

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème

Étude expérimentale d'un béton confiné par grilles métallique : essai de compression

Présenté par :

M^{elle} RAHIM MELISSA

Devant le jury composé de :

Mr BOUKAIS SAID	Professeur à l'UMMTO	Président.
Mr ATLAOUI DJAMAL	Maitre de conférences à l'UMMTO	Examineur.
Mr MERAKKEB SEDDIK	Maitre de conférences à l'UMMTO	Encadrant.
Mme KHELOUI FATMA	Maitre de conférences à l'UMMTO	Co- Encadrante.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème

Étude expérimentale du confinement du béton par grilles métallique

Présenté par :

M^{elle} RAHIM MELISSA

Devant le jury composé de :

Mr BOUKAIS SAID	Professeur à l'UMMTO	Président.
Mr ATLAOUI DJAMEL	Maitre-assistant (e) à l'UMMTO	Examineur.
Mr MERAKKEB SEDDIK	Maitre de conférences à l'UMMTO	Encadrant.
Mme KHELOUI FATMA	Maitre de conférences à l'UMMTO	Co- Encadrante.



Remerciement

Avant toute chose, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et mon amour à **mes parents** bien-aimés. Vous avez été ma force dans les moments de doute, mon refuge dans les périodes difficiles. Par votre patience, vos sacrifices silencieux, votre foi en moi et votre amour inconditionnel, vous m'avez permis d'avancer avec confiance. Ce mémoire est l'aboutissement de mon travail, mais il est avant tout le reflet de tout ce que vous m'avez offert, transmis et inspiré. Merci du fond du cœur.

Je remercie chaleureusement **Monsieur Merakkeb**, mon encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, sa rigueur scientifique et sa bienveillance tout au long de ce travail. Son accompagnement m'a été d'une grande aide et m'a permis d'avancer sereinement.

Mes remerciements s'adressent également à **Madame Kheloui**, co-encadrante, pour ses orientations claires, sa pédagogie et son soutien constant. Sa contribution a fortement enrichi ce mémoire.

Je tiens à remercier les membres du jury, Monsieur le Président et Monsieur l'Examinateur, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour le temps qu'ils y consacrent.

Je n'oublie pas de remercier l'ensemble du secteur Génie Civil, en particulier les enseignants pour la qualité de leur enseignement, leur accompagnement tout au long de ma formation, et le personnel de laboratoire, pour leur aide technique, leur disponibilité et leur professionnalisme lors des essais expérimentaux.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, je vous adresse mes sincères remerciements.

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs années d'efforts, à toutes les personnes chères à mon cœur, qui m'ont soutenue, encouragée et inspirée tout au long de ce parcours.

À mes parents, mon **papa** et ma **maman**, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leurs sacrifices, sans lesquels rien de tout cela n'aurait été possible.

À mes frères, **Belaïd**, **Yanis** et **Mohamed**, pour leur présence, leur humour et leur encouragement.

À mes amis fidèles : **Sabrina**, **Mourad**, **Hakim**, **Mouloud**, **Thinhinane**, **Sonia**, et **MASSIVA** pour les rires partagés, les moments d'entraide et les souvenirs inoubliables.

Une pensée très particulière à mes cousines **Vanessa**, **Lynda**, **Fatima**, **Samia**, **Nadia** et **Malak**, qui tiennent une place toute spéciale dans ma vie. Vous êtes, à mes yeux, les sœurs que je n'ai pas eues.

Je dédie ce travail à mes chers cousins, ceux qui sont près de moi et ceux qui sont loin. Votre présence, vos encouragements et vos pensées bienveillantes m'ont toujours accompagnée, même à distance. Cette réussite est aussi la vôtre.

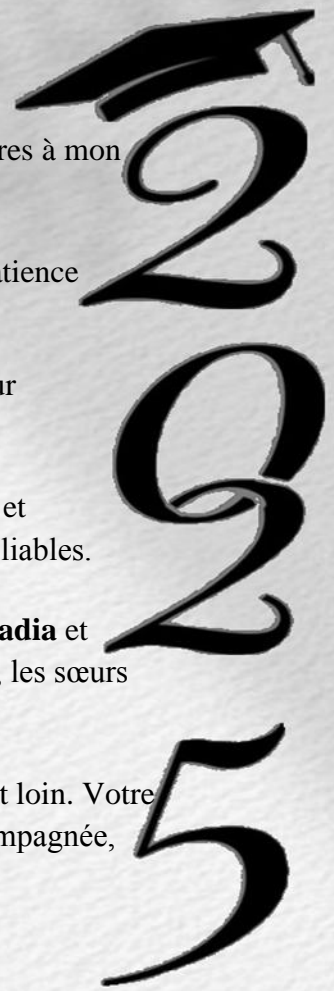
À mes grands-parents, **Mohamed** et **Djouhar**, pour leurs prières et leur tendresse.

À mes oncles **Hamid** et **Nordine**, ainsi qu'à leurs familles, et à ma tante **Fazia** et sa famille, pour leur bienveillance et leur soutien.

À ma chère sœur **Louiz**, avec tout mon amour.

À **Farid Louardani**, pour son implication, sa disponibilité et son aide précieuse tout au long de ce travail, notamment lors des travaux de laboratoire. Merci pour ta collaboration sincère et ton engagement.

À tous les étudiants de la section structure, avec qui j'ai partagé cette belle aventure académique.



LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I-1 les differents types de beton, leurs composition et proprietes resultante	8
Tableau I-2 types de beton renforce composition et avantage	11
Tableau I-3 comparaison des exigences parasismiques sur les armatures transversales du beton selon differentes normes internationales . [22] [36] [37].....	21
Tableau I-4 strategies de confinement du beton : typologies de structures, contextes d'application et objectifs principaux.....	23
Tableau I-5 tableau comparatif des techniques de confinement.....	24

CHAPITRE II

Tableau II-1 classification de la nature et de la qualité du sable en fonction de l'équivalent de sable.....	42
Tableau II-2 Classification des granulats selon leur dimension et qualité.....	44
Tableau II-3 Correction sur le dosage en eau en fonction de D max.....	53
Tableau II-4 Tableau des corrections à apporter au dosage en eau selon le format des granulats, le type de vibration et le dosage en ciment.....	54
Tableau II-5 Tableau des coefficients de compacité selon la consistance, le serrage et le diamètre des granulats	56

CHAPITRE III

Tableau III-1 les resultats des eprouvettes a un confinement de diametre 8 cm.....	97
tableau III-2 les resultats des eprouvettes a un confinement de diametre 12 cm	99
tableau III-3 les resultats des eprouvettes a un confinement de diametre 16 cm	100
tableau III- resultats des eprouvettes confinees avec la grille a	103
tableau III-5 resultats des eprouvettes confinees avec la grille b.....	104
tableau III-6 resultats des eprouvettes confinees avec la grille c	105
tableau III-7 resultats des eprouvettes confinees avec la grille d.....	107

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I-1 l'empire romain.....	3
Figure I-2 le Panthéon de Rome	3
Figure I-3 John Smeaton	3
Figure I-4 Phare d'Eddystone.....	3
Figure I-5 Joseph Aspdin.....	4
Figure I-6 Louis Vicat.....	4
Figure I-7 Joseph Monier.....	4
Figure I-8 système d'Hennebique.....	4
Figure I-9 :François Hennebique.....	4
Figure I-10 Eugène Freyssinet	5
Figure I-11 Pont de Plougastel.....	5
Figure I-12 Les composantes du béton.....	6
Figure I-13 le cycle de transformation chimique du calcaire a la chaux.....	7
Figure I-14 : Procède de fabrication du ciment, du calcaire au clinker	8
Figure I-15 Béton armé.....	9
Figure I-16 Béton précontraint.....	9
Figure I-17 Béton confiné.....	10
Figure I-18 Béton fibré	10
Figure I-19 confinement par des étriers.....	16
Figure I-20 confinement par gainage.....	17
Figure I-21 Confinement par des tubes cft	18
Figure I-22 confinement spirale.....	20
Figure I-23 fibres polymères.....	25
Figure I-24 les nanotubes	25
Figure I-25 fibres de basalte	25
Figure I-26 fibres de carbone.....	26
Figure I-27 Évolution de la cicatrisation des fissures dans le béton : comparaison avant et après 100 jours.....	26
Figure I-28 Poteaux préfabriqués en béton armé : éléments structurels pour constructions modulaires.....	27
Figure I-29 Bras robotiques de précision assemblant des composants complexes.....	27
Figure I-30 un capteur optique intégré qui mesure l'indice de réfraction.....	28
Figure I-31 le Nitinol (alliage nickel-titane).....	29
Figure I-32 dioxyde de titane (TiO2).....	30

Chapitre II

Figure II-1 ciment cpj cem ii 42,5 n.....	33
Figure II-2 sable utilisée (0/3).....	33
Figure II-3 gravier (8/15)	34
figure ii-4 gravier (3/8).....	34
Figure II-5 l'adjuvant utilisée est un super-plastifiant reducteur d'eau.....	34
Figure II-7 sechage des granulats.....	35
Figure II-8 materiel utilisée dans l'essai de masse volumique apparente	36
Figure II-9 materiel utilisée dans l'essai masse volumique absolue	37
Figure II-10 processus de l'essai de masse volumique absolue	38
Figure II-11 materiel utilisée dans l'essai analyse granulometrique.....	39
Figure II-12 essai d'équivalent de sable	40
Figure II-13 resultats de masse volumique absolue et apparente du gravier (3/8)	46
Figure II-14 resultats de masse volumique absolue et apparente du gravier (8/15)	47
Figure II-15 la courbe granulometrique du sable (0/3)	48
Figure II-16 la courbe granulometrique du gravier (3/8)	49

Figure II-17 la courbe granulometrique du gravier (8/15)	50
Figure II-18 la courbe granulometrique des agregats	51
Figure II - 18 : courbe granulometrique globale	55
Figure II-20 quantite d'adjuvant	60
Figure II-21 grille (a, b, c, d).....	63
Figure II-22 decoupe des grilles.....	66
Figure II-23 materiel utilise pour le decoupage des grilles metalliques	66
Figure II-24 mise en forme des cylindres de grille.....	67
Figure II-25 materiel utilise pour la mise en forme.....	67
Figure II-26 exemple de designation d'une eprouvette.....	69
Figure II-27 resultats d'affaissement	72
Figure II-28 positionnement et centrage des cylindres de confinement	73
Figure II-29 cure par immersion	75

Chapitre III

Figure III-1 machine électrohydraulique SEIDNER 2000 & 200	82
Figure III-2 courbe contrainte déformation du béton témoin.....	84
Figure III-6 courbe contrainte déformation de la superposition des trois courbes A.....	87
Figure III-10 courbe contrainte déformation de la superposition des trois courbes B.....	90
Figure III-14 courbe contrainte déformation de la superposition des trois courbes C.....	93
Figure III-18 courbe contrainte déformation de la superposition des trois courbes.....	96
Figure III-19 Courbe des contraintes en fonction du type de mailles (Ø 8 cm).....	98
Figure III-20 Courbe des contraintes en fonction du type de mailles (Ø 12 cm).....	99
Figure III-21 Courbe des contraintes en fonction du type de mailles (Ø 16 cm)	101
Figure III-22 Comparaison des Contraintes en Fonction du Type de Mailles pour Ø 8, 12, et 16 cm.....	102
Figure III-23 Courbe des contraintes de la grille A en fonction de la position de confinement (Ø 8, 12 et 16 cm).....	103
Figure III-23 courbe des contraintes de la grille a en fonction de la position de confinement (ø 8, 12 et 16 cm).....	103
Figure III-24 courbe des contraintes de la grille b en fonction de la position de confinement (ø 8, 12 et 16 cm).....	104
Figure III-25 courbe des contraintes de la grille c en fonction de la position de confinement (ø 8, 12 et 16 cm).....	105
Figure III-26 courbe des contraintes de la grille d en fonction de la position de confinement (ø 8, 12 et 16 cm).....	107
Figure III-27 comparaison des 4 courbe des contraintes des grille a, b,c et d en fonction de la position de confinement (ø 8, 12 et 16 cm).....	108
Figure 28 III.4.4 comparaison des performances mecaniques du beton confine et non confine	109
Figure III-28 eprouvettes du beton temoin avant et apres ecrasement	110
Figure III-29 l'eprouvette bgla8 avant et apres l'ecrasement	111
Figure III-30 l'eprouvette bgla12 avant et apres l'ecrasement	111
Figure III-31 l'eprouvette bgla16 avant et apres l'ecrasement	112
Figure III-32 l'eprouvette bglb8 avant et apres l'ecrasement.....	112
Figure III-33 l'eprouvette bglb12 avant et apres l'ecrasement.....	113
Figure III-34 l'eprouvette bglb16 avant et apres l'ecrasement.....	113
Figure III-35 l'eprouvette bglc8 avant et apres l'ecrasement	114
Figure III-36 l'eprouvette bglc12 avant et apres l'ecrasement	114
Figure III-37 l'eprouvette bglc16 avant et apres l'ecrasement	115
Figure III-38 l'eprouvette bgld8 avant et apres l'ecrasement.....	115

Introduction générale

Le béton est un matériau incontournable dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, apprécié pour sa résistance, sa durabilité et sa polyvalence. Pourtant, il présente un défaut majeur : sa **fragilité**. Lorsqu'il atteint sa résistance maximale, le béton se rompt brutalement, sans possibilité de déformation, ce qui limite sa **ductilité**. Cette faiblesse devient critique dans les zones sismiques, où les structures doivent pouvoir se déformer sans s'effondrer brutalement.

Pour améliorer ce comportement, le **confinement du béton** est une solution efficace. Il consiste à enserrer le béton pour limiter son expansion latérale sous l'effet des charges, retardant ainsi la fissuration et augmentant sa capacité à absorber l'énergie. Ce mémoire s'intéresse à une technique innovante et simple à mettre en œuvre : le **confinement par grilles métalliques losangées**, façonnées en cylindre autour d'éprouvettes de béton.

L'étude porte sur deux paramètres clés :

- **La taille de la maille** de la grille (de 4 cm à 1 cm),
- **Le pourcentage de confinement**, en faisant varier le diamètre du cylindre de grille ($\emptyset 8$ cm, $\emptyset 12$ cm, $\emptyset 16$ cm), correspondant respectivement à **50 %**, **75 %** et **100 %** de la surface de l'éprouvette.

L'objectif est de comprendre comment ces deux facteurs influencent la **résistance** et la **ductilité** du béton, à travers une série d'essais de compression. Ce travail vise à proposer une solution pratique pour améliorer le comportement du béton, notamment dans des contextes structurels exposés à des charges extrêmes.

Chapitre I

Confinement du béton

I.1 Introduction

Aujourd'hui, le béton est largement utilisé dans le domaine de la construction en raison de sa grande résistance à la compression, de sa durabilité face aux agressions extérieures et de sa polyvalence. Il est très apprécié pour la réalisation de divers ouvrages, allant des fondations aux structures complexes. Cependant, malgré ses avantages, le béton présente des limites importantes notamment en termes de résistance à la traction et de fragilité face à des contraintes extrêmes comme les séismes ou les surcharges. C'est pourquoi il est nécessaire de développer des solutions techniques pour améliorer ses performances globales.

Pour répondre à ces défis, le concept de confinement du béton a été étudié. Cette technique vise à renforcer le béton pour augmenter sa ductilité, sa résistance mécanique et sa capacité à absorber l'énergie lors de sollicitations importantes. Plusieurs méthodes de confinement existent, incluant l'utilisation d'armatures en acier, le renforcement par des matériaux composites ou des systèmes externes de confinement.

Le premier chapitre de ce texte présente les bases nécessaires à la compréhension du béton et des techniques de confinement. Il aborde les généralités sur le béton, son comportement mécanique et les différentes méthodes de confinement. Une attention particulière est portée aux applications pratiques de ces techniques, en particulier dans les zones sismiques où le confinement joue un rôle crucial pour renforcer la stabilité des structures et assurer la sécurité des occupants. Cela permet de mieux comprendre les défis liés à l'amélioration des performances du béton dans un contexte de construction moderne et exigeant. [1] [2] [15]

I.2 L'évolution historique du béton :

Le béton est un matériau de construction ancien dont l'histoire remonte à environ 7000 av. J.-C. au Proche-Orient, où les peuples néolithiques utilisaient un mélange de chaux et de calcaire pour construire des structures simples. En Égypte ancienne (vers 3000 av. J.-C.), on utilisait des mortiers à base de gypse et de chaux pour assembler les blocs des pyramides. L'ancêtre du béton moderne est apparu avec l'Empire romain, qui a développé l'opus caementicium : (un mélange de chaux, de pouzzolane (cendre volcanique) et d'agrégats). Ce béton romain, à la fois solide et durable, a permis la construction de monuments emblématiques comme le Panthéon de Rome, qui est toujours debout près de 2000 ans plus tard. Grâce à la pouzzolane, il pouvait durcir sous l'eau, ce qui a rendu possible la construction de ports et d'aqueducs. [1] [3]



Figure I-1 l'empire romain[3]



Figure I-2 le Panthéon de Rome[3]

Après la chute de l'Empire romain, l'utilisation du béton a diminué pendant plusieurs siècles. Au Moyen Âge, des techniques similaires sont réapparues, notamment en Europe, avec l'utilisation de mortiers à base de chaux dans la construction des châteaux et des cathédrales. Le véritable renouveau du béton moderne a eu lieu au XVIIIe siècle grâce à John Smeaton, un ingénieur britannique, qui a développé en 1756 un ciment hydraulique à base de chaux et d'argiles calcaires. Ce nouveau matériau a été utilisé pour la construction du phare d'Eddystone, l'une des premières structures modernes en béton durable. [7]



Figure I-3 John Smeaton[7]



Figure I-4 Phare d'Eddystone[7]

Au XIXe siècle, Joseph Aspdin a mis au point le ciment Portland en Angleterre. Il a créé ce matériau en chauffant un mélange de calcaire et d'argile, ce qui a donné un ciment plus résistant et plus pratique pour les travaux de construction. Il a choisi de l'appeler « Portland » en raison de sa ressemblance avec une pierre naturelle très populaire à cette époque. Pendant ce temps, en France, Louis Vicat se penchait sur les liants hydrauliques et contribuait à une meilleure compréhension du durcissement du ciment. [1]



Figure I-5 Joseph Aspdin[1]



Figure I 6 Louis Vicat[1]

Le béton armé est une grande innovation apparue dans la seconde moitié du XIXe siècle. En 1849, Joseph Monier, un jardinier français, a eu l'idée de mettre des tiges de fer dans des pots de fleurs en béton pour les rendre plus résistants. Cette technique a ensuite été améliorée par François Hennebique, qui a breveté en 1892 un système de construction en béton armé. Ce matériau réunit les avantages du béton (résistance à la compression) et de l'acier (résistance à la traction), ce qui le rend très adapté pour construire des bâtiments et des ponts. [7]

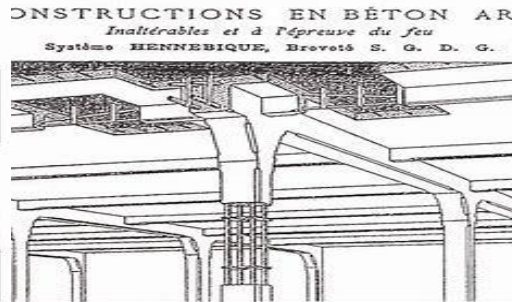


Figure I-7 Joseph Monier [7] Figure I-8 système d'Hennebique [7] Figure I-9 :François Hennebique [7]

Au XXe siècle le béton est devenu un matériau incontournable dans le domaine de l'architecture et des grands projets de construction. Une avancée majeure a été le développement du béton précontraint par Eugène Freyssinet dans les années 1920, permettant la construction de structures plus légères et plus résistantes, comme le pont de Plougastel. De nos jours, le béton est utilisé dans quasiment tous les domaines de la construction : gratte-ciel, ponts, routes, barrages, etc. Cependant, la production de ciment génère une importante quantité de CO₂,

incitant les chercheurs à explorer des solutions plus écologiques telles que les bétons géopolymères ou ceux fabriqués à partir de matériaux recyclés.. [1]



Figure I-10 Eugène Freyssinet [1]



Figure I-11 Pont de Plougastel [1]

En résumé, l'histoire du béton montre une incroyable évolution, de la simple utilisation des mortiers de chaux par les anciennes civilisations à l'utilisation des bétons innovants d'aujourd'hui. De nombreux inventeurs, des Romains à Joseph Aspdin et Joseph Monier, ont joué un rôle essentiel dans la transformation du béton en un matériau indispensable dans le domaine de la construction. Cette évolution témoigne à la fois des besoins techniques de chaque époque et de la créativité humaine, faisant du béton un élément essentiel de l'ingénierie moderne. [1] [3] [7]

I.3 Généralités sur le béton :

I.3-1 La composition du béton :

Le béton est un matériau composite dont la structure est basée sur quatre éléments principaux :

- **Liant** : Généralement du ciment (souvent du ciment Portland), il assure la cohésion du mélange grâce à la réaction d'hydratation qui transforme la pâte en un matériau solide.
- **Granulats** : Constitués de sable (granulat fin) et de gravier (granulat gros), ils forment la structure du béton, lui assurant sa solidité, son équilibre et sa résistance.
- **Eau** : Elle permet la réaction chimique d'hydratation du ciment et facilite la mise en œuvre du mélange. La quantité d'eau influe directement sur la résistance finale du béton.
- **Adjuvants** : Ce sont des produits ajoutés en faible quantité pour modifier certaines propriétés du béton : accélérer ou retarder la prise, améliorer la maniabilité, augmenter la durabilité, etc.

La combinaison équilibrée de ses composants rend le béton un matériau polyvalent et essentiel dans l'industrie de la construction. [1]

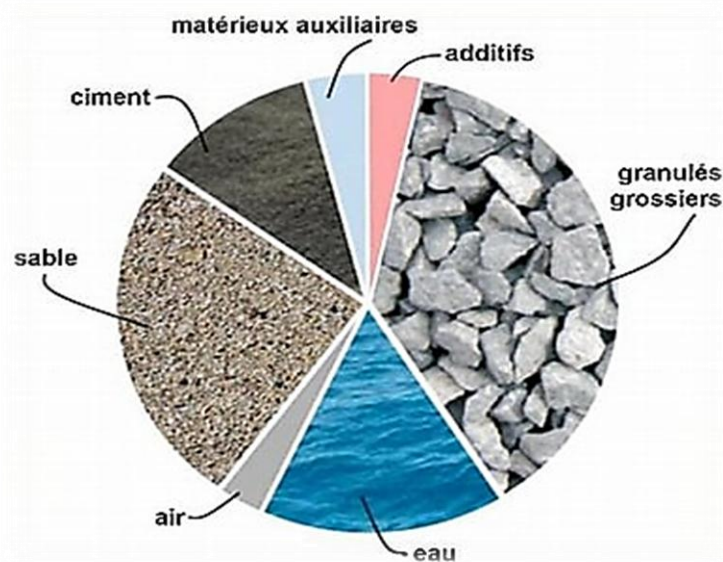


Figure I-12 Les composants du béton [1]

I.3-2 Les types du béton

Le béton est un matériau de construction utilisé depuis des siècles. Il a beaucoup évolué, depuis le béton romain, connu pour sa solidité, jusqu'au béton Portland, devenu le béton le plus utilisé aujourd'hui. Chaque époque a développé des types de béton différents pour répondre à ses besoins. Dans cette partie, nous allons présenter les principaux types de béton, leurs caractéristiques et leurs utilisations dans le domaine du génie civil. [2]

- **Le béton romain :**

Le liant utilisé à l'origine était fabriqué à partir de chaux aérienne, obtenue en chauffant un calcaire très pur à haute température (900–1000 °C). Ce processus provoque la décomposition du calcaire en chaux vive, qui, une fois mélangée à de l'eau, donne de la chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ce liant devait durcir à l'air, par réaction avec le CO_2 de l'atmosphère (carbonatation). Ainsi, les moulages ne pouvaient pas être trop épais, car l'air devait pénétrer pour assurer le durcissement. Ce type de matériau est donc mal adapté aux pièces volumineuses et impossible à utiliser dans des milieux humides ou sous l'eau, comme les installations portuaires. [3]

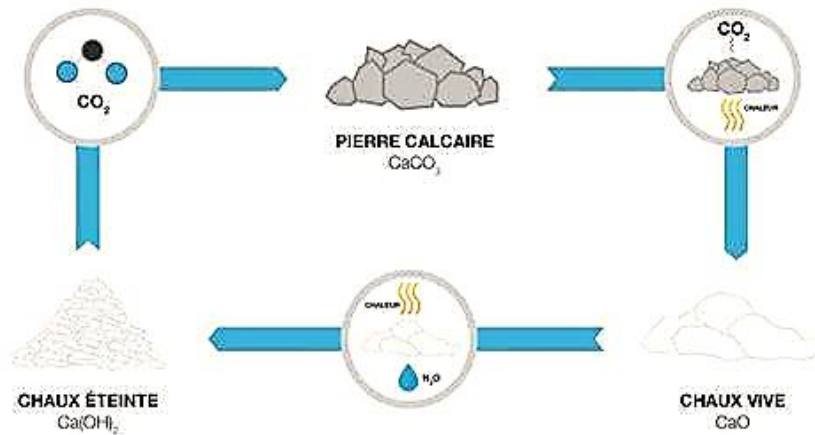


Figure I-13 le cycle de transformation chimique du calcaire à la chaux [3]

Pour pallier ces limites, les Romains ont ajouté de la pouzzolane (cendres volcaniques) au mélange. Grâce à cette réaction pouzzolanique, l'eau devient un acteur du durcissement, rendant inutile le séchage à l'air. Le béton obtenu devient hydraulique : il durcit même sous l'eau, ce qui permet de construire des ports, aqueducs ou fondations immergées. En plus, la présence de résidus de chaux (vive ou éteinte) permettait au matériau de présenter une certaine capacité d'autoréparation en cas de fissures, par réaction avec l'eau.

Ce béton romain à la pouzzolane a surtout été utilisé dans les régions proches de sources volcaniques, comme Rome et Naples. Il est important de noter que les recettes variaient selon les lieux et les époques, ce qui explique que seules les structures construites avec les bonnes formulations sont encore debout aujourd'hui. [3]

- **Le béton du ciment Portland :**

De nos jours, on utilise majoritairement du ciment de portland. La pouzzolane y a été remplacée par d'autres sources de silice (SiO_2) comme l'argile. Les méthodes de fabrication ont été améliorées pour rendre le matériau plus performant. Le fait de chauffer le mélange calcaire et d'argile (ou schiste) à très hautes températures (900 à 1450 °C) va produire un matériau très dur qui s'appelle le clinker. Le clinker sera broyé pour fabriquer un ciment performant. Pour les dalles et les murs, on utilisera du 100% clinker. Pour cimenter les briques, cela pourra être 80 % de clinker avec 20 % de laitier (les résidus de hauts fourneaux). [4]

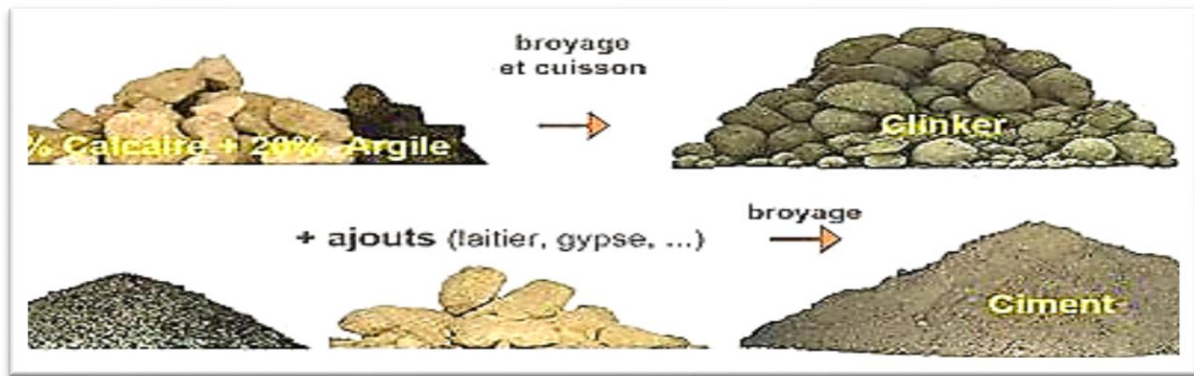


Figure I-14 : Procède de fabrication du ciment, du calcaire au clinker

Cependant, il existe d'autres types de béton ou formulations spécifiques qui ont marqué des avancées technologiques ou qui répondent à des besoins particuliers. Voici une liste de ces bétons. [5]

Tableau I-1 Les différents types de béton, leurs composition et propriétés résultante

Type de béton	Composition spécifique	Propriétés résultantes
Béton ordinaire	Ciment Portland, sable, gravier, eau.	Résistance standard (20-40 MPa), polyvalent.
Béton léger	Ciment, granulats légers (argile expansée, pierre ponce), eau.	Léger, isolant thermique et acoustique.
Béton lourd	Ciment, granulats denses (barytine, magnétite, fer), eau.	Haute densité, protection contre les radiations.
Béton haute performance (BHP)	Ciment, fumée de silice, granulats fins, adjuvants, faible teneur en eau.	Résistance élevée (50-150 MPa), durable.
Béton géopolymère	Liants géopolymères (aluminosilicates activés), granulats, eau.	Faible empreinte carbone, résistant aux températures élevées.
Béton de chanvre	Chaux, fibres de chanvre, eau.	Léger, isolant, écologique.
Béton réfractaire	Ciment alumineux, granulats réfractaires (chamotte), eau.	Résiste à des températures supérieures à 1000°C.
Béton autoplaçant (BAP)	Ciment, granulats, adjuvants superplastifiants, eau.	Très fluide, ne nécessite pas de vibration.

Les différents types de béton se distinguent par leurs méthodes de renforcement, tout en conservant une composition de base similaire.

- **Béton armé** : Le béton armé est une combinaison de béton standard renforcé par des barres d'acier. Ce genre de béton associe les bénéfices des deux composants : l'acier est performant en traction, tandis que le béton est capable de supporter des charges en compression. Cette combinaison rend le béton armé particulièrement approprié pour des utilisations telles que les poutres, les dalles et les ponts, où des charges considérables sont importante. [6]



Figure I-15 Béton armé. [6]

- **Béton précontraint** : La composition du béton précontraint inclut des câbles d'acier déjà tendus. Cette méthode crée une compression interne qui renforce la résistance à la traction du béton. Le béton précontraint est parfaitement adapté aux structures qui nécessitent une longue portée, comme les ponts ou les grandes dalles, mais aussi à celles qui sont exposées à des charges dynamiques, puisqu'il permet de minimiser le risque de fissures. [7]



Figure I-16 Béton précontraint. [7]

- **Le béton confiné :** est constitué de béton standard entouré d'une enveloppe de confinement, qui est généralement faite d'acier ou de fibres composites. Cette amélioration augmente la ductilité du matériau et sa résistance à des forces extrêmes, en particulier dans des situations comme les tremblements de terre ou les explosions. On utilise fréquemment le béton confiné dans les régions sismiques et pour des composants structuraux essentiels tels que les colonnes et les piliers de pont. [7]



Figure I-17 Béton confiné. [7]

- **Le béton fibré :** Le béton fibré est amélioré par des fibres (qu'elles soient métalliques, synthétiques ou en verre) réparties au sein de la matrice du béton. Ces fibres sont conçues pour renforcer la résistance du matériau face aux fissures, aux chocs et à l'usure. Cette sorte de béton convient particulièrement pour des utilisations comme les revêtements industriels, les dalles et les composants préfabriqués, tout comme pour des réparations nécessitant une résistance supérieure. [7]

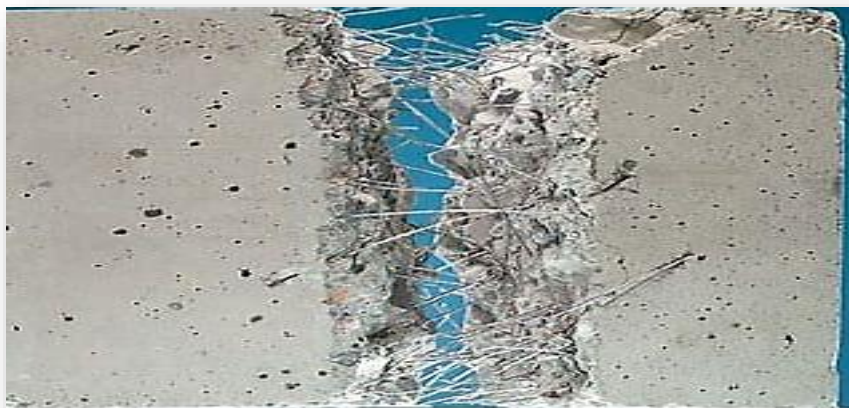


Figure I-18 Béton fibré . [7]

Tableau I-2 Types de béton renforcé composition et avantage

Technique	Composition de base	Élément de renforcement	Avantages
Béton armé	Béton standard	Armatures en acier	Résistance à la traction, polyvalence.
Béton précontraint	Béton standard	Câbles d'acier tendus	Augmente la portée, réduit les fissures.
Béton confiné	Béton standard	Enveloppe de confinement (acier, composites)	Améliore la ductilité et résiste aux charges extrêmes.
Béton fibré	Béton standard	Fibres (métalliques, synthétiques, verre)	Résistance accrue à la fissuration et à l'impact.

I.3-3 Les propriétés mécanique du béton :

Pour comprendre comment le béton se comporte sous diverses contraintes et assurer son efficacité dans les constructions, il est crucial d'examiner ses caractéristiques mécaniques.

a) Résistance à la compression du béton :

La résistance à la compression du béton est sa capacité à supporter des forces axiales qui tendent à le comprimer. C'est la propriété mécanique la plus importante et la plus fréquemment mesurée pour le béton. Elle est généralement déterminée par des essais sur des éprouvettes cylindriques, après un âge de 28 jours. Les résultats sont exprimés en Mégapascals (MPa). [2]

- **Béton ordinaire** : La résistance à la compression varie généralement entre 20 et 40 MPa. [2]
- **Béton à haute performance (BHP)** : Peut atteindre jusqu'à 100 MPa ou plus. [2]

- **Facteurs Influent** : Plusieurs facteurs influencent la résistance à la compression du béton notamment :
 - **Qualité et dosage des composants** : Le type et la quantité de ciment, d'eau et de granulats utilisés affectent la résistance.
 - **Rapport eau/ciment** : Un rapport eau/ciment faible augmente la résistance et un rapport E/C élevé donne un béton fluide et moins résistant
 - **Conditions de cure** : La température et l'humidité pendant la cure influencent la prise et la résistance finale.
 - **Âge du béton** : La résistance augmente avec le temps, notamment durant les premiers jours après la mise en œuvre. [2]

b) Résistance à la traction du béton :

La traction du béton est la force que le béton peut supporter avant de se fissurer ou se rompre lorsqu'on tire dessus dans des directions opposées. Le béton est nettement moins résistant à la traction qu'à la compression, ce qui explique souvent le recours à l'armature métallique pour compenser cette faiblesse. Elle est généralement évaluée par des méthodes indirectes, car il est difficile d'appliquer une force de traction directe de manière fiable sur ce matériau. Les essais les plus courants sont :

- **Essai brésilien (ou essai de fendage)** : Cette méthode consiste à appliquer une force de compression sur une éprouvette cylindrique fendue longitudinalement, ce qui génère des contraintes de traction dans le plan de fendage. Cela permet d'estimer la résistance à la traction sans avoir à appliquer directement une force d'étirement. [2]
- **Essai de flexion** : Dans cet essai, une éprouvette est soumise à une flexion, ce qui crée des contraintes de traction dans la partie inférieure de l'éprouvette. Cela permet également d'évaluer la résistance à la traction de manière indirecte. [2]

Ces méthodes sont préférées car elles offrent une approche plus pratique et fiable pour évaluer la résistance à la traction du béton.

La résistance à la traction est environ 10 % de la résistance à la compression. Pour un béton ordinaire, cela signifie une résistance à la traction de l'ordre de 2 à 5 MPa. [2]

c) Module d'élasticité (Module de Young) :

Le module d'élasticité, ou module de Young, mesure la rigidité du béton et sa capacité à se déformer de façon élastique lorsqu'une contrainte est appliquée. Il indique à quel point le béton peut se déformer sans se casser sous l'effet d'une charge normale. Plus ce module est élevé, plus le béton est rigide. Pour un béton ordinaire, il varie généralement entre 20 et 40 GPa, tandis qu'il peut dépasser 50 GPa pour un béton à haute performance. Ce module dépend de plusieurs facteurs : la résistance à la compression, la nature des granulats, l'âge du béton et les conditions de cure. Le module d'élasticité est utilisé dans la loi de Hooke : $\sigma = E \times \varepsilon$ ou σ est la contrainte, E le module d'élasticité, et ε la déformation. Cela permet de calculer les déformations élastiques dans les structures. Ce paramètre est donc essentiel pour le dimensionnement et l'analyse du comportement des structures en béton [8]

d) Déformation et fluage :

Lorsque le béton est soumis à une charge, il subit une déformation instantanée appelée déformation élastique. Cette déformation est réversible, si la charge est retirée rapidement, le béton reprend presque totalement sa forme initiale, conformément à la loi de Hooke.

Cependant, si la charge est maintenue dans le temps, le béton continue à se déformer lentement, c'est le phénomène de fluage. Le fluage est une déformation différée et irréversible, causée par la migration de l'eau contenue dans la pâte de ciment et par la réorganisation progressive de sa microstructure. Ce comportement viscoélastique du béton est particulièrement important dans les structures massives, les poutres à grande portée ou les poteaux fortement sollicités, car il peut provoquer des déformations importantes à long terme, affecter les alignements, la stabilité, voire la durabilité des ouvrages.

Il est donc essentiel de prendre en compte le fluage dans les calculs de structure, notamment pour les bâtiments, ponts et ouvrages précontraints. [9]

e) Résistance au cisaillement :

La résistance au cisaillement du béton est sa capacité à résister à des forces qui provoquent un glissement entre différentes parties du matériau. Cette propriété est cruciale dans les éléments de structure tels que les poutres et les poteaux, qui sont souvent soumis à des efforts de cisaillement. [10]

f) Ductilité et fragilité :

Le béton est un matériau qui peut supporter de fortes compressions, mais il est peu ductile, c'est-à-dire qu'il se casse brusquement sans se déformer. Il ne prévient donc pas la rupture, ce qui peut être dangereux dans certaines structures. Pour améliorer ce comportement, on ajoute de l'acier au béton : on parle alors de béton armé. L'acier est un matériau très ductile, capable de se plier ou s'allonger avant de casser. Grâce à cette combinaison, le béton armé peut se déformer davantage sous l'effet des charges, ce qui le rend plus sûr et plus résistant, surtout en cas de chocs, de séismes ou de surcharges.

Cette ductilité permet aussi d'absorber l'énergie et d'éviter des ruptures soudaines, ce qui est essentiel pour la sécurité des structures. [11]

g) Comportement sous charges cycliques :

Le béton peut être soumis à des charges répétées, appelées aussi charges cycliques, comme celles rencontrées dans les ponts, les chaussées, ou les structures soumises à des vibrations mécaniques. Sous ce type de sollicitations, le béton peut subir un phénomène appelé fatigue, qui se traduit par une diminution progressive de sa résistance mécanique.

Les cycles de chargement et de déchargement entraînent des déformations accumulées, surtout au début de l'effort, et peuvent provoquer une dégradation lente mais continue du matériau. Cette fatigue est souvent aggravée par l'apparition de fissures et par une perte de raideur du béton, ce qui affecte négativement la durabilité et la sécurité de la structure à long terme. Il est donc important de prendre en compte les effets de la fatigue dans la conception des ouvrages soumis à des sollicitations répétées, afin d'assurer leur résistance dans le temps. [12]

h) Dilatation thermique :

Le béton se dilate ou se contracte en fonction des variations de température, un phénomène mesuré par le coefficient de dilatation thermique, qui est d'environ 10 à 12 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ (micromètre par mètre et par degré Celsius). Ce coefficient indique comment le béton change de longueur en réponse aux changements de température. Il est crucial de prendre en compte ce phénomène dans la conception des structures pour éviter que les contraintes thermiques ne provoquent des fissures. En effet, les variations de température peuvent générer des forces internes qui, si elles ne sont pas correctement gérées, peuvent endommager la structure. [13]

i) Comportement sous charges dynamiques

Le béton peut être soumis à des charges dynamiques comme les chocs ou les explosions, qui sont rapides et très intenses. Dans ces cas, le béton peut sembler plus résistant que sous des charges lentes, car il n'a pas le temps de se déformer.

Cependant, il reste fragile, car les contraintes se propagent vite et peuvent provoquer des fissures soudaines ou des ruptures locales. C'est pourquoi il est important d'étudier spécifiquement le comportement du béton dans ce type de situation pour assurer la sécurité et la durabilité des structures. [14]

I.4 La technique de confinement du béton :

I.4.1 définition de confinement du béton :

Le confinement du béton est une technique utilisée en génie civil pour améliorer ses propriétés mécaniques, en particulier sa résistance et sa capacité à se déformer sans se casser. Cette méthode consiste à entourer le béton avec des armatures transversales, comme des étriers ou des cadres, pour limiter son expansion latérale lorsqu'il est soumis à des charges de compression. En empêchant cette dilatation, le béton devient plus résistant et peut supporter des déformations plus importantes avant de se fissurer ou de se rompre. Le confinement est surtout utilisé dans les zones exposées aux séismes, ou dans les éléments structurels très sollicités comme les poteaux et les poutres. [15]

I.4.2 Objectifs du confinement du béton :

Le confinement du béton poursuit plusieurs objectifs clés :

- **Améliorer la ductilité** : Le confinement limite l'expansion latérale du béton sous compression, ce qui permet de retarder l'initiation et la propagation des fissures. En maintenant une pression transversale autour du béton, il favorise une répartition plus stable des contraintes. Ainsi, le béton peut subir des déformations plus importantes sans rupture immédiate. Ce comportement est essentiel pour les structures exposées aux séismes, car il permet d'absorber l'énergie tout en conservant la stabilité de l'élément. [15]
- **Augmenter la résistance à la compression** : En empêchant le gonflement latéral du béton comprimé, le confinement réduit les zones de concentration de contraintes et retarde l'endommagement interne. Cette contrainte latérale appliquée par l'armature de confinement permet au béton de supporter des charges verticales plus

importantes qu'en l'absence de confinement. Ce renforcement est particulièrement utile pour les éléments porteurs, comme les poteaux, soumis à des efforts élevés. [15]

- **Contrôler la fissuration** : Le confinement agit comme une barrière mécanique qui limite l'ouverture et la propagation des fissures. Cela réduit la perméabilité du béton et protège les armatures métalliques contre l'humidité et les agents agressifs. En réduisant la fissuration, le confinement contribue à préserver l'intégrité de la structure et à prolonger sa durée de vie, notamment dans les environnements agressifs ou humides. [15]

I.4.3 Méthodes de confinement du béton :

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser le confinement du béton, chacune adaptée à des situations spécifiques :

a) Armatures transversales (étriers ou cadres) :

Les armatures transversales, comme les étriers ou les cadres, sont des barres en acier placées autour des armatures longitudinales. Elles sont mises perpendiculairement et espacées régulièrement pour maintenir le béton serré et empêcher qu'il ne gonfle sur les côtés.

Dans les zones sensibles, comme les poteaux ou les angles de la structure, ces étriers sont plus rapprochés pour mieux confiner le béton. Cette disposition renforce le béton et améliore sa résistance ainsi que sa capacité à se déformer sans se fissurer et rompre brutalement, surtout en cas de forte charge ou de séisme. [16]

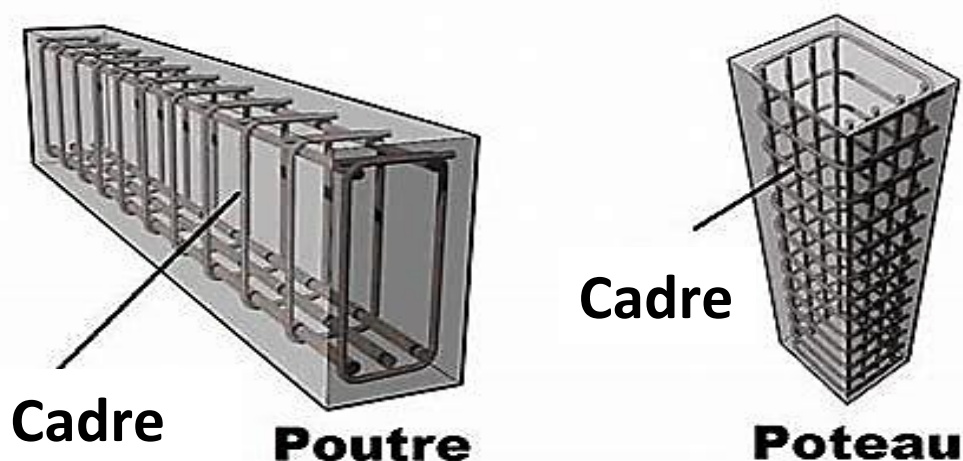


Figure I-19 confinement par des étriers [16]

Gainage ou enveloppes de confinement :

Cette méthode de confinement utilise des matériaux composites, tels que la fibre de carbone ou la fibre de verre, pour envelopper les éléments en béton. Les gaines sont enroulées autour des poteaux ou des poutres afin de les confiner, ce qui améliore leur résistance et leur ductilité. Cette technique est particulièrement adaptée pour le renforcement des structures existantes, car elle est facile à mettre en œuvre et ne nécessite pas de modifications majeures. Elle permet d'améliorer la durabilité et la sécurité des structures de manière efficace, tout en préservant leur intégrité et sans affecter leur fonctionnement. [17]

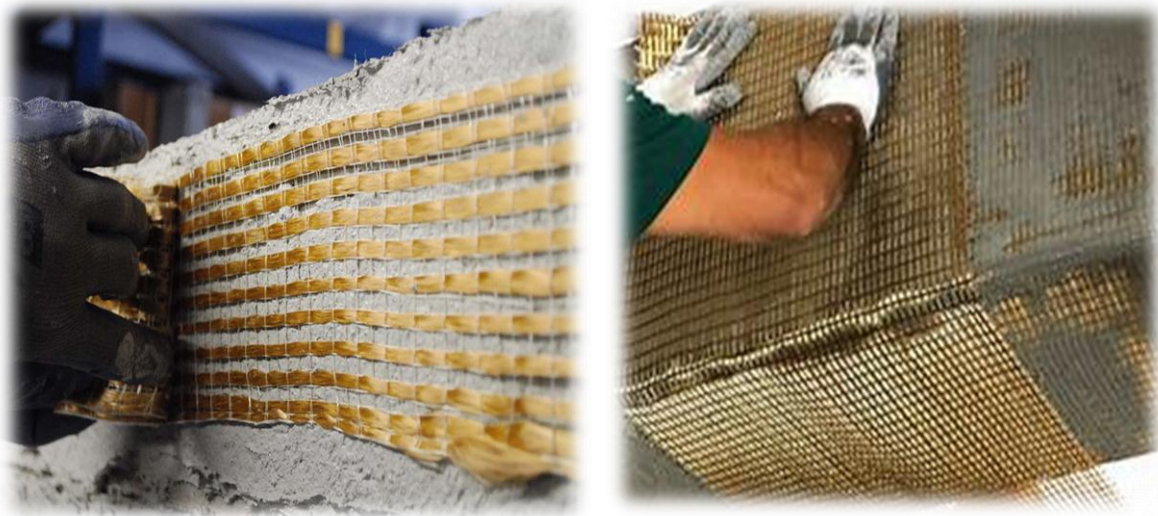


Figure I 20 confinement par gainage [17]

Béton confiné par des tubes (CFT - Concrete Filled Tubes) :

Dans cette méthode, le béton est coulé dans des tubes en acier, qui servent d'armature de confinement continue. Les tubes en acier empêchent l'expansion latérale du béton, ce qui a pour effet d'augmenter sa résistance et sa ductilité. Cette technique est couramment utilisée pour les poteaux dans les bâtiments de grande hauteur ou les ponts, où elle permet de supporter des charges élevées tout en assurant une grande stabilité et sécurité structurelle. L'utilisation de tubes en acier comme confinement offre une solution robuste et efficace pour les structures qui nécessitent une résistance exceptionnelle. [18]

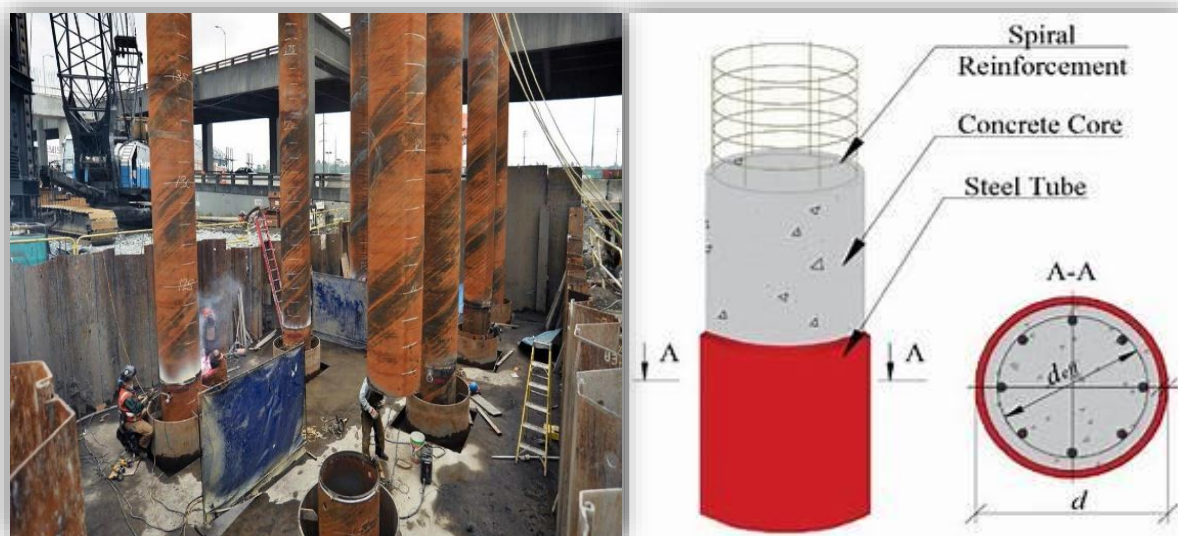


Figure I-21 Confinement par des tubes cft [18]

I.4.4 Applications du confinement du béton :

Le confinement du béton est utilisé dans diverses applications pour améliorer la performance des structures :

- **Poteaux et Poutres** : Les poteaux et les poutres, soumis à des charges axiales élevées ou à des moments de flexion importants, bénéficient considérablement du confinement. Ce processus renforce ces éléments en limitant leur expansion latérale, ce qui améliore leur résistance et leur capacité à supporter des contraintes sans rupture. [19]
- **Éléments Préfabriqués** : Le confinement est également utilisé pour renforcer les éléments préfabriqués, comme les poutres et les dalles, pendant leur transport et leur mise en place sur le chantier. Cela réduit les risques de dommages et améliore la résistance des éléments, contribuant ainsi à une construction plus robuste et durable. [19]
- **Renforcement des structures existantes (rénovation sismique)** : De nombreux bâtiments anciens ne satisfont pas aux normes parasismiques actuelles, ce qui les rend vulnérables aux tremblements de terre. Pour améliorer leur résistance sismique sans avoir recours à une reconstruction complète, le confinement du béton est souvent utilisé comme méthode efficace. [19]

- **Ponts et viaducs :** Les ponts et viaducs sont exposés à des conditions environnementales difficiles, telles que l'humidité et le gel-dégel, ainsi qu'à des charges dynamiques provenant du trafic et du vent. Pour assurer leur durabilité et leur sécurité, le confinement du béton joue un rôle essentiel. [19]

I.4.5 Confinement dans les zones sismiques :

Le confinement du béton joue un rôle important en ingénierie parasismique. Il aide les structures à mieux résister aux forces répétées et dans plusieurs directions provoquées par les séismes. En renforçant les éléments comme les poteaux, il augmente à la fois leur capacité à supporter des charges et leur aptitude à se déformer sans se rompre brutalement, ce qui est essentiel pour absorber et dissiper l'énergie sismique. [20]

a) Mécanismes du confinement :

Les armatures transversales (étriers ou spirales) génèrent une pression latérale qui confine le noyau de béton, limitant son expansion (gonflement) sous charges sismiques. Ce procédé :

- Augmente la résistance à la compression de 15 à 25% selon la densité des armatures
- Multiplie par 4 la déformation sans rupture passant de 0,35% à 1,5%. (0,35 % c'est la déformation maximale typique du béton non confiné. Il se casse rapidement après une faible déformation et 1,5 % c'est la déformation que peut atteindre un béton bien confiné. Il résiste plus longtemps, même s'il se fissure, et ne se casse pas immédiatement.)
- Maintient la cohésion du matériau après fissuration, évitant l'éclatement [21]

b) Exigences réglementaires :

Les zones critiques des structures, comme les nœuds entre poteaux et poutres, subissent de fortes sollicitations en cas de séisme. Pour assurer leur bon comportement, les réglementations imposent des exigences principales concernant les armatures transversales :

- **Pourcentage minimal d'armatures transversales (0,6% à 1,2% du volume)**

Ce pourcentage correspond à la quantité minimale d'acier transversal, comme les étriers, à disposer dans les zones critiques telles que les nœuds poteaux-poutres, afin d'assurer un bon comportement de la structure en cas de séisme.

Ces zones subissent des efforts complexes comme le cisaillement, la flexion et la torsion. Sans un confinement adapté, le béton peut se fissurer, éclater ou se rompre de manière fragile.

Un taux d'armatures transversales compris entre 0,6 % et 1,2 % du volume permet de :

- Confiner le noyau de béton, ce qui renforce sa résistance et améliore sa capacité à se déformer sans rupture brutale,
- Assurer la transmission des efforts entre les armatures longitudinales et le béton, limitant les risques de rupture par perte d'adhérence,
- Contrôler l'apparition des fissures et limiter leur ouverture, ce qui prolonge la durabilité de l'élément structurel. [22]

- **Utilisation de spirales plutôt que d'étriers rectangulaires**

Les armatures transversales peuvent être disposées sous forme d'étriers rectangulaires ou de spirales hélicoïdales (forme du ressort). L'emploi de spirales présente plusieurs avantages importants :

- Elles assurent un confinement plus uniforme et continu du noyau de béton, car la spirale exerce une pression latérale constante tout autour, contrairement aux étriers qui agissent de manière ponctuelle. (Chaque étrier agit seulement à l'endroit où il est placé)
- Elles offrent une meilleure résistance à l'éclatement du béton soumis à des charges répétées ou à de fortes déformations, car la spirale limite la propagation des fissures.
- Elles augmentent la ductilité du béton confiné, qui peut alors supporter des déformations beaucoup plus grandes, parfois jusqu'à quatre fois celles du béton non confiné.
- Elles sont environ 40 % plus efficaces que les étriers traditionnels pour absorber l'énergie sismique et prévenir les ruptures soudaines.



Figure I-22 confinement spirale [38]

Dans la norme algérienne RPA 99 version 2003, l’emploi des spirales continues, aussi appelées cerces hélicoïdales, est interdit dans les poteaux circulaires. Le règlement impose l’usage de cerces droites individuelles dans ce cas précis.

En revanche, au niveau international, notamment dans les normes ACI 318 et ACI 315, l’utilisation de spirales est autorisée et même recommandée dans certains éléments verticaux comme les colonnes circulaires, les pieux forés et les fondations profondes. Ces normes définissent clairement les exigences concernant le diamètre, l’espacement et la résistance des spirales afin d’assurer un confinement efficace du béton.

Ce type de confinement permet une meilleure performance sous charges sismiques, en améliorant la résistance, la ductilité et la durabilité des éléments structuraux. [38]

Tableau I-3 Comparaison des exigences parasismiques sur les armatures transversales du béton selon différentes normes internationales . [22] [36] [37]

Norme	Zone sismique concernée	Espacement maximal des étriers	Diamètre minimal des armatures transversales	Exigences spécifiques
Eurocode 8	Zones 3 à 5	15 cm	8 mm	Confinement renforcé exigé dans les zones critiques (poteaux, extrémités, nœuds)
Norme Japon	Zones de forte sismicité	10 cm	10 mm	Utilisation fréquente de spirales pour plus d’efficacité
Norme Algérie (RPA99/2003)	Zones IIa, IIb, III (forte sismicité)	10 à 15 cm selon la zone et l’élément	8 mm (poteaux) / 6 mm (poutres)	Exige des voiles de contreventement, et des règles strictes pour les bâtiments sensibles

c) Techniques de confinement dans les zones sismiques :

Pour améliorer la résistance des structures situées en zones sismiques, différentes techniques de confinement sont appliquées aux éléments les plus sollicités, comme les poteaux, les poutres et les nœuds, afin de mieux absorber les efforts sismiques et de préserver leur stabilité. [16]

- **Confinement des poteaux**

Les poteaux sont des éléments très sollicités lors des séismes. Pour renforcer leur comportement, des techniques de confinement sont utilisées afin d'augmenter leur résistance et leur capacité à se déformer sans casser.

- **Étriers en acier fermés** : Ces armatures sont placées autour des barres principales du poteau. Elles empêchent le flambement des aciers longitudinaux et limitent l'expansion latérale du béton sous l'effet des charges. Leur espacement est réduit dans les zones critiques, surtout aux extrémités, où les efforts sismiques sont les plus intenses.
- **Gaines composites** : En enveloppant les poteaux avec des bandes de fibres (carbone ou verre), on applique une pression latérale continue sur le béton. Cela augmente sa résistance et sa déformabilité, tout en gardant la structure légère. Cette méthode est souvent utilisée pour renforcer des structures existantes sans travaux lourds. [16]

- **Confinement des poutres**

Les poutres sont soumises à des efforts de flexion et de cisaillement, surtout au niveau des liaisons avec les poteaux. Pour améliorer leur résistance, des techniques de confinement sont utilisées dans les zones critiques.

- **Armatures transversales** : Des étriers en acier sont placés régulièrement le long des poutres. Ils limitent l'expansion latérale du béton et empêchent le flambement des barres longitudinales, ce qui renforce la capacité de la poutre à résister au cisaillement.
- **Renforcement des nœuds** : Les zones où les poutres rencontrent les poteaux (appelées nœuds) sont soumises à des efforts complexes pendant un séisme. On y ajoute des armatures supplémentaires, comme des étriers plus rapprochés ou des barres disposées en diagonale, pour mieux répartir les charges et éviter la rupture.[16]

- **Renforcement des structures existantes**

Pour améliorer la résistance sismique des bâtiments déjà construits, plusieurs solutions sont possibles :

- **Gaines en fibre de carbone** :

Ce sont des bandes légères, solides et faciles à poser autour des poteaux ou poutres. Elles forment une enveloppe qui confine l'élément en béton, ce qui augmente sa résistance et sa capacité à se déformer sans se casser.

- **Enveloppes en acier :**

Des plaques ou coques métalliques sont fixées autour des éléments porteurs. Cette solution renforce leur rigidité et les rend plus résistants face à des efforts importants.

- **Précontrainte additionnelle :**

On applique une force de compression externe (par câbles ou vérins) pour améliorer la capacité de l'élément à supporter les charges. Cela permet de mieux résister aux effets d'un séisme. [16]

d) Exemples de structures confinées dans des zones sismiques

Selon Badoux, M. et Lestuzzi, P. (2023), Génie parasismique : Conception et dimensionnement des bâtiments, 2ème édition, Eyrolles. Voici un tableau clair et synthétique résumant les exemples de structures confinées dans les zones sismiques, avec leur contexte, localisation et techniques utilisées :

Tableau I-4 Stratégies de confinement du béton : typologies de structures, contextes d'application et objectifs principaux

Type de structure	Contexte principal	Exemple pays	Techniques de confinement principales	Objectifs clés
Bâtiments résidentiels et commerciaux	Résistance aux séismes fréquents et déformations cycliques	Japon	Étriers rapprochés, spirales en acier, matériaux composites (fibre de carbone/verre)	Améliorer la ductilité et la sécurité des occupants
Ponts et viaducs	Résistance aux forces sismiques et charges dynamiques (trafic, vent)	Californie	Gaines en fibre de carbone autour des piliers	Renforcer la résistance, prolonger la durée de vie
Structures critiques (hôpitaux, écoles)	Maintien de la fonctionnalité après séisme	Turquie	Armatures transversales denses, spirales, renforcement composite	Garantir sécurité, continuité d'activité et résistance aux déformations

I.4-6 Avantages et défis du confinement

Le tableau suivant présente une comparaison des principales techniques de confinement du béton, en soulignant pour chacune leurs avantages et leurs limites. Cette analyse permet d'aider au choix de la solution la plus adaptée selon le type de structure, les exigences de performance, les contraintes économiques et les conditions du chantier. Ces techniques sont utilisées aussi bien en conception qu'en renforcement des structures existantes, notamment dans les zones sismiques ou à fortes sollicitations. [15]

Tableau I-5 tableau comparatif des techniques de confinement

Technique	Avantages	Inconvénients
Armatures métalliques	<ul style="list-style-type: none"> - Coût raisonnable - Technique bien connue et maîtrisée - Conforme aux normes standards 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque de corrosion - Poids important - Difficile à mettre en œuvre en rénovation
Matériaux composites (FRP)	<ul style="list-style-type: none"> - Très léger - Ne rouille pas - Pose rapide - Grande résistance mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix élevé - Fragile aux rayons UV - Nécessite une protection spéciale
Confinement par tubes CFT	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne résistance et ductilité - Construction plus rapide - Pas besoin de coffrage 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus cher que le béton armé classique - Connexions complexes avec d'autres éléments - Contrôle de qualité strict lors du remplissage

Chaque technique de confinement présente des avantages et des limites.

Les armatures métalliques sont abordables et faciles à utiliser, mais peuvent rouiller avec le temps. Les composites (FRP) sont très résistants et légers, mais coûtent cher et nécessitent une protection contre le soleil. Les tubes CFT permettent une construction rapide et solide, mais leur prix et leur complexité peuvent poser problème.

Il faut donc choisir la méthode selon les exigences techniques, le budget et les conditions du projet. [15]

I.4-7 Innovations récentes en matière de confinement du béton (matériaux avancés et techniques émergentes)

a) Nouvelles générations de matériaux composites

- **Nanocomposites FRP (fiber-reinforced polymer) :** Ce sont des matériaux composites renforcés par des fibres polymères dans lesquels on intègre de très petites particules appelées nanotubes de carbone (entre 1 et 3 % en poids). Ces nanotubes améliorent significativement les propriétés mécaniques du matériau, augmentant la résistance à la traction jusqu'à 3000 MPa, ce qui rend le béton confiné plus solide et durable. De plus, ils réduisent la perméabilité du béton aux agents corrosifs, ce qui est particulièrement utile dans des environnements marins agressifs, prolongeant ainsi la durée de vie des ouvrages comme les ponts ou les infrastructures côtières. [15]



Figure I-23 fibres polymères [15]

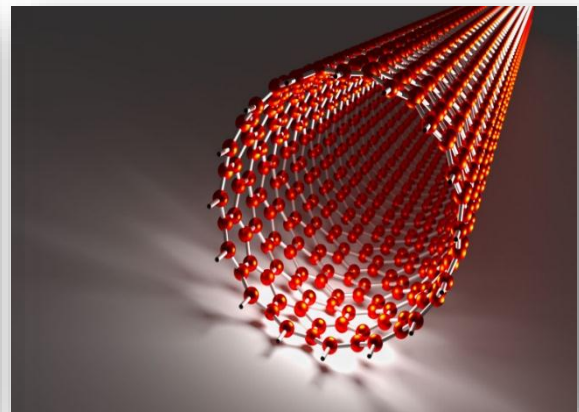


Figure I-24 les nanotubes [15]

- **Fibres hybrides :** sont un mélange de deux types ou plus de fibres différentes intégrées dans le béton pour combiner les avantages de chaque fibre., typiquement des fibres de carbone très résistantes avec des fibres de basalte plus ductiles (flexibles). Cette combinaison optimise à la fois la résistance et la capacité à se déformer sans casser. Elle permet aussi de réduire les coûts de 15 à 25 % par rapport aux composites classiques en fibres de carbone seules. Ces fibres hybrides offrent un meilleur comportement sous charges répétées, comme lors de séismes, ce qui est idéal pour renforcer des structures sensibles telles que des poteaux dans des écoles situées en zone sismique. [24]



Figure I-25 fibres de basalte [24]



Figure I-26 fibres de carbone [24]

- **Matrices auto-cicatrisantes (Béton auto-cicatrisant) :** Ce type de béton contient une matrice polymère avec des microcapsules. Ces microcapsules renferment soit une résine spéciale, soit des bactéries capables de produire de la calcite (un minéral naturel).

Quand une fissure apparaît (jusqu'à 0,3 mm), les capsules se brisent et libèrent leur contenu, ce qui permet de reboucher la fissure automatiquement. Ce processus restaure jusqu'à 90 % de la résistance initiale du béton et peut prolonger la durée de vie des structures de 30 %, surtout dans les milieux agressifs. Ce principe est étudié par le projet européen « **HealCon** », qui vise à l'appliquer aux infrastructures sensibles. [25]

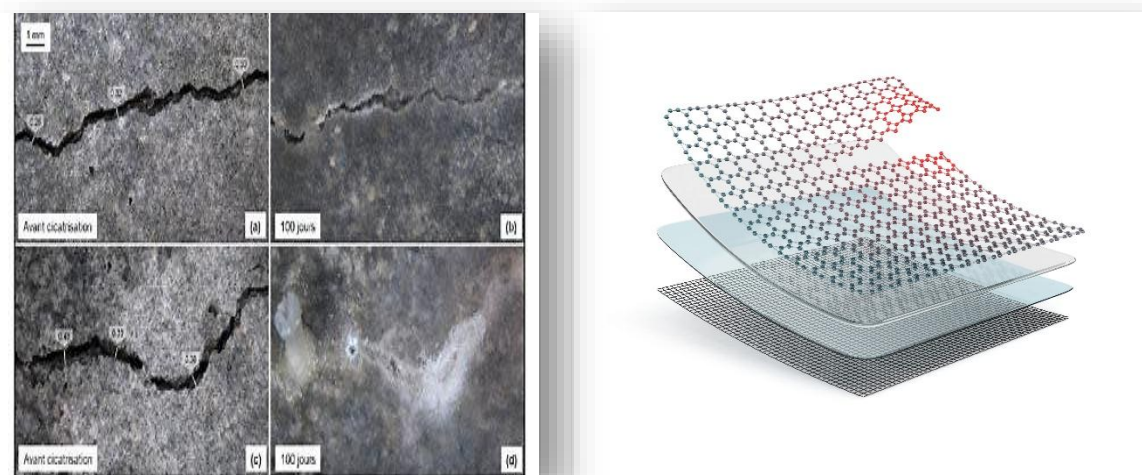


Figure I-27 Évolution de la cicatrisation des fissures dans le béton : comparaison avant et après 100 jours [25]

b) Technologies innovantes de mise en œuvre :

- **Préfabrication modulaire :** Cette technique consiste à fabriquer en usine des éléments standards de béton (comme des panneaux ou des cercles) équipés de connecteurs brevetés, qui sont ensuite assemblés rapidement sur le chantier. Cela permet de gagner jusqu'à 40 % de temps par rapport aux méthodes traditionnelles. Par exemple, 120 poteaux confinés ont pu être installés en seulement 3 jours dans un parking souterrain à Tokyo, illustrant l'efficacité de cette méthode [26]



Figure I-28 Poteaux préfabriqués en béton armé : éléments structurels pour constructions modulaires [26]

- **Robotisation :** L'utilisation de bras robotiques pour poser avec précision des bandes de matériaux composites (FRP) sur les structures permet une application très fine et régulière, avec une précision de ± 1 mm. Des logiciels optimisent les trajectoires pour réduire les pertes de matériaux de 15 %. Une solution appelée "AutoWrap" a été testée sur 20 chantiers en 2023, montrant un bon potentiel pour automatiser et améliorer la qualité des renforcements. [27]



Figure I-29 Bras robotiques de précision assemblant des composants complexes [27]

- **Monitoring intégré (Surveillance intelligente des structures) :** La surveillance intelligente des structures utilise des capteurs à fibres optiques intégrés dans le béton pour détecter des déformations très faibles, jusqu'à 0,01 mm. Ces capteurs sont associés à des algorithmes d'intelligence artificielle qui analysent les données en continu. Cela permet de prévoir les dégradations avec une précision de 92 % sur une période de cinq ans, facilitant une maintenance préventive efficace. Le projet « SmartConf » en Suisse applique cette technologie à des ponts routiers pour renforcer la sécurité et prolonger leur durée de vie. [28]

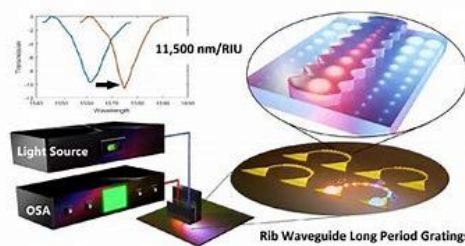


Figure I-30 un capteur optique intégré qui mesure l'indice de réfraction [28]

c) Approches bio-inspirées et durables

- **Geopolymères :** Les géopolymères sont des matériaux utilisés à la place du ciment traditionnel pour réduire l'impact environnemental. Ils permettent de diminuer jusqu'à 70 % les émissions de CO₂. En plus d'être écologiques, ils développent une résistance élevée dès les premières 24 heures, atteignant environ 30 MPa. Ils sont compatibles avec les systèmes de confinement en fibres composites (FRP), assurant une bonne adhérence. Cela en fait une solution durable et performante pour le béton confiné. [29]
- **Composites biosourcés :** Les composites biosourcés sont des matériaux fabriqués à partir de fibres naturelles comme le lin. Ces fibres sont traitées pour être plus résistantes, avec une rigidité proche de 40 GPa. Ils coûtent environ 30 % moins cher que les fibres de verre traditionnelles. Ces matériaux sont également biodégradables de manière contrôlée, ce qui permet de choisir leur durée de vie entre 20 et 50 ans. Ils sont

particulièrement adaptés aux constructions temporaires. En France, le projet BioConf étudie leur utilisation pour ce type de bâtiments. [30]

- **Structures biomimétiques** Certaines innovations en génie civil s'inspirent de la nature, notamment des structures internes des os, qui sont à la fois légères et solides. En utilisant des logiciels de modélisation topologique, les ingénieurs peuvent créer des formes optimisées qui utilisent seulement la matière nécessaire, sans perte de performance. Cette méthode permet de réduire jusqu'à 25 % la quantité de matériau utilisé. Grâce à l'impression 3D, il devient possible de fabriquer ces formes complexes, notamment pour des noyaux de confinement. Cela ouvre de nouvelles possibilités pour construire des structures plus légères, tout en gardant une bonne résistance, ce qui est particulièrement utile dans les zones sismiques ou les constructions à haute performance. [31]

d) Solutions intelligentes :

- **Alliages à mémoire de forme** : Ces alliages, comme le Nitinol (alliage nickel-titane), peuvent se déformer puis retrouver leur forme initiale grâce à une activation thermique ou électrique en moins de 10 secondes, sont placés autour des poteaux ou colonnes en béton sous forme de fils ou d'anneaux. Ils sont d'abord déformés, puis activés par la chaleur ou l'électricité. Une fois activés, ils reprennent leur forme initiale et exercent une compression sur le béton. Ils sont utilisés pour appliquer une précontrainte active sur le béton confiné, améliorant sa résistance aux charges dynamiques. Des tests à grande échelle ont été réalisés par l'équipe du University of Nevada, Reno sur un viaduc autoroutier reconstitué d'environ 33 m de long et 181 tonnes, installé sur des rails sismiques. [32] [39]

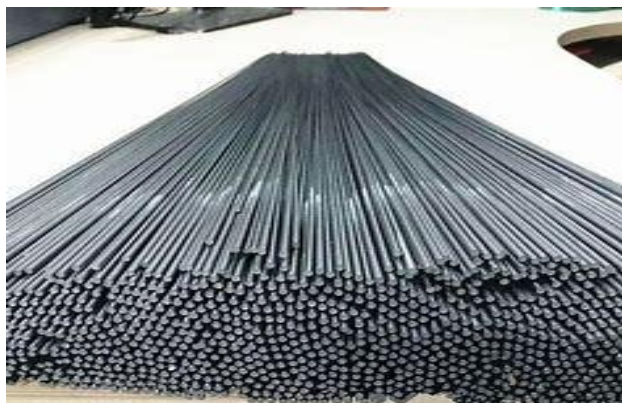


Figure I-31 le Nitinol (alliage nickel-titane) [39]

- **Revêtements actifs** : Certains revêtements innovants à base de nanoparticules de dioxyde de titane (TiO_2) sont conçus pour rendre les structures en béton plus intelligentes et plus durables. Ces revêtements ont plusieurs fonctions. D'abord, le TiO_2 agit comme un agent photocatalytique : il décompose les polluants présents dans l'air lorsqu'il est exposé à la lumière, ce qui aide à garder les surfaces plus propres et à améliorer la qualité de l'air autour des bâtiments. Ensuite, ces revêtements changent de couleur selon le pH, ce qui permet de détecter visuellement des changements chimiques, par exemple en cas d'infiltration acide ou de corrosion. Enfin, ils peuvent contenir des couches conductrices qui réchauffent la surface, empêchant la formation de givre ou de glace en hiver. Cela permet de réduire la consommation d'énergie pour le dégivrage de près de 40 %, tout en prolongeant la durée de vie de la structure. [33]



Figure I-32 dioxyde de titane (TiO_2) [33]

- **Systèmes adaptatifs** : Les systèmes adaptatifs sont des technologies avancées qui permettent à une structure en béton de s'ajuster automatiquement en fonction des forces qu'elle subit. Ils utilisent des actionneurs piézoélectriques, c'est-à-dire de petits dispositifs capables de se déformer ou de bouger légèrement lorsqu'ils reçoivent un courant électrique. Grâce à ces mouvements, ils peuvent modifier la raideur (la rigidité) du béton confiné en temps réel. Ce processus est géré par des algorithmes d'apprentissage automatique, qui analysent en continu les efforts exercés sur la structure et ajustent le comportement du système pour éviter les dommages. Le projet européen

"AdaptConf" (2022–2026) développe ce type de confinement intelligent pour rendre les bâtiments plus sûrs et plus résistants aux événements comme les séismes ou les charges dynamiques. [40]

Ces innovations intègrent des avancées matérielles, des techniques de mise en œuvre innovantes, des concepts inspirés du vivant et des technologies intelligentes, afin d'améliorer la résistance, la longévité et la durabilité écologique du béton confiné, tout en facilitant l'entretien et la rénovation des ouvrages. [34]

I.5 Conclusion :

Ce premier chapitre a permis de présenter les bases essentielles du béton confiné, en abordant son historique, sa composition, son comportement mécanique ainsi que les différentes techniques de confinement. Le confinement améliore significativement la résistance et la ductilité du béton, renforçant ainsi la sécurité et la durabilité des structures. Malgré quelques contraintes liées à sa mise en œuvre, le béton confiné reste une solution efficace et largement utilisée en génie civil. Cette introduction pose les fondations nécessaires pour approfondir l'étude du comportement et des applications du béton confiné dans les chapitres suivants. [35]

Chapitre II

Présentation et caractéristique des matériaux utilisés

II.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau fondamental en génie civil, reconnu pour sa solidité, sa durabilité et sa polyvalence. Cependant, pour garantir ses bonnes performances sur le terrain, il est essentiel de bien maîtriser sa composition. La méthode Dreux-Gorisse permet précisément d'ajuster les dosages des différents constituants (ciment, eau, granulats, adjuvants) afin d'obtenir un béton adapté aux exigences mécaniques et aux conditions de mise en œuvre.

Malgré ses qualités, le béton présente une faiblesse naturelle face aux efforts de traction et aux sollicitations extrêmes, notamment dans des contextes sismiques ou à fortes charges. Pour surmonter cette limite, plusieurs techniques de renforcement ont vu le jour. Parmi elles, le confinement par grilles métalliques, et en particulier les grilles à mailles losangiques, s'est révélé efficace pour améliorer à la fois la résistance et la capacité de déformation du béton (sa ductilité).

Cette étude repose donc sur une double approche :

L'application de la méthode Dreux-Gorisse pour concevoir une formulation de béton.

L'analyse expérimentale de l'influence du confinement par grilles métalliques, en variant la taille des mailles et le diamètre des cylindres de grille.

Des essais de compression seront réalisés sur plusieurs configurations afin d'évaluer les performances mécaniques de chaque combinaison. L'objectif est d'identifier les solutions les plus efficaces pour des applications concrètes en construction, en réhabilitation d'ouvrages existants, ou dans le développement de bétons techniques plus performants.

II.2 Description des matériaux utilisés

II.2.1 Ciment :

Le ciment utilisé est un CPJ CEM II 42,5 N, un choix idéal pour les bétons courants grâce à ses performances équilibrées. Avec une résistance garantie de 42,5 MPa à 28 jours, il assure une bonne durabilité tout en restant facile à mettre en œuvre. Sa composition optimisée en fait un produit polyvalent et fiable pour la plupart des applications structurelles standard



Figure II-1 ciment CPJ CEM II 42,5 n

II.2.2 Granulats

Les granulats utilisés sont de nature courante et proviennent d'une carrière locale. Trois fractions granulaires ont été sélectionnées :

a) Sable 0/3 mm :

Le sable 0/3 mm, utilisé comme granulats fin, joue un rôle essentiel dans la fabrication du béton. Sa finesse permet de remplir les vides entre les gros granulats, ce qui améliore la cohésion du mélange. Cela rend le béton plus facile à manipuler et à mettre en place, tout en contribuant à une structure plus compacte et uniforme.



Figure II-2 Sable utilisée (0/3)

b) Gravier 3/8 mm et gravier 8/15 mm

Ces graviers forment l'armature granulaire du béton, lui conférant sa résistance structurelle et sa stabilité dimensionnelle. Leur rôle est déterminant dans la capacité du matériau à supporter les charges mécaniques.



Figure II-3 Gravier (8/15)



Figure II-4 Gravier (3/8)

II.2.3 Eau de gâchage :

L'eau employée est une eau potable standard, répondant parfaitement aux critères normatifs pour la fabrication du béton. Elle remplit deux fonctions essentielles : activer l'hydratation du ciment et réguler la consistance du mélange.

II.2.4 Adjuvants

Un superplastifiant a été incorporé à la formulation pour améliorer significativement la maniabilité du béton à faible rapport eau/ciment. Cet adjuvant hautement performant permet d'obtenir une excellente ouvrabilité tout en maintenant des résistances mécaniques élevées. Son dosage a été optimisé pour répondre aux exigences spécifiques du projet sans altérer les autres caractéristiques du béton



Figure II-5 l'adjuvant utilisée est un super-plastifiant réducteur d'eau

II.3 Mode opératoire et préparation des matériaux

II.3.1 Préparation des échantillons

Quand un échantillon est trop humide, il faut le sécher avant de l'analyser. Le séchage à l'air est la méthode la plus douce car elle ne modifie pas les propriétés du matériau, mais elle prend du temps. Si on utilise la chaleur, il faut contrôler la température : ne pas dépasser 60 °C si l'échantillon contient de l'argile (pour ne pas l'abîmer), ou 102 à 103 °C si ce n'est pas le cas. Il ne faut pas non plus trop le sécher, car on risquerait de perdre les fines particules importantes. Enfin, il est nécessaire de casser les blocs formés pour bien séparer les grains, mais sans les écraser. [42]

II.3.2 Lavage et séchage des granulats

Avant toute caractérisation, les granulats sont lavés à l'eau claire pour éliminer les poussières et impuretés superficielles. Ils sont ensuite séchés à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante, afin de garantir la fiabilité des mesures de masse volumique et d'analyse granulométrique. [42]



Figure II-7 séchage des granulats

II.4 Caractérisation des granulats

II.4.1 Masse volumique apparente NF EN 1097-3 :

La masse volumique apparente représente la masse par unité de volume d'un matériau granulaire (sable, gravier) dans son état naturel, incluant à la fois les grains solides et les vides intergranulaires. Elle s'exprime généralement en kg/m^3 ou en t/m^3 et se calcule selon la formule : [42]

$$\text{Masse volumique apparente } (\rho) = \text{Masse du matériau (kg)} / \text{Volume apparent (m}^3\text{)}$$

Cette caractéristique physique est essentielle pour :

- Le dosage des constituants dans les formulations de béton
- Le calcul des volumes nécessaires en travaux de génie civil
- La conversion entre masses et volumes pour le stockage et le transport

À distinguer de : - La masse volumique réelle (sans les vides)

- La masse volumique compactée (après serrage)

a) matériel utilisée

- Un récipient
- Une balance
- Une raclette
- Une truelle
- Un entonnoir (pour le sable)



Sinon on utilise les mains formant un entonnoir pour les gros Granulats. [42]

Figure II-8 matériel utilisée dans l'essai de masse volumique apparente

b) Processus

- Saisir une quantité de sable avec les deux mains en formant un entonnoir naturel.
- Positionner les mains à environ 10 cm au-dessus d'un récipient étalonné d'un litre.
- Laisser s'écouler le sable librement, à vitesse modérée (ni trop rapide, ni trop lente).
- Maintenir un versement régulier au centre du récipient.
- Continuer jusqu'à formation d'un cône de débordement uniforme sur tout le pourtour du récipient.
- Araser l'excédent à l'aide d'une règle métallique en un mouvement franc et régulier.
- Procéder à la pesée précise du contenu. [42]

II.4.2 Masse volumique absolue NF EN 1097-6

La masse volumique absolue (ou masse volumique réelle) d'un matériau représente la masse par unité de volume des seules particules solides, excluant tout volume de vide intergranulaire ou de porosité interne. Elle s'exprime par la relation : [42]

$$\text{Masse volumique absolue} = \text{masse du matériau (kg)} / \text{volume du matériau (m}^3\text{)}$$

Applications pratiques :

- Calcul de la porosité des granulats
- Détermination précise des volumes solides en formulation béton
- Caractérisation des propriétés intrinsèques des matériaux

La masse volumique absolue ne tient compte que de la matière solide, tandis que la masse volumique apparente intègre les vides entre les grains. [42]

a) matériel utilisé

- Éprouvette graduée
- Balance
- Entonnoir

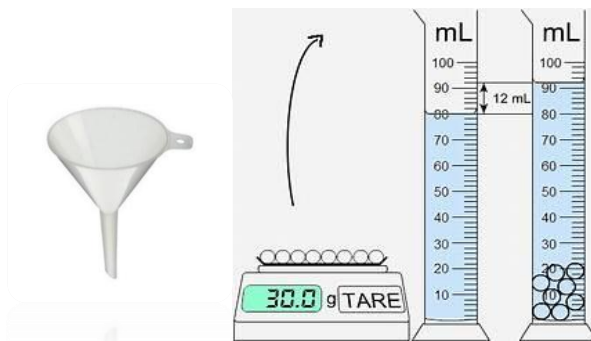


Figure II-9 matériel utilisée dans l'essai masse volumique absolue

b) Processus

- Remplir partiellement une éprouvette graduée avec un volume précis d'eau (noté V_1)
- Noter soigneusement ce volume initial
- Peser avec précision une masse M de l'échantillon (environ 300 g)
- Introduire délicatement le matériau dans l'éprouvette
- Agiter légèrement pour éliminer toute bulle d'air résiduelle
- Observer et noter le nouveau volume atteint (V_2) après immersion complète
- Calculer le volume déplacé par différence : $V = V_2 - V_1$ [42]

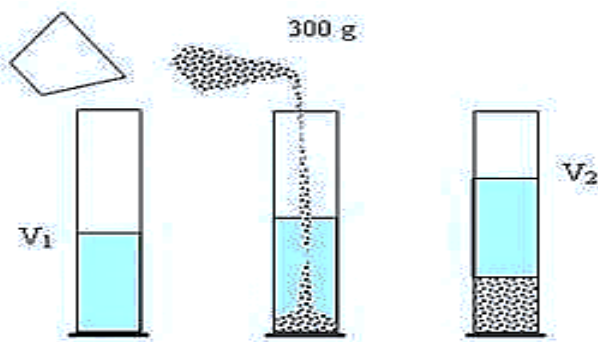


Figure II-10 processus de l'essai de masse volumique absolue

II.4.3 Analyse granulométrique NF EN 933-1 :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution des tailles de grains dans chaque fraction de granulat, essentielle pour assurer la compacité et la maniabilité du béton.

a) Matériel requis

- Colonne de tamis emboîtés par ordre décroissant de mailles
- Récipient de fond et couvercle
- Balance précise (0,1%)
- Chronomètre
- Brosse à tamis
- Tamiseuse



Figure II-11 matériel utilisée dans l'essai analyse granulométrique

b) Mode opératoire :

- Assembler les tamis du plus fin (bas) au plus grossier (haut)
- Placer le récipient de fond sous le dernier tamis
- Fixer le couvercle sur le tamis supérieur
- Verser l'échantillon sur le tamis supérieur
- Effectuer un tamisage pendant 10 minutes
- Peser chaque refus cumulé avec précision
- Vérifier en fin d'essai la concordance avec la masse initiale ($\pm 1\%$)
- Calcul des pourcentages de passants cumulés
- Tracé de la courbe granulométrique
- Détermination des modules granulaires [42]

II.4.4 Le module de finesse NF P 18-540 :

Le module de finesse (MF) est une grandeur utilisée pour caractériser la granulométrie d'un sable ou d'un granulat fin. Il donne une indication sur la finesse ou la grossièreté du sable. [42]

a) Calcul du module de finesse :

- Effectuer un tamisage du sable sur la série de tamis normalisés.
- Mesurer les refus cumulés (pourcentage de matériau retenu sur chaque tamis)
- Additionner les refus cumulés des 6 tamis.
- Diviser par 100 pour obtenir le module de finesse.

$$MF = (\text{Somme des refus cumulés (\%)}) / 100$$

b) Interprétation du module de finesse :

- $MF < 2,2$: Sable très fin (risque de fissuration dans les bétons).
- $2,2 \leq MF \leq 2,8$: Sable fin (idéal pour les bétons courants).
- $MF > 2,8$: Sable grossier (peut nécessiter un ajustement du mélange pour éviter un béton trop rigide). [43]

II.4.5 L'équivalent de sable :

L'essai d'équivalent de sable (ES) est une méthode utilisée pour évaluer la propreté des sables et des granulats fins en mesurant la proportion de particules argileuses ou fines nuisibles. [42]

a) matériel utilisé

- Une éprouvette graduée en plastique avec deux traits repères et bouchon
- Une machine agitatrice manuelle qui secoue l'éprouvette (90 cycles en 30 secondes),
- Un piston taré pour mesurer précisément la hauteur du sable propre,
- Un entonnoir

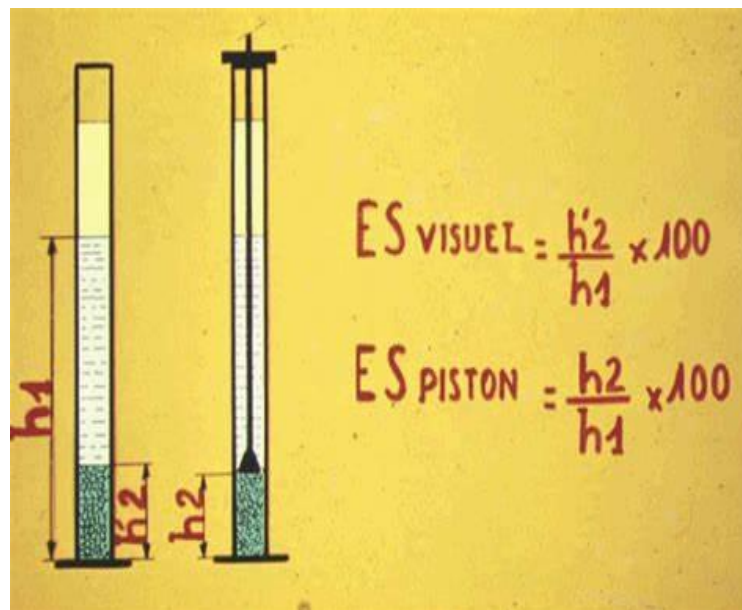


Figure II-12 essai d'équivalent de sable

b) Processus :

- Prélever un échantillon représentatif de sable ou de granulat fin (≤ 5 mm).
- Sécher l'échantillon à l'étuve (105 ± 5 °C) jusqu'à masse constante.
- Tamiser à 5 mm pour éliminer les gros éléments.
- Verser 120 ± 1 g de sable sec dans une éprouvette graduée.
- Compléter avec de l'eau jusqu'au repère 100 ml.
- Boucher l'éprouvette et l'agiter mécaniquement (à l'aide d'un agitateur) pendant 30s pour décoller les fines.
- Placer l'éprouvette sur un support et laisser reposer 20 min pour permettre la sédimentation des particules.
- Lire et noter les résultats de H1 et H2 à l'aide d'une règle [42]

c) Mesure de l'équivalent de sable

Après décantation, mesurer :

- H_1 : hauteur totale du mélange (sable + boue de fines).
- H_2 : hauteur du sable propre (partie supérieure claire).
- Calculer l'équivalent de sable (ES) avec la formule :

$$ES = (H_2 / H_1) \times 100$$

d) Interprétation des résultats

- **Un ES élevé** (proche de 100) indique un sable propre, peu chargé en fines.
- **Un ES faible** (inférieur à 60-70) signale une forte teneur en argiles/fines, ce qui peut nuire à la qualité du matériau (mauvaise adhérence des liants comme le ciment ou le bitume).

Le classement de la qualité du sable en fonction de l'équivalent de sable (ES) est établi selon les recommandations de la norme NF P 18-598

Tableau II-1 classification de la nature et de la qualité du sable en fonction de l'équivalent de sable

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. À rejeter pour les bétons de qualité.
$65 \leq ES < 75$	$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux : propreté admissible pour béton courant, sans risque particulier de retrait.
$75 \leq ES < 85$	$70 \leq ES < 80$	Sable propre : faible pourcentage de fines argileuses, convient pour bétons de haute qualité.
ES \geq 85	ES \geq 80	Sable très propre : quasi absence de fines argileuses, risque de manque de plasticité à compenser par l'eau.

Résultats obtenus :

Echantillon	h_1 (cm)	h_2 (cm)	Equivalent du Sable (%) $SE = 100 \frac{h_2}{h_1}$
N°01	9.7	7.5	77
N°02	9.5	7.4	77
N°03	9.3	7.2	77

- Echantillon N°01 :

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 9.7 \text{ cm} \\ h_2 = 7.5 \text{ cm} \end{array} \right\} SE = 100 \frac{h_2}{h_1} = 100 \frac{7.5}{9.7} = 77\%$$

- Echantillon N°02 :

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 9.5 \text{ cm} \\ h_2 = 7.4 \text{ cm} \end{array} \right\} SE = 100 \frac{h_2}{h_1} = 100 \frac{7.4}{9.5} = 77\% \quad \text{ES} = 77\%$$

- Echantillon N°03 :

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 9.3 \text{ cm} \\ h_2 = 7.2 \text{ cm} \end{array} \right\} SE = 100 \frac{h_2}{h_1} = 100 \frac{7.2}{9.3} = 77\%$$

D'après le Tableau II- 2

$70 \leq ES = 77\% < 80 \longrightarrow$ Sable propre : faible pourcentage de fines argileuses, convient pour bétons de haute qualité

II.5 La composition du béton (Méthode Dreux-Gorisse)

II.5.1 Hypothèses de base

a) Caractéristiques du béton :

- Résistance moyenne à 28 jours..... $f_{c28}=25$ MPA
- Affaissement au cône d'Abrams $A=7$ cm

b) Propriétés des granulats :

- Classe des granulats Courante
- Diamètre maximal du granulat..... D=15 mm
- Coefficient granulaire G=0,45

Tableau II-2 classification des granulats selon leur dimension et qualité [41]

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins D ≤ 16,5	Moyens 20 ≤ D ≤ 31,5	Gros
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

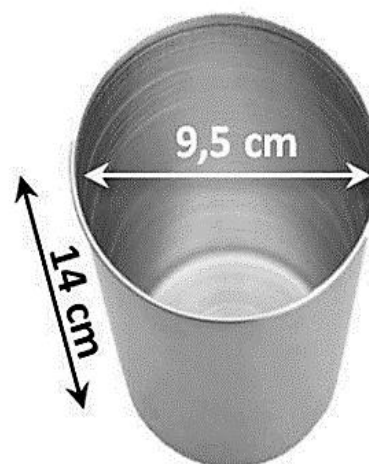
II.5.2 Détermination de la masse volumique

L'essai est réalisé à l'aide d'un récipient cylindrique de pesée avec les dimensions suivantes :

- Hauteur : 14 cm
- Diamètre intérieur : 9,5 cm
- Poids du récipient : 653 g
- Volume : $V = \pi \times r^2 \times h$

$$V = \pi \left(\frac{9,5}{2}\right)^2 \times 14$$

$$V = 992,35 \text{ cm}^3$$



a) **Sable 0/3mm**➤ **La masse volumique apparente**

Exemple de calcul de pesée 01

$$MV_{app} = \frac{M}{V} \rightarrow MV_{app} = \frac{1593}{992,35} = 1,605 \text{ g/cm}^3$$

Pesée	Poids du récipient (g)	Poids du sable(g)	Poids total Récipient + sable (g)	$MV_{app} = \frac{M}{V}$ (g / cm ³)
Pesée 01	653	1593	2246	1,605
Pesée 02	653	1599,3	2252,3	1,611
Pesée 03	653	1616,3	2269,3	1,628

➤ **La masse volumique absolue :**

$$M_{\text{sable}} = 300\text{g}$$

$$V_1 = 300 \text{ ml} = 300 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = 414 \text{ ml} = 414 \text{ cm}^3$$

$$V = V_2 - V_1 = 114 \text{ cm}^3$$

$$MV_{abs} = \frac{M}{V} = \frac{300}{114} = 2,631 \text{ g/cm}^3$$

Pesée	Poids du sable (g)	V1 (cm ³)	V2 (cm ³)	V	$MV_{abs} = \frac{M}{V}$ (g / cm ³)
Pesée 01	300	300	414	114	2,631
Pesée 02	300	300	415	115	2,60
Pesée 03	300	300	416	116	2,58

b) Gravier 3/8 :

➤ **La masse volumique apparente**

Pesée	Poids du récipient (g)	Poids du gravier (g)	Poids total Récipient + gravier (g)	$MV_{app} = \frac{M}{V}$ (g / cm ³)
Pesée 01	653	1451,3	2104,3	1,462
Pesée 02	653	1449,5	2102,5	1,460
Pesée 03	653	1450,6	2103,6	1,461

➤ **La masse volumique absolue :**

Pesée	Poids Gravier (g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	V (cm ³)	$MV_{abs} = \frac{M}{V}$ (g / cm ³)
Pesée 01	200	300	375	75	2,66
Pesée 02	200	300	375	75	2,66
Pesée 03	200	300	372	72	2,77



Figure II-13 résultats de masse volumique absolue et apparente du gravier (3/8)

c) Gravier 8/15 :

➤ **Masse Volumique apparente :**

Pesée	Poids Total (Gravier + récipient)	Poids du récipient	Poids du Gravier	$MV_{APP} = \frac{M}{V}$ g/cm ³
Pesée 1	2140,8	653 g	1487,8 g	1,613
Pesée 2	2143,2	653 g	1490,2 g	1,615
Pesée 3	2139,3	653 g	1486,3 g	1,611

➤ **La masse volumique absolue :**

Pesée	Poids Gravier (g)	V1(cm ³)	V2 (cm ³)	V (cm ³)	$MV_{abs} = \frac{M}{V}$ g/cm ³
Pesée 1	200	300	373	73	2,739
Pesée 2	200	300	372	72	2,777
Pesée 3	200	300	375	75	2,666



Figure II-14 résultats de masse volumique absolue et apparente du gravier (8/15)

II.5.3 Résultats d'analyse granulométrique

a) sable 0/3

Masse = 2000g

Tamis (mm)	Refus(g)	Refus cumulés(g)	Refus cumulés(%)	Tamisât cumulés(%)
5	2.3	2.3	0.115	100
2.5	91.2	93.5	4.675	95.325
1.25	347	440.5	22.02	77.98
0.63	376.2	816.7	40.84	59.16
0.315	487.5	1304.2	65.21	34.79
0.16	477.8	1782	89.1	10.09
0.08	103.3	1885.2	94.26	5.74
Fond	97	1982.2	99.11	0.89

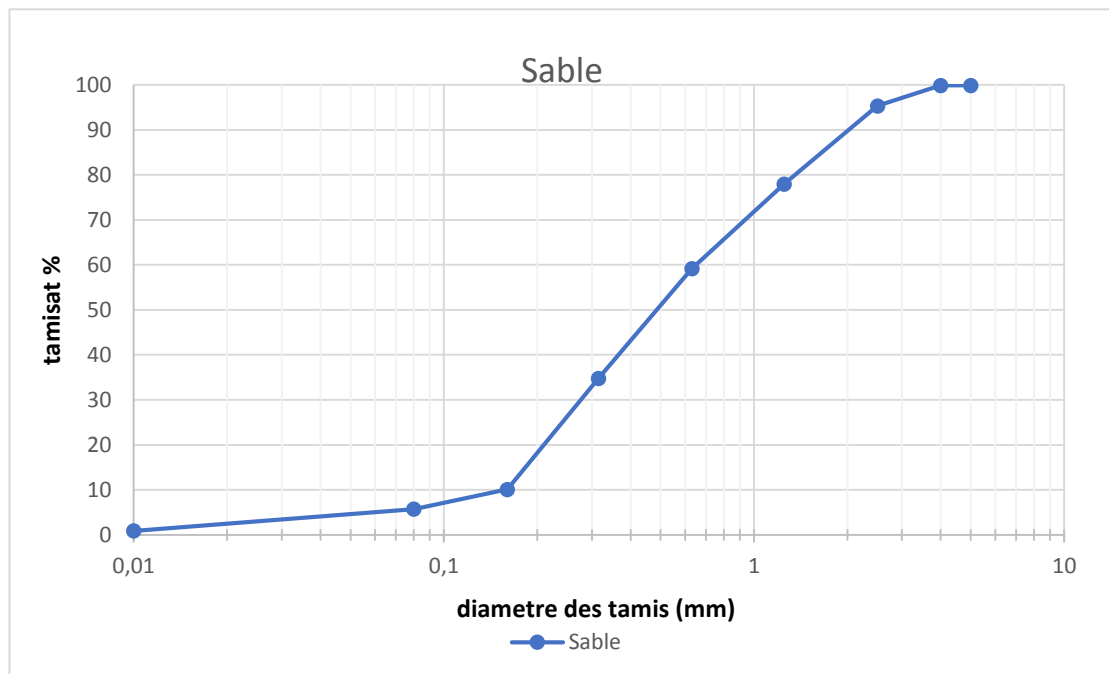


Figure II-15 La courbe granulométrique du sable (0/3)

b) Gravier 3/8

Masse = 5000g

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
8	0	0	0	100
6.3	826.10	826.10	16.52	83.48
5	2582.10	3408.10	68.16	31.83
4	1078.80	4487	89.74	10.26
3.15	454.70	4941.70	98.83	1.16
Fond	58.30	5000	100	0

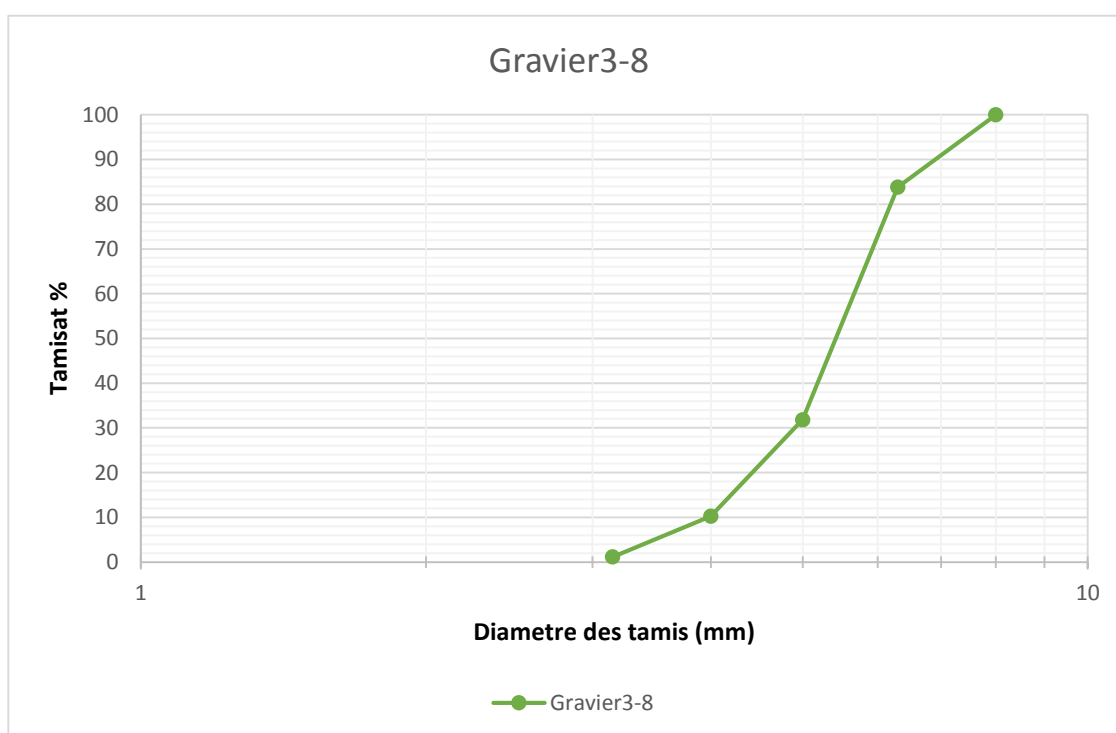


Figure II-16 La courbe granulométrique du gravier (3/8)

c) Gravier 8/15

Masse = 5000g

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
16	0	0	0	100
12.5	1927.80	1927.80	38.55	61.44
10	1305.10	3232.90	64.65	35.34
8	1154.20	4387.10	87.74	12.25
Fond	613	5000	100	0

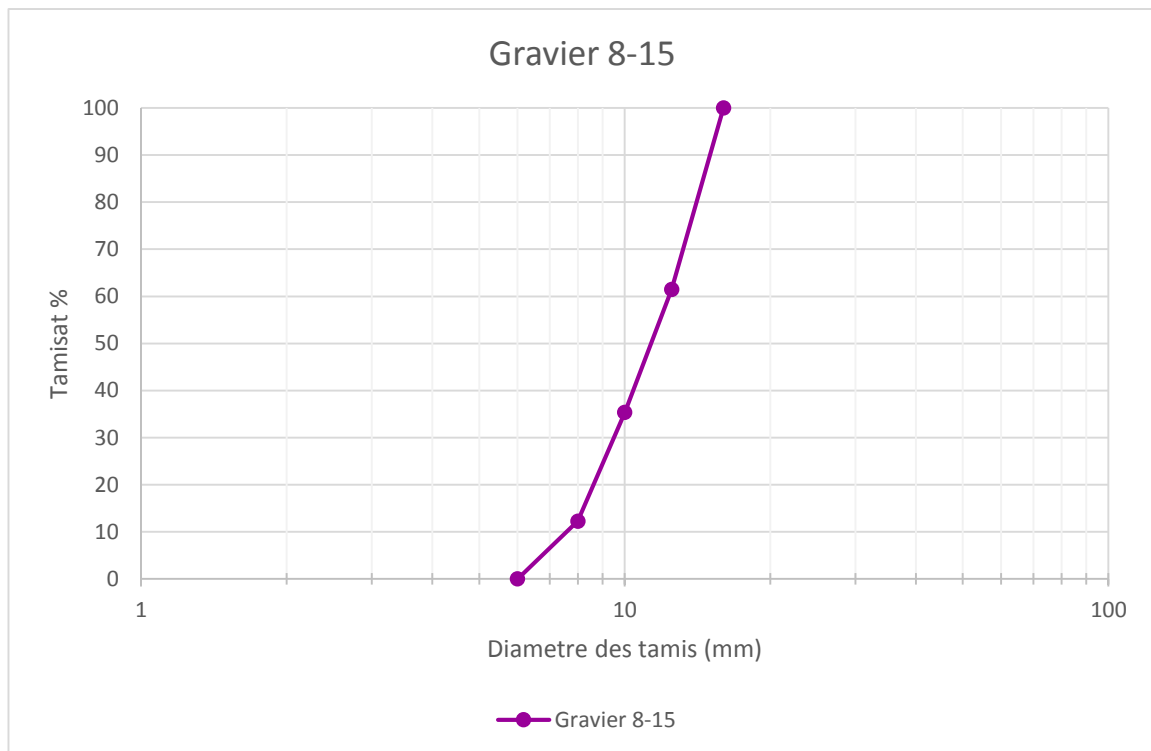


Figure II-17 La courbe granulométrique du gravier (8/15)

II.5.4 La courbe granulométrique

La courbe granulométrique représente la répartition des différentes tailles de grains au sein d'un matériau granulaire, en indiquant la proportion relative de chaque fraction granulométrique. Cette analyse est essentielle pour caractériser les granulats utilisés dans la fabrication du béton. En effet, la forme et la position de cette courbe permettent de comprendre comment les particules se combinent entre elles, influençant directement la compacité et la performance du mélange.

Dans le cadre de la formulation du béton, la courbe granulométrique joue un rôle déterminant. Elle guide le choix et le dosage des granulats (sable, gravier, gravillons) afin d'obtenir une composition équilibrée, où les vides entre les grains sont minimisés. Cette optimisation réduit la quantité de ciment nécessaire, améliore la maniabilité du béton frais et contribue à la durabilité du matériau durci. En respectant des critères granulométriques précis, il est possible de garantir la résistance mécanique et l'étanchéité du béton, tout en facilitant sa mise en œuvre. [7]

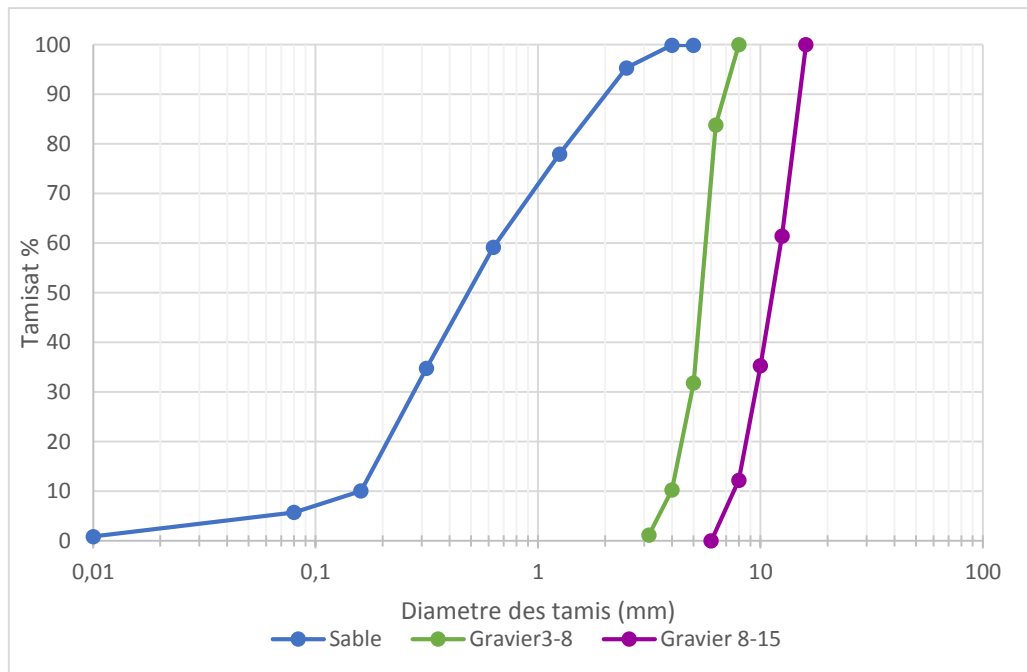


Figure II-18 la courbe granulométrique des agrégats

II.5.5 Module de finesse du Sable

Le module de finesse du sable se calcule avec la formule suivante ;

$$\begin{aligned}
 MF_{\text{sable}} &= \frac{1}{100} \times \sum \text{Refus cumulée en \% des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\} \\
 &= \frac{1}{100} \times (89,1 + 65,21 + 40,84 + 22,02 + 4,67 + 0) \\
 &= \frac{1}{100} \times 221,84 = 2,218
 \end{aligned}$$

$MF_{\text{sable}} = 2.218$ sable préférentiel

- Si $1,8 < MF < 2,2$ Le sable est à majorité de grains fins
- Si $2,2 < MF < 2,8$ Sable Préférentiel
- Si $2,8 < MF < 3,3$ Sable un peu Grossier, donnera des bétons résistants mais moins maniabiles

II.5.6 Détermination du Rapport C/E

Formule de Bolomey

$$f_{cb} = \sigma_c \times G \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Avec :

- f_{cb} : résistance visée à 28 jours,
- C : dosage du ciment en kg/m³ de béton,
- E : dosage de l'eau en kg/m³ de béton,
- σ_c : Classe vraie du ciment en MPa,
- G : coefficient granulaire.

Faire sortir $\frac{C}{E}$

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{cb}}{\sigma_c \times G} + 0,5$$

$$f_{cb} = f_{c28} \times 1,15 = 25 \times 1,15$$

$$f_{cb} = 28,75 \text{ MPa}$$

$$\frac{C}{E} = \frac{28,75}{42,5 \times 0,45} + 0,5 = 2$$

a) Détermination de la quantité du Ciment (C)

De l'abaque (Estimation de la quantité de Ciment) nous aurons

$$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 2 \\ \text{L'affaissement } A = 7 \end{array} \right\} C = 400 \text{ KG/m}^3$$

b) Détermination de la quantité de l'eau (E)

$$\frac{C}{E} = 2 \rightarrow E = \frac{C}{2} = \frac{400}{2} = 200$$

$$E = 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tableau II-3 Correction sur le dosage en eau en fonction de D max [41]

Diamètre en mm	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
Correction en %	+9	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6

$$D = 15 \text{ mm} \rightarrow E_{cor} = E + 4\% = 208 \text{ Kg/m}^3$$

$$E = 208 \text{ kg/m}^3$$

II.5.7 Détermination de la composition granululaire**a) Ordonnée du point A**

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + Ks + Kp$$

Avec :

- D : Diamètre du plus gros granulat
- K : Terme correcteur
- Ks : Correction si MF du sable est fort
- Kp : Correction si le béton doit être pompé

- $D = 15 \text{ mm}$
- $MF = 2.218$
- *Vibration : Normale*
- *Forme Granulaire : concassé k=0*
- Dosage de ciment : 400 kg/m^3

Tableau II-4 Tableau des corrections à apporter au dosage en eau selon le format des granulats, le type de vibration et le dosage en ciment

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Format des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage ciment	400+f	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	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

$$Ks = 6 \times MF - 15 = (6 \times 2.218) - 15 = -1.69$$

$$Kp = 0 \rightarrow \begin{cases} 0 \text{ si le béton est non pompable} \\ 5 \leq Kp \leq 10 \text{ si le béton est pompable} \end{cases}$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + Ks + Kp = 50 - \sqrt{15} + 0 - 1.69 + 0 = 44,43$$

$$Y_A = 44,43 \%$$

$$X_A = \frac{D}{2} \rightarrow D_{max} \leq 20mm$$

$$X_A = \frac{15}{2} = 7,5$$

b) ordonnée du point B

$$X_B = 15 \text{ mm}$$

$$Y_B = 100 \%$$

c) La courbe granulométrique finale

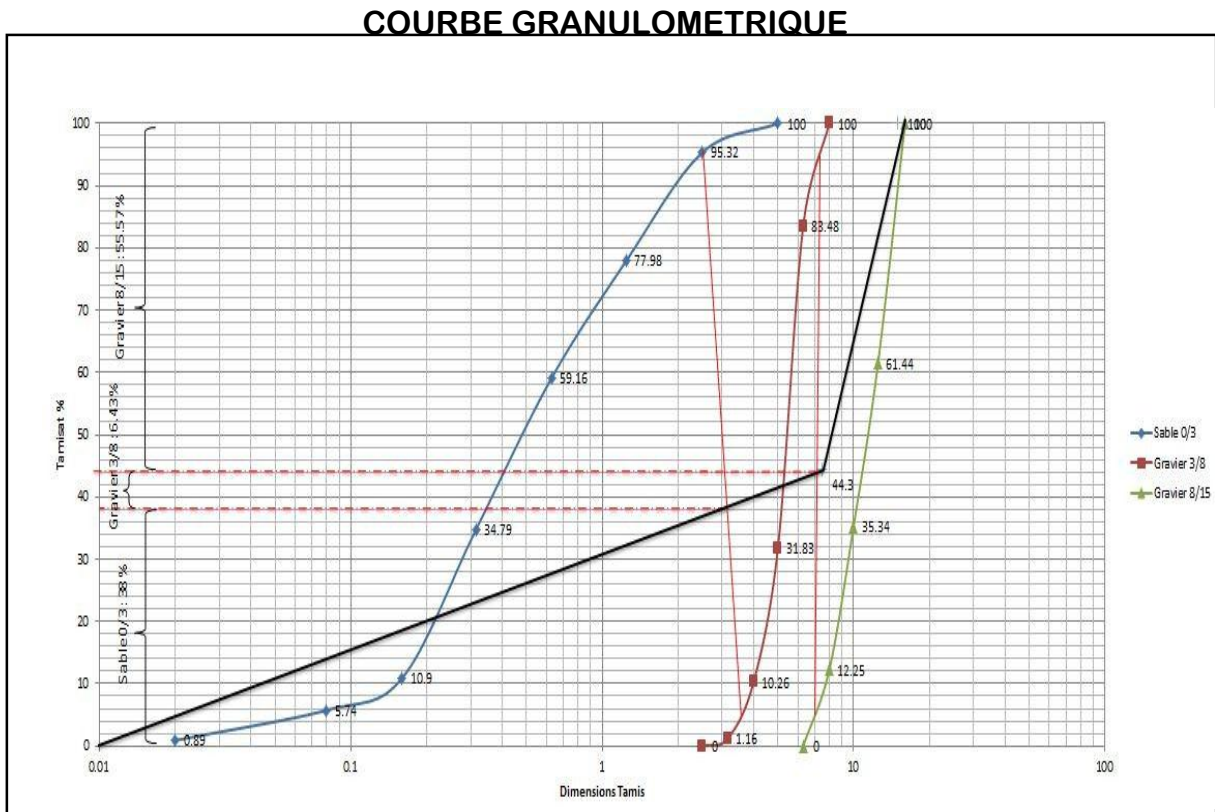


Figure II - 18 : Courbe granulométrique globale

II.5.8 Détermination de la composition du béton

• **Pourcentage des granulats**

Détermination des pourcentages des granulats à partir de la courbe granulométrique

- **Sable : 38%**
- **Gravier (3/8) : 6,43%**
- **Gravier (8/15) : 55,57%**

• **Coefficient de compacité (γ) en fonction de D**

- Consistance : plastique
 - vibration normal
 - D = 15 mm

} $\gamma = 0,815$

$$\gamma_{corr} = 0,815 - 0,03$$

$$\gamma_{corr} = 0,785$$

Tableau II-5 Tableau des coefficients de compacité selon la consistance, le serrage et le diamètre des granulats [41]

Coefficient de compacité :

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulats						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

• **Volume total absolue**

$$V_{abs} = V_c + V_g + V_s = 1m^3$$

$$V_c = \frac{C}{MV_{abs}}$$

Avec :

- V_c : Volume absolue de ciment en dm^3
- C : masse de ciment en kg
- MV_{abs} : masse volumique absolue du ciment en kg /dm^3

$$MV_{abs} = 3100 \text{ kg}/m^3 \rightarrow MV_{abs} = 3,1 \text{ kg}/dm^3$$

$$V_c = \frac{400}{3,1} = 129,03 \text{ dm}^3$$

On a :

$$V_{abs} = V_c + V_g + V_s$$

En remplace ($V_g + V_s$) par V_G

Avec :

- V_G : Volume absolue des granulats

$$V_G = (100 \times \gamma) - V_c$$

$$V_G = (100 \times 0,785) - 129,03 \rightarrow V_G = 655,97 \text{ dm}^3$$

- **Volume du sable**

$$V_s = S\% \times V_G$$

$$V_s = 38\% \times 655,97 = 0,38 \times 655,97 \rightarrow V_s = 249,26 \text{ dm}^3/\text{m}^3$$

- **Volume de gravillons**

$$V_g = G\% \times V_G$$

$$V_g = 62\% \times 655,97 = 0,62 \times 655,97 \rightarrow V_g = 406,7 \text{ dm}^3/\text{m}^3$$

- **Volume du gravier 3/8**

$$V_{g1} = g_1\% \times V_G$$

$$V_{g1} = 6,43\% \times 655,97 = 0,06 \times 655,97 \rightarrow V_{g1} = 39,35 \text{ dm}^3/\text{m}^3$$

- **Volume du gravier 8/15**

$$V_{g2} = g_2\% \times V_G$$

$$V_{g2} = 55,57\% \times 655,97 = 0,55 \times 655,97 \rightarrow V_{g2} = 360,78 \text{ dm}^3/\text{m}^3$$

- **Composition pondérale sèche en (kg)**

- Masse de ciment400 kg /m³

- Masse d'eau.....208 kg /m³

- **Masse du sable 0/3 :**

$$M_S = V_s \times MV_{abs}$$

$$M_S = 249,26 \times 2,631 \rightarrow M_S = 655,80 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

- **Masse de gravillon :**

$$M_g = V_g \times MV_{absg}$$

$$M_g = 406,7 \times 2,66 \rightarrow M_g = 1081,82 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

- **Masse de gravier 3/8 :**

$$1081,82 \text{ Kg}/\text{m}^3 \rightarrow 62\%$$

$$X \rightarrow 6,43\%$$

$$X = \frac{1081,82 \times 6,43\%}{62\%} \rightarrow 112,20 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

- Masse de gravier 8/15 :

$$1081,82 \text{ Kg}/\text{m}^3 \rightarrow 62\%$$

$$X \rightarrow 55,57\%$$

$$X = \frac{1081,82 \times 55,57\%}{62\%} \rightarrow 969,62 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

• La composition du béton pour 1m³

Ciment	400 kg /m ³
Eau	208 kg /m ³
Sable	655,80 Kg/m ³
Gravier 3/8	112,20 Kg/m ³
Gravier 8/15	969,62 Kg/m ³
Adjuvant : 0,6 à 2,5% du poids du ciment soit 0,5 à 2L pour 100kg de ciment	

• La composition du béton pour une éprouvette

Le volume de l'éprouvette

$$V = \pi \times r^2 \times H$$

$$V = \pi \times 8^2 \times 32 \rightarrow V = 6434 \text{ cm}^3$$

$$V = 6434 \times 10^{-6} \rightarrow V = 6,43 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \rightarrow V = 0,0064\text{m}^3$$

➤ Ciment

$$400 \text{ kg} \rightarrow 1\text{m}^3$$

$$X \rightarrow 0,0064\text{m}^3$$

$$X = \frac{0,0064 \times 400}{1} \rightarrow X = 2,56 \text{ kg}$$

➤ Eau

$$208 \text{ kg} \rightarrow 1\text{m}^3$$

$$X \rightarrow 0,0064\text{m}^3$$

$$X = \frac{0,0064 \times 208}{1} \rightarrow X = 1,33 \text{ kg}$$

➤ **Sable**

$$655,80 \text{ kg} \rightarrow 1\text{m}^3$$

$$X \rightarrow 0,0064\text{m}^3$$

$$X = \frac{0,0064 \times 655,80}{1} \rightarrow X = 4,19\text{kg}$$

➤ **Gravier 3/8**

$$112,20 \text{ kg} \rightarrow 1\text{m}^3$$

$$X \rightarrow 0,0064\text{m}^3$$

$$X = \frac{0,0064 \times 112,20}{1} \rightarrow X = 0,718\text{kg}$$

➤ **Gravier 8/15**

$$977,12 \text{ kg} \rightarrow 1\text{m}^3$$

$$X \rightarrow 0,0064\text{m}^3$$

$$X = \frac{0,0064 \times 969,62}{1} \rightarrow X = 6,20\text{kg}$$

• **La composition de béton majoré a + 15% pour 3 éprouvettes**- **Ciment**

$$7,68 + ((15 \times 7,68) \div 100) = \mathbf{8,83 \text{ kg}}$$

- **Eau**

$$4 + ((4 \times 15) \div 100) = \mathbf{4,6 \text{ kg}}$$

- **Sable**

$$12,57 + ((15 \times 12,57) \div 100) = \mathbf{14,45 \text{ kg}}$$

- **Gravier (3/8)**

$$2,15 + ((2,15 \times 15) \div 100) = \mathbf{2,47 \text{ kg}}$$

- **Gravier (8/15)**

$$18,6 + ((18,6 \times 15) \div 100) = \mathbf{21,40 \text{ kg}}$$

- **Adjuvant**

$$2 \text{ L} \rightarrow 100 \text{ kg ciment}$$

$$x \rightarrow 8,83 \text{ KG}$$

$$x = (8,83 \times 2) / 100 \rightarrow x = 0,176 L \quad x = 17,6 ml \approx 18 ml$$

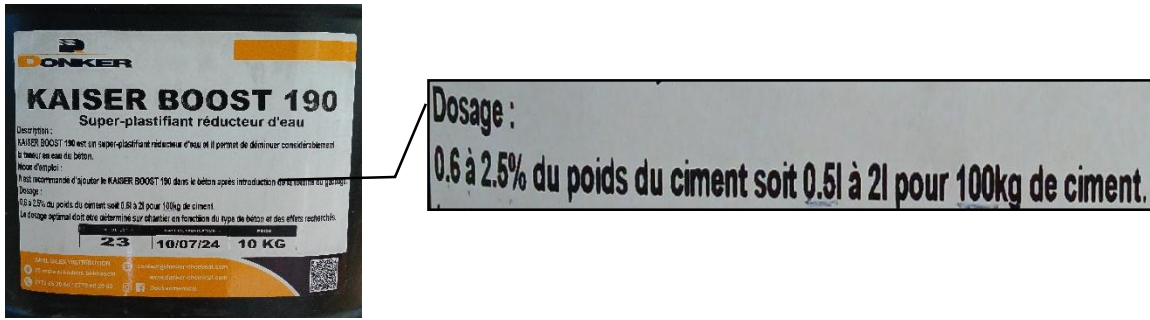


Figure II-20 quantité d'adjuvant

Ciment	8,83 kg
Eau	4,6 kg
Sable	14,45 kg
Gravier (3/8)	2,47 kg
Gravier (8/15)	21,40 kg
Adjuvant	18 ml

- La composition du béton pour 3 éprouvettes

Les composantes	Pour 1 m ³	Pour une éprouvette	Pour 3 éprouvettes
Ciment	400 kg /m ³	2,56 kg	7,68 kg
Eau	208 kg /m ³	1,33 kg	4 kg
Sable	655,80 Kg/m ³	4,19kg	12,57 kg
Gravier 3/8	112,20 Kg/m ³	0,718kg	2,15 kg
Gravier 8/15	969,62 Kg/m ³	6,20kg	18,6 kg
Adjuvant			18 ml

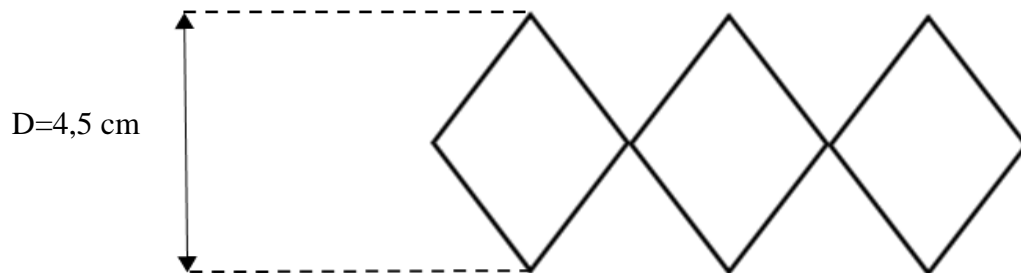
II.6 Matériaux et Méthodologie

II.6.1 Description des grilles métallique

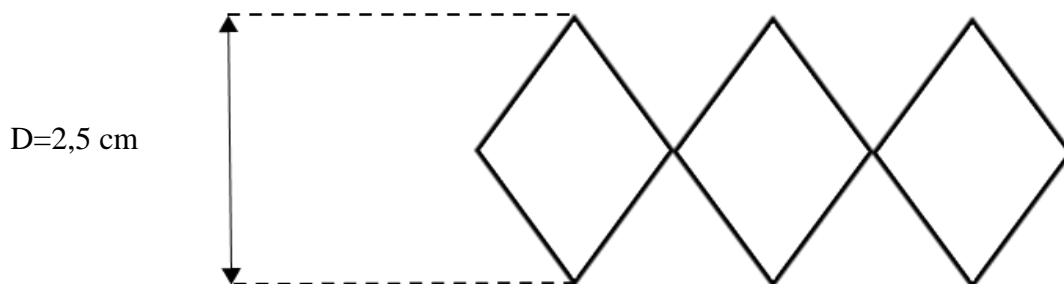
a) Types de grilles utilisées

Les grilles de métal utilisées dans l'ambiance de ce projet sont de type losange, spécialement conçues pour accroître la force et renfermer le béton. Il a été sélectionné quatre catégories de grilles, identifiées en fonction de la grandeur de leur maille comme suit :

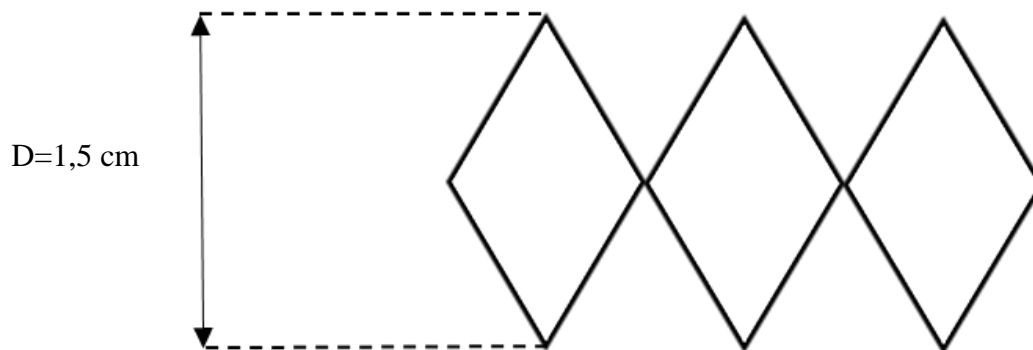
- **Grille A** : La maille la plus grande, offrant une ouverture plus large et favorisant une pénétration plus efficace du béton, tout en offrant moins de confinement latéral.



- **Grille B** : Maille légèrement plus petite que la grille A, avec un équilibre entre rigidité et flexibilité.



- **Grille C** : Cette grille, plus lisse, augmente le confinement en réduisant la fluidité du béton au moment de son coulage.



- **Grille D** : Maille la plus dense, fournissant le confinement maximum tout en restreignant le flux de béton, ce qui peut éventuellement créer des zones de faiblesse.

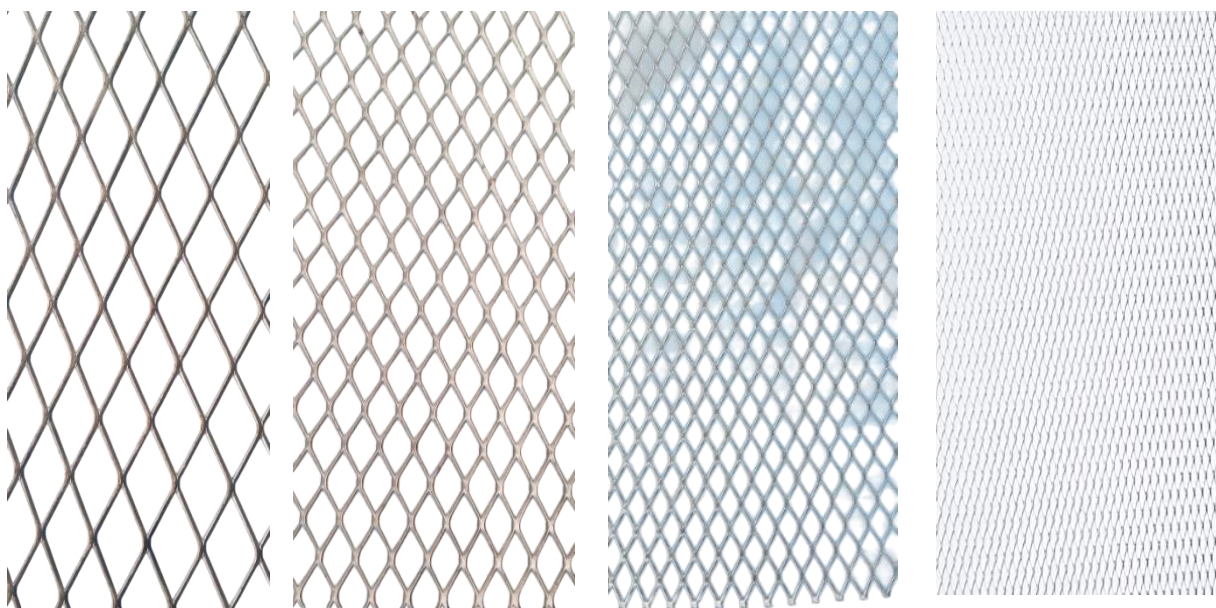


Figure II-21 GRILLE (A, B, C, D)

b) Caractéristiques géométriques de la grille

- **Matériau** : Acier galvanisé pour une meilleure résistance à la corrosion et à l'oxydation.
- **Épaisseur de fil** : Variable en fonction du type de grille, influençant la rigidité et la capacité de confinement.
- **Forme de fil** : Section parallélogrammique plate (non circulaire)

II.7 Préparation des Éprouvettes

La préparation des échantillons est une étape cruciale de cette expérience, Cette section présente les différentes étapes du processus de préparation, depuis la fabrication des cylindres de confinement jusqu'à l'opération de coulage du béton.

a) Caractéristiques géométriques des éprouvettes

Les dimensions des éprouvettes utilisées

- $D = 16 \text{ cm}$
- $H = 32 \text{ cm}$
 - La surface de la base
- $S = \pi \times r^2 \rightarrow S = \pi \times 8^2$
- $S = 201,06 \text{ cm}^2$
 - Le volume de l'éprouvette
- $V = \pi \times r^2 \times H$
- $V = \pi \times 8^2 \times 32 \rightarrow V = 6434 \text{ cm}^3$



II.7.1 Variantes de confinement

Les essais de confinement ont été configurés selon trois variantes pour étudier l'influence de l'enrobage et de la géométrie du cylindre de grille sur le comportement mécanique.

- **Première variante** : un confinement avec une épaisseur du béton libre de 4 cm, où le cylindre de grille (diamètre 8 cm) est centré dans l'éprouvette ($D=16$ cm). Cette configuration laisse une épaisseur uniforme de 4 cm entre la grille et la surface externe, correspondant à un rapport épaisseur du béton libre /diamètre de béton confiné 50 % .
- **Deuxième variante** : une épaisseur de béton libre réduit à 2 cm avec un cylindre de grille de 12 cm de diamètre. Le positionnement central permet une répartition symétrique du confinement tout en augmentant la surface confinée, réduisant l'effet de bord .
- **Troisième variante** : confinement externe avec une épaisseur du béton libre nulle, utilisant un cylindre de grille de 16 cm de diamètre épousant exactement la périphérie de l'éprouvette. Cette configuration maximise l'interaction grille-béton, simulant un confinement périphérique intégral tel que décrit dans les modèles de renforcement externe .

Le choix des diamètres de grille (8, 12 et 16 cm) permet une progression contrôlée du rapport entre la surface confinée et la surface totale du béton (50 %, 75 % et 100 %). Parallèlement, la variation de l'épaisseur de béton non confiné (4 cm \rightarrow 2 cm \rightarrow 0 cm) permet d'évaluer l'impact de la proportion de béton effectivement soumise au confinement sur les performances mécaniques. Contrairement au rôle d'enrobage dans le béton armé, cette zone de béton libre n'a pas pour fonction de protéger des armatures, mais constitue une couche non confinée susceptible de limiter l'efficacité du confinement. Ainsi, plus cette épaisseur diminue, plus la résistance à la compression et la ductilité sont susceptibles d'augmenter, en raison d'un confinement plus efficace du volume central.

II.7.2 Fabrication des cylindres de confinement

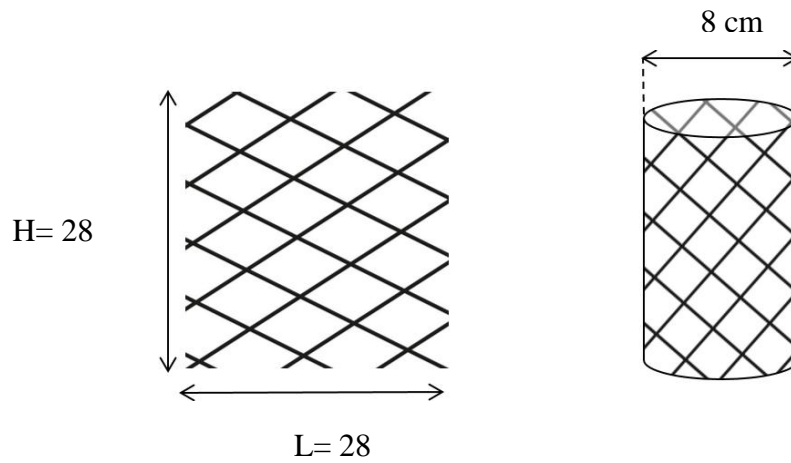
a) Découpe des grilles métalliques

Les grilles métalliques de forme losangique, disponibles en quatre tailles de mailles (A, B, C, D), ont été découpées selon trois dimensions

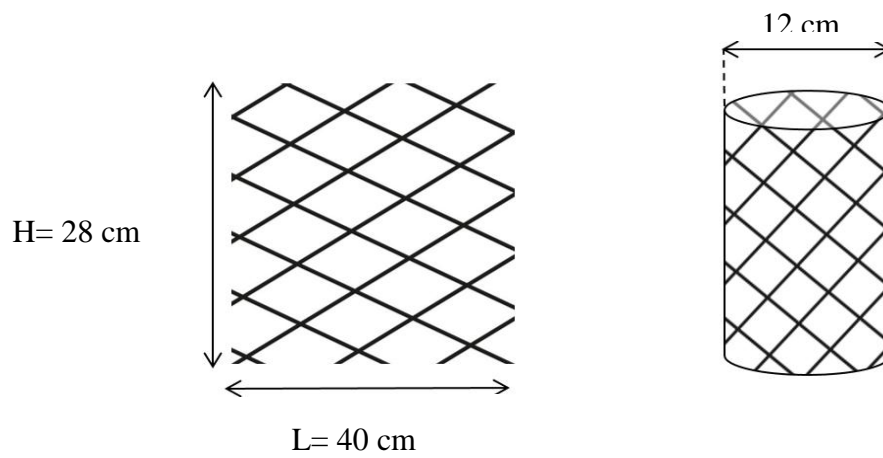
$$\text{➤ } L=P = \pi \times D \rightarrow L = 3,14 \times 8 = 25\text{cm} \rightarrow 25 + 3\text{cm}$$

➤ 3cm c'est le recouvrement

- 28 \times 28 cm \rightarrow formant un cylindre de 8 cm de diamètre



- 40×28 cm \rightarrow formant un cylindre de 12 cm de diamètre



- 53×28 cm \rightarrow formant un cylindre de 16 cm de diamètre

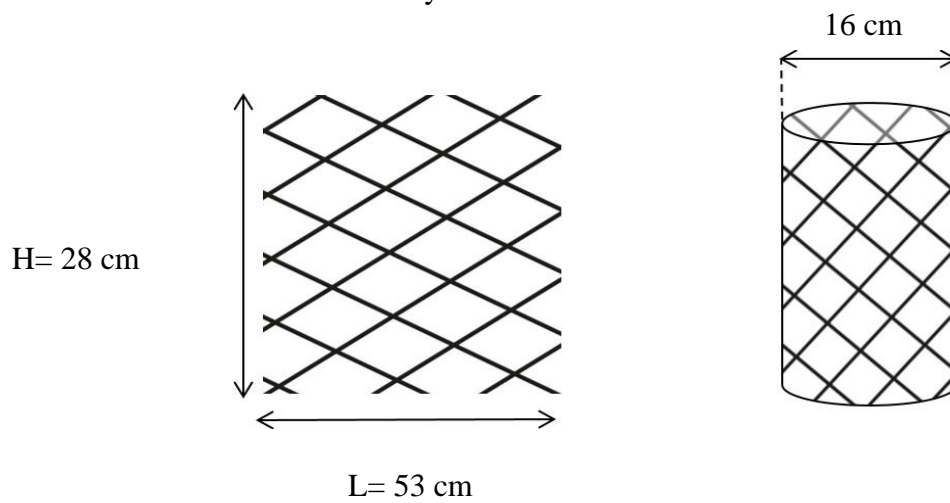




Figure II-22 découpe des grilles

➤ **Matériel utilisé**

- Cisaille
- Mètre
- Fil d'attache
- Tenaille



Figure II-23 Matériel utilisé pour le découpage des grilles métalliques

b) Mise en forme cylindrique

Chaque morceau de grille a été soigneusement enroulé et fixé à l'aide de liens métalliques pour obtenir des cylindres rigides et réguliers, garantissant un confinement uniforme.



Figure II-24 mise en forme des cylindres de grille

➤ **Matériel utilisé**

- Plieuse tôle
- Fil d'attache
- Tenaille



Figure II-25 Matériel utilisé pour la mise en forme

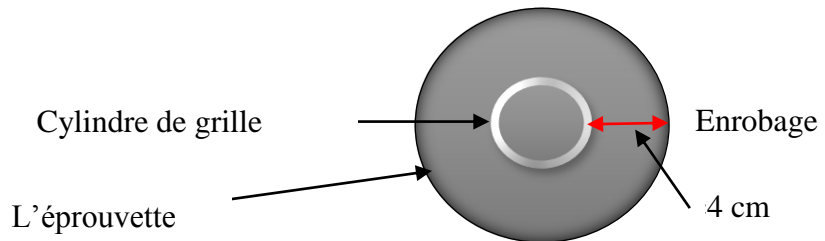
c) Contrôle qualité :

Les diamètres des cylindres ont été vérifiés à l'aide d'un mètre avec une tolérance de ± 2 mm et on a utilisés un tube de pvc pour avoir une forme parfaite.

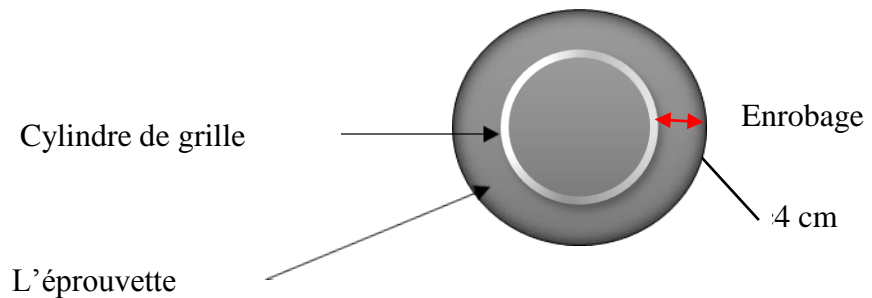
II.7.3 Positionnement des systèmes de confinement

Les cylindres de grille ont été positionnés au centre des moules permettant d'obtenir un enrobage uniforme :

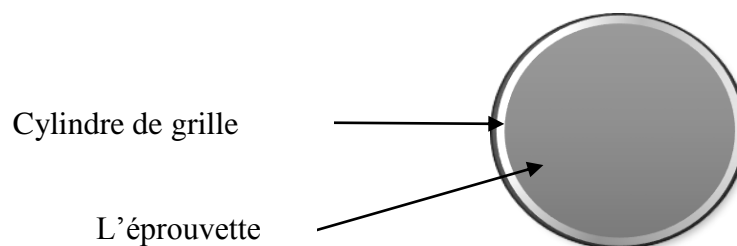
- **8 cm → enrobage de 4 cm**



- **12 cm → enrobage de 2 cm**



- **16 cm → confinement externe (0 cm d'enrobage)**



II.8 Nombre et désignation d'Éprouvettes

Cette expérience nécessite un nombre précis d'éprouvettes pour garantir la signification statistique des résultats obtenus. La procédure expérimentale a été planifiée sur la base d'une approche structurée qui prend en compte :

a) Éprouvettes Témoins

Trois (3) éprouvettes de béton non confiné utilisées comme référence pour déterminer l'efficacité des différents systèmes de confinement.

b) Éprouvettes Confinées

Pour chaque combinaison des 4 types de mailles (A, B, C, D) et des 3 diamètres de confinement (8 cm, 12 cm, 16 cm), 3 essais identiques sont préparés pour assurer la reproductibilité.

- **Désignation des Éprouvettes**

La méthode proposée réduit les imprécisions de caractérisation des paramètres. Chaque éprouvette reçoit un code unique construit à partir des caractéristiques clés du confinement étudié.

- **Structure du code**

- Code : BGL[X][Y] -[Z]
- BGL : Béton avec Grille de forme losange (préfixe commun)
- [X] : Lettre désignant le type de maille (A, B, C ou D)
- [Y] : Diamètre du confinement en cm (8, 12 ou 16)
- [Z] : Numéro de l'éprouvette (précise laquelle parmi les 3)

Les éprouvettes de référence non confinées portent la désignation codifiée 'BT' pour Béton Témoin.

- **Exemples**

- BGLA8 -1 : Béton à grille losangique de maille A et confinement Ø8cm la 1ère parmi les 3 identiques

Chapitre II Présentation et caractéristique des matériaux utilisés

- BGLD16 -2 : Béton à grille losangique de maille D et confinement Ø16cm la 2ème parmi les 3 identiques

La figure ci-dessous représente une éprouvette de béton à grille losangique de maille (A), diamètre de grille 16 cm et la 2ème parmi les 3 identiques

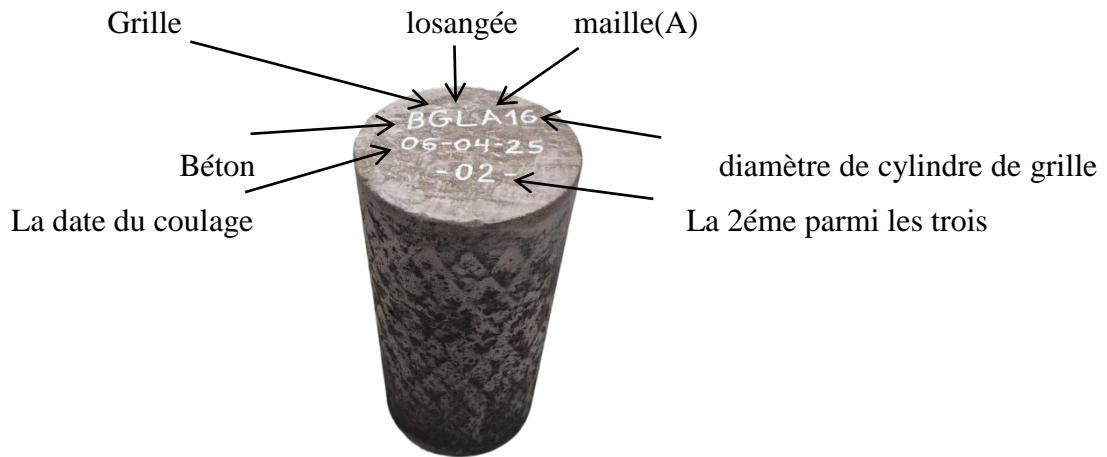


Figure II-26 exemple de désignation d'une éprouvette

- **Avantages de ce système**

- Chaque combinaison paramétrique possède un identifiant unique
- Permet une identification immédiate des caractéristiques
- Facilite le suivi tout au long des essais

II.9 Procédé de coulage du béton

II.9.1 Préparation du mélange

La formulation du béton a été établie selon les proportions suivantes :

- Dosage en ciment 400 kg /m³
- Eau208 kg /m³
- Sable 655,80 Kg/m³
- Gravier 3/8104,61 Kg/m³
- Gravier 8/15.....977,12 Kg/m³
- Affaissement au cône d'Abrams : 7±1 cm
-

II.9.2 Mise en œuvre

Le coulage s'est déroulé comme suite :

a) Préparation des moules

Le nettoyage et l'huilage des éprouvettes avant le coulage est une procédure très importante à effectuer pour garantir l'intégrité des échantillons et la fiabilité des essais en laboratoire. Tout d'abord, il est nécessaire de procéder à un nettoyage efficace des éprouvettes afin d'éliminer toute trace de poussière, de pâte de ciment, de graisse ou d'autres substances susceptibles d'entraver l'adhérence des matériaux et d'influencer les résultats obtenus. Ensuite, une fine couche d'huile de démoulage ou d'un lubrifiant approprié est appliquée pour faciliter l'opération ultérieure de démoulage, en minimisant la possibilité de fissuration ou d'endommagement de l'échantillon.

b) L'essai d'affaissement

L'essai d'affaissement, connu également sous le nom de test au cône d'Abrams ou slump test, est une technique facile et largement employée pour déterminer la consistance ainsi que la fluidité du béton fraîchement préparé. Cette méthode consiste à observer la diminution de hauteur d'un cône de béton sous l'action de son propre poids, ce qui donne une indication sur la facilité avec laquelle le béton peut être travaillé avant d'être utilisé.

• Principe et déroulement de l'essai

- Un moule métallique en forme de cône tronqué (cône d'Abrams) est placé sur une plaque rigide et légèrement humidifiée. Ce cône a une hauteur de 300 mm, un diamètre de 200 mm à la base et 100 mm au sommet.
- Le cône est rempli en trois couches de béton frais, chaque couche étant piquée 25 fois avec une tige métallique pour éliminer les bulles d'air et assurer une bonne compaction.
- Le béton est arasé au sommet, puis le cône est retiré verticalement et doucement.
- L'affaissement est mesuré comme la différence entre la hauteur initiale du cône et la hauteur du béton affaissé

- **Interprétation des résultats**

L'affaissement du béton peut prendre plusieurs formes : un effondrement complet, un affaissement par cisaillement (glissement latéral), ou un véritable affaissement où le béton conserve sa forme générale mais s'abaisse.

Plus l'affaissement est important, plus le béton est fluide et maniable. La norme NF EN 206 classe le béton en cinq catégories selon la hauteur d'affaissement mesurée (en mm) :

Tableau II-6 Classification du béton selon l'affaissement (consistance) et ses utilisations typiques

Classe	Affaissement (mm)	Propriétés du béton frais	Utilisations typiques
S1	10 – 40	Béton ferme, peu maniable	Routes, fondations légères
S2	50 – 90	Béton plastique, maniabilité moyenne	Béton armé normal avec vibration
S3	100 – 150	Béton très plastique, maniabilité élevée	Usage courant
S4	160 – 210	Béton fluide, très maniable	Applications nécessitant une grande fluidité
S5	≥ 220	Béton très fluide, autoplaçant	Béton autoplaçant

- **Les résultats obtenus**

- L'affaissement = 7 cm = 70 mm → on est dans la classe S2 [50 – 90]mm
- Un béton plastique, maniabilité moyenne
- Utilisations typiques : Béton armé normal avec vibration



Figure II-27 résultats d'affaissement

c) Positionnement et centrage des cylindres de confinement

- La mise en place des grilles de confinement suit un protocole précis :
- Une couche de béton de 2 cm est d'abord coulée en fond de moule
- Le cylindre de grille (hauteur 28 cm) est positionné verticalement au centre
- L'enrobage est vérifié sur tout la périphérie à l'aide d'un mètre ruban
- Une dernière couche de 2 cm complète l'éprouvette (hauteur totale 32 cm)

Cette méthode garantit :

- Un positionnement parfaitement centré de la grille
- Un enrobage uniforme sur 360°
- Une hauteur totale conforme aux spécifications (2+28+2 cm)
- Une reproductibilité optimale entre éprouvettes

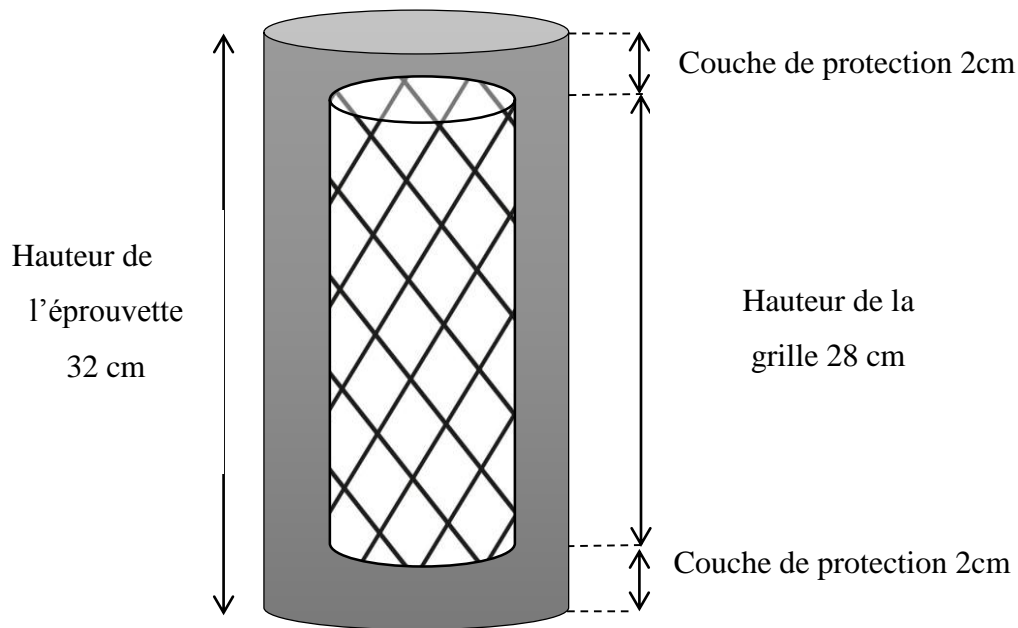


Figure II-28 Positionnement et centrage des cylindres de confinement

Le contrôle de l'enrobage est réalisé à trois niveaux :

- En partie basse (après coulage de la première couche)
- Au milieu (vérification de la verticalité)
- En partie haute (avant coulage final)

d) Coulage en couches supervisé

Mélanger les composantes du béton à l'aide d'un malaxeur

- **Phase 1 (couche inférieure)**

- Versement contrôlé de la première couche du béton
- Vibration initiale (10 sec)
- Vérification de la position de grille



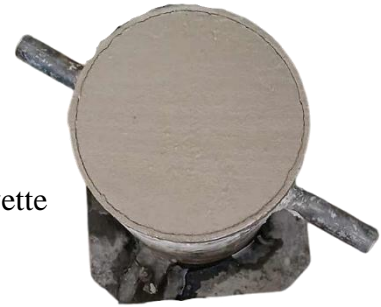
- **Phase 2 (couche médiane)**

- Versement de la deuxième couche
- Vibration intermédiaire (10 sec)
- Contrôle de la position de grille



- **Phase 3 (couche supérieure)**

- Versement de la troisième couche du béton
- Vibration finale (10 à 15 sec)
- Aplanir parfaitement la surface pour obtenir une éprouvette régulière, sans creux ni surépaisseur.



e) Finition et marquage

- Lissage de surface à la règle métallique en cas de remontent des bulles d'air
- Marquage temporaire de la référence d'éprouvettes et la date de coulage sur des étiquettes

II.10 Protocole de démoulage

Le délai standard est 24 ± 1 heures après coulage

- **Procédure**

- Desserrement symétrique des éléments de coffrage
- Extraction Délicate
- Brossage léger des surfaces latérales
- Marquage définitif des références pour chaque éprouvette

II.11 Cure par immersion des éprouvettes

Les éprouvettes sont placées dans des bacs d'eau pour une cure de 28 jours. Elles restent complètement immergées pendant toute la durée de la cure, avec un niveau d'eau maintenu à au moins 5 cm au-dessus de leur surface. Cette immersion continue permet une hydratation uniforme du béton sur toutes ses faces. La méthode garantit des conditions de cure standard pour toutes les éprouvettes, aussi bien pour les échantillons confinés que pour les témoins. L'immersion se fait dans des conditions ambiantes normales



Figure II-29 cure par immersion

II.12 Suivi des éprouvettes

Avant et après immersion, chaque éprouvette est pesée avec précision pour mesurer sa prise d'eau. Ces pesées régulières permettent de calculer l'absorption d'eau et de suivre l'évolution du béton durant sa cure. Les données recueillies aident à comprendre comment le confinement influence la perméabilité et la qualité du matériau. Cette étape est essentielle pour valider la performance des différentes configurations testées.

Les étapes de suivi

- Réalisation d'un tableau de suivi des éprouvettes (affaissement, dates de coulage et démoulage, pesées...)
- Pesée initiale après démoulage (M jour 0)
- Pesée après immersion (M jour 28)

II.13 Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière détaillée l'ensemble des étapes nécessaires à la préparation des éprouvettes en béton confiné par grilles métalliques, depuis le choix des matériaux jusqu'au stockage des échantillons en vue des essais. Trois variantes de confinement ont été définies afin d'étudier l'effet de la surface libre de béton non confinée et de la position du confinement sur le comportement mécanique : un confinement centré avec 4 cm de béton libre autour du noyau confiné, un confinement partiel avec 2 cm de béton libre, et un confinement total où l'ensemble de l'éprouvette est entouré de grille métallique. Ces configurations permettront de comparer l'efficacité relative de chaque stratégie de renforcement.

La méthodologie appliquée, basée sur une découpe rigoureuse des grilles, une mise en place soignée des cylindres métalliques, et un coulage précis du béton, vise à garantir l'homogénéité des échantillons et la reproductibilité des résultats. Les conditions de cure ont également été standardisées afin de limiter les biais et d'assurer une maturation adéquate du béton.

Les étapes présentées ici constituent la base indispensable à l'analyse des performances mécaniques, qui fera l'objet du chapitre suivant. Ce dernier exposera les résultats des essais de compression ainsi que l'interprétation des effets du confinement métallique sur la résistance et la ductilité des échantillons.

chapitre.III

Résultats et
Analyse des essais
expérimentaux

III.1 Introduction

Le béton est un matériau hétérogène dont les performances mécaniques dépendent fortement de sa composition, de sa mise en œuvre et des éventuels systèmes de renforcement appliqués. Dans le cadre de cette étude, l'objectif principal est d'évaluer l'efficacité du confinement par grilles métalliques losangées sur l'amélioration de la résistance et du comportement post-pic du béton. Les essais réalisés en laboratoire ont permis de quantifier l'impact de différents paramètres, tels que la taille des mailles (A, B, C, D), le diamètre des éprouvettes (8, 12, 16 cm) et le type de confinement (interne, partiel, externe).

Ce chapitre présente une analyse détaillée des résultats expérimentaux obtenus après les phases de préparation, de cure et d'essais mécaniques. Les données traitées incluent :

- Les mesures de masse avant et après immersion (pour évaluer l'absorption d'eau et l'effet de la cure).
- Les courbes contrainte-déformation issues des essais de compression axiale.
- Les modes de rupture observés, en lien avec la configuration des grilles.
- Les gains de résistance par rapport aux éprouvettes témoins (non confinées).

Une approche comparative est adoptée pour mettre en évidence l'influence des variables étudiées, en s'appuyant sur des outils statistiques (moyennes, écarts-types) et des références normatives (NF EN 12390-3). Enfin, une synthèse critique des limites et perspectives est proposée pour guider les recherches futures.

III.2 Résultats des Essais

III.2.1 Données de Pesée (Avant/Après Immersion)

➤ Béton témoin

	Reference	Poids avant (kg)	Poids après (kg)
1	BT-01	15,25	15,29
2	BT-02	15,45	15,5
3	BT-03	15,25	15,31

➤ Béton confinée

• Béton à grille losangique de maille A

	Reference	Poids avant (kg)	Poids après (kg)
4	BGLA-08- 01	15,78	15,8
5	BGLA-08- 02	15,53	15,55
6	BGLA-08- 03	15,64	15,64
7	BGLA-12- 01	15,85	15,86
8	BGLA-12- 02	15,82	15,87
9	BGLA-12- 03	15,82	15,82
10	BGLA-16- 01	15,64	15,69
11	BGLA-16- 02	15,7	15,75
12	BGLA-16- 03	15,56	15,58

• Béton à grille losangique de maille B

	Reference	Poids avant (kg)	Poids après (kg)
13	BGLB-08- 01	15,47	15,50
14	BGLB-08- 02	15,58	15,60
15	BGLB-08- 03	15,63	15,64
16	BGLB-12- 01	15,64	15,65
17	BGLB-12- 02	15,58	15,59
18	BGLB-12- 03	15,62	15,63
19	BGLB-16- 01	15,55	15,55
20	BGLB-16- 02	15,55	15,55
21	BGLB-16- 03	15,62	15,62

- **Béton à grille losangique de maille C**

	Reference	Poids avant (kg)	Poids après (kg)
22	BGLC-08- 01	15,52	15,51
23	BGLC-08- 02	15,48	15,50
24	BGLC-08- 03	15,37	15,40
25	BGLC-12- 01	15,44	15,65
26	BGLC-12- 02	15,45	15,46
27	BGLC-12- 03	15,48	15,49
28	BGLC-16- 01	15,45	15,47
29	BGLC-16- 02	15,55	15,55
30	BGLC-16- 03	15,58	15,59

- **Béton à grille losangique de maille D**

	Reference	Poids avant (kg)	Poids après (kg)
31	BGLD-08- 01	15,41	15,42
32	BGLD-08- 02	15,38	15,39
33	BGLD-08- 03	15,34	15,37
34	BGLD-12- 01	15,39	15,40
35	BGLD-12- 02	15,39	15,41
36	BGLD-12- 03	15,38	15,39
37	BGLD-16- 01	15,35	15,37
38	BGLD-16- 02	15,35	15,35
39	BGLD-16- 03	15,38	15,39

III.2.2 Le taux d'absorption d'eau

Le taux absorption d'eau (TA) quantifie la capacité des éprouvettes à absorber l'eau pendant la cure par immersion. Il s'exprime en pourcentage (%) et se calcule par

$$TA(\%) = \frac{M_{humide} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

Où :

- M_{humide} = Masse de l'éprouvette après immersion (g)
- M_{sec} = Masse de l'éprouvette avant immersion (g)

➤ **Tableau Normatif de Référence pour le Taux d'Absorption du Béton**

Classe	Taux d'absorption (% en masse)	Qualité du béton	Commentaires
Très faible	< 3 %	Excellente	Très peu poreux, haute résistance aux agents externes
Faible	3 % – 5 %	Bonne	Adapté aux environnements modérément agressifs
Moyenne	5 % – 7 %	Moyenne	Usage courant, peut nécessiter protection
Élevée	7 % – 10 %	Faible	Risque accru de pénétration d'eau et de chlorures
Très élevée	> 10 %	Très faible	Non recommandé sans traitements protecteurs

a) Résultats de calcul de taux d'absorption d'eau

Échantillon	Poids sec (kg)	Poids humide (kg)	Taux d'absorption (%)
BT-01	15,25	15,29	0,26 %
BT-02	15,45	15,5	0,32 %
BT-03	15,25	15,31	0,39 %
BGLA-08-02	15,53	15,55	0,13%
BGLA-08-03	15,64	15,64	0,00%
BGLA-12-01	15,85	15,86	0,06%
BGLA-12-02	15,82	15,87	0,32%
BGLA-12-03	15,82	15,82	0,00%
BGLA-16-01	15,64	15,69	0,32%
BGLA-16-02	15,7	15,75	0,32%
BGLA-16-03	15,56	15,58	0,13%
BGLB-08-01	15,47	15,5	0,19%
BGLB-08-02	15,58	15,6	0,13%
BGLB-08-03	15,63	15,64	0,06%
BGLB-12-01	15,64	15,65	0,06%
BGLB-12-02	15,58	15,59	0,06 %
BGLB-12-03	15,62	15,63	0,06%
BGLB-16-01	15,55	15,55	0,00%
BGLB-16-02	15,55	15,55	0,00%

BGLB-16-03	15,62	15,62	0,00%
BGLC-08-01	15,52	15,52	0,00%
BGLC-08-02	15,48	15,5	0,13%
BGLC-08-03	15,37	15,4	0,20%
BGLC-12-01	15,44	15,65	1,36 %
BGLC-12-02	15,45	15,46	0,06%
BGLC-12-03	15,48	15,49	0,06%
BGLC-16-01	15,45	15,47	0,13%
BGLC-16-02	15,55	15,55	0,00%
BGLC-16-03	15,58	15,59	0,06%
BGLD-08-01	15,41	15,42	0,06%
BGLD-08-02	15,38	15,39	0,06%
BGLD-08-03	15,34	15,37	0,20%
BGLD-12-01	15,39	15,4	0,06%
BGLD-12-02	15,39	15,41	0,13%
BGLD-12-03	15,38	15,39	0,06%
BGLD-16-01	15,35	15,37	0,13%
BGLD-16-02	15,35	15,35	0,00%
BGLD-16-03	15,38	15,39	0,06%

Les résultats se classent systématiquement dans la catégorie "**Très faible porosité**" ($TA < 3\%$) selon la norme NF EN 206-1

Donc c'est un béton Très peu poreux avec une haute résistance aux agents externes

III.3 Essai de compression

La résistance à la compression du béton est une propriété mécanique essentielle qui mesure la capacité du matériau à supporter des charges compressives sans rupture. Elle est généralement déterminée sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques après une cure standard de 28 jours, conformément aux normes telles que l'Eurocode 2. Cette résistance dépend de plusieurs facteurs, notamment le rapport eau/ciment, la qualité des granulats, le compactage et les conditions de cure. De plus, le confinement du béton, par exemple à l'aide de grilles métalliques, exerce une pression latérale qui augmente significativement sa résistance et améliore sa ductilité. Les modèles de comportement et les diagrammes contrainte-déformation permettent de mieux comprendre et prédire cette amélioration.

a) Description de la machine d'essai

L'essai de compression est réalisé à l'aide d'une machine électrohydraulique, spécialement conçue pour appliquer une charge de compression progressive et contrôlée sur des éprouvettes de béton. Cette machine est équipée de platines supérieures et inférieures ajustables, souvent montées sur des sièges à billes, afin d'assurer un contact parfaitement uniforme avec l'éprouvette et d'éviter toute contrainte excentrée qui pourrait fausser les résultats. La capacité de la machine varie généralement entre 200 kN et plusieurs milliers de kN, selon la taille des éprouvettes et la résistance attendue. Un système informatique intégré permet de contrôler précisément la vitesse de chargement, d'enregistrer la charge appliquée en temps réel, et de générer automatiquement des rapports d'essai.

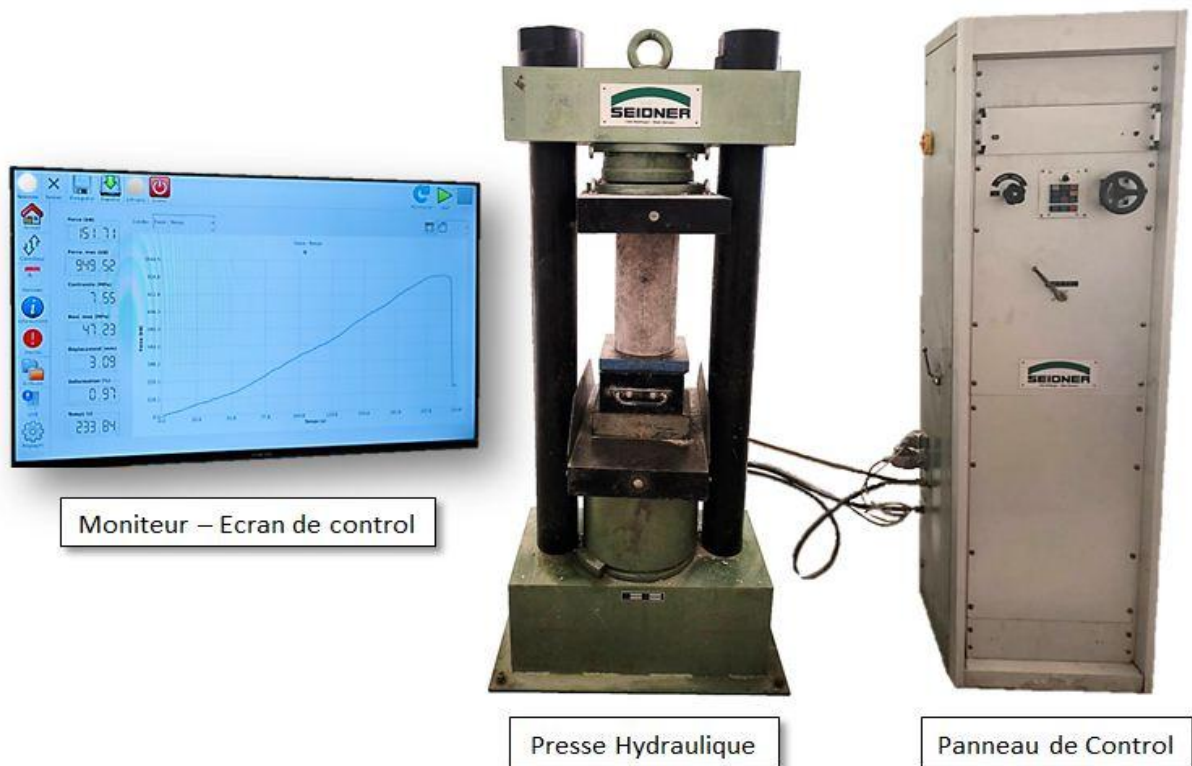


Figure III-1 machine électrohydraulique SEIDNER 2000 & 200

b) Procédure de l'essai

- Préparer les éprouvettes (cylindriques ou cubiques) avec des faces planes, parallèles et parfaitement lisses, souvent rectifiées pour garantir une répartition uniforme des efforts.

- Placer verticalement l'éprouvette entre les platines de la machine d'essai, en la centrant parfaitement
- Appliquer la charge de compression progressivement à une vitesse constante, généralement prescrite par les normes (par exemple entre 0,3 et 5 K_n/s ou 0,5 MPa/s), dans notre expérience on a mis la vitesse à 2,5 K_n/s
- Continuer le chargement jusqu'à la fissuration puis la rupture de l'éprouvette.
- Enregistrer les résultats (la force, la contrainte, la déformation, la courbe ...)

c) Le but de l'essai

Le but de l'essai de compression des éprouvettes en béton confiné par des grilles métalliques est de caractériser l'effet du confinement métallique sur la résistance mécanique du béton. Plus précisément, cet essai permet de mesurer l'augmentation de la résistance à la compression due à la présence des grilles losangiques qui exercent une pression latérale passive sur le béton, limitant sa dilatation transversale sous charge. Il vise à valider si le confinement améliore la capacité portante et la ductilité du matériau par rapport au béton non confiné, et à quantifier cette amélioration en fonction des paramètres géométriques des grilles (taille de maille, diamètre du cylindre confiné). Ces résultats sont essentiels pour optimiser les systèmes de confinement dans les structures en béton armé, garantir la sécurité des ouvrages, et orienter la conception et la formulation des bétons renforcés. Enfin, cet essai s'inscrit dans le cadre du contrôle qualité et de la recherche expérimentale visant à mieux comprendre et modéliser le comportement du béton confiné

III.4 Interprétation des résultats d'essai de compression

III.4.1 Fiche de suivi de confection

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques des éprouvettes confinées par grilles métalliques losangées de type A. Il regroupe, pour chaque éprouvette, des données essentielles telles que la référence, la forme et le type de la maille, la date de coulage, la mesure de l'affaissement (consistance du béton frais), la date d'écrasement ainsi que la résistance maximale à la compression obtenue lors des essais. Ces informations permettent de suivre l'évolution du comportement mécanique du béton en fonction du diamètre des éprouvettes et des conditions de mise en œuvre.

➤ Béton témoin

référence des éprouvettes	date de coulage	l'affaissement (cm)	date d'écrasement	la résistance moyenne (MPa)
BT- 01	23/03/2025	7	20/04/2025	36
BT - 02				
BT - 03				

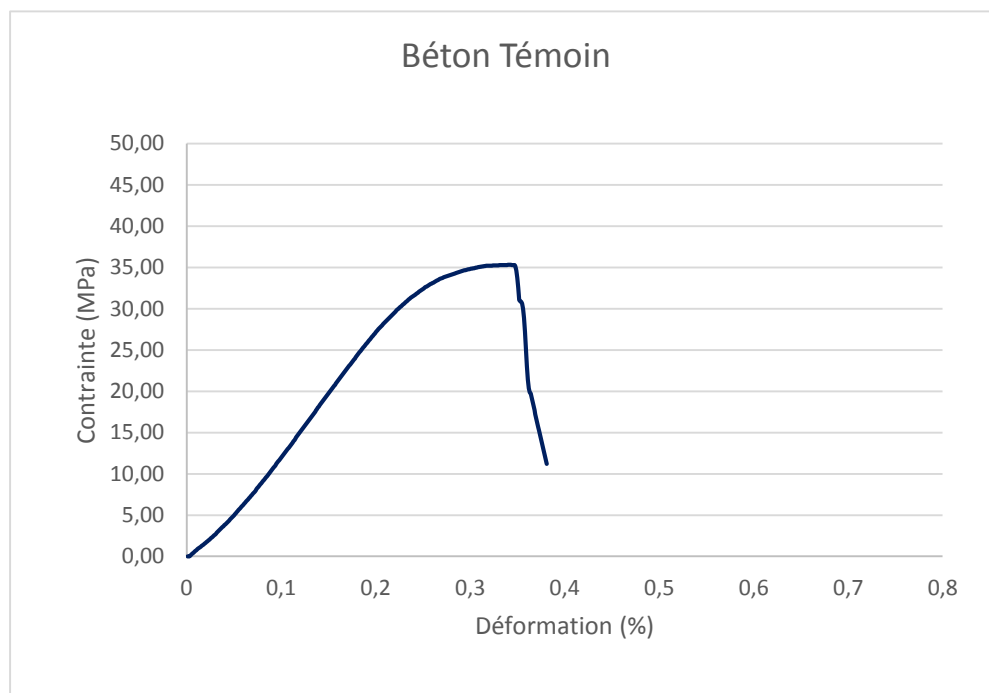


Figure III-2 courbe contrainte déformation du béton témoin

➤ Observation

Le béton témoin (non confiné) présente une résistance maximale moyenne de 36 MPa, avec une déformation maximale atteignant environ 0,33 %. Après le pic, la descente est abrupte, traduisant une rupture fragile. Le palier post-pic est court, avec une chute rapide de la contrainte, ce qui indique une faible capacité à dissiper l'énergie après fissuration.

Le béton témoin sert de référence. Sa résistance de 36 MPa et son comportement fragile sont les points de comparaison pour évaluer l'efficacité des différents confinements.

➤ Type de maille A

référence des éprouvettes	Type de maille	forme de la maille	date de coulage	l'affaissement (cm)	date d'écrasement	la résistance moyenne(MPA)
BGLA-8 - 01	A	Losange	24/03/2025	7,2	21/04/2025	37,25
BGLA-8 - 02						
BGLA-8 - 03						
BGLA-12 - 01	A	Losange	06/04/2025	7,1	04/05/2025	38,90
BGLA-12 - 02						
BGLA-12 - 03						
BGLA-16 - 01	A	Losange	06/04/2025	7,4	04/05/2025	39,16
BGLA-16 - 02						
BGLA-16 - 03						

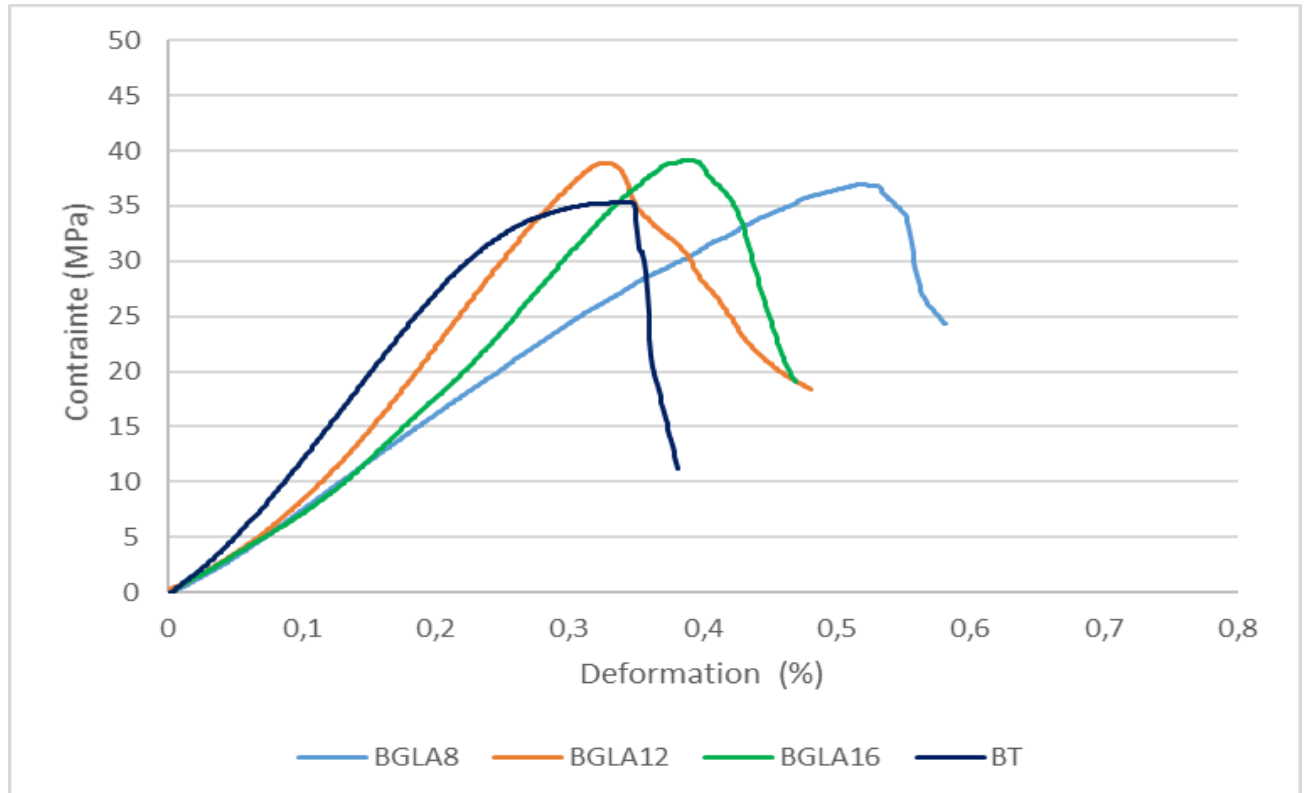


Figure III-6 courbe contrainte déformation de la superposition des trois courbes A

➤ Observation et interprétation

On observe une augmentation progressive de la résistance à mesure que le diamètre de confinement augmente.

- **BGLA-8** : La courbe montre une légère amélioration par rapport au béton témoin (36 MPa), mais la chute post-pic reste relativement abrupte, indiquant une ductilité limitée, bien que meilleure que le béton non confiné.
- **BGLA-12** : La résistance est plus élevée. La phase de ramollissement (descente après le pic) est un peu moins raide que pour BGLA-8, suggérant une meilleure capacité à absorber l'énergie.
- **BGLA-16** : Atteint la plus haute résistance pour le Type A. La courbe montre la meilleure ductilité parmi les trois, avec une descente post-pic plus douce, permettant une plus grande déformation avant la rupture complète. Le pic est également atteint à une déformation légèrement supérieure.

On comprend que même avec la maille la plus large, le confinement est efficace. Plus la zone confinée est étendue (c'est-à-dire plus le diamètre de confinement se rapproche de celui de l'éprouvette), plus le bénéfice en termes de résistance et de ductilité est important. Le confinement sur toute la section (16 cm) est le plus performant pour ce type de maille.

BT : 36 MPa

BGLA8 : 37,25 MPa → Gain 3,45 %

BGLA12 : 38,90 MPa → Gain 8,05 %

BGLA16 : 39,16 MPa → Gain 8,7 %

➤ Type de maille B

réf des éprouvettes	Type de maille	forme de la maille	date de coulage	l'affaissement (cm)	date d'écrasement	la résistance moyenne(MPA)
BGLB-8 - 01	B	Losange	08/04/2025	7	06/05/2025	38,12
BGLB-8 - 02						
BGLB-8 - 03						
BGLB-12 - 01	B	Losange	09/04/2025	6,9	07/05/2025	39,07
BGLB-12 - 02						
BGLB-12 - 03						
BGLB-16 - 01	B	Losange	09/04/2025	6,9	07/05/2025	41,58
BGLB-16 - 02						
BGLB-16 - 03						

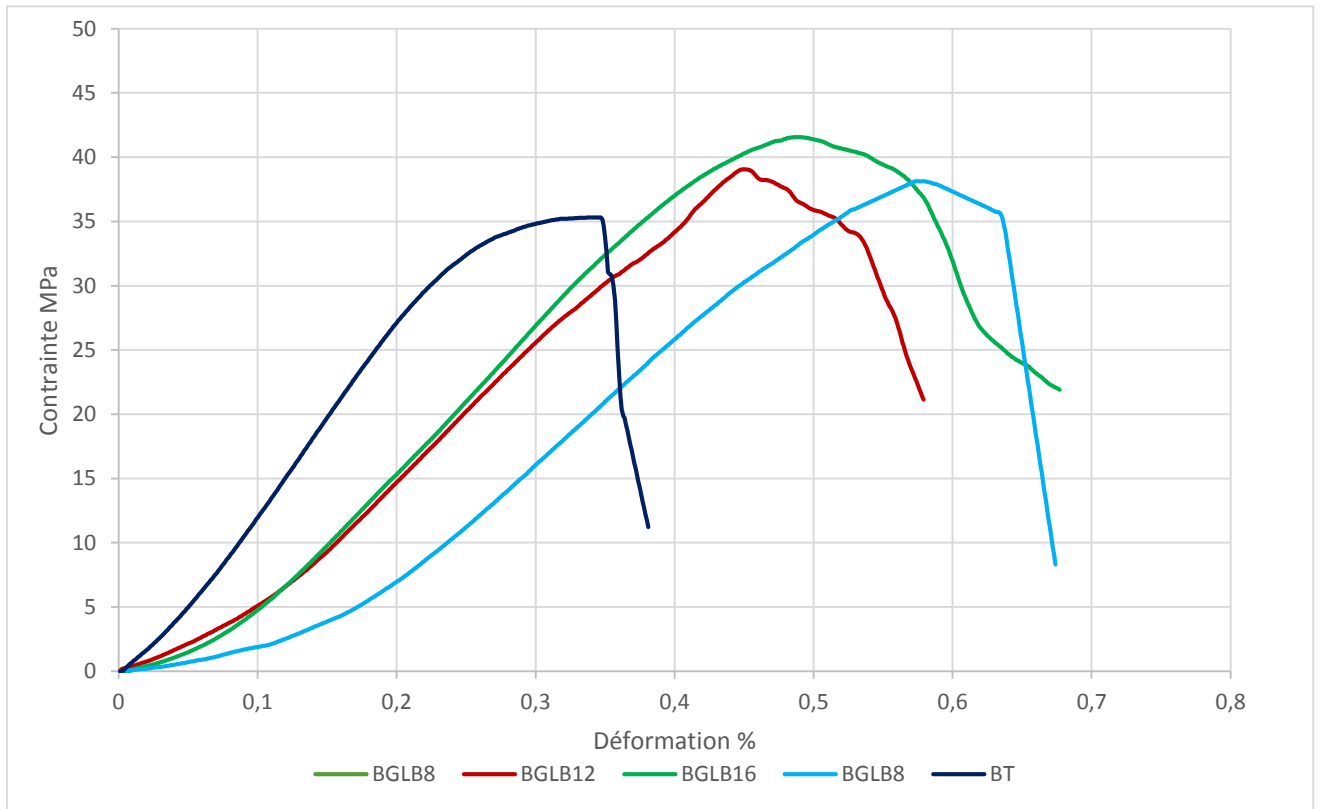


Figure III-10 courbe contrainte déformation de la superposition des trois courbes B

➤ Observation et interprétation

On observe une augmentation claire de la résistance avec l'augmentation du diamètre de confinement. Les gains sont plus prononcés que pour le Type A, surtout entre 12 cm et 16 cm

(un saut de près de 2.5 MPa). Plus crucialement, elle confère au béton une ductilité significativement accrue, visible par des courbes post-pic de plus en plus douces et prolongées. La configuration BGLB-16, avec un confinement total, présente la performance optimale du Type B en termes de résistance et de déformabilité, offrant un comportement plus sûr et moins fragile. en particulier pour **BGLB16**, qui atteint la déformation maximale (~0,5 %) tout en maintenant une contrainte élevée

BT (non confiné) : ≈ 35 MPa

BGLB8 (Ø8 cm, 25 % de confinement) : 38,12 MPa → Gain 5,8 %

BGLB12 (Ø12 cm, 56 % de confinement) : 39 ,07 MPa → Gain 8,52%

BGLB16 (Ø16 cm, 100 % de confinement) : 41,58 MPa → Gain 15,5 %

➤ **Type de maille C**

réf des éprouvettes	type de maille	forme de la maille	date de coulage	l'affaissement (cm)	date d'écrasement	la résistance moyenne(MPA)
BGLC-8 - 01	C	Losange	13/04/2025	6,8	11/05/2025	39,20
BGLC-8 - 02						
BGLC-8 - 03						
BGLC-12 - 01	C	Losange	13/04/2025	6,8	11/05/2025	40,37
BGLC-12 - 02						
BGLC-12 - 03						
BGLC-16 - 01	C	Losange	13/04/2025	6,8	11/05/2025	42,39
BGLC-16 - 02						
BGLC-16 - 03						

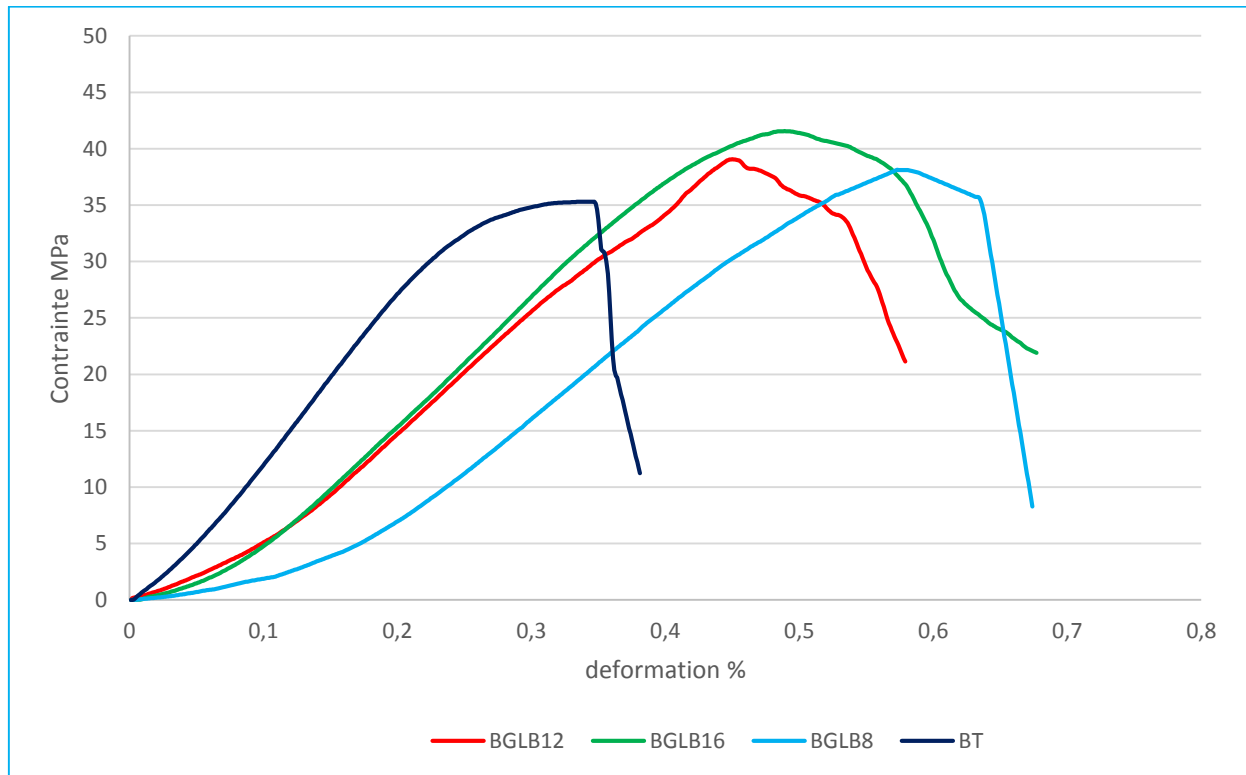


Figure III-14 courbe contrainte déformation de la superposition des trois courbes C

➤ **Observation et analyse**

Les éprouvettes confinées avec la maille de type C présentent une amélioration notable par rapport au béton témoin. La résistance augmente progressivement avec le diamètre de la grille, atteignant jusqu'à 42,39 MPa pour Ø16. On observe également une rupture moins brutale et une légère amélioration de la ductilité, notamment pour les diamètres 12 et 16 cm.

Cela montre que le confinement par maille C apporte un effet positif, bien qu'il reste modéré comparé aux autres types

BT : 36 MPa

BGLB8 : 39,20 MPa → Gain 8,88 %

BGLB12 : 40,37 MPa → Gain 12,13 %

BGLB16 : 42,39 MPa → Gain 17,75 %

➤ Type de maille D

ref des éprouvettes	type de maille	forme de la maille	date de coulage	l'affaissement (cm)	date d'écrasement	la résistance moyenne (MPa)
BGLD-8 - 01	D	Losange	14/04/2025	7	12/05/2025	39,99
BGLD-8 - 02						
BGLD-8 - 03						
BGLD-12 - 01	D	Losange	15/04/2025	7	13/05/2025	44,51
BGLD-12 - 02						
BGLD-12 - 03						
BGLD-16 - 01	D	Losange	15/04/2025	7	13/05/2025	47,97
BGLD-16 - 02						
BGLD-16 - 03						

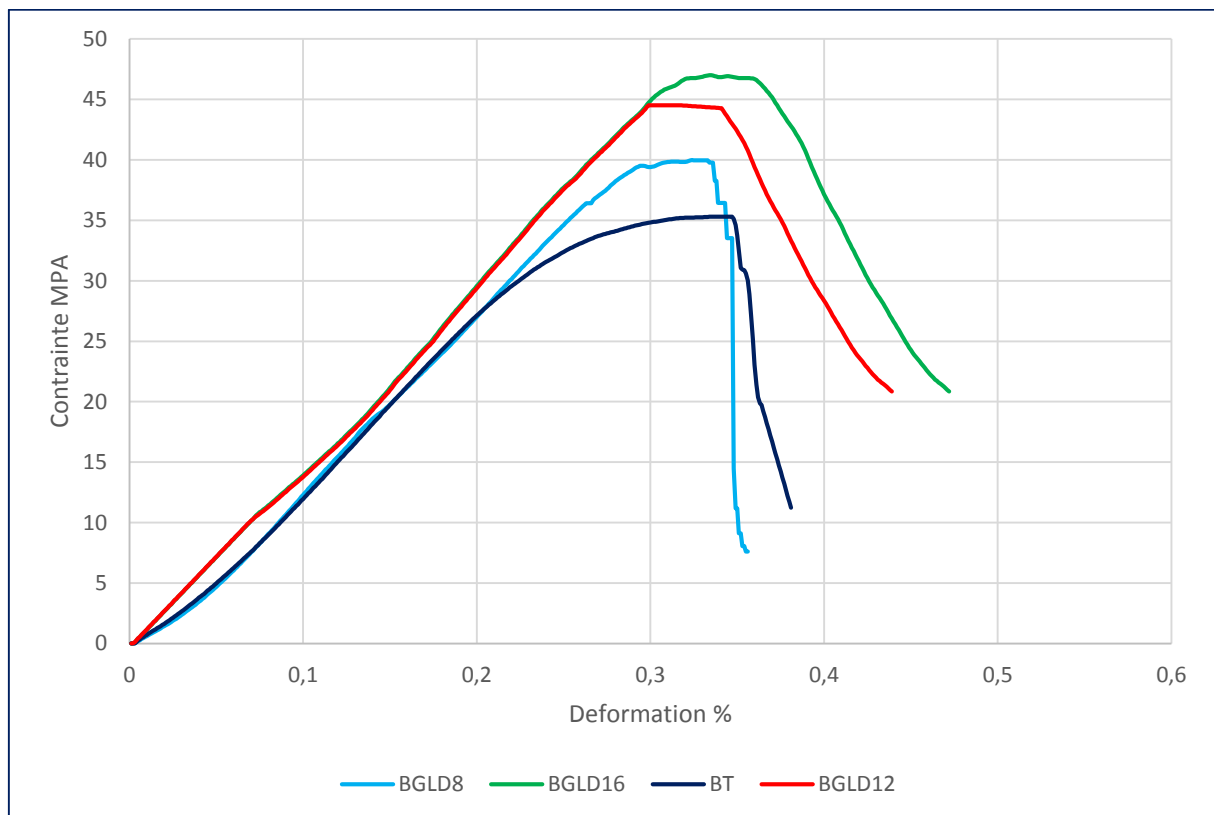


Figure III-18 courbe contrainte déformation de la superposition des trois courbes D

➤ **Observation et analyse**

Le confinement à l'aide de la maille de type D montre une efficacité nettement supérieure par rapport aux autres configurations. La résistance maximale atteint 47,97 MPa pour Ø16, soit un gain de près de 33 % par rapport au béton témoin. Les courbes contrainte-déformation présentent une montée progressive, un pic bien défini et une descente plus contrôlée, traduisant une meilleure ductilité et une absorption d'énergie accrue. Cette performance s'explique par la continuité et la densité du confinement offert par la maille D, qui limite efficacement l'expansion latérale du béton et retarde la fissuration.

BT : 36 MPa

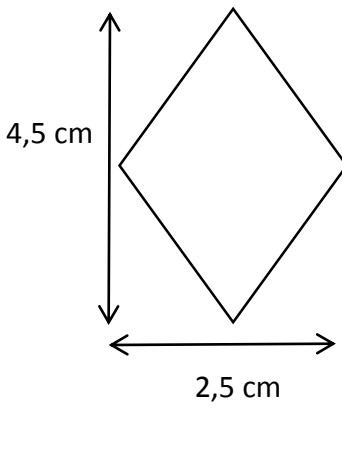
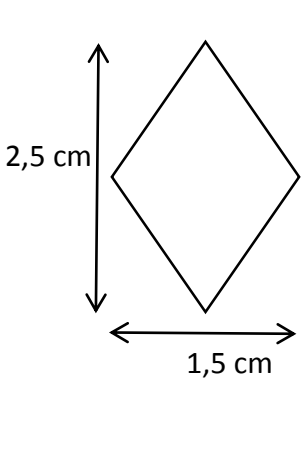
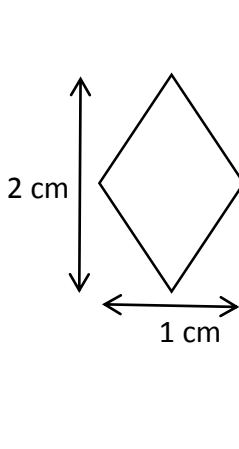
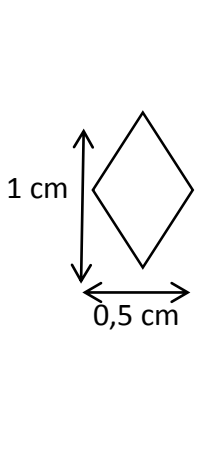
BGLD8 : 39,99 MPa → Gain 11,08 %

BGLD12 : 44,51 MPa → Gain 23,63 %

BGLD16 : 47,97 MPa → Gain 33,25 %

III.4.2 Influence de la dimension de la maille

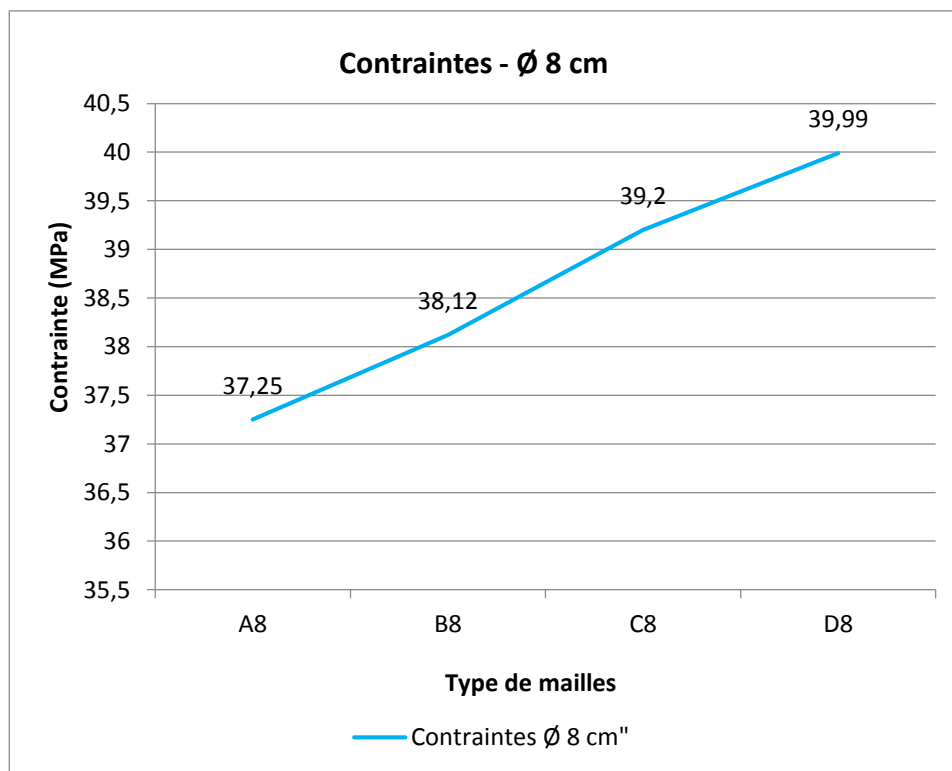
La dimension de la maille joue un rôle déterminant dans l'efficacité du confinement. Cette section examine l'impact de ses variations sur la résistance à la compression du béton

Maille A (4,5 cm)	Maille B (2,5 cm)	Maille C (1,5 cm)	Maille D (1 cm)
			

a) confinement de 25 % (\varnothing 8 cm)

Tableau III-1 • Les résultats des éprouvettes à un confinement de diamètre 8 cm

Nombre	type de maille	contrainte
1	A8	37,25
2	B8	38,12
3	C8	39,20
4	D8	39,99

Figure III-19 Courbe des contraintes en fonction du type de mailles (\varnothing 8 cm)

➤ Observation des résultats

- La Figure III-19 montre une tendance générale à l'augmentation de la résistance maximale à mesure que l'on passe de la maille A8 à la maille D8.
- La contrainte maximale est la plus faible pour la maille A8 (37,25 MPa) et la plus élevée pour la maille D8 (39,99 MPa).
- L'écart de résistance entre les mailles A8 et D8 est d'environ 2,74 MPa.

➤ Interprétation des résultats

Même avec un confinement partiel de 8 cm, l'utilisation d'une grille métallique améliore la résistance du béton par rapport au béton témoin (36 MPa). Cette amélioration est d'autant plus marquée que la maille est fine (de A à D), car une maille plus dense offre un support latéral plus efficace et une meilleure répartition des contraintes.

b) confinement de 56 % (Ø 12 cm)

Tableau III-2 Les résultats des éprouvettes à un confinement de diamètre 12 cm

Nombre	type de maille	contrainte
1	A12	38,9
2	B12	39,07
3	C12	40,37
4	D12	44,51

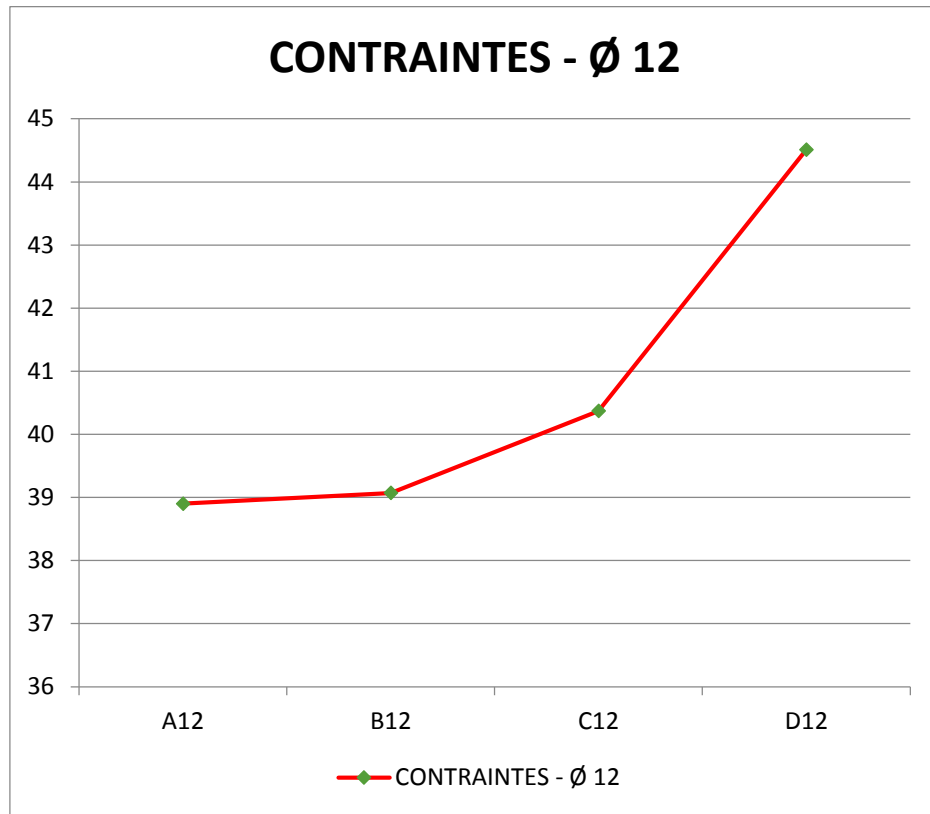


Figure III-20 Courbe des contraintes en fonction du type de mailles (\varnothing 12 cm)

➤ Observation des résultats

La Figure III-20 révèle une augmentation générale et plus prononcée de la résistance maximale à mesure que la maille devient plus fine (de A12 à D12).

Les résistances maximales sont généralement plus élevées que celles observées pour le confinement de 8 cm.

Un saut significatif de résistance est observé entre la maille C12 (40,37 MPa) et la maille D12 (44,51 MPa), ce dernier étant le plus élevé pour ce diamètre de confinement.

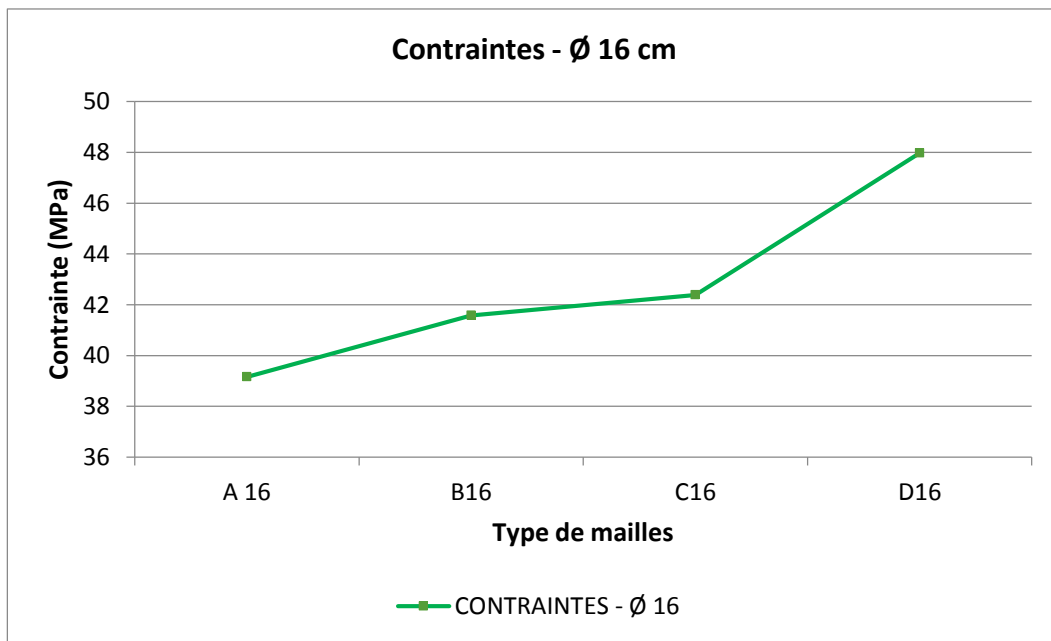
➤ Interprétation des résultats

L'augmentation du diamètre de confinement à 12 cm amplifie l'efficacité pour toutes les mailles. L'impact de la finesse de la maille est ici plus prononcé, la maille D offrant un gain de résistance nettement supérieur. Cela souligne l'importance combinée d'un confinement plus étendu et d'une maille très fine pour optimiser la performance.

c) confinement total 100% (\varnothing 16 cm)

Tableau III-3 • Les résultats des éprouvettes à un confinement de diamètre 16 cm

Nombre	type de maille	contrainte
1	A16	39,16
2	B16	41,58
3	C16	42,39
4	D16	47,97

Figure III-21 Courbe des contraintes en fonction du type de mailles (\varnothing 16 cm)

➤ Observation des résultats

La Figure III-21 montre une tendance similaire d'augmentation de la contrainte maximale de la maille A16 à D16, mais avec des valeurs de résistance généralement les plus élevées de toute l'étude.

La résistance maximale pour D16 atteint près de 48 MPa (47,97 MPa), ce qui est la valeur la plus haute enregistrée.

Les gains de résistance sont constants entre les mailles A, B, C, et le saut le plus significatif reste entre la maille C et D.

➤ Interprétation des résultats

Le confinement total de 16 cm est la configuration la plus efficace pour augmenter la résistance du béton, car toute la section est sous contrainte. Dans ce cas, la maille D, la plus fine, maximise la capacité portante du béton. Ces résultats confirment qu'une maille très fine combinée à un confinement complet est essentielle pour des performances optimales en résistance.

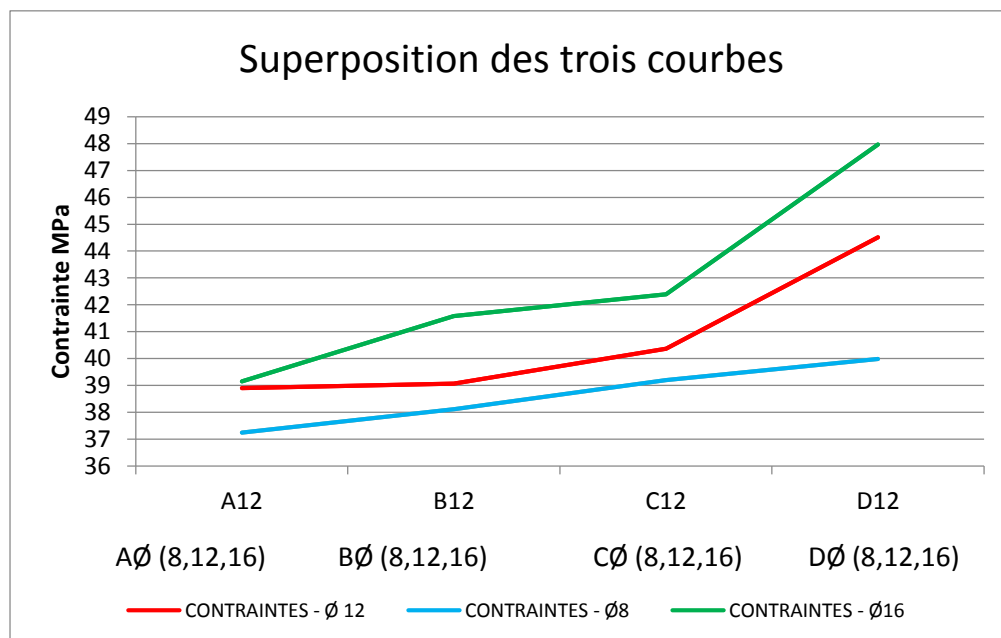


Figure III-22 Comparaison des Contraintes en Fonction du Type de Mailles pour Ø 8, 12, et 16 cm

Synthèse finale et interprétation globale

L'influence essentielle de la dimension de la maille est claire : plus la maille est fine, plus le confinement du béton est efficace. Cela se traduit par une augmentation significative de la résistance maximale et une amélioration cruciale de la ductilité, rendant le béton plus performant et plus sûr, surtout lorsque le confinement s'étend à toute la section de l'élément.

III.4.3 Influence de la position de la maille

a) Type de maille A

Tableau III-4 • Résultats des éprouvettes confinées avec la grille A

Nombre	Position	Contrainte
1	A8	37,25
2	A12	38,9
3	A16	39,16

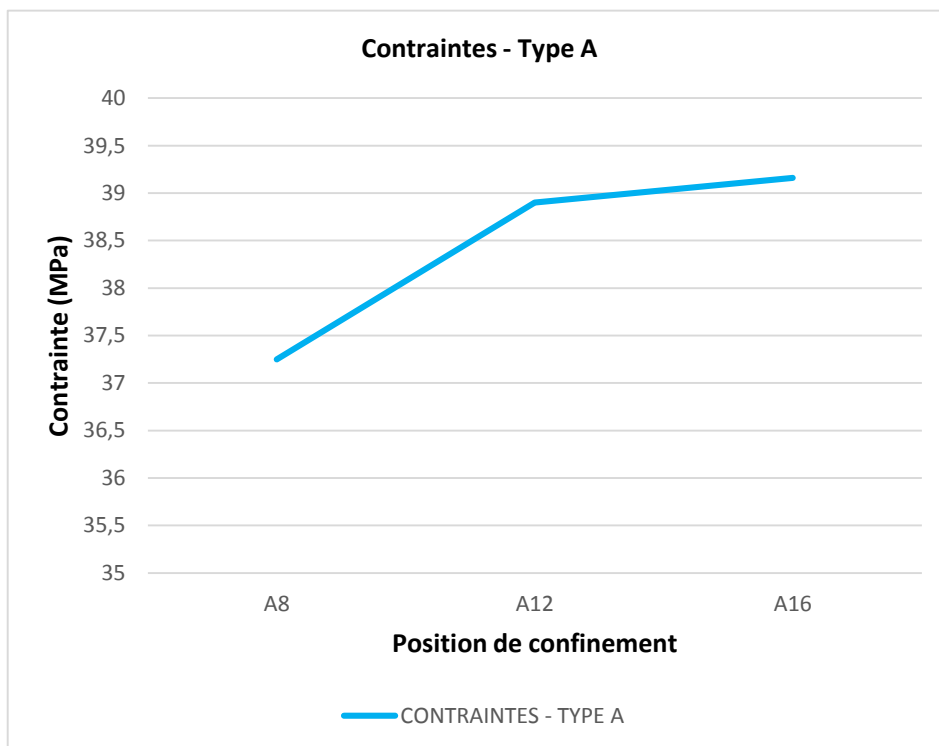


Figure III-23 Courbe des contraintes de la grille A en fonction de la position de confinement (Ø 8, 12 et 16 cm)

➤ Observation des résultats

- La Figure III-23 montre une augmentation de la contrainte maximale à mesure que le diamètre de confinement (position) augmente de 8 cm à 16 cm.
- Le gain de résistance est notable entre 8 cm et 12 cm (37,25 MPa à 38,90 MPa), mais devient plus modeste entre 12 cm et 16 cm (38,90 MPa à 39,16 MPa). La courbe tend à s'aplatir légèrement après 12 cm.

➤ Interprétation des résultats

Pour la maille A, l'augmentation du confinement de 8 à 12 cm améliore significativement la résistance du béton. Cependant, le bénéfice supplémentaire de l'étendre à 16 cm est minime, suggérant que le maillage large atteint ses limites d'efficacité au-delà d'une certaine zone.

a) type de maille B

Tableau III-5 Résultats des éprouvettes confinées avec la grille B

Nombre	Position	Contrainte
1	B8	38,12
2	B12	39,07
3	B16	41,56

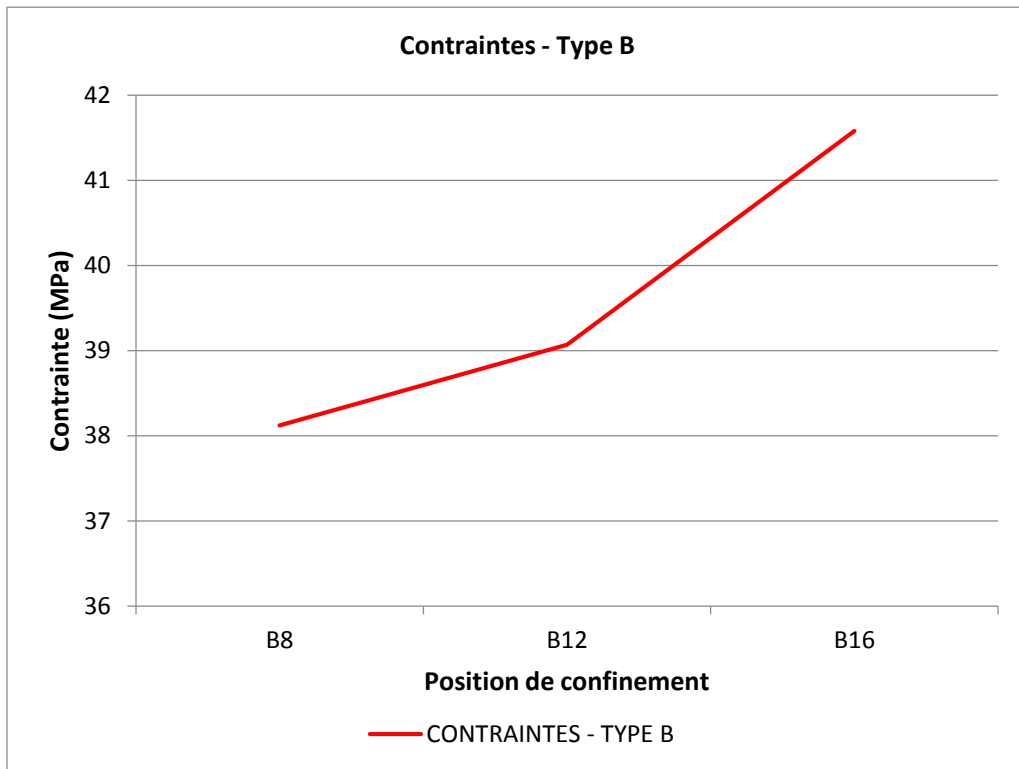


Figure III-24 Courbe des contraintes de la grille B en fonction de la position de confinement (Ø 8, 12 et 16 cm)

➤ Observation des résultats

- La Figure III-24 présente également une augmentation de la contrainte maximale avec l'augmentation du diamètre de confinement.
- Le gain est plus régulier et particulièrement marqué entre 12 cm et 16 cm (39,07 MPa à 41,58 MPa), ce qui contraste avec la maille A.

➤ Interprétation des résultats

Pour la maille B, l'extension du confinement est toujours bénéfique pour la résistance. Son efficacité augmente de manière plus marquée, voire accélérée, en allant vers un confinement total (16 cm), car sa densité lui permet de mieux exploiter un support latéral étendu.

b) type de maille C

Tableau III-6 Résultats des éprouvettes confinées avec la grille C

Nombre	Position	Contrainte
1	C8	39,20
2	C12	40,37
3	C16	42,39

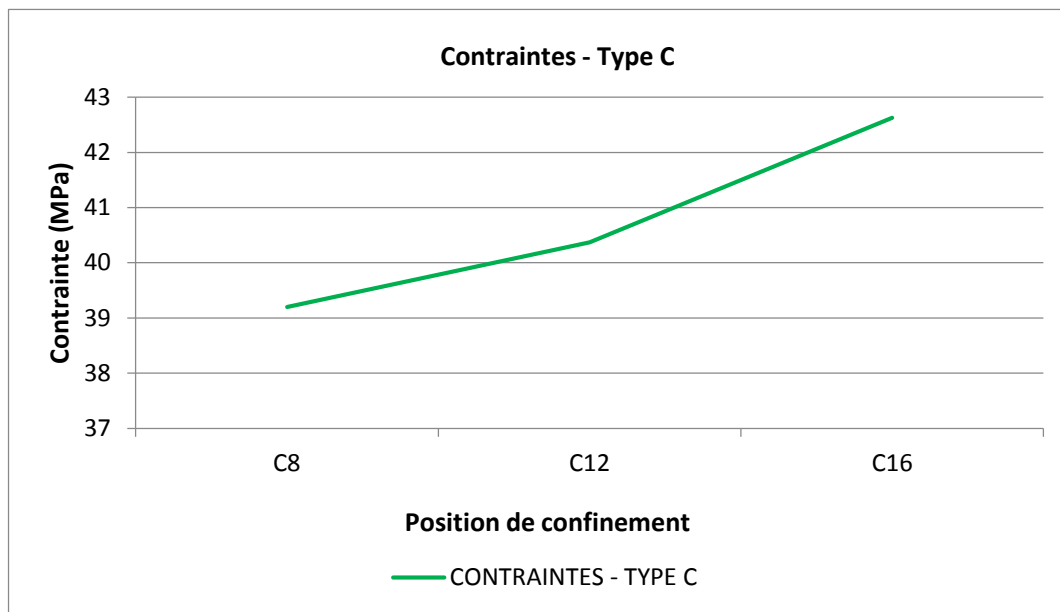


Figure III-25 Courbe des contraintes de la grille C en fonction de la position de confinement (\emptyset 8, 12 et 16 cm)

➤ Observation des résultats

La Figure III-25 montre une augmentation continue et significative de la contrainte maximale avec l'élargissement du diamètre de confinement.

La courbe a une pente positive constante, indiquant des gains progressifs à chaque étape (8 à 12, puis 12 à 16 cm).

➤ Interprétation des résultats

La maille C, encore plus fine, tire pleinement parti de l'augmentation du diamètre de confinement. Chaque pas d'augmentation du diamètre se traduit par un gain appréciable en résistance.

La maille plus dense fournit un confinement plus efficace sur des zones plus étendues, permettant au béton de mieux mobiliser sa résistance. Le confinement total à 16 cm est clairement le plus performant pour ce type de maille.

c) type de maille D

Tableau III-7 • Résultats des éprouvettes confinées avec la grille D

Nombre	Position	Contrainte
1	D8	39,99
2	D12	44,51
3	D16	47,97

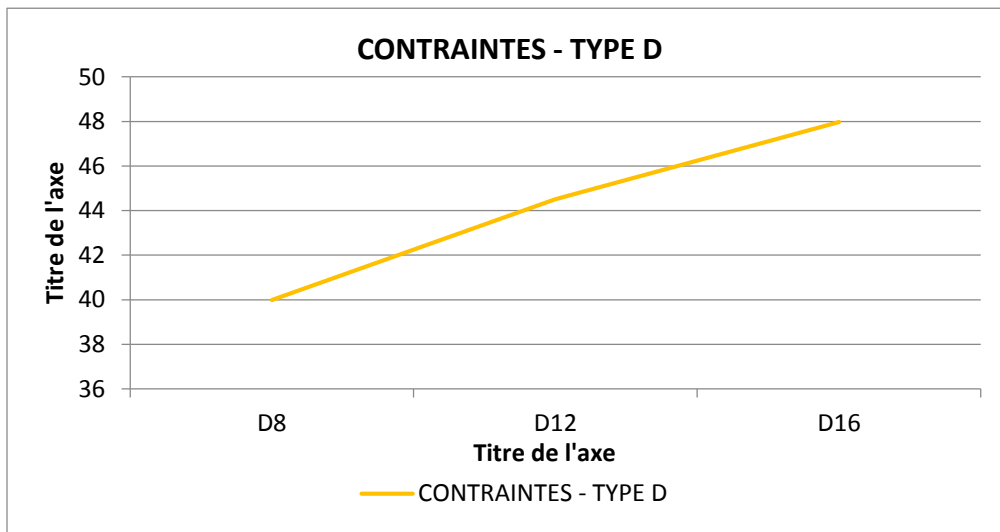


Figure III-26 Courbe des contraintes de la grille D en fonction de la position de confinement (Ø 8, 12 et 16 cm)

➤ Observation des résultats

La Figure III-26 présente la courbe avec les contraintes maximales les plus élevées de toutes les configurations.

Un gain très important est observé entre 8 cm et 12 cm (près de 5 MPa). Le gain est ensuite plus faible mais toujours présent entre 12 cm et 16 cm.

Interprétation des résultats

La maille D, la plus fine, montre une sensibilité exceptionnelle à l'étendue du confinement. Le passage d'un confinement de 8 cm à 12 cm entraîne un bond spectaculaire de la résistance, confirmant que cette maille est extrêmement efficace dès qu'elle peut confiner une zone plus significative.

Le confinement à 16 cm atteint la résistance maximale absolue de l'étude. , il confirme que le confinement total est optimal pour exploiter pleinement le potentiel de la maille la plus fine.

Ces résultats mettent en évidence l'interaction synergique entre la finesse de la maille et l'étendue du confinement, où une maille très fine devient exponentiellement plus efficace à mesure qu'elle couvre une plus grande surface.

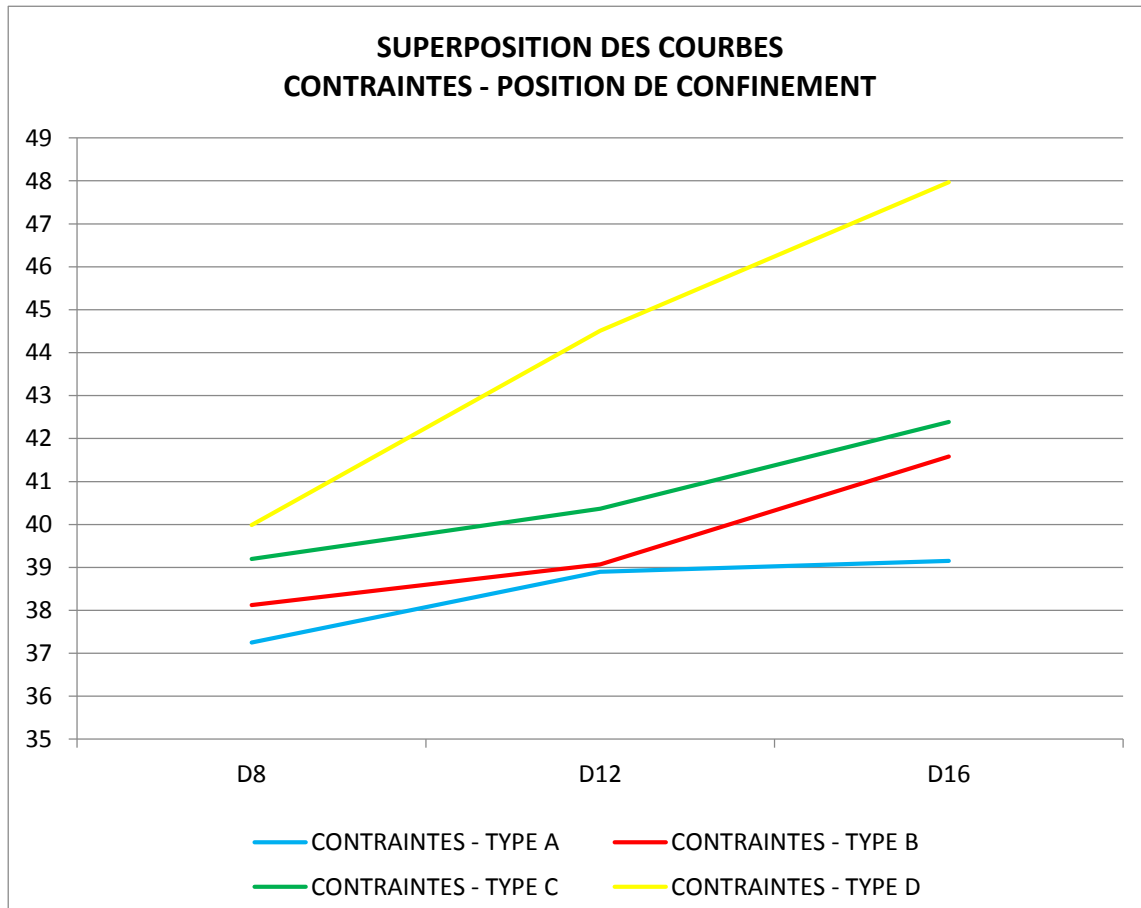


Figure III-27 comparaison des 4 Courbe des contraintes des grille A, B,C et D en fonction de la position de confinement (\varnothing 8, 12 et 16 cm)

➤ Synthèse finale et interprétation globale

L'analyse de ces courbes confirme que l'augmentation du diamètre de confinement améliore systématiquement la résistance maximale du béton. Cependant, l'ampleur de cette amélioration dépend fortement de la finesse de la maille. Pour les mailles plus larges (Type A), les gains deviennent limités au-delà d'un certain point. En revanche, pour les mailles plus fines (Types B, C et surtout D), l'extension du confinement à la totalité de la section (16 cm) est cruciale et

permet d'atteindre des résistances maximales bien plus élevées, en tirant pleinement parti de la capacité de confinement de ces mailles denses .

III.4.4 Comparaison des performances mécaniques du béton confiné et non confiné

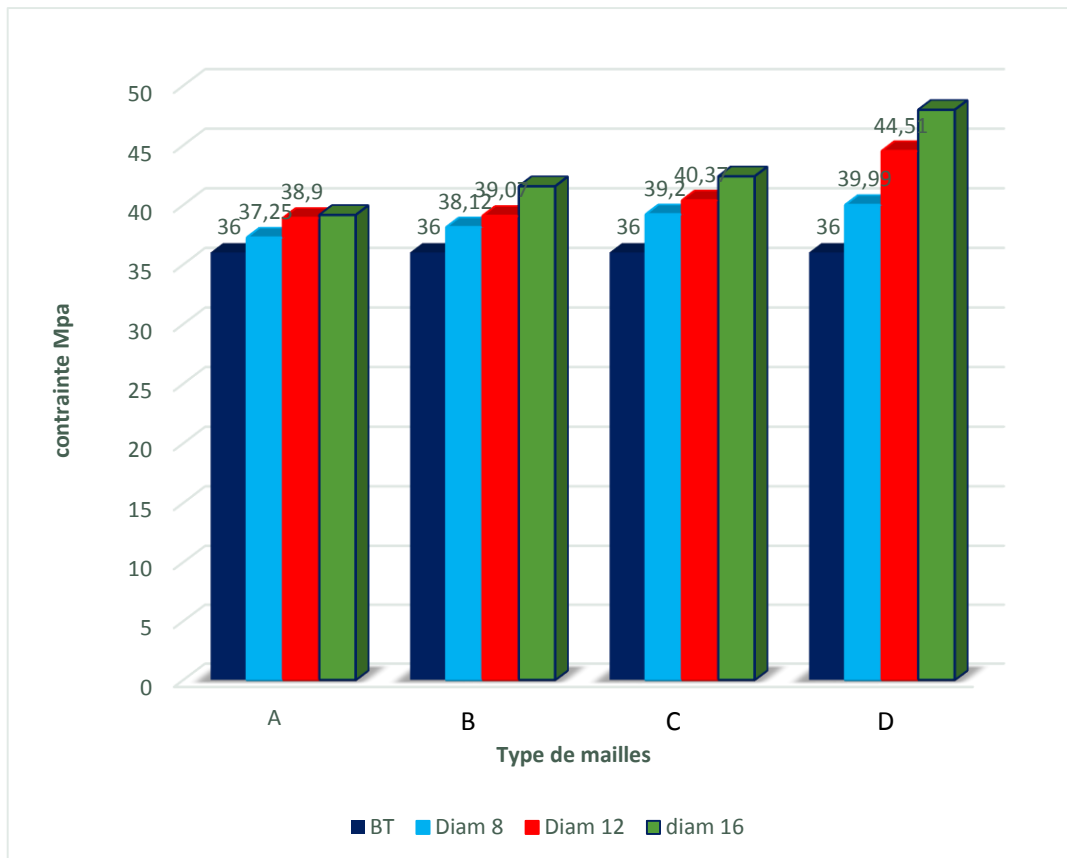


Figure 16 III.4.4 Comparaison des performances mécaniques du béton confiné et non confiné

Le graphique met en évidence l'effet combiné de la taille de la maille et du pourcentage de confinement sur la résistance à la compression du béton. On observe une tendance générale d'augmentation progressive de la contrainte maximale lorsque l'on passe de la maille A (la plus large) à la maille D (la plus serrée). À chaque type de maille correspond une amélioration de la résistance proportionnelle au diamètre de confinement utilisé : plus la surface confinée est grande (de Ø8 cm à Ø16 cm), plus l'effet de confinement est efficace. Le béton confiné avec la maille D et un diamètre de 16 cm atteint ainsi la résistance la plus élevée (47,97 MPa), soit un gain de plus de 33 % par rapport au béton témoin (36 MPa). À l'inverse, les mailles larges associées à un confinement réduit montrent un impact très limité. Cette évolution confirme que la performance mécanique du béton est fortement influencée par la finesse du maillage et le

taux de confinement, deux facteurs qui agissent ensemble pour limiter l'expansion latérale du béton et améliorer son comportement global.

III.4.5 Mode de rupture

L'analyse des modes de rupture permet de mieux comprendre le comportement du béton confiné sous compression. En observant les fissures, l'éclatement ou la forme de dégradation après l'essai, il est possible de relier visuellement la performance mécanique à l'efficacité du confinement. Cette section présente les types de ruptures enregistrés selon les différentes mailles et diamètres d'éprouvettes, afin de comparer l'influence de chaque configuration sur la manière dont le béton cède sous charge.

a) Béton témoin (non confiné)

Le béton témoin, non confiné, a été utilisé comme référence afin de comparer les effets des différentes configurations de confinement. Les observations faites sur ce béton permettent d'apprécier plus clairement les améliorations apportées par le confinement dans les cas étudiés.

Remarque : Les photos prises après rupture ne reflètent pas l'état exact juste après l'écrasement. Le béton extérieur à la zone confinée a été retiré manuellement afin de vérifier si la grille métallique avait subi des dommages tels que déformations ou ruptures.



Figure III-28 éprouvettes du béton témoin avant et après écrasement

b) Béton confiné (type de maille A)

➤ Diamètre de confinement 8 cm

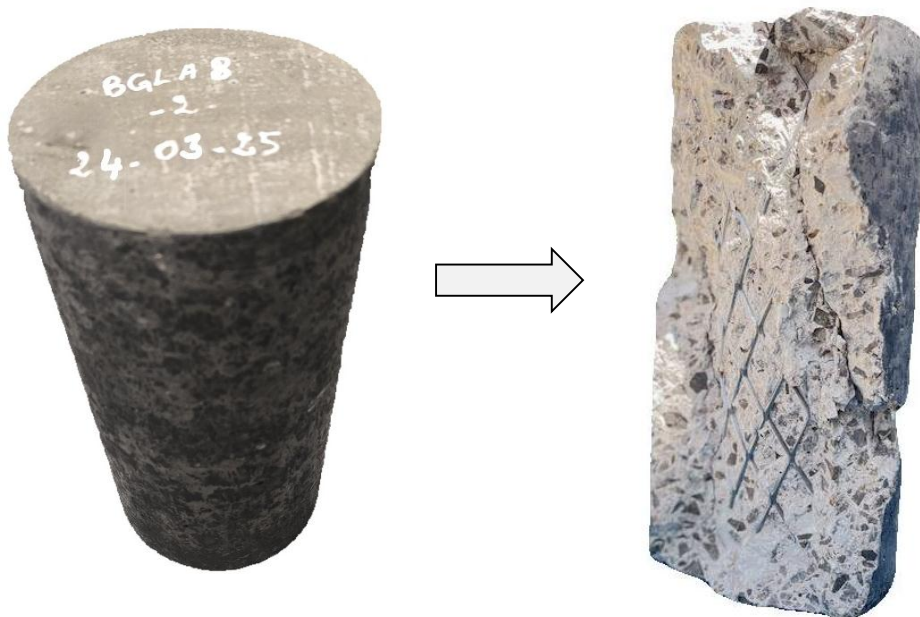


Figure III-29 l'éprouvette BGLA8 avant et après l'écrasement

➤ Diamètre de confinement 12 cm

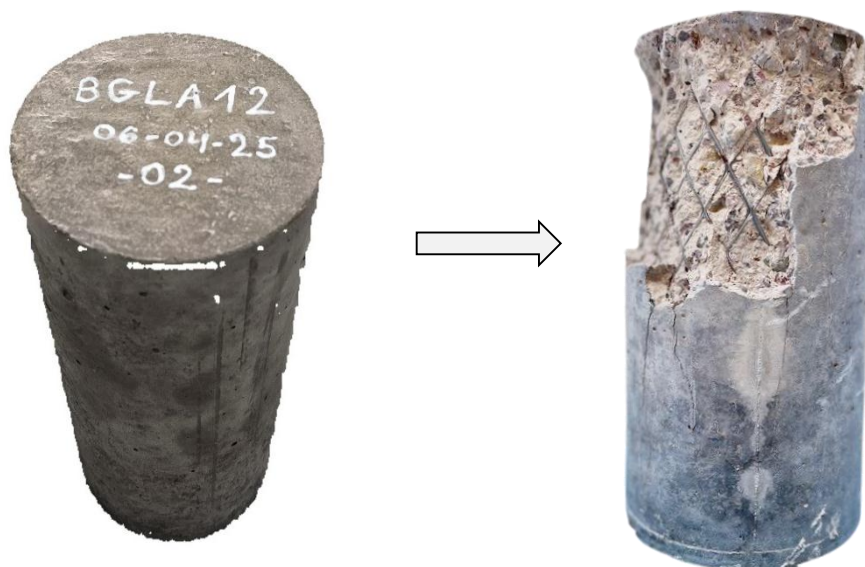


Figure III-30 l'éprouvette BGLA12 avant et après l'écrasement

➤ Diamètre de confinement 16 cm



Figure III-31 l'éprouvette BGLA16 avant et après l'écrasement

c) Béton confiné (type de maille B)

➤ Diamètre de confinement 8 cm

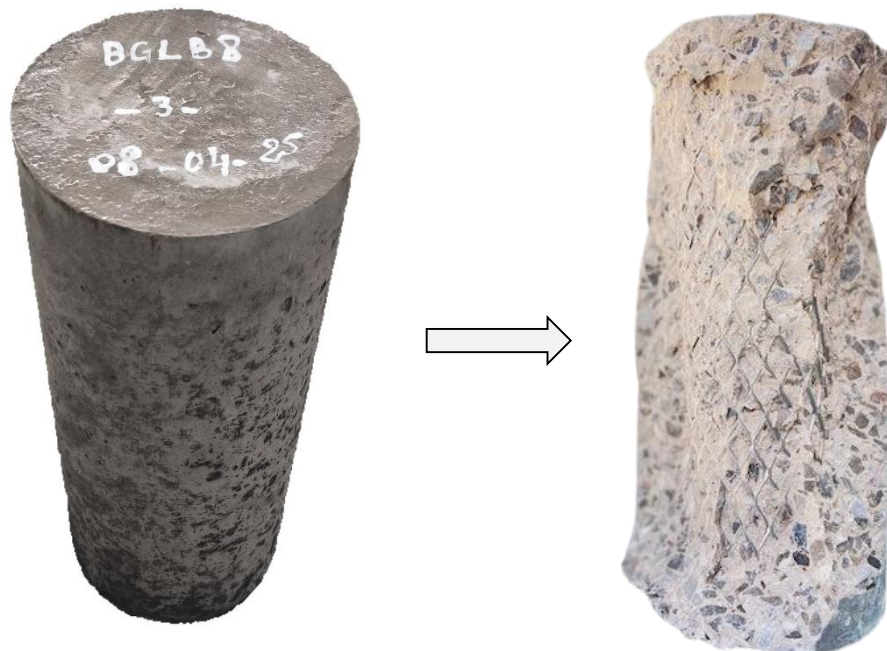


Figure III-32 l'éprouvette BGLB8 avant et après l'écrasement

➤ Diamètre de confinement 12cm

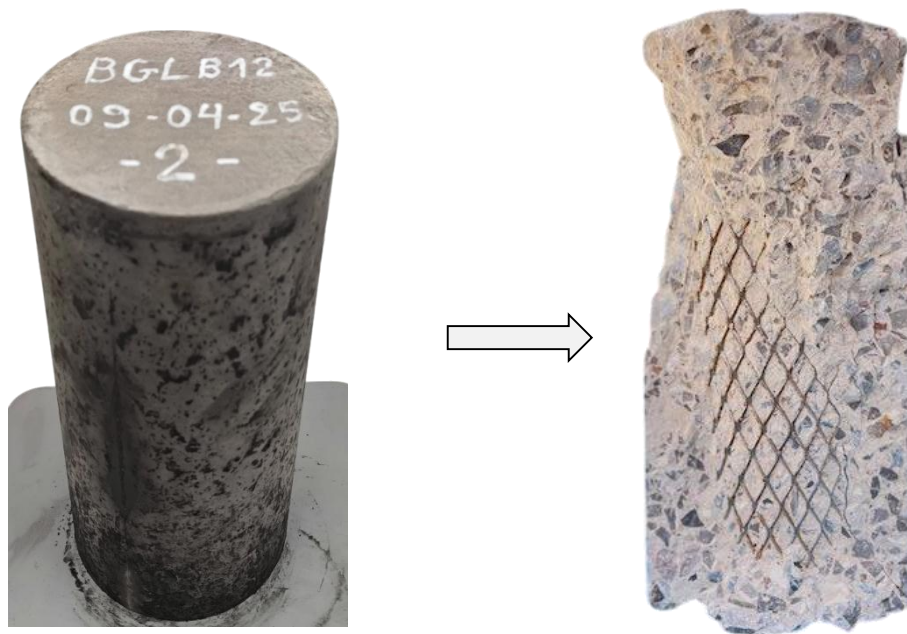


Figure III-33 l'éprouvette BGLB12 avant et après l'écrasement

➤ Diamètre de confinement 16 cm



Figure III-34 l'éprouvette BGLB16 avant et après l'écrasement

d) Béton confiné (type de maille C)

➤ Diamètre de confinement 8 cm

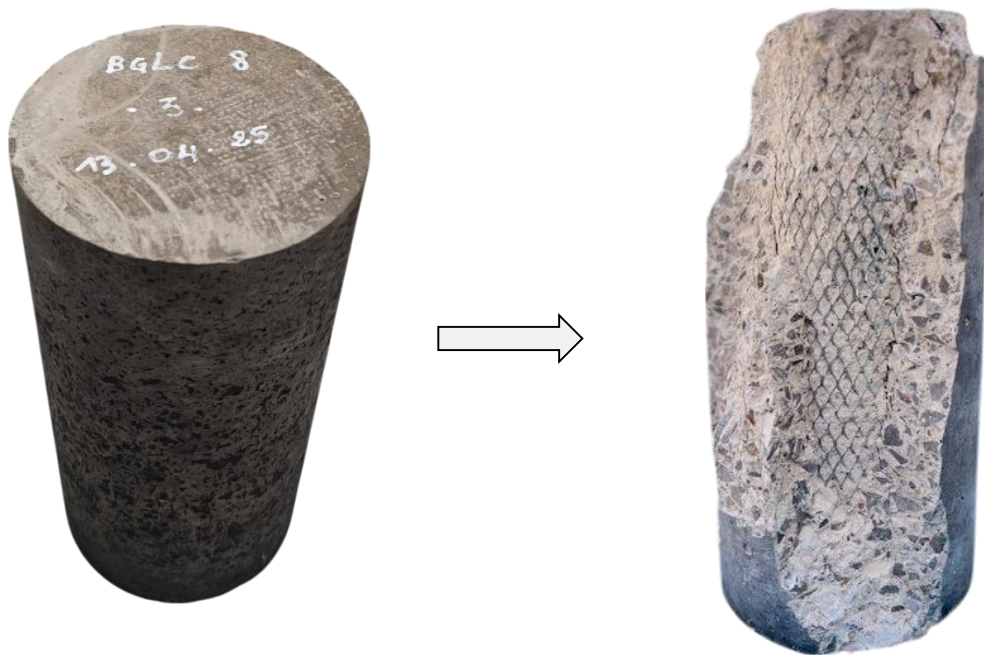


Figure III-35 l'éprouvette BGLC8 avant et après l'écrasement

➤ Diamètre de confinement 12 cm

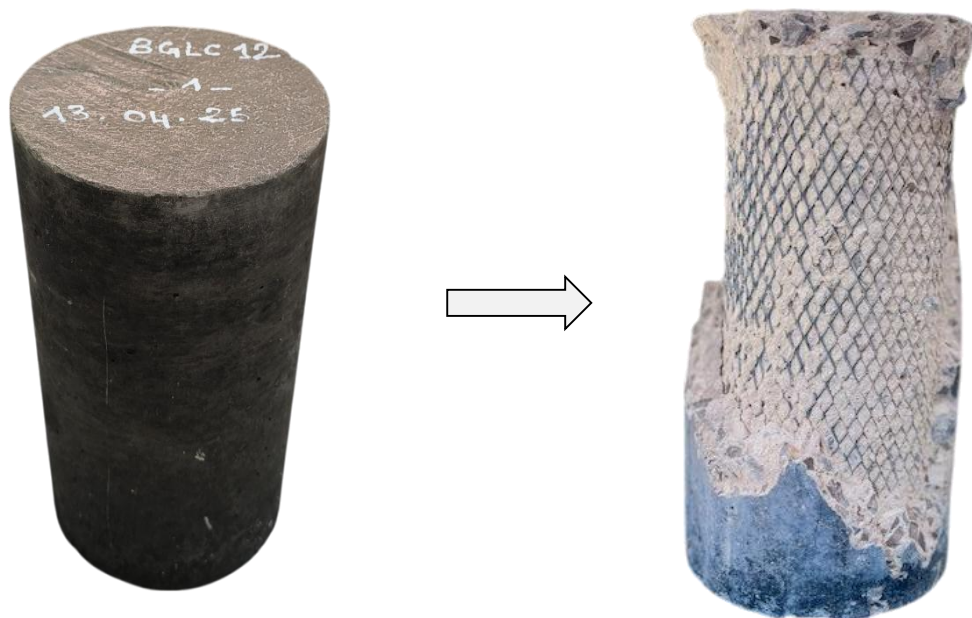


Figure III-36 l'éprouvette BGLC12 avant et après l'écrasement

➤ Diamètre de confinement 16 cm

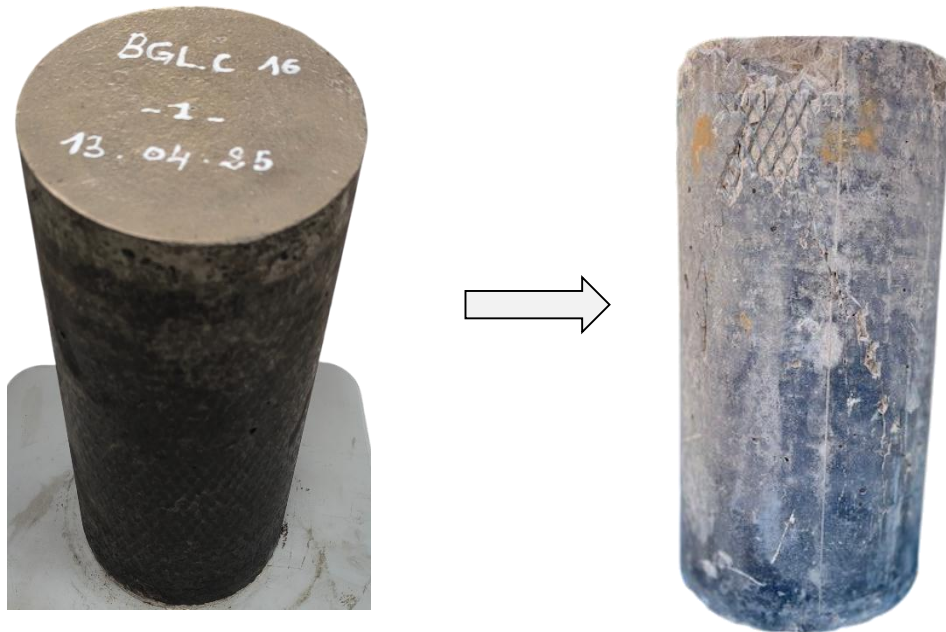


Figure III-37 l'éprouvette BGLC16 avant et après l'écrasement

e) Béton confiné (type de maille D)

➤ Diamètre de confinement 8 cm



Figure III-38 l'éprouvette BGLD8 avant et après l'écrasement

➤ Diamètre de confinement 12 cm

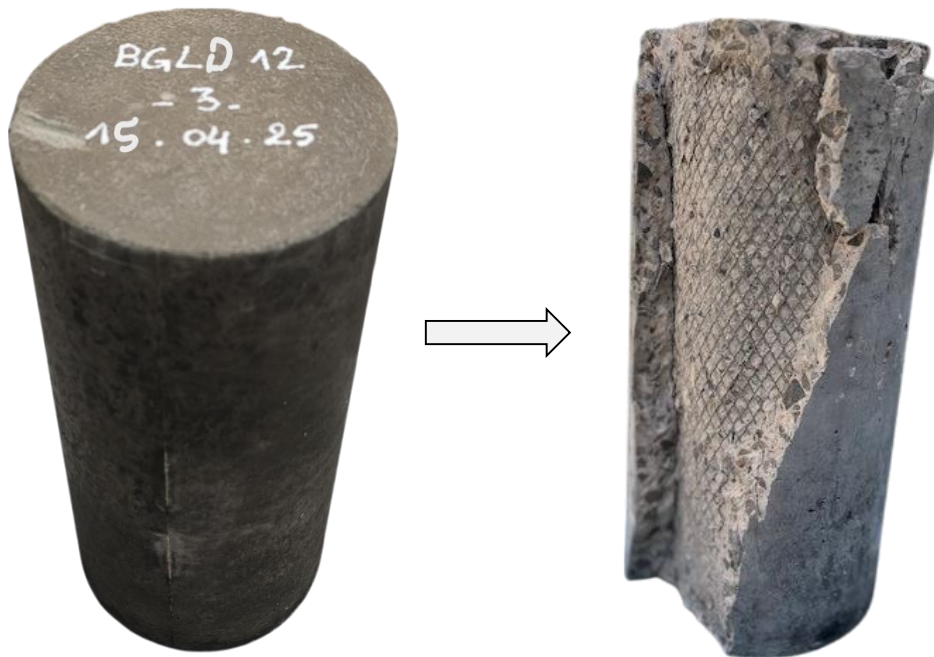


Figure III-39 l'éprouvette BGLD12 avant et après l'écrasement

➤ Diamètre de confinement 16 cm

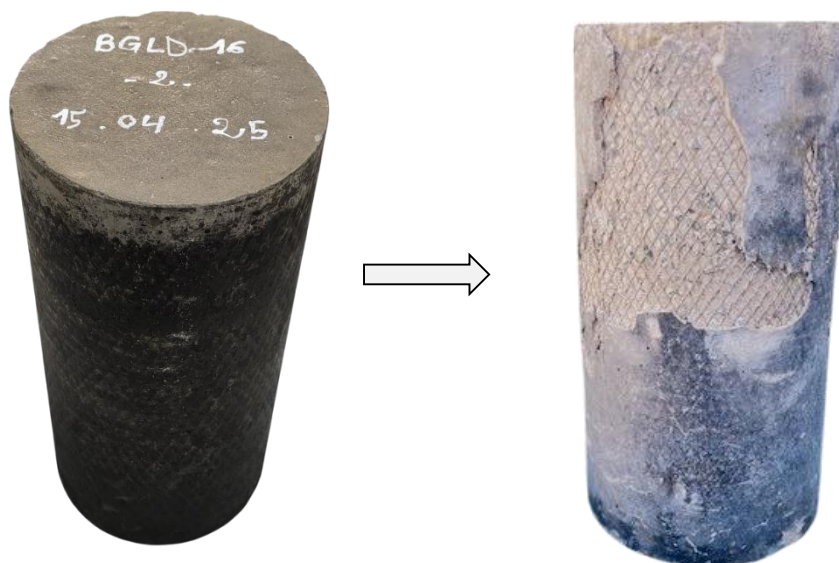


Figure III-40 l'éprouvette BGLD16 avant et après l'écrasement

III.5 Conclusion

Cette étude a clairement démontré l'efficacité du confinement par grilles métalliques losangées pour améliorer les propriétés du béton. Les résultats confirment qu'une maille plus fine (de Type A à D) et un confinement appliqué sur une plus grande surface (de 8 cm à 16 cm) augmentent significativement la résistance maximale et, surtout, transforment le comportement du béton en le rendant plus ductile. La combinaison d'une maille très fine (Type D) et d'un confinement total (16 cm) offre la performance optimale, faisant passer le béton d'un matériau fragile à un matériau plus résistant et sécurisant.

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'étudier de manière expérimentale l'influence d'un confinement métallique losangé sur le comportement mécanique du béton. En testant différentes tailles de maille et positions de confinement (50 %, 75 %, 100 % de la section), il a été démontré que le confinement améliore significativement la ductilité du béton, tout en augmentant modérément sa résistance à la compression. Les courbes contrainte-déformation montrent une rupture plus progressive et une capacité accrue à dissiper l'énergie, surtout pour les configurations fortement confinées.

Les résultats soulignent deux conclusions majeures :

1. Plus la maille est serrée, plus le confinement est efficace.
2. Plus la surface confinée est importante, meilleure est la transformation du comportement fragile vers un comportement ductile.

Le meilleur compromis est obtenu avec une maille serrée (type D) et un confinement total ($\varnothing 16$ cm), atteignant des performances mécaniques optimales.

Perspectives

Les résultats de ce travail ouvrent la voie à plusieurs axes de recherche. Il serait intéressant d'étudier l'effet d'autres géométries de maille, de matériaux constitutifs différents pour les grilles, ou encore d'examiner l'influence du confinement sur d'autres propriétés du béton, comme sa résistance en traction ou son comportement sous chargement cyclique. Une application à l'échelle structurelle, en intégrant ces bétons confinés dans des éléments réels (colonnes, poutres, murs porteurs), permettrait de valider leur performance dans un contexte pratique. Ainsi, ce mémoire contribue à enrichir les connaissances dans le domaine du béton confiné et ouvre des perspectives concrètes pour des structures plus sûres, plus durables et mieux adaptées aux exigences actuelles de la construction.

[1] Mehta, P.K., & Monteiro, P.J.M. (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (3rd Edition). Chapter 1 : Introduction to Concrete, pp. 17-23. McGraw-Hill Education

[2] Mehta, P.K., & Monteiro, P.J.M. (2014). Concrete : Microstructure, Properties, and Materials (4th Edition). McGraw-Hill Education. Chapitre 1 : Introduction to Concrete, pp. 17-30.

[3] Brico-Ressources (2024). Jackson, M.D., et al. (2013). Roman seawater concrete : Characterization and durability.

[4] Le ciment portland artificiel : fabrication, propriétés : mortiers et ...

Le ciment portland artificiel : fabrication, propriétés : mortiers et bétons / publié par le Groupement professionnel des fabricants de ciment portland de Belgique -- 1928 – livre

[5] Classification des bétons dans la norme béton NF EN 206+A2/CN ...

Les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci sont prescrites sous forme de différents types de classes dans la norme NF EN 206+A2/CN : 2022.

[6] Infociments. (2025). Le béton armé.

[7] Neville, A.M. (2011). Properties of Concrete (5th Edition). Pearson Education Limited.

Ce livre détaille les principes du béton précontraint, ses méthodes de mise en œuvre et ses avantages structurels.

[8] Ollivier, J.-P. (2012). Propriétés physiques du béton et de ses constituants

Ce livre analyse les propriétés physiques et mécaniques du béton, offrant un cadre scientifique solide.

[9] Infociments. (2022, juillet 20). Le fluage des bétons.

[10] Dlubal Software. (2024, novembre 20). Résistance au cisaillement selon l'ACI 318-19 dans RFEM 6.

[11] Boubekeur Toufik. (2020). Matériaux de Construction [PDF]. Université de Chlef.

[12] Effet de la charge de fatigue sur l'interface PRF-béton — École de technologie supérieure (ÉTS), Montréal (2023).

[13] Bouzoubaa, N. (2020). Coefficient de dilatation thermique du béton : influence de la nature des granulats. Université de Sherbrooke

[14] IFSTTAR. (2023). Modélisation du comportement du béton en dynamique rapide. Rapport scientifique.

[15] Babba, R. (2019). Renforcement et comportement du béton confiné par des composites PRF et armatures transversales [Thèse de doctorat, Université de Sétif

[16] Abdesselam, H., & Kassoul, A. (2015). Effet du confinement latéral sur la résistance et la ductilité des structures en béton armé dimensionnées selon le règlement parasismique Algérien (RPA99/V2003) [PDF]. Université Hassiba Benbouali de Chlef.

[17] El Youbi, M., & Kadiri, I. (2022). Contribution à l'étude du comportement des bétons confinés par CFRP. Annales de l'Université Moulay Ismail, vol. 40(1), pp. 274-290.

[18] Université Badji Mokhtar - Annaba. (2020). Étude expérimentale du comportement en compression axiale de tubes en acier remplis de béton [PDF].

[19] Yaiche, F. (2015). Effet du confinement selon les types de sections et sollicitations [Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri].

[20] RPA-2024 (Règlement Parasismique Algérien, 2024).

Chapitre VII : Structures en béton armé — Nouvelle rédaction enrichie visant à introduire des prescriptions pour améliorer la ductilité et la performance sismique.

[21] Comportement sismique des structures en béton ordinaire et en béton à haute performance armé confinées par étriers, École des Ponts ParisTech, 1998.

[22] RPA 99 / Version 2003. Règles Parasismiques Algériennes pour la conception et le calcul des constructions en zones sismiques. Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, Algérie.

[23] Pierre Engel (2017). Mise aux normes sismiques des constructions (Techniques de l'Ingénieur) [1] Association Française du Génie Parasismique (AFPS)

[24] Hamdi, O. (2021). Influence des fibres hybrides sur les caractéristiques de béton de fibres [Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla].

[25] Wiktor, V., & Jonkers, H.M. (2011). Un nouveau béton auto-cicatrisant grâce à l'incorporation de bactéries. *Matériaux & Techniques*, 99(8-9), 731-738.

[26] AMOCER Group – Les habitats modulaires : le futur de la construction

[27] Compositadour (2023). Formation et technologies de placement de fibres robotisé (AFP)

[28] Les capteurs à fibre optique pourraient décupler leur performance. *actu.epfl.ch*. Publié le 13 novembre 2020.

[29] Davidovits, J. (2013). *Geopolymer Chemistry and Applications*.

[30] Capital Durable (2025). Le lin : un atout naturel pour la construction durable

[31] Gradel (2023). Les composites biosourcés et la fabrication additive robotisée

[32] Otsuka, K., & Wayman, C.M. (1999). *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press.

ISBN : 978-0521592526

[33] Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D.A. (2008). TiO₂ Photocatalysis and Related Surface Phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515-582.

[34] European Commission (2023). *Smart and Adaptive Structural Systems for Resilient Infrastructure : The AdaptConf Project Overview*.

[35] Lahlou, K. (1994). Colonnes en béton à hautes performances confinées dans des tubes d'acier minces.

[36] AFNOR. (2005). NF EN 1998-1 : Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments. Paris : Association Française de Normalisation (AFNOR).

Référence norme européenne EN 1998-1:2004, version française publiée en 2005.

[37] Japanese Architectural Standard Specification for Reinforced Concrete Structures (JASS 5) et la Building Standard Law of Japan,

[38] ACI Committee 318 (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. American Concrete Institute. ACI Committee 315 (2018). *Guide to Presenting Reinforcing Bar Details*. American Concrete Institute.

[39] M. Saiidi et H. Wang (2005). *Innovative Materials For Bridge Seismic Design*. WIT Transactions on the Built Environment, Volume 81.

[40] Steffen, S., Nitzlader, M., Burghardt, T., Binz, H., Blandini, L., & Sobek, W. (2021). *An Actuator Concept for Adaptive Concrete Columns*. *Actuators*, (10), 273. doi:10.3390/act10100273

[41] Dreux, G., & Gorisse, J. (1990). *Nouveau guide du béton*. Eyrolles.

[42] Lanchon, R. (1993). *Cours de laboratoire : Granulats, bétons, sols (Tome 2)*. Desforges

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude expérimentale du comportement mécanique du béton confiné à l'aide de grilles métalliques losangées cylindriques. L'objectif est d'évaluer l'efficacité de ce type de confinement sur la résistance à la compression et la ductilité du béton, en comparant plusieurs configurations. Pour cela, des éprouvettes cylindriques de dimensions normalisées ($D = 16$ cm, $H = 32$ cm) ont été confectionnées, certaines non confinées (béton témoin), et d'autres confinées à l'aide de grilles métalliques de **quatre mailles différentes** (ouvertures de 4 cm à 1 cm).

Trois **positions de confinement** ont été testées :

- un confinement centré de $\varnothing 8$ cm (≈ 50 % de la surface confinée),
- $\varnothing 12$ cm (≈ 75 %),
- et $\varnothing 16$ cm (≈ 100 % de confinement).

Les résultats montrent que le confinement améliore significativement la **ductilité** du béton, surtout avec des mailles serrées et un confinement couvrant une grande surface. Le gain en **résistance à la compression** reste modéré, mais la **rupture devient moins brutale**, avec une capacité à maintenir la charge au-delà du pic, ce qui représente un avantage important dans les structures soumises à des sollicitations dynamiques.

Cette méthode de confinement, simple à mettre en œuvre et peu coûteuse, apparaît comme une solution efficace pour renforcer la sécurité et la résilience des structures en béton, en particulier en zone sismique.

Mots clés : Béton confiné, Grille métallique losangée, Ductilité du béton, Résistance à la compression

Abstract

This thesis presents an experimental study on the mechanical behavior of concrete confined with cylindrical diamond-shaped metallic grids. The goal is to evaluate the effectiveness of this confinement technique in enhancing the compressive strength and especially the ductility of concrete. Standard cylindrical specimens (16 cm in diameter and 32 cm in height) were prepared, some unconfined (control group), and others confined using metallic grids with four different mesh sizes (from 4 cm to 1 cm opening).

Three levels of confinement coverage were also investigated by varying the diameter of the confining cylinder positioned at the center of the specimen: 8 cm (25% of the section), 12 cm (56%), and 16 cm (100%).

The compression tests revealed that while the increase in peak compressive strength remains moderate, the improvement in ductility is significant. The confined specimens showed a more stable post-peak behavior, with a higher energy absorption capacity and a delayed rupture compared to the unconfined concrete. The best results were observed with fine mesh grids covering the entire section.

This innovative and cost-effective confinement method demonstrates a promising solution to improve the mechanical performance of concrete, particularly in structures exposed to seismic loading or requiring enhanced structural resilience.

Keywords : Confined concrete, Metallic diamond-shaped grid, Concrete ductility, Compressive strength