

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : Génie Civil

Spécialité : Structures

Présenté par :

SELMANI RANIA

SLIMANE FATIMA ZOHRA

Sujet du mémoire :

**Effet de la variable d'endommagement sur la ductilité
locale des poutres en béton armé**

Soutenu publiquement le 20/06/2023 devant le jury composé de:

Mr. M. AIT AMAR MEZIANE

Président

Mr. R. BENFERHAT

Encadreur

Mr. H. BOUZID

Co-encadre

Mr. H.H. ABDELAZIZ

Examineur

Mr. H. LAZREG

Examineur

Promotion : 2022-2023

REMERCIEMENT

Tout d'abord nous remercions **ALLAH**
De nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer
Et de terminer ce mémoire.

Nous voudrions dans un premier temps remercier
Messieurs **BENFERHAT RABIA ET BOUZID**
HAITHAM

Pour leurs judicieux conseils qui ont contribué à
alimenter nos réflexions.

Nous remercions plus particulièrement les membres de
Jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, Nous présentons nos profonds remerciements
aux enseignants et au staff du département de Génie
Civil.

Dédicace

Au nom d'Allah, le plus miséricordieux et le plus compatissant. Louange à Allah.

Cette mémoire est dédiée à :

Mes merveilleux parents qui m'ont élevé pour être la personne que je suis aujourd'hui.

Merci pour tout l'amour inconditionnel, les conseils et le soutien sans faille qui ont toujours été présents dans les bons moments comme dans les moments difficiles.

À ma douce sœur jumelle, même s'il y a un écart de 6 ans entre nous, la miséricordieuse "Ismahane" et la merveilleuse nièce "Saden". Et à mes adorables frères "Ahmed et Zakaria".

À mes cousines proches, Soumia et Chaïma, les meilleurs auditeurs et conseillers.

À la longue liste de mes amies : Rania, kholoud, Bakhta, Djamila, Chahira, Soumia, Kholoud, Naima, Ferial Je vous aime tous.

En souvenir de ma grand-mère, que le tout-puissant Allah accepte son âme pure dans Jannatul Firdous, amen.

Slimane Fatima

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance je dédicace cet humble travail :

A la mémoire de ma grand-mère "**ma mère KADARI HADJA TORKIA**"

Puisse dieu t'avoir dans sa sainte miséricorde et que ce travail soit une prière pour ton âme, et a celui qui m'a encouragé à persévérer tout au long de ma vie, à l'homme le plus en vue de ma vie mon cher père "**SELMANI BENKHADA**", et à celui qui est au-dessus, et sur lui je compte, au cœur qui donne chère mère "**CHERIF HOSNI MEBARKA**".

A ma grand-père **CHERIF HOSNI AID**, Et ma grande mère **SELMANI HAFSA**.

A ma deuxième mère **KASSIDA**.

A mes chères sœur **NAIMA, FADILA, ASMA, HOUDA, SARAH, HADJER, FRIAL, MARAM**.

A ma sœur spéciale **HADJA**.

A ma sœur architecte **FATIMA**.

A mes chers frères **TAHA YASSINE, AHMED AMINE, MOHAMED, YOUCEF HOUARI**.

A mes tantes et professeurs **AMIRA, SAMRA**.

A mes chers oncles **AMER, BELKACEM, ABDELHADI, DJILALI, ABDERRAZAK, MOUSTAFA**.

A mon binôme et cher amie **FATIMA**.

A mes sœurs **IKRAM, KHOULOU, BAKHTA, SAWSAN, FATIHA, WISSAM**.

A mes chers amies **DOUAA, RABIA, YOUSRA, BOUCHRA, CHAIMA, WISSAL, KHOULOU, NAIMA, FRIAL, AKILA, ZINEB, MARIAM, MARIA, MAROUA**.

A toute ma famille.

Rania selmani

RESUME

La ductilité fait référence à la capacité d'un matériau à subir une déformation plastique significative avant de se rompre. Dans le cas du béton armé, cette propriété est rendue possible grâce à l'interaction entre le béton et les armatures.

L'objectif principal de cette étude de recherche est d'analyser la ductilité des poutres en béton armé et d'évaluer l'impact de l'endommagement sur cette caractéristique en fonction de la résistance du béton. Une comparaison est également réalisée avec les poutres en béton armé conventionnel en termes de ductilité. Les résultats obtenus révèlent que l'augmentation du niveau de dommage entraîne une diminution de la ductilité, tout en ayant une incidence sur la résistance globale du béton armé. Cependant, il a été constaté que le renforcement de ces poutres à l'aide de barres en fibre de polymère renforcé (FRP) permet de compenser en partie la perte de ductilité.

Cette étude se concentre donc sur l'analyse de l'effet de l'endommagement sur la résistance et la ductilité des poutres en béton armé. Les résultats soulignent l'importance cruciale du renforcement par des barres en FRP pour maintenir un niveau satisfaisant de ductilité. Ces conclusions mettent en évidence les avantages du renforcement structurel à l'aide de matériaux composites avancés dans le domaine de la construction en béton armé, offrant ainsi des solutions pour améliorer la ductilité des structures face aux contraintes liées à l'endommagement.

Mots clés : ductilité, endommagement, renforcement, béton armé, BHP, FRP.

ABSTRACT

Ductility refers to the ability of a material to undergo significant plastic deformation before it fractures. In the case of reinforced concrete, this property is made possible through the interaction between the concrete and the reinforcing bars.

The main objective of this work is to analyze the ductility of reinforced concrete beams and evaluate the impact of damage on this characteristic based on the concrete strength. A comparison is also made with conventional reinforced concrete beams in terms of ductility. The results obtained reveal that an increase in the level of damage leads to a decrease in ductility while also affecting the overall strength of reinforced concrete. However, it has been found that reinforcing these beams using fiber-reinforced polymer (FRP) bars partially compensates for the loss of ductility.

Therefore, this study focuses on analyzing the effect of damage on the strength and ductility of reinforced concrete beams. The results underline the crucial importance of reinforcement with FRP bars to maintain a satisfactory level of ductility. These findings highlight the advantages of structural reinforcement using advanced composite materials in the field of reinforced concrete construction, providing solutions to enhance the ductility of structures in the face of damage-related constraints.

المخلص

المرونة تشير إلى قدرة المادة على تحمل تشوه بلاستيكي كبير قبل الكسر. في حالة الخرسانة المسلحة، يتم تمكين هذه الخاصية بفضل التفاعل بين الخرسانة والتسليح.

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة البحثية هو تحليل مرونة العوارضالخرسانية المسلحة وتقييم تأثير التلف على هذه الخاصية بناءً على قوة الخرسانة. يتم أيضاً إجراء مقارنة مع العوارض الخرسانية المسلحة من حيث المرونة. توضح النتائج المتحصل عليها أن زيادة مستوى التلف يؤدي إلى انخفاض في المرونة، مع تأثير على المقاومة العامة للخرسانة المسلحة. ومع ذلك، تبين أن تعزيز هذه العوارض باستخدام أعمدة معززة بألياف البوليمرالمقواة (FRP) يعوض جزئياً عن فقدان المرونة.

لذلك، تركز هذه الدراسة على تحليل تأثير التلف على المقاومة والمرونة للعوارض المسلحة بالخرسانة. تؤكد النتائج أهمية بالغة لتعزيزها باستخدام أعمدة FRP للحفاظ على مستوى مقبول من المرونة. تسلط هذه الاستنتاجات الضوء على مزايا التعزيز الهيكلي باستخدام مواد مركبة متقدمة في مجال البناء بالخرسانة المسلحة، مما يوفر حلاً لتحسين مرونة الهياكل في مواجهة الضغوط المرتبطة بالتلف

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Sommaires	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notations	
Introduction Générale.....	1

CHAPITRE I

Les différents types de béton

I.1.Introduction	03
1.1. Historique.....	03
1.2. Définition du béton	03
1.3. Définition de béton armé	03
I.2. Composition du béton armé	04
2.1. Le béton	04
2.1.1. Le ciment	04
2.1.2. Les granulats	05
2.1.3. L'eau	06
2.1.4. Les adjuvants	06
2.2. L'acier	06
I.3. Propriétés du béton armé	07
3.1. Les propriété d'acier	07
3.2. Propriétés du béton	07
3.2.1. Propriétés du béton frais	07
3.2.2. Propriétés du béton durci	09
I.4. Les pathologies de béton armé	10
I.5. Utilisations du béton armé	11
I.6. Les types de béton	11

6.1. Les Bétons à Hautes Performances	12
6.2. Béton autoplaçant	12
6.3. Béton ordinaire	13
I.7. Méthodes de la formulation du béton	14
7.1. Méthode de Faury	14
7.2. Méthode de Bolomey	14
7.3. Méthode de LA Valette	15
7.4. Méthode Dreux-Gorisse	15
I.8. Conclusion	15

CHAPITRE II

Dégradation des structures en béton armé

II.1. Introduction :	16
II.2. Les cause de dégradation	16
2.1. Dégradation mécanique	16
2.1.1. Chocs.....	16
2.1.2. Abrasion	17
2.2. Dégradation chimique	17
2.2.1. Réaction d'alcalis-granulats	17
2.2.2. Attaques Sulfatiques	18
2.2.2.1. L'attaque sulfatique interne	18
2.2.2.2. L'attaque sulfatique externe	18
2.2.3. Attaques Acides	19
2.2.4. L'attaque des chlorures	20
2.3. Dégradations Physique	21
2.3.1. Cycles de gel-dégel	21
2.3.1.1. Détérioration par fissuration interne	22
2.3.1.2. Détérioration par l'écaillage	22
2.3.2. Sels de déverglaçage	22
2.3.3. Tassement	23
II.3. Les types de dégradations	23
3.1. La ségrégation	23
3.2. La fissuration	23
3.3. La rupture	25

3.4. La disjonction entre les grains	25
3.5. L'apparition de l'armature	25
3.6. Le délitage et l'épaufrure	26
3.7. L'excroissance cryptogame	26
II.4. Causes dues aux variations de température	26
II.5. Causes dues au milieu environnant	27
5.1. Classification des environnements agressifs	27
II.6. Les méthodes d'auscultation	27
6.1. Inspection visuelle (Marteau et Carottage)	28
6.2. Radar	28
6.3. Potentiel de corrosion	28
6.4. Résistivité électrique	29
II.7. Conclusion	29

CHAPITRE III

Génialité sur la ductilité

III.1. Introduction	30
III.2. Différents types de ductilité	31
2.1. Ductilité de déformation	32
2.2. Ductilité de déplacement	33
2.3. Ductilité en courbure	33
III.3. Facteurs influençant la ductilité	34
III.4. Ductilité vis-à-vis chargement statique	35
III.5. Ductilité en chargement dynamique alterné	37
III.6. Ductilité des matériaux	38
6.1. Acier	38
6.2. Béton	39
7.1. Conclusion	40

CHAPITRE IV

Calcul de facteur de ductilité

IV.1. Introduction	41
IV.2. Lois de comportement des matériaux.....	41
2.1. Béton.....	41
2.2. Acier.....	42

IV.3. Facteur de ductilité pour un béton non-endommagé.....	43
3.1. Courbure à la fin de la phase élastique.....	43
3.2. Courbure à l'état limite ultime	44
3.3. Facteur de ductilité.....	45
IV.4. Facteur de ductilité d'un béton endommagé.....	45
4.1. Comportement d'un béton endommagé.....	45
4.2. État limite de service.....	45
4.3. État limite ultime.....	46
IV. Conclusion.....	46

CHAPITRE V

Ductilité des poutres avec un béton endommagé

V.1. Introduction.....	47
V.2. Effet d'endommagement sur la ductilité.....	47
V.3. Effet de taux d'armature tendues.....	52
V.4. Optimisation de la ductilité des structures en béton par l'ajout de renforts en matériaux composites.....	54
V.4.1. Courbure à l'état ultime	55
V.4.2. Influence du renforcement par matériaux composites FRP sur la ductilité	55
V.5. Conclusion	61
Conclusion générale	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : ciment

Figure I.2 : les granulats

Figure I.3 : flambement des armatures

Figure I.4 : mesure de l'affaissement au cône d'abrams

Figure I.5 : essais de compression

Figure I.6 : courbe de compression

Figure I.7 : résiste à la traction par flexion

Figure I.8 : courbe déformation

Figure I.9 : différence entre les BAP et le BO

Chapitre II

Figure II.1 : Intrados des ponts dégradés

Figure II.2 : Pile de pont atteinte par l'alcali-réaction

Figure II.3 : Attaques Sulfatiques

Figure II.4 : Schéma illustratif des attaques des acides sur le béton

Figure II.5 : Processus de corrosion par les chlorures

Figure II.6 : Dégradation due aux sels de déverglaçage

Figure II.7 : Fussiomètre : réglette qui s'utilise pour la détermination de la largeur des fissures

Figure II.8 : Phénomène de corrosion de l'acier

Figure II.9 : Fissure transversale dans la corniche et l'acrotère

Figure II.10 : L'eau qui traverse les fissures peut s'infiltrer derrière l'étanchéité

Figure II.11 : Essais Radar et de potentiel de corrosion sur les secteurs étudiés

Chapitre III

Figure III.1 : Courbe charge – déformation / Relation déformabilité – ductilité

Figure III.2 : Déformabilité et ductilité des voiles et portiques en béton armé

Figure III.3 : Comportement d'un élément ductile et fragile

Figure III.4 : Types de ductilité

Figure III.5 : Ductilité de déformation

Figure III.6 : Ductilité de déplacement

Figure III.7 : Ductilité en courbure

Figure III.8 : Relation entre les niveaux de ductilité

Figure III.9 : Courbe charge – déplacement

Figure III.10 : Comportement élastoplastique en dynamique

Figure III.11 : Courbes contrainte-déformation de quelques types d'acier

Figure III.12 : Courbes contrainte-déformation de cylindres de béton sous compression uniaxiale

Chapitre IV

Figure IV.1. Diagramme parabole rectangle pour le béton non confiné sous compression.

Figure IV.2. Diagramme "contrainte – déformation" des aciers du béton armé.

Figure IV.3. Comportement d'une section fléchie d'une poutre en béton armé à l'état limite de service (la fin de phase élastique).

Figure IV.4. Comportement de la section d'une poutre fléchie en béton armé à l'état limite ultime.

Chapitre V

Figure V.1. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement $f_c=20$

Figure V.2. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement $f_c=30$

Figure V.3. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement $f_c=40$

Figure V.4. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement $f_c=50$

Figure V.5. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement $f_c=60$

Figure V.6. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement $f_c=70$

Figure V.7. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement $f_c=80$

Figure V.8. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement $f_c=90$

Figure V.9. courbe du moment des poutre Par rapport la ductilité courbure

Figure V.10. courbe du moment des poutre Par rapport la ductilité courbure. $f_c=20$ MPa

Figure V.11. Courbe du moment des poutre Par rapport la ductilité courbure. $f_c=60$ MPa

Figure V.12. Courbe du moment des poutre Par rapport la ductilité courbure. $f_c=90$ MPa

Figure V.13. La courbe représente la variation de la ductilité en fonction du taux d'armature $f_c=20$

Figure V.14. La courbe représente la variation de la ductilité en fonction du taux d'armature $f_c=50$

Figure V. 15. La courbe représente la variation de la ductilité en fonction du taux d'armature $f_c=90$

Figure V.16. Défirent types de renforcement en FRP

Figure V.17. P- Δ Pour EBR-M2 et NSM-2

La figure V.18. Section d'une poutre renforcée avec des barres en FRP

Figure V.19. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement $f_c=20(\epsilon_{fu}=0.02)$

Figure V.20. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement $f_c=20(\epsilon_{fu}=0.04)$

Figure V.21. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement $f_c=20(\epsilon_{fu}=0.08)$

Figure V.22. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement $f_c=50(\epsilon_{fu}=0.02)$

Figure V.23. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement $f_c=50(\epsilon_{fu}=0.04)$

Figure V.24. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement $f_c=50(\epsilon_{fu}=0.08)$

Figure V.25. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement $f_c=90(\epsilon_{fu}=0.02)$

Figure V.26. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement $f_c=90(\epsilon_{fu}=0.04)$

Figure V.27. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement $f_c=90(\epsilon_{fu}=0.08)$

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableaux I.1 : les classes de consistance

Tableaux I.2 : Types de béton distingué selon la composition

Chapitre II

Tableaux II.1 : interprétation des mesures selon la norme ASTM c876

Liste des Notations et symboles

F_{cj}: Résistance à la compression à « j » jours

F_{c28}: Résistance à la compression à (j :28)

F_{tj}: Résistance à la traction

J : Jour

P : Pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D : Diamètre du plus gros grain

R: Rayon du moule

E: Eau

G: Granulats

E/C: rapport eau sur ciment

BO: Béton ordinaire

BAP: Béton auto-plaçant

BHP: Béton de haute performance

RPA: Règles Parasismiques Algériennes

B.A.E.L: Béton armé aux états limites

σ: Contrainte

w: Ouverture de fissure

μ: Facteur de ductilité

A_s : Section des armatures tendues

A'_s: Sections des armatures comprimées

ρ: Armatures tendues

ρ': Armatures comprimées

F'_c: résistance à la compression du béton

F_e: Limite élastique de l'acier

∅_u : Courbure ultime

∅_y : Courbure élastique

ε_u : Déformation maximale du matériau

ε_y: Déformation élastique du matériau

Δ_u: Déplacement ultime de l'élément

Δ_y : Déplacement élastique de l'élément

μ_Δ: Ductilité de déplacement

μ_∅: Ductilité de courbure

$\mu\varepsilon$: Ductilité de déformation

f_{cd} : Contrainte en compression du béton

ε_c : Déformation résultant de la compression du béton

f_{yd} : Contrainte dans l'armature

ε'_s : Déformation dans les armatures comprimées

σ'_s : Contrainte dans les armatures comprimées

F_f : limite élastique des matériaux FRP

E_f : module élastique des matériaux FRP

A_f : section transversal des matériaux FRP

D_{frp} : diamètre des barres en FRP

N_{frp} : nombre des barres en FRP

ε_{fu} : déformation ultime des matériaux FRP

Introduction générale:

Dans la construction parasismique, les structures en béton armé sont conçues pour être ductiles, évitant ainsi les ruptures fragiles. La ductilité est donc essentielle dans les systèmes de protection parasismique, permettant à la structure de dissiper l'énergie sismique. Une bonne ductilité réduit les efforts de dimensionnement, minimisant les coûts de construction tout en préservant la survie de la structure en cas de séisme.

Les structures en béton armé sont des structures utilisant du béton armé d'acier. Ce dernier est un matériau de construction largement utilisé dans le génie civil et la construction. Le béton armé est largement utilisé dans la construction de bâtiments, ponts, barrages, tunnels et autres infrastructures. Il offre de nombreux avantages, notamment sa résistance à la pression, sa durabilité, sa polyvalence et sa facilité de mise en œuvre. Le béton armé est constitué de deux composants principaux : le béton, qui est une combinaison de ciment, de sable, de gravier et d'eau, et l'armature en acier, qui est insérée dans le béton pour renforcer sa résistance à la traction. Matériau résistant à la compression, mais relativement faible à la traction. Pour compenser cette faiblesse, de l'acier a été incorporé dans la structure pour résister aux forces de traction.

La ductilité permet au béton armé de dissiper l'énergie générée par les charges appliquées, ce qui améliore la résistance sismique et la résistance aux chocs. Lorsqu'une structure en béton armé est soumise à des charges sismiques ou à des charges accidentelles, la ductilité lui permet de se déformer sans se rompre brutalement, absorbant ainsi l'énergie et réduisant le risque de défaillance catastrophique. Il est important de noter que la ductilité est souvent obtenue grâce à la combinaison de béton de qualité appropriée et de barres d'armature en acier correctement dimensionnées et bien ancrées. Une conception et une mise en œuvre adéquates sont essentielles pour garantir la ductilité du béton armé dans les applications structurelles, en particulier lorsqu'il est soumis à des charges dynamiques ou sismiques. Elle permet la redistribution des contraintes dans la structure. Lorsqu'une zone de la structure est soumise à une charge excessive, les barres d'armature peuvent transférer les contraintes vers d'autres zones du béton, soulageant ainsi la contrainte excessive et répartissant la charge de manière plus uniforme.

Lorsqu'une structure en béton armé est soumise à des charges excessives, comme des charges sismiques ou des surcharges ponctuelles, elle peut subir des fissures, des déformations excessives ou même une rupture. Ces dommages peuvent se propager le long des barres

Introduction générale

d'armature, entraînant une perte de résistance et de capacité portante. De plus, les mouvements du sol, tels que les tassements différentiels ou les glissements de terrain, peuvent provoquer des contraintes et des déformations dans la structure, ce qui peut également entraîner des fissures et des dégradations.

Le présent travail de recherche vise à réaliser une étude paramétrique sur l'effet de l'endommagement sur la ductilité des poutres en béton armé. L'endommagement entraîne la formation de fissures dans les poutres, ce qui influe sur leurs caractéristiques, notamment la ductilité et la durabilité. L'objectif principal est de déterminer l'influence spécifique de l'endommagement sur la ductilité des poutres en béton armé.

Notre étude se concentre sur l'analyse du facteur d'endommagement susceptible d'affecter la ductilité des poutres en béton armé. Nous modifions de manière systématique deux paramètres clés : la résistance du béton et le taux des armatures tendues.

Le mémoire est structuré en deux parties distinctes. La première partie propose une synthèse approfondie sur le béton armé, abordant ses différents types, les concepts de ductilité et leurs manifestations, ainsi que les diverses formes d'endommagement et leurs causes. La seconde partie de notre travail est dédiée à une étude analytique dont l'objectif est de déterminer la valeur de la ductilité dans les poutres endommagées et de la comparer à celle des poutres non endommagées. Ensuite, nous examinons l'effet du renforcement en matériaux composites sur la ductilité.

CHAPITRE I

Différents types de béton

I.1. Introduction

1.1. Historique

Apparu au cours du XXe siècle, le béton est un matériau relativement jeune qui a connu d'importants développements au cours des vingt dernières années. Il a bénéficié des avancées dans les domaines de la chimie minérale et organique, ainsi que des améliorations dans les outils de production. En plus des progrès continus en termes de maniabilité, de performances mécaniques et de durabilité, les recherches sur les nouveaux bétons se sont accélérées ces dix dernières années, conduisant à des solutions innovantes en matière de conception, de mise en œuvre et d'esthétisme. Les bétons sont désormais considérés comme des matériaux de modernité et d'innovation.

Les performances physiques, mécaniques et esthétiques des bétons ne cessent de s'étendre. Les propriétés de résistance mécanique, initialement uniques, se sont diversifiées pour répondre aux différentes exigences des concepteurs, aux contraintes des chantiers et aux agressions environnementales [1].

1.2. Définition du béton

Le béton est un matériau composite. Il est constitué de plusieurs matériaux différents, qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton »

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil. Il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée. La structure du béton est composée de deux principaux constituants : les granulats et la matrice :

- Les granulats représentent en moyenne 70% à 80% du volume du béton, on les trouve sous forme de sables, de graviers ou de cailloux. Ils sont considérés comme un renfort mécanique, et ils sont traités comme des inclusions. Les granulats sont obtenus à partir des carrières de roches massives, de gisements alluvionnaires et artificiels tels que les laitiers expansés,

Les argiles expansées et les schistes expansés. Ils conditionnent la compacité du matériau ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

- La matrice liante enrobe et lie les granulats entre eux. Elle est formée d'une structure complexe poreuse source d'échanges internes et externes. Il existe plusieurs types de matrice parmi lesquelles on trouve : la pâte de ciment, la résine et l'hydrocarbure. Un examen plus approfondi, montre que la structure du béton présente un caractère hétérogène sur un domaine de dimensions extrêmement étendu [2].

1.3. Définition de béton armé

Le béton armé est un matériau de construction qui associe béton et barres d'acier. Il conjugue ainsi les qualités de compression du béton et la résistance à la traction de l'acier.

" Le béton armé est une matière hétérogène utilisée dans la construction et forme d'une masse de béton ou de mortier de ciment dans laquelle est noyée une ossature en fer ou en acier"

Béton armé, un matériau composite dans lequel la résistance à la traction et la ductilité relativement faibles du béton sont annulées par l'inclusion d'armatures de résistance à la traction et / ou de ductilité plus élevée. L'armature est généralement, mais pas nécessairement, des barres d'armature en acier (acier d'armature) et est généralement noyée passivement dans le béton avant la prise du béton. Les schémas de renforcement sont généralement conçus pour résister aux contraintes de traction dans des zones spécifiques du béton qui peuvent provoquer une fissuration inacceptable et/ou une défaillance structurelle. Le béton armé moderne peut contenir divers matériaux de renforcement en acier, polymères ou matériaux composites alternatifs en conjonction avec ou sans armature en acier. Le béton armé peut également être comprimé en permanence (en compression), pour améliorer le comportement de la structure finie sous les charges de travail[3].

I.2. Composition du béton armé

Le béton armé est un matériau obtenu par association de béton et d'armatures métallique en forme des barres le béton peut endurer des efforts de compression mais sa résistance aux efforts de traction est faible et pour pallier cette carence il faut placer des barres d'acier, qui jouent le rôle d'armature.

2.1. Le béton

Le béton est un matériau de construction composé d'un mélange de granulats, de sable, et d'eau aggloméré par un liant hydraulique (le plus souvent du ciment) qui sert de « colle ». On y ajoute éventuellement des adjuvants et d'autres ingrédients pour modifier ses caractéristiques[4].

2.1.1. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique se présente sous la forme d'une poudre minérale fine hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est la constituante fondamentale du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

- Fabrication du ciment

Le ciment est fabriqué à partir de calcaire et d'argile : 80 % + 20 % respectivement.

Le ciment est fabriqué (par voie sèche) selon le processus suivant :

-Extraction de matière première de la carrière Concassage primaire de la matière première.

- Concassage secondaire de la matière première en taille plus petite.

- Broyage de la matière concassée.
- Broyage du mélange : clinker + gypse ($\approx 5\%$) + ajouts éventuels.
- Le produit fini (ciment) est alors prêt pour être expédié en sacs, en vrac

Différent type de ciment :

- CEM I : ciments Portland.
- CEM II : ciments Portland composés.
- CEM III : ciments de haut fourneau.
- CEM IV : ciments pouzzolanique.
- CEM V : ciments composés[5].



Figure I.1.Ciment [5]

2.1.2. Les granulats

Le rôle des granulats dans un mélange de béton est de permettre de produire un matériau ayant une résistance et une durabilité appropriées avec le moindre coût possible.

Différents types de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être :

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions fluviales ou marines) ou de roches massives (roches éruptives, calcaires, métamorphiques...), n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant par exemple des transformations thermiques : sous-produits industriels, granulats réfractaires
- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments ou des structures de chaussées[6].



Figure I.2. Les granulats[6]

2.1.3. L'eau

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton (effet lubrifiant) dans la mesure où on n'abuse pas de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. La quantité d'eau varie avec un très grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais); elle est en général comprise entre 140 et 200 l/m³. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Il est souvent utile de contrôler la plasticité à l'aide d'essais simples connus. Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ses performances : résistance mécanique à la compression, durabilité.[1]12

2.1.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont de plus en plus utilisés. Ils améliorent les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés. Par exemple, l'emploi des plastifiants-réducteurs d'eau et des super plastifiants facilite la mise en place du béton dans les pièces minces fortement armées, ainsi que la réalisation des Bétons à Hautes Performances. Les accélérateurs de prise facilitent le bétonnage par temps froid, tandis que les retardateurs de prise sont utiles pour le bétonnage par temps chaud[13].

2.2. L'acier

L'acier est un alliage de fer et de carbone. Cet alliage possède une bonne résistance mécanique en traction et en compression. Le fer apporte une base de résistance importante et de la souplesse. Le carbone accroît de façon considérable la résistance de l'acier. Mais c'est un matériau rigide qui fait perdre de la souplesse à l'acier. L'acier pour le béton armé se présente sous forme de barres appelées « armatures ».

- Différents types d'acier pour le béton armé :
 - Les aciers ronds lisses
 - Les barres à haute adhérence (H.A)

- Les fils à haute adhérence
- Les treillis soudés [7].

I.3. Propriétés du béton armé

3.1. Propriétés d'acier

L'acier bénéficie d'une excellente résistance en compression et en traction. Mais dans le cas de la compression il faut veiller à éviter le flambement des armatures[7].

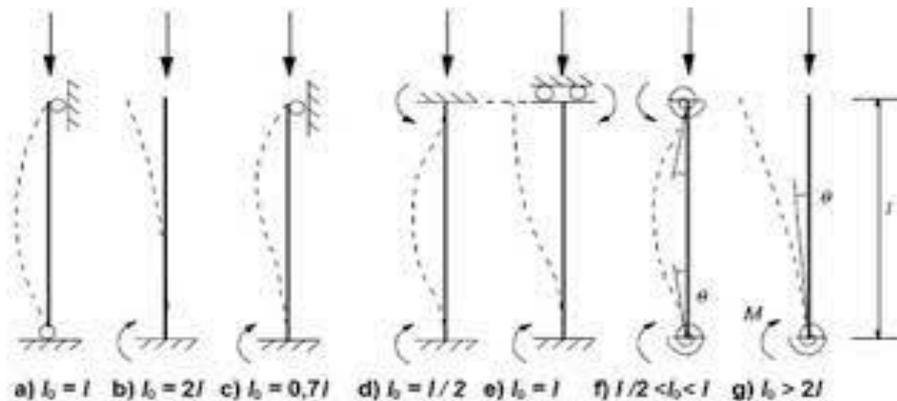


Figure I.3. Flambement des armatures[7]

3.2. Propriétés du béton

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- **Le béton frais** : mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage.
- **Le béton durci** : solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.[8]

3.2.1. Propriétés du béton frais

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique[9].

- **La durabilité** :

La durabilité des structures en béton est maintenant devenue un point important, y compris dans l'approche normative des ouvrages, ne serait-ce que parce que les réparations ont un coût non négligeable.

Défini la notion de durée d'utilisation de projet, durée pour laquelle la structure doit être dimensionnée de sorte que sa détérioration n'abaisse pas ses performances au-dessous de

celles qui sont escomptées, compte tenu de l'environnement et du niveau de maintenance prévu. Il y a beaucoup de facteurs à considérer pour ce dimensionnement, parmi lesquels la composition, les propriétés et les performances des matériaux, ainsi que la qualité de la mise en œuvre et le niveau de contrôle [10].

- **Affaissement au cône d'Abram**

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance[8].

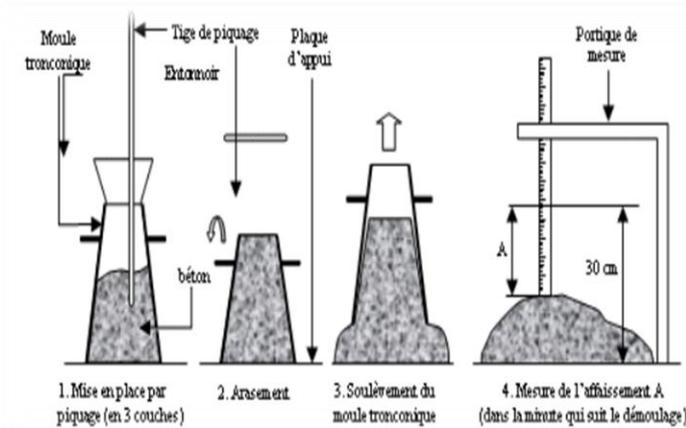


Figure I.4. Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams[8]

La norme NF EN 206-1 définit d'après l'affaissement, cinq classes de consistance des bétons représentées ci-dessous

Tableaux I.1. Classe de consistance.

Classe de consistance	Affaissement en (cm)
S1 (Ferme)	1 à 4
S2 (Plastique)	5 à 9
S3 (Très plastique)	10 à 15
S4 (Fluide)	16 à 21
S5 (Très fluide)	≥ 22

- **Masse volumique sur béton frais**

Récipient étanche à l'eau, suffisamment rigide. Le bord supérieur et la base doivent être parallèles. La plus petite dimension du récipient doit être égale à au moins quatre fois la dimension du plus gros granulats du béton, mais doit être au moins égale à 150 mm. Le volume du récipient ne doit pas être inférieur à 5 litres.

Les récipients suivants peuvent être utilisés :

- cylindre 16 x 32 métallique ou plastique
- pot spécifique
- cuve de l'aéromètre

Balance permettant de déterminer la masse du béton après serrage avec une précision de 0,01kg.

Réalisation de l'essai :

Remplir le moule et serrer le béton à refus par couches d'épaisseurs approximativement égales et de hauteurs maximales d'environ 100 mm. La surface supérieure doit ensuite être talochée et soigneusement arasée avec la règle.

La masse volumique est calculée selon la formule[11] :

$$D = \frac{(m2 - m1)}{V}$$

3.2.2. Propriétés du béton durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées[2].

- **Essais de compression**

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci afin de déterminer sa résistance à la compression. L'éprouvette est placée entre deux plateaux parallèles d'une presse rigide. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est égale au rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. Le temps d'attente entre le moment où les éprouvettes sont sorties de l'eau et celui de l'exécution de l'essai de compression ne doit pas dépasser une heure, afin d'éviter la dessiccation des éprouvettes, sinon, des précautions doivent être prises [5].



Figure I.5. Essais de compression[5]

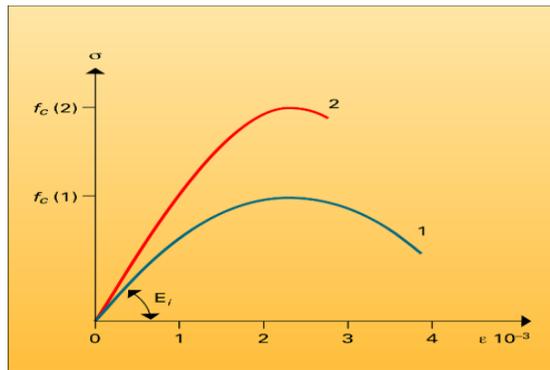


Figure I.6. Courbe de compression [5]

- **Résistance à la traction par flexion**

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée [6].



Figure I.7. Résistance à la traction par flexion [6]

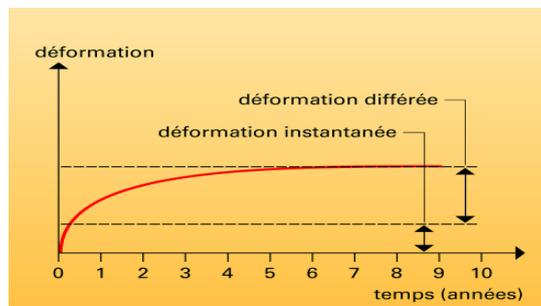


Figure I.8. Courbe de déformation [6]

I.4. Les pathologies de béton armé

Une structure en béton armé est conçue pour servir en toute sécurité, pendant une durée de vie bien précise, cette durée est influencée par plusieurs facteurs climatiques et environnementaux, l'attaque des chlorures, l'attaque des sulfates... le gel/dégel

Classé les principales causes de détérioration des structures en béton armé en cinq types :

- Les actions mécaniques
- Les actions chimiques

- Les actions physiques
- Les dommages causés par le feu
- La corrosion des armatures[12]

I.5. Utilisations du béton armé

Positionnement de l'acier, enrobage et adhérence sont des phases clés pour limiter les déformations éventuelles des ouvrages. Le béton armé est utilisé dans les poutres, les dalles, les voiles, les fondations, les coques et les murs de soutènement.

Le mode de sollicitation de l'ouvrage, la maîtrise de la mécanique des milieux continus et de la résistance des matériaux, la compréhension des phénomènes physiques créant des efforts sur l'ouvrage, relèvent du métier d'ingénieur en béton armé.

I.6. Les types de béton :

Tableaux I.2.Types de béton distingué selon la composition

Type de béton	Composition	Rapport (Eau/ciment) ou Granulat/sable)	Caractéristiques
Ordinaire (BO)	Eau + ciment + granulats	$E/C \approx 0,5 \text{ à } 0,6$	$20\text{Mpa} \leq f_{c28} \leq 50\text{Mpa}$
Hautes Performances (BHP)	Eau + ciment + granulats + adjuvant réducteur d'eau	$0.35 \leq E/C \leq 0.40$	$50\text{Mpa} \leq f_{c28} \leq 80\text{Mpa}$
Autoplaçant (BAP)	Eau + ciment + granulats + fines (Cendre volante, laitier de haut fourneau, fine calcaire) + super plastifiant + (agent de viscosité)	$G/S \approx 1$	Béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre dans le coffrage par le seul effet de la gravité et sans aucun procédé de serrage.

6.1. Les Bétons à Hautes Performances

Définition

Un béton hautes performances (BHP) (ou béton à hautes performances) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais, à court ou à long terme. Le béton haut performances est apparu à la fin des années 80.

Composition de béton à hautes performances

Pour améliorer les performances d'un béton, il convient d'en réduire la porosité en agissant sur le squelette granulaire (granulométrie) par l'addition de particules ultrafines type "fumée de silice", l'ajout d'un adjuvant superplastifiants/haut réducteur d'eau, la réduction de l'eau.

L'emploi des "super plastifiants/haut réducteur d'eau permet de réduire l'eau (voir fiche technique de l'adjuvant) du béton à consistance égale entraînant la suppression d'un volume important non mobilisé par l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment

Le rapport eau/ciment est ainsi de 0,30 à 0,40 alors qu'il est habituellement de 0,45 à 0,60 pour un béton ordinaire.

La composition d'un béton hautes performances est en général la suivante :

750 à 950 kg/m³ de gravillons,

700 kg/m³ de sable,

350 à 500 kg/m³ de ciment de classe 52.5

N ou R et d'une addition type "fumée de silice".

L'ajout d'un "super plastifiants/haut réducteur d'eau" à hauteur de 1 à 2% du poids de ciment permet de réduire le volume d'eau nécessaire à une valeur de 140 à 160 litres/m³ [14].

6.2. Bétonautoplaçant

Définition

Les bétons autoplaçants sont des bétons très fluides qui se mettent en place par gravitation sans apport extérieur ou intérieur de vibration. Le béton n'est qualifié d'autoplaçant que si le matériau final présente des propriétés homogènes c'est à dire n'ayant pas subi de ségrégation.

La dénomination des bétons autoplaçants et pour certains chercheurs se distingue :

- Le premier terme est employé lorsqu'il s'agit d'un coulage vertical alors que le second correspond à une mise en œuvre horizontale (dallage).

D'autres expressions sont aussi utilisées, (béton auto plaçable, béton très fluide ou béton auto nivelant), ces bétons présentent les propriétés suivantes :

- Absence de vibration ce qui réduit les nuisances sonores.
- Bétonnage de zones fortement ferrillées.
- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Qualité des parements.

Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de

façade, mobiliers urbains, etc.). Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation des structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- Densités de ferrailage importantes.
- Formes et géométries complexes : voiles, courbes.
- Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts.
- Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- Exigences architecturales et qualité de parement particulière.

Les principaux constituants d'un béton autoplaçant

Les constituants d'un BAP sont le ciment, les fines (les ajouts minéraux), les granulats (sable, gravier), eau et les adjuvants chimiques (superplastifiant). Voir schéma suivant[15].

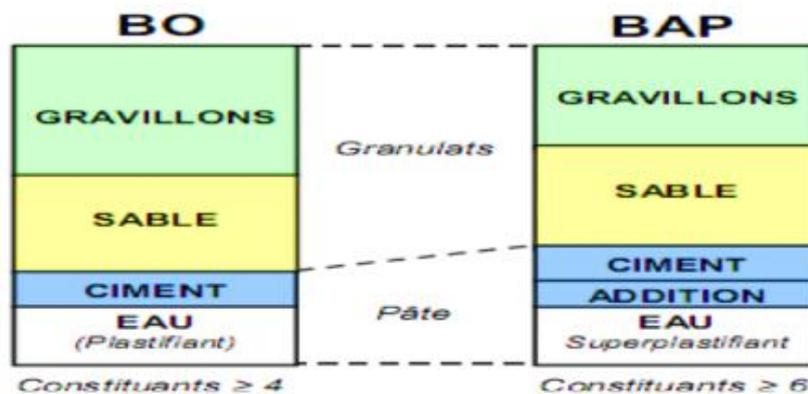


Figure I.9. Différence entre les BAP et les BO[15]

6.3. Béton ordinaire

Les caractéristiques physico- mécaniques du béton à l'état frais et à l'état durci dépendent de sa composition et des différentes actions mécaniques auxquelles il est soumis lors de sa fabrication. Le béton est sujet à un ensemble de mécanismes de structuration (hydratation, floculation, ... etc.) et de déstructuration (malaxage, vibration, ... etc.). Les trois composants de base sont l'eau, le ciment et les granulats. Des additions peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange [16].

Qualités recherchées pour un bon béton :

- Résistance mécanique élevée (25-40 MPa).
- Imperméabilité à l'eau et absence de réaction chimique avec l'acier.
- Bonne mise en œuvre (facile à couler).
- Bonne tenue dans le temps [17].

I.7. Méthodes de la formulation du béton :

L'étude de la composition d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de partie d'ouvrage en cause

Différentes méthodes

7.1. Méthode de Faury

La particularité de cette méthode est qu'elle est applicable à tous les granulats, quelle que soit la masse volumique. Faury a distingué des grains fins et moyens des ceux gros et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux courbes, il adopta aussi une échelle des abscisses graduée en $5\sqrt{d}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée $D/2$ et son ordonnée par la formule

$$Y=A+17, \sqrt{D5BRD}-0,5 \quad (I.1)$$

Où :

A : constante, traduisant la maniabilité du béton ;

B : constant traduisant l'importance du serrage du béton ;

D : plus grande dimension de tamis ;

R : rayon moyen du moule.

7.2. Méthode de Bolomey :

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et d'où on s'efforce de réaliser avec des granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

$$P=A+(100-A)\sqrt{d/D}$$

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d ;

D : est le diamètre des plus gros grains ;

A : la valeur de A dépendra de :

- la consistance souhaitée de béton ;

- la provenance des granulats.

Elle varie de 6 à 16, étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue

7.3. Méthode de LA Valette

La Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum des sables » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ». On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment.

Puisque la méthode est essentiellement expérimentale elle repose donc, sur l'appréciation de l'opérateur concernant la convenance du béton, il doit être un praticien connaissant la matière.

7.4. Méthode Dreux-Gorisse

Cette méthode française est de nature fondamentalement empirique qui date de 1970. Elle simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (D). La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, C et E, le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats. Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations déjà validées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est très simple d'utilisation [18].

I.8. Conclusion :

Ce chapitre fournit une vue complète sur les différents types de béton. Ces matériaux sont les plus couramment utilisés dans la construction. Le béton est principalement composé de gravier, de sable, de ciment et d'eau. Cependant, de plus en plus d'additifs et d'adjuvants sont désormais intégrés au béton moderne. Ces ajouts permettent de modifier ses propriétés, le transformant ainsi en un matériau nouveau tout en conservant son appellation de "béton". Le développement de ces matériaux bétonnés offre de nouvelles possibilités d'application qui ne doivent pas être négligées [16].

CHAPITRE II
Dégradation des structures en
Béton armé

II.1. Introduction

La durabilité des ouvrages en béton armé est étroitement liée à leur résistance aux conditions climatiques et environnementales présentes dans les lieux où ils sont construits. Ces ouvrages subissent généralement des dégradations physiques et chimiques permanentes en raison des agressions extérieures [19].

Depuis le début du XXe siècle, l'utilisation du béton s'est considérablement développée dans les domaines du génie civil, tels que les ponts, les tunnels, les structures de soutènement, tant sur les sites terrestres que maritimes. Bien qu'il ait été initialement considéré comme un matériau inerte et résistant aux agressions, le béton s'est révélé susceptible de subir des phénomènes de dégradation plus ou moins complexes, en fonction des conditions d'exposition des ouvrages à l'environnement et de la composition intrinsèque du béton, ainsi que des conditions de mise en œuvre [20].

Les dégradations affectant les structures existantes peuvent se présenter sous diverses formes, d'où la pertinence de les classer afin de les distinguer. Ainsi, nous avons établi une classification en trois types distincts pour ces dégradations :

- Les dégradations qui impactent l'ensemble de la construction.
- Les dégradations qui touchent les éléments constitutifs de la construction.
- Les dégradations qui concernent les matériaux de construction [21].

II.2. Les cause de dégradation

2.1. Dégradation mécanique

L'altération physique d'un béton est très souvent d'ordre accidentel, c'est-à-dire qu'un élément extérieur est responsable de son usure les principales causes de dégradation physique sont :

2.1.1. Chocs

Les désordres de ce genre concernant beaucoup plus les ponts Les chocs les plus fréquents sont ceux du poids lourd hors gabarit contre l'intrados des ponts les chocs des bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue ils peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voir même des ruptures d'acier.



Figure II.1. Intrados des ponts dégradés [21]

2.1.2. Abrasion

Les phénomènes d'abrasion et d'érosion se rencontrent essentiellement dans des Structures de génie civil en contact avec des circulations intenses d'eau comme les barrages (érosion des évacuateurs de crue) ou les galeries d'amenée d'eau, et dans les structures Soumises à des charges mécaniques répétées comme les chaussées en béton [22].

2.2. Dégradation chimique

2.2.1. Réaction d'alcalis-granulats

Lors des réactions alcali-granulats (RAG), la solution interstitielle d'un béton réagit avec les granulats, ce qui peut entraîner des gonflements et des fissures. Des mesures appropriées permettent d'éviter ces phénomènes. La première description de dégâts dus aux réactions alcali-granulats (RAG) a paru en 1940 aux USA. Depuis lors, des observations similaires ont été faites dans différentes régions, par exemple en Islande, au Danemark, en Angleterre, en France et en Allemagne. Ces dégâts ont été dans une large mesure épargnés à d'autres pays, dont la Suisse. Dans le présent article sur les RAG, l'accent est mis principalement sur les aspects généraux. Il sera traité dans un prochain numéro du « Bulletin du ciment » des possibilités d'éviter ces réactions.

On distingue trois types de réactions alcali-granulats (RAG) :

- Les réactions alcali-silice
- Les réactions alcali-silicate
- Les réactions alcali-carbonate.

Les réactions alcali-silice et les réactions alcali-silicate sont assez semblables ; elles diffèrent principalement par leurs vitesses : les réactions alcali-silice sont plus rapides les trois types de réactions ont en commun la réaction de la solution interstitielle d'un béton avec certains granulats, laquelle engendre des gonflements qui peuvent entraîner des fissures dans ce qui suit, on entend par réactions alcali-granulats (RAG) aussi bien les réactions alcali-silice que

les réactions alcali-silicate; il ne sera traité que ponctuellement des réactions alcali-carbonate, rarement observées. Les mécanismes de réaction possibles sont décrits dans l'encadré «Théorie concernant les RAG»[23].



Figure II.2. Pile de pont atteinte par l'alcali-réaction[23]

2.2.2. Attaques Sulfatiques

2.2.2.1. L'attaque sulfatique interne

L'attaque sulfatique interne (appelée aussi DEF) est causée par les sulfates présents initialement dans le béton. Ils peuvent être contenus dans les produits de gâchage ou introduits de manière accidentelle :

- Les constituants du béton contiennent initialement une certaine quantité de sulfates. C'est le cas par exemple des granulats contenant de la pyrite (FeS_2) très riche en soufre. Il est ainsi préconisé d'avoir une teneur en soufre total des granulats (exprimée en SO_3) inférieure à 0.4%. De même, on rajoute du gypse broyé (généralement 5%) au ciment afin de réguler le temps de prise. Enfin, l'eau de gâchage (dont la concentration en sulfate varie de 1 à 1000 mg/L) ainsi que les additions et les adjuvants peuvent contenir une quantité de sulfate non négligeable.
- Les sulfates peuvent aussi être introduits de manière accidentelle par l'ajout involontaire de déchets de plâtre au moment du gâchage.

2.2.2.2. L'attaque sulfatique externe

Les sulfates, source de cette attaque, ont des origines naturelles mais aussi accidentelles, notamment les pollutions industrielles ou domestiques :

- Les sols peuvent contenir naturellement une quantité de sulfates (de 0.01 à 0.05%). Dans le cas des sols constitués de roches gypseuses, cette teneur peut être supérieure à 5%.

- Des engrais acidifiants tels que le sulfate d'ammonium sont parfois utilisés en agriculture pour amender le sol. La décomposition biologique aérobie de ces substances peut entraîner un relargage des sulfates.
- Les eaux souterraines séléniteuses proviennent de la dissolution de nappes de gypse. Elles peuvent aussi provenir de la dissolution de tous les sulfates alcalins.
- L'eau de mer est naturellement chargée en sulfates
- Les sols des sites industriels, comme par exemple l'industrie du textile ou les stations de traitement de l'eau, peuvent contenir des quantités de sulfate très supérieures à celles observables normalement. Ces pollutions sont visibles notamment dans les sols et les eaux ruisselantes[24].

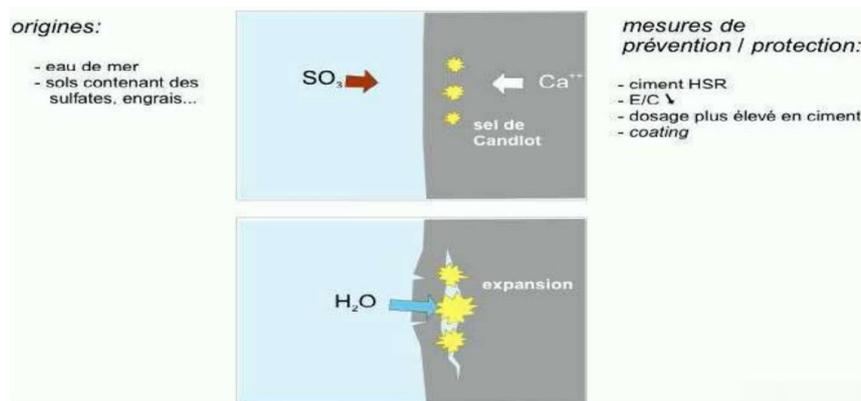


Figure II.3. Attaques Sulfatiques [24]

2.2.3. Attaques Acides

Tous les acides se comportent de manière analogue au gaz carbonique. La base contenue dans le béton, l'hydroxyde de calcium est neutralisé pour former le sel correspondant.

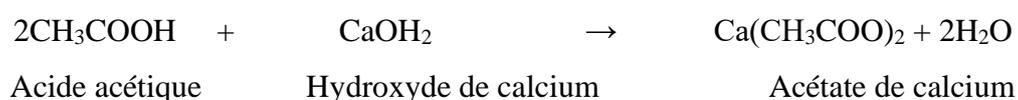
Rappel : Acide + Base → Sel + Eau

L'agressivité de l'acide est fonction de la solubilité du sel formé,

Acides organiques: L'agressivité varie selon les acides

- ✓ Forte avec l'acide lactique ou acétique ;
- ✓ Très faible avec l'acide oxalique ou tartrique.

Exemple:



L'acide acétique forme avec l'hydroxyde de calcium un acétate de calcium neutre. Le sel acétate de calcium est très soluble dans l'eau, il est extrait (dégagé) ce qui a pour effet d'endommager la pâte de ciment.



- **L'acide oxalique** a un comportement analogue à celui de l'acide acétique et réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former de l'oxalate de calcium. Parce que contrairement à l'acétate de calcium, l'oxalate de calcium n'est pas soluble dans l'eau, la pâte de ciment reste exempte de dommages.
- **Les acides forts** ne neutralisent pas l'hydroxyde de calcium, mais réagissent avec toutes les parties de la pâte de ciment et attaquent également les granulats contenant du carbone, comme le calcaire. La pâte de ciment se dissout entièrement par exemple dans l'acide chlorhydrique en formant du chlorure de calcium, d'aluminium, de fer et de manière colloïdale du dioxyde de silicium.
- **Acides minéraux**

Milieux très agressifs (sels très solubles) \longrightarrow dissolution

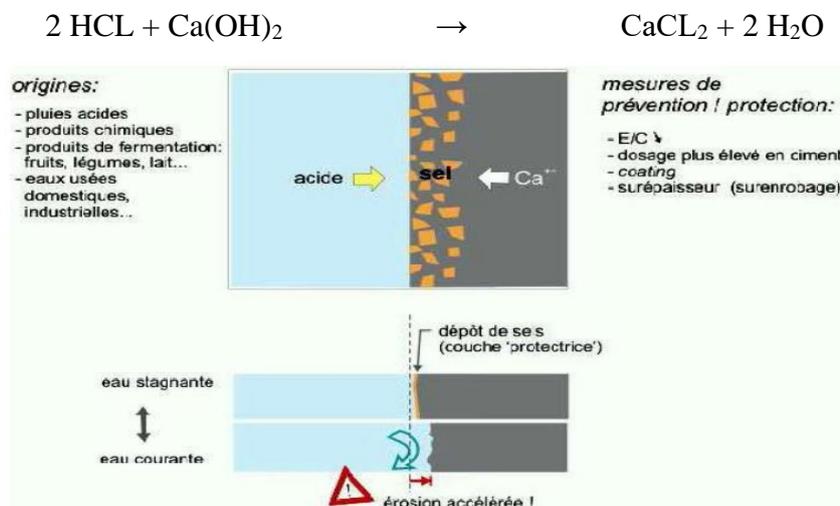


Figure II.4. Schéma illustratif des attaques des acides sur le béton[22].

2.2.4. L'attaque des chlorures

La pénétration des ions chlorure est une des causes majeures de dégradations des structures en béton armé due à une corrosion prématurée des armatures, convient donc de prendre en compte ce phénomène lorsqu'on souhaite modéliser la durabilité des structures en béton armé et évaluer leur durée de vie.

Les chlorures proviennent la plupart du temps des sels de déverglaçage ou des environnements marins et restent, en majorité, à l'état dissous dans la solution interstitielle du béton. Mais ils peuvent aussi réagir avec certains constituants du matériau (réaction chimique ou adsorption). Dans le cas des ouvrages en environnement marin, les conditions d'exposition des structures conduisent à différents mécanismes de transport des ions chlorure. Dans les zones submergées en permanence, le béton est saturé et les ions chlorure peuvent pénétrer dans le béton par diffusion, sous gradient de concentration dû à la différence de concentration entre la surface contenant des chlorures et le cœur du béton ne contenant pas de chlorures. Dans les zones de marnage, les zones d'éclaboussures et les zones soumises à des cycles d'humidification/séchage, le béton est partiellement saturé et les ions chlorure pénètrent dans le béton par absorption capillaire et migrent avec la phase liquide par convection. Dans un deuxième temps, les ions chlorures diffusent dans la partie à saturation constante. En général on considère qu'en dessous d'un taux de saturation de 60 %, la phase liquide n'est plus continue et la diffusion des ions est impossible.

Le transport de la phase liquide et de la phase gazeuse dans le milieu poreux jouent donc un rôle déterminant dans l'étude de la propagation des ions chlorures. D'une manière générale, les ions chlorure pénètrent beaucoup plus rapidement dans la matrice cimentaire lorsque le béton est soumis à des cycles d'humidification/séchage que lorsque qu'il est saturé.

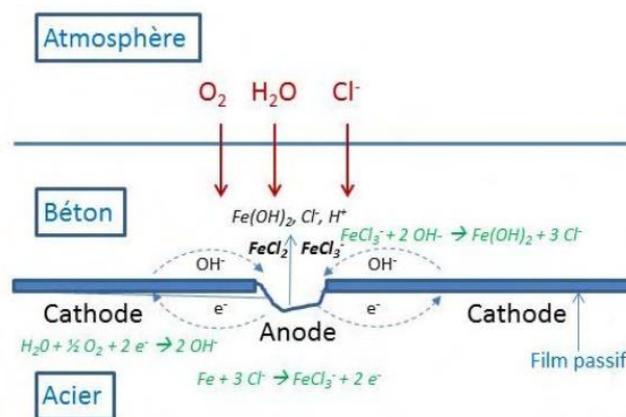


Figure II.5. Processus de corrosion par les chlorures [25]

2.3. Dégradations Physique

2.3.1. Cycles de gel-dégel

Le risque de détérioration par le gel d'un béton est particulièrement plus élevé lorsque que son degré de saturation en eau est important. C'est notamment le cas des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux salées. Ces dégradations peuvent être amplifiées si le béton est mal conçu et elles se manifestent sous deux formes :

- ✓ Détérioration par fissuration interne.
- ✓ Détérioration par l'écaillage des surfaces en présence de sels fondants.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante et elles peuvent affecter la durabilité de la structure.

2.3.1.1. Détérioration par fissuration interne

La fissuration interne peut se propager dans toute la masse de béton, mal conçu et soumise à de nombreux cycles de gel dégel.

Cette dégradation se manifeste par l'apparition d'une intense microfissuration du béton non seulement en surface mais aussi à l'intérieur de la masse de béton soumise au gel La microfissuration.

La fissuration interne diminue la performance du béton en réduisant considérablement ses caractéristiques mécaniques (résistances à la compression et à la traction, module élastique) et son imperméabilité. Par exemple, un béton fortement attaqué par le gel interne peut affaiblir énormément sa cohésion.

2.3.1.2. Détérioration par l'écaillage

L'écaillage de surface est un mode de dégradation qui n'affecte que les surfaces de béton fortement exposées aux cycles de gel-dégel et des sels fondants. Il se manifeste par le décollement progressif de petites particules de pâte qui ont souvent la forme de petites écailles. En plus d'une dégradation esthétique de l'ouvrage, ce phénomène augmente sensiblement la perméabilité de surface et réduit l'épaisseur de recouvrement des aciers. Il favorise ainsi l'intrusion de substance délétère au sein du matériau et augmente le risque de corrosion des armatures. L'écaillage de surface est pratiquement inexistant lorsque l'exposition au gel-dégel se fait en absence des sels fondants[25].

2.3.2. Sels de déverglaçage

La cause principale des dégradations de surface pouvant résulter de la diffusion des sels de déverglaçage dans les capillaires du béton est un accroissement des pressions osmotiques. L'importante chute de température de surface, due à la quantité de chaleur consommée pour provoquer la fusion de la glace, amplifie les effets du gel dans la zone du béton proche de la surface (la chute de température de surface peut atteindre 4 °c/minute au lieu de 4 °c/heure habituellement). La peau du béton va donc se refroidir brutalement.

Mais ce phénomène est rarement générateur d'un écaillage, car les sels de déverglaçage sont répandus dans la plupart des cas à titre préventif sur les ouvrages d'art des réseaux routier et autoroutier, pour garantir la sécurité des usagers. Il n'y a donc pas de film de glace lorsque les sels sont répandus[26].



Figure II.6.Dégradation due aux sels de déverglaçage [26]

2.3.3. Tassement

On trouve aussi le tassement localisé des surfaces de coulage causé par la présence d'armature dans le béton engendrant ainsi des vides ou des fissures au voisinage de ces armatures. Une augmentation du diamètre ou un mauvais compactage favorisera l'apparition des fissures[22].

II.3. Les types de dégradations

Le béton armé se présente sous forme d'association hétérogène de deux matériaux, le béton et l'acier. Les caractéristiques de ce matériau diffèrent de celles de ses composants bien que ceux-ci conservent leurs qualités propres. Le béton qui résiste bien à la compression mais résiste mal à la traction assure la transmission des efforts de compression et l'acier reprend des efforts de traction. C'est l'adhérence entre le béton et l'acier qui permet cette association, rendue possible par l'existence de coefficients de dilatation voisins. En ce basant sur les résultats d'une recherche bibliographique notamment le document [26] d'une part, et d'autre part sur les résultats des enquêtes que nous avons menés sur un certain nombre de constructions existantes, nous avons remarqué que les principaux types de dégradations qui affectent le matériau béton armé sont comme suit :

3.1. La ségrégation

Il arrive des fois, que lors de la mise en place du béton frais dans les fonds de moules, la laitance en liant s'échappe à travers les ouvertures des coffrages laissant un béton sous forme de nid de graviers complètement appauvri en liant. Cet état est dénommé : " Ségrégation du béton" qui influe négativement sur la qualité du béton (compacité, perméabilité, absorption d'eau, résistance...).

3.2. La fissuration

Par fissuration on comprend toute fente prenant des dimensions (longueur, largeur et profondeur) très variables et qui affecte la surface d'une partie de construction (maçonnerie,

enduit, dallage, etc...), les fissures sont visibles à partir de la surface de l'élément de construction et qui généralement ne traversent pas toute la section de l'élément examiné.

Il faut noter que les fissures se subdivisent en deux classes distinctes :

- ✓ Les fissures structurelles.
- ✓ Les fissures matérielles

Les premières fissures sont dues à un tassement localisé pendant la prise du béton ou dues à un tassement ultérieur de la structure, les secondes sont dues au retrait empêché, par exemple, sous ses différentes formes, chimique, thermique, dessiccation rapide de la surface, etc....

Il faut préciser aussi que dans le domaine de construction, les définitions suivantes sont retenues :

- **Ouverture d'une fissure**

C'est la largeur entre les lèvres, elle peut être évaluée à l'œil nu ou de préférence à l'aide d'un fussiomètre (figure II.7) par convention, une fissure a entre 0,2 et 2 mm de largeur.

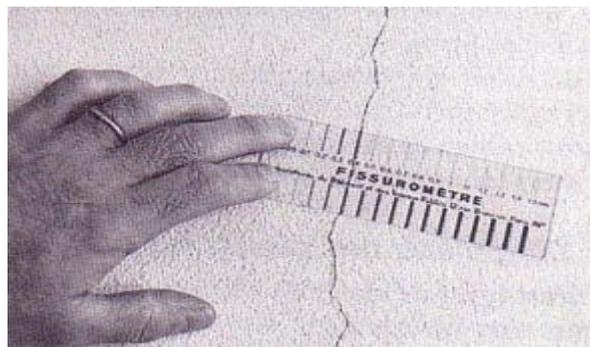


Figure II.7.Fussiomètre : réglette qui s'utilise pour la détermination de la largeur des fissures

- **Microfissure fissure**

C'est une fissure à ouverture très fine, au tracé plus au moins régulier et linéaire, le plus souvent discontinu et dont la largeur est inférieure à 0,2 mm. Elle peut évoluer jusqu'à former un réseau.

- **Faïençage**

C'est un réseau de microfissures, se présentant sous forme d'un dessin géométrique à mailles irrégulières et qui s'inscrivent dans un carré n'excédant pas 20 cm de côté. Ce réseau n'intéresse le plus souvent que la couche superficielle de béton ou de l'enduit à base de liants hydrauliques.

- **Lézarde ou crevasse**

C'est une ouverture dont la largeur dépasse 2 mm.

- **Activité d'une fissure**

L'activité d'une fissure est caractérisée par la variation de son ouverture dans le temps.

- **Fissure « passive » ou « morte »**

C'est une fissure dont l'ouverture ne varie plus de façon dans le temps quelque soient les conditions de température ou de sollicitation de l'ouvrage, dans ce cas la cause de la fissure est devenue négligeable ou a disparu.

- **Fissure « active » ou « vivante »**

C'est une fissure dont l'ouverture varie dans le temps en fonction des gradients thermiques ou hygrométriques, ou de sollicitations de l'ouvrages (absence de joint, tassement d'appuis, conséquence de défaut d'exécution, etc.).

3.3. La rupture

La fissure n'affecte qu'une partie de la section d'un élément de construction, par contre la rupture traverse toute la section de l'élément considéré. C'est ainsi que la distinction est faite entre une fissure et une rupture.

3.4. La disjonction entre les grains

Ce type de dégradation se traduit par la fissuration de l'interface grain- matrice (granulat et pâte de ciment), alors qu'une fissure traverse en générale le mortier et les grains. La disjonction entre les grains pourrait être provoquée par le gel du béton frais ou par un décoffrage prématuré.

3.5. L'apparition de l'armature

A la suite de la pénétration de l'humidité au sein du béton deux aspects différents peuvent produire :

La corrosion qui affecte l'armature incorporée dans la masse du béton s'accompagne d'une augmentation de volume, d'une fissuration et d'un délitage du béton de recouvrement (Figure II.8) durant une baisse de température, le gel affecte le béton humide pour mettre d'abord l'armature à nu et son oxydation ensuite.

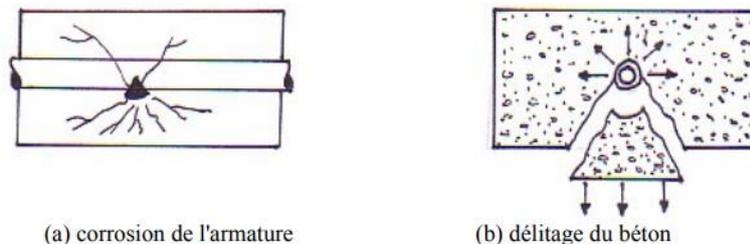


Figure II.8.Phénomène de corrosion de l'acier [27]

(a) corrosion de l'armature suivie d'une augmentation de volume provoquant la fissuration.

(b) délitage du béton de recouvrement.

3.6. Le délitage et l'épaufrure

La désagrégation, le dessertissage des grains ou la pulvérisation du mortier sont des manifestations résultant de l'agression chimique.

La dissolution des composés hydratés du ciment est suivie de formation de sels solubles et leur élimination hors du béton d'où le dessertissage des grains ; lors de dessiccation temporaire, la pulvérisation des composés séparés s'ensuit. Dans d'autres cas, la dissolution des composés de sels solubles est suivie de la formation de composés nouveaux, insolubles, qui se placent dans les interstices restant des sels dissouts, augmentent le volume et démolissent le béton par expansion d'où le phénomène d'épaufrure ou de désagrégation généralisé.

3.7. L'excroissance cryptogame

La mousse, les mollusques, s'incrudent dans la masse du béton et provoquent une dissolution des sels calcaires ; ceci conduit à des dégradations superficielles d'abord et profonde ensuite. Certains types de dégradation sont faciles à identifier ; d'autres, provoqués par des bactéries et amibes sont décelables au microscope ; ils peuvent apparaître aux niveaux des piscines [27].

II.4. Causes dues aux variations de température

Lorsque le matériau est soumis à des conditions de séchage en même temps que l'hydratation évolue, les déformations plastiques qui en résultent sont une combinaison complexe de mécanismes apparaissant à différentes échelles. Les résultats (déformations plastiques et phénomènes corollaires) sont présentés suivant deux conditions de séchage [28].

Au niveau des constructions se trouvent des parties qui sont exposées à d'importantes variations de températures journalières et saisonnières, et, par suite, subissent des mouvements alternés (dilatation et contraction) dont les effets peuvent être préjudiciables pour les parties de construction considérées. On signale que parmi les sinistres rencontrés et qui sont dus principalement aux variations de température se trouvent leur origine dans le gros œuvre en béton armé du dernier étage, à savoir les toitures terrasses, les corniches et les acrotères comme le montrent les cas de figures [27].

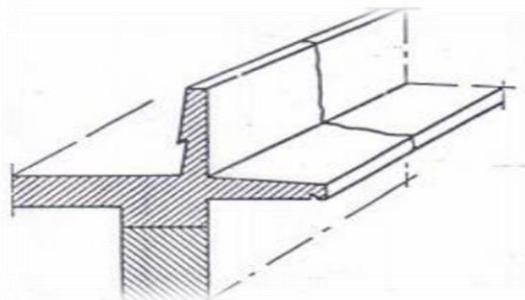


Figure II.9.Fissure transversale dans la corniche et l'acrotère

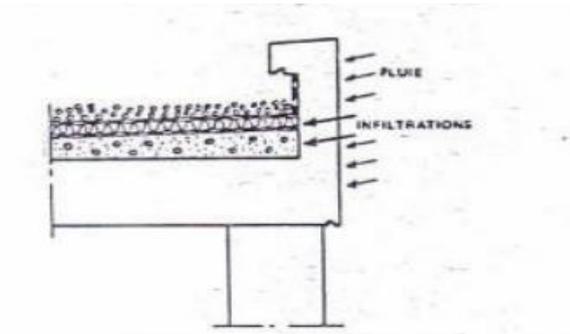


Figure II.10. Eau qui traverse les fissures peut s'infiltrer derrière l'étanchéité [27]

II.5. Causes dues au milieu environnant

Les constructions subissent quelque changement d'environnement telle que : le vent, les pluies, les eaux courantes et une variation de température, tous ceux-ci réagissent et influent sur les propriétés des bétons, par exemple les eaux peuvent être saturées de sulfate, le vent et la température sont deux facteurs essentiels d'érosion et de sécheresse, et n'oublions pas le sol qui peut contenir des agents agressifs dont la source est le dégagement des usines.

5.1. Classification des environnements agressifs

La durabilité du béton est très souvent liée à sa capacité d'empêcher des agents agressifs de pénétrer à travers sa porosité. Certains environnements sont agressifs pour le béton, ils peuvent occasionner des attaques acides importantes. Trois catégories d'environnements agressifs peuvent être distinguées : [27]

- ❖ **Milieux gazeux :** gaz, vapeurs
- ❖ **Milieux liquides :** eaux douces, eaux de mer, solutions de sels, d'acides ou de bases, eaux résiduaires, liquides organiques (huiles, pétrole, solvants)
- ❖ **Milieux solides :** sols, produits de stockages qui agissent par extraction ou dissolution, le plus souvent par l'eau, des agents nocifs. L'agressivité du milieu dépend :
 - De la concentration de l'agent agressif
 - De la viscosité (huiles)
 - De l'humidité relative (H.R).

II.6. Les méthodes d'auscultation

Vu l'âge des structures en béton armé, le vieillissement s'accélère d'une façon impressionnante. Dans un climat aussi sévère que celui de l'Amérique du nord, ces structures combattent perpétuellement les effets de la présence de l'eau riche en agents agressifs dans leurs masses. Le cycle de gel-dégel accéléré par les changements climatiques affaiblit les structures et permet un développement rapide des dommages causés par la corrosion des armatures. Les coûts liés à la réparation et à la reconstruction des nouvelles structures forcent à trouver d'autres alternatives

pour faire durer le plus longtemps ces structures en service tout en étant sécuritaires... Leurs états doivent être suivis assidûment par des contrôles qui ne doivent pas porter atteinte à leurs intégrités. Les contrôles non destructifs permettent de cibler les interventions rapides sur les structures. Mais, ces méthodes n'ont pas encore la place qui est leur due.

6.1. Inspection visuelle (Marteau et Carottage)

L'essai par le marteau permet de délimiter les zones dégradées suivant un son grave (béton délaminé) ou aigu (béton sain). Il ne peut être appliqué que directement sur le béton.

Le carottage permet de prélever des carottes dans la dalle de béton pour l'inspection visuelle et pour déterminer les paramètres mécaniques du béton.

6.2. Radar

L'essai consiste à envoyer une onde électromagnétique dans le béton et à détecter les réflexions de ces ondes provenant des interfaces dans la dalle. Cet essai permet de balayer rapidement et donner en temps réel l'état général de la dalle en béton armé. L'interprétation des données est effectuée sur la base de l'onde directe [2, 3], la réflexion sur l'armature, la réflexion à la fin de la dalle, sur l'atténuation et la vitesse de l'onde à travers la dalle. L'essai est effectué avec un maillage de 0,5 m x 0,5 m

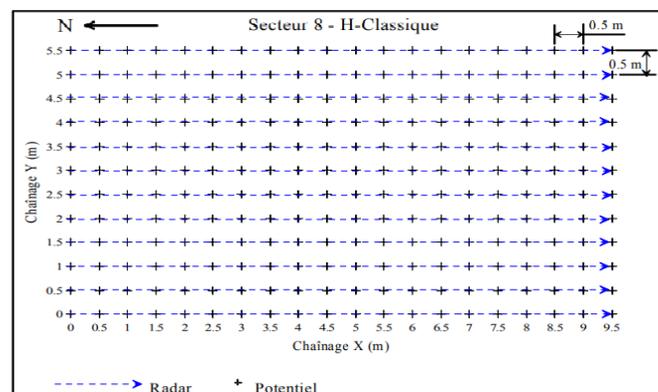


Figure II.11. Essais Radar et de potentiel de corrosion sur les secteurs étudiés [27]

6.3. Potentiel de corrosion

Cet essai permet d'évaluer l'état de l'activité de corrosion des barres d'armature dans une dalle de béton armé suivant la norme ASTM C876 (1999) (Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete). Elle recommande l'analyse des mesures de potentiel de corrosion en termes de probabilité de corrosion selon les critères donnés dans le tableau II.1. L'essai est effectué sur un maillage de 0,5 m x 0,5 m

Tableaux II.1. Interprétation des mesures selon la norme ASTM C876

Potentiel de corrosion (en Mv)	Probabilité de corrosion	Activité de corrosion
>-200	$\leq 10\%$	Négligeable
-200 à -350	50 %	Initiée
-350 à -500	$\geq 90\%$	Avancée
< -500		Très avancée

6.4. Résistivité électrique

Cet essai est généralement réalisé en parallèle avec les essais de potentiel de corrosion pour apporter un complément d'information à ces mesures en ce qui concerne la cinétique de la corrosion. L'essai est effectué sur une dizaine de points pour chaque secteur sur la base des données de potentiel de corrosion[29].

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les différentes pathologies du béton, qui sont souvent la principale cause des effondrements structurels. Nous avons examiné en détail les causes et les types de ces pathologies. De plus, nous avons abordé les méthodes d'auscultation qui offrent des alternatives pour prolonger la durée de vie des structures tout en garantissant leur sécurité. Il est essentiel de surveiller attentivement l'état de ces structures grâce à des contrôles rigoureux qui n'affectent en aucun cas leur sécurité.

CHAPITRE III

Généralités sur la ductilité

III.1. Introduction

Avant 1960, la notion de ductilité était principalement utilisée pour caractériser le comportement des matériaux. Cependant, suite aux travaux de Baker sur la conception plastique et aux recherches de Housner sur les problèmes sismiques, ce concept s'est étendu au niveau des structures et est désormais associé aux notions de résistance et de rigidité de la structure dans son ensemble [30].

Les causes des dommages aux structures sont multiples. Lorsque les sollicitations sismiques sont importantes, le manque de ductilité dans les structures favorise les ruptures fragiles. Une conception déficiente et le non-respect des dispositions constructives peuvent également rendre les structures plus fragiles et moins résistantes. Même si la capacité de déformation post-élastique des structures est prise en compte, notamment grâce au coefficient de comportement, il est important de noter que la ductilité est définie comme la capacité d'un matériau, d'un élément ou d'une structure dans son ensemble à se déformer de manière inélastique tout en conservant une raideur et une résistance qui ne compromettent pas sa capacité portante. Cela est particulièrement crucial dans le cas des tours de grande hauteur en béton armé [31].

- **Relation déformabilité – ductilité**

La déformabilité est la capacité d'un matériau, d'un élément de la structure ou d'une structure entière de se déformer avant l'effondrement; par contre, la ductilité est la capacité de subir une déformation après la fin de la phase élastique jusqu' avant la ruine, comme la montre la **figure III.1**

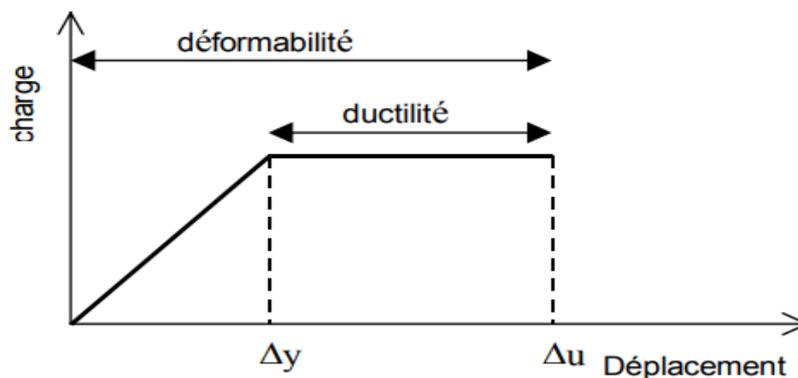


Figure III.1. Courbe charge – déformation ´ Relation déformabilité – ductilité [33]´

Il est à noter qu'une structure peut avoir une grande déformabilité, alors qu'elle est moins ductile comme la montre la **figure III.2**, où on constate que les murs en béton armé (voile) possèdent une faible déformation alors qu'ils sont plus ductiles comparativement aux portiques qui sont plus déformables et moins ductiles.

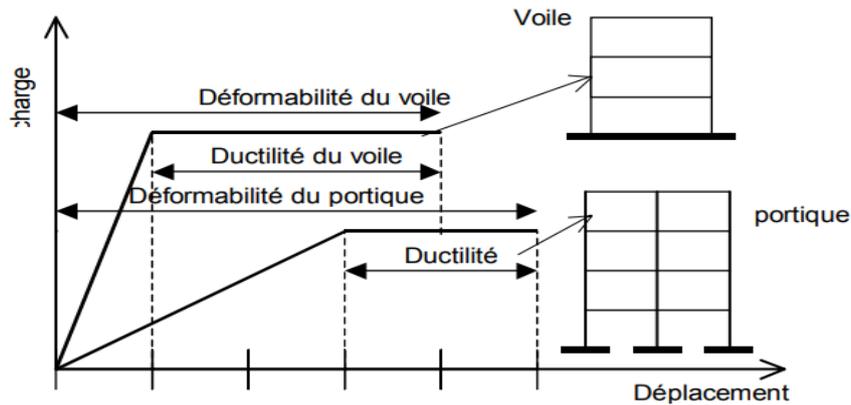


Figure III.2. Déformabilité et ductilité des voiles et portiques en béton armé[33]

- **Comportement ductile et fragile**

Pour les éléments en béton armé, lorsque le palier de non linéarité (plasticité) est long, on dit que l'élément est ductile. Cependant, lorsque le palier de non linéarité est court, on dit que l'élément est fragile (figure) Un comportement fragile aura lieu dans le cas où l'élément est sous armé (quantité d'armature insuffisante) et dans le cas où l'élément est armé en excès, l'élément est dit rigide [30]

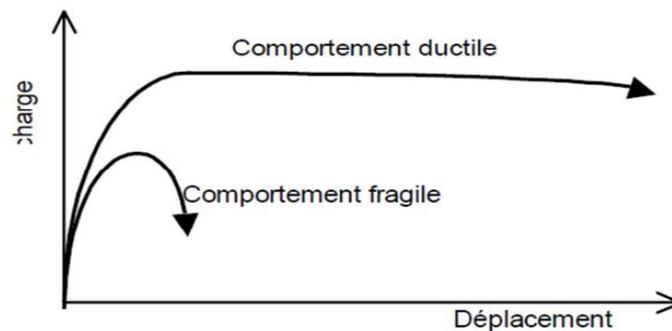


Figure III.3. Comportement d'un élément ductile et fragile[30]

III.2. Différents types de ductilité

On distingue 3 manières de quantifier la ductilité dans une structure : la ductilité de déformation, la ductilité de courbure et la ductilité de déplacement. La première est liée à la capacité de déformation locale des matériaux, la deuxième est associée à la capacité de rotation dans une section et la troisième se réfère au comportement global de l'élément ou de la structure[31].

Figure III.4.Types de ductilité

Types de ductilité	Représentation	Définition
Ductilité de déformation		$\mu_\epsilon = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y}$
Ductilité de courbure		$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$
Ductilité de déplacement		$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$

2.1.Ductilité de déformation

La ductilité de déformation ou la ductilité axiale caractérise les déformations élasto-plastique des matériaux pour différents types de chargement. Le facteur de cette ductilité est Quantifié par le rapport de la déformation de rupture ϵ_u et la déformation à la fin de la phase élastique du matériau ϵ_y [33].

La source de la ductilité est la capacité des matériaux à supporter des déformations plastiques sans réduction importante de contrainte, La ductilité de déformation est exprimée par le rapport de la déformation totale imposée à la déformation élastique [34]:

$$\mu_\epsilon = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y}$$

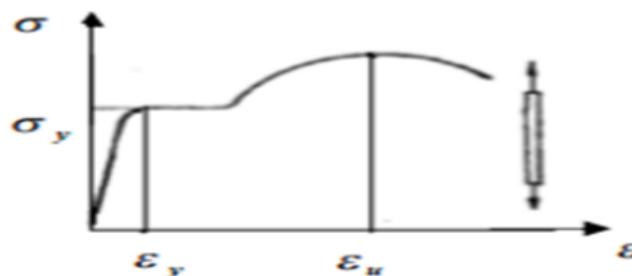


Figure III.5.Ductilité de déformation [34]

2.2. Ductilité de déplacement

La ductilité en déplacement est, généralement, une mesure de la ductilité globale de la structure. Elle est souvent employée en calcul sismique, elle est liée au déplacement d'un point de la structure. Le facteur de ductilité en déplacement μ_{Δ} est également défini comme le rapport du déplacement maximal Δ_u d'un niveau défini de la structure, sur le déplacement Δ_y correspondant à la limite élastique, voir (figure III.6).

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

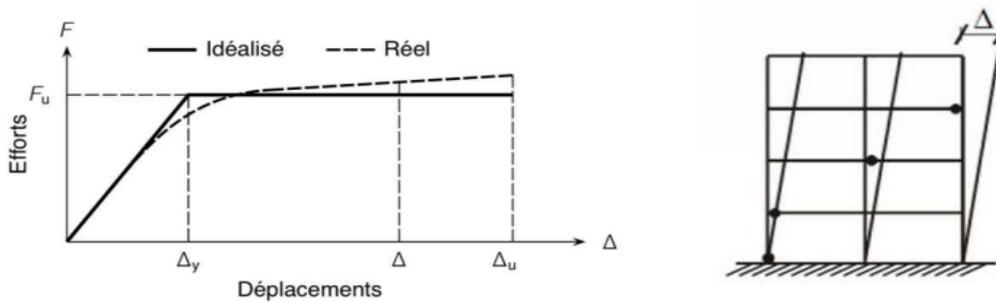


Figure III.6. Ductilité de déplacement [35]

2.3. Ductilité en courbure

C'est la capacité de rotation des rotules plastiques développées dans la structure. Elle est définie comme étant le rapport de la courbure maximale à la courbure élastique [36].

La ductilité locale ou en courbure est définie par son facteur μ_{φ} qui est le rapport entre la courbure ultime φ_u et la courbure à la fin de la phase élastique φ_y .

$$\mu_{\varphi} = \frac{\varphi_u}{\varphi_y}$$

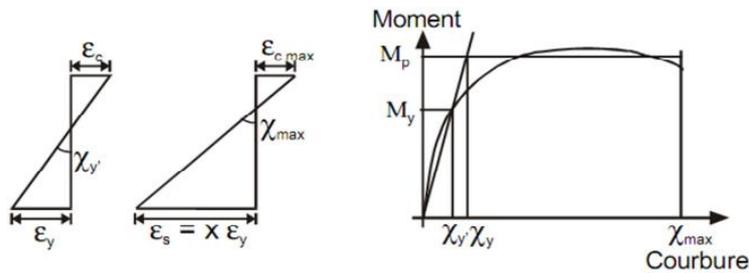


Figure III.7. Ductilité en courbure [37]

III.3. Facteurs influençant la ductilité

La ductilité de la structure permet d'apprécier le niveau de la résistance de la construction en phase élastique et les dégradations dues aux déformations dans le domaine élastoplastique qu'elle peut subir sous l'effet des charges sismiques ou accidentelles qui entraînent le plus souvent des rotules plastiques dans certains points de la structure.

Un grand nombre de recherches expérimentales et analytiques a été conduit pour l'amélioration de la capacité des rotules plastiques de l'absorption et la dissipation de l'énergie sismique. Or, cette amélioration dépend de plusieurs facteurs intrinsèques qui influent sur la ductilité et la portance des rotules plastiques. Parmi ces facteurs, on cite:

- la résistance à la compression du béton ;
- le confinement transversal des éléments ;
- les pourcentages des armatures tendues et comprimées ;
- la résistance élevée des armatures tendues[35].

Relation entre les différents types de ductilités

Dans les structures globales, la relation entre la ductilité disponible et la ductilité requise est aussi compliquée. Elle est en fonction de la topologie de la distribution d'énergie de la structure. La demande de ductilité globale peut correspondre à des demandes de ductilité locales beaucoup plus importantes. Par exemple, pour un pilier de pont un facteur de ductilité globale de 4 à 5 correspond à un facteur de ductilité locale varie entre 12 à 16[38].

La Figure 1.8 montre une corrélation entre la ductilité locale et la ductilité globale :

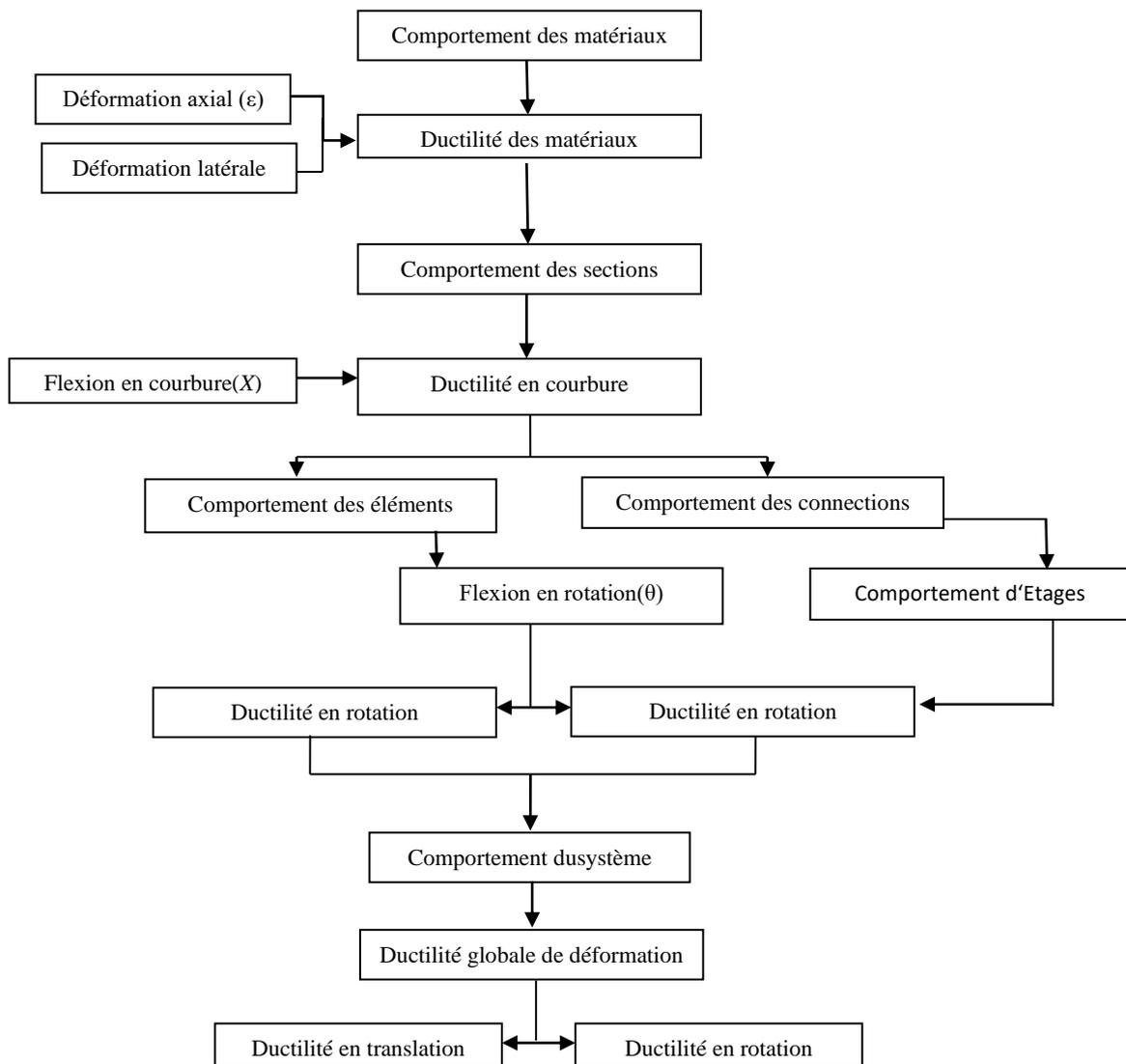


Figure III.8. Relation entre les niveaux de ductilité [38]

III.4. Ductilité vis-à-vis chargement statique

Un grand nombre de problèmes rencontrés actuellement dans l'industrie peuvent nécessiter la prise en compte des non linéarités aussi bien géométrique que matérielle. La première utilisation de la théorie élasto-plastique était pour d'écrire le comportement des matériaux, elle a été initialement élaborée à partir des constatations expérimentales relatives au comportement bidimensionnel tridimensionnel des métaux.

Actuellement, les domaines d'application de cette modélisation sont devenus plus larges et débordent ce cadre. On résout actuellement, par les méthodes analytiques ou numérique, des problèmes d'élasto-plastique en calcul des structures (structures réticulées, structures. barres fléchies, les structures plaques et coques, les structures complexes,...). Depuis les années 80,

la théorie de plasticité est aussi utilisée dans la modélisation et l'analyse des structures en béton, en béton armé et dans les ouvrages de géotechnique.

On propose, dans la suite, d'exposer le modèle de comportement élasto-plastique classique, construit, en utilisant l'hypothèse de la petite transformation (nom linéarité matérielle). Ce modèle, dont la présentation est maintenant bien acquise, demeure le schéma plastique le plus fréquemment utilisé dans les applications courantes et numériques. Il convient toutefois de signaler que des travaux de recherche effectués au cours des trois dernières décennies ont abouti à la mise sur pied, de la théorie de l'élasto-plastique (Lee en 1969 ; Mandel 1971,1973 ; Brun en1992).

Le Modèle de comportement élasto-plastique classique (le modèle qui couple la théorie de l'élasticité avec celui de la plasticité laisse de côté, en ce qui concerne la plasticité, deux phénomènes de vieillissent et de viscosité du matériau utilisé.

Pour étudier le comportement des structures en béton armé soumises aux actions répétées et alternées de type séismique, il est très important d'avoir des informations sur le comportement de l'acier et du béton et des éléments en béton armé sous de telles charges.

Des essais séismiques réalisés sur table vibrante, comme ceux du C.E.A en collaboration avec le C.E.B ont montré l'importante diminution de rigidité que subit une structure en béton armé avant l'atteinte de son état limite. Or la fréquence propre d'une structure et donc sa réponse à une sollicitation dynamique, est directement dépendant de sa rigidité. Les méthodes simplement linéaires se révèlent insuffisantes pour une analyse complète du comportement des structures en béton armé, même pour leniveau de séisme relativement modéré. Les séismes de forte magnitude sollicitent la structure en dehors du domaine d'élasticité. Celle-ci doit être en mesure de résister en absorbant de grandes énergies de déformation, sans se ruiner. La ductilité offerte par les matériaux de construction, l'acier en particulier, constitue un facteur important de résistance aux actions sismiques.

En effet, les déformations inélastiques jouent un rôle très important dans le mécanisme d'absorption de l'énergie transmise à la structure par ces charges exceptionnelles.

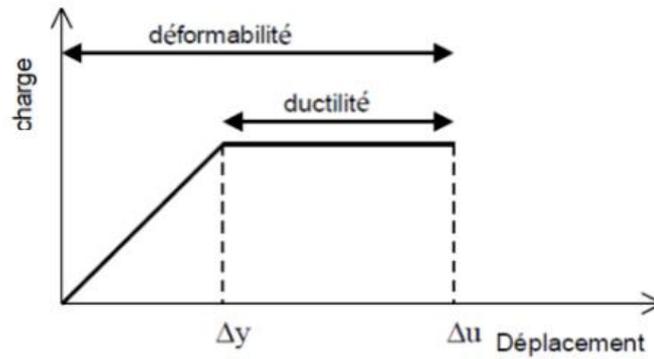


Figure III.9. Courbe charge – déplacement [34]

Ce diagramme se caractérise par deux branches, un élastique traduit un comportement fragile, il peut s'agir d'une pièce non armée, et l'autre plastique pourrait être le diagramme d'un acier à haute résistance. La ductilité de la structure permet d'apprécier le niveau de la résistance de la construction en phase élastique et les dégradations dues aux déformations dans le domaine élasto-plastique qu'elle peut subir sous l'effet des charges sismiques ou accidentelles qui entraînent le plus souvent des rotules plastiques dans certains points de la structure.

En effet, Le facteur de ductilité est calculé à l'aide d'une courbe idéalisée élastoplastique équivalente.

III.5. Ductilité en chargement dynamique alterné

La capacité des structures ductiles est encore plus significative lorsqu'on les considère en régime dynamique alterné ; en effet, la courbe de la (Figure III.10) "force-déplacement" va présenter plusieurs cycles provenant des accélérogrammes sismiques. Ceci permet à la structure d'absorber une grande partie d'énergie apportée par le séisme, à condition que le matériau présente une bonne ductilité dans les deux sens. Aussi, est-on en mesure de penser que les structures en acier, qui présentent en général une ductilité importante, auront un meilleur comportement face aux séismes que d'autres structures, par exemple celles en béton armé dimensionnées de manière habituelle, étant donné que la ductilité globale de la structure est conditionnée par celle des matériaux qui la constituent.

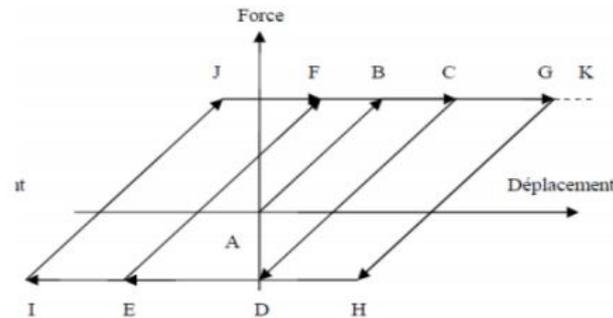


Figure III.10. Comportement élastoplastique en dynamique [34]

Enfin, nous pouvons dire que les structures en acier, qui présentent en général une ductilité importante, auront un meilleur comportement face aux séismes que d'autres structures, par exemple celles en béton armé dimensionnées de manière habituelle, étant donné que la ductilité globale de la structure est conditionnée par celle des matériaux qui la constituent.

III.6. Ductilité des matériaux

Les matériaux de construction, subissant un chargement ou une déformation très rapide, présentent, pour la plupart, une augmentation de la résistance et du module élastique par rapport à leurs résistances et modules élastiques statiques. La connaissance de ces modifications de propriété et leurs prises en compte à la fois pour l'interprétation des résultats des essais (impacts ou essais semblables) sur des éléments structuraux et aussi pour estimer la réponse des structures soumises à de telles charges, quand il s'agit de leur dimensionnement, paraît indispensable, les travaux de Gold Smith (1960), Johnson (1972), Tsutsumi et Sway dans ce domaine sont remarquables. Nous présenterons un extrait des résultats expérimentaux sur les propriétés importantes de l'acier et du béton et du changement de ces propriétés, en fonction des paramètres intervenant.

III.6.1. Acier

La loi contrainte-déformation de l'acier sous chargement monotone est bien connue. Cette loi présente successivement des parties élastique, plastique et écrouie. Dans le cas de l'acier naturel, la partie écrouie n'existe pas. La (Figure III.11) représente les courbes contrainte-déformation de quelques types d'acier. Cette loi est supposée la même en traction et en compression. Les résultats d'essais confirment la validité de cette hypothèse.

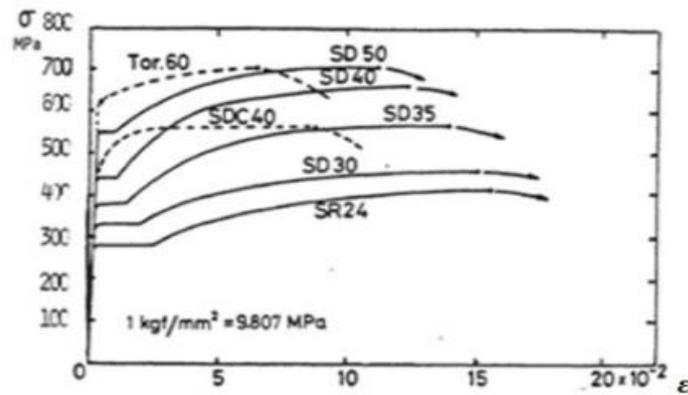


Figure III.11. Courbes contrainte-déformation de quelques types d'acier[34]

III.6.2. Béton

La résistance à la compression du béton en général est déterminée sur des cylindres dont le rapport de la hauteur au diamètre est de 2. Les cylindres sont chargés longitudinalement avec telle vitesse que la résistance maximale est atteinte au bout de 2 à 3 minutes. La résistance à la compression du béton peut varier de 14 à 56 MPA. La déformation correspondant à la résistance maximale est de l'ordre de 0.002. La courbe contrainte déformation en fonction de la résistance à l'allure présentée sur la (Figure III.12).

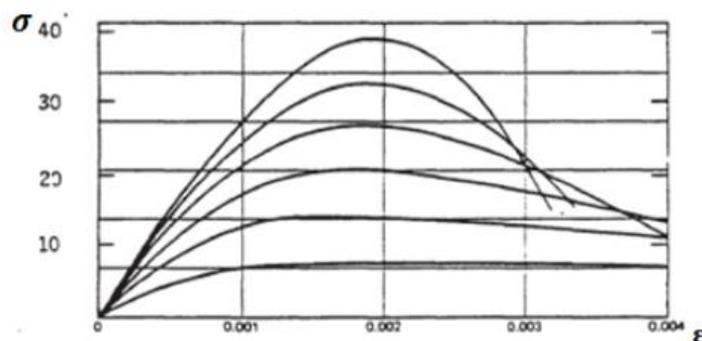


Figure III.12. Courbes contrainte-déformation de cylindres de béton sous compression uniaxiale [34]

Ces courbes montrent qu'une augmentation de pression latérale apporte une augmentation significative aussi bien en résistance qu'en ductilité. La comparaison des diagrammes contraintes-déformations pour l'acier de construction et pour un béton traduit la ductilité importante de l'acier par rapport au béton. Cependant, il est à noter que le facteur de ductilité d'un degré de liberté d'une structure n'est pas seulement en fonction de la nature des matériaux constitutifs, mais qu'il dépend aussi du champ des déformations relatif à ce degré de liberté. La ductilité en section est donc significative [34].

III.7. Conclusion

Il est essentiel pour le concepteur de s'assurer que la structure est apte à subir des déformations, en particulier l'étirement, sans se rompre et en maintenant son intégrité. La ductilité joue un rôle crucial dans la conception parasismique, car elle permet à la structure de dissiper l'énergie lors d'un séisme. La ductilité est définie par des paramètres qui reflètent son niveau, et il est impératif de les prendre en compte lors de la conception. De plus, il existe différents types de ductilité qui doivent être pris en considération. En intégrant ces éléments dans le processus de conception, il est possible de développer des structures plus résilientes, capables de faire face aux contraintes sismiques, assurant ainsi la sécurité et la durabilité des ouvrages.

CHAPITRE IV

Calcul du facteur de ductilité

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons en détail la méthode de calcul du facteur de ductilité en courbure pour les poutres en béton, qu'elles soient non endommagées ou endommagées. Nous examinons attentivement les différentes étapes de ce calcul, en mettant l'accent sur les aspects clés qui influencent la ductilité des poutres. En comprenant pleinement cette méthode, nous serons en mesure d'évaluer avec précision la capacité de déformation et la résistance des poutres en béton, contribuant ainsi à une conception structurelle plus solide et durable.

IV.2. Lois de comportement des matériaux

IV.2.1. Béton

La valeur de calcul de la résistance en compression du béton sur cylindre f_{cd} est définie par :

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_c}{\gamma_c} \quad (\text{IV.1})$$

Où, γ_c est le facteur partiel de sécurité pour le béton, égal à 1.5 pour les situations durables et 1.2 pour les situations accidentelles, α_{cc} est un coefficient tenant compte des effets à long terme sur la résistance à la compression du béton, sa valeur varie entre 0.8 et 1. Dans la suite, la situation accidentelle est totalement considérée.

Pour le dimensionnement des sections transversales d'un élément en béton armé, on utilise le diagramme contrainte - déformation du calcul illustré dans la (figure IV.1), caractérisé par les relations des contraintes et des déformations suivantes :

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] & \text{pour } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \\ f_{cd} & \text{pour } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Où, ε_c est la déformation résultant de la compression du béton et ε_{c2} est la déformation de compression du béton sous la contrainte maximale f_{cd} et ε_{cu} est la déformation de compression ultime du béton, définie par:

n : est un exposant qui prend les valeurs suivantes :

$$n = \begin{cases} 2 & \text{pour } f_c \leq 50 \text{ MPa} \\ 1.4 + 23.4 \left(\frac{90 - f_c}{100} \right)^4 & \text{pour } f_c > 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

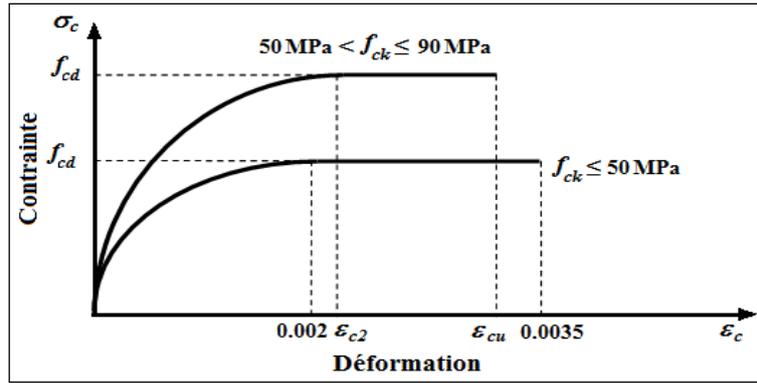


Figure IV.1. Diagramme parabole rectangle pour un béton non confiné sous compression

IV.2.2. Acier

Le diagramme contrainte –déformation des aciers schématisé dans la (Figure IV.2) est distingué par la courbe élasto-plastique bilinéaire, caractérisée par une branche inclinée jusqu'à une déformation égale à $\epsilon_{sy,d}$ et une contrainte de l'armature égale à f_{yd} , ainsi qu'une branche supérieure supposée horizontale jusqu'à la déformation maximale ϵ_{uk} correspondant à la contrainte dans l'armature égale à f_{yk} , où :

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_s} \tag{IV.3}$$

Où, γ_s est un coefficient partiel de l'acier égal à 1.15 pour les situations durables et 1 pour les situations accidentelles.

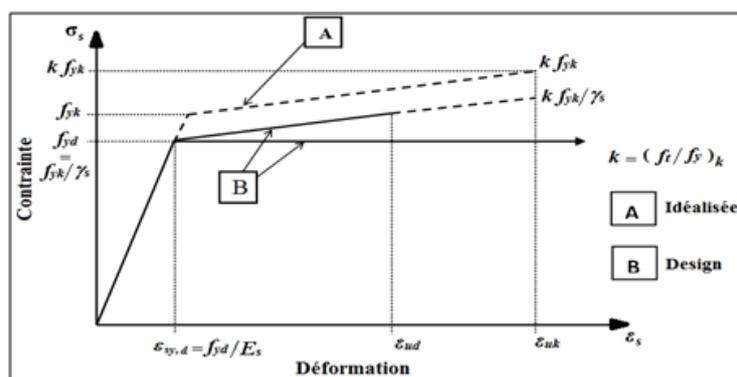


Figure 4.2. Diagramme "contrainte – déformation" des aciers du béton armé

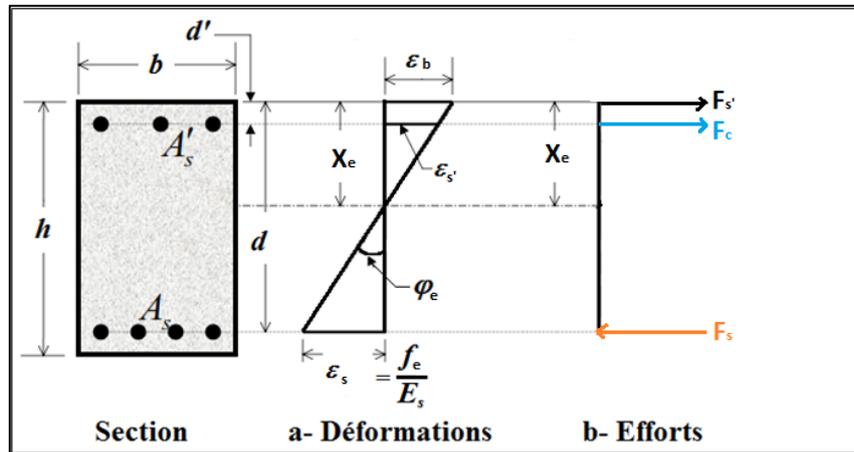
$\epsilon_{sy,d} = f_{yd}/E_s$: Allongement élastique de l'armature sous charge maximale.

E_s : Module d'élasticité de l'acier, égal à 200000 MPa.

ε_{uk} : Allongement ultime de l'armature sous charge maximale, cette déformation ultime est limitée à 5 % pour la classe B et 7.5 % pour la classe C. La valeur recommandée pour ε_{ud} est $0.9\varepsilon_{uk}$.

IV.3. Facteur de ductilité pour un béton non-endommagé

IV.3.1. Courbure à la fin de la phase élastique



La Figure IV.3. Comportement d'une section fléchie d'une poutre en béton armé à l'état limite de service (la fin de phase élastique)

La courbure à la fin de la phase élastique est exprimée par :

$$\varphi_e = \frac{\varepsilon_s}{d - X_e} \quad (IV.4)$$

Et, la déformation dans les armatures comprimées $\varepsilon_{s'}$, s'écrit :

$$\varepsilon_{s'} = \frac{\varepsilon_s(X_e - d')}{d - X_e} \quad (IV.5)$$

Sachant que la contrainte dans les armatures comprimées

$$\sigma_{s'} = \varepsilon_{s'} E_{s'} \quad (IV.6)$$

L'équation d'équilibre statique des efforts internes sollicitant la section s'écrit :

$$E_b \varepsilon_b A_b + E_{s'} \varepsilon_{s'} A_{s'} = \sigma_s A_s \quad (IV.7)$$

La solution de cette équation, conduit à un polynôme du second degré dont la solution acceptable retenue est :

$$\varepsilon_b = \frac{F_e}{E_s} \frac{X_e'}{d - X_e} \quad (IV.8)$$

$$E_b \frac{\varepsilon_s X_e}{d - X_e} (b \cdot X_e) + E_{s'} \frac{\varepsilon_s (X_e - d')}{d - X_e} A_{s'} = E_s \varepsilon_s A_s \quad (IV.9)$$

$$E_b \frac{F_e}{E_s} \cdot b \cdot \frac{X_e^2}{(d - X_e)} + E_{s'} \frac{F_s (X_e - d')}{E_s (d - X_e)} A_{s'} = E_s \varepsilon_s A_s = F_s A_s \quad (IV.10)$$

$$\varepsilon_s = \frac{F_s}{E_s} \quad (IV.11)$$

$$\left(E_b \frac{F_e}{E_s} \cdot b \cdot \frac{X_e^2}{(d-X_e)} + E_s' \frac{F_s}{E_s} \frac{(X_e-d)}{(d-X_e)} A_s' = F_s A_s\right) \times \frac{(d-X_e)}{F_s} \quad (IV.12)$$

$$\frac{E_b}{E_s} \cdot b \cdot X_e^2 + (X_e - d')A_s' - A_s(d - X_e) = 0 \quad (IV.13)$$

$$\frac{E_b}{E_s} \cdot b \cdot X_e^2 + A_s' X_e - A_s' d' - A_s d + A_s X_e = 0 \quad (IV.14)$$

$$\frac{E_b}{E_s} \cdot b \cdot X_e^2 + (A_s' + A_s) X_e - (A_s' d' + A_s d) = 0 \quad (IV.15)$$

Le calcul du facteur (X_e) peut se trouver, en trouvant la solution de l'équation (15)

IV.3.2.Courbure à l'état limite ultime :

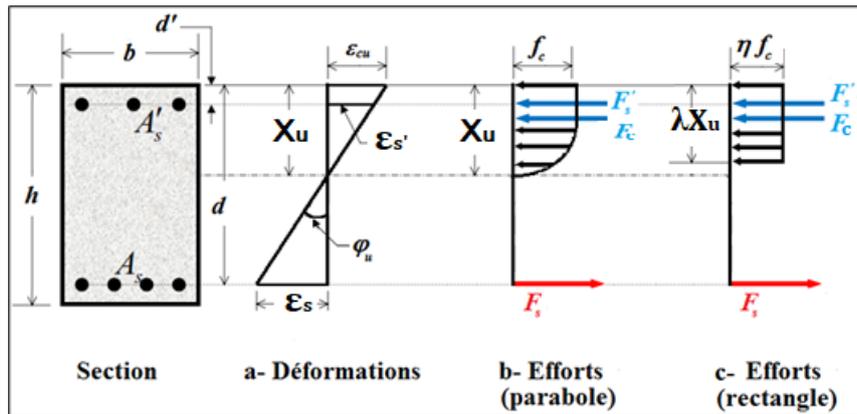


Figure IV.4. Comportement de la section d'une poutre fléchie en béton armé à l'état limite ultime
La courbure à l'état limite ultime, d'après (la figure IV.4a) est exprimée par :

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{X_u} \quad (IV.16)$$

Supposons que les armatures comprimées A_s' restent à l'état élastique, leur déformation ε_s' , s'obtient :

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{X_u} = \frac{\varepsilon_s'}{X_u - d'} \quad (IV.17)$$

$$\varepsilon_s' = \frac{\varepsilon_{cu}(X_u - d')}{X_u} \quad (IV.18)$$

Où λ est le facteur de la hauteur effective de la zone comprimée (Figure IV.4).D'après l'Eurocode 2 (EN 1992, 2004), il s'exprime par :

$$\lambda = \begin{cases} 0.8 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0.8 - \frac{f_{ck} - 50}{400} & \text{pour } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (IV.19)$$

Et η est le facteur de la résistance effective du béton (figure IV.4).D'après l'Eurocode 2 (EN 1992, 2004),il s'exprime par :

$$\eta = \begin{cases} 1.0 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1.0 - \frac{f_{ck} - 50}{200} & \text{pour } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (\text{IV.20})$$

$$-\eta f_c \lambda X_u \cdot b - E_s' \frac{\varepsilon_{cu}(X_u - d')}{X_u} A_s' = -f_e A_s \quad (\text{21})$$

La solution de l'équation (21), conduit à une expression du second degré variant en fonction de X_u , dont la solution acceptable, s'écrit comme suit :

$$\eta f_c \lambda X_u \cdot b \cdot X_u - E_s' A_s' \varepsilon_{cu} (X_u - d') + f_e A_s X_u = 0 \quad (\text{IV.22})$$

$$\eta f_c \lambda \cdot b \cdot X_u^2 - E_s' A_s' \varepsilon_{cu} X_u + E_s' A_s' \varepsilon_{cu} d' + f_e A_s X_u = 0 \quad (\text{IV.23})$$

$$\eta f_c \lambda \cdot b \cdot X_u^2 + (-E_s' A_s' \varepsilon_{cu} + f_e A_s) X_u + E_s' A_s' \varepsilon_{cu} d' = 0 \quad (\text{IV.24})$$

Le calcul du facteur (X_u) peut se trouver, en trouvant la solution de l'équation (24)

IV.3.3. Facteur de ductilité

Facteur de ductilité locale le facteur de ductilité en courbure, dans le cas de la rupture par écrasement du béton s'obtient, par le rapport entre la courbure à l'état ultime déterminée en (16) et la courbure à la fin de la phase élastique déterminée en (4):

$$\mu_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_e} \quad (\text{IV.25})$$

$$\mu_\varphi = \frac{\varepsilon_{cu}}{X_u} \cdot \frac{d - X_e}{\varepsilon_s} \quad (\text{IV.26})$$

IV.4. Facteur de ductilité d'un béton endommagé

IV.4.1. Comportement d'un béton endommagé

Sous l'effet d'endommagement un changement significatif est engendré au béton. Dans ce contexte, la résistance à la compression et le module élastique du béton endommagé sont donnés comme suit :

$$f_{ce} = f_c (1 - D) \quad (\text{IV.27})$$

$$E_{ce} = E_c (1 - D) \quad (\text{IV.28})$$

D : coefficient d'endommagement.

IV.4.2. État limite de service

$$\varphi_e = \frac{\varepsilon_{be}}{X_e} \quad (\text{IV.29})$$

ε_{be} est la déformation élastique d'un béton endommagé, elle est liée à l'état d'endommagement

L'équilibre des forces internes a mené à écrire l'équation suivante :

$$f_b + f_s' = f_s \quad (\text{IV.30})$$

$$f_{ce} X_e b + \varepsilon_s' A_s' E_s' = E_s \varepsilon_s A_s \quad (\text{IV.31})$$

$$\varepsilon_s' = \frac{\varepsilon_{be}(X_e - d')}{X_e} \quad (IV.32)$$

$$f_{ce}X_e b + \frac{\varepsilon_{be}(X_e - d')}{X_e} A_s' E_s' = E_s \varepsilon_s A_s \quad (IV.33)$$

$$\varepsilon_s = \frac{f_e}{E_s} \quad (IV.34)$$

$$f_{ce} \cdot b \cdot X_e^2 + \varepsilon_{be} A_s' E_s' (X_e - d') - E_s \frac{f_e}{E_s} A_s' X_e = 0 \quad (IV.35)$$

$$f_{ce} \cdot b \cdot X_e^2 + \varepsilon_{be} A_s' E_s' X_e - \varepsilon_{be} A_s' E_s' d' - E_s \frac{f_e}{E_s} A_s' X_e = 0 \quad (IV.36)$$

$$f_{ce} \cdot b \cdot X_e^2 + (\varepsilon_{be} A_s' E_s' - f_e A_s') X_e - \varepsilon_{be} A_s' E_s' d' = 0 \quad (IV.37)$$

Le calcul du facteur (X_e) peut se trouver, en trouvant la solution de l'équation (37)

IV.4.3. État limite ultime

La courbure ultime est considérée identique à celle d'un béton non endommagé, sauf qu'un changement au niveau des propriétés du béton à savoir la résistance à la compression et le module élastique. Dans ce cadre, la courbure est donnée par la relation suivante :

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{X_u} \quad (IV.38)$$

L'équilibre des forces internes permet d'écrire les relations suivantes :

$$f_{ce} X_u b + E_s' \varepsilon_{cu} \frac{(X_u - d')}{X_u} A_s' = f_e A_s \quad (IV.39)$$

$$f_{ce} b X_u^2 + E_s' A_s' \varepsilon_{cu} (X_u - d') - f_e A_s X_u = 0 \quad (IV.40)$$

$$f_{ce} b X_u^2 + (E_s' A_s' \varepsilon_{cu} - f_e A_s) X_u - E_s' A_s' \varepsilon_{cu} d' = 0 \quad (IV.41)$$

Le calcul du facteur (X_u) peut se trouver, en trouvant la solution de l'équation (41)

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous introduisons une méthode analytique avancée pour calculer le facteur de ductilité en courbure des poutres en béton, qu'elles soient endommagées ou non. Cette méthode repose sur le principe fondamental de l'équilibre des forces internes agissant au sein de la poutre, offrant ainsi une approche précise pour évaluer à la fois la capacité de déformation et la résistance des poutres en béton. Grâce à cette méthode, nous sommes en mesure de quantifier de manière rigoureuse la capacité d'absorption d'énergie et la flexibilité structurelle des poutres en béton, ce qui revêt une importance cruciale dans le dimensionnement et la conception de structures sûres et durables..

CHAPITRE V

Ductilité des poutres en béton endommagé

V.1. Introduction

La ductilité des poutres en béton armé revêt une importance capitale pour la capacité des structures à absorber l'énergie lors d'événements sismiques. Ce chapitre présente une étude paramétrique visant à analyser l'impact de l'endommagement sur la ductilité des poutres en béton armé. Dans cette étude, nous avons varié la résistance à la compression du béton de 20 MPa à 90 MPa, couvrant ainsi différents types de bétons, notamment les bétons ordinaires et les bétons à haute résistance. De plus, nous avons modifié le taux d'armatures tendues dans une plage allant de 0,5% à 4%, en respectant les recommandations des règlements en vigueur.

Dans ce cadre, nous examinons l'effet de l'endommagement sur la ductilité des poutres, ainsi que l'influence du taux d'armatures tendues. Enfin, nous proposons une solution pour restaurer le niveau de ductilité en utilisant des matériaux composites tels que les barres en FRP (Fiber Reinforced Polymer). Cette approche permet de renforcer les poutres endommagées et de rétablir leur capacité de déformation et de résistance, contribuant ainsi à la durabilité et à la sécurité des structures en béton armé.

V.2. Effet d'endommagement sur la ductilité

Les figures V.1-8 illustrent des histogrammes en 3D qui permettent de visualiser la répartition de la ductilité en fonction du niveau d'endommagement. Sur l'axe horizontal, nous pouvons observer les différentes valeurs d'endommagement, tandis que chaque barre représente un paramètre D avec des valeurs de 0, 0.1, 0.2 et 0.3. L'axe vertical représente quant à lui le facteur de ductilité en courbure.

La figure V.1 correspond à une résistance très basse de 20 MPa et met en évidence l'impact significatif de l'endommagement sur la réduction du facteur de ductilité, passant de 7.42 à 1.82. De plus, ce facteur continue de diminuer à 1.58 et 1.20 lorsque le coefficient D augmente respectivement à 0.2 et 0.3.

De même, les figures V.2-4 représentent l'effet de l'augmentation de la résistance à la compression du béton à 30, 40 et 50 MPa sur le facteur de ductilité, montrant une diminution similaire. Globalement, l'endommagement conduit à une réduction du facteur de ductilité allant de 75% à 90%.

D'autre part, les figures V.5-8 mettent en évidence l'effet de l'endommagement sur des bétons à haute résistance, variant de 60 MPa à 90 MPa. De manière similaire aux figures précédentes, la figure V.5 correspondant à une résistance de 60 MPa démontre une réduction significative du facteur de ductilité, passant de 10.97 à 1.21. Cette figure met également en

évidence l'influence négative du coefficient D sur le facteur de ductilité, montrant une diminution de 1.16 à 1.07 lorsque le coefficient D varie de 0.2 à 0.3.

De plus, lorsque la résistance à la compression du béton augmente jusqu'à 70, 80 et 90 MPa, le même constat est observé, avec une diminution du facteur de ductilité sous l'effet de l'endommagement. En général, pour les bétons à haute résistance, l'endommagement a conduit à une diminution du facteur de ductilité de 88% à 90%.

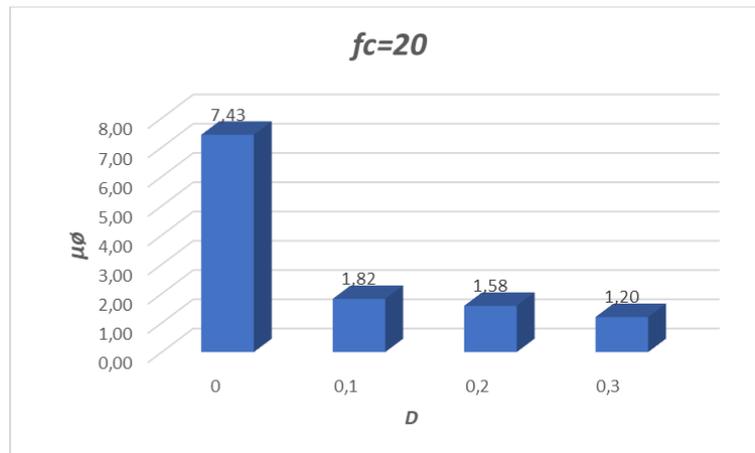


Figure V.1. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement

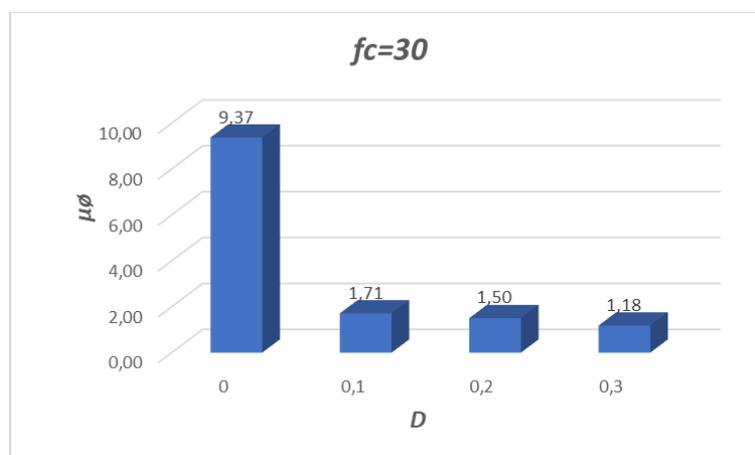


Figure V.2. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement

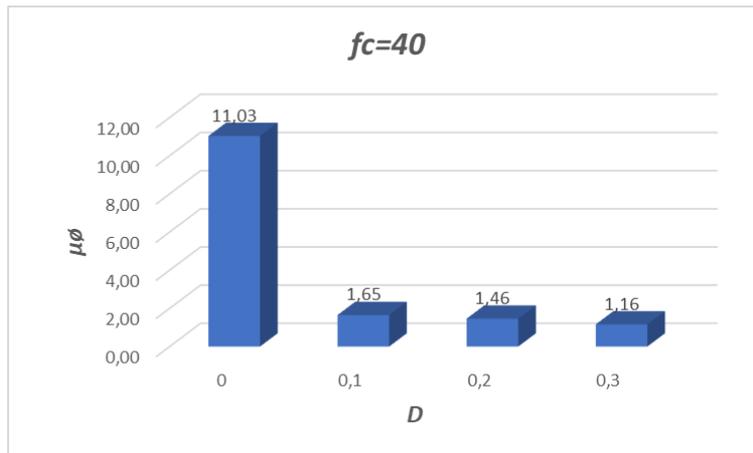


Figure V.3. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement

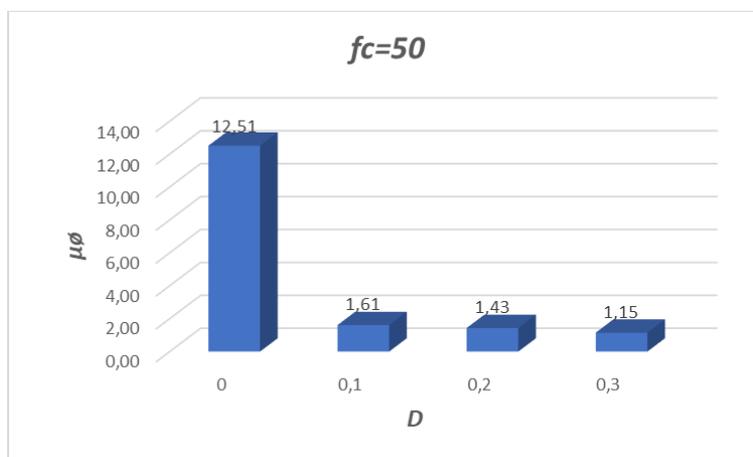


Figure V.4. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement

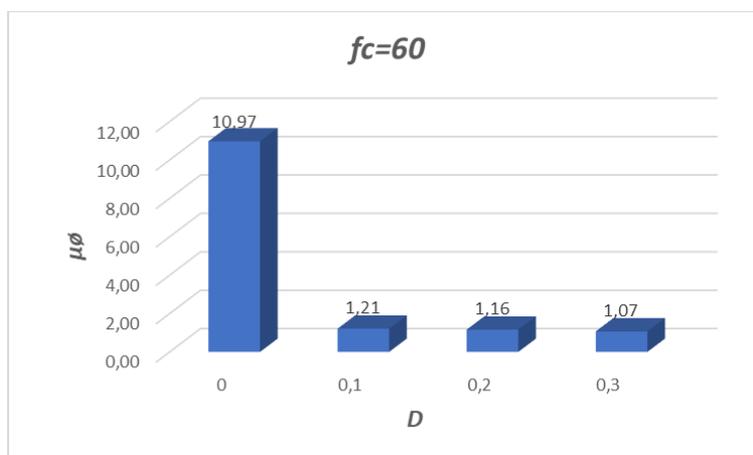


Figure V.5. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement

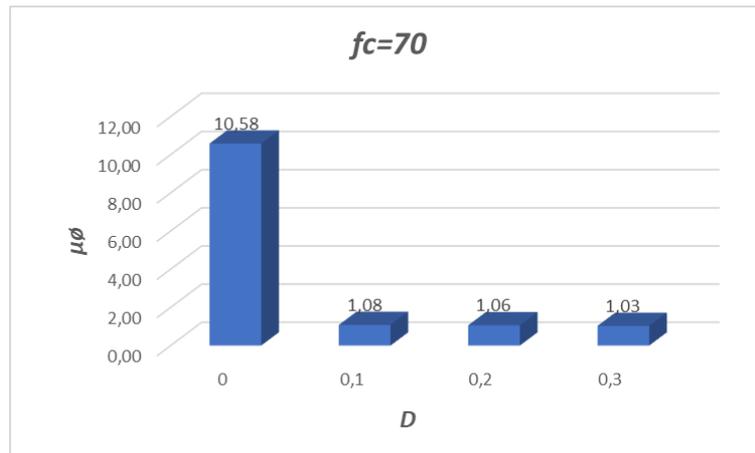


Figure V.6. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement

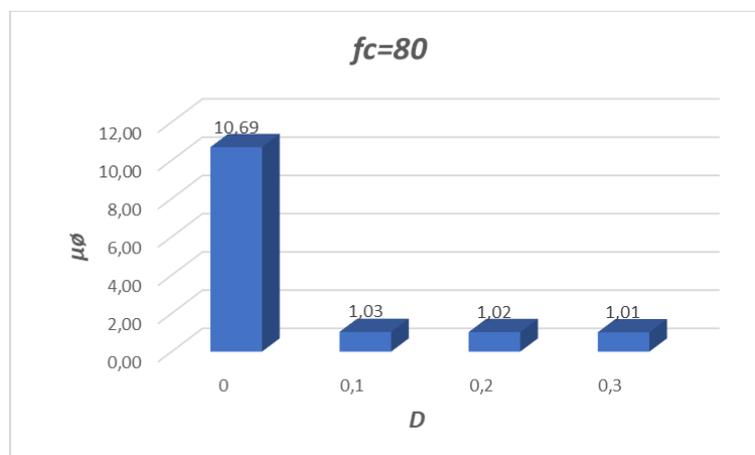


Figure V.7. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement

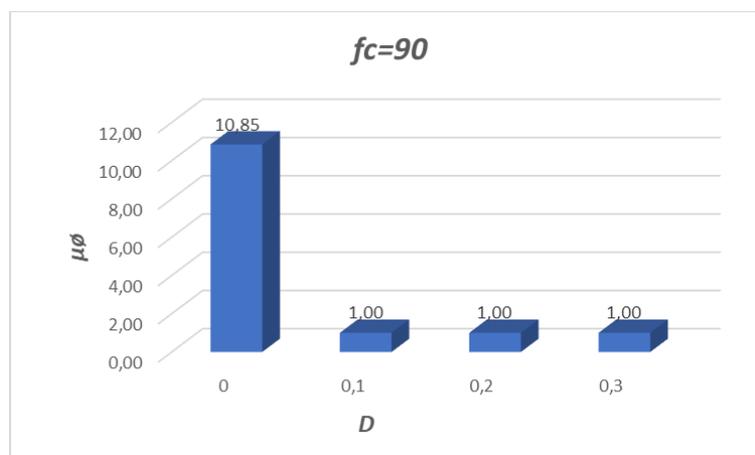


Figure V.8. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement.

La figure V.9 présente la variation du moment en fonction de la ductilité de courbure d'une poutre en béton armé endommagé et non endommagé. Cette figure démontre clairement que l'endommagement conduit à une augmentation de la courbure élastique, ce qui réduit la longueur de la phase plastique. Par conséquent, cela affecte négativement le facteur de ductilité. Donc, les dommages peuvent perturber la capacité d'un matériau à se déformer de manière plastique sans se rompre, entraînant ainsi une diminution de sa ductilité.

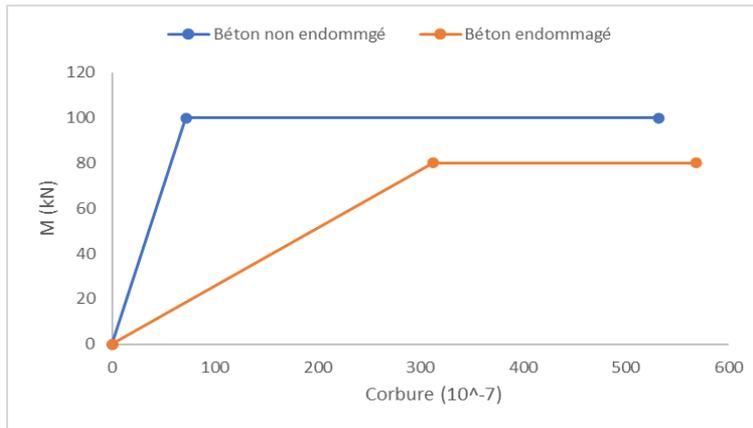


Figure V.9. Courbe du moment des poutre Par rapport la ductilité courbure.

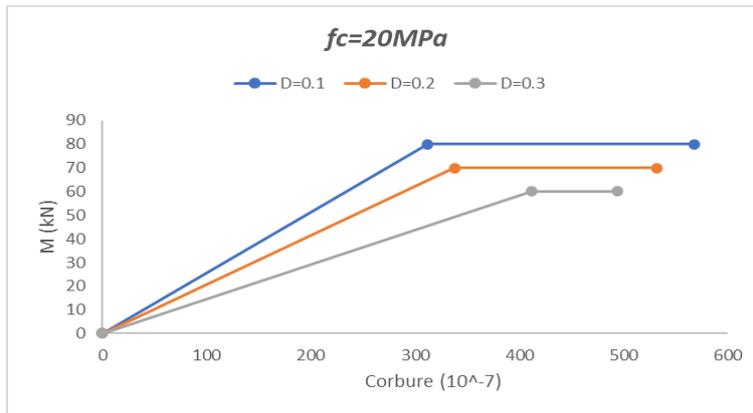


Figure V.10. Courbe du moment des poutre Par rapport la ductilité courbure.

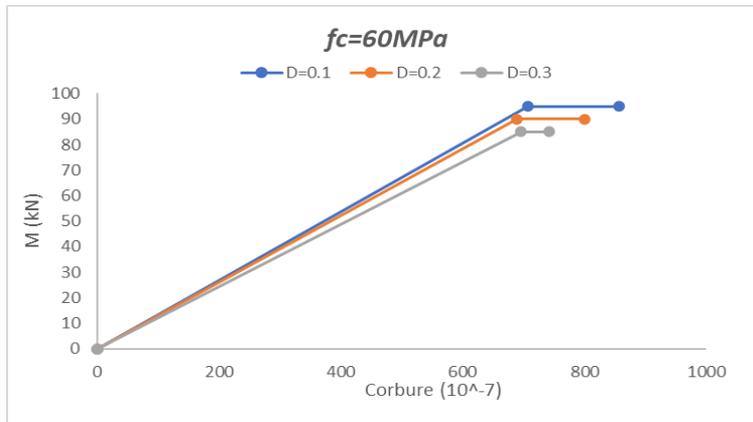


Figure V.11. Courbe du moment des poutre Par rapport la ductilité courbure.

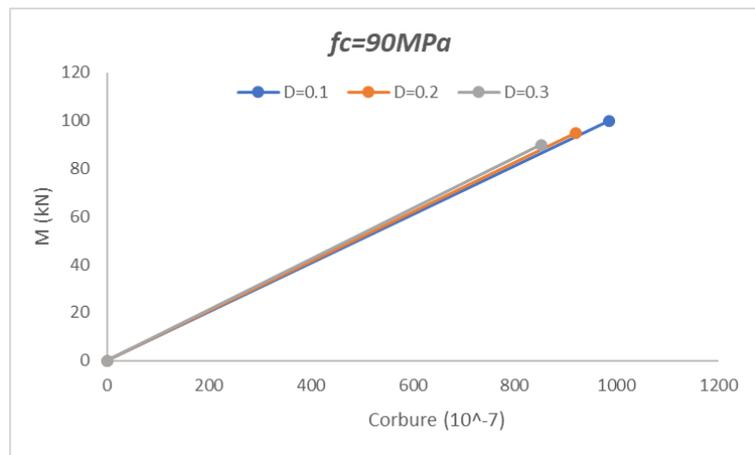


Figure V.12. Courbe du moment des poutres par rapport à la ductilité courbure.

Lors de la comparaison entre le béton ordinaire et le béton à haute résistance, il a été constaté que l'effet du coefficient d'endommagement "D" devient pratiquement négligeable pour les bétons à haute résistance en raison de leur fragilité. Ces bétons se caractérisent par une phase plastique très courte. Les figures V.10-12 illustrent les différentes courbes (M- ϕ) pour les deux types de bétons avec des valeurs de D égales à 0.1, 0.2 et 0.3, confirmant ainsi les observations de cette section.

V.3. Effet de taux d'armature tendues

Les Figures V.13-14 présentent des courbes illustrant la variation du facteur de ductilité en fonction de l'effet de taux d'armatures tendues pour les différents états d'endommagement. Ces figures montrent que l'ajout des armatures tendues augmente la ductilité de 10% jusqu'à 46%. L'ajout d'armatures tendues peut compenser cette perte de ductilité et aider à maintenir la stabilité de la structure. Les armatures tendues peuvent également agir comme des liens entre les zones endommagées du béton, répartissant les charges et empêchant la propagation de fissures. Cela peut contribuer à améliorer la capacité de la structure à se déformer sans se rompre et donc augmenter sa ductilité. D'ici vient l'idée d'ajouter un renfort dans la partie tendue de la poutre pour restaurer le niveau de la ductilité.

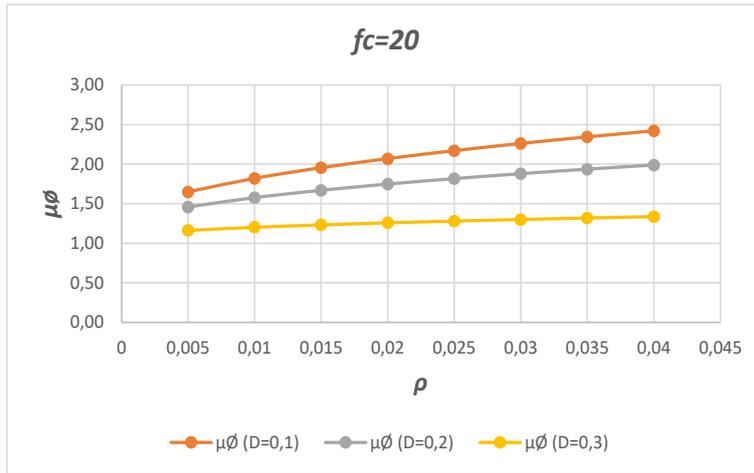


Figure V.13. Courbe représente la variation de la ductilité en fonction du taux d'armateur

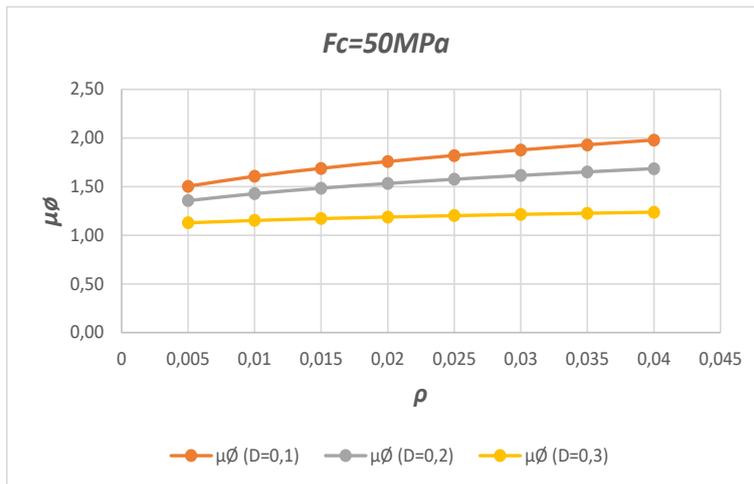


Figure V.14. Courbe représente la variation de la ductilité en fonction du taux d'armateur

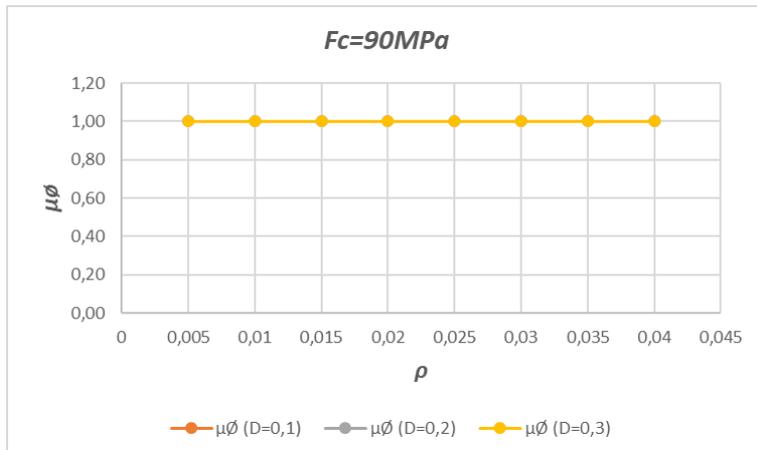


Figure V. 15. Courbe représente la variation de la ductilité en fonction du taux d'armateur

V.4. Optimisation de la ductilité des structures en béton par l'ajout de renforts en matériaux composites

Les polymères renforcés de fibres (FRP) sont largement utilisés pour le renforcement des éléments en béton armé en raison de leurs nombreux avantages, notamment leurs excellentes propriétés mécaniques et physiques [39-40]. En pratique, les poutres en béton armé peuvent être renforcées en utilisant deux systèmes bien connus, tels que les des barres montées dans le corps de béton ou bien des plaques collées en externe sur la surface du béton[41, 42]. Ces renforcements en FRP, sous forme de barres ou de plaques, sont collés au béton à l'aide de systèmes spéciaux de résine époxy [43-44]. Toutanji et al. [45], Hashemi et al. [46], Nayak et al. [47], Elbana and Junaid[48], et Helal et al. [49] ont démontré que l'utilisation du système avec des plaques améliore uniquement la résistance à la flexion des poutres, c'est-à-dire qu'elle augmente la capacité de charge tout en réduisant la déflexion ultime et la ductilité. D'autre part, Oudah et al. [43] et Aidoo et al. [50] ont démontré que l'utilisation d'un système avec des barres améliore le comportement en flexion des poutres, en augmentant ainsi la capacité de charge, les déformations et la ductilité.

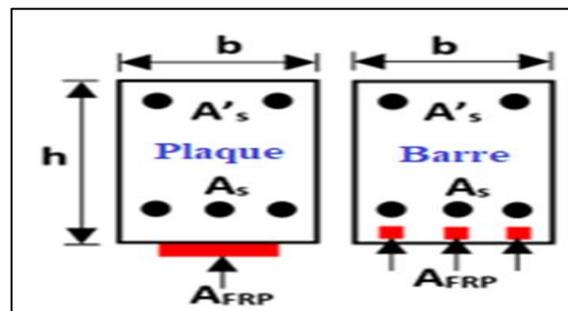


Figure V.16. Différents types de renforcement en FRP

Une étude récente menée par Bouzid et al. en 2023 a mis en évidence les avantages d'un système utilisant des barres en FRP (polymère renforcé de fibres) placées à proximité des armatures tendues. Par conséquent, pour restaurer la ductilité des poutres endommagées, l'utilisation d'un système de renforcement en barres en FRP est adopté dans cette partie.

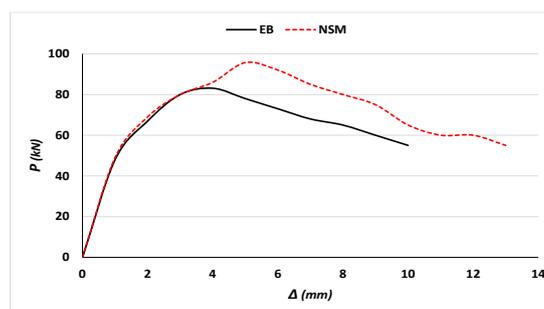


Figure V.17. Courbe P-Δ de systèmes avec barre et plaque en FRP [51].

V.4.1. Courbure à l'état ultime

La figure V.18 Présente une section de poutre renforcée avec matériaux FRP. D'après cette figure, la courbure ultime est calculée comme suit :

$$X_u = \frac{-B_2 + \sqrt{B_2^2 - 4A_2C_2}}{2A_2} A_2 = f_f \frac{E_{ce}}{E_f} b \tag{V.1}$$

$$B_2 = f_f \frac{E'_s}{E_f} A'_s + f_f A_f + f_f \frac{E_s}{E_f} A_s \tag{V.2}$$

$$C_2 = -f_f \frac{E'_s}{E_f} A'_s d' - f_f A_f d_f - f_f \frac{E_s}{E_f} A_s d \tag{V.3}$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{fu}}{d_f - X_u} \tag{V.4}$$

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_f}{E_f} \tag{V.5}$$

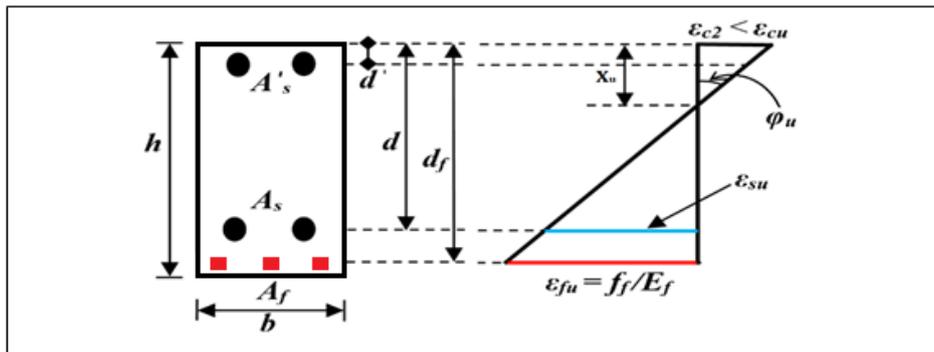


Figure V.18. Section d'une poutre renforcée avec des barres en FRP

V.4.2. Influence du renforcement par matériaux composites FRP sur la ductilité

Les figures V.19-27 présentent des histogrammes en 3D permettant de visualiser l'évolution de la ductilité en fonction du niveau d'endommagement et du renforcement par matériaux composites FRP, en tenant compte de la déformation ultime du matériau FRP (ε_{fu}).

Pour une résistance de 20 MPa, lorsque $\varepsilon_{fu}=0.02$, l'ajout de renforcement a légèrement augmenté la ductilité de 1.82 à 2.19, de 1.58 à 2.05 et de 1.20 à 1.71 pour les valeurs de D égales à 0.1, 0.2 et 0.3 respectivement. Avec $\varepsilon_{fu}=0.04$, la ductilité s'est améliorée de manière significative, passant de 1.82 à 4.38, de 1.58 à 4.10 et de 1.20 à 3.43 pour les mêmes valeurs de D. De plus, lorsque $\varepsilon_{fu}=0.08$, une amélioration notable de la ductilité a été observée, avec des valeurs augmentant de 1.82 à 8.75, de 1.58 à 8.21 et de 1.20 à 6.86 pour les valeurs de D correspondantes. Ces résultats mettent en évidence l'impact positif du renforcement par

matériaux composites FRP sur la ductilité des poutres, en particulier lorsque la déformation ultime du matériau FRP est élevée.

Pour une résistance de 50 MPa, lorsque $\varepsilon_{fu}=0.02$, l'ajout de renforcement a légèrement diminué la ductilité de 1.61 à 1.15, de 1.43 à 1.10 et de 1.15 à 0.97 pour les valeurs de D égales à 0.1, 0.2 et 0.3 respectivement. Avec $\varepsilon_{fu}=0.04$, la ductilité s'est améliorée de manière significative, passant de 1.61 à 2.30, de 1.43 à 2.21 et de 1.15 à 1.94 pour les mêmes valeurs de D. De plus, lorsque $\varepsilon_{fu}=0.08$, une amélioration notable de la ductilité a été observée, avec des valeurs augmentant de 1.61 à 4.60, de 1.43 à 4.41 et de 1.15 à 3.83 pour les valeurs de D correspondantes.

Pour une résistance de 90 MPa, lorsque $\varepsilon_{fu}=0.02$, l'ajout de renforcement a légèrement diminué la ductilité de 1.00 à 0.67, de 1.00 à 0.72 et de 1.00 à 0.79 pour les valeurs de D égales à 0.1, 0.2 et 0.3 respectivement. Avec $\varepsilon_{fu}=0.04$, la ductilité a augmenté, passant de 1.00 à 1.33, de 1.00 à 1.44 et de 1.00 à 1.58 pour les mêmes valeurs de D. De plus, lorsque $\varepsilon_{fu}=0.08$, une amélioration significative de la ductilité a été observée, avec des valeurs augmentant de 1.00 à 2.66, de 1.00 à 2.88 et de 1.00 à 3.16 pour les valeurs de D correspondantes.

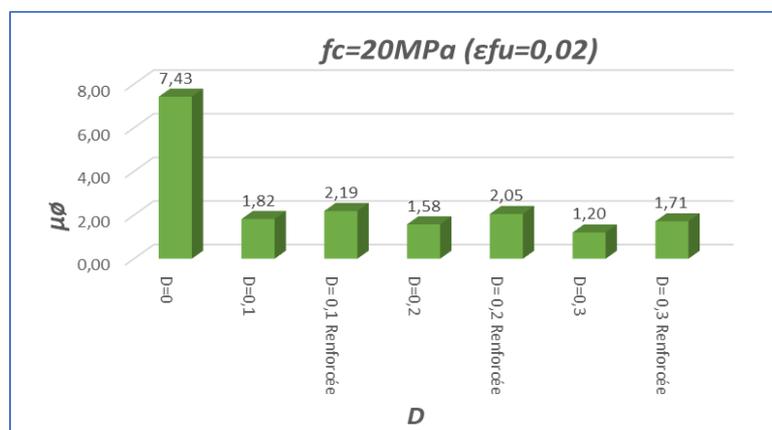


Figure V.19. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement.

Dans l'ensemble, les matériaux composites FRP présentent des propriétés mécaniques supérieures à celles du béton armé, telles que la résistance à la traction, la rigidité et la résistance à la corrosion. L'incorporation de renforts en FRP peut donc renforcer la résistance à la traction, ce qui contribue à une meilleure capacité de déformation plastique. De plus, le renforcement par FRP peut améliorer la ductilité en limitant la propagation des fissures et en augmentant la résistance à la flexion.

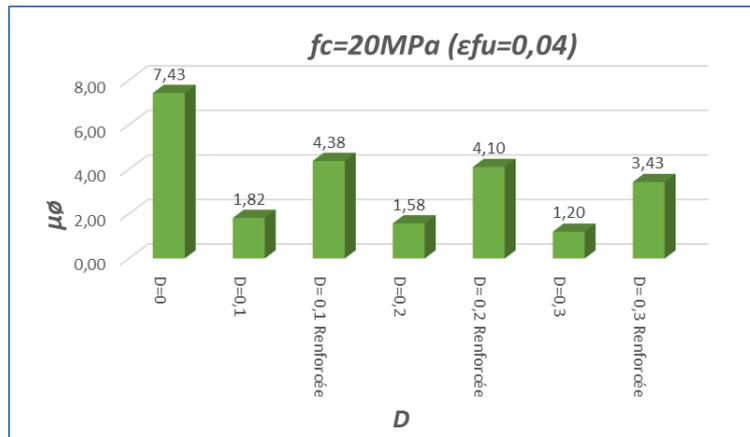


Figure V.20. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement.

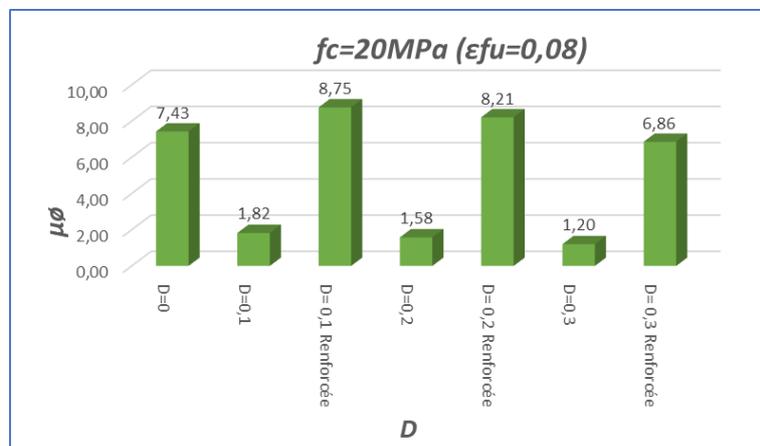


Figure V.21. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement.

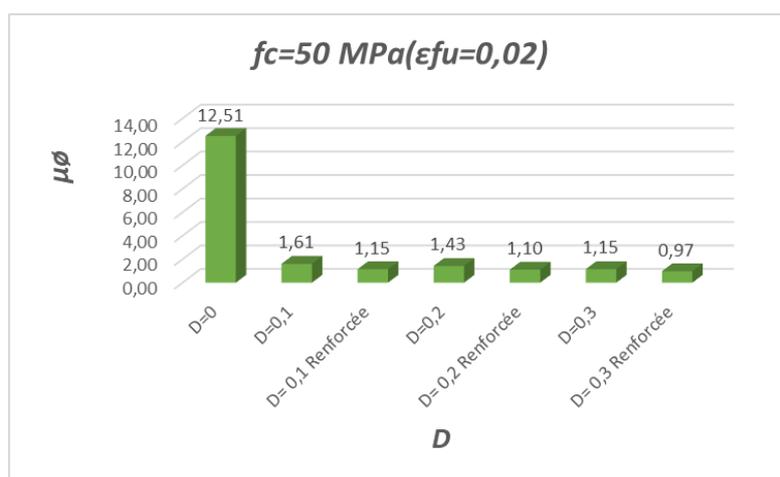


Figure V.22. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement.

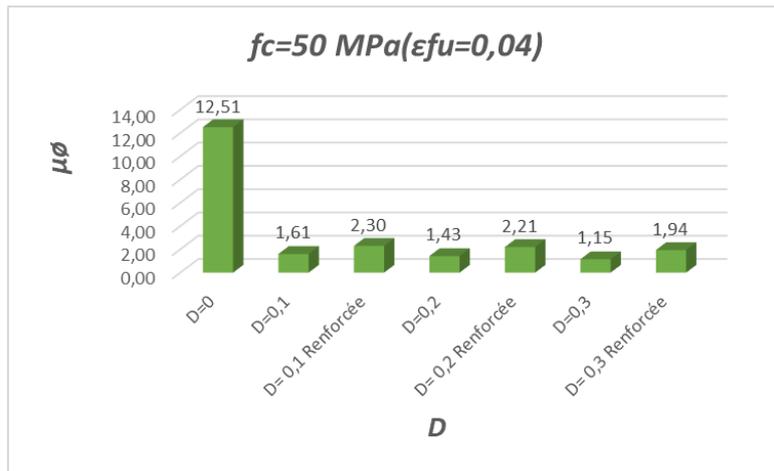


Figure V.23. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement.

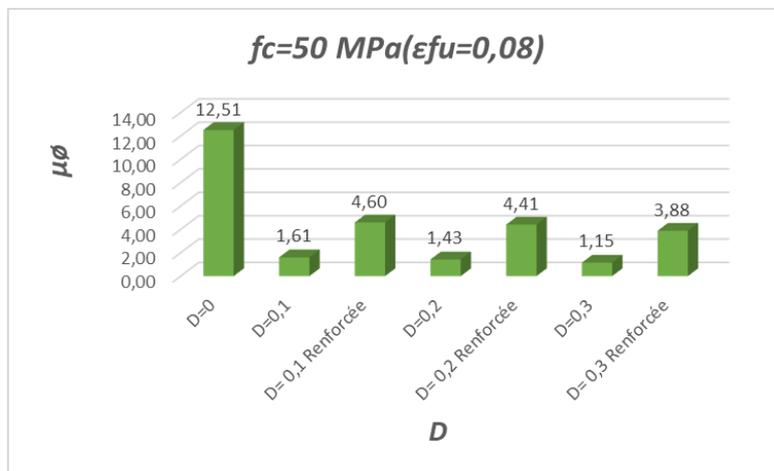


Figure V.24. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement.

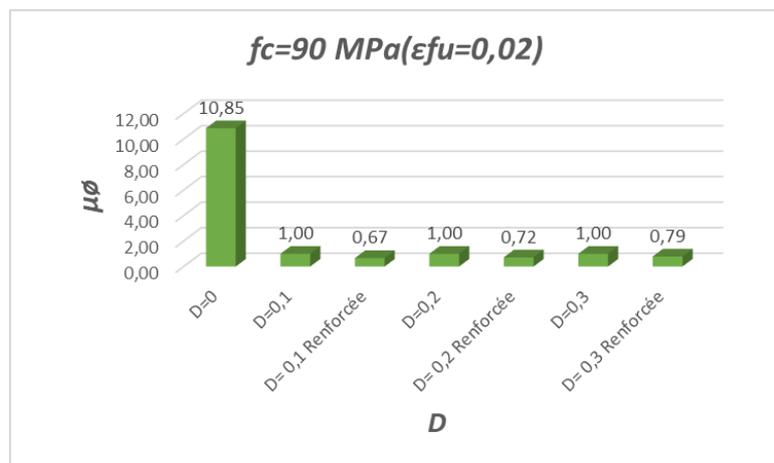


Figure V.25. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement.

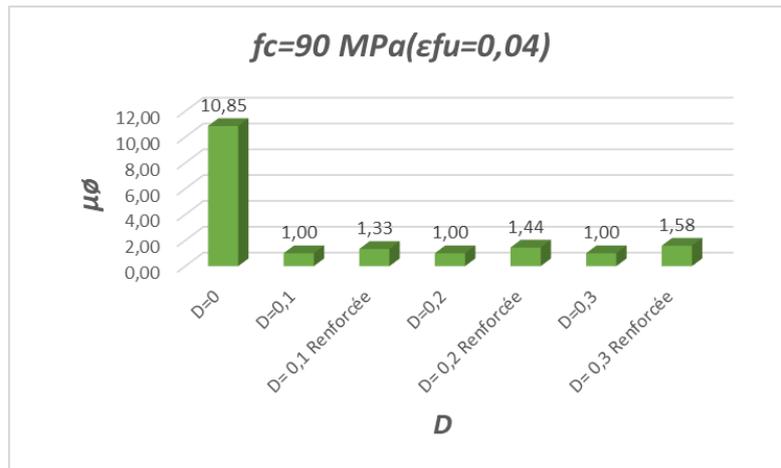


Figure V.26. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement.

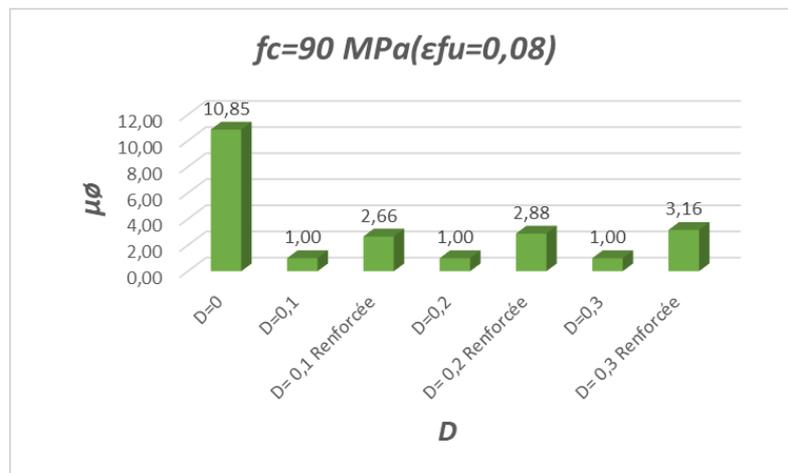


Figure V.27. Histogramme 3D représente la variation de la ductilité en fonction d'endommagement et renforcement d'endommagement.

V.5. Conclusion

Les dommages subis par un matériau peuvent altérer sa ductilité en perturbant sa capacité à se déformer plastiquement sans se rompre. Toutefois, l'ajout d'un renfort dans la partie tendue de la poutre permet de restaurer cette ductilité. Dans cette optique, l'utilisation de renforts en matériaux composites FRP présente des avantages significatifs. Ces renforts améliorent la résistance à la traction du matériau et renforcent sa capacité de déformation plastique. Ainsi, l'incorporation de renforts FRP constitue une solution prometteuse pour améliorer les performances mécaniques et la ductilité des structures.

Conclusion générale

Dans le domaine de la construction parasismique, les structures en béton armé sont spécifiquement conçues pour résister aux séismes en adoptant un comportement flexible, évitant ainsi les ruptures brusques et fragiles. La flexibilité joue un rôle crucial dans les systèmes de protection parasismique en permettant à la structure de dissiper l'énergie sismique. Une bonne flexibilité réduit les contraintes exercées sur la structure, ce qui permet de minimiser les coûts de construction tout en assurant la sécurité de la structure en cas de séisme.

La flexibilité du béton armé permet d'absorber l'énergie générée par les charges appliquées, améliorant ainsi la résistance sismique et la résistance aux chocs. Lorsqu'une structure en béton armé est soumise à des charges sismiques ou à des charges accidentelles, sa flexibilité lui permet de se déformer progressivement sans se rompre brutalement. Cette capacité à absorber l'énergie réduit le risque de défaillance catastrophique. Il est important de souligner que la flexibilité est souvent obtenue grâce à la combinaison judicieuse de matériaux de construction de qualité et de l'utilisation de renforcements appropriés.

Dans le cadre de notre étude, nous avons observé que le renforcement des poutres en béton avec des barres composites en FRP (Fiber Reinforced Polymer) offre une solution efficace pour compenser la perte de ductilité causée par l'endommagement. Les barres en FRP présentent une résistance à la traction plus élevée que l'acier, ce qui améliore la capacité de la poutre à supporter les charges et à résister aux déformations excessives.

L'utilisation des barres en FRP comme renforcement offre plusieurs avantages. Tout d'abord, elles sont légères, ce qui facilite leur manipulation et leur installation. De plus, leur haute résistance à la corrosion les rend idéales pour les environnements agressifs. Les barres en FRP sont également très durables, avec une excellente stabilité dimensionnelle, ce qui garantit leur performance à long terme.

En conclusion, le renforcement des poutres en béton avec des barres composites en FRP constitue une solution prometteuse pour compenser la perte de ductilité due à l'endommagement. Cela permet d'améliorer la capacité de la poutre à résister aux charges et aux déformations excessives, tout en préservant la résistance structurelle et en réduisant les coûts de construction.

Références bibliographiques

- [1] « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre », FICHES TECHNIQUES.
- [2] Mémoire de Magister, Présenté par Mr BOUFEDAH BADISSI AHMED, Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires, année 2011.
- [3] m.maerefa.org/ت_مسلحة_خرسانة Traduction
- [4] site (futura-sciences.com/maison/définition/batimant-5834
- [5] NF EN-12390-4
- [6] NF EN-12390-5
- [7] Université Abou BekrBelkaid Tlemcen/ chapitre1 « formulation et propriétés mécanique du béton armé
- [8] mémoire de master « L'effet des Adjuvants(Superplastifiant) sur le Comportement mécanique du béton ordinaire -Application la méthode de FAURY-»Présenté par ABID CHAREF AMAR université d'Adrar année 2015/2016
- [9] fiche PDF « caractéristique principale du béton frais »
- [10] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/beton/3-le-beton-frais/>
- [11] NF EN-12350-6 (conseils pratique) réalisation des essais courants sur béton frais et béton durci
- [12] Thèse Présentée pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT LMD THEME ...Pathologie des constructions en béton, diagnostic et méthodes de réparations. Etude de cas de l'effet combiné de pré-fissuration/corrosion sur le comportement des poutres en béton armé ...Présenté par : Ali SIAD
- [13]
- [14] présentation de CH 4 Les bétons hautes performances BHP by Omar Mt, Is attached. Site d'Academia.edu.
- [15] Mémoire de Master présenté Par : HADJERSI FOUAD et BENZEOUAD OUALID, « caractérisation rhéologique d'un béton auto-plaçant (BAP) à base de fumée de silice » université Mohamed Boudiaf - m'sila 2017/2018.

- [16] Mémoire de Master présenté Par : DJELIL FARIDA, ABIDET SIHEM, «EtudeParametrique Sur La Ductilite Locale Des Poutres En Béton Renforce Par Différents Types De Fibres » Université De Ibn Khaldoun De Tiaret 2021/2022
- [17] support du cours de béton armé /université de béchar, Mr. BARAKA ABDELHAK 2005/2006
- [18] MEMOIRE DE MASTER EN GÉNIE CIVIL Présenté par KADI ABDELGHANI, NAAMAOUI TAHAR « Méthodes de la formulation des bétons » 2019/2020
- [19] Cours Pathologie des Bétons Armés Département d'Architecture Annaba Mr. LAKHAL RIDHA
- [20] <https://www.infociments.fr/genie-civil/les-facteurs-de-degradation-du-beton>
- [21] Types, causes et remèdes des dégradations des constructions existantes2004
- [22] Mémoire de fin d'études de master causes de dégradation du béton en Algérie, université Yahia fares de Médéa 2019
- [23] Réactions alcali-granulats (1ère partie) Bulletin du ciment 68, cahier 5 (2000)
- [24] Thèse de doctorat de l'université de Toulouse « mise au point et développement d'un procédé d'aide à la déconstruction des ouvrages en béton armé » Jérôme AUGER 2009
- [25] Chapitre 2 : Principales pathologies des constructions BENSALÉM Sara Juillet 2018
- [26] <https://www.infociments.fr/betons/recommandations-pour-la-durabilite-des-betons-durcis-soumis-au-gel-et-aux-sels-de>
- [27] MEMOIRE DE MAGISTER, CHERIF DERARDJA, « Types, causes et remèdes des dégradations des constructions existantes », UNIVERSITE DE BISKRA, 2004
- [28] F. LEKDIM. 2010 « Etude de la durabilité des bétons armés confectionnés à partir des sables de concassage ». Mémoire de magister. Université Bejaia.
- [29] « AUSCULTATION DES DALLES EN BÉTON ARMÉ PAR DES TECHNIQUES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF », O. Dou1, J. Rhazi, L. Bertrand.
- [30] : MÉMOIRE DE MASTER, GHERBI Khaled « ÉVALUATION DE LA DUCTILITÉ SECTIONNELLE ET SRTUCTURALE DES ÉLÉMENTS FLÉCHIS EN BÉTON ARMÉ » 2012/2013.

- [31] : Ductilité des structures en béton armée, Sébastien Gieu, CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS PARIS.
- [32]: Damascus UNIV. Journal Vol. (18)-Number (2)2002. E. Shdeed- A. Kassoul.
- [33] : Mémoire de Master, DJELIL FARIDA ABIDET SIHEM « ETUDE PARAMETRIQUE SUR LA DUCTILITE LOCALE DES POUTRES EN BETON RENFORCE PAR DIFFERENTS TYPES DE FIBRES » 2021/2022
- [34] : Mémoire de Master, OUAR FAWZI OULD IBRAHIM AHMED SALEM « Étude paramétrique sur la ductilité des poteaux et des poutres en béton armé» 2016/2017
- [35] : Mémoire de master, BELAID HANIA «Réduction du risque sismique par l'amélioration de la ductilité des structures en portiques auto-stables »
- [36] : Mémoire de master, AKRAM BEN CHETIOUI «L'importance de la ductilité dans les constructions» M'SILA, 2013/2014
- [37] : Article N ° 58, Janvier 2018, H. BOUZID, A. KASSOUL
- [38] : (Amr, 2008), (Kassoul, 2015)
- [39] Al-Mahmoud F, Arnaud C, Raoul F, Christian T. RC Beams Strengthened with NSM CFRP Rods and Modeling of Peeling-off Failure. *Composite Structures*. 2010; 92(8): 1920-1930. 10.1016/j.compstruct.2010.01.002.
- [40] Hawileh RA, Nawaz W, Abdalla JA. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with Hardwire Steel-Fiber Sheets. *Construction and Building Materials*. 2018; 172: 562-573. 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.225.
- [41] Jawdhari A, Amir F, Issam H. Numerical study on the bond between CFRP rod panels (CRPs) and concrete. *Construction and Building Materials*, 2018; 177: 522-534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.138>.
- [42] Jawdhari A, Issam K, Ali S, Ph.D., Amir F, Eric S. Bond Characteristics of CFRP Rod Panels Adhered to Concrete under Bending Effects. *Journal of Composites for Construction*, 2019; 23(1): 04018077-1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000909).
- [43] Oudah F, El-Hacha R. A New Ductility Model of Reinforced Concrete Beams Strengthened Using Fiber Reinforced Polymer Reinforcement. *Composites Part B: Engineering*. 2012; 43(8): 3338-3347. 10.1016/j.compositesb.2012.01.071.

- [44] Al-Obaidi S, Yasir MS, Franz NR. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams with NSM-CFRP Bars Using Mechanical Interlocking. *Journal of Building Engineering*. 2020; 31: 101422. [10.1016/j.jobe.2020.101422](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101422).
- [45] Toutanji H, Zhao L, Zhang Y. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets Bonded with an Inorganic Matrix. *Engineering Structures*. 2006; 28(4): 557-566. [10.1016/j.engstruct.2005.09.011](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.011).
- [46] Hashemi SH, Ali Akbar M, Reza R. Flexural Ductility of Reinforced HSC Beams Strengthened with CFRP Sheets. *Structural Engineering and Mechanics*. 2008; 30(4): 403-426. [10.12989/sem.2008.30.4.403](https://doi.org/10.12989/sem.2008.30.4.403).
- [47] Nayak AN, Kumari A, Swain RB. Strengthening of RC Beams Using Externally Bonded Fiber Reinforced Polymer Composites. *Structures*. 2018; 14: 137-152. [10.1016/j.istruc.2018.03.004](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.03.004).
- [48] Elbana A, Junaid MT. Determination of Flexural Capacity for GFRP-Reinforced Concrete Beams Retrofitted Using External CFRP Sheet. *Structures*. 2020; 27: 1384-1395. [10.1016/j.istruc.2020.07.003](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.003).
- [49] Helal K, Yehia S, Hawileh R, Abdalla J. Performance of Preloaded CFRP-Strengthened Fiber Reinforced Concrete Beams. *Composite Structures*. 2020; 244: 112262. [10.1016/j.compstruct.2020.112262](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112262).
- [50] Aidoo J, Kent AH, Michael FP. Full-Scale Experimental Investigation of Repair of Reinforced Concrete Interstate Bridge Using CFRP Materials. *Journal of Bridge Engineering*. 2006; 11(3): 350-358. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2006\)11:3\(350\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:3(350)).
- [51] Haytham Bouzid, Benferhat Rabia, Tahar HassaineDaouadji. “Ultimate behavior of RC beams strengthened in flexure using FRP material”. *Engineering Structures*, Volume 289, 116300, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116300>