co} + k_1 f_l$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left(1 + K_2 \frac{f_l}{f_{co}} \right)$$

$$k_2 = 5k_1$$

K_1 = Coefficient d'efficacité de confinement.

f_l = Pression latérale de confinement.

F_{cc} et f_{co} sont respectivement la contrainte de béton confiné et la contrainte de béton non confiné au pic.

ϵ_{cc} et ϵ_{co} sont respectivement les déformations axiales qui correspondent à F_{cc} et f_{co}

Richart et al ont montré par la suite que leur modèle est aussi valable pour un béton confiné avec des aciers en spirales continues (confinement passif) (52). **Fardis et Khalili** (35).ont suggéré que le modèle de Richart et al. pourrait être utilisé directement pour le béton confiné avec des matériaux composites «PRF» **Saadatmanesh et al** (53) ont étendu le modèle de Mander et al. au béton confiné avec des matériaux composites «PRF».

Cependant d'autres études ont montré que l'estimation de la résistance à la compression axiale du béton confiné avec des matériaux composites «PRF» avec des modèles établis pour le béton confiné avec de l'acier n'était pas appropriée du fait que ces derniers surestiment la résistance à la compression du béton confiné avec des matériaux composites «PRF»

Plusieurs modèles de résistance proposés par la suite pour le béton confiné avec des matériaux composites «PRF» ont repris l'équation précédente avec la simple modification de la valeur de K_1

Fardis et Khalili (35), ont proposé les équations suivantes pour prévoir la contrainte du béton confine par PRF.

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

$$f_{cc} = f_{co} \left(1 + 3.7 \left(\frac{f_I}{f_{co}} \right)^{0.86} \right)$$

f_{cc} et f_{co} : Résistance de béton confiné et non confiné respectivement.

F_I : Pression latérale de confinement donné par la formule suivante :

$$f_I = \frac{2f_{frp}t_{frp}}{d}$$

Où f_{frp} est la contrainte de traction dans l'enveloppe de PRF, t_{frp} est l'épaisseur de l'enveloppe de PRF et d le diamètre de la section de béton confinée

Saadatmanesh et al (53), conduisent 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 (54)**. Quatre paramètres sont considérés en particulier: la résistance du béton, l'épaisseur de la lamelle en PRF, l'espacement des lamelles et les propriétés du matériau des lamelles. Ils ont utilisé le modèle de Mander et al. pour calculer le gain de la résistance et la ductilité des colonnes de béton extérieurement confinées au moyen de courroies de composé de fibre de haute résistance. La contrainte à la compression maximale du béton confiné f_{cc} et la déformation axiale qui correspondent à cette contrainte ϵ proposé par Mander et al sont données par :

$$f_{cc} = \left[2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{co}}} 1.254 - 2 \frac{f_l}{f_{co}} \right]$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left[\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right] \right]$$

Ou : le 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 précédentes.

Samaan et al (44), ont modifié le modèle de **Richart et al (52)**. Pour qu'il soit adapté au béton confiné avec des matériaux composites «PRF» en proposant une nouvelle valeur au coefficient d'efficacité de confinement KI, l'équation de la résistance à la compression du béton confiné f_{cc} et celle de la déformation ε_{cc} correspondant à la contrainte maximale de béton confiné sont données par :

$$f_{cc} = f_{co} \left(1 + 6 \frac{f_l^{0.7}}{f_{co}} \right)$$

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

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

d: le diamètre du noyau de béton.

Toutanji (55) a proposé l'équation suivante pour calculer la contrainte à la compression maximale (f_{cc}) de béton confiné par PRF :

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

Tandis que la déformation axiale ε_{cc} correspondante à cette résistance est donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + (310.57\varepsilon_{frp} + 1.19) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right]$$

ε_{frp} représente la déformation circonférentielle du béton confiné avec des matériaux composites «PRF» au moment de la rupture.

Le modèle de Saafi et al, est identique à celui de Toutanji, avec la seule différence que les travaux de Saafi et al, ont été réalisés sur des tubes en «PRF» remplis de béton contrairement

à Toutanji qui a étudié des éprouvettes cylindriques en béton confinées avec des matériaux composites «PRF» stratifié manuellement (stratification directe). Des coefficients différents ont été observés entre les deux modèles et cette différence a été attribuée à l'adhérence entre le tissu en «PRF» et le béton. Cette dernière est supposée plus forte en comparaison à celle développée par les tubes en «PRF». La valeur du coefficient d'efficacité de confinement K_i donnée par **Saafi et al.** a changé, par conséquent, l'expression de la résistance à la compression axiale maximale du béton confiné avec des matériaux composites «PRF» est donnée comme suit :

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

Miyauchi et al (56), ont entrepris une étude expérimentale sur des cylindres de béton classiques et de haute résistance confinés par des feuilles de CFRP. D'après 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 al ont proposé les équations suivantes pour déterminer la résistance à la compression et la déformation qui correspond à cette résistance de béton confiné:

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2.98 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right) \right]$$

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

Lam et Teng (47), ont confirmé à partir des résultats expérimentaux que la résistance du béton confiné avec des matériaux composites «PRF» augmente linéairement avec la pression de confinement latérale f_l et estiment que dans la plupart des modèles récents utilisent une complexité supplémentaire inutile pour représenter cette relation .

Les même auteurs ont montré que **Eq** avec un coefficient $K_i = 2, 15$ donne de très bonnes valeurs de f_{cc} . Cependant pour des rapports élevés de confinement ($f_l/f_{co} > 1$), ce modèle surestime légèrement la résistance à la compression du béton confiné avec des matériaux composites «PRF» , Par conséquent, et après avoir modifié le coefficient K_i , l'équation suivante a été proposée par **(35)** . pour les besoins de dimensionnement:

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

II.6. Paramètres affectant le confinement:

Plusieurs modèles de comportement du béton confiné par les armatures transversales ont été proposés. Ces modèles sont déterminés à partir des essais effectués sur des poteaux chargés axialement en compression, plusieurs paramètres impliqués dans la réalisation du confinement donnant des courbes contraintes déformations complètes qui englobent la déformation maximale et les blocs des contraintes du béton confiné à chaque étape. Parmi ces paramètres, on cite (57) :

- a)- Le pourcentage volumique des armatures transversales, frettes et spirales ρ_v
- b)- La limite d'élasticité spécifiée des armatures transversales f_{yh}
- c)- L'espacement entre les cadres (épingles, cerces, étriers) des armatures transversales s_t
- d)- La résistance à la compression du béton f_{c28} .
- e)- La configuration ou la forme des cadres transversaux et les spirales.
- g)- Le nombre et le diamètre des barres des armatures longitudinales ainsi que leurs arrangements.

II.5. Les causes qui conduisent à renforcer les structures :

Les causes qui conduisent à renforcer la structure sont nombreuses, chaque cas doit être considéré comme un cas particulier, qui doit subir un traitement spécifique (58). Les causes les plus fréquentes sont :

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure, exemple : changement d'usage de la structure, augmentation du niveau d'activité, installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels, etc.
- Défauts dans le projet ou dans l'exécution, exemple : une insuffisance de ferrailage, mauvaise disposition des armatures, matériaux de mauvaise qualité, dimensions insuffisantes des éléments structurels.etc.
- Rénovation des structures anciennes.
- Changement de la forme de la structure, exemple : suppression des éléments porteurs, élargissement des portées, ouverture de passages en dalles, etc.
- 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 : limiter les déformations et les flèches, réduire l'intensité des contraintes sur les armatures, diminuer la vitesse de propagation et ouvertures des fissures.

II.7. Méthodes de renforcement des structures en béton armé :

Actuellement, plusieurs méthodes et techniques de réparation ou/et de renforcement sont proposées dans la littérature. Le choix de la technique dépend de plusieurs paramètres, tels que :

- le degré d'endommagement de la structure ou des éléments.
- les matériaux de renforcement.
- Nature et la forme de l'élément, etc.

La solution la mieux adaptée sera alors définie en fonction de la structure à renforcer, de l'espace disponible pour l'exécution des travaux et de l'usage futur de la structure renforcée ou réparée, le cout de l'opération de renforcement (59) (60) (61).

a) Chemisage en béton armé:

Le chemisage en béton armé consiste à augmenter considérablement les sections, par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage (35) (36).

Ces avantages :

- peu coûteux - ne nécessite pas de main - d'œuvre hautement qualifiée.

Ces inconvénients :

- augmentation de la section (et de l'encombrement) et du poids de la structure
- corrosion et autres pathologies du béton armé - nécessité de coffrages ; travaux assez longs

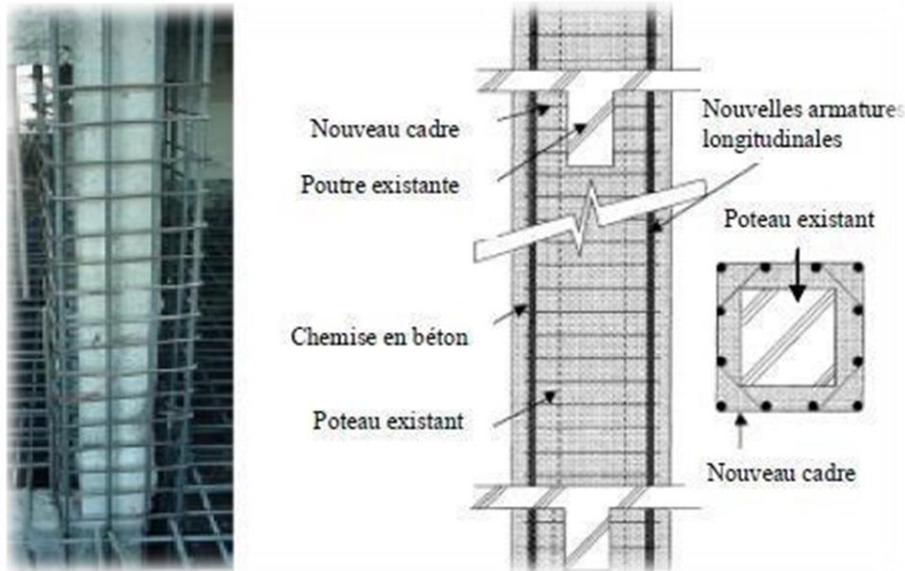


Figure II- 11. Chemisage en béton armée

b) Chemises en acier:

Le renforcement des poteaux de sections circulaires ou rectangulaires avec des chemises en acier permet d'améliorer considérablement la résistance sismique des poteaux ainsi que leur ductilité. Toutefois, cette technique est onéreuse et exige une main-d'œuvre qualifiée. Les chemises en acier pourraient éventuellement être utilisées dans les installations industrielles possédant un nombre restreint de poteaux nécessitant un renforcement, vu le coût élevé de l'acier. Cependant, dans le cas des bâtiments à usage d'habitation où plusieurs poteaux doivent être renforcés, cette technique s'avère trop onéreuse (58).

Ces avantages :

-faible augmentation des sections - assez rapide à mettre en œuvre.

Ces inconvénients :

-coût élevé -nécessité d'une main d'œuvre grande qualifiée -sensibilité à la corrosion ;entretien régulier nécessaire.

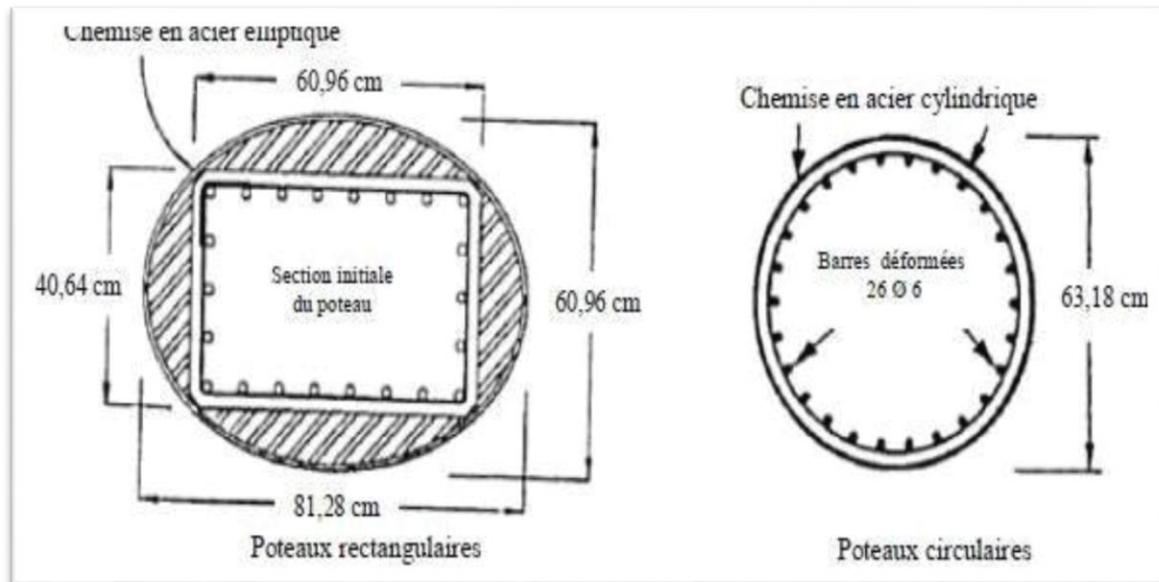


Figure II- 12. Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier

II.8. Mise en œuvre des renforts composites:

Bien que l'installation du système de renforcement avec des matériaux composites varie d'un fabricant ou d'un installateur à l'autre, le processus passe généralement par les étapes suivantes (61) (62):

- 1) Inspecter la surface de l'élément de structure à renforcer.
- 2) Réparer les fissures et les surfaces effritées avec une injection d'époxy et de mortier à base de résine époxy.
- 3) Préparer la surface de l'élément de structure (avec des meules et du sablage humide au besoin) en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat.
- 4) Appliquer une couche d'apprêt puis du mastic de vitrier afin d'assurer l'adhérence des tissus de fibres.
- 5) Appliquer une première couche d'agent d'imprégnation.
- 6) Appliquer les tissus de fibres sur la surface, comme s'il s'agissait de papier peint.
- 7) Appliquer une deuxième couche d'agent d'imprégnation, une fois que les tissus auront bien durci, généralement au bout d'une heure.
- 8) Répéter les étapes 6 et 7, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées.

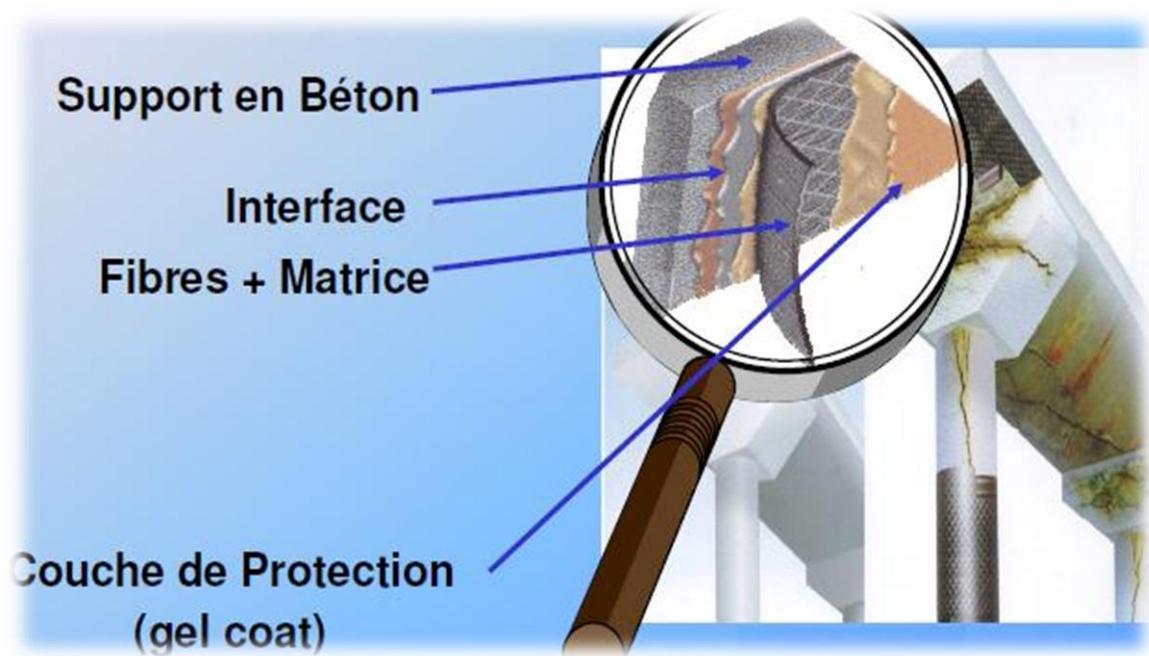


Figure II- 13. Conception du système multicouche

II.9. Avantages du confinement:

Les armatures transversales dans les poutres et les poteaux ont trois fonctions principales :

- Empêchent le flambement des barres longitudinales et évitent l'échec de cisaillement.
- Confinent le noyau de béton pour fournir suffisamment de ductilité et de déformabilité. En outre, le confinement latéral offre deux avantages principaux pour les éléments structuraux fléchis en béton armé à savoir.
- L'augmentation de la résistance à la compression du béton, où le confinement s'oppose à la chute possible du béton causée par le gonflement ou le soulèvement du béton.
- L'amélioration de la pente de la branche descendante de la courbe contrainte déformation du béton (σ - ϵ). En effet, le confinement augmente la déformation maximale du béton ϵ_{cu} .

II.10. Conclusion:

Dans ce chapitre on a présenté l'apport que confère le confinement au béton et son influence sur le comportement mécanique.

Nous avons vu qu'en général, le souci essentiel de déterminer un renforcement dans les structures de béton est pour augmenter la capacité portante, la déformabilité (ductilité) ou

pour améliorer le comportement de l'ouvrage à l'état de service (déformation, fissures, vibrations...), des recherches expérimentales ne cessent d'être entreprises par des spécialistes dans ce sens. Le confinement du béton se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone et d'aramide et autres. Les différents composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné. Parmi les endommagements que peuvent engendrer le manque du confinement, on cite :

- Rupture de poteaux courts
- Eclatement des armatures transversales
- Rupture des armatures longitudinales
- Endommagement par écrasement du béton
- Rupture par cisaillement des poteaux
- Endommagement due à la différence d'hauteur
- Endommagement par rupture d'ancrage des cadres
- Rotule plastique aux nœuds poteau-poutre
- Dommages aux poteaux dus à un excès de résistance.

CHAPITRE III :
MATERIAUX ET METHODES
EXPERIMENTALES

CHAPITRE III : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

III.1. Introduction :

Le programme expérimental de la présente étude porte sur l'analyse expérimentale de cette technique de confinement sur des colonnes de section circulaire et traitée, en particulier le comportement axial résultant de l'effet du confinement procuré par l'intégration dans la matrice cimentaire des grilles métallique (**GM**) avec différentes section de mailles et différents diamètre de confinement. Une modélisation statique des paramètres issus de l'analyse de comportement des éprouvettes 15*30 cm est effectuée, sur la base deux facteurs :

- Section de la maille de la grille métallique
- Diamètre de confinement.

Dans la première partie du chapitre, on présente les caractéristiques des matériaux utilisés, les caractéristiques des colonnes testées, les principales étapes de leur fabrication ainsi que la méthode statique utilisée suivi par la nouvelle technique proposé de confinement. Dans la deuxième partie, on présente les procédures des essais, notamment la méthode des plans d'expérience utilisée.

III.2. Matériaux utilises:

III.2.1. Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique (qui durcit sous l'action de l'eau), utilisé dans la préparation du béton, et aujourd'hui le plus souvent employé dans la confection des dallages.

Le ciment utilisé pour la préparation de différentes compositions est un ciment portland artificiel (**CEM II/B de classe 42,5**). Ce ciment de couler grise est obtenu en mélangeant le clinker avec une proportion du gypse. La composition chimique et les propriétés physico-mécaniques du ciment sont présentées dans les tableaux III.1 et III.2 suivant :

Tableau-III .1. composition chimique du ciment.

Element	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	NaO	P ₂ O ₅	PAF
%	20.14	63.47	2.12	3.71	4.74	2.67	0.47	0.21	0.69	0.06	1.72

Tableau-III. 2. Propriétés physico-mécanique du ciment.

Paramètre	Valeur
Consistance normale de la pate	27
Début de prise (minute)	170
Fin de prise (minute)	255
Densité spécifique	3.1
Finesse (cm ² /g)	3300

III.2.1.1. Essais prise de ciment : (63)

Le but de l'essai est de déterminer le temps de prise, c'est à dire la durée qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise.

Principe d'essai : On détermine le début de prise à l'aide de l'aiguille de Vicat s'enfonçant dans le moule tronconique rempli de mortier normal ou de pâte de consistance normale. Quand, sous l'effet d'une charge de 500 g l'aiguille s'arrête à une distance " **d** " du fond de moule telle que $D > 2.5 \text{ mm}$

On dit que le début de prise est atteint. Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de **0.5 mm**.

Équipements : Appareil de VICAT, Chronomètre, Balance de précision 1 à 2 g

Matières consommables : Ciment à étudier, Sable normal, Adjuvants éventuellement.

Mode d'opérateur :

- 1 - Nous avons préparé une pâte normale ou un mortier normal. Le temps t_0 est celui où l'eau a fini d'être ajoutée au ciment dans la cuve du malaxeur.
- 2 - Nous avons Remplir immédiatement le moule tronconique et araser la surface au moyen de la truelle.
- 3 - Nous avons Immergé immédiatement le moule dans l'eau.
- 4 - Nous avons Sortir le moule de l'eau pour procéder à une mesure. Et nous Aménons l'aiguille en contact avec la surface de la pâte. Nous Relâchons l'aiguille sans vitesse initiale lorsque elle est immobilisée (ou après 30 secondes d'attente). Nous relevons la distance " d " séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.
- 5 - Nous avons Recommencé l'opération à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à constatation du début de prise (intervalle de temps mesuré à 5 min près). Entrer deux mesures, nous avons remettre le moule dans l'eau.
- 6 - Suivre l'évolution jusqu'à constatation de la fin de prise.



Figure III- 1. Essais de prise de ciment

III.2.1.2. Essai de la consistance : (64)

Le but de l'essai déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte normale. Principe d'essai consiste à évaluer la consistance en mesurant l'enfoncement, dans la pâte, d'une sonde sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance ainsi évaluée est appelée " **consistance Vicat** ".

Équipements : - 1 - Appareil de VICAT avec sonde, Malaxeur, Balance de précision 1 à 2 g



Figure III- 2. Essai de la consistance

Mode opératoire :

La salle de préparation d'essai doit être maintenue à une température de 20 ± 2 °C et humidité relative minimale 50%

- 1 - On a Pesé 500 g * 1 g de ciment et l'introduire dans la cuve du malaxeur.
- 2 - Nous ajoutons une quantité d'eau (on commence par exemple par un rapport de masse eau / ciment : $E/C = 0.25$), effectué l'opération en 10 sec maximum
- 3 - Nous mettons le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 secondes et après, arrêtons le malaxeur pendant 30 secondes. Pendant ces 30 secondes en lever le moyen d'une raclette en toute la pâte adhérant aux parois et au fond du cuve et placer cette pate au milieu, remettre le malaxeur à vitesse rapide pendant 90 seconde.
- 4 - Avec la pâte ainsi préparée, nous avons rempli immédiatement le moule tronconique et araser la surface au moyen d'une truelle prenant appui sur le bord du moule.
- 5 - Nous avons mettre le moule dans l'appareil de Vicat et réglons le niveau zéro lorsque la sonde est au contact du bord du moule.
- 6 - Nous avons centré le moule dans l'axe de la sonde et la laisser descendre sans vitesse initiale.
- 7 - Nous lis la distance " d " donnant l'épaisseur de la pâte entre le fond du moule et l'extrémité de la sonde.

III.2.2. Sable :

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Le sable utilisé de la ville de Laghouat.

III.2.2.1. Module de finesse : (65)

Le module de finesse d'un sable «MF»

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.25, 5\}$$

$1.8 \leq MF \leq 2.2$ le sable est à majorité des grains fins.

$2.2 \leq MF \leq 2.8$ sable préférentiel.

$2.8 \leq MF \leq 3.3$ sable un peu grossier.

Le résultat: $Mf=2.26$ Sable préférentiel.

III.2.2.2. Equivalente de sable : (66)

L'essai d'équivalent de sable utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons l'est aussi pour les sols, mais son importance est moindre, Cet essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossier. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui .

La hauteur totale donne représente la proportion de sable brut dans le sable. Cette proportion exprimée en pourcentage est appelé (ES) : Equivalent de Sable

Équipements :

- 1/ Eprouvettes en Plexiglas avec deux traits repères et leurs bouchons.
- 2/ Entonnoir pour introduire le sable.
- 3/ Bonbonne de solution lavant avec son bouchon, le siphon et le tube souple.
- 4/ Tube laveur métallique plongeant.

5/ Machine agitatrice.

6/ Réglet métallique pour la mesure des hauteurs des sables et floculats.

7/ Piston taré à masse de 1 kg pour la mesure de l'ES.



Figure III- 3. Essai de l'équivalent de sable.

Mode Opérateur:

1/ Nous Remplirons les 2 éprouvettes de solution lavant jusqu'au 1er repère, ensuite nous versons la quantité de sable tarée.

2/ Nous avons Eliminer les bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main et laisser reposer 10 minutes.

3/ Nous bouchons les éprouvettes et les agiter d'un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude à l'aide d'une machine à secouer (en 30 secondes).

4/ Nous lavons et remplirons les éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon, lavant les parois intérieures de toutes les éprouvettes et laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface.

5/ On a fermé le robinet lorsque la solution atteint le 2eme trait (supérieur) et on sort le tube laveur.

6/ On a laissé reposer 20 minutes en évitant toute vibration

7/ On a mesuré à vue les hauteurs h_1 et h_2 (h_2 est entachée d'incertitude). Pour effectuer la mesure de façon plus précise, on introduit le piston taré à travers le floculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette et on l'immobilise au contact du sable

8/ Et enfin, nous mesurons h2.

III.2.3. Gravier :

Le gravier provient de station de concassage de METLILI on travaille sur deux classes de gravier de 3/8, 8/15.

III.2.3.1. L'essai d'analyse granulométrique : (67)

L'analyse granulométrique permet de déterminer des grains suivant leur dimension. Principe d'essai L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages obtenus sont exploités sous forme graphique.



Figure III- 4 Equipements de l'analyse granulométrique.

Mode opératoire :

Le tamisage peut être effectué soit manuellement soit à l'aide d'un vibro-tamis

1/ On à peser l'échantillon.

2/ On a tamisé l'échantillon en versant ce dernier au sommet d'une série de tamis et en les agitant.

3/ Nous Recueillons le refus de chaque tamis et le peser dans une balance de portée pesant au gramme près.

4/ Rapporter les poids des différents refus aux poids initiaux du matériau.

5/ Nous Calculons le parentage des tamisât.

6/ Établirent la courbe granulométrique.

Le Calcul: On note les masses des refus partiels (R_i), on calcule les pourcentages des refus partiels donné par la relation suivante

$$\text{refus } (i)\% = \frac{R_i}{M} \times 100 \text{ Avec } M \text{ la masse totale de l'échantillon}$$

On trace la courbe granulométrique après le calcul du pourcentage des tamisât partiels par la formule suivant: $\text{Tamisas } (i)\% = 100 - \text{refus } (i)\%$

III.2.3.2. Essai de coefficient d'aplatissement des granulats : (68)

La présente a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination du coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 50 mm.

L'essai consiste à effectuer un double tamisage :

Tamisage sur tamis à mailles carrées, pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/D (avec $D = 1,25 d$), suivant leur grosseur G .

Puis tamisage des différentes classes granulaires d/D , sur des grilles à fentes parallèles d'écartement : $D/1,58$

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d'écartement $d/1,58$, exprimé en pourcentage.

Le coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/D composant l'échantillon.

La forme d'un élément est définie par trois dimensions principales :

Longueur L = le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles.

Épaisseur E = le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles

Grosseur G = dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément

Le coefficient d'aplatissement A d'un lot de granulats soumis à l'essai est, par définition, le pourcentage des éléments tels que : $G/E > 1,58$

Équipements:

1/ Une série de tamis normalisés à mailles carrées

2/ Une série de grilles à fentes de largeurs normalisé



Figure III- 5. Un série de grilles.

Mode opératoire:

1/ on a Pesé un échantillon de masse $M \geq 0.2 D$, D étant le diamètre maximum des granulats en millimètres, et M la masse de l'échantillon exprimée en kg.

2/ On a Tamisé l'échantillon sur un tamis de 4 mm d'ouverture et le refus de masse M_0 est utilisé pour la détermination de A

3/ Nous avons effectué le tamisage et chaque fraction d/D est pesée, puis tamisée sur le tamis à fentes d'écartement E correspondant. Après on a Pesé le passant à travers chaque grille

4/ Nous Calculons le coefficient d'aplatissement.

Pour une classe granulaire d/D donnée on peut définir un coefficient d'aplatissement

partiel; $A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} \times 100$ avec M_{ei} =Masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement E .

M_{gi} = Masse de la classe granulaire d/D .

Le coefficient d'aplatissement global A s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire :

$$A = \frac{\sum Me_i}{M} \times 100$$

III.2.3.3. L'essai des masses volumiques : (absolue et apparente)

a) La masse volumique absolue:

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains:

$$\rho_s = M_s / V_s$$

M_s = La masse des grains solides V_s = Le volume des grains solides



Figure III- 6. L'essai de masse volumique.

b) La masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. Il faut donc préciser : masse volumique apparente à l'état compacté ou masse volumique apparente à l'état non compacté. La masse volumique apparente est donnée par:

$$\rho_a = M_t / V_t$$

L'essai est répété 4 fois pour un volume de 5 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

Avec M_t = La masse totale d'échantillon et V_t = Le volume total d'échantillon

III.2.3.4. Essais de la propreté de gravier : (69)

Contrairement aux sables, les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières, ainsi le principe de séparation des agrégats des éléments fins ne se fera pas par sédimentation mais par lavage.

Équipements :

- 1/ Tamis de 0,5 mm et un seau de d'eau
- 2/ Tamis de décharge
- 3/ Balance avec une précision relative de 0,1 %



Figure III- 7. L'essai de la propreté

- 4/ Etuve ventilée réglée à 105 °C

Mode opératoire :

- 1/ On a posé un kg de gravier soit M_0 et placer dans le tamis
- 2/ On a Lave l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis soit claire
- 3/ Nous essayons l'excès en eau à l'aide d'un chiffon et peser la nouvelle masse, soit M_1
- 4/ Après, nous calculons la propreté de gravier par la formule suivante:

$$P(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100$$

III.2.4. Les résultats obtenus de sable et granulats :

Deux granulats sont utilisés un sable et un gravillon. Le sable utilisé est de type alluvionnaire, disponible dans la wilaya de Laghouat. D'après les résultats de l'analyse granulométrique des granulats (Figure III- 8 courbe granulométrique des granulats) ce sable présente une granulométrie continue qu'est recommandé pour la production des bétons de bonnes qualités.

Le gravier utilisé provient de la municipalité de Ghardaïa de Metlili, le gravillon entrant dans la composition de différents mélanges de BAP est un gravillon concassé d'origine, utilisée de classe du gravillon : 3/8 et 8/15.

Tableau-III .3.Propriétés physiques des granulats

Granulat	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Coefficient d'absorption %	0.59	1.56	2.26
Masse volumique absolue	2600	2690	2670
Masse volumique apparente	1540	1370	1270
Teneur en eau %	0.03	0.17	0.13
Equivalent du sable	80.61	/	/
Dureté de gravier %	/	25.5	25

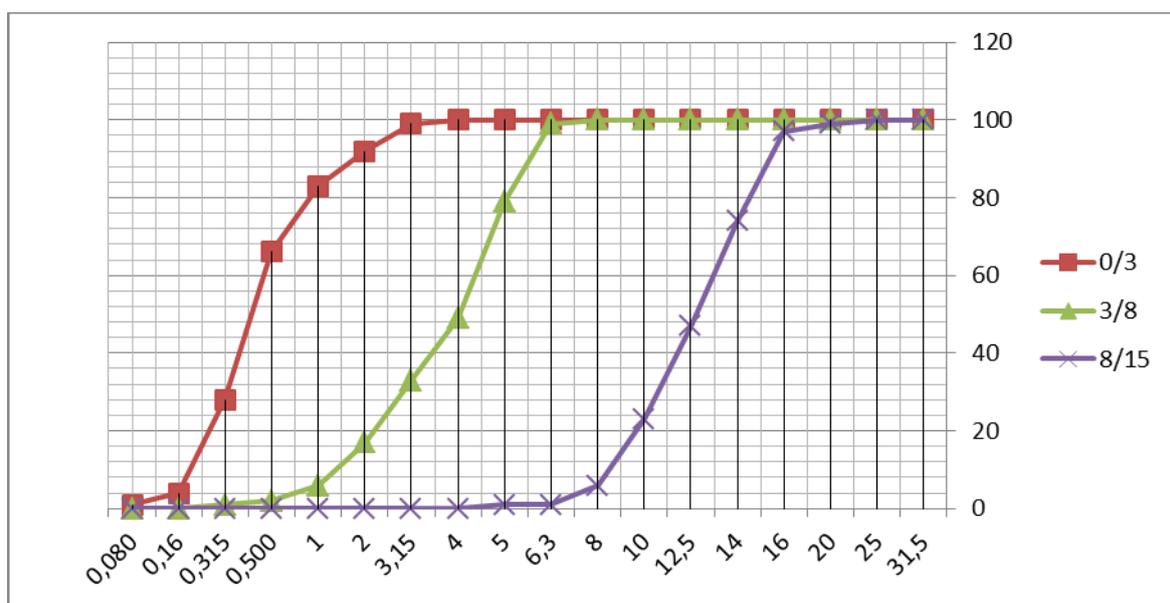


Figure III- 8. courbe d'analyse granulometrique

III.2.5. L'eau :

D'après la norme (70), il joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement

La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité les résistances mécaniques

III.2.6. Les adjuvants:

sont des produits chimiques ajoutés au matériaux cimentaires tel que les coulis, les mortiers de ciment et les bétons de ciment pour modifier leurs caractéristiques. Les ajouts de ces adjuvants, réalisés lors du malaxage, sont le plus souvent inférieurs à 5 % en masse de ciment.

L'adjuvant utilisé dans ce béton (BAP) les caractéristiques de l'adjuvant (**SIKAPLAST BV 40+**): Résistance mécaniques à court et à long terme. Bétons à hautes performances. Bétons précontraints. Bétons préfabriqués étuvés.



Figure III- 9. Adjuvant SIKAPLAST BV 40+

III.2.7. Grilles métalliques:

Dans cette étude les GM utilisées sont de forme losange ces grilles présentent des mailles de dimension minimale de 30 mm, ce qui concorde bien avec la granulométrie des granulats du béton (3/8 et 8/15) donc elles n'influencent pas l'homogénéisation du béton, les différentes variantes des grilles sont présentées.

III.3. Méthodes expérimentales :

III.3.1. Présentation de technique de confinement par Grille Métallique :

La nouvelle technique proposée dans ce travail, consiste à intégrer circonférentiellement, le long du contour, dans la matrice béton, des grilles (GM) alvéolées. Dans les études antérieures, il a été trouvé que l'intégration des GM dans la matrice béton permet de confiner le béton, ce qui lui confère une plus grande réserve de résistance et de ductilité. Généralement les GM vont jouer deux principaux rôles, le premier consiste à confiner le béton, ce qui lui confère une plus grande réserve de résistance, et le deuxième consiste à éviter lors de l'écrasement les débris de béton, qui restent emprisonnés à l'intérieur des grilles ce qui permettra de prolonger le temps pour une destruction totale de l'élément.

La technique proposée assure la continuité de béton dans la structure, puisque les grilles utilisées présentent des mailles de dimension qui concordent bien avec la granulométrie du béton, ce qui évite le problème de la rupture d'interface et facilite le processus de réalisation en évitant le procédé de la jointure et du surfaçage. Dans notre travail on veut illustrer les effets de la section des GM (maille) et le diamètre de confinement sur le comportement du béton confiné (Figure III-10 exemple de confinement proposé (Intégration des grilles dans les matrice de béton)).



Figure III- 10. Exemple de confinement proposé (intégration des grilles dans matrice de béton) et schéma explicatif.

III.3.2. Formulation de la composition du Béton:

III.3.2.1. Méthode de Dreux-Gorisse :

Le choix de la méthode de formulation s'est fait en fonction des critères suivants:

- Une méthode assez simple et facile à utiliser.
- C'est une méthode appliquée au niveau des laboratoires de l'est algérien comme ceux du C.T.C. Est, le L.T.P. Est et autres laboratoires privés.

Pour pouvoir comparer les résultats à ceux des autres organismes de contrôle.

a- Détermination du dosage en ciment:

On évalue d'abord le rapport E/C en fonction de la résistance désirée sur la base de

La formule: $\sigma'_{28} = G' \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$

Avec: σ'_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E = Dosage en eau totale sur matériau sec en litre par m³ de béton

G' = Coefficient granulaire (Tab.4) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Tableau-III. 4. Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale. des granulats D_{max}

Qualité des granulats	Dimension D_{max} des granulats		
	Fins $D_{max} < 12,5 \text{ mm}$	Moyens $20 < D_{max} < 31,5$	Gros $D_{max} > 50 \text{ mm}$
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Connaissant le rapport C/E la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d'après l'abaque (Figure III-11)

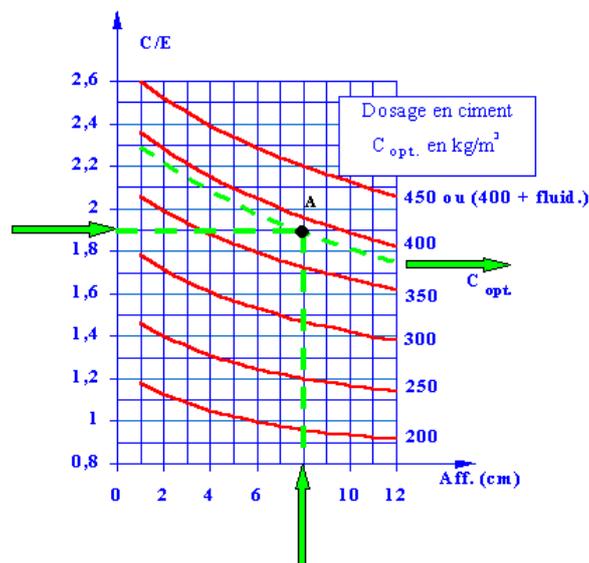


Figure III- 11. Dosage de ciment

b- Détermination du dosage en eau :

Connaissant C/E et le dosage en ciment (C) on détermine le dosage en eau total à prévoir par la formule :

$$E = \frac{C}{E/C}$$

c- Détermination du dosage en granulat:

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, (Figure III-12) ci dessous courbe OAB. La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définie comme suit :

En abscisse :

$$\text{Si } D_{\max} \leq 20 \text{ mm} \quad X = D_{\max} / 2$$

$$\text{Si } D_{\max} > 20 \text{ mm} \quad \text{Module}(X) = (\text{Module}(D_{\max}) + 38) / 2$$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{1.25(D_{\max})} + K$$

Y est donné en pourcentage de passants cumulés

K: est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (sur tout le sable, dont l'influence est prépondérante)

et également du module de finesse du sable qui est donné par le (Tableau III-5).

Tableau-III. 5. Valeur du terme correcteur K

Vibration	Faible		Normale		Puissante		
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	
Forme des granulats (du sable en particulier)							
Dosage en	400 + Fluid	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2

Ciment	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre Chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g_1, g_2, g_3 par exemple. Si c 'est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est:

$$c = \frac{C}{\rho_c}$$

ρ_c : C'est la masse spécifique pour les grains du ciment Le volume absolu de l'ensemble des granulats est:

$$V = 1000\gamma - C$$

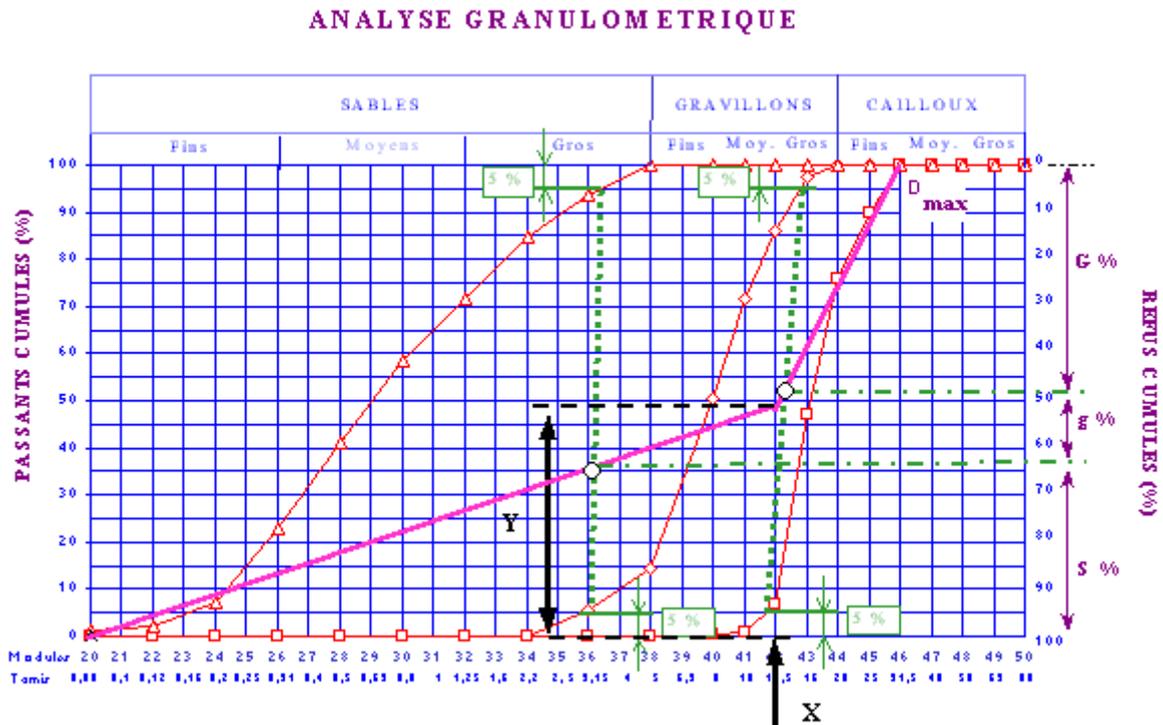


Figure III- 12. Courbe granulométrique.

La formulation de la composition du BAP a été faite d'après la méthode AFGC (association française de génie civil) basée sur l'optimisation de volume de pâte et du rapport gravier/sable, D'après le calcul, la composition finale de béton obtenue est représentée dans le tableau suivant :

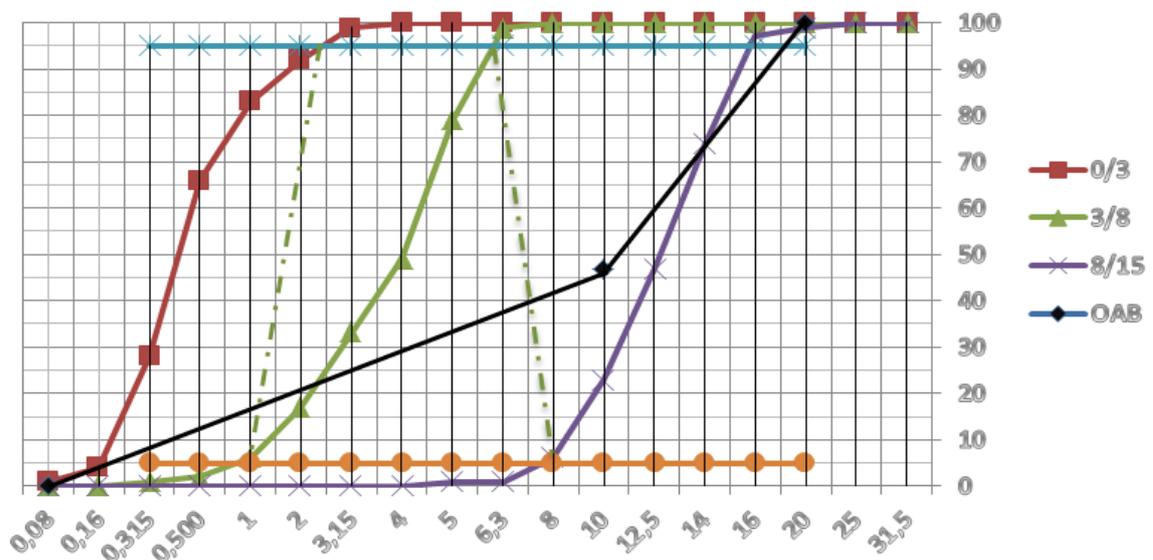


Figure III- 13. Courbe référence Dreux Gorisse

Tableau-III. 6. Composition du béton Solon la formulation Dreux Gorisse

Composition	Poids kg
Ciment	25.08
Sable	54.054
Eau	13.002
Gravier 3/8	19.647
Gravier 8/15	36.487
Adjuvant	0.4263

III.3.2.2. Malaxage et mise en œuvre du béton :

Le malaxage de béton est réalisé avec un malaxeur à axe vertical, constitué de cuve et de palettes centrales tournantes, sa capacité est de 80 litres. Ce type de malaxage est très efficace et fournit dans la plupart des cas un béton très homogène.



Figure III- 14. Les étapes de confection d'un béton

III.3.3. Préparation des éprouvettes de béton:

Après la préparation du BAP, dont les caractéristiques sont décrit ci-dessus, les moules cylindriques sont remplies de la manière suivants:

Les GM ont été soigneusement disposées à l'intérieure des moules cylindriques, de dimension standard un diamètre de 150 mm avec une hauteur de 300 mm. Le remplissage a été effectué en versant le BAP dans le moule.

Tableau-III .7. Variet de confinement

Code	Diamètre(Cm)	Section(Cm ²)
A1	6	2.25
A2	6	9
A3	6	20.25
B1	9	2.25
B2	9	9
B3	9	20.25
C1	12	2.25
C2	12	9
C3	12	20.25

III.3.4. Préparation de GM:

Les GM ont préparées d'une manière à avoir des sections différentes (2.25 ; 9 et 20.25) et des dispositions. Différentes (6 ; 9 et 12). Ces choix ont été offerts après l'utilisation du logiciel de modélisation statique JMP (**tableau III- 8** Niveaux des facteurs : section et diamètre).

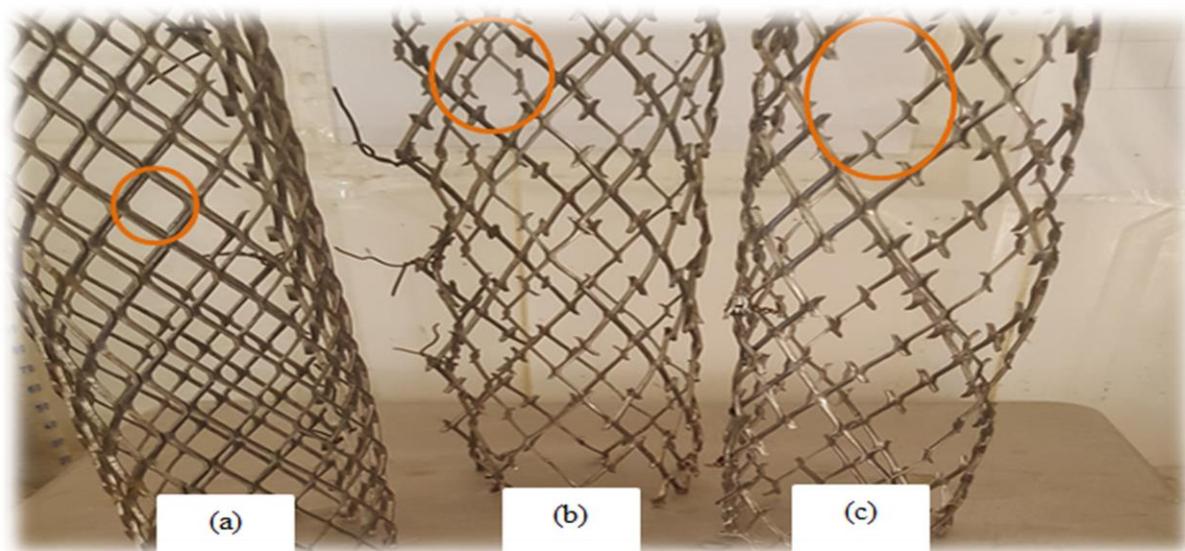


Figure III- 15. Les sections des grilles métalliques (a) 2.25 cm² (b) 9 cm² (c) 20.25cm²

a) Plan d'expérience utilisé :

Le plans choisi est un plan factoriel complet (3^2) c'est-à-dire un plan de deux facteurs chacun avec deux niveaux, en plus une répétition de la composition centrale 03 fois pour faire une validation des modèles qui seront établir par la suite. Donc le nombre des compositions à effectuées est : $3^2+3=9$. Les trois facteurs avec les niveaux en unités codées et réelles sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau-III. 8. Niveau des facteurs : section et diamètre

Facteurs		Niveau -1	Niveau 0	Niveau + 1
Section	Cm ²	2.25	9	20.25
Diamètre	Cm	6	9	12

b) Choix des réponses :

Les réponses sont les paramètres au moment de la réalisation de l'essai. Dans notre étude nous vision à voir l'effet de la section et de diamètre de confinement des éprouvettes de béton, par de GM, sur le comportement à une composition axiale.

Les paramètres à mesurer, et que seront pris comme réponses dans les modèles établies sont :

- la contrainte de béton confiné f_{cc} .
- la déformation maximale du béton confiné ϵ_{cc} .
- la déformation ultime du béton confiné ϵ_{cu} .
- le module d'élasticité E.

c) Choix du modèle mathématique :

da(S) et diamètre (D) est le suivant :

$$y = a_0 + a_1 \times S + a_2 \times D + a_3 S \times D$$

ou : a_0 , a_1 , a_2 et a_3 sont les coefficient à déterminer pour ce méthode. La détermination est effectuée grâce au logiciel JMP, par la méthode moindre carrée.

III.3.5. Les essais sur béton frais :

III.3.5.1. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams : (71)

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai réalisé sur le béton de ciment frais peu fluide pour déterminer sa consistance.

Pour réaliser cet essai une plaque et un cône d'Abrams sont utilisés :

- La plaque est en acier et a une surface dure et non-absorbante ;
- Le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé. Il a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm². Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams
- Une tige d'acier lisse de diamètre 16 mm et à extrémité arrondie.
- L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :
- Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque
- Le cône est rempli avec du béton frais en trois fois À chaque fois, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige
- Le cône est arasé avec une tige
- Le cône est levé immédiatement, verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler.
- L'affaissement du béton frais est mesuré.



Figure III- 16. L'essai d'affaissement.

Tableau-III. 9. La classe d'affaissement au cône d'Abrams

Classe	Affaissement en mm	Propriété du béton frais
S1	10 – 40	Ferme, très secs et peu maniable
S2	50 – 90	Plastique, à humidité moyenne et à maniabilité moyenne
S3	100 – 150	Très plastique, très humide et à maniabilité élevée
S4	160 – 210	Fluide, très humide et à maniabilité élevée
S5	≥ 220	Très fluide, très humide et à maniabilité élevée

En-dessous de 10 mm, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams peut être remplacé par l'essai Vébé. Au-dessus de 220 mm, on parle de béton auto plaçant et l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est remplacé par l'essai d'étalement au cône d'Abrams.

III.3.6. Les essais sur béton durci :

III.3.6.1. Essai de compression: (72) (71)

Tout les cylindres sont soumis à une compression initiale jusqu'à la rupture sous une presse hydraulique dont le plateau est mobile et l'appui supérieur fixe est une rotule, de ce type CONTROLS de capacité égale à 2000 KN (disponible au laboratoire privés de Ghardaïa). Le contrôle de déplacement est assuré avec un comparateur digital d'une précision de 0.01 mm. Pour assurer le parallélisme et la planéité des faces d'appui, une opération de surfacage est préalablement appliquée sur l'extrémité supérieure des cylindres. Un taux de chargement quasi statique est appliqué avec une vitesse de 7 KN/s, ce qui correspond à une valeur de 0.34 MPA/s (ce taux de la valeur la plus faible offerte par la machine, qui permet la lecture des résultats de contrainte et de déplacement en même temps). Pour assurer des bonnes lectures, nous avons utilisés deux caméras vidéo tout les long l'essai.

Le dispositif utilisé pour mesurer le déplacement intrinsèque du béton est donné sur **la Figure III-17**. La déformation sera calculée par rapport à une longueur de 200 mm.



Figure III- 17. Mode de préparation et mise en charge des spécimens.

Equipements :

Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des normes NF P 18-411 et NF P 18-412.

Un Cage extensométrique avec capture J2P.

Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes : surfaçage au soufre, ou disque diamanté.

Conduite de l'essai :

Les essais de module élastique ont été faits selon de la norme (72) . L'essai se déroule de la façon suivante :

– Après surfaçage au soufre, l'éprouvette $\varnothing 16 \times 32$ cm est équipée d'un extensomètre à béton J2P constitué de 2 couronnes solidarisiées entre elles par des entretoises.

Une fois les couronnes fixées en position centrale autour du cylindre par 3 vis disposées à 120° respectivement, elles sont désolidarisiées l'une de l'autre, en enlevant les entretoises. Leur distance initiale est ainsi égale à $L=12$ cm. Les variations de distance ΔL entre les deux

couroannes, correspondent alors aux déformations de l'éprouvette. Elles sont mesurées à l'aide de la moyenne de 3 LVDT positionnés à 120° ;

– La presse est équipée d'un système permettant l'enregistrement simultané de la variation de distance entre les couronnes et de la force appliquée sur le cylindre ;

– L'éprouvette est soumise à trois cycles de chargement successifs dont les caractéristiques sont les suivantes :

– Vitesse de rampe montante (MPa/s) : + 0,1

– Contrainte palier haut (MPa) : $R_c/3$

– Durée palier haut (s) : + 2

– Vitesse de rampe descendante (MPa/s) : - 0,1

– Force palier bas (MPa) : + 0,99

– Durée palier bas (s) : + 2

– A l'issue des essais, on calcule par la méthode des moindres carrés, la pente de la partie montante de la courbe $\sigma=f(\Delta L/L)$, lors du 2ième et du 3ième cycle. Le lissage est fait pour σ compris entre une valeur basse incluse dans l'intervalle [palier bas ; palier bas+0,15MPa] et une valeur haute incluse dans l'intervalle [palier haut-0,5MPa ; palier haut]. Cette pente donne directement le module d'élasticité. Le module retenu est la valeur obtenue sur le dernier cycle, si l'écart avec la valeur de l'avant dernier cycle est inférieur à 5%. Dans le cas contraire, il faut répéter l'essai jusqu'à ce que cette condition soit vérifiée.

A l'issue de l'essai de module qui est non destructif, l'extensomètre est retiré de l'éprouvette et on réalise un essai de compression suivant la norme (72).

La mise en charge doit être effectuée à raison de 0,5 MPa/s avec une tolérance de 0,2 MPa/s. Pour des éprouvettes 16 × 32 cela signifie une montée en charge de 10 KN/s ±4 KN/s.

La charge de rupture, P, est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit S la section orthogonale de l'éprouvette ; la résistance à la compression f_{c28} , est exprimée en MPa

à 0,5MPa près et a Pour expression : $f_{c28} = \frac{P}{S}$

Dans la relation ci-dessus f_{c28} est directement obtenue en MPa si P est exprimée en méga newton (MN) et S en m^2 .



Figure III- 18. Des éprouvettes après essais de compression

III.3.6.2. Essai au scléromètre : (73)

L'objectif du Scléromètre est de connaître la résistance à la pression de la surface du béton.

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur laquelle frappe la masse.



Figure III- 19. L'essai de scléromètre

Équipements : Scléromètre, Pierre spéciale pour le règlement, L'échantillon étudié

III.3.6.3. Essai ultrasonique : (74)

Le but de l'essai est d'apprécier la qualité du béton d'un ouvrage, sans procéder à un prélèvement d'éprouvette par carottage.

Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur du béton ; cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton a un module d'élasticité plus important, donc à priori une résistance plus importante.

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément à contrôler. Après avoir franchi une longueur de parcours (L) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores t.

Equipement nécessaire :

L'appareil comprend les accessoires suivants

- Un générateur d'impulsions électriques,
- Paire de transducteurs,
- Un amplificateur,
- Un dispositif électronique de mesure de temps permettant de mesurer la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur - émetteur et son arrivée au transducteur - récepteur,
- Un barreau de calibrage est fourni pour permettre d'obtenir une ligne de référence du mesurage de la vitesse.

Préparation de l'éprouvette :

Appliquer une mince couche d'huile sur le fond du plateau de surfaçage

Disposition du transducteur :

Il est possible de mesurer la vitesse de propagation du son en plaçant les deux transducteurs sur des faces opposées « Transmission directe », sur des faces adjacentes « Transmission semi-directe » ou sur la même face « Transmission indirecte ou transmission de surface » en cas de structure ou d'éprouvette de béton.



Figure III- 20. L'essai d'ultrasonique

La vitesse de propagation du son à travers le béton est déterminée par la formule suivante :

$$V = \frac{L}{T}$$

Ou :

V : est la vitesse de propagation du son, en km/s ;

L : est la longueur de parcours, en mm ;

T : est le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur, en μ s.

III.4. Conclusion:

Cette partie nous a permis de caractériser les matériaux utilisés dans notre travail et de décrire les procédures des essais utilisés. En plus une description de la préparation du plan d'expérience utilisé a été donnée. Nous a permis de déterminer la consistance des bétons étudiés. Les essais à la compression sont décrits. Ils seront utilisés pour obtenir les valeurs des résistances à la compression et déformation de béton confiné.

CHAPITRE IV :
RESULTATS EXPERIMENTAUX ET
INTERPRETATIONS

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPREMONTAUX

IV.1. Logiciel JMP :

JMP 7 est un puissant logiciel de découverte d'analyse statistique, il comprend des fonctions complètes d'analyse pour les ingénieurs et les scientifiques de tous niveaux importer des données de différents types de fichiers ainsi que de base de données puis préparer lait à l'aide de puissants outils de reco d'âge et de restructuration, il simplifie le calcul des régressions et des anneaux va et l'exécution des analyses multivariées tels que l'analyse en composantes principales et l'analyse de classification, toutes les analyses de JMP s'ont réalisés dans son interface interactive et intuitive de type pointer clique qui permet aux plus novices de tirer rapidement des enseignement de leurs données de plus ces analyses sont couplés a des graphiques pour une compréhension instantanée des relations complexes entre les variables jobs offre également des fonctionnalités de pointe pour la création rapide de visualisation de données à la fois efficace et élégante (75)



Figure IV- 1.logo de logiciel JMP (75)

IV.1. Préparation résultats :

Les résultats des essais de laboratoire sont présentés sous forme de courbes contrainte-déformation axiale .sur ces courbes, les contraintes sont représentées en fonction des déformations. l'essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques

mécaniques (f_{cc} , e) voir Tableau vi_1 . La charge de rupture « F » est la force maximal enregistrée au cours de l'essai .Si « S » est la section de l'éprouvette, la résistance à la compression σ_c est donnée par la relation :

$$\sigma_c = F/S$$

La figure suivant présente le comportement en compression simple du béton confectionné .tous les cylindres sont soumis à un chargement uniaxial en compression jusqu'à la rupture de ces derniers. la vitesse de chargement était constante de l'ordre de 7KN/S. Le raccourcissement axial des échantillons est mesuré par un montage équipé d'un comparateur de déplacement installé dans le sens vertical .cette acquisition manuelle des données, a été relativement délicate au moment de la lecture à une vitesse suscitée du chargement.

un exemple de résultat de l'assai de contrainte _ déformation est donné dans la figure suivante (figure IV-2) :

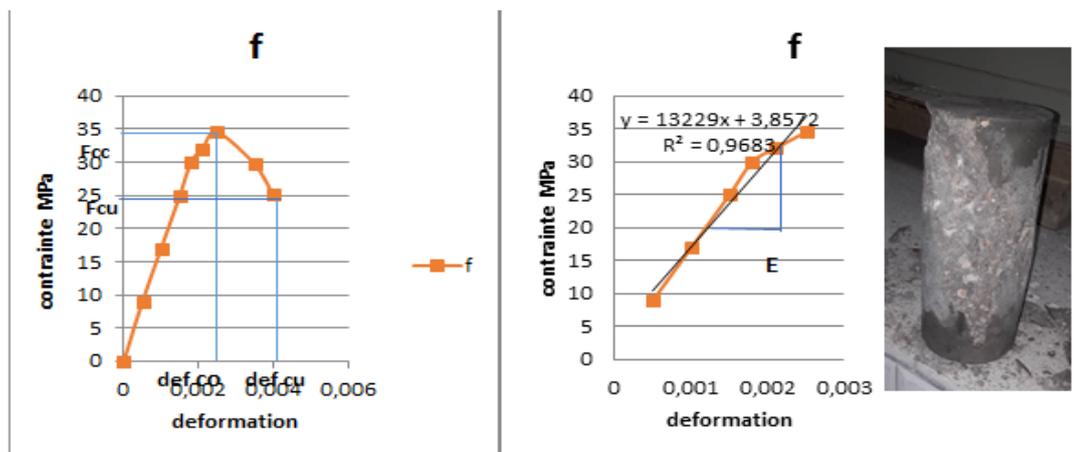


Figure IV- 2. Diagramme de contrainte-déformation de la composition

La figure suivante donne toutes les courbes de contraintes déformation ainsi trouvées dans notre étude.

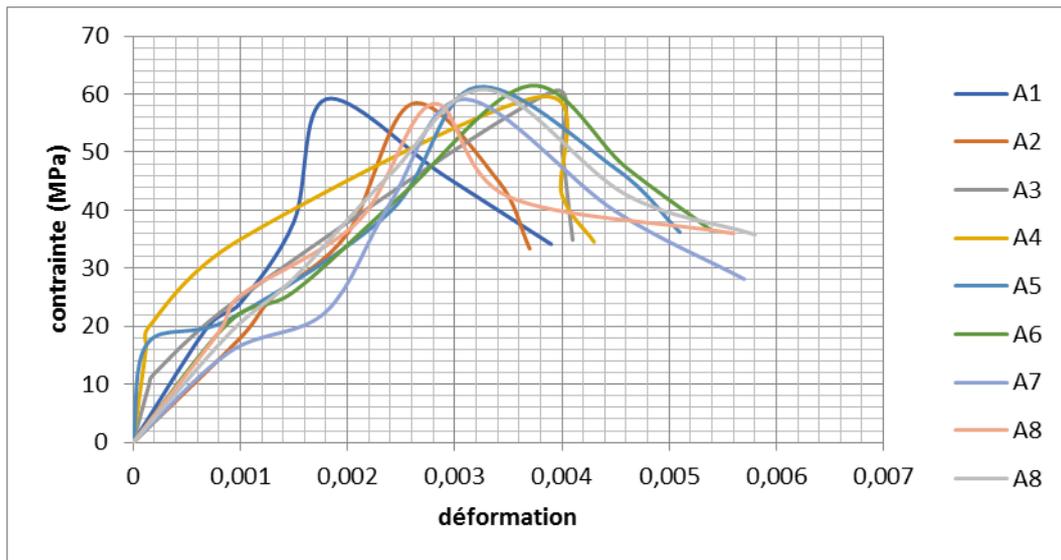


Figure IV- 3. Courbes de contraintes-déformation de toutes les compositions étudiées.
 le **Tableau IV-1** suivante résume les résultats issus des courbes de contraintes-déformations des différentes compositions étudiées.

Tableau-IV. 1. Résultats issus de courbes contraintes-déformations de notre étude.

	section	diamètre	F_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	F_{cu}	ϵ_{cu}	E(GPa)
A1	2.25	6	59.15	0,0018	34.15	0,0039	30.74
A2	9	6	58.35	0,026	33.37	0,0037	21.6
A3	20.25	6	60.38	0.0039	34.88	0.0041	14.4
B1	2.25	9	59.56	0,0038	34.56	0,0043	15.8
B2	9	9	61.21	0,0032	36.21	0,0051	18.39
B3	20.25	9	61.46	0,0037	36.45	0,0054	16.1
C1	2.25	12	59.15	0,0031	28.15	0,0057	18.48
C2	9	12	58.37	0,0028	36.01	0,0056	19.4
C3	20.25	12	60.82	0.0033	35.82	0.0058	18.4

IV.2. Résultats des réponses :

En utilisant le logiciel de modélisation statistique (JMP7), on a trouvé de chaque réponse :

- ✚ un résumé de l'ajustement,

- ✚ une analyse de la variance.
- ✚ une estimation des coefficients des modèles.
- ✚ des profileurs de prévision
- ✚ et finalement une représentation graphique des réponses en fonction des facteurs S et D, sous forme des profileurs d'isorréponses.

IV.2.1. Réponse : contrainte de béton confiné (fcc) :

la figure suivante donne la variation de f_{cc} en (MPa) observée (mesurée lors des essais) en fonction de celle prédite par le modèle établi, dans les coefficients sont donné par le **Tableau IV-2** .d'après cette figure, on constate que la corrélation est faible ($R^2=0,40$) .ceci est peut-être dû à la délicatesse des mesures des contraintes maximales lors des essais et l'hétérogénéité du matériau béton étudié .le résumé de l'ajustement de la réponse f_{cc} (R^2 , moyenne de la réponse et nombre des essais) sont récapitulés dans la **Figure IV-4**.

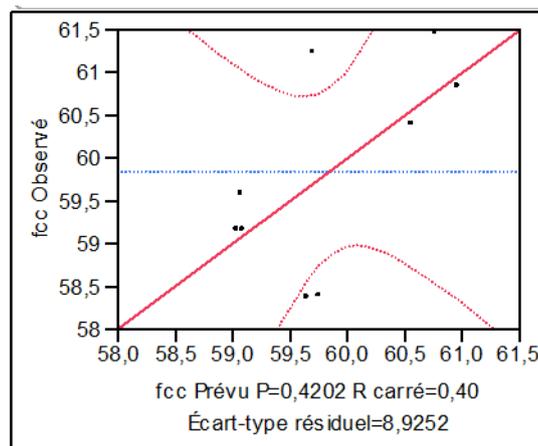


Figure IV- 4. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de fcc (MPA)

Tableau-IV. 2.Résumé de l'ajustement de la réponse fcc

Paramètre	Valeurs
R²	0.404359
Moyenne de la réponse	59,84851
Observations (ou sommes pondérées)	9

L'analyse de la variance (ANOVA), qui regroupe le degré de liberté, la somme des carrés, le carré moyen et le rapport F (de Fisher) sont donné dans le **Tableau IV- 3**.

Tableau-IV. 3. Paramètres issus de l'analyse de la variance de la réponse fcc.

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	270,53086	90,1770	1,5320
Résidus	5	398,29585	79,6592	Prob. > F
Total	8	668,82671		0,4202

D'après la probabilité de Student qui exigent une probabilité de 95% et qui correspond à une valeur supérieure à 2, en valeur absolue, du rapport de Fisher (dans notre cas rapport F=1.53). On peut dire que le modèle proposé (ci-après) est acceptable, malgré que le coefficient de corrélation est plus ou moins faible.

Dans le **Tableau IV-4** suivant on trouve des estimations des coefficients du modèle de fcc proposé.

Tableau-IV. 4. Paramètres et coefficient du modèle établi

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.>|t|
Constante	59,84851	2,55171	23,13	<,0001
S (cm²)	0.0941194	0,1971	0,28	0,7892
D (cm)	0.0255556	0,273602	-0,07	0,9461
S*D	0,004289	0,021125	0,20	0,8471

D'après ce tableau, on peut écrire le modèle mathématique décrivant la contrainte maximale fcc, en fonction de la section de confinement (S) et du diamètre de confinement (D) dans le domaine d'étude:

$$f_{cc} = 60 + 0.1 \cdot S - 0.03 \cdot D - 0.004 \cdot S \cdot D$$

En utilisant ce modèle, on peut estimer la variation réponse fcc en fonction des facteurs S et D, séparément. La **Figure IV-5** donne le profileur de prévision de la réponse fcc.

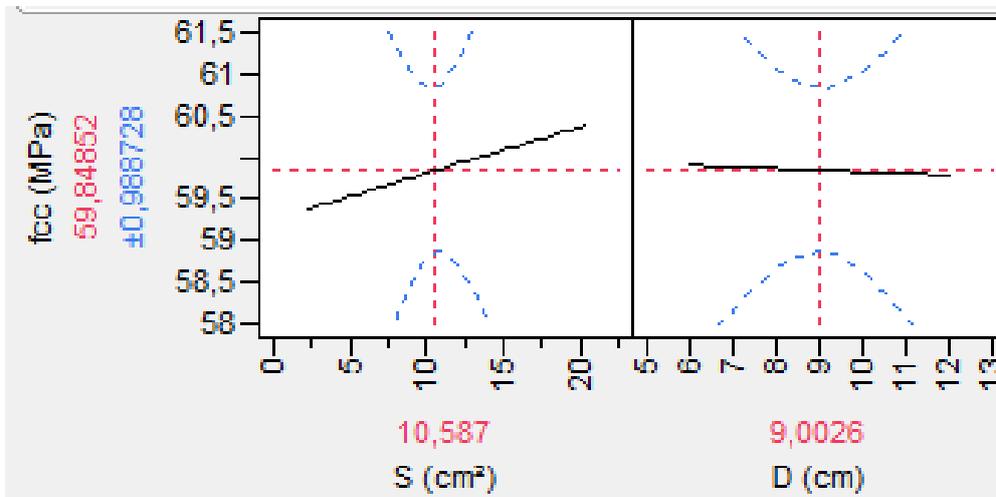


Figure IV- 5. Variation de la réponse fcc en fonction de S et D (profileurs de prévision).

D'après cette figure, on remarque que la contrainte maximale fcc augmente en fonction de l'augmentation de la section et diminue en fonction de l'augmentation du diamètre du confinement. Mais, on remarque que l'effet de la variation de S est plus important que celui du D. On peut dire également que l'effet de la variation de D est négligeable (puisque d'après la **Figure VI- 5**, on remarque que la droite du facteur D est presque horizontale).

L'exploitation du modèle de la contrainte maximale fcc, trouvé permet de tracer les courbes iso réponses (profileur d'iso réponses) représentées dans **la Figure IV- 6**. Cette figure constitue un outil flexible pour faire des prévisions de la réponse fcc en fonction de l'effet de S et de l'effet de D séparément et de leurs interactions.

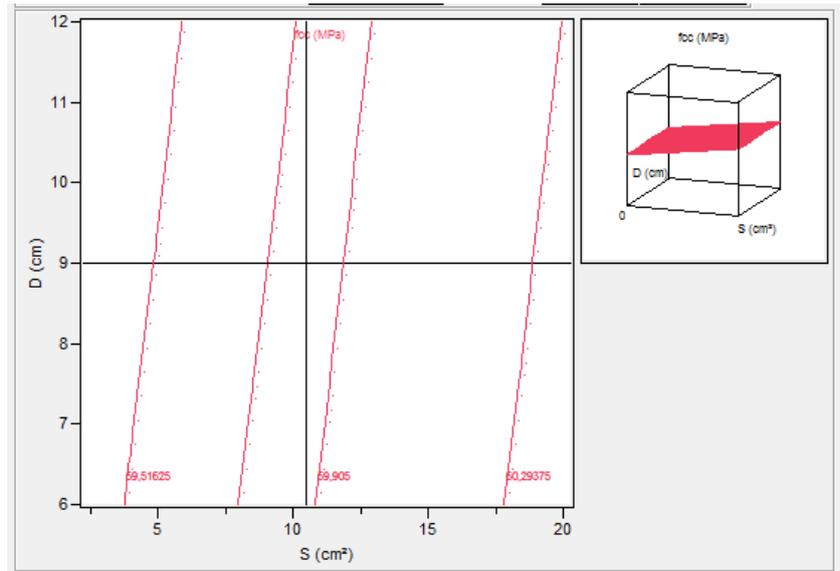


Figure IV- 6. Courbes isoréponses de la variation de la contrainte maximale f_{cc} (MPa) en fonction de S et de D

IV.2.2. Réponse : déformation d'un béton confiné ϵ_{cc} :

Cette déformation correspond à celle mesurée à la contrainte de compression maximale du béton confiné, La figure suivante (**Figure IV-7**) donne la variation de ϵ_{cc} observée (mesurée lors des essais) en fonction de celle prévue par le modèle proposé. D'après cette figure, on constate que la corrélation est très faible ($R^2=0.42$). Comme cité ci-dessus, ceci est peut-être dû à la sensibilité des mesures des déformations lors des essais et l'hétérogénéité du matériau béton étudié, Le résumé de l'ajustement de la réponse & sont récapitulés dans le **Tableau VI-5** et la représentation.

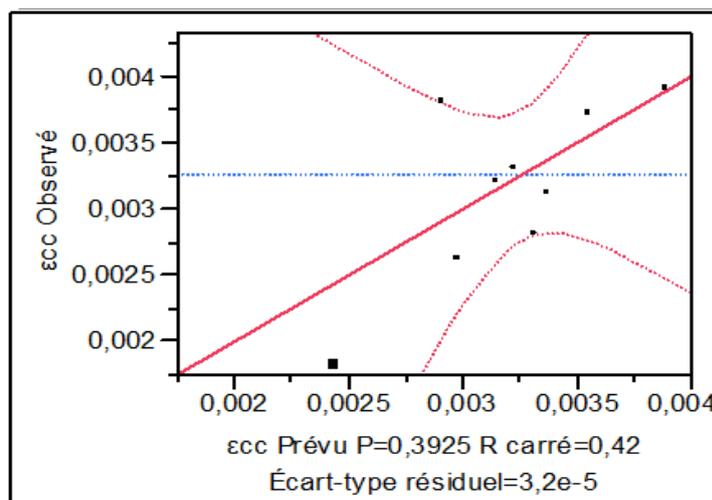


Figure IV- 7. Graphique des valeurs observée en fonction des valeurs prévues

Tableau-IV. 5. Résumé de l'ajustement de la réponse ξ_{cc} .

paramètre	Valeurs
R²	0,423322
Moyenne de la réponse	0,00326
Observations (ou sommes pondérées)	9

L'analyse de la variance (ANOVA), qui regroupe le degré de liberté, la somme des carrés, les carrés moyens et le rapport F (de Fisher) sont donnés dans le **Tableau IV-6**.

Tableau-IV. 6. Paramètres issus de l'analyse de la variance de la réponse ξ_{cc}

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	3,84373e-9	1,2812e-9	1,2235
Résidus	5	5,23619e-9	1,0472e-9	Prob. > F
Total	8	9,07991e-9		0,3925

D'après la probabilité de Student qui exigent une probabilité de 95 % et qui correspond à une valeur supérieure à 2, en valeur absolue, du rapport de Fisher. On peut dire que le modèle proposé (ci-après) est non valide (dans notre cas rapport F=1.23).

IV.2.3. Réponse : contrainte ultime de béton confiné (F_{cu}) :

La **Figure IV-8** ci-dessous donne la variation de F_{cu} observée (mesurée lors des essais) en fonction de celle prédite par le modèle établi, donc les coefficients sont donné par le **Tableau VI- 9** D'après cette figure, on constate que la corrélation est bonne ($R^2=0.48$). Le résumé de l'ajustement de la réponse F_{cu} est récapitulé dans le **Tableau IV-7**.

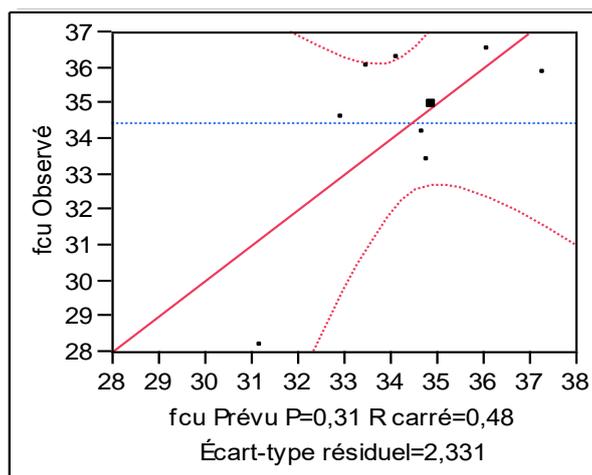


Figure IV- 8. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

Tableau-IV. 7. Résumé de l'ajustement de la réponse Fcu

Paramètre	Valeurs
R^2	0,482819
Moyenne de la réponse	34.3
Observations (ou sommes pondérées)	9

L'analyse de la variance de la réponse eu est donné dans le **Tableau IV- 8**.

Tableau-IV. 8. Paramètres issus de l'analyse de la variance de la réponse Fcu.

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	25.361987	8.454	1,5559
Résidus	5	27.167013	5.4334	Prob. > F
Total	8	52.529000		0,3100

On constate que le rapport ($F=1.56$). On peut dire que le modèle proposé (ci-après) est acceptable, malgré que le coefficient de corrélation est plus ou moins faible.

Tableau-IV. 9. Paramètres et coefficients du modèle établi Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.>|t|
Constante	38,97381	5,124592	7,61	0,0006
S (cm ²)	-0,320363	0,398496	-0,80	0,4579
D (cm)	-0,713333	0,549414	-1,30	0,2508
S*D	0,0551323	0,042723	1,29	0,2533

D'après ce tableau, on peut écrire le modèle mathématique décrivant la contrainte ultime f_{cu} , en fonction de S et de D dans le domaine d'étude:

$$f_{cu} = 39 - 0.32.S - 0.71.D + 0.06.S.D$$

En utilisant ce modèle, on peut estimer la variation de la réponse f_{cu} en fonction des facteurs S et D, séparément La **Figure IV-9** donne le profileur de prévision de la réponse f_{cu} .

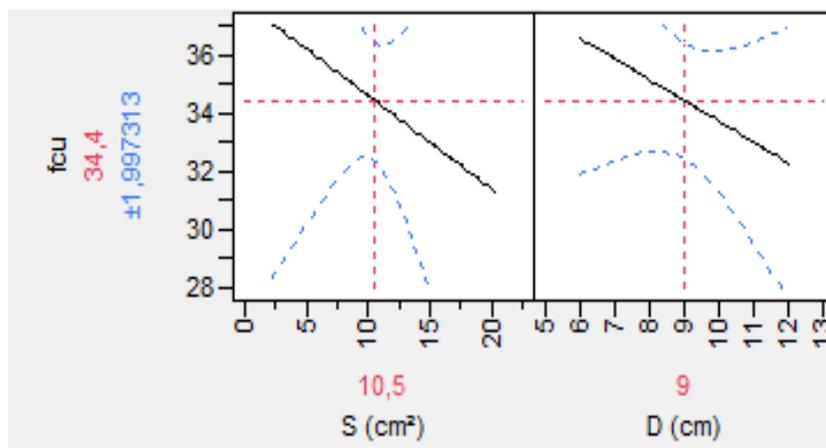


Figure IV- 9. Variation de la réponse f_{cu} en fonction de S et D (profileurs de prévision).

D'après cette figure, on remarque que la contrainte ultime f_{cu} diminue en fonction de l'augmentation de D et en fonction de l'augmentation de S, Mais, on constate que l'effet quadratique de l'interaction S et D est positif.

L'exploitation du modèle de la contrainte maximale f_{cu} , trouvé, permet de tracer les courbes iso réponses (profileurs d'iso réponses) représentées dans la **Figure IV- 10**. D'après les **Figure**

IV- 9 et **Figure IV- 10**, on remarque que f_{cu} diminue en fonction de l'augmentation de S et de l'augmentation de D séparément et de leurs interactions.

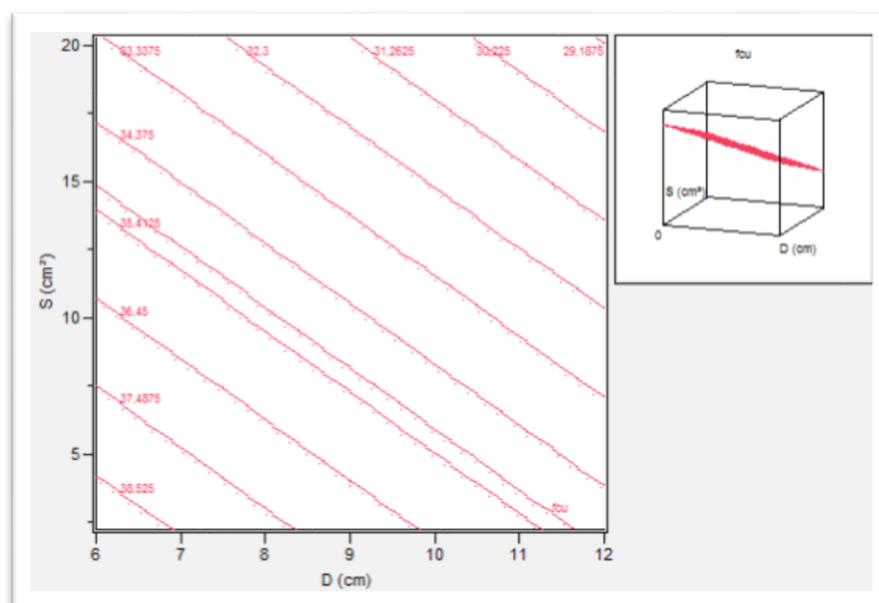


Figure IV- 10. Courbes isoréponses de la variation de la contrainte maximale f_{cu} en fonction de S et de D .

IV.2.4. Réponse : déformation ultime de béton confiné (ϵ_{cu}) :

La figure ci-après donne la relation entre ϵ_{cu} observée (mesurée lors des essais) et celle prédite par le modèle établi, donc les coefficients sont donnés par le **Tableau IV-12**. D'après cette figure, on constate que la corrélation est bonne ($R^2=0.92$). Les paramètres de l'ajustement de la réponse ϵ_{cu} sont regroupés dans le **Tableau IV-10**.

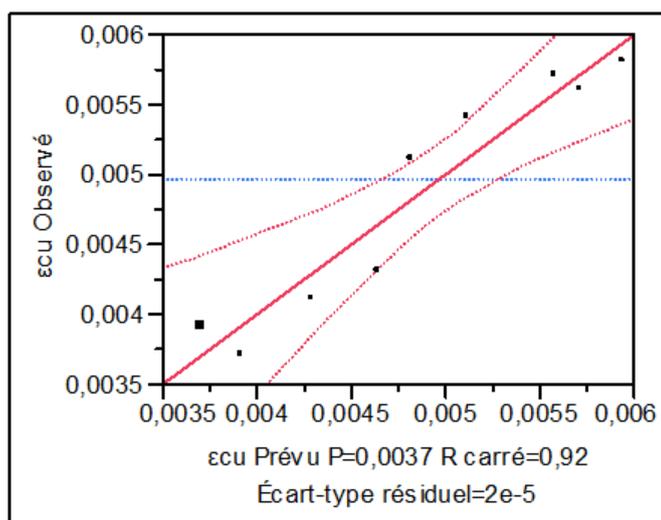


Figure IV- 11. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la réponse ϵ_{cu}

Tableau-IV. 10. Résumé de l'ajustement de la réponse ϵ_{cu} .

Paramétré	Valeurs
R²	0,921489
Moyenne de la réponse	0,004974
Observations (ou sommes pondérées)	9

L'analyse de la variance de la réponse ϵ_{cu} est donnée dans le **Tableau IV-11**. D'après ce tableau, on remarque que le rapport F est largement supérieur à 2 (rapport F=18.85).

Tableau-IV. 11. Paramètres issus de l'analyse de la variance de la réponse ϵ_{cu}

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	2,37107e-8	7,9036e-9	18,8585
Résidus	5	2,09549e-9	4,191e-10	Prob. > F
Total	8	2,58062e-8		0,0037

On peut dire que le modèle proposé (ci-après) est bon Dans le **Tableau VI- 12** suivant on trouve des estimations des coefficients du modèle de ϵ_{cu} proposé .

Tableau-IV. 12. Paramètres et coefficient du modèle établi

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.>|t|
Constante	0,0017171	0,000685	2,51	0,0540
S (cm²)	4,4865e-5	5,246e-5	0,86	0,4315
D (cm)	0,0003182	7,063e-5	4,51	0,0064
S*D	-2,076e-6	5,428e-6	-0,38	0,7178

D'après ce tableau, on peut écrire le modèle mathématique décrivant la contrainte ultime ϵ_{cu} en fonction de S et D dans le domaine d'étude

$$\epsilon_{cu} = (1.7 + 0.005.S + 0.32.D - 0.0002.S.D)e - 3$$

La figure suivante donne le profilur de prévision de la déformation ultime ϵ_{cu} en fonction des facteurs S et D

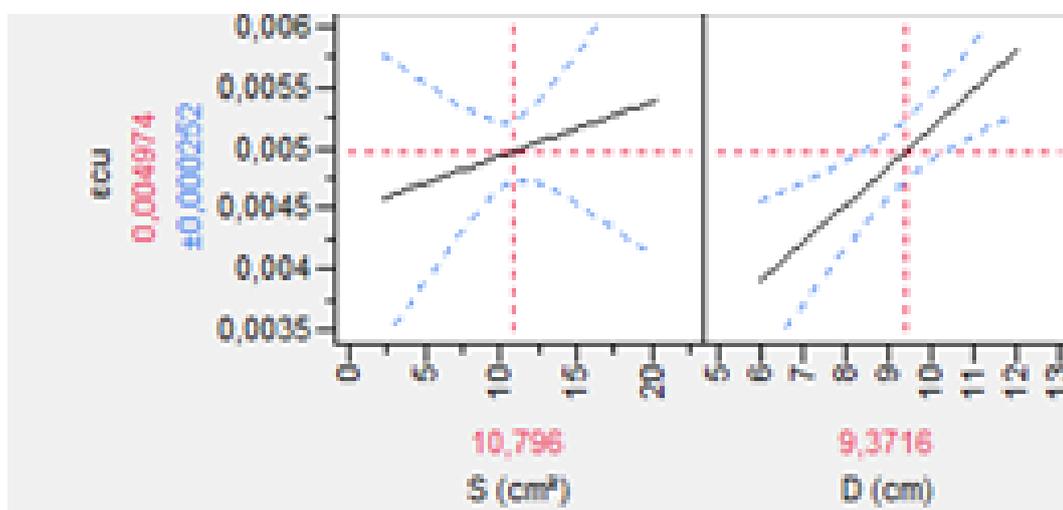


Figure IV- 12. Variation de la réponse ϵ_{cu} en fonction de S et D (profileurs de prévision).

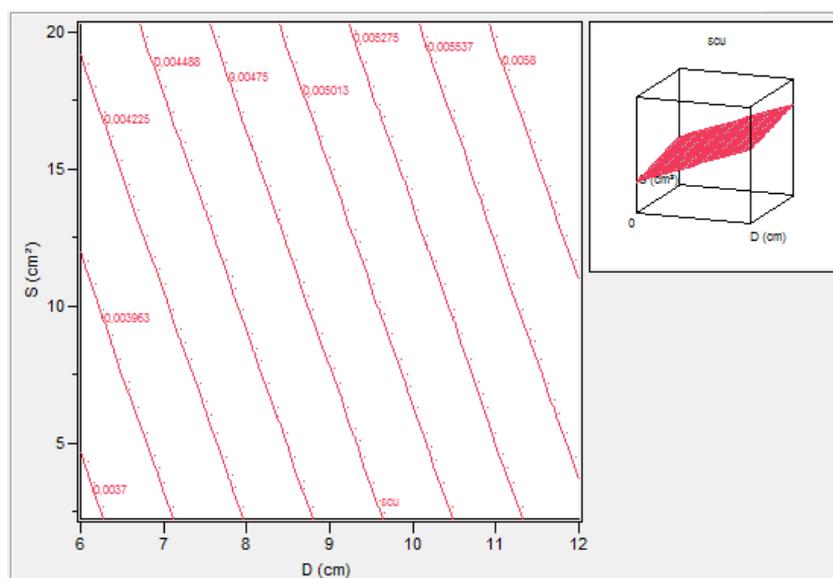


Figure IV- 13. Courbes isoréponses de la variation de la déformation maximale ϵ_{cu} en fonction de S et de D.

Les **Figure IV-12** et **Figure IV-13** illustrent de manière claire l'effet positif des facteurs S et D sur la déformation ultime ϵ_{cu} , que ce soit séparément ou en interaction.

IV.2.5. Réponse : module d'élasticité (E) :

Le module d'élasticité E est déterminé graphiquement comme la pente de la droite de la partie élastique du diagramme contrainte-déformation. C'est le rapport entre la contrainte et la déformation. La figure suivante donne la variation de E mesuré en fonction de celui prévu par le modèle proposé D'après cette figure, on constate que la corrélation est bonne ($R^2=0.68$). Le résumé de l'ajustement de la réponse E sont récapitulés dans le **Tableau IV-14**.

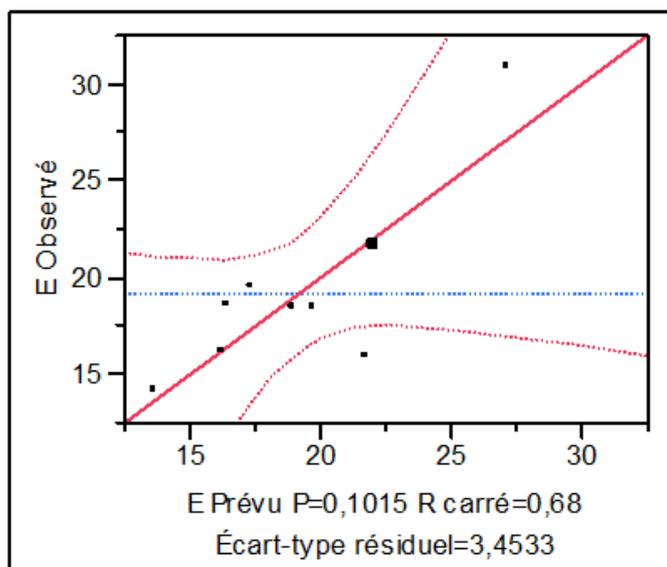


Figure IV- 14. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la réponse E (GPa).

Tableau-IV. 13. Résumé de l'ajustement de la réponse E.

Paramètre	Valeurs
R^2	0,682766
Moyenne de la réponse	19,22333
Observations (ou sommes pondérées)	9

L'analyse de la variance de la réponse E est donnée dans le **Tableau IV-14**. D'après ce tableau, on remarque que le rapport F est supérieur à 2 (rapport F=3.89).

Tableau-IV. 14. Analyse de la variance de la réponse E.

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	128,33349	42,7778	3,5871
Résidus	5	59,62771	11,9255	Prob. > F
Total	8	187,96120		0,1015

Tableau-IV. 15. Coefficient du modèle de la réponse E.

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.>|t|
Constante	41,452857	7,592109	5,46	0,0028
S (cm²)	-1,633288	0,590374	-2,77	0,0395
D (cm)	-2,113333	0,81396	-2,60	0,0485
S*D	0,1475132	0,063295	2,33	0,0672

D'après ce tableau, on peut écrire le modèle mathématique décrivant le module d'élasticité E. en fonction de S et D dans le domaine d'étude

$$E(GPa) = 41.5 - 1.63.S - 2.1.D + 0.2.S.D$$

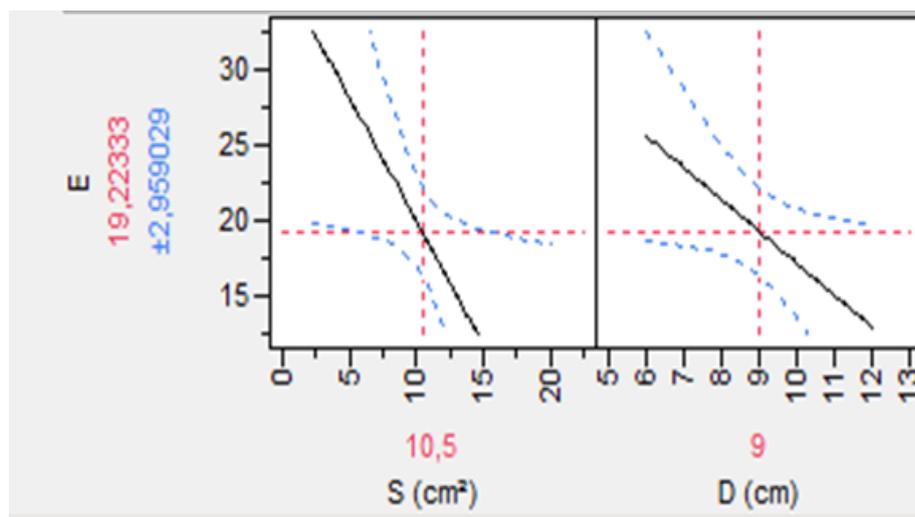


Figure IV- 15. Profileur de prévision de la réponse E.

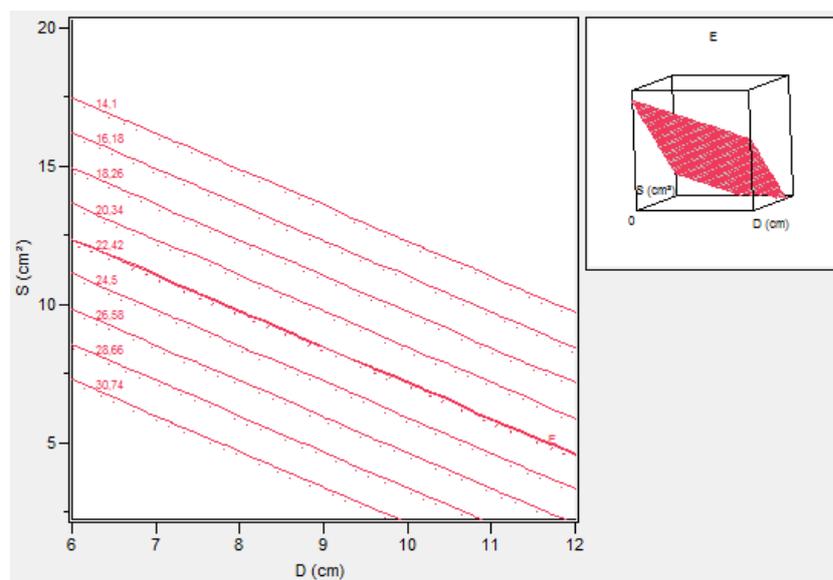


Figure IV- 16. Courbes isoréponses de la variation de la contrainte maximale E (GPa) en fonction de S et de D.

On constate, d'après les **Figure IV-15** et **Figure IV-16** que le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la section et diminue aussi avec l'augmentation du diamètre de confinement, Mais, on constate que l'effet quadratique de l'interaction S et D est positif.

IV.2. Conclusion :

Le modèle formulé pour estimer la résistance et la ductilité des colonnes renforcées par des grilles, en s'appuyant sur les études antérieures, liées au béton confiné par des grilles fonction de la taille de la maille et de sa forme (losange et hexagonale), de la nature des grilles, de leur résistance et de leur densité volumique relative au béton offre des prédictions précises des contraintes et des déformations. Les valeurs calculées en utilisant le modèle sont relativement proches des résultats expérimentaux obtenus dans cette étude.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

La dégradation des structures en béton sous l'effet de plusieurs facteurs : séismes, intempéries, agressivité du milieu a donné un élan à l'idée du renforcement des éléments structuraux, vers une évolution incessante et variée ; une idée forte de laquelle il en ressort plusieurs travaux essayant de proposer des solutions techniques plus efficaces et plus économiques à ces problèmes. L'analyse critique et objective des différents travaux antérieurs a déjà démontré le potentiel de la méthode de confinement par grilles métalliques dans l'amélioration du comportement (résistance, ductilité...) des structures en béton. Le contexte de l'étude effectuée dans le présent travail est essentiellement associé au problème des effets de la section de la maille de la grille et le diamètre de confinement sur les paramètres de confinement (contrainte maximale, déformation maximale, module d'élasticité...ect), en utilisant une approche de modélisation statistique (offerte par le logiciel JMP7 de SAS Institute).

Ce mémoire comporte deux grandes parties : une première qui consiste en une étude bibliographique qui nous a permis d'enrichir nos connaissances et de tracer le chemin tout au long de cette recherche sur les principes de base du comportement en compressions.

Le deuxième partie quant-à elle est scindée en deux chapitres , un premier chapitre où nous avons présenté les différents essais expérimentaux réalisés et les caractérisations des matériaux utilisés. Un deuxième chapitre a été consacré à la présentation et la discussion des résultats des essais . le travail expérimental consiste à confectionner des cylindres de diamètre 150mm et de hauteur 300 mm afin de caractériser le béton utilisé (contrainte de compression, déformation, module d'élasticité...), en utilisant un dispositif d'acquisition manuelle.

Les résultats des essais et les modèles établis nous mènent à conclure que :

- ✚ La contrainte maximale (f_{cc}) augmente en fonction de l'augmentation de la section et diminue en de l'augmentation du diamètre du confinement. Ce phénomène est généralement remarqué dans le cas des béton confinés (c'est-à-dire pour gagner la ductilité, généralement on constate une diminution de la contrainte

- ✚ La déformation correspondante à la contrainte maximale (ϵ_{cc}) n'a pas donné un résultat satisfaisant par la déformation ($R^2=0.42$). Ceci est dû à la délicatesse de l'acquisition manuelle de la déformation en fonction de la contrainte.
- ✚ La déformation ultime (ϵ_{cu}) augmente en fonction de l'augmentation de D et en fonction de l'augmentation de S.
- ✚ La contrainte ultime (f_{cu}), diminue en fonction de l'augmentation de la section de confinement et en de l'augmentation du diamètre de confinement.
- ✚ Le module d'élasticité (E) diminue en fonction de l'augmentation de la section et diminue aussi avec l'augmentation du diamètre de confinement.

Comme perspective de ce travail de recherche, on propose:

- ✚ L'utilisation des dispositifs d'acquisition automatique des contrainte- déformation pour éviter les erreurs, notamment dans l'acquisition de déformation (par exemple : les jauges et les LVDT).
- ✚ L'étude de l'autre paramètre tel que les types de grilles (plastique par exemple), la forme de section, etc.

ANNEXE

Tableau de l'essai de scléromètre et Ultrasonique :

	Moyen Scléromètre	Ultrasonique Km/s²
A1	34	4.49
A2	32	4.78
A3	36.4	3.61
B1	33.5	3.18
B2	33	3.31
B3	34	3.48
C1	31	4.01
C2	30	3.65
C3	34.5	3.32
T	31	4.74

Tableau de l'essai de compression :

	Charge (KN)	RC (MPa)	Moyen (MPa)
A1	650	32.33	34.15
	729.8	36.30	
	680.0	33.82	
A2	644.56	32.06	33.37
	680.65	33.85	
	687.67	34.2	
A3	650.2	32.34	34.88
	715.85	35.6	
	737.9	36.70	
B1	617.24	30.69	34.56
	652.6	32.46	
	795.0	39.54	
B2	668.4	33.24	36.21

	734.8	36.54	
	781.1	38.85	
B3	754.595	37.53	36.45
	687.723	34.2	
	756.8	37.64	
C1	482.8	24.01	28.15
	452.9	22.53	
	762.05	37.9	
C2	726.247	36.12	36.01
	714.27	35.52	
	731.594	36.39	
C3	699.714	34.80	35.82
	750.277	37.32	
	710.8	35.35	
T	801.8	39.88	37.49
	797.99	39.68	
	661.8	32.91	

RÉFÉRENCES

Références :

Bibliographie

1. *Glossaire Matériaux Composites.* .
2. **J.M.BERTHELOT.** Matériaux Composites. s.l., Comportement Mécanique Et Analyse Des Structures, TEC Et DOC : 4eme Edition, 2002.
3. **C.BATHIAS.** matériaux composites. s.l. : DUNOD, 2005.
4. **D.G.HERMES.** matériaux composites. s.l. : 5eme, 2005.
5. **BELHANNACHI, Hicham.** REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POTEAUX EN BETON ARME. Constantine, Thèse De Magister En Génie Civil Université Mentouri : s.n., 2009.
6. **MOSLEY W.H, HULSE R, BUNGEY J.H.** *Reinforced concrete design to Eurocode 2.* Grande-Bretagne, Londres : s.n., 1996.
7. *Les ouvrages en béton dimensionnement et esthétique.*
8. **Vu, Tru.** Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé.: *approche expérimentale et probabiliste.* Toulouse : Doctoral dissertation,INSA, 2011.
9. *La carbonatation du béton armé.* **Girard, C.** 1998. (No. CERN-ST-98-018).
10. **Vervisch-Fortuné, I.** Sensibilité de la technique d'émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton . Université de Toulouse : Doctoral dissertationUniversité Toulouse III Paul Sabatier, 2009.
11. **techniques, Fiches.** Corrosion des aciers dans le béton arme. *Xand Solutions for durability.*
12. **Ginger, C.** La pathologie du beton. *Compagnie des experts du bâtiment des travaux publics et de l'industrie CEBTPI.* 2016.
13. **Ce fracor, A. F. G. C.** Réhabilitation du biton armé dégradé par la corrosion. s.l. : Centre Français Anti-Corrosion, (2003). pp. 55-59.

14. **Nguyen, T. H.** Durabilité des réparations à base cimentaire. : *analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation* . s.l. : (Doctoral dissertation ,Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier), 2010.
15. **Ouzaa, K.** Réhabilitation des structures. Oran : Université d'Oran, (2015).
16. **J.M.BERTHELOT.** matériaux composites. : *comportement mécanique et analyse des structures*. s.l. : TEC et DOC 4eme édition, 2002.
17. **Amal, DJELLAD Zohra.** Contribution A L'étude Des Dalles Renforcées Par Des Composites. : *Analyse Expérimentale Et Modélisation* . TIZI-OUZOU : MEMOIRE DE MAGISTER EN GENIE CIVIL UNIVERCITE TIZI-OUZOU, 2015.
18. **Abidine, Ould El Hacem Zein El.** RENFORCEMENT DU BETON PAR LES MATERIAUX COMPOSITES . Tébessa : Mémoire De Master, Académique Université De Tébessa, 2015/2016.
19. **G, Chevillard.** *Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire*. s.l. : Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d'art, (1993). OA12..
20. *structural applications and standards Matériels and Structures*. **M., Di Prisco.** 9, 2009, FRC, Vol. 42, pp. 1169-1171.
21. **D. Spenlé, R. Gourhant.** Guide de calcul de la mécanique. 2003, pp. 130-208.
22. **Dreux, G. et Festa, J.** Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième édition.
23. **Consideré, A.** Experimental Research on Reinforced Concrete Translated and Arranged by Leon S. New York : Moisseiff, McGraw Publishing Co, 1903. Vol. 188 , 2.
24. **Rousakis, T.C. et Karabinis, A.I.** Substandard reinforced concrete members subjected to compression: FRP confining effects. *Materials and Structures*. 2008. Vol. 41, 9, pp. 1595-1611,.
25. **Iyengar, K.T.S .R., Desayi, R et Reddy, K.N.** Stress-strain characteristics of concrete confined in steel binders. London : Magazine of Concrete Research, 1970. Vol. 22, 72, pp. 173-184.

26. **E, Richart F, A, Brandtzaeg et L, Brown R.** A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. *Engineering Experimental Station*. Urbana, USA : University of Illinois, 1928. 185.
27. **Ahmad, S.J, Khaloo, A.R et Irshaid, A.** Behavior of concrete spirally confined by fiber glass filaments. s.l. : Magazine of Concrete Research, 1991. Vol. 43, 156, pp. 143-148.
28. **Monti, G et Spoelstra, M. R.** Fiber-section analysis of RC bridge piers retrofitted with FRP jackets. Portland : s.n., 1997. pp. 884-888. Proceedings of Structures Congress XV Building to Last, ASCE.
29. **Newman, K. et Newman, J.B.** Failure theories and design criteria for plain concrete. *Proceedings of the International Civil Engineering Materials Conference on Structure, Solid Mechanics and Engineering Design*. New York : Wiley Inter-science, 1972. 2, pp. 963-995.
30. **Richart, F. E, Brandtzaeg, A et Brown, R.L.** The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression. urban , USA : Engineering Experiment Station, University of Illinois, 1929. 190.
31. *Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets.* **Xiao, Y. et Wu, H.** 13, 2003, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 22, pp. 1187-1201.
32. *External support of concrete structures using composite materials.* **Bavarian, B; Shively, R; Ehrgott, R; Di Julio, R.** [éd.] H Saadatmanesh et M. R Ehsani. Tucson, Arizona : Proceedings of the First International Using Composites in infrastructure, ICCI'96, 1996, pp. 917-928.
33. **Berthet, J.F, E, Ferrier et P, Hamelin.** Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets- Part A: Experimental study. s.l. : Construction and Building, 2005. Vol. 19, pp. 223-232.
34. **Nanni, A et Bradford, N.M.** FRP jacketed concrete under uniaxial compression. s.l. : Construction and Building Materials, 1995. Vol. 9, 2, pp. 115-124.
35. *Concrete encased in fiber glass-reinforced plastic.* **Fardis, M.N et Khalili, H.H.** 6, s.l. : ACI, Material Journal Proceedings, 1981, Vol. 78, pp. 440-446.

36. **Katsumata, H, Kobatake, Y et Takeda, T.** A study on strengthening with carbon fiber for earthquake-resistant capacity of existing reinforced concrete columns. Tokyo, Japan : Proceedings of the 9th Conference on Earthquake Engineering, 1988. Vol. 7, pp. 517-522.
37. *Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement.* **Ahmad, S.H et Shah, S.P.** 6, 1982, ACI Journal, Vol. 79, pp. 484-490.
38. **Ahmad, S.J, Khaloo, A.R et Irshaid, A.** Behavior of concrete spirally confined by fiber glass filaments. s.l. : Magazine of Concrete Research, 1991. Vol. 43, 156, pp. 143-148.
39. *Behavior of concrete columns confined with fibercomposites.* **A, Mirmiran. et Shahawy, M.** 1997, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, pp. 583-590.
40. *Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fibercomposite sheets.* **Toutanji, H.** 3, 1999, ACI Materials Journal, Vol. 96, pp. 397-404.
41. *Confinement of concrete cylinders with CFPP.* **Picher, F, Rochetter, P et Labossière, P.** [éd.] H Saadatmanesh et M. R Ehsani. 96, Tucson Arizona : Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure, 1996, ICCI, pp. 829-841.
42. *External support of concrete structures using composite materials”.* **Bavarian, B, et al., et al.** [éd.] H. et Ehsani, M. R Saadatmanesh. 96, Tucson, Arizona : Proceedings of the First International Using Composites in infrastructure, 1996, ICCI, pp. 917-928.
43. *Tests and modeling of carbon-wrappedconcrete columns.* **Shahawy, M, Mirmiran, A et T, Beitelman.** s.l. : Composites: part B, 2000, Vol. 31, pp. 471-480.
44. *Model of Concrete Confined by Fiber Composites.* **Samaan, M, Mirmiran, A et Shahawy, M.** 9, 1998, Journal of Structural Engineering, ACSE., Vol. 124, pp. 1025–1031.
45. *Strength and ductility of concrete columns reinforcedwith FRP tubes.* **Kanatharana, J et Lu, L,W.** [éd.] H Saadatmanesh et M. R Ehsani. Tucson, Arizona : Proceedings of the Second International on Composites in Infrastructure, 1998 , ICCI, pp. 370-384.
46. *Behavior of concrete prisms confined with FRP composites under axial cyclic compression.* **Abbasnia, R et Ziaadiny, H.** 2009, Vol. 30, pp. 493-505. Engineering Structures.

47. *Strength models for FRP-confined concrete.* **Lam, L. et Teng, J.G.** 5, s.l. : Journal of Structural Engineering, 2002, ASCE, Vol. 128, pp. 612-623.
48. *Circular columns confined with FRP: Experimental versus predictions of models and guidelines.* **O, Chaallal, M, Hassan et M, LeBlanc.** 1, s.l. : Journal of Composites for Construction, 2006, ASCE, Vol. 10, pp. 4-12.
49. *Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites.* **Wu, G., Lü, Z.T. et Wu, Z.S.** 20, 2006 : Construction and building materials, pp. 134-148.
50. *Strength and ductility of tied concrete columns.* **Sheikh, S.A et Uzumeri, S.M.** 5, s.l. : Journal of Structural Division, 1980, ASCE, Vol. 106, pp. 1079-1102.
51. **Young, Qing-Sheng, Qin, Qing-Huang et Zheng, Dai-Hua.** Analytical and numerical investigation of interfacial stress of FRP-concret hybrid structure. s.l. : Composite Structure, 57, 2002. pp. 221-226.
52. **Richart, F.E, Brandtzaeg, A et Brown, R.L.** A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. Urbana, USA : University of Illinois Engineering Experimental Station, 1928. 185.
53. *'Strength and ductility of concrete colums extenally reinforced with fiber composite straps.* **Saadatmanesh, IL, et al., et al.** 4, s.l. : Structural journal, 1994, ACI , Vol. 91, pp. 434-447.
54. *Theoretical stress-strain model for confined concrete.* **Mander, J. B, Priestley, M.J.N et Park, R.** 8, s.l. : Journal of Structural Engineering, 1988, ASCE, Vol. 114, pp. 1804- 1826.
55. *Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets.* **Toutanji, H.** 3, 1999, ACI Materials Journal, Vol. 96, pp. 397- 404.
56. *Experimental study on the confinement effect of concrete cylinders confined by carbon fiber sheets". Proc Jpn Conc Inst .* **Miyauchi, K, et al., et al.** 23, 2001, pp. 856-70.
57. **D.Cusson et P.Paultre.** le confinement des poteaux en béton à hautes performances-étude expérimentale. Canada : université de Sherbrooke (Québec) , Bull. liaison labo.P. et Ch-192Réf.3813., 1994.

58. **Houssaini, ROCHDI EL.** « Contribution A L'analyse Du Comportement Mécanique De Dalles En Béton Arme Renforcées Par Matériaux Composites. Lyon : Université Lyon 1, Thèse De Doctorat , 2004. p. 232.
59. **Mohcene, BOUKHAZAR.** Réhabilitation Et Renforcement Des Poutres Au Moyen Des Matériaux Composites. Université De Constantine : Thèse De Magister, 2009. p. 123.
60. **Patrick, GULRAUD.** *Les Solutions Techniques Pour La Réparation Et Le Renforcement Des Ouvrages De Génie Civil En Béton.* s.l. : Solution Béton ; Construction Moderne /Annuel Ouvrage D'art , 2011. pp. 15-22.
61. **Carolin, A.** *Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements.* s.l. : Thèse de doctorat, 2003.
62. **Hamelin, P.** *Réparation des ouvrages par matériaux composites : Recommandations AFGC. Colloque Le Pont : Les Ouvrages d'Art – Toulouse.* 2008.
63. NA 230 :2010 /EN 196-3 2008 .
64. EN 196-3 2009.
65. Norme (NF P 18-540).
66. **1991, NF P 18-598 Octobre.**
67. NF P 18-560 septembre 1990 .
68. Norme (NFP-18 561).
69. NF P 18-591 Septembre 1990.
70. NF EN 1008.
71. NF EN 12390-3 .
72. **12390-3, NF EN.**
73. NF EN 12504-2.
74. P 18-418 (1989) 74.
75. JMP. [En ligne] http://www.jmp.com/fr_fr/software.html.

76. **Kurt, H., & Fritz.** La carbonatation du béton. 2017.

77. *Circular columns confined with FRP: Experimental versus predictions of models and guidelines.* **O, Chaallal, M, Hassan et M, LeBlanc.** 1, s.l. : Journal of Composites for Construction, 2006, ASCE, Vol. 10, pp. 4-12.

78. NF EN 12390-13.