



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

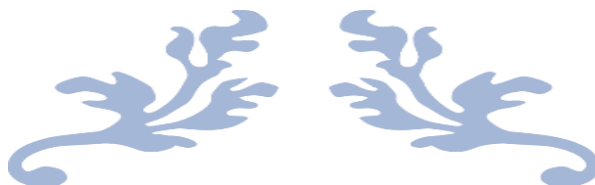
OPTION : STRUCTURES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

GHADBANE AMAL

BELAID WIAM



*Effet de la ductilité sur les constructions
en zone sismique*



Encadré par : Mr BOULAOUAD Abderrachid

Année Universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENT:

Tout d'abord, Nous remercions Dieu Clément et Miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à Mr. BOULAOUAD Abderrachid, Docteur à l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, pour sa patience et sa coopération le long de cette période et les conseils pertinents apportés durant la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour son intérêt et sa grande disponibilité.

Nos remerciements s'adressent aux membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Nous remercions aussi nos parents, nos grandes familles, ainsi nos amis pour leurs soutien et leurs encouragements.

Toute notre gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Merci à tous

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I:

Figure (I -1) Diagramme contrainte-déformation de béton.....	10
Figure (I-2) Diagramme contrainte-déformation de l'acier	10
Figure (I-3) : Poutre travaillant en flexion simple.....	12
Figure (I-4) : Courbure de la section	12

CHAPITRE II :

Figure II-1 : Confinement du béton	21
--	----

CHAPITRE III :

Figure III-1 : Schéma illustratif	24
Figure III-2 : Diagramme de déformation du béton	25
Figure III-3 : Diagramme de déformation de l'acier (Type 1,3et 4)	26
Figure III-4 : Section à l'état limite élastique.....	27
Figure III-5 : Section à l'état ultime.....	27
Figure III-6 : Effort tranchant à la base	30
Figure III-7 : Variation en fonction du pourcentage d'armature tendue.....	39

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :

Tableau I.1: Valeurs du facteur de comportement R selon le RPA 99 version 2003.....14

CHAPITRE III :

Tableau III-1 : Variation de l'effort tranchant V en fonction de ξ
.....29

Tableau III-2 : Variation de l'effort tranchant V en fonction de μ 30

Tableau III-3 : Facteur de ductilité en section μ (en fonction de Ψ)39

Tableau III-4: Moment résistant (en fonction de Ψ)39

Résumé

Les constructions en zone sismique subissent inévitablement des déformations plastiques dues aux mouvements intenses induits par les fortes secousses.

Dans ce cas, la capacité de résistance d'une structure repose essentiellement sur son aptitude à se déformer au-delà de la limite élastique appelée "ductilité".

Ce concept si important fait l'objet de recherches intenses et poussées afin de le définir avec précision, de trouver les liens éventuels avec d'autres paramètres et surtout de connaître les facteurs qui tendent à l'augmenter.

Notre étude entre dans ce cadre.

Mots clés : Ductilité, béton armé, confinement, pourcentage d'armatures tendues

SOMMAIRE:

<i>Introduction Générale</i>	7
CHAPITRE I :DEFINITION ET ROLE DE LA DUCTILITE	8
I –1. Définition de la Ductilité :	9
I .2 Le rôle de Ductilité :	9
I. 3. TYPES DE DUCTILITE :	10
3. 1 Ductilité des matériaux :	10
3. 2 Ductilité en section :	11
3. 3 Ductilité des éléments :	12
3. 4 Ductilité globale de la structure :	13
I. 4. Ductilité et facteur de comportement R :	13
4. 1 Facteur de comportement R :	13
4. 2 Facteur de comportement R Selon le RPA version 2003 :	14
4. 3. Facteur de ductilité R_{μ} :	15
4. 4 Facteur de sur-résistance R_s :	15
4. 5 Facteur d’amortissement R_{ξ} :	16
Chapitre II :Facteurs qui augmentent la ductilité	17
Introduction :	18
II. 1 Qualité des matériaux:	18
II.2 Qualité de l’exécution :	19
II.3 Disposition constructives :	20
3.1 confinement du béton :	20
3.2 Types de confinement du béton	21
3.3 Confinement passif	21
3.4 Confinement actif	21
3.5 Lois de comportement du béton confiné :	21
II.4 pourcentages d’armatures :	22
Chapitre III :Applications numériques	

III-1 / Rappels	24
1-1 / Ductilité en section	24
1-2 / Béton Armé aux états-limites :	25
2-1 Béton :	25
2-2 Acier :	26
2-3 Béton armé (Acier-Béton) :	27
III-2 / Applications	28
2.1 Comparaison entre l'effet de la ductilité et celui du facteur d'amortissement sur la valeur de l'effort tranchant à la base :	28
2.2 Effet du confinement du béton sur la ductilité d'après l'Eurocode 2 :	30
2-3 Effet du pourcentage d'armatures tendues sur la ductilité en section : Calcul de μ_1:	33
Conclusion	40
Références :	41

Introduction Générale

L'étude des constructions en zone sismique se concentre sur la ductilité, qui est la capacité d'un matériau, d'une section, d'un élément ou d'une structure à subir des déformations irréversibles sans perte significative de résistance sous des sollicitations alternées. La ductilité est essentielle pour résister aux déformations plastiques induites par les secousses sismiques intenses.

Les recherches ont pour objectif de définir précisément la ductilité et en évidence l'effet favorable de la ductilité sur les constructions en béton armé dans les zones sismiques. Une structure et ses éléments doivent avoir une ductilité suffisante pour absorber une grande partie de l'énergie sismique et maintenir leur résistance calculée sous des déformations imposées.

Les déformations plastiques jouent un rôle important dans l'absorption de l'énergie sismique, et une philosophie de calcul sismique des structures ductiles a été établie. Selon cette philosophie, une structure doit résister aux séismes de moyenne intensité en subissant des dommages superficiels dans la zone élastique, et être capable de survivre aux séismes de forte intensité sans subir de dommages catastrophiques grâce à sa résistance plastique.

Il existe trois manières de quantifier la ductilité dans une structure : la ductilité de déformation, qui mesure la capacité de déformation locale des matériaux ; la ductilité de courbure, qui mesure la capacité de rotation dans une section ; et la ductilité de déplacement, qui se réfère au comportement global de l'élément ou de la structure.

CHAPITRE I :

DEFINITION ET ROLE DE LA DUCTILITE

I -1. Définition de la Ductilité :

Avant 1960 la notion de ductilité a été utilisée seulement pour la caractérisation du comportement du matériau, après les études de Baker dans la conception plastique et les travaux de recherches dans les problèmes sismiques de Housner, ce concept s'est étendu au niveau de la structure et est associé avec les notions de résistance et de rigidité de la structure globale. [1]

La ductilité est la capacité des matériaux à se déformer plastiquement lors d'efforts élevés sans diminution significative de la résistance pendant plusieurs cycles de chargement. [2]

La ductilité est une caractéristique primordiale des structures devant résister au séisme par la formation d'un mécanisme plastique global. Mais qu'est-ce que la ductilité ? Le terme "ductilité" définit la capacité d'un matériau, d'une section, d'un élément ou d'une structure de subir avant rupture des déformations irréversibles sans perte significative de résistance sous sollicitations alternées. [3]

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.

I.2 Le rôle de Ductilité :

Le rôle de la ductilité dans les installations d'ingénierie est considéré comme l'un des aspects importants pour assurer la stabilité et la sécurité de l'installation. La ductilité d'une installation est la capacité à résister aux divers changements et vibrations auxquels elle est exposée, à l'impact des surcharges, des charges statiques, des tremblements de terre et d'autres forces externes [3].

La ductilité est également importante pour résister aux chocs et aux vibrations. Les matériaux flexibles peuvent absorber l'énergie des chocs et des vibrations par déformation, ce qui leur permet de mieux résister aux dommages.

La structure et ses éléments doivent avoir une ductilité suffisante pour pouvoir dissiper une grande part de l'énergie induite par le mouvement sismique et conserver leur résistance de calcul sous déformations imposées. [2]

La ductilité joue un rôle important dans la résistance aux tremblements de terre. Il faut souligner toutefois que les forces et les déformations obtenues pour l'élément à partir des méthodes d'analyse statiques pour les charges de conception recommandées sont inférieures aux forces et aux déformations qui seraient observées sur la structure sous les

effets d'un séisme majeur pour lequel les charges ont été spécifiées. Ce dépassement des forces est équilibré par le comportement ductile qui est fourni par les détails de construction de l'élément.

C'est pourquoi l'utilisation de cette méthode (i.e. la méthode statique équivalente) ne peut être dissociée de l'application rigoureuse des Dispositions constructives garantissant à la structure :

- Une ductilité suffisante
- La capacité de dissiper l'énergie vibratoire transmise à la structure par des secousses sismiques majeures. [2]

I. 3. TYPES DE DUCTILITE :

3. 1 Ductilité des matériaux :

La ductilité d'un matériau se réfère à sa capacité à se déformer de manière plastique avant de se rompre. En d'autres termes, c'est la capacité d'un matériau à se déformer sous l'application d'une contrainte sans se rompre.

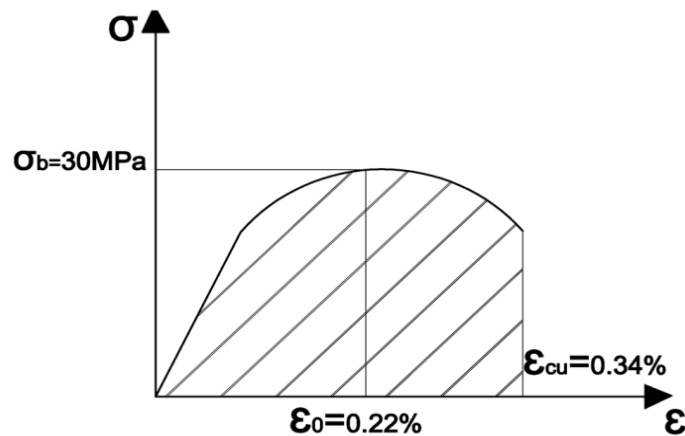


Figure (I -1) Diagramme contrainte-déformation de béton

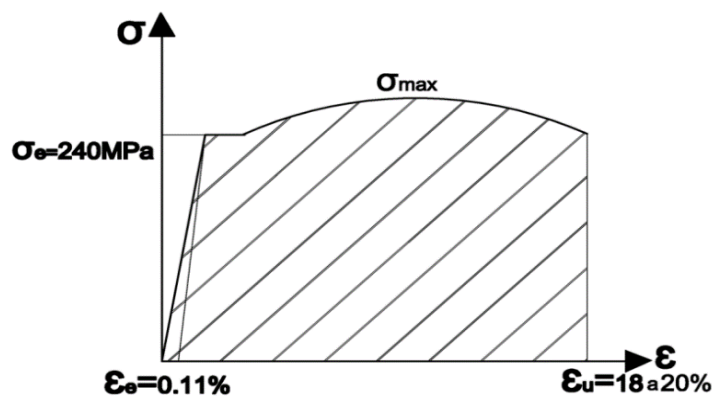


Figure (I-2) Diagramme contrainte-déformation de l'acier

Lorsque l'on compare les diagrammes "contrainte-déformation" de l'acier de construction E 24 et du béton, on peut observer que la courbe pour l'acier présente une augmentation de la déformation plastique après avoir dépassé la contrainte élastique limite. Cela signifie que l'acier peut subir une déformation importante sans se rompre.

En revanche, la courbe pour le béton montre une déformation très limitée et une rupture immédiate après avoir atteint sa résistance en compression. Cela indique que le béton est beaucoup moins ductile que l'acier.

En conclusion, la ductilité importante de l'acier par rapport au béton fait de l'acier un matériau très adapté aux structures nécessitant une grande résistance et une capacité à se déformer sans rompre. [4]

3. 2 Ductilité en section :

La ductilité en section peut être définie comme la capacité de la section à se déformer plastiquement sans rupture lorsque le moment fléchissant appliqué dépasse la limite élastique du matériau. Cela signifie que la section est capable de subir une déformation permanente sans se rompre.

Considérons une poutre travaillant en flexion simple (figure I-3). En supposant que la déformation varie linéairement, en élasticité et en élasto-plasticité, sur la hauteur de la section (hypothèse de Bernoulli), on sait que la courbure de la section, lorsqu'elle est soumise à un moment fléchissant, est donnée par :

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon}{d-x} = \frac{\varepsilon'}{x} \dots\dots\dots(I-1)$$

Φ courbure de la section.

ρ Rayon de la courbure.

ε déformation de la fibre inférieure de la section.

ε' déformation de la fibre supérieure de la section.

d hauteur de la section.

x distance entre l'axe neutre et la fibre supérieure de la section.

On désigne comme facteur de ductilité de la section le rapport :

$$\mu = \frac{\Phi u}{\Phi_{el}} \dots\dots\dots(I-2)$$

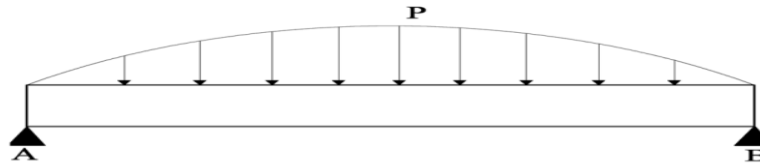


Figure (I-3) : Poutre travaillant en flexion simple

Φ_u Φ_{el} représentent la courbure de la section respectivement à l'état ultime de résistance et celle à l'état élastique limite. [4]

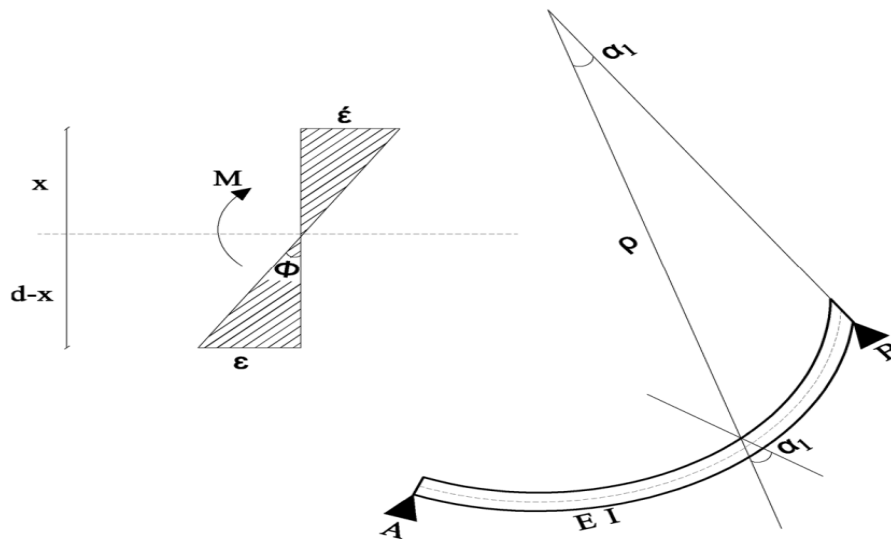


Figure (I-4) : Courbure de la section

$$\mu = \frac{\varphi_u}{\varphi_{el}} \quad \text{avec} \quad \phi = \frac{l}{\rho} = \frac{\varepsilon}{d-x} = \frac{\varepsilon'}{x}$$

3. 3 Ductilité des éléments :

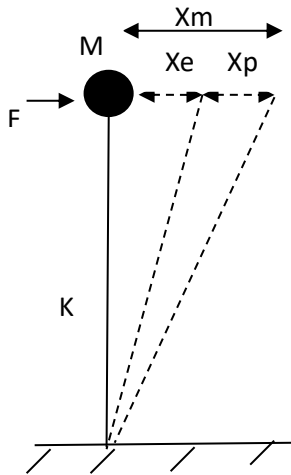
Une bonne ductilité intermédiaire est essentielle pour assurer la capacité de l'élément à se déformer suffisamment avant de se rompre, ce qui permet de dissiper l'énergie sismique et de limiter les dommages structurels. Des éléments plus ductiles auront une capacité de déformation plus importante, ce qui contribue à améliorer la résistance sismique de la structure dans son ensemble.

Il est important de prendre en compte la ductilité des éléments lors de la conception et de la construction d'une structure, en choisissant des matériaux et des sections adaptés pour garantir un comportement ductile en cas de chargement sismique. Il est également essentiel de vérifier la capacité de l'élément à se déformer de manière ductile en effectuant des analyses de résistance sismique et en respectant les normes et les réglementations en vigueur.

3. 4 Ductilité globale de la structure :

La ductilité d'ensemble est généralement définie par un facteur noté μ qui représente le rapport entre le déplacement max (X_m) et le déplacement élastique limite (X_e) tel que :

$$\mu = \frac{x_m}{x_e}.$$



I. 4. Ductilité et facteur de comportement R :

4. 1 Facteur de comportement R :

Le facteur de comportement R est un paramètre crucial dans le domaine de l'ingénierie structurale, notamment en ce qui concerne la conception parasismique des structures. Ce facteur est introduit dans les réglementations parasismiques pour prendre en compte le comportement non linéaire des structures sous l'effet des séismes.

Les procédures conventionnelles spécifiées dans les codes parasismiques universellement établis utilisent l'analyse élastique pour évaluer les charges sismiques induites sur les bâtiments. Pour tenir compte du comportement inélastique, ces charges sismiques sont modifiées en introduisant le facteur de comportement structurel ou facteur de réduction de la force de calcul (R), défini comme suit :

$$R = \frac{V_e}{V_i}$$

Où : V_e et V_i sont, respectivement, l'effort tranchant élastique et inélastique à la base.

Dans la moitié des années 80, un programme de recherche expérimentale conduit par l'université de Berkeley a permis de formuler le facteur de comportement R comme le

produit de 3 facteurs tenant respectivement compte de la ductilité, de la réserve de résistance et de l'amortissement visqueux :

$$R = R_{\mu} \cdot R_s \cdot R_{\xi}$$

Les valeurs de ce facteur sont données par les codes sismiques en fonction du matériau de construction (béton, acier...) et du type de structure utilisé (portiques, voiles.). [5]

4. 2 Facteur de comportement R Selon le RPA version 2003 :

Les valeurs de R sont données par le tableau (I-1)

Tableau I.1. : Valeurs du facteur de comportement R. selon le RPA 99 version 2003. [2]

Cat	Description du système de contreventement	Valeur de R
<u>A</u>	<u>Béton armé</u>	
1a	Portiques auto stables sans remplissages en maçonnerie rigide	5
1b	Portiques auto stables avec remplissages en maçonnerie rigide	3,5
2	Voiles porteurs	3,5
3	Noyau	3,5
4a	Mixte portiques/voiles avec interaction	5
4b	Portiques contreventés par des voiles	4
5	Console verticale à masses réparties	2
6	Pendule inverse	2
<u>B</u>	<u>Acier</u>	6
7	Portiques auto stables ductile	4
8	Portiques auto stables ordinaires	4
9a	Ossature contreventée par palées triangulées en X	3
9b	Ossature contreventée par palées triangulées en V	5
10a	Mixte portiques/palées triangulées en X	4
10b	Mixte portiques/palées triangulées en V	2

11	Portiques en console verticale	
C	<u>Maçonnerie</u>	
12	Maçonnerie porteuse chaînée	2,5
D	Autres systèmes	
13	Ossature métallique contreventée par diaphragme	2
14	Ossature métallique contreventée par noyau en béton armé	3
15	Ossature métallique contreventée par voiles en béton armé	3,5
16	Ossature métallique avec contreventement mixte comportant un noyau en béton armé et palées ou portiques métalliques en	4
17	façades Systèmes comportant des transparences (étages souples)	2

4. 3. Facteur de ductilité R_{μ} :

Le facteur R_{μ} est une mesure de la réponse non linéaire globale d'un système de contreventement. Il est évalué pour un spectre inélastique à ductilité constante et il tient compte de la différence entre un chargement statique et un chargement dynamique réversible induit par l'action sismique.[5]

C'est ainsi que Newmark et Hall [6] ont relié R_{μ} au niveau de demande de ductilité de déplacement, fonction de la période par les expressions suivantes :

$$R_{\mu} = 1 \quad \text{Pour } T < 0.03 \text{ S} \quad (\text{Egalité des accélérations}).$$

$$R_{\mu} = \sqrt{2\mu - 1} \quad 0.1 \text{ s} < T < 0.5 \text{ S} \quad (\text{Egalité des énergies}).$$

$$R_{\mu} = \mu \quad T > 0.5 \text{ S} \quad (\text{Egalité des déplacements}).$$

4. 4 Facteur de sur-résistance R_s :

La capacité de résistance latérale V_u d'une structure dépasse généralement sa demande de résistance V calcul car ses éléments constitutifs sont dimensionnés de telle façon qu'ils aient des capacités substantiellement plus grandes que les efforts résultants. Ceci est attribuable au fait que la résistance des matériaux utilisés est généralement plus grande

que la résistance nominale spécifiée, de plus le contrôle des déplacements résulte généralement en un surdimensionnement du coffrage et les exigences au niveau du détail conduisent le plus souvent à adopter des éléments plus résistants que ceux demandés.

Le code NEHRP-94 préconise $R_s = 1.67$ alors que le code NZS92 le fixe à 1.5. Des études ont été faites dans ce domaine donnant lieu à des valeurs de R_s variant entre 1.5 et 2.7. [5]

4. 5 Facteur d'amortissement R_ξ :

Le facteur d'amortissement R_ξ est un paramètre qui mesure l'amortissement d'un système dynamique. Il est défini comme le rapport entre le coefficient d'amortissement ξ et la racine carrée du coefficient de raideur k du système.

Le facteur d'amortissement R_ξ peut être utilisé pour déterminer la réponse d'un système à une perturbation, ou pour évaluer la stabilité d'un système dynamique. Le facteur d'amortissement est souvent utilisé pour quantifier la rapidité et la stabilité de la réponse d'un système dynamique à une perturbation. Un facteur d'amortissement élevé correspond à une réponse rapide et stable, tandis qu'un faible facteur d'amortissement peut entraîner des oscillations indésirables.

Chapitre II :

Facteurs qui augmentent la ductilité

Introduction :

Pour augmenter la ductilité des matériaux dans les constructions, il est important de prendre en compte plusieurs facteurs, tels que la qualité des matériaux (Acier, Béton) et la qualité de l'exécution. Dans cette partie de la recherche, nous fournirons quelques conseils pour améliorer la ductilité.

II. 1 Qualité des matériaux:

1-1 Béton :

Le béton est un matériau constitué d'un mélange de ciment et de granulats (sable et gravier) et d'eau de gâchage et parfois les adjuvants.

Les différents types de béton présentent des caractéristiques mécaniques et physiques distinctes qui influent sur leur ductilité. Voici un aperçu des caractéristiques de certains types de béton et leur impact sur la ductilité :

- Béton haute performance : Ce type de béton est plus résistant à la compression, plus fluide et moins poreux que les bétons conventionnels, offrant ainsi une meilleure protection des armatures. Sa résistance accrue peut améliorer la ductilité de la structure en cas de contraintes importantes.
- Béton projeté : Utilisé en étant projeté sur une surface solide, ce béton limite l'affaissement et le coulage ultérieur. Sa composition spécifique peut contribuer à une meilleure ductilité en renforçant la structure contre les contraintes.
- Béton armé : Ce matériau composite alliant béton et acier renforce la structure. L'acier, avec sa bonne résistance à la traction, compense les faiblesses du béton en termes de ductilité, permettant ainsi une meilleure capacité à absorber les déformations sans se rompre.

Ces caractéristiques mécaniques et physiques spécifiques des différents types de béton peuvent jouer un rôle crucial dans la ductilité des structures construites avec ces matériaux, en assurant une certaine flexibilité et capacité d'adaptation face aux contraintes extérieures.

1-2 Acier :

L'acier est un alliage métallique principalement composé de fer, avec une teneur en carbone inférieure à 1,8 %. Les différents types d'acier présentent des caractéristiques mécaniques et physiques distinctes qui influent sur leur ductilité. Voici un aperçu des types d'acier, de leurs caractéristiques et de leur effet sur la ductilité :

- Acier doux : Contient une faible teneur en carbone, offrant une bonne ductilité et soudabilité. Il est utilisé dans diverses applications nécessitant une certaine flexibilité.
- Acier mi-dur : Avec une teneur en carbone légèrement plus élevée, il offre une combinaison de résistance et de ductilité, adaptée à des applications nécessitant une certaine robustesse tout en conservant une certaine malléabilité.
- Acier allié : Incorporant divers éléments d'alliage comme le nickel, le chrome ou le tungstène, il peut améliorer la résistance, la dureté et la ductilité de l'acier en fonction des besoins spécifiques de l'application.

La ductilité de l'acier est influencée par sa composition chimique, son traitement thermique et mécanique. Des aciers plus résistants peuvent parfois présenter une ductilité réduite, tandis que des aciers plus malléables peuvent offrir une meilleure capacité à se déformer sans se rompre. Le choix de l'acier dépendra donc des exigences spécifiques de chaque application en termes de résistance, flexibilité et durabilité.

En résumé, pour améliorer la ductilité des matériaux dans les constructions, il est important de choisir des matériaux de haute qualité, de contrôler la microstructure, et de gérer la température et de concevoir des structures robustes et résistantes.

1.2 Qualité de l'exécution :

La qualité de la mise en œuvre joue un rôle essentiel dans la réussite du processus de construction. Les responsables du projet doivent prendre en compte les conditions de mise en œuvre, qui constituent un ensemble de procédures nécessaires :

2-1 Béton :

Lors du coulage du béton en cours de mise en œuvre, voici quelques conseils importants pour y faire face :

- 1_ Contrôle du temps de coulage : Le temps de coulage doit être ajusté avec précision en fonction des conditions ambiantes et des exigences de la structure à construire.
- 2_ Contrôle de la proportion d'eau : La proportion d'eau dans le mélange doit être surveillée pour garantir l'obtention d'un béton de consistance appropriée et de haute qualité.

3_ Faire attention au processus de réduction : Vous devez vous assurer que le processus de réduction est bien effectué pour garantir qu'il n'y a pas de vides d'air à l'intérieur du béton.

4_ Maintien de l'humidité de la surface : Il est recommandé de pulvériser régulièrement de l'eau sur la surface du béton pour éviter qu'elle ne sèche brusquement.

5_ Contrôle de la température ambiante : des précautions doivent être prises dans des situations de températures élevées ou basses pour garantir la qualité du béton. [7]

2-2 Acier :

Lorsqu'il s'agit de barres d'armature pendant la mise en œuvre, il y a quelques conseils importants à suivre :

1_ Vérification de la qualité : assurez-vous de la qualité des barres d'armature utilisées et évitez les fraudes en matière de type, de taille et de quantité.

2_ Stockage approprié : Les barres d'armature doivent être stockées dans un endroit sec et ombragé pour les protéger de la corrosion.

3_ Souci du détail : Suivez les instructions techniques pour installer correctement les barres d'armature selon les besoins structurels selon les dessins techniques.

4_ Inspection continue : Inspectez régulièrement les barres d'armature pour vous assurer qu'il n'y a pas de défauts ou de déformations. [7]

Ces conseils aident à garantir la sécurité et la qualité de l'utilisation du béton et des barres d'armature pendant le processus de construction, en garantissant la durabilité et la stabilité des structures construites et en augmentant leur valeur de ductilité pour résister aux tremblements de terre.

II.3 Disposition constructives :

3.1 confinement du béton :

Le concept de « confinement du béton » fait référence à la pratique consistant à améliorer la résistance à la compression du béton en le renforçant avec des armatures transversales. Cette technique consiste à améliorer la résistance à la compression des éléments en béton en ajoutant un soutènement supplémentaire via des renforts transversaux.

Dans la pratique, le béton peut être confiné par les armatures transversales, ceci par l'utilisation des cadres, épingles et étriers...

Le béton devient confiné lorsque la résistance du noyau est supérieure à celle du béton hors noyau (non-confiné).

La figure (II-1) montre la différence entre une section confinée et l'autre non confinée, où l'armature transversale forme une zone sous un confinement.[8]

De plus, des études ont montré que le comportement du béton sous fort confinement diffère de celui sous faible confinement, avec des réponses distinctes observées en compression et en extension sous différents niveaux de confinement.[9]

Le confinement du béton à haute performance dans des tubes d'acier est une méthode la ductilité du béton remarquable qui offre des avantages techniques et économiques, permettant d'augmenter la résistance. [10]

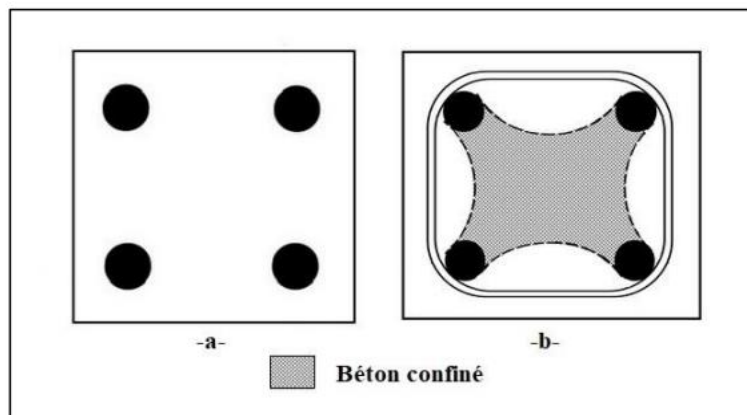


Figure II-1 : Confinement du béton

3.2 Types de confinement du béton

On distingue deux types différents de confinement passif et actif.

3.3 Confinement passif

Le confinement est passif quand la pression latérale agit par réaction à l'expansion latérale du béton comprimé qui est due à l'effet de Poisson. Ce type de confinement provient généralement d'armatures transversales, mais peut aussi résulter de l'effet de pièces limitrophes (Paultre (2011)). [8]

3.4 Confinement actif

Le confinement actif du béton est obtenu par l'application d'une pression hydraulique latérale sur la surface d'une éprouvette de béton conduisant à une augmentation de la résistance unidirectionnelle (Paultre (2011)).[8]

3.5 Lois de comportement du béton confiné :

Il existe plusieurs règles de calcul du béton confiné parmi elles :

- 1) Lois de comportement de Kent et Park 1971
- 2) Lois de comportement Kent et Park
- 3) Lois de comportement de Sheikh et Uzumeri 1982
- 4) Lois de comportement de Mander, Priestely et Park 1988
- 5) Lois de comportement de Cusson et Paultre 1995
- 6) Lois de comportement de Attard et Setunge 1996
- 7) Lois de comportement de Samani et Attard 2012
- 8) Lois de comportement de l'Eurocode 2
- 9) Lois de comportement de Piscesa et al. 2017

Dans notre recherche, nous utiliserons la loi de comportement de l'Eurocode 2.

II.4 pourcentages d'armatures :

Le territoire national est divisé en quatre (04) zones de sismicité croissante, définies sur la carte des zones de sismicité associé qui précise cette répartition par wilaya et par commune selon le règlement parasismique algérien RPA 99 VERSION 2003 [2] :

Zone O : sismicité négligeable.

Zone I : sismicité faible.

Zone II : sismicité moyenne.

Zone III : sismicité élevée.

A partir de la carte des zones sismiques déterminés le pourcentage d'armature de chaque zone.

Les armatures longitudinales doivent être à haute adhérence, droites et sans crochets [2]

Leur pourcentage **minimal** sera de :

- 0,7% en zone I.
- 0,8% en zone II.
- 0,9% en zone III.

Leur pourcentage **maximal** sera de

- 4% en zone courante.
- 6% en zone de recouvrement.[2]

Chapitre III :
Applications numériques

III-1 / Rappels

1-1 / Ductilité en section

Courbure d'une section soumise à un moment fléchissant M :

$$\phi = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon}{d-x} = \frac{\varepsilon'}{x}$$

Avec :

ρ : Rayon de courbure de la courbure.

ε : Déformation de la fibre inférieure de la section.

ε' : Déformation de la fibre supérieure de la section.

d : Hauteur (utile) de la section.

x : Distance entre l'axe neutre et la fibre supérieure de la section.

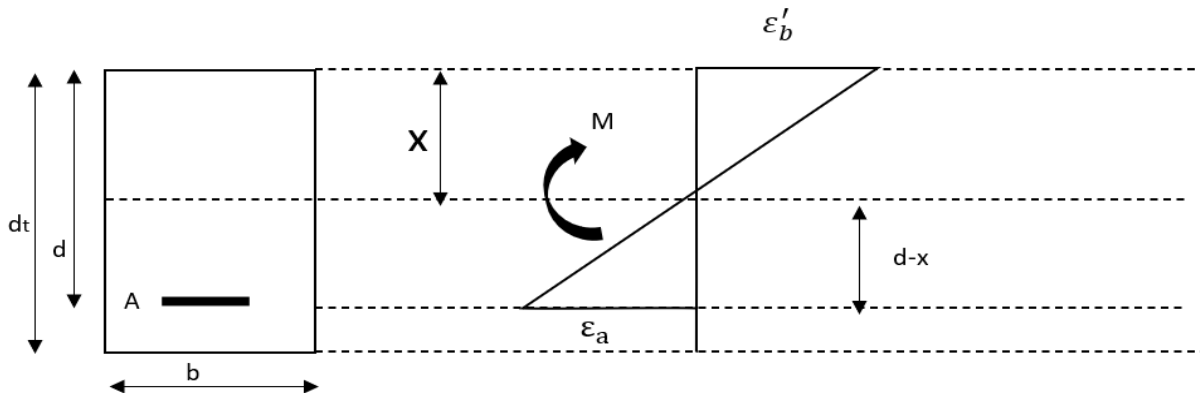


Figure III-1: Schéma illustratif

M : Moment fléchissant.

ε_a : Déformation acier tendu.

ε'_b : Déformation béton comprimé.

d : hauteur utile.

ψ : pourcentage d'acier tendu.

$$\psi = \frac{A}{b \cdot d_t}$$

1-2 / Béton Armé aux états-limites :

2-1 Béton :

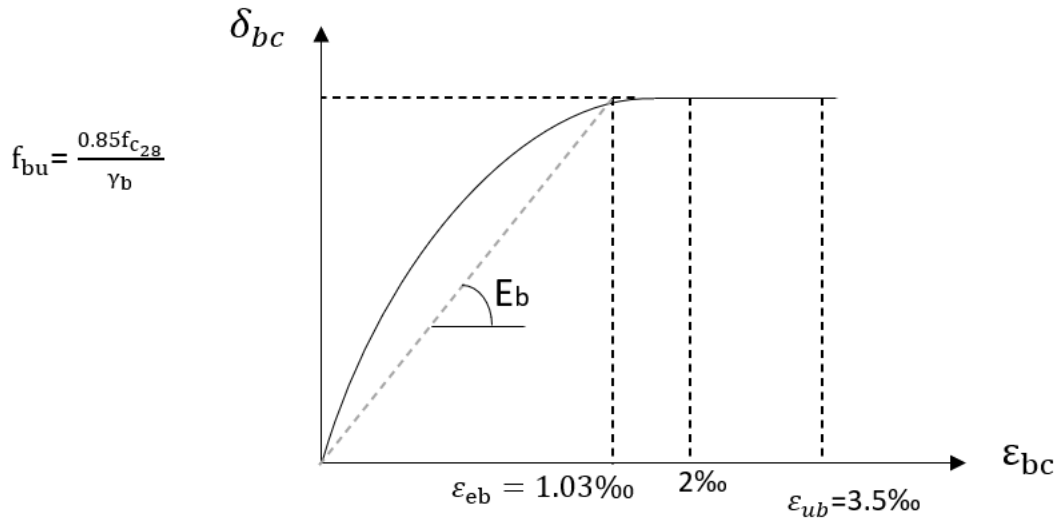


Figure III-2 : Diagramme de déformation du béton

On a :

$f_{c28} = 20$ Mpa courant 325 classe 55.

E_b :

$$E_{bi} = 12000(f_{c28})^{1/3} .$$

$$E_{bv} = \frac{E_{bi}}{3} = 1.1.10^4 MPa .$$

$\gamma_s = 1.5$ Cas courant.

2-2 Acier :

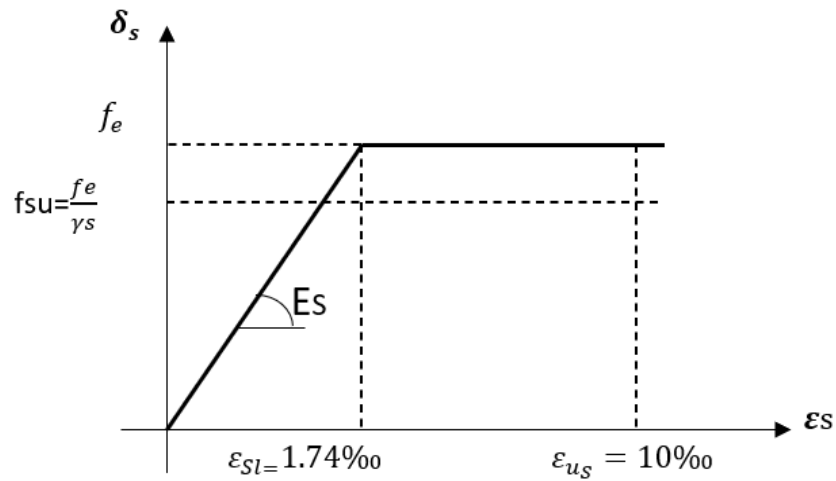


Figure III-3 : Diagramme de déformation de l'acier (Type 1,3et 4)

On a:

$$E_s = 200000MP_a = 2.10^5MP_a .$$

$$f_e = 400MP_a \text{ (Type 1, feE40) emploi courant.}$$

$$f_{su} = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1.15} = 348MP_a .$$

$$\varepsilon_{Sl} = \frac{f_{su}}{E_s} = \frac{34.8}{2.10^5} = 1.74 \text{ ‰.}$$

$$\varepsilon_{u_s} = 10 \text{ ‰.}$$

$$\gamma_s = 1.15 \text{ en général.}$$

2-3 Béton armé (Acier-Béton) :

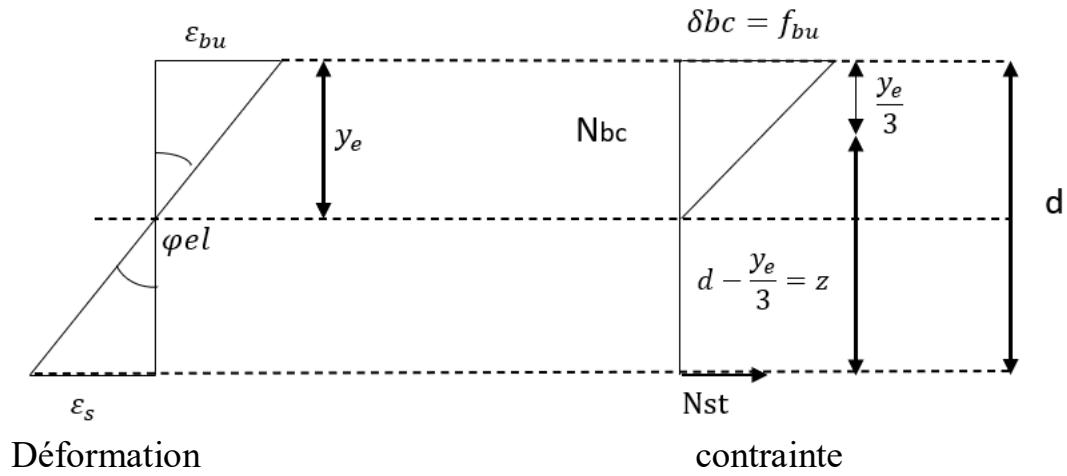


Figure III-4 : Section à l'état limite élastique

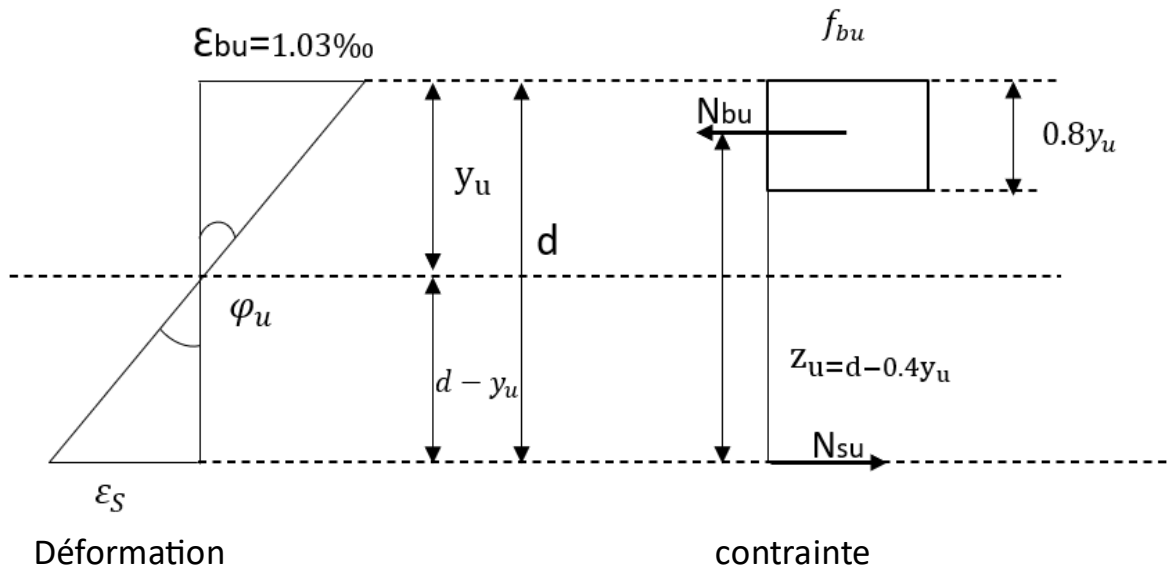


Figure III-5 : Section à l'état ultime

III-2 / Applications

2.1 Comparaison entre l'effet de la ductilité et celui du facteur d'amortissement sur la valeur de l'effort tranchant à la base :

Le calcul de l'effort tranchant pour différentes valeurs de l'amortissement (à ductilité constante) et pour différentes valeurs de ductilité (à amortissement constant) nous donne les résultats suivants :

$$R = R\mu \cdot R_S \cdot R_R$$

$$R\mu = \begin{cases} 1 & \text{Pour } T < 0.03 \text{ S} \\ \sqrt{2\mu - 1} & 0.1 \text{ s} < T < 0.5 \text{ S} \\ \mu & T > 0.5 \text{ S} \end{cases} \quad \text{Formules de Newmark et Hall}$$

$$1.5 \leq R_S \leq 2.7$$

$$\rightarrow R_S = 2$$

$$R_R = 1 \text{ (4files)}$$

Finalement :

$$R = 1.2 \cdot \mu$$

$$R = 2\mu$$

Effort tranchant selon la méthode statique[2] :

$$V = \frac{ADQ}{R} W$$

$$\rightarrow v = \frac{ADQ}{2\mu} W$$

$$v = \left(\frac{AQW}{2} \right) \frac{D}{\mu}$$

Exempel :

$$A=2,5 \text{ (groupe 1A zone IIa)}$$

$$Q=1 \text{ (tous les critères observés)}$$

$$W=10^3 \text{ kN}$$

$$\rightarrow C=A.Q.W= 250\text{kN} \quad \text{et } T > 0.5 \text{ s}$$

$$\rightarrow V = 125 \cdot \frac{D}{\mu}$$

$$1 / \mu = 1$$

On a :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{(2+\xi)}}$$

$$D = 2,5 \eta$$

Donc :

$$\xi_1 = 0 \% \rightarrow \eta_1 = 1.87 \rightarrow D_1 = 4,68 \rightarrow V_1 = 585 \text{ kn} .$$

$$\xi_2 = 5 \% \rightarrow \eta_2 = 1 \rightarrow D_2 = 2,5 \rightarrow V_2 = 312.5 \text{ kn} .$$

$$\xi_3 = 7\% \rightarrow \eta_3 = 0.88 \rightarrow D_3 = 2,2 \rightarrow V_3 = 275 \text{ kn} .$$

$$\xi_4 = 10\% \rightarrow \eta_4 = 0,76 \rightarrow D_4 = 1.9 \rightarrow V_4 = 237,5 \text{ kn} .$$

$$2 / \xi = 0\% \rightarrow \eta_1 = \sqrt{\frac{7}{2}} \rightarrow D_1 = 4,68$$

$$\mu_1 = 1 \rightarrow V'_1 = 125.D = 585 \text{ kN}$$

$$\mu_2 = 1,50 \rightarrow V'_2 = \frac{125D_1}{1.5} = 390 \text{ kN}$$

$$\mu_3 = 2 \rightarrow V'_3 = \frac{125D_1}{2} = 292,5 \text{ kN}$$

$$\mu_4 = 3 \rightarrow V'_4 = \frac{125.D_1}{3} = 195 \text{ kN} .$$

Tableau III-1 : Variation de l'effort tranchant V en fonction de ξ (%)

ξ	0%	5%	7%	10%
V (KN)	585	312,5	275	237,5

Tableau III-2 : Variation de l'effort tranchant V en fonction de μ :

μ	1	1,5	2	3
V(KN)	585	390	292,5	195

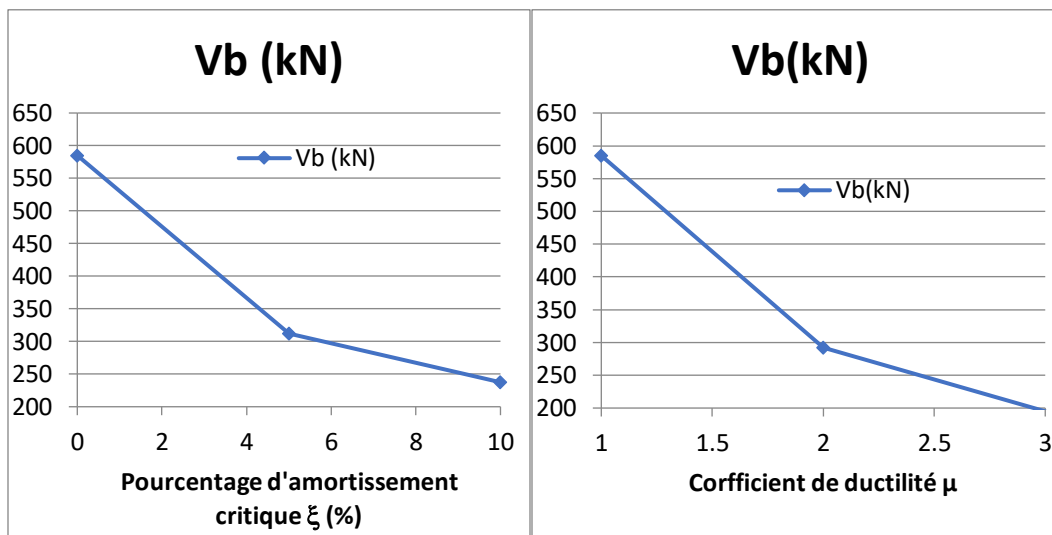


Figure III-6 : Effort tranchant à la base :

- a) à ductilité constante ($=1$) et amortissement variable (ξ)
- b) à amortissement constant ($=0$) et ductilité variable (μ)

Commentaire :

Avec comme cas témoin : $\xi=0\%$ (système non amorti) et $\mu=1$ (état élastique), donc $V_b=585$ kN,

On remarque que la diminution de l'effort tranchant en fonction de la ductilité est plus rapide ou brusque que la diminution de l'effort tranchant en fonction de l'amortissement. Ce qui prouve que l'effet favorable de la ductilité sur les structures est plus important que celui de l'amortissement.

2.2 Effet du confinement du béton sur la ductilité d'après l'Eurocode 2 :

$$\mu_c = \frac{\epsilon_{cuc}}{\epsilon_{oc}} \quad (\text{confiné}) \quad \text{et} \quad \mu_0 = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_0} \quad (\text{non confiné}), \text{ avec :}$$

$$F_{ck}=20 \text{ Mpa} \quad \text{par exemple} \leq 50 \text{ MPa} \quad \rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \epsilon_0 = 2 \\ \epsilon_{cu} = 3.5 \text{ ‰} \end{array} \right.$$

$$\sigma = \frac{N}{S} \leq 0.05 fck = 0,05 \cdot 20 = 1 \text{ MPa}$$

$$fckc = fck \left(1 + 5 \frac{\sigma_2}{fck} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{0c} = \left(\frac{fckc}{fck} \right)^2 \\ \varepsilon_{cuc} = \varepsilon_{cu} + 0,2 \cdot \frac{\sigma_2}{fck} \end{array} \right.$$

$$\mu_0 = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_0} = \frac{3,5\text{‰}}{2\text{‰}} = 1,75\text{‰}$$

$$\mu_c = \frac{\varepsilon_{cuc}}{\varepsilon_{0c}}$$

Non confiné :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_0 (\text{‰}) = \begin{cases} 2 & fck \leq 50 \text{ MPa} \\ 2 + 0,085(fck - 50)^{0,53} & fck > 50 \text{ MPa} \end{cases} \\ \varepsilon_{cu} (\text{‰}) = \begin{cases} 3,5 & fck \leq 50 \text{ MPa} \\ 2,6 + 35 \left(\frac{90 - fck}{100} \right)^4 & fck > 50 \text{ MPa} \end{cases} \end{array} \right.$$

ε_{cu} : la déformation de compression ultime .

ε_0 : la déformation de compression du béton sous la contrainte maximale fck .

$$\text{Confiné : } \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{0c} = \left(\frac{fckc}{fck} \right)^2 \\ \varepsilon_{cuc} = \varepsilon_{cu} + 0,2 \cdot \frac{\sigma_2}{fck} \end{array} \right.$$

ε_{0c} : La déformation à la fin de la phase élastique .

ε_{cuc} : La déformation ultime .

La résistance à l'intérieur des cadres $fckc$:

$$fckc = \left\{ \begin{array}{l} fck \left(1 + 5 \frac{\sigma_2}{fck} \right) \quad \text{pour } \sigma_2 \leq 0,05 fck \\ fck \left(1,125 + 2,5 \frac{\sigma_2}{fck} \right) \quad \text{pour } \sigma_2 > 0,05 fck \end{array} \right.$$

Non confiné :

$$\mu_0 = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_0} = \frac{3.5\%}{2\%} = 1,75$$

Confiné :

Exemple :

En prenant par exemple : $S = 30.40 = 12.10^2 \text{ cm}^2 = 12.10^{-2} \text{ m}^2$ et
 $N = 12.10^4 \text{ N}$

$$\text{Donc : } \sigma_2 = \frac{N}{S} = \frac{12.10^4}{300.400} = 1 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 \leq 0,05 f_{ck} = 0,05 \cdot 20 = 1 \text{ Mpa}$$

a) Calcul de la résistance à l'intérieur des cadres f_{ckc} :

$$f_{ckc} = f_{ck} \left(1 + 5 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) \quad \text{pour } \sigma_2 \leq 0,05 f_{ck} \quad \text{donc } f_{ckc} = 25$$

b) Calcul de la déformation à la fin de la phase élastique ε_{0c} :

$$\varepsilon_{0c} = \left(\frac{f_{ckc}}{f_{ck}} \right)^2$$

$$\varepsilon_{0c} = \left(\frac{25}{20} \right)^2 = 1,563$$

C) Calcul de la déformation ultime ε_{cuc} :

$$\varepsilon_{cuc} = \varepsilon_{cu} + 0,2 \left(\frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right)$$

$$\varepsilon_{cuc} = 3,5 + 0,2 \left(\frac{1}{20} \right)$$

$$\varepsilon_{cuc} = 3,51$$

$$\text{Donc : } \mu_c = \frac{\varepsilon_{cuc}}{\varepsilon_{0c}} = \frac{3,51}{1,563} = 2,25$$

Commentaire :

On voit bien qu'il y a une nette augmentation de la ductilité du béton confiné ($\mu_c = 2.25$) par rapport au béton non confiné ($\mu_0 = 1.75$), ce qui met en évidence l'effet favorable du confinement sur le béton comprimé.

2-3 Effet du pourcentage d'armatures tendues sur la ductilité en section : Calcul de μ_1 :

On considère 5 cas de pourcentages d'armatures tendues

Pour tous les cas, les données suivantes sont les mêmes :

$$b = 30\text{cm} \quad d_t = 40\text{cm}; \quad d = 35\text{cm} \quad ; \quad \sigma_e = 240\text{MPa} = 240 \cdot 10^6 \text{N/m}^2; \quad E_s = 2 \cdot 10^5 \text{MPa}$$

Cas1 :

$$A_1 = 12\text{cm}^2 \quad (6\text{T16 par ex}) \quad (\Psi = 1\%)$$

$$s = b \cdot d_t = 30 \cdot 40 = 1200\text{cm}^2 = 12 \cdot 10^2 \text{cm}^2$$

1/ calcul de φ_u : (Etat limite ultime)

$N_{bu} = N_{su}$ (Equilibrer entre la force de béton et la force de l'acier)

$$0,8 \cdot b \cdot y_u \cdot f_{bu} = A_1 \cdot \sigma_e \Rightarrow y_u = \frac{A_1 \cdot \sigma_e}{0,8 b f_{bu}} = \frac{12 \cdot 240}{(0,8) \cdot (30) \cdot (11,33)} = 10,6\text{cm}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_a = \frac{d - y_u}{y_u} \varepsilon_{bu} = \frac{35 - 10,6}{10,6} \cdot (3,5 \cdot 10^{-3}) = 8,06 \cdot 10^{-3} > \varepsilon_{sl} (= 1,74\%)$$

$$z_u = d - 0,4 y_u = 35 - 0,4(10,6) = 30,76\text{cm}$$

$$M_u = N_{bu} z_u = A_1 \sigma_e z_u = (12 \cdot 10^{-4}) \cdot (240 \cdot 10^6) \cdot (30,76 \cdot 10^{-2}) = 88588,8 \text{ N} \cdot \text{m} \\ = 8,86 \cdot 10^4 \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{bu}}{y_u} = \frac{\varepsilon_{us}}{d - y_u} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{10,6}$$

2 / calcul de φ_{el} :

$N_{bc} = N_{st}$

$$\frac{1}{2} b y_e \cdot f_{bu} = A_1 E_s \frac{d - y_e}{y_e} \cdot \varepsilon_{ub}$$

$$\rightarrow y_e \left(\frac{1}{2} b f_{bu} y_e \right) = A_1 E_s \cdot \varepsilon_{ub} (d - y_e) = A_1 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d - A_1 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} b f_{bu} \cdot y_e^2 + A_1 \cdot E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e - A_1 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 0$$

$$\bullet \frac{1}{2} b f_{bu} = 0,5 \cdot 30 \cdot 11,33 = 170$$

$$\bullet A_1 E_s \cdot \varepsilon_{ub} = 12 \cdot 2,10^5 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 8400$$

$$\bullet A_1 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 8400 \cdot 35 = 294000$$

$$\rightarrow 170 y_e^2 + 8400 y_e - 294000 = 0$$

$$\rightarrow y_e^2 + 49,41 y_e - 1729,41 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

$$\rightarrow \Delta = (49.41)^2 + 1729.41 = 9358.5$$

$$\rightarrow \sqrt{\Delta} = 97 \text{ domc :}$$

$$\rightarrow y_e = 24 \text{ cm}$$

$$\varphi_{el} = \frac{3.5 \cdot 10^{-3}}{24}$$

$$\varphi_u = \frac{3.5 \cdot 10^{-3}}{10.6}$$

$$\text{donc : } \mu_1 = \frac{\varphi_u}{\varphi_{el}} = \frac{3.5 \cdot 10^{-3}}{10.6} \cdot \frac{24}{3.9 \cdot 10^{-3}} = 2,26$$

$$\mu_1 = 2,26$$

Cas 2 :

$$A_2 = 14 \text{ cm}^2 \text{ (7T16 par ex)}$$

$$s = b \cdot d_t = 30.40 = 1200 \text{ cm}^2 = 12 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$$

1/ calcul de φ_u : (Etat limite ultime)

$$0.8 \cdot b \cdot y_u \cdot f_{bu} = A_2 \cdot \sigma_e \Rightarrow y_u = \frac{A_2 \cdot \sigma_e}{0.8 b f_{bu}} = \frac{14 \cdot 240}{(0.8) \cdot (30) \cdot (11,33)} = 12,36 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_a = \frac{d - y_u}{y_u} \varepsilon_{bu} = \frac{35 - 12.36}{12.36} \cdot (3.5 \cdot 10^{-3}) = 6,41 \cdot 10^{-3} > \varepsilon_{sl} (= 1,74\text{‰})$$

$$z_u = d - 0.4 y_u = 35 - 0.4(12,36) = 30,06 \text{ cm}$$

$$M_u = N_{bu} z_u = A_2 \sigma_e z_u = (14 \cdot 10^{-4}) \cdot (240 \cdot 10^6) \cdot (30,06 \cdot 10^{-2}) = 101001,6 \text{ N} \cdot \text{m} \\ = 10,10 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{bu}}{y_u} = \frac{\varepsilon_{us}}{d - y_u} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{12,36}$$

2 / calcul de φ_{el} :

$$N_{bc} = N_{st}$$

$$\frac{1}{2} b y_e \cdot f_{bu} = A_2 E_s \frac{d - y_e}{y_e} \cdot \varepsilon_{ub}$$

$$\rightarrow y_e \left(\frac{1}{2} b \cdot y_e \cdot f_{bu} \right) = A_2 E_s \cdot \varepsilon_{ub} (d - y_e) = A_2 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d - A_2 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} b f_{bu} \cdot y_e^2 + A_2 \cdot E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e - A_2 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 0$$

$$\bullet \frac{1}{2} b f_{bu} = 0,5 \cdot 30 \cdot 11,33 = 170$$

$$\bullet A_2 E_s \cdot \varepsilon_{ub} = 14 \cdot 2,10^5 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 9800.$$

$$\bullet A_2 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 9800 \cdot 35 = 343000.$$

$$\rightarrow 170 y_e^2 + 9800 y_e - 343000 = 0$$

$$\rightarrow y_e^2 + 57,65 y_e - 2017,65 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

$$\rightarrow \Delta = (57,65)^2 + 2017,65 = 5341,17$$

$$\rightarrow \sqrt{\Delta} = 73 \text{ donc :}$$

$$y_e = 24,55 \text{ cm}$$

$$\varphi_{el} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{24,55}$$

$$\varphi_u = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{12,36}$$

$$\text{donc : } \mu_2 = \frac{\varphi_u}{\varphi_{el}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{12,36} \cdot \frac{24,55}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 1,99$$

$$\mu_2 = 1,99$$

Cas 3 :

$$A_3 = 20 \text{ cm}^2 \text{ (10T16 par ex)}$$

$$s = b \cdot d_t = 30 \cdot 40 = 1200 \text{ cm}^2 = 12 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$$

1/ calcul de φ_u : (Etat limite ultime)

$$0,8 \cdot b \cdot y_u \cdot f_{bu} = A_3 \cdot \sigma_e \Rightarrow y_u = \frac{A_3 \cdot \sigma_e}{0,8 b f_{bu}} = \frac{20 \cdot 240}{(0,8) \cdot (30) \cdot (11,33)} = 17,65 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_a = \frac{d - y_u}{y_u} \varepsilon_{bu} = \frac{35 - 17,65}{17,65} \cdot (3,5 \cdot 10^{-3}) = 3,44 \cdot 10^{-3} > \varepsilon_{sl} (= 1,74\%)$$

$$z_u = d - 0,4 y_u = 35 - 0,4(17,65) = 27,94 \text{ cm}$$

$$M_u = N_{bu} z_u = A_3 \sigma_e z_u = (20 \cdot 10^{-4}) \cdot (240 \cdot 10^6) \cdot (30,06 \cdot 10^{-2}) = 134112 \text{ N.m}$$

$$= 13,41 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{bu}}{y_u} = \frac{\varepsilon_{us}}{d - y_u} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{17,65}$$

2 / calcul de φ_{el} :

$$N_{bc} = N_{st}$$

$$\frac{1}{2} b y_e \cdot f_{bu} = A_3 E_s \frac{d-y_e}{y_e} \cdot \varepsilon_{ub}$$

$$\rightarrow y_e \left(\frac{1}{2} b \cdot y_e \cdot f_{bu} \right) = A_3 E_s \cdot \varepsilon_{ub} (d - y_e) = A_3 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d - A_3 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} b f_{bu} \cdot y_e^2 + A_3 \cdot E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e - A_3 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 0$$

$$\bullet \frac{1}{2} b f_{bu} = 0,5 \cdot 30 \cdot 11,33 = 170$$

$$\bullet A_3 E_s \cdot \varepsilon_{ub} = 20 \cdot 2,10^5 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 14000.$$

$$\bullet A_2 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 14000 \cdot 35 = 490000.$$

$$\rightarrow 170 y_e^2 + 14000 y_e - 490000 = 0$$

$$\rightarrow y_e^2 + 82,35 y_e - 490000 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

$$\rightarrow \Delta = (82,35)^2 + 1960000 = 0$$

$$\rightarrow \sqrt{\Delta} = 1400 \text{ donc :}$$

$$y_e = 26,48 \text{ cm}$$

$$\varphi_{el} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{26,48}$$

$$\varphi_u = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{17,65}$$

$$\text{donc : } \mu_3 = \frac{\varphi_u}{\varphi_{el}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{17,65} \cdot \frac{26,48}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 1,50$$

$$\mu_3 = 1,50$$

Cas 4 :

$$A_3 = 30 \text{ cm}^2$$

$$s = b \cdot d_t = 30 \cdot 40 = 1200 \text{ cm}^2 = 12 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$$

1/ calcul de φ_u : (Etat limite ultime)

$$0,8 \cdot b \cdot y_u \cdot f_{bu} = A_4 \cdot \sigma_e \Rightarrow y_u = \frac{A_4 \cdot \sigma_e}{0,8 b f_{bu}} = \frac{30 \cdot 240}{(0,8) \cdot (30) \cdot (11,33)} = 26,48 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_a = \frac{d-y_u}{y_u} \varepsilon_{bu} = \frac{35-26,48}{26,48} \cdot (3,5 \cdot 10^{-3}) = 1,13 \cdot 10^{-3} > \varepsilon_{sl} (= 1,74\text{‰})$$

$$z_u = d - 0,4 y_u = 35 - 0,4(26,48) = 24,41 \text{ cm}$$

$$M_u = N_{bu} z_u = A_3 \sigma_e z_u = (30 \cdot 10^{-4}) \cdot (240 \cdot 10^6) \cdot (24,41 \cdot 10^{-2}) = 175752 \text{ N.m}$$

$$= 17,6 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{bu}}{y_u} = \frac{\varepsilon_{us}}{d - y_u} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{26,48}$$

2 / calcul de φ_{el} :

$$N_{bc} = N_{st}$$

$$\frac{1}{2} b y_e \cdot f_{bu} = A_4 E_s \frac{d - y_e}{y_e} \cdot \varepsilon_{ub}$$

$$\rightarrow y_e \left(\frac{1}{2} b \cdot y_e \cdot f_{bu} \right) = A_4 E_s \cdot \varepsilon_{ub} (d - y_e) = A_4 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d - A_4 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} b f_{bu} \cdot y_e^2 + A_4 \cdot E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e - A_4 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 0$$

$$\bullet \frac{1}{2} b f_{bu} = 0,5 \cdot 30 \cdot 11,33 = 170$$

$$\bullet A_4 E_s \cdot \varepsilon_{ub} = 30 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 21000$$

$$\bullet A_4 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 21000 \cdot 35 = 735000$$

$$\rightarrow 170 y_e^2 + 21000 y_e - 735000 = 0$$

$$\rightarrow y_e^2 + 123,53 y_e - 4323,53 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

$$\rightarrow \Delta = (123,53)^2 + 17294,12 = 0$$

$$\rightarrow \sqrt{\Delta} = 180,43 \text{ donc :}$$

$$y_e = 28,45 \text{ cm}$$

$$\varphi_{el} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{28,45}$$

$$\varphi_u = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{26,48}$$

$$\text{donc : } \mu_4 = \frac{\varphi_u}{\varphi_{el}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{26,48} \cdot \frac{28,45}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 1,07$$

$$\mu_4 = 1,07$$

Cas 5 :

$$A_3 = 36 \text{ cm}^2$$

$$s = b \cdot d_t = 30 \cdot 40 = 1200 \text{ cm}^2 = 12 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$$

1/ calcul de φ_u : (Etat limite ultime)

$$0.8 \cdot b \cdot y_u \cdot f_{bu} = A_5 \cdot \sigma_e \Rightarrow y_u = \frac{A_5 \cdot \sigma_e}{0.8 b f_{bu}} = \frac{36 \cdot 240}{(0,8) \cdot (30) \cdot (11,33)} = 31,77 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_a = \frac{d-y_u}{y_u} \varepsilon_{bu} = \frac{35-31,77}{31,77} \cdot (3,5 \cdot 10^{-3}) = 3,56 \cdot 10^{-4} \text{ (donc l'acier plastifie) } > \varepsilon_{sl} (= 1,74\text{‰})$$

$$z_u = d - 0.4y_u = 35 - 0.4(31,77) = 22,29 \text{ cm}$$

$$M_u = N_{bu} z_u = A_5 \sigma_e z_u = (36 \cdot 10^{-4}) \cdot (240 \cdot 10^6) \cdot (22,29 \cdot 10^{-2}) = 192585,6 \text{ N.m} \\ = 19,26 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{bu}}{y_u} = \frac{\varepsilon_{us}}{d-y_u} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{31,77}$$

2 / calcul de φ_{el} :

$$N_{bc} = N_{st}$$

$$\frac{1}{2} b y_e \cdot f_{bu} = A_5 E_s \frac{d-y_e}{y_e} \cdot \varepsilon_{ub}$$

$$\rightarrow y_e \left(\frac{1}{2} b \cdot y_e \cdot f_{bu} \right) = A_5 E_s \cdot \varepsilon_{ub} (d - y_e) = A_5 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d - A_5 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} b f_{bu} \cdot y_e^2 + A_5 \cdot E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot y_e - A_5 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 0$$

$$\bullet \frac{1}{2} b f_{bu} = 0,5 \cdot 30 \cdot 11,33 = 170$$

$$\bullet A_5 E_s \cdot \varepsilon_{ub} = 36 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 25200 \cdot$$

$$\bullet A_5 E_s \cdot \varepsilon_{ub} \cdot d = 25200 \cdot 35 = 882000 \cdot$$

$$\rightarrow 170 y_e^2 + 25200 y_e - 882000 = 0$$

$$\rightarrow y_e^2 + 148,24 y_e - 5188,24 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

$$\rightarrow \Delta = (148,24)^2 + 20752,96 = 0 \rightarrow \sqrt{\Delta} = 206,70 \text{ donc :}$$

$$y_e = 29,23 \text{ cm}$$

$$\varphi_{el} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{29,23} \text{ et } \varphi_u = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{31,77}$$

$$\text{donc : } \mu_5 = \frac{\varphi_u}{\varphi_{el}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{31,77} \cdot \frac{29,23}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 0,92$$

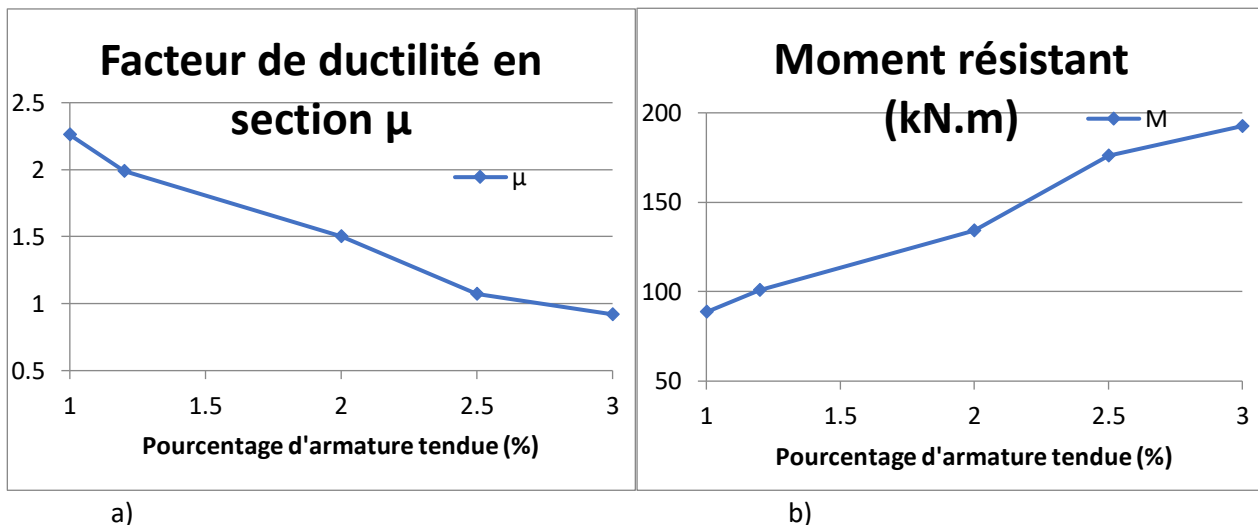
$$\mu_5 = 0,92$$

Tableaux récapitulatifs**Tableau III-3: Facteur de ductilité en section μ (en fonction de Ψ) :**

A (cm^2)	12	14	20	30	36
Ψ	0,01	0,012	0,02	0,025	0,03
μ	2,26	1,99	1,5	1,07	0,92

Tableau III-4: Moment résistant (kN.m) en fonction de Ψ :

Ψ	0.01	0.012	0.02	0.025	0.03
$M(10^4 \text{ kN.m})$	8.86	10.1	13.41	17.6	19.26

**Figure III-7: Variation en fonction du pourcentage d'armature tendue**

a) Facteur de ductilité en section et b) Moment résistant

Commentaire :

L'examen des résultats obtenus montre que l'**augmentation** du pourcentage d'armatures tendues dans une section en béton armé a pour effet d'**augmenter le moment résistant** de la section mais **diminue** par contre sa **ductilité**. Ceci est dû au fait que lorsqu'on diminue la section d'acier tendu, l'axe neutre se déplace suffisamment vers la fibre supérieure permettant ainsi aux armatures d'atteindre la déformation plastique. Par contre, une section fortement armée en traction se rompt bien avant et manquera donc de ductilité.

Il résulte de ces constatations que l'obtention d'une **ductilité désirée** dans une section en BA nécessite une **optimisation** précise du **pourcentage** d'armatures de façon à ne pas nuire à une **résistance suffisante**.

Conclusion

Cette étude nous a permis d'atteindre les objectifs tracés, à savoir:

- Définition de la **ductilité** comme paramètre **important** pour les structures en zone sismique
- Mise en évidence de l'effet **favorable** de ce paramètre
- Recherche des facteurs qui **augmentent** cette ductilité du point de vue conception (% d'armatures tendues par ex) et réalisation (choix des matériaux, confinement du béton comprimé, ...).

Elle nous a permis également d'approfondir et de mettre en pratique les connaissances acquises durant notre cursus universitaire, notamment le calcul BAEL et la DDS.

Références :

- [1] V GIONCU Framed structures. Ductility and seismic response. General Report Journal of Constructional Steel Research, 55 (2000) pp.125-154.
- [2] Ministère de l'Habitat, Règles Parasismiques Algériennes, C.G.S (2003), Algérie.
- [3] Mansouri Redha, « Ductilité et comportement sismique des structures », Mémoire de Master, ENP, Alger, 2017.
- [4] <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/16029>
Mémoire de Master Académique (EFFET DE LA DUCTILITE SUR LES CONSTRUCTIONS EN ZONE SISMIQUE).
- [5] « BERRA Ibrahim Thèse DOCTORAT L.M.D Méthode Simplifiée d'Analyse Sismique en Performance Intégrable dans les Règles Parasismiques Algériennes », Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Janvier 2021.
- [6] BELKHEIR Mohammed Aghiles, "Influence de la disposition des voiles sur la performance sismique des structures mixtes" Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Juillet 2012.
- [7] NIGRI Ghania Polycopié de cours Master Génie Civil. Technologie du béton, Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2020.
- [8] <http://dspace.univtiaret.dz/bitstream/123456789/11722/10/CHAPITRE%203.pdf>
Mémoire de fin d'études de Master « Effet du Confinement sur la Ductilité Locale des Poutres en Béton Armé » Chapitre 3 COMPORTEMENT DU BETON SOUS L'EFFET DU CONFINEMENT.
- [9] <https://theses.hal.science/tel-00365786/document>
THÈSE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER Fabrice Dupray Comportement du béton sous fort confinement : Étude en compression et en extension triaxiales à l'échelle mésoscopique.
- [10] BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES - 20 9 - MAI-JUIN 1997 - RÉF. 410 9 - PP. 49-67 Khaled LAHLOU Ingénieur Ph. D. Maître de conférences Département Ponts, Chaussées et Transport École Hassania des Travaux publics. Casablanca (Maroc). Pierre-Claude AÏTCIN Professeur titulaire Université de Sherbrooke. Québec (Canada).