

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 GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Travaux Publics

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par :

ZOUAOUI MOHAMED ABDELMOUIZ

Sujet du mémoire

Etude de la ductilité des poutres en béton armé
Impact des bulles d'air sur la performance structurale

Soutenu publiquement le 23-06-2024 devant le jury composé de :

Mr, DRAICHE Kada	Président
Mr, BENFERHAT Rabia	Rapporteur
Mr, BOUZID Haythem	Co-rapporteur
Mlle, OUAZIR Khatima	Examineur
Mr, TLIDJI Youcef	Examineur
Mlle, ZOUATNIA Nafissa	Examineur

PROMOTION : 2023-2024

REMERCIEMENT

Tout d'abord, Je tiens a remercié **ALLAH** de m'avoir donné à la force et le courage de mener à bien ce mémoire

Je veux dans un premier temps de remercier messieurs **RABIA BENFERHAT** et **BOUZID HAYTHEM**

Pour leurs conseils avisés qui m'ont permis d'obtenir de précieuses informations

Je remercier plus particulièrement les membres de jury pour accepter d'examiner ce travail

Enfin, Je présente profonds remerciements aux enseignants et au staff du département de Génie Civil.



Dédicace

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste
Travail, comme un geste de gratitude :
A celle qui m'a enfanté, mon symbole
d'amour ;*

Ma très chère mère

*A celui qui je chère et j'apprécie fort son
Soutien continu tout le long de mes études ;*

Mon très cher père

A mes très chers Sœurs

RESUME

Les bulles d'air dans le béton armé peuvent compromettre sa ductilité locale, la capacité à se déformer de manière plastique avant la rupture. Elles affaiblissent la résistance globale du béton, réduisent la liaison entre l'acier et le béton, et facilitent la propagation des fissures. Cependant, l'impact dépend des facteurs tels que la taille et la distribution des bulles, la qualité du béton et la nuance de l'acier utilisé. Des techniques de conception et de fabrication appropriées peuvent atténuer ces effets négatifs.

L'objectif principal de cette étude de recherche est d'analyser la ductilité des poutres en béton armé et d'évaluer l'impact des bulles d'air sur la performance structurale. Les résultats obtenus révèlent que l'augmentation du niveau de la porosité entraîne une diminution de la ductilité. Cependant, il a été constaté que la résistance caractéristique du béton, la limite élastique de l'acier et le taux des armatures comprimé dans les poutres permet d'améliorer la performance des poutres face à l'augmentation de la porosité.

Cette étude se concentre donc sur l'analyse de l'effet de la porosité sur la résistance et la ductilité locale des poutres en béton armé. Les résultats soulignent l'importance cruciale de l'impact de la porosité sur la ductilité. Ces conclusions mettent en évidence les avantages du renforcement structural dans le domaine de la construction en béton armé. Offrant ainsi des solutions pour améliorer la ductilité des structures face aux contraintes liées à la porosité.

Mots-clés: Ductilité locale, poutres en béton armé, Bulles d'air, performance structurale.

ABSTRACT

Air bubbles in reinforced concrete can compromise its local ductility, the ability to deform plastically before breaking. They weaken the overall strength of the concrete, reduce the bond between steel and concrete, and facilitate the propagation of cracks. However, the impact depends on factors such as the size and distribution of the bubbles, the quality of the concrete, and the grade of the steel used. Appropriate design and manufacturing techniques can mitigate these negative effects.

The primary objective of this research study is to analyze the ductility of reinforced concrete beams and to evaluate the impact of air bubbles on structural performance. The results obtained reveal that an increase in the level of porosity leads to a decrease in ductility. However, it has been found that the percentage of tensioned reinforcement in the beams can improve the performance of the beams in response to increased porosity.

Therefore, this study focuses on analyzing the effect of porosity on the strength and local ductility of reinforced concrete beams. The results highlight the crucial importance of the impact of porosity on ductility. These conclusions underscore the advantages of structural reinforcement in the field of reinforced concrete construction, thus offering solutions to improve the ductility of structures in response to porosity-related challenges.

Keywords: Local ductility, reinforced concrete beams, air bubbles, structural performance.

ملخص

فقاعات الهواء في الخرسانة المسلحة يمكن أن تؤثر على الليونة المحلية، وهي القدرة على التشوه بشكل بلاستيكي قبل الكسر. تضعف هذه الفقاعات من القوة الكلية للخرسانة، تقلل من الربط بين الفولاذ والخرسانة، وتسهّل انتشار الشقوق. ومع ذلك، فإن التأثير يعتمد على عوامل مثل حجم الفقاعات وتوزيعها، جودة الخرسانة، ونوعية الفولاذ المستخدم. يمكن للتقنيات المناسبة في التصميم والتصنيع أن تخفف من هذه التأثيرات السلبية.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة البحثية هو تحليل الليونة المحلية لعوارض الخرسانة المسلحة وتقييم تأثير فقاعات الهواء على الأداء الهيكلي. تكشف النتائج التي تم الحصول عليها أن زيادة مستوى المسامية تؤدي إلى انخفاض في الليونة. ومع ذلك، تم اكتشاف أن نسبة التسليح المشدود في العوارض يمكن أن تحسن أداء العوارض في مواجهة زيادة المسامية.

تركز هذه الدراسة بالتالي على تحليل تأثير المسامية على القوة والليونة المحلية لعوارض الخرسانة المسلحة. تسلط النتائج الضوء على الأهمية الحاسمة لتأثير المسامية على الليونة. هذه الاستنتاجات تؤكد على فوائد التعزيز الهيكلي في مجال البناء بالخرسانة المسلحة، مما يوفر حلاً لتحسين ليونة الهياكل في مواجهة التحديات المتعلقة بالمسامية.

الكلمات المفتاحية: الليونة المحلية، عوارض الخرسانة المسلحة، فقاعات الهواء، الأداء الهيكلي.

SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Sommaires	
Liste de figure	
Liste de tableau	
Liste de notations	

Introduction Générale	1

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA DUCTILITES

I.1. Introduction	3
I.2. Aspect général sur la ductilité	3
I.2.1. Définition de la ductilité	3
I.3. Facteur de la ductilité	3
I.3.1. Facteur ductilité globale	4
I.3.2. Facteur ductilité local (en courbure)	4
I.4. Relation déformabilité – ductilité	5
I.5. Relation ductilité – fragilité	5
I.6. Différents types de ductilité	6
I.7. Relation entre les différentes ductilités	9
I.8. Ductilité requise-ductilité disponible	9
I.8.1. Ductilité requise	10
I.8.2. Ductilité disponible	11
I.9. Ductilité des matériaux	11
I.9.1. Acier	12
I.9.2. Béton	12
I.10. Classe de ductilité	13
I.11. Critères requis pour les structures ductiles	14
I.11.1. Mécanismes de ruine	14

I.12. Conclusion.....	15
-----------------------	----

CHAPITRE 2 : COMPORTEMENT DE BETON

II.1. Introduction	17
II.2. Aperçu sur le comportement du béton	17
II.2.1. Comportement du béton en compression	17
II.2.2. Comportement du béton en Traction	19
II.2.3. Comportement cyclique traction-compression.....	20
II.2.4. Comportement en cisaillement.....	21
II.3. Aspect de confinement	21
II.4. Types de confinement du béton	22
II.4.1. Confinement Passif.....	22
II.4.2. Confinement actif	22
II.5. Principes de construction du béton armé	22
II.5.1. Adhérence béton-acier.....	23
II.6. Fissuration de béton.....	24
II.6.1. Causes de la fissuration	24
II.7. Durabilité de béton.....	25
II.8. Aperçu sur le comportement non linéaire des éléments des ossatures en Béton armé	26
II.8.1. Comportement des éléments poutres	26
II.8.2. Comportement des éléments poteaux	27
II.8.3. Comportement des nœuds poutres-poteaux	28
II.9. Conclusion	28

CHAPITRE 3 : CALCUL DE FACTEUR DE DUCTILITE

III.1. Introduction	30
III.2. Méthode d'évaluation de facteur de ductilité locale :	30
III.2.1. Lois de comportement des matériaux.....	30
III.2.1.1. Béton.....	30
III.2.1.2. Acier	31
III.2.2. Facteur de ductilité locale	32
III.2.2.1. Courbure à la fin de la phase élastique.....	32
III.2.2.2. Courbure à l'état limite ultime	33
III.3. La relation entre porosité et résistance du béton.....	35
III.4. Conclusion	36

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1.Introduction	37
IV.2. Interprétation des résultats du tableau IV.1	37
IV.3. Interprétation des figures	38
IV.4. Solutions pour atténuer l'effet de porosité sur la ductilité locale des poutres en BA	51
IV.4.1. Vibration de béton pour réduire le taux de porosité	51
IV.4.2. Renforcement des structures	51
IV.5. Conclusion générale	51

Liste de figures

CHAPITRE I

Figure I.1. Ductilité-facture de ductilité.....	3
Figure I.2. Déformabilité – ductilité-facteur de ductilité.....	4
Figure I.3 Déformabilité – ductilité-Facteur de ductilité.....	5
Figure I.4. Diagramme de comportement ductile et fragile.....	5
Figure I.5. Différence entre un comportement ductile et fragile.....	6
Figure I.6. Relation entre les différents types de ductilités.....	9
Figure I.7. Courbes contrainte-déformation de quelques types d'acier.....	12
Figure I.8. Courbes contrainte-déformation de cylindres de béton sous Compression uni axiale.....	13
Figure I.9. Classes de ductilité des éléments.....	14

CHAPITRE II

Figure II.1. A Gauche, la courbe de réponse du béton à la compression, a droit, le résultat d'un essai en compression.....	18
Figure II.2 : Différents essais ont été effectués sur la résistance Du béton à la traction.....	19
Figure II.3. Courbe de comportement du béton en traction.....	20
Figure II.4. Essai Comportement uni axiale du béton sous Chargement cyclique.....	21
Figure II.5. Comportement de béton confiné.....	22
Figure II.6. Scellement de la barre dans le béton.....	23
Figure II.7. Distribution de la fissuration.....	23
Figure II.8. Le dispositif normatif du béton.....	25
Figure II.9. (a) poutre ferrailée normalement, (b) boucles d'hystérésis.....	27
Figure II.10. (a) poutre avec ferrailage diagonal, (b) boucles d'hystérésis.....	27
Figure II.11. Comportement des nœuds poutres-poteaux (a) mode de rupture, (b) comportement d'hystérésis.....	28

CHAPITRE III

Figure III.1. Diagramme parabole rectangle pour le béton non confiné Sous compression.....	31
Figure III.2. Diagramme "contrainte – déformation" des aciers du béton armé.....	31
Figure III.3. Comportement d'une section fléchie d'une poutre en béton armé à l'état limite de service (la fin de phase élastique).....	32

Figure III.4 : Comportement de la section d'une poutre fléchie en béton armé à l'état limite ultime.....33

Figure III.5. Relation entre résistance à la compression et porosité totale.....35

CHAPITRE IV

Figure IV.1. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 20 \text{ MPa}$; $F_e = 400 \text{ MPa}$39

Figure IV.2. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 20 \text{ MPa}$; $F_e = 500 \text{ MPa}$40

Figure IV.3. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 20 \text{ MPa}$; $F_e = 600 \text{ MPa}$41

Figure IV.4. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 30 \text{ MPa}$; $F_e = 400 \text{ MPa}$42

Figure IV.5. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 30 \text{ MPa}$; $F_e = 500 \text{ MPa}$43

Figure IV.6. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 30 \text{ MPa}$; $F_e = 600 \text{ MPa}$44

Figure IV.7. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 40 \text{ MPa}$; $F_e = 400 \text{ MPa}$45

Figure IV.8. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 40 \text{ MPa}$; $F_e = 500 \text{ MPa}$46

Figure IV.9. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 40 \text{ MPa}$; $F_e = 600 \text{ MPa}$47

Figure IV.10. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 50 \text{ MPa}$; $F_e = 400 \text{ MPa}$48

Figure IV.11. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 50 \text{ MPa}$; $F_e = 500 \text{ MPa}$49

Figure IV.12. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 50 \text{ MPa}$; $F_e = 600 \text{ MPa}$50

Liste de tableau

Tableau I.1. Différents types de la ductilité.....8

Tableau I.2. Ductilité requise-ductilité disponible.....10

Tableau I.3. Paramètres influençant sur cette ductilité Requise.....10

Tableau I.4. Paramètres influençant sur cette ductilité disponible.....11

Tableau IV.1. Comparaison de la ductilité locale des poutres en béton armé avec son porosité.....38

Liste des notations et symboles

- f_c : La résistance à la compression
- f_{c28} : Résistance à la compression a (j : 28)
- BO** : béton ordinaire
- RPA** : règlement parasismique algérien
- B.A.E.L** : béton armé aux états limites
- σ : Contrainte
- μ : Facture de ductilité
- As** : sections des armatures tendues
- A's** : sections des armatures comprimées
- ρ : Armatures tendues
- ρ' : Armatures comprimées
- f_{yk} : La limite élastique
- f_{ck} : La résistance à la compression du béton
- θ_u : courbure ultime
- θ_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_{θ} : Ductilité en courbure
- μ_{ϵ} : Ductilité de déformation
- f_{cd} : contrainte en compression du béton
- f_{yd} : contrainte dans l'armatures
- ϵ_c : Déformation résultant de la compression du béton
- ϵ'_s : Déformation dans les armatures comprimées
- σ'_s : Contrainte dans les armatures comprimées
- P** : Porosité
- Ep** : l'effet de la porosité
- f_{cp} : La résistance du béton poreux

Introduction Générale

L'étude de la ductilité des poutres en béton armé constitue un domaine crucial dans le génie civil, visant à comprendre et améliorer la capacité des structures à résister à des charges importantes tout en maintenant leur intégrité structurelle. Dans cette perspective, il est essentiel d'explorer les différents facteurs qui peuvent influencer la ductilité du béton armé. L'un de ces facteurs, souvent sous-estimé, est l'impact des bulles d'air présentes dans le matériau

Les poutres en béton armé sont couramment utilisées dans la construction d'infrastructures, offrant une combinaison de résistance à la compression du béton et de la flexibilité de l'acier. Cependant, la présence de bulles d'air dans le béton peut avoir des conséquences significatives sur la performance structurale, en particulier en ce qui concerne la ductilité

Cette étude se concentre sur l'influence des bulles d'air sur la ductilité des poutres en béton armé. Les bulles d'air peuvent affecter la capacité du matériau à se déformer élastiquement avant la rupture, ce qui a des implications directes sur la résistance sismique et la capacité de dissipation d'énergie des structures

Il a examiné les méthodes de mesure de la ductilité des poutres en béton armé, en mettant en évidence les paramètres essentiels pour évaluer la performance structurale. Il a analysé également comment la présence de bulles d'air peut altérer la ductilité, en identifiant les mécanismes sous-jacents et en proposant des approches potentielles pour atténuer ces effets négatifs.

Le présent travail de recherche vise à réaliser une étude paramétrique sur l'effet de porosité (bulles d'air) sur la ductilité des poutres en béton armé. L'objectif principal est de déterminer l'influence spécifique de la porosité sur la ductilité des poutres en béton armé.

Notre étude se concentre sur l'analyse du facteur de porosité susceptible d'affecter la ductilité des poutres en béton armé. Nous modifions de manière systématique quatre paramètres clés : la résistance du béton et le taux des armatures tendues, le taux des armatures comprimées, la limite élastique de l'acier.

Le mémoire est structuré en deux parties distinctes. La première partie propose une synthèse approfondie sur la ductilité, abordant ses différents types et leurs manifestations, ainsi que le comportement de béton. La seconde partie de notre travail est dédiée à une étude analytique pour calculer le facteur de ductilité en courbure pour les poutres en béton armé, il propose une analyse détaillée des différentes étapes de calcul, en se concentrant sur les principaux facteurs

Introduction générale

qui influencent la ductilité des poutres. De plus, il aborde l'impact des bulles d'air sur les performances structurelles et explore comment la résistance à la compression du béton peut être déterminée à partir du taux de porosité existant. Ensuite, nous examinons une étude paramétrique détaillée visant à analyser l'impact de différents paramètres sur la ductilité locale des poutres en béton armé.

Chapitre I

Généralités sur la ductilité

I.1. Introduction

La ductilité, élément clé dans le domaine de la science des matériaux, joue un rôle essentiel dans le comportement mécanique de diverses structures.

Ce chapitre vise à explorer les mécanismes qui gouvernent la ductilité, ses facteurs, ses différents types, et les relations entre ces types.

Plus qu'une simple propriété mécanique, la ductilité est une composante indispensable à la conception d'infrastructures intelligentes et résilientes, garantissant leur performance et leur sécurité face à des conditions variables et imprévisibles.

I.2. Aspect général sur la ductilité

I.2.1. Définition de la ductilité

La ductilité désigne généralement la capacité d'un matériau à subir une déformation significative sans se rompre. Ce concept est particulièrement pertinent pour les matériaux utilisés dans la construction et les structures.

La ductilité est une caractéristique essentielle pour les matériaux de construction tels que le béton, l'acier ou d'autres alliages métalliques. Par exemple, dans le béton armé, la ductilité est cruciale pour garantir la résistance et la flexibilité de la structure face à des charges sismiques importantes. Une structure ductile peut absorber l'énergie des forces sismiques en se déformant de manière plastique plutôt qu'en se rompant brusquement.

En résumé, la ductilité est une propriété mécanique fondamentale pour les matériaux de construction, assurant la sécurité et la durabilité des structures face à diverses contraintes et charges.

I.3. Facteur de la ductilité

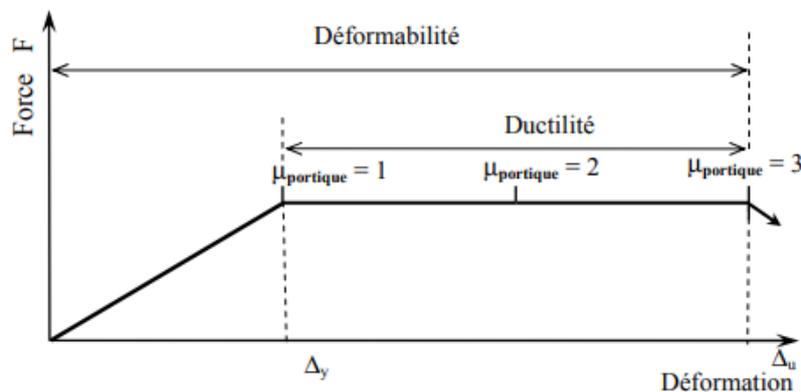


Figure I.1. Ductilité-facteur de ductilité (bertero, 1988)(SEBAI, (2011)).

Le rapport entre la déformation maximale (Δu) avec une dégradation importante de leur résistance ou de leur rigidité et la déformation obtenue à la fin de la phase élastique (Δc ou Δy) est connu sous le nom de facteur de ductilité, ou :

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta u}{\Delta_e} \dots \dots \dots (I.1)$$

I.3.1. Facteur ductilité globale

Actuellement, la technique statique non linéaire (push over) est un outil efficace pour évaluer la ductilité globale des structures. Une série d'analyses inélastiques statiques sur le bâtiment sont effectuées à l'aide d'un modèle de charge latérale présélectionné basé sur le premier mode de vibration de la structure ou des modèles de charge statique latérale équivalents dans les règles de parasitisme. Bien que le modèle de charge reste stable tout au long de l'analyse, son amplitude augmente graduellement jusqu'à ce que le bâtiment atteigne un déplacement cible spécifique. Ce déplacement cible est généralement utilisé pour représenter le déplacement maximum du bâtiment lorsqu'il atteint une excitation séisme maximale. Les résultats de l'analyse push over sont utilisés pour estimer la capacité du bâtiment en utilisant la courbe de variation du déplacement au sommet, avec le cisaillement à la base, et en conséquence le facteur de ductilité globale de la structure (Amar, 2003).

I.3.2. Facteur ductilité local (en courbure)

Le facteur de ductilité local, souvent désigné par l'en courbure, est un concept utilisé pour évaluer la capacité d'une section locale d'un matériau ou d'une structure à se déformer de manière plastique sans se rompre. Ce facteur mesure la déformation à une échelle plus petite, par exemple au niveau d'une poutre ou d'une colonne, par rapport à la déformation globale de la structure.

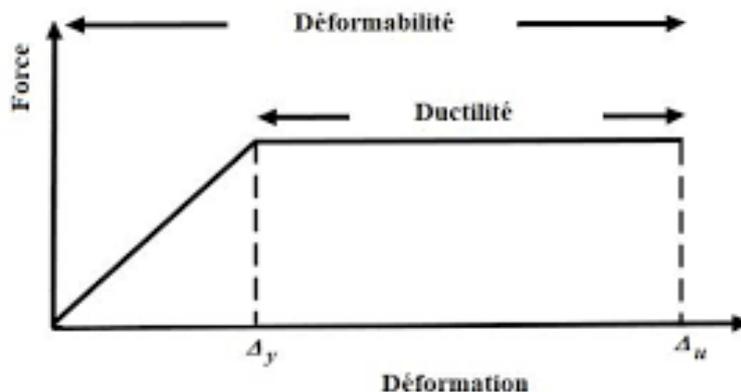


Figure I.2. Déformabilité – ductilité – facteur de ductilité (bertero, 1988)(KASSOUL, 2015)

I.4. Relation déformabilité – ductilité

La capacité d'un élément de la structure ou de la structure entière à se déformer avant un effondrement est connu sous le nom de déformabilité. La capacité d'une structure (élément) à subir une déformation après la fin de la phase élastique avec une dégradation significative de sa résistance ou de sa rigidité est appelée ductilité. Il est à noter qu'une structure peut être moins ductile mais avoir une grande déformabilité.

Par exemple, les murs en béton armé sont plus ductiles et moins déformables que les portiques (KASSOUL, 2015) (bertero, 1988).

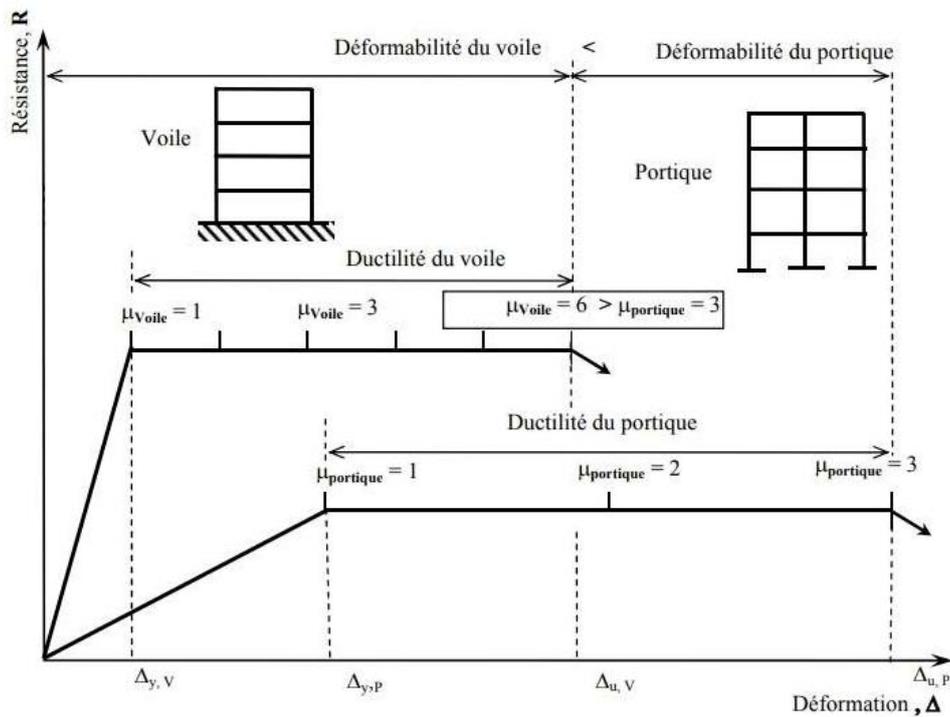


Figure I.3 Déformabilité – ductilité-Facteur de ductilité (bertero, 1988)(KASSOUL, 2015).

I.5. Relation ductilité – fragilité

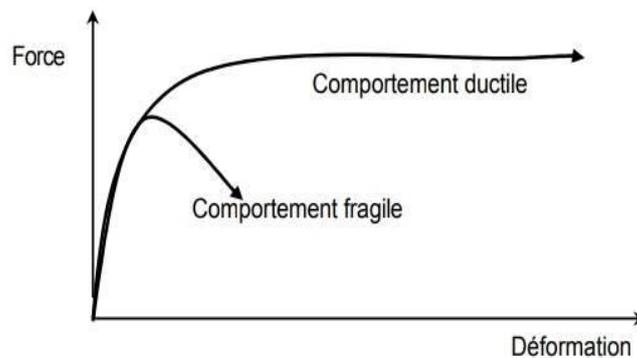


Figure I.4. Diagramme de comportement ductile et fragile (Park R. P., 1975)(KASSOUL, 2015).

Lorsque le palier de plasticité d'un matériau en béton armé est long, il est considéré comme ductile. Néanmoins, lorsque le palier de non-linéarité est court, l'élément est considéré comme fragile. Lorsqu'un élément est sous-armé (ayant une quantité d'armature insuffisante), il présentera un comportement fragile. Lorsqu'un élément est trop armé, il est considéré comme rigide (Park R. P., 1975)(KASSOUL, 2015).

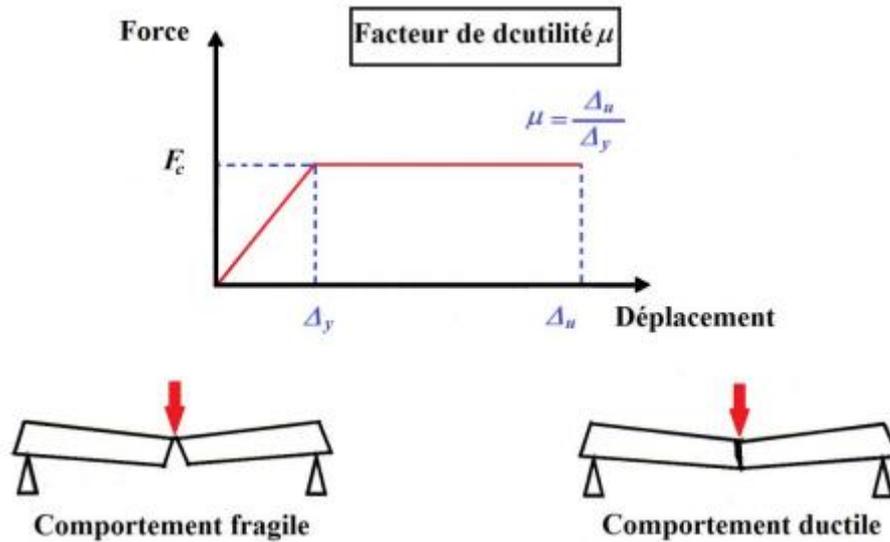


Figure I.5. Différence entre un comportement ductile et fragile (SEBAI, (2011)).

I.6. Différents types de ductilité

L'analyse du comportement des structures nécessite une connaissance des critères caractérisant le domaine non linéaire de la structure et ses composantes, tels que les matériaux constitutifs, les poutres, les poteaux, les voiles, etc. Le Tableau répertorie cinq types de ductilité rencontrés dans la littérature. On explique ensuite ces types de ductilités (V Gioncu, 2000)(KASSOUL, 2015)(Park R. , 1989).

- Ductilité de déformation

La déformation élasto-plastique des matériaux pour divers types de chargement est caractérisée. Le rapport de la déformation de rupture (ϵ_u) et la déformation à la fin de la phase élastique du matériau (ϵ_y) sont utilisés pour déterminer le facteur de cette ductilité ; ou :

$$\mu_\epsilon = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} \dots \dots \dots (I.2)$$

Le béton non confiné est clairement très peu ductile en compression. Un confinement approprié peut améliorer considérablement la ductilité.

- **Ductilité en courbure (Ductilité locale)**

Le facteur responsable de la déformation plastique de la section transversale est exprimé par le rapport de la courbure ultime (φ_u) ou de la courbure à la fin de la phase élastique (φ_y)

$$\mu_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} \dots \dots \dots (I.3)$$

Elle décrit la capacité des sections à rotation. Elle est directement liée à la capacité de rotation ou de déplacement de l'élément.

- **Ductilité des éléments (ductilité en rotation)**

Elle prend en compte les caractéristiques de l'élément complet (poutre avec poteaux), dont le facteur est défini par le rapport entre la rotation ultime (θ_u) et la rotation à la fin de la phase élastique (θ_y) ou :

$$\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y} \dots \dots \dots (I.4)$$

- **Ductilité de structure (ductilité globale, ductilité de déplacement)**

Elle soulève des questions sur le comportement global de la structure. Le rapport du déplacement ultime (Δ_u) représente ce type. et le mouvement à la fin de la phase élastique (Δ_y). Ce facteur reflète généralement le comportement des structures dans les codes parasismiques.

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \dots \dots \dots (I.5)$$

Il est difficile, voire impossible, de déterminer la part de la ductilité dans la capacité à dissiper l'énergie d'une structure prise dans son ensemble.

- **Ductilité énergétique**

Lorsque la ductilité est prise en compte en fonction de l'énergie sismique dissipée. Cette ductilité est le résultat de la combinaison des ductilités mentionnées précédemment. Elle démontre la capacité de la construction à absorber et dissiper l'énergie.

Leur indice est exprimé par le rapport : $\mu_E = \frac{E_p}{E_y} \dots \dots \dots (I.6)$

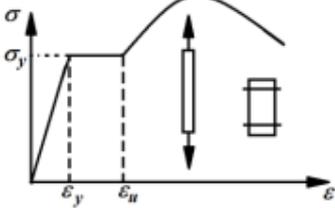
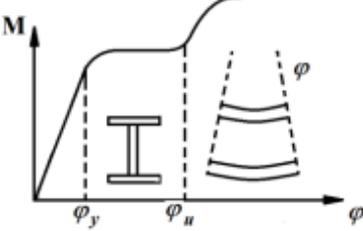
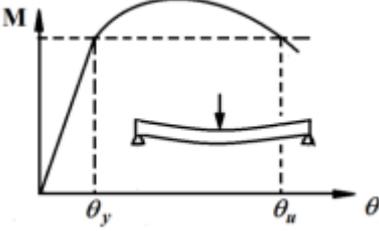
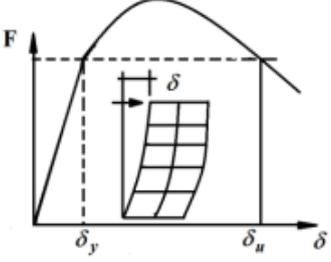
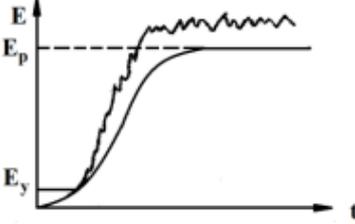
N°	Type de ductilité	Configuration du type	Facteur de ductilité
1	Ductilité de déformation (déformation, ε)		$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon_\mu}{\varepsilon_y}$
2	Ductilité en courbure ou locale (courbure, φ)		$\mu_\varphi = \frac{\varphi_\mu}{\varphi_y}$
3	Ductilité de l'élément (rotation, θ)		$\mu_\theta = \frac{\theta_\mu}{\theta_y}$
4	Ductilité de structure (globale, déplacement, δ)		$\mu_\delta = \frac{\delta_\mu}{\delta_y}$
5	Ductilité énergétique (hystérétique, E)		$\mu_E = \frac{E_p}{E_y}$

Tableau I.1. Différents types de la ductilité (Park R. , 1989)(V Gioncu, 2000)(KASSOUL, 2015).

I.7. Relation entre les différentes ductilités

Relation entre ductilité locale et globale est aussi complexe dans les structures entières. La topologie de la distribution de l'énergie de la structure l'explique. La demande de ductilité locale peut être beaucoup plus importante que la demande globale. Par exemple, un facteur de ductilité global de 4 à 5 pour un pilier de pont correspond à un facteur de ductilité local de 12 à 16 (Elnashai, 2008).

Cette figure montre une corrélation entre la ductilité locale et la ductilité globale.

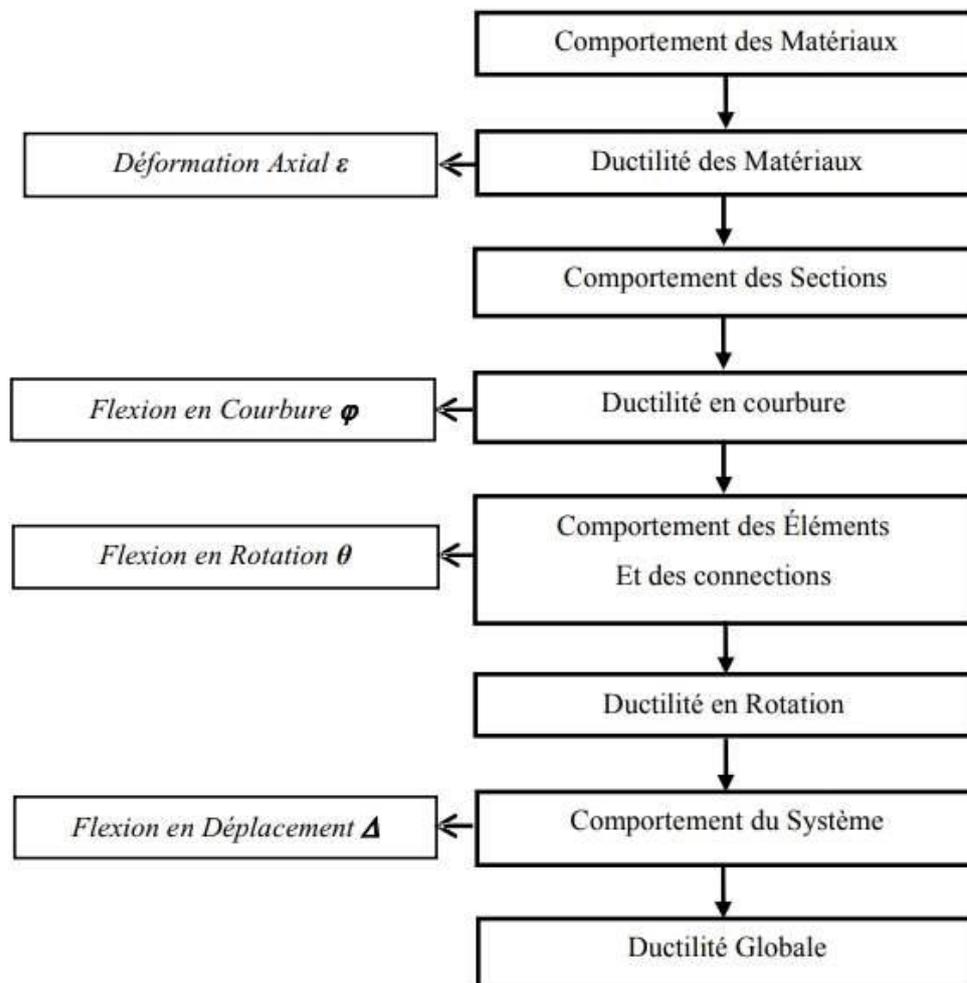


Figure I.6. Relation entre les différents types de ductilités (KASSOUL, 2015).

I.8. Ductilité requise-ductilité disponible

Dans la conception sismique, la limite de ductilité est une valeur cruciale. La ductilité limite est utilisée dans la pratique pour indiquer le taux de ductilité d'un élément ou d'une structure (Bertero, 1988). Les mécanismes de rotules plastiques, les fondations, les séismes majeurs et les types de structures nécessitent une ductilité globale. En revanche, la ductilité locale devrait

être disponible dans les matériaux, les sections transversales, les éléments structuraux et les nœuds.

Ce tableau elle montre ces deux types de ductilité (V Gioncu, 2000) :

Ductilité	
Requise	Disponible
<ul style="list-style-type: none"> - Séisme majeur - Fondation - Type de structure - Type du mécanisme 	<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux - Section - Élément - Nœuds

Tableau I.2. Ductilité requise-ductilité disponible (V Gioncu, 2000).

I.8.1. Ductilité requise

Ductilité requise (Globale)	
Séisme majeur	Réponse de la structure
<p style="text-align: center;">Source</p> <ul style="list-style-type: none"> - Type de séisme, l'intensité sismique - Profondeur du centre 	<p style="text-align: center;">Fondation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Type de fondation - Isolation a la base
<p style="text-align: center;">Distance à la source</p> <ul style="list-style-type: none"> - Distance à la source 	<p style="text-align: center;">Système structural</p> <ul style="list-style-type: none"> - Type de la structure - Mécanise d'endommagement
<p style="text-align: center;">Le site</p> <ul style="list-style-type: none"> - Type de sol - Amplification du sol - Duré de propagation de l'onde 	<p style="text-align: center;">Élément non structuraux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interaction - Limite d'endommagement - Limite de rupture

Tableau I.3. Paramètres influençant sur cette ductilité Requise (V Gioncu, 2000)(KASSOUL, 2015).

La demande de ductilité, également connue sous le nom de ductilité nécessaire, est liée au comportement global de la structure, qui dépend du nombre de rotations plastiques subies par chaque élément au cours du chargement sismique ou cyclique (Park R. , 1989)(V Gioncu, 2000).Les facteurs influençant sur la ductilité requise sont présentés dans le tableau I.3. Les méthodes couramment utilisées pour ce type de ductilité sont les analyses statiques non linéaires (de type push-over) ou l'analyse dynamique non linéaire (V Gioncu, 2000).

I.8.2. Ductilité disponible

Les méthodes d'analyse des structures basées sur la ductilité nécessitent fréquemment l'évaluation de la réponse élasto-plastique. Les déformations inélastiques dans les structures correspondent à la formation de rotules plastiques dans des zones bien définies. Dans ce contexte, la ductilité locale disponible est liée à la capacité de déformation (rotation ou courbure) des matériaux, des sections, des éléments et des nœuds (Park R. , 1989). Plusieurs facteurs, dépendant de la nature du cas en question, ont un impact sur ce type de ductilité. Le tableau 1.4 fournit un résumé clair des paramètres qui affectent la ductilité disponible (locale) des éléments en béton armé et des constructions en charpente métallique (V Gioncu, 2000) (KASSOUL, 2015).

La Ductilité disponible (Locale)	
Élément en béton armé	Assemblage en charpente métallique
<p>Matériaux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Type d'acier, béton - déformation 	<p>Panneaux d'assemblages</p> <ul style="list-style-type: none"> - types de panneaux - mécanisme de cisaillement
<p>Sections transversales</p> <ul style="list-style-type: none"> - type de section - élancement des voiles - interaction des voiles 	<p>Poteaux</p> <ul style="list-style-type: none"> - types de poteaux - mécanisme plastiques
<p>Éléments</p> <ul style="list-style-type: none"> - déformation de raffermissment - flambement - force axial - charge cyclique 	<p>Nœuds</p> <ul style="list-style-type: none"> - types de connections - charges cycliques - mécanisme de plastification locale - l'indice de déformation

Tableau I.4. Paramètres influençant sur cette ductilité disponible (V Gioncu, 2000) (KASSOUL, 2015)

I.9. Ductilité des matériaux

Les matériaux de construction qui subissent un chargement ou une déformation rapide ont généralement une résistance et un module élastique plus élevés que leurs résistances et modules élastiques statiques.

Il semble essentiel de connaître ces changements de propriété et de les prendre en compte lors de l'interprétation des résultats des essais (impacts ou essais similaires) sur des éléments structuraux, ainsi que pour estimer la réponse des structures soumises à ces charges en termes de dimensionnement.

Les travaux de Gold Smith (1960), Johnson (1972), Tsutsumi et Sway dans ce domaine sont remarquables. Les résultats sont expérimentaux sur les propriétés importantes de l'acier et du béton et du changement de ces propriétés, en fonction des paramètres intervenant.

I.9.1. Acier

Il est bien connu que la loi contrainte-déformation de l'acier sous chargement monotone. Cette loi a des composants élastiques, plastiques et écrouis. En acier naturel, il n'y a pas de partie écrouie. Les courbes de contrainte-déformation de différents types d'acier sont représentées à la figure I.7. La loi de traction et de compression est supposée être la même. Les résultats des essais confirment cette hypothèse.

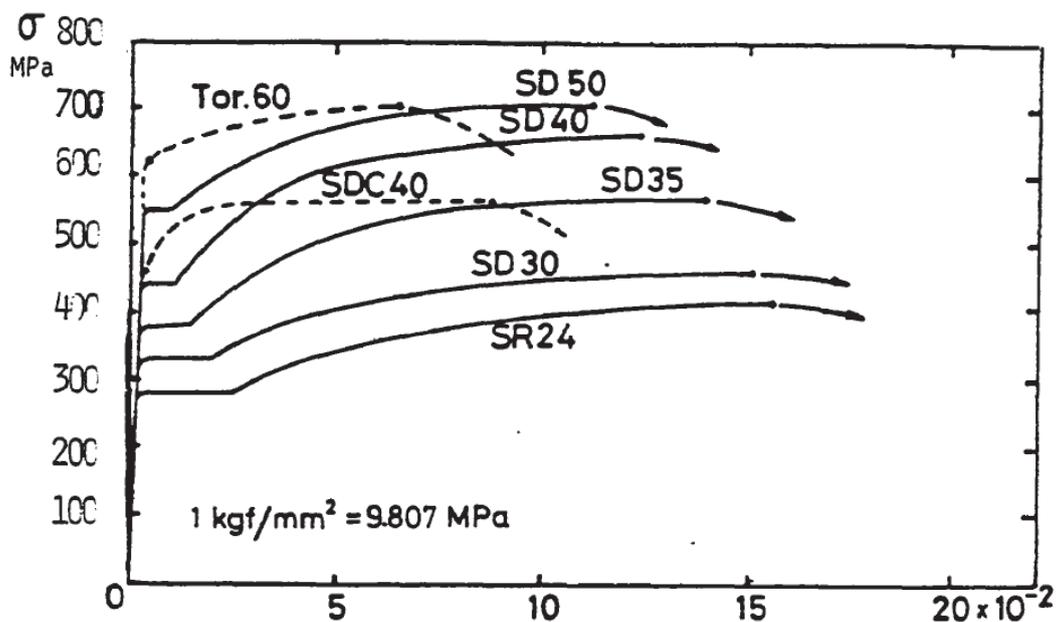


Figure I.7. Courbes contrainte-déformation de quelques types d'acier.

I.9.2. Béton

En règle générale, la résistance à la compression du béton est calculée à l'aide de cylindres dont le rapport hauteur/diamètre est de 2. Les cylindres sont chargés longitudinalement à une vitesse qui atteint la résistance maximale en deux à trois minutes. Le béton a une résistance à la compression de 14 à 56 MPa. La déformation équivalente à la résistance maximale est

d'environ 0.002. La courbe de déformation contrainte en fonction de la résistance à l'allure illustrée sur la figure I.8.

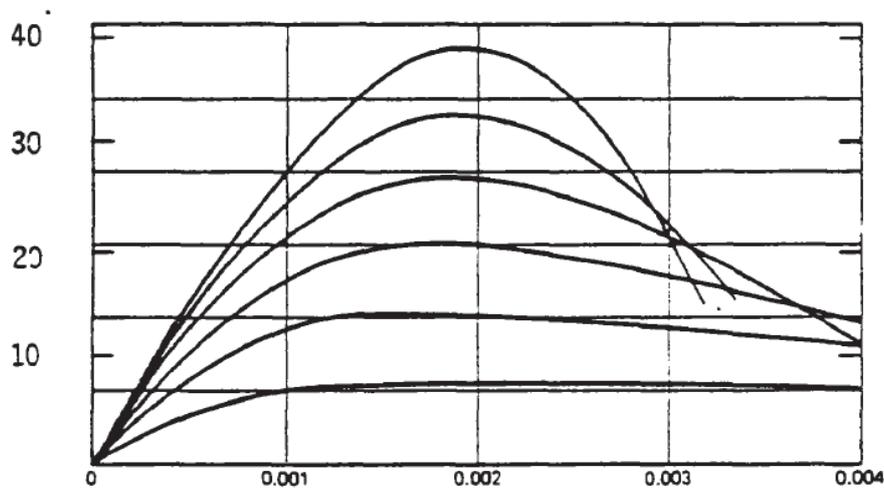


Figure I.8. Courbes contrainte-déformation de cylindres de béton sous Compression uni axiale.

Ces courbes indiquent qu'une augmentation de la pression latérale augmente considérablement la résistance et la ductilité. La ductilité importante de l'acier par rapport au béton est illustrée par la comparaison des diagrammes de contraintes-déformations pour l'acier de construction et pour le béton. Il est important de souligner que le facteur de ductilité d'un degré de liberté d'une structure dépend non seulement de la nature des matériaux constitutifs, mais également du champ des déformations associé à ce degré de liberté. Ainsi, la ductilité en section est significative.

I.10. Classe de ductilité

La ductilité des structures est classée en trois catégories selon l'Euro code 8 (EN 1998-1, 2003), Cela consiste en:

- La classe de ductilité limitée (DCL).
- La classe de ductilité moyenne (DCM).
- La classe de ductilité élevée (DCH).

En imposant des critères de ductilité locale, ce code permet de relier directement la ductilité locale disponible lors du dimensionnement de chaque section à la ductilité globale. Il est à noter que le règlement parasismique Algérien (RPA99/V-2003, 2003) appuie directement ces recommandations sur la conception des structures avec une classe de ductilité élevée (KASSOUL, 2015). Les trois catégories de ductilité sont clairement représentées à la Figure 1.9.

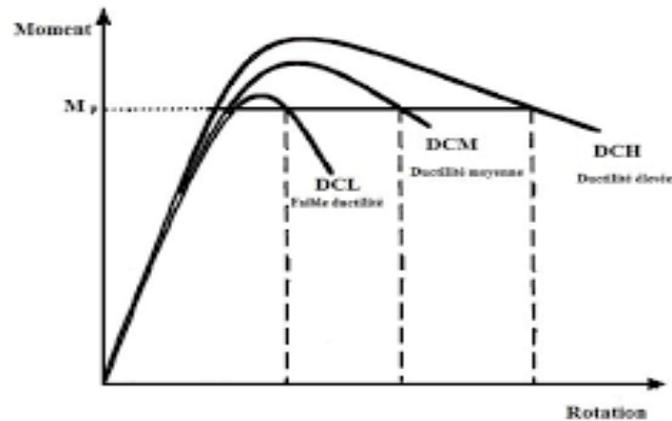


Figure I.9. Classes de ductilité des éléments (Gioncu et Mazzolani (2002) ; Mazzolani et Piluso(1993)).

I.11. Critères requis pour les structures ductiles

Un comportement élastique lors d'un séisme modéré et l'endurance des déformations post-élastiques lors d'un séisme sévère garantissent un niveau de sécurité optimal sans jamais mettre en danger la vie humaine ou l'intégrité structurelle. Le critère de calcul de la force sismique pour les structures ductiles a été établi dans les différents règlements courants sur la base que les structures ductiles seraient aptes à résister à des séismes modérés sans dommages structurels et aptes à résister à des séismes sévères sans s'effondrer mais subissant éventuellement des dommages structurels et non structurels. Ainsi, il est nécessaire de déterminer au préalable le niveau ou la demande de ductilité (R, Aug. 1992).

I.11.1. Mécanismes de ruine

La compréhension des mécanismes de ruine est essentielle dans la conception des structures ductiles, notamment pour répondre aux charges extrêmes et aux contraintes sismiques. Les rotules plastiques, zones de plastification formées sous charges importantes, absorbent l'énergie et préservent l'intégrité structurelle. La position stratégique de ces rotules permet une répartition efficace des contraintes, tandis que le choix des mécanismes de déformation post-élastique favorise un comportement optimal de la structure. En anticipant ces mécanismes, les ingénieurs peuvent concevoir des bâtiments résilients, capables de faire face à des conditions extrêmes tout en garantissant la sécurité et la durabilité des structures (B. Bousalem, Mai 1999.).

I.12. Conclusion

Ce chapitre souligne l'importance de la ductilité dans la science des matériaux, surtout pour les structures de construction. La ductilité, qui permet aux matériaux de se déformer sans se rompre, est essentielle pour assurer la résistance et la flexibilité des structures face à des conditions variées, notamment sismiques. Le chapitre explore les mécanismes, les facteurs influençant la ductilité, et ses manifestations globales et locales. Il montre comment la ductilité permet aux structures d'absorber et de dissiper l'énergie sismique, améliorant leur résilience et sécurité. Les relations entre ductilité et déformabilité, ainsi que les différentes classes et critères de ductilité nécessaires pour les structures, sont également abordées. En conclusion, la maîtrise de la ductilité est cruciale pour concevoir des structures sûres, durables et résistantes aux conditions imprévisibles, posant ainsi les bases d'une ingénierie des matériaux rigoureuse et éclairée.

Chapitre II

Comportement du béton

II.1. Introduction

Les caractéristiques du béton, telles que sa composition, sa formulation, son âge et son environnement, ainsi que les conditions auxquelles il est soumis, jouent un rôle crucial dans son comportement global, complexe et varié.

Ce chapitre explore plusieurs aspects essentiels du comportement du béton, notamment sa résistance à la compression et à la traction, sa durabilité dans diverses conditions environnementales, son retrait et son fluage au fil du temps, sa propension à la fissuration, son adhérence aux armatures et son comportement face aux températures élevées.

II.2. Aperçu sur le comportement du béton

Le béton est un matériau hétérogène composé de granulats et d'une pâte de ciment (ciment et eau). Il n'existe pas de méthode de composition de béton actuellement reconnue comme la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre un certain nombre d'exigences qui sont généralement opposées. Au cours de la fabrication, certaines exigences doivent être respectées :

- Après durcissement, le béton doit avoir une résistance à la compression spécifique.
- Il est nécessaire que les techniques et méthodes utilisées sur le chantier permettent une mise en œuvre facile du béton frais.
- Le béton doit avoir un faible retrait et un faible fluage.
- Le béton doit être le moins cher possible.

Grâce à tous ces avantages, le béton est considéré comme un élément important pour la construction de différents édifices. Il est fréquemment utilisé lors de la construction de bâtiments, de ponts, de barrages et de défenses militaires (pijaudier-cabot, 2005).

II.2.1. Comportement du béton en compression

Les structures soumises à des charges compressives importantes, telles que les fondations, les piliers et les murs, sont souvent construites en béton en raison de sa grande résistance à la compression.

Les essais de compression utilisent des éprouvettes cylindriques de dimensions $\emptyset = 160$ par 320 mm qui sont conservées avant le chargement dans des conditions de température et d'humidité spécifiques. C'est l'essai le plus fréquemment utilisé pour évaluer le comportement du béton. Le comportement est généralement déterminé à partir d'un matériau à maturité, âgé de 28 jours et représenté sur une courbe de déformation contrainte.

Le processus de dimensionnement repose sur l'utilisation des valeurs caractéristiques de la résistance f_c et de la raideur E (module d'Young).

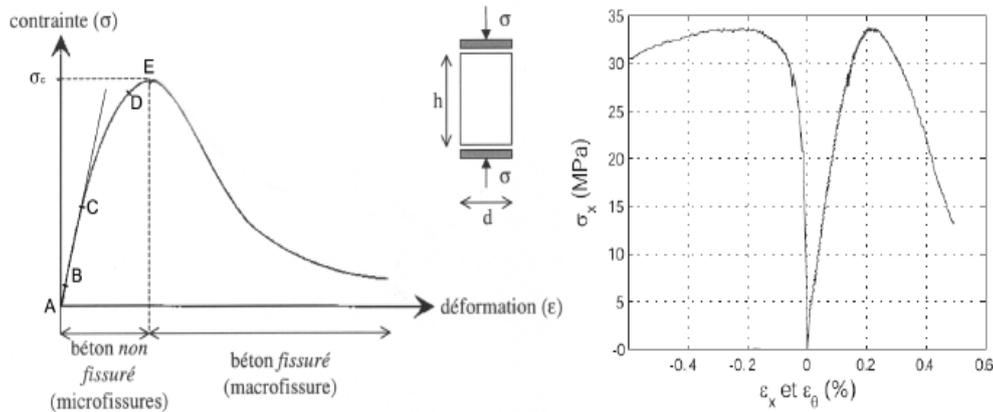


Figure II.1. A Gauche, la courbe de réponse du béton à la compression (Hentz, 2003), a droit, le résultat d'un essai en compression (Vu, 2007)(Shiu, 2008).

La figure II.1 montre l'aspect général de la courbe contrainte - déformation. Dans cette situation, le comportement du béton change en plusieurs étapes. La réponse est principalement presque linéaire jusqu'à des contraintes de 30 à 50 % de la résistance. L'interface entre la pâte de ciment et les inclusions est où les premières fissures peuvent se former à ces niveaux de contrainte (Shiu, 2008). La contrainte augmente toujours après un régime élastique, mais la déformation augmente plus que la contrainte. Le matériau se détériore davantage, ce qui réduit le module tangent. Le nombre de fissures d'interface dans ce domaine de comportement non linéaire peut être considérablement augmenté. Au fur et à mesure que le niveau de contrainte s'approche de la limite de compression simple f_c , le volume de l'échantillon augmente en raison des déformations dilatantes qui se forment dans la direction transversale de l'effort. Avec l'observation d'une fissuration notable, ces déformations deviennent plus importantes que celles mesurées dans la direction de la charge. Des fissures se forment dans la pâte de ciment et se propagent en direction de l'effort. La traction importante perpendiculaire à la direction de l'effort provoque une instabilité interne du matériau (Bazant Z. P., 2000). Ensuite, on atteint rapidement la résistance limite. Lorsque le déplacement est imposé, il y a une zone d'adoucissement au-delà de la résistance ultime qui indique une chute progressive de la capacité portante sous déformation croissante (Shiu, 2008).

II.2.2. Comportement du béton en Traction

Le béton a une résistance en compression relativement faible par rapport à sa traction. Cependant, la capacité à résister à la traction peut être considérablement augmentée en ajoutant des armatures en acier (béton armé), ce qui le rend idéal pour les dalles et les poutres qui sont soumises à des forces de traction.

Parce que le béton est largement utilisé en raison de sa résistance à la compression, il est essentiel d'avoir une compréhension approfondie de ses propriétés en traction afin de fournir une description exhaustive de son comportement matériel. En effet, lorsque les granulats à l'échelle micro sont soumis à un chargement en traction, le béton est souvent endommagé. Ainsi, il est crucial de déterminer la résistance du béton à la traction simple f_t . Il est évident que la réalisation de ce type d'essais est difficile, c'est pourquoi on fait souvent appel à des essais indirects pour obtenir ce comportement. Trois méthodes d'essai distinctes sont présentées dans la figure II.2 pour déterminer la résistance du béton à la traction. Les essais de traction par flexion sont les plus courants. Sur un échantillon avec un élanement de quatre, deux forces concentrées sont appliquées au tiers de la portée. L'essai de traction par fendage, également connu sous le nom d'essai Brésilien, implique l'écrasement d'un cylindre de béton en utilisant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. La pression (P) et la taille de l'échantillon sont utilisées pour calculer la résistance. En appliquant directement la charge sur les deux métaux collés aux extrémités de l'échantillon, l'essai de traction direct peut être effectué. Pour maintenir une contrainte uniforme pendant le chargement, le collage des têtes de traction doit être parfaitement centré.

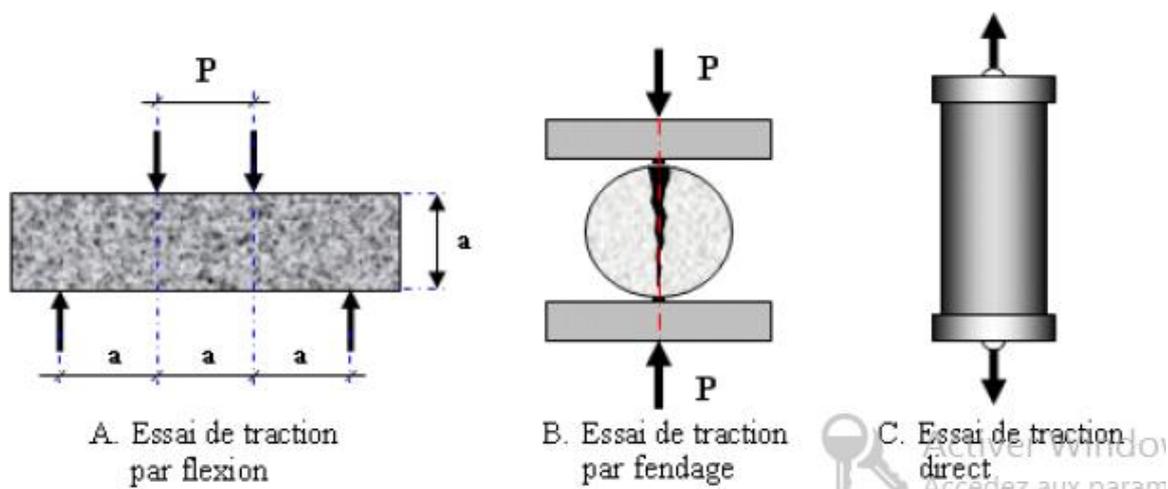


Figure II.2 : Différents essais ont été effectués sur la résistance Du béton à la traction (Phoummavong, 2003)(Shiu, 2008).

Le comportement du béton lors d'un essai de traction uni axial effectué par Terrien (terrien, 1980) est illustré à la figure II.3. Dans cette situation, le comportement du béton est divisé en deux étapes. La progression entre les déformations et les contraintes est linéaire jusqu'au pic de contrainte. Le matériau est élastique. Le matériau reste intègre d'un point de vue microscopique et jusqu'à 40 % de la résistance f_t . À partir d'environ 40 %, voire 60 % de la résistance en traction, des fissures localisées et des points de rupture isolés commencent à se former sur l'éprouvette. Cependant, ces dommages demeurent limités car les fissures restent stables et présentent peu d'évolution. De nombreuses fissures se forment à proximité des inclusions et se propagent vers la pâte de ciment entre 60 et 75 % de f_t . Cette extension reste cependant limitée et stable. Enfin, la connexion de l'ensemble des fissures s'établit rapidement entre 75 et 90 % f_t et jusqu'à f_t en réduisant les zones de résistance sur la section de l'échantillon. La deuxième phase de comportement est causée par cette progression de l'endommagement, qui entraîne une rupture généralement brutale et nette de l'échantillon avec une perte de résistance très rapide (Dhir, 1974). L'essai de traction direct, dans son état ultime, produit une fissure unique, localisée et perpendiculaire à la direction d'effort.

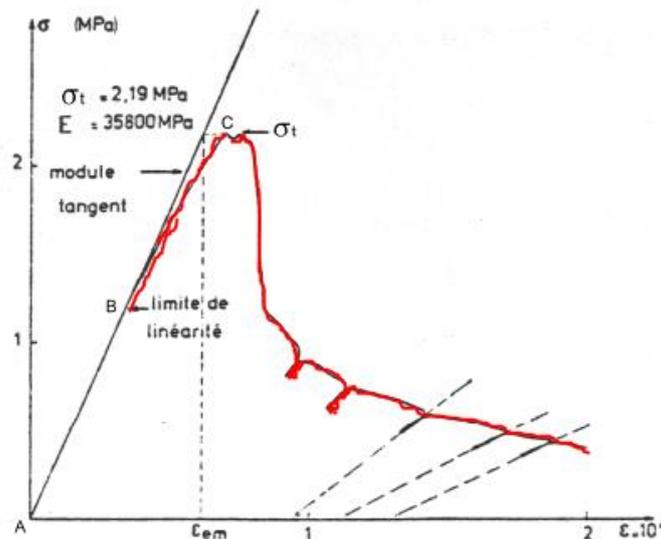


Figure II.3. Courbe de comportement du béton en traction (terrien, 1980)(Shiu, 2008).

II.2.3. Comportement cyclique traction-compression

Le caractère unilatéral du béton est mis en évidence par des essais cycliques de traction-compression. Lors du passage d'un chargement en traction (où la raideur a été endommagée par des fissures) à un chargement en compression, la raideur du matériau est restaurée. Ce comportement est dû au fait que les fissures de traction se referment sous contrainte de compression, ce qui empêche toute interaction avec les fissures de compression qui se

créeront dans une direction perpendiculaire. Le béton reprend son comportement de matériau sain.

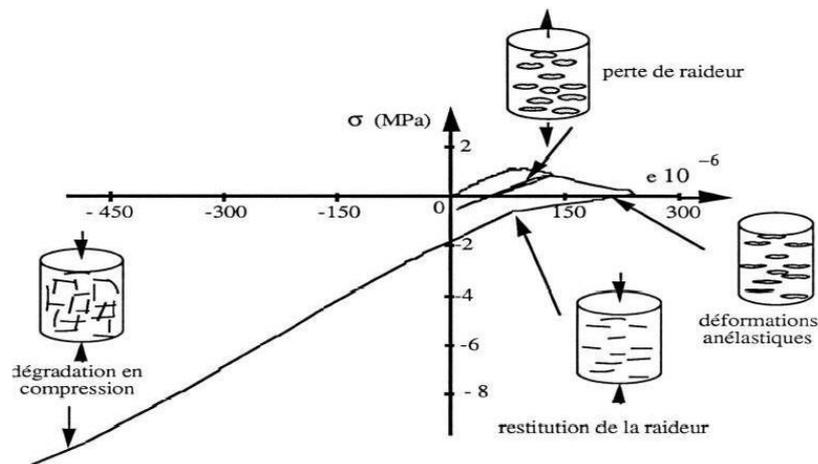


Figure II.4. Essai Comportement uni axiale du béton sous Chargement cyclique (salah, 1990)(ResearchGate).

II.2.4. Comportement en cisaillement

Les granulats du béton brut transfèrent principalement les forces de cisaillement à travers le plan de la fissure. La capacité du béton au cisaillement est déterminée par la largeur de l'ouverture de fissure selon ce mécanisme de transfert de la force de cisaillement. Avec des zones de fissures constantes dans des échantillons de béton non armé, considérant le transfert de cisaillement, (Paulay, 1974) ont démontré expérimentalement que la relation entre la contrainte et la déformation de cisaillement dépend principalement de la largeur de la fissure. La contrainte de cisaillement de glissement est linéaire et la force de pic est d'environ $20 f_c$ si l'ouverture de la fissure est petite (environ 0.125 mm). La rigidité diminue avec l'ouverture plus grande (jusqu'à 0.5 mm). Mais la contrainte de cisaillement maintient une capacité maximale d'environ $0.20 f_c$.

II.3. Aspect de confinement

Le confinement latéral de l'élément est l'un des paramètres qui ont un impact positif sur la ductilité locale. Il joue un rôle important dans l'amélioration et l'augmentation de la résistance de compression du béton ainsi que de sa déformation maximale, ce qui augmente la résistance et la ductilité des éléments. Les cadres carrés ou rectangulaires ou les spirales d'armatures circulaires peuvent être utilisés pour le confinement. Comme plusieurs paramètres l'affectent, suivant (S.M, may-1980)(Park.R, apr-1982)(Priestly MNJ, jan-1987)(Mander J.B, Feb-1988).

- Le pourcentage de volume des armatures transversales
- La résistance limite des armatures transversales.
- La forme des cadres
- L'espace des cadres
- la distribution des armatures longitudinales sur le pourtour de la section de l'élément.

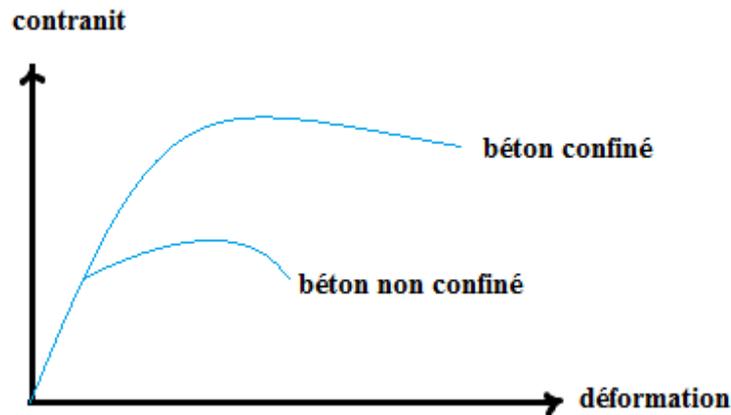


Figure II.5. Comportement de béton confiné (Mander J.B, Feb-1988).

II.4. Types de confinement du béton

Il existe deux catégories de confinement : passif et actif.

II.4.1. Confinement Passif

Le confinement est passif lorsque la pression latérale réagit à l'expansion latérale du béton comprimé par l'effet de Poisson. Ce type de confinement est généralement causé par des armatures transversales, mais il peut également être causé par l'effet des pièces limitrophes (P, 2011).

II.4.2. Confinement actif

L'application d'une pression hydraulique latérale sur la surface d'une éprouvette en béton crée un confinement actif qui augmente la résistance unidirectionnelle (P, 2011).

II.5. Principes de construction du béton armé

Le béton armé est fabriqué en combinant du béton et de l'acier de manière à :

- Le béton (et éventuellement l'acier) absorbe les efforts de compression.
- L'acier absorbe les efforts de traction.

Il est possible de combiner acier et béton en raison de :

- La transmission des efforts entre les deux matériaux est facilitée par l'adhérence de l'acier et du béton.
 - Il n'y a pas de réactions chimiques dangereuses entre le ciment et l'acier.
- En outre, le béton qui recouvre l'acier le protège de la corrosion.

II.5.1. Adhérence béton-acier

Les efforts sont généralement appliqués directement sur le béton dans les structures en béton armé. Le phénomène d'adhérence entre les armatures et le béton transfère ces efforts aux armatures d'acier.

Un test d'arrachement est utilisé pour déterminer la capacité d'adhérence d'une barre en acier au béton (Ramirez.N.D, 2005).

L'adhérence permet aux armatures de transmettre les efforts au béton par contact entre les deux matériaux.

L'adhérence assure trois rôles :

- Elle assure le scellement (ou l'ancrage) des barres (Figure II.6).

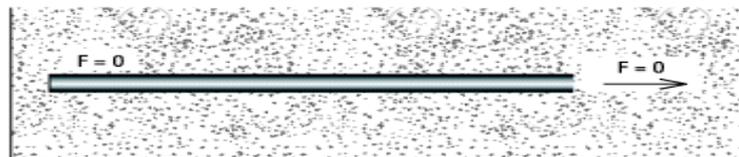


Figure II.6. Scellement de la barre dans le béton (l'ingénieur).

- Elle s'oppose au glissement des barres tendues ;
- Elle distribue la fissuration (Figure II.7).

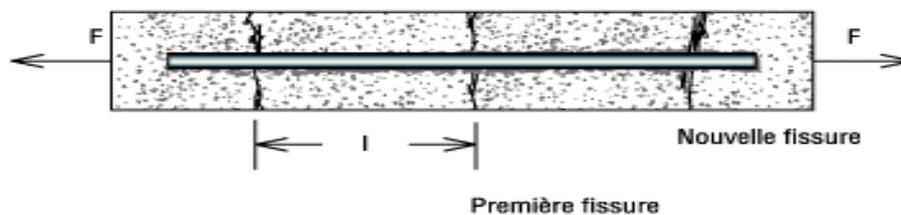


Figure II.7. Distribution de la fissuration (l'ingénieur).

Cet essai démontre que l'adhérence ne résulte pas seulement d'un phénomène de collage entre les deux matériaux, car elle persiste même lors de déplacements notables. En fait, il s'agit d'un phénomène de frottement. L'adhésion est préférable par :

- La qualité du béton d'enrobage : l'adhérence dépend de la résistance à la compression du béton, qui est influencée par le dosage, la classe de ciment et les conditions de vibration (lors du bétonnage).
- La résistance à la traction du béton.
- La surface et la forme de la barre d'acier : les nervures en saillies ou la surface rugueuse améliorent l'adhérence.

II.6. Fissuration de béton

Dans la vie d'un ouvrage en béton, les fissures se produisent fréquemment. Elle peut survenir dans diverses circonstances et compromettre la durabilité et l'apparence de la structure. Voici quelques informations importantes à savoir sur les fissures dans le béton :

II.6.1. Causes de la fissuration

Ressuage : Le béton se tasse et une pellicule d'eau se forme à sa surface lors du séchage. Avant la prise complète du béton, des fissures peuvent être créées par des gros granulats ou des armatures qui entravent ce tassement. Ce phénomène est généralement léger et ne provoque pas de problèmes importants dans les constructions (Canteneur).

Retrait : Bien que différents types de retrait existent à différents stades de vie du béton, ils tous entraînent une diminution du volume du béton en raison des réactions chimiques. Des fissures apparaîtront inévitablement si le retrait est empêché par le frottement. Un bruissement régulier du béton pendant le séchage est envisageable pour limiter le retrait endogène. Parce qu'un mélange de ciment dense aura tendance à se retirer davantage (Canteneur).

Vibration : Si le béton est trop vibré, le ressuage augmente, ce qui entraîne des fissurations plus graves. De nombreuses bulles d'air sont présentes lorsqu'il est trop peu vibré, ce qui facilite la fissuration interne ou externe (Canteneur).

Condition de mise en œuvre : Un béton qui contient trop d'eau perdra beaucoup de résistance et sera plus susceptible de se fissurer. Les conditions climatiques sont également cruciales. Un niveau trop élevé de température entraînera un séchage rapide du béton et une forte dessiccation, ce qui entraînera des fissures. Le béton risque de geler et de devenir cassant si la température est trop basse, ce qui provoque des fissures dans les bétons qui subissent des cycles de gel/dégel. Pour éviter les fissurations causées par le gel ou le dégel, pensez à utiliser des adjuvants entraîneurs d'air si vous habitez dans une zone où les sels de déverglaçâtes sont fréquents et où il gèle beaucoup (Canteneur).

II.7. Durabilité de béton

La capacité du béton à maintenir ses performances structurelles et esthétiques pendant une longue période est appelée durabilité. La durabilité du maintien de ses fonctions doit être assortie d'une durée, temps minimal et raisonnable pour lequel l'ouvrage est conçu qui est appelé la durée de d'utilisation de projet. La prise en compte de cette durabilité permet de valider et justifier la rentabilité de l'investissement. La résistance d'un bâtiment est influencée par divers facteurs, tels que sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, sa construction et sa mise en œuvre, ainsi que les différentes conditions d'utilisation, d'exploitation et de maintenance. Pour garantir cette durabilité, les bétons ont été longuement spécifiés en prenant en compte les performances mécaniques nécessaires à 28 jours, ainsi qu'éventuellement un dosage minimum en ciment. Un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directes ou indirectes, sur l'expérience et sur des recommandations de mise en œuvre, de fabrication et d'entretien constitue la notion de durabilité d'un ouvrage(GUIRAUD, 2018).

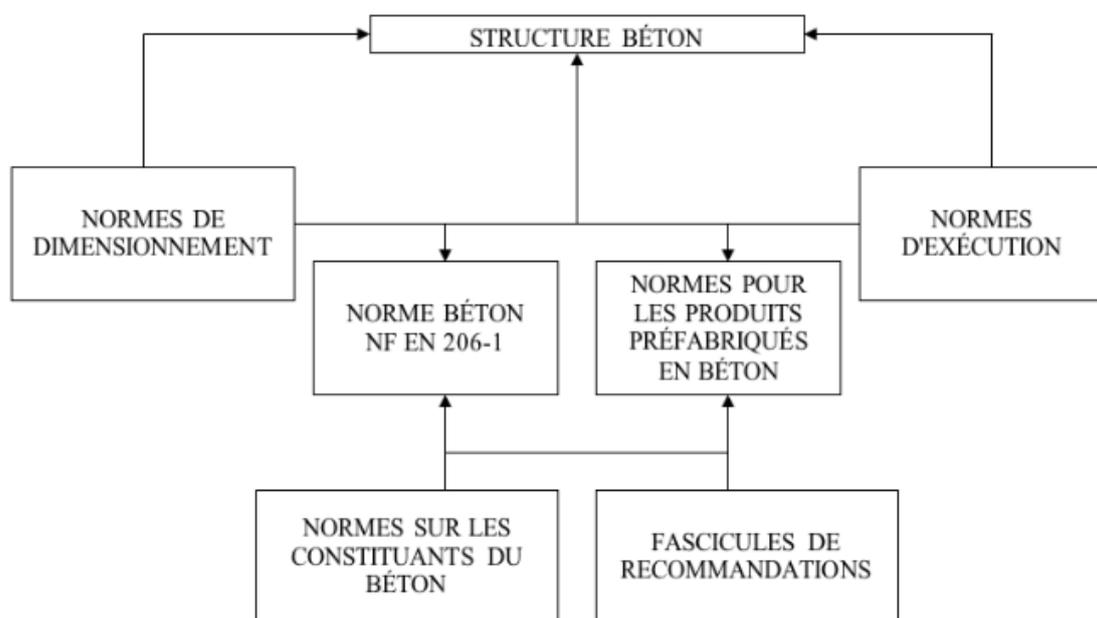


Figure II.8. Le dispositif normatif du béton (GUIRAUD, 2018).

II.8. Aperçu sur le comportement non linéaire des éléments des ossatures en Béton armé

Les portiques en béton armé sont construits en combinant des éléments de poutres et de poteaux pour créer des ossatures auto stables.

Les poutres sont des objets horizontaux qui sont flexionnels. Les poteaux sont sollicités en flexion composée car ils subissent les efforts verticaux par leur propre poids ou par des sollicitations extérieures.

Pour ces éléments, le comportement et le mode de rupture sont gouvernés soit par la flexion, soit par l'effort tranchant, soit par la combinaison des deux. L'élanement, le ferrailage, l'effort tranchant et l'intensité de l'effort normal ont tous un impact sur eux.

La flexion régit le comportement des éléments élancés. En règle générale, la rupture se produit dans la zone de moment fléchissant maximal. En général, leurs ductilités sont assez importantes.

L'effort tranchant domine le comportement des éléments peu élancés. Ils ont généralement une faible ductilité.

II.8.1. Comportement des éléments poutres

En général, les éléments en poutre sont soumis à une simple flexion sans effort Normal. Selon la revue de la littérature, la plupart des études expérimentales ont porté sur des consoles en béton armé, qui représentent la moitié des poutres courantes dans les structures réelles. Par ces études, on peut citer :

- Les essais de Brown et Jirsa (R.H.BROWN and J.O.JIRSA, 1971).
- Les essais de Wight et soza (J.KWIGHT and M.A. SOZEN, 1973).
- Les essais de bertero et popov (POPOV., 1977).

Des séries de consoles rectangulaire, élancées et soumises à un chargement cyclique en flexion simple ont été le sujet de tous ces essais. Les paramètres d'étude sont le ferrailage et l'élanement. A partir de ces essais, on a fait les constatations suivantes :

- Dès que la charge dépasse la résistance à la traction du béton, le comportement des poutres devient non linéaire. Au fur et à mesure que la charge augmente, l'aire des boucles d'hystérésis caractérise la capacité d'absorption et de dissipation d'énergie.

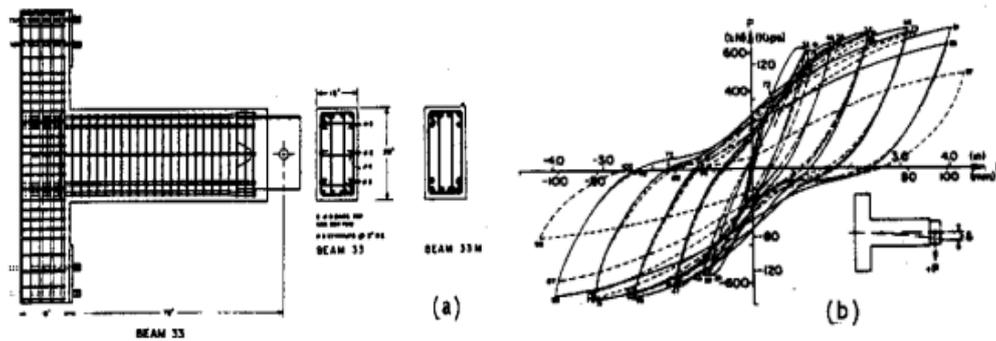


Figure II.9. (a) poutre ferrillée normalement, (b) boucles d'hystérésis

- La fissuration du béton est la principale cause de la dégradation de la rigidité. L'effet de Bauschinger, la dégradation de l'adhérence acier-béton et le cisaillement dans la section critique amplifient cette dégradation. Le style des boucles Lorsque le cisaillement est important, l'hystérésis devient plus pincée.
- La disposition en diagonale des armatures favorise un comportement plus favorable de l'hystérésis, comme le montrent les figures (II.9 et II.10), issues des essais de Bertero et Popov.

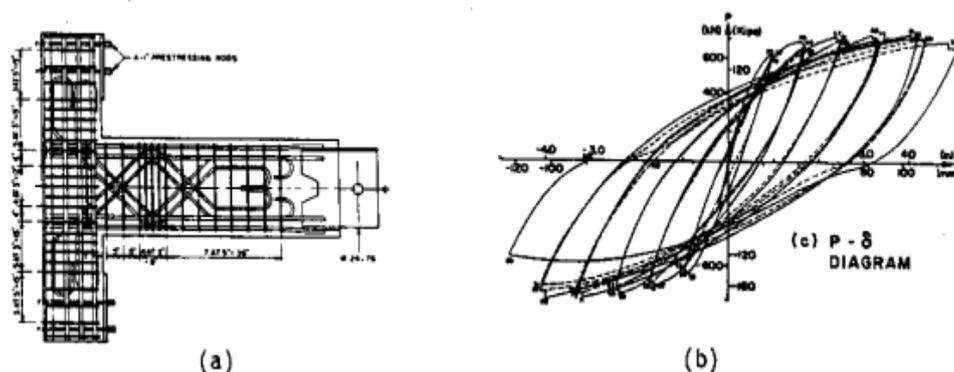


Figure II.10. (a) poutre avec ferrillage diagonal, (b) boucles d'hystérésis

II.8.2. Comportement des éléments poteaux

La seule chose qui distingue les éléments poutres des éléments poteaux est l'existence d'un effort normal pour les premiers. Plusieurs auteurs ont mené des études expérimentales sur le comportement des poteaux en béton armé sous chargement cyclique alterné en tenant compte du paramètre effort normal. Les travaux suivants sont inclus dans ce contexte :

- Essais de Kaverchine et Grelat (M.KAVERCHINE et A.GRELAT, Mai 1979).
- Essais de Park, Priestley et GUI (T.PAULAY, novembre 1978).
- Essais d'Abram (ABAMS.D, 1987).
- Essais de Saatçioğlu et Özcebe (SAATCIOĞLU. M, 1989).

Ces essais ont été menés sur des poteaux en béton armé soumis à des sollicitations cycliques en flexion composée. L'intensité de l'effort normal et la disposition et l'espacement des armatures transversales sont les paramètres pris en considération.

Ces essais ont mis en évidence l'impact de l'espacement des cadres sur la forme de la rupture finale et la courbe de charge - flèche au-delà de la charge maximale.

II.8.3. Comportement des nœuds poutres-poteaux

Les assemblages de poutres à poteaux (ou nœuds) sont conçus de façon à obtenir la plastification des poutres avant celle des poteaux afin d'avoir un comportement ductile des portiques vis à vis des sollicitations sismiques. La géométrie, le confinement du béton et la résistance au cisaillement de l'assemblage déterminent principalement le comportement d'un assemblage de poutres-poteaux. Les études d'Uzumeri (S.M.UZUMERI, 1977) et Zaid et al. (S.ZAID, 1998) font partie des essais réalisés dans ce domaine.

Un mode de rupture d'un assemblage de poutre-poteau et la courbe d'hystérésis correspondante sont représentés à la figure II.11, tirés de [32].

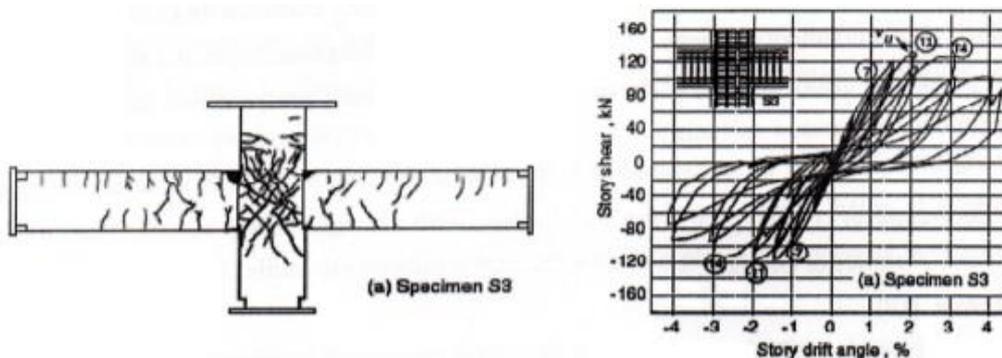


Figure II.11. Comportement des nœuds poutres-poteaux
(a) mode de rupture, (b) comportement d'hystérésis

II.9. Conclusion

La compréhension approfondie du comportement du béton est essentielle pour garantir la robustesse et la durabilité des structures de construction. En examinant les différents aspects du comportement du béton, de sa résistance mécanique à sa capacité à résister à diverses sollicitations, ce chapitre met en lumière l'importance de choisir les formulations appropriées et de mettre en œuvre des pratiques de construction adéquates. En combinant la théorie avec des observations pratiques, il fournit une base solide pour la conception, la construction et la maintenance de structures en béton sûres et durables.

Chapitre III

Calcul de facteur de ductilité

III.1.Introduction

Ce chapitre se consacre à la méthode de calcul du facteur de ductilité en courbure pour les poutres en béton. Il propose une analyse détaillée des différentes étapes de ce calcul, en se concentrant sur les principaux facteurs qui influencent la ductilité des poutres. De plus, il aborde l'impact des bulles d'air sur les performances structurales et explore comment la résistance à la compression du béton peut être déterminée à partir du rapport de porosité et du facteur de ductilité.

III.2. Méthode d'évaluation de facteur de ductilité locale :

III.2.1.Lois de comportement des matériaux

III.2.1.1.Béton

D'après L'Eurocode 2 (Eurocode 2, 2004), la valeur de calcul de la résistance en compression du béton sur cylindre f_{cd} est définie par :

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

Où, le facteur partiel de sécurité pour le béton γ_c 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 (III.1), caractérisé par les relations des contraintes et des déformations suivantes :

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] & \text{pour } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \\ f_{cd} & \text{pour } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

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 :

$$\varepsilon_{cu} (\%) = \begin{cases} 3.5 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ Mpa} \\ 2.6 + 35 \left(90 - \frac{f_{ck}}{100} \right)^4 & \text{pour } f_{ck} > 50 \text{ Mpa} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

n : est un exposant qui prend les valeurs suivantes :

$$n = \begin{cases} 2 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ Mpa} \\ 1.4 + 23.4(90 - f_{ck})^4 / 100 & \text{pour } f_{ck} > 50 \text{ Mpa} \end{cases} \quad \text{(III.4)}$$

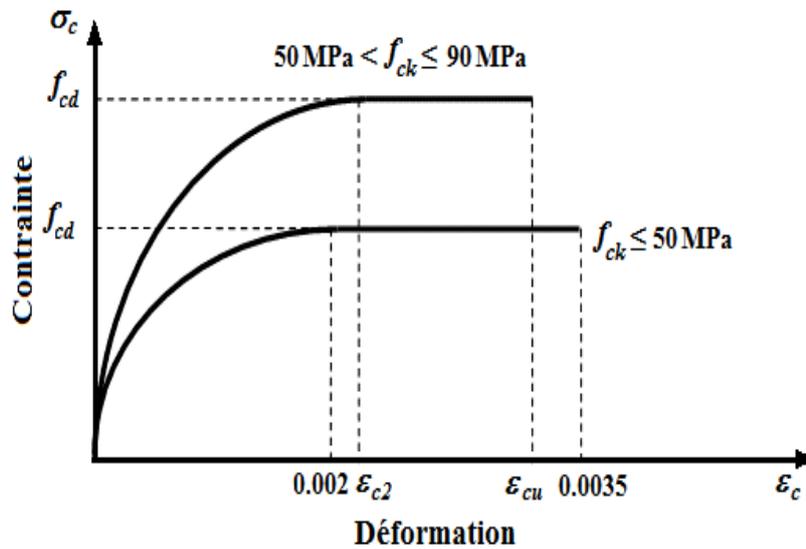


Figure III.1. Diagramme parabole rectangle pour le béton non confiné Sous compression (Eurocode 2, 2004).

III.2.1.2. Acier

Le diagramme contrainte-déformation des aciers schématisé dans la (figure III.2) est distingué par la courbe élasto-plastique bilinéaire, caractérisée par une branche inclinée jusqu'à une déformation égal a $\epsilon_{sy,d}$ et une contrainte de l'armature égale a f_{yd} , ainsi qu'une branche supérieur supposé horizontale jusqu'à la déformation maximale ϵ_{uk} correspondante a la contrainte dans l'armature égale a f_{yk} , Où :

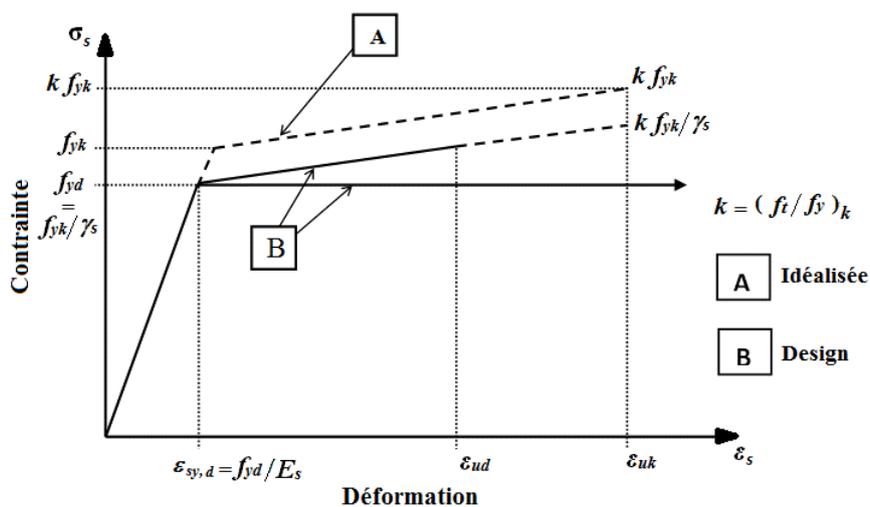


Figure III.2. Diagramme "contrainte – déformation" des aciers du béton armé (Eurocode 2, 2004).

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_s} \quad \text{(III.5)}$$

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

$\varepsilon_{sy,d} = f_y/E_s$ 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 $0.9\varepsilon_{uk}$.

III.2.2. Facteur de ductilité locale

III.2.2.1. Courbure à la fin de la phase élastique

Les contraintes limites dans le béton et les armatures sont souvent responsables de l'utilisation de l'état limite de service dans les poutres en béton armé. Afin d'éviter des fissures longitudinales et des microfissures, la contrainte de compression dans le béton sera limitée à $k_1 f_{ck}$ ($f_{cd} \leq k_1 f_{ck}$), où généralement $k_1 = 0,6$. Afin d'éviter les déformations inélastiques, les fissures et les déformations inacceptable, les contraintes de traction dans les armatures seront limitées à $k_3 f_{yk}$ ($f_{yd} \leq k_3 f_{yk}$), dans notre cas $k_3 = 0,8$ (Eurocode 2, 2004).

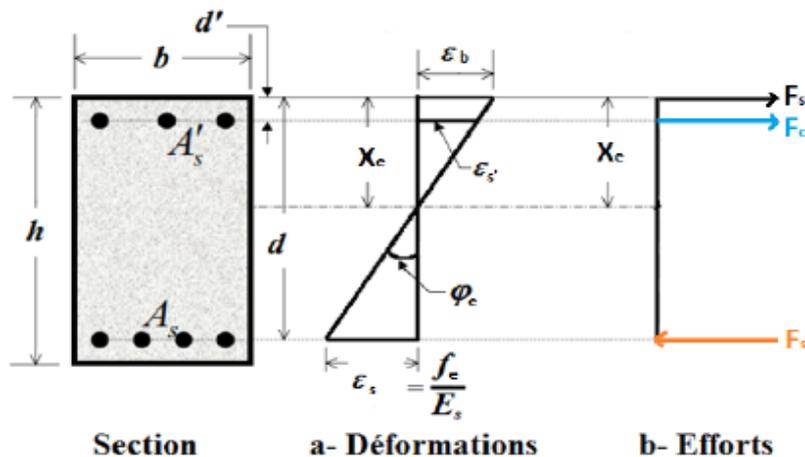


Figure III.3. Comportement d'une section fléchie d'une poutre en béton armé à l'état limite de service (la fin de phase élastique).

La (Figure III.3), illustre une section transversale d'une poutre doublement armée à l'état limite de service, où ξ_y désigne le facteur de la hauteur de la zone comprimée à l'état élastique, d est la hauteur utile de la section et d' est la hauteur de l'enrobage dans la zone comprimée. D'après la Figure III.3, la courbure à la fin de la phase élastique est exprimée par :

$$\varphi_e = \frac{\varepsilon_s}{d - x_e} \quad (III.6)$$

Et, la déformation dans les armatures comprimées ε'_s , s'écrit :

$$\varepsilon'_s = \frac{\varepsilon_s (Xe - d')}{d - Xe} \quad (III.7)$$

Sachant que la contrainte dans les armatures comprimées $\sigma'_s = \varepsilon'_s E_s$, l'équation d'équilibre statique des efforts internes sollicitant la section, dans la (Figure III.3) s'écrit :

$$E_b \varepsilon_b A_b + E_s \varepsilon'_s A'_s = \sigma_s A_s \quad (III.8)$$

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

$$\varepsilon_b = \frac{F_e}{E_s} \frac{Xe}{d - Xe} \quad (III.9)$$

$$E_b \frac{\varepsilon_s Xe}{d - Xe} (b \cdot Xe) + E_s \frac{\varepsilon_s (Xe - d')}{d - Xe} A'_s = E_s \varepsilon_s A_s \quad (III.10)$$

$$E_b \frac{F_e}{E_s} \cdot b \cdot \frac{Xe^2}{(d - Xe)} + E_s \frac{F_s (Xe - d')}{E_s (d - Xe)} A'_s = E_s \varepsilon_s A_s = F_s A_s \quad (III.11)$$

$$\varepsilon_s = \frac{F_s}{E_s} \quad (III.12)$$

$$\left(E_b \frac{F_e}{E_s} \cdot b \cdot \frac{Xe^2}{(d - Xe)} + E_s \frac{F_s (Xe - d')}{E_s (d - Xe)} A'_s = F_s A_s \right) \times \frac{(d - Xe)}{F_s} \quad (III.13)$$

$$\frac{E_b}{E_s} \cdot b \cdot Xe^2 + (Xe - d') A'_s - A_s (d - Xe) = 0 \quad (III.14)$$

$$\frac{E_b}{E_s} \cdot b \cdot Xe^2 + A'_s Xe - A'_s d' - A_s d + A_s Xe = 0 \quad (III.15)$$

$$\frac{E_b}{E_s} \cdot b \cdot Xe^2 + (A'_s + A_s) Xe - (A'_s d' + A_s d) = 0 \quad (III.16)$$

Où, $\rho = \frac{A_s}{bd}$ est le pourcentage d'armatures tendues, et $\rho' = \frac{A'_s}{bd}$ est le pourcentage d'armatures comprimées.

Le calcul du facteur (Xe) peut se trouver, en trouvant la solution de l'équation (16).

III.2.2.2. Courbure à l'état limite ultime

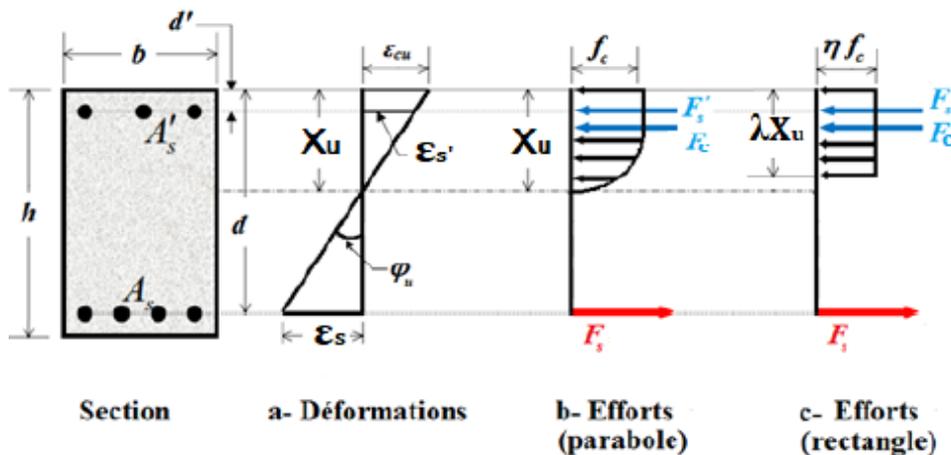


Figure III.4 : Comportement de la section d'une poutre fléchie en béton armé à l'état limite ultime.

D'après la Figure III.4, la courbure à l'état limite ultime est exprimée par :

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{X_u} \quad (\text{III.17})$$

$$\varepsilon'_s = \frac{\varepsilon_{cu}(X_u - d')}{X_u} \quad (\text{III.18})$$

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

$$\eta = \begin{cases} 1,0 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ Mpa} \\ 1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200} & \text{pour } 50 \text{ Mpa} < f_{ck} \leq 90 \text{ Mpa} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Et λ est le facteur de la hauteur effective de la zone comprimée (figure III.4). D'après l'Eurocode 2 (Eurocode 2, 2004), il s'exprime par :

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ Mpa} \\ 0,8 - \frac{f_{ck} - 20}{400} & \text{pour } 50 \text{ Mpa} < f_{ck} \leq 90 \text{ Mpa} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

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

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

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

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

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

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

Dans l'étape suivante, on obtient le facteur de ductilité locale (ductilité en courbure) par le rapport entre la courbure à l'état ultime déterminée en (17) et la courbure à la fin de la phase élastique déterminée en (6):

$$u_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_e} \quad (\text{III.25})$$

III.3. La relation entre porosité et résistance du béton

Il est bien connu que le comportement mécanique d'un matériau de construction dépend principalement de sa structure composite. La présence de pores peut nuire aux propriétés mécaniques du matériau telles que la résistance à la rupture, l'élasticité et les déformations au fluage. Le béton poreux, qui diffère du béton conventionnel, présente un grand volume de vides d'air.

La résistance à la compression du béton poreux a été testée. Ces tests pourraient être utilisés comme indice pour caractériser la capacité mécanique du béton poreux dans cette étude. D'autre part, la structure des pores d'un matériau poreux peut être caractérisée par un certain nombre de paramètres. Notamment la taille des pores, la connectivité des pores, la rugosité de la surface des pores et la fraction volumique des pores (porosité).

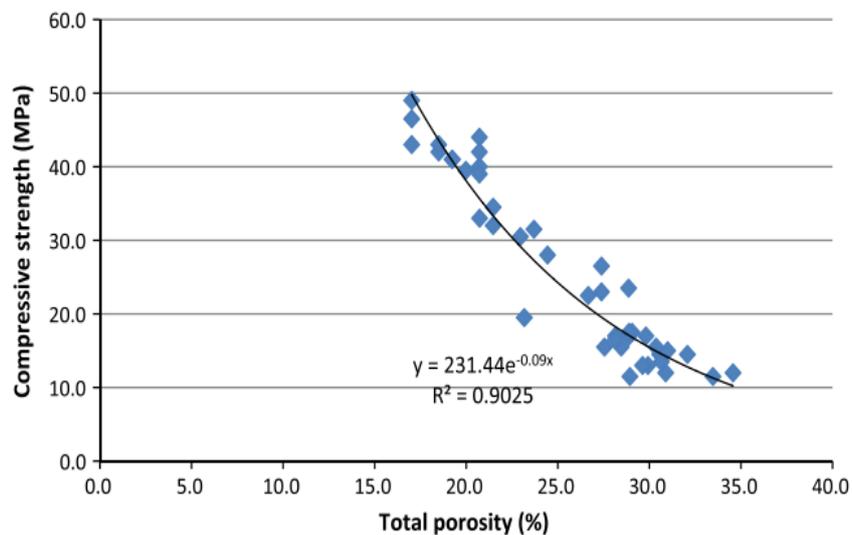


Figure III.5. Relation entre résistance à la compression et porosité totale(Lian, 2011).

Parmi ceux-ci, la porosité est considérée comme le paramètre principal des microstructures des matériaux poreux. Généralement, la résistance d'un matériau poreux est influencée par la porosité, les autres paramètres énumérés ci-dessus ayant moins d'influence. Ainsi, dans cette étude, la porosité est choisie comme variable indépendante liée à la résistance du matériau. L'objectif de cette étude est d'établir une relation quantitative entre la porosité et la résistance à la compression du béton poreux(Lian, 2011).

D'après la figure III.5, la résistance à la compression est exprimée par :

$$f_c = 231,44 \times (e^{-0.09 \cdot P}) \quad (\text{III.26})$$

Où, P il est représenté la porosité, Et c'est confiné entre $15\% \leq P \leq 35\%$.

D'après cette relation, l'effet de la porosité est quantifié comme suit :

$$E_p = 324.26.(P^{-2.135}) \quad (\text{III.27})$$

Enfin, la résistance du béton poreux est obtenue à partir des deux équations (26) et (27) comme suit :

$$f_{cp} = f_c \cdot E_p \quad (\text{III.28})$$

III.4. Conclusion

Ce chapitre a présenté une méthode détaillée pour le calcul du facteur de ductilité en courbure des poutres en béton. En examinant les lois de comportement des matériaux, il a été montré comment les propriétés du béton et de l'acier influencent la ductilité des structures en béton armé. Les différentes étapes du calcul, y compris les contraintes et les déformations maximales, ont été décomposées et expliquées.

En outre, l'impact des bulles d'air sur les performances structurelles a été abordé, révélant que la porosité est un facteur clé influençant la résistance à la compression du béton. Une relation quantitative entre la porosité et la résistance du béton a été établie, soulignant l'importance de la microstructure du béton poreux.

Ces analyses permettent de mieux comprendre les facteurs qui affectent la ductilité des poutres en béton et fournissent des outils pour améliorer le dimensionnement et la durabilité des structures en béton armé.

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1.Introduction

La ductilité des poutres en béton armé est essentielle pour la capacité des structures à absorber l'énergie et à résister aux déformations lors des événements sismiques. Ce chapitre présente une étude paramétrique détaillée visant à analyser l'impact de la porosité (présence de bulles d'air) sur la ductilité des poutres en béton armé. Nous avons examiné des bétons avec des résistances à la compression variant de 20 MPa à 50 MPa, couvrant ainsi l'éventail des bétons ordinaires. Par ailleurs, la limite élastique de l'acier a été ajustée entre 400 MPa et 600 MPa, et le taux d'armatures tendues a été modifié entre 0,5 % et 4 %, conformément aux recommandations des normes en vigueur.

Cette étude explore non seulement l'effet de la porosité sur la ductilité des poutres, mais également l'influence du taux d'armatures tendues et de la résistance à la compression du béton. Enfin, nous proposons une solution innovante pour restaurer le niveau de ductilité en utilisant la vibration du béton pour réduire la porosité pendant le coulage, suivie d'un renforcement par chemisage. Cette méthode permet de renforcer les poutres, rétablissant ainsi leur capacité de déformation et de résistance, tout en augmentant la durabilité et la sécurité des structures en béton armé.

IV.2.Interprétation des résultats du tableau IV.1

Le tableau IV.1 présente une comparaison de la ductilité locale des poutres en béton armé avec différents niveaux de porosité. Les colonnes du tableau comprennent des paramètres tels que la résistance à la compression du béton (f_{ck}), la distance à la fibre la plus tendue (d), le taux d'armatures tendues (ρ), la limite élastique de l'acier (f_{yk}), et le facteur de ductilité en courbure pour différents niveaux de porosité (0%, 20%, 30%). Les résultats expérimentaux (Exp) sont comparés aux prédictions des codes ACI (américain) et CSA (canadien) et la présente méthode.

A partir du tableau, on peut observer que les facteurs de ductilité expérimentaux varient de 2.07 à 11.84, ce qui indique une large gamme de ductilité en fonction des caractéristiques des poutres. Les valeurs calculées selon les méthodes théoriques (ACI, CSA et la présente méthode) sont généralement plus faibles que les valeurs expérimentales, suggérant que ces normes sont peut-être conservatrices.

La présence de porosité réduit significativement la ductilité des poutres en béton. Par exemple, pour la poutre 1, la ductilité passe de 3.53 (0% de porosité) à 1.36 (30% de

porosité). Cela démontre que la porosité affaiblit le matériau, le rendant moins capable de se déformer sans casser.

Pour optimiser la ductilité et la performance sismique des structures, il est crucial de minimiser la porosité par des techniques appropriées lors du coulage du béton et de choisir des matériaux et des taux d'armatures adaptés

Tableau IV.1. Comparaison de la ductilité locale des poutres en béton armé avec son porosité

N° Poutre	f_{ck} (MPa)	d (mm)	d' (mm)	ρ (%)	ρ' (%)	ρ/ρ'	f_{yk} (MPa)	Facteur de ductilité en courbure (Locale)					
								Résult Exp	ACI	CSA	Présente méthode		
											Porosité		
											0 %	20 %	30 %
1	73.65	256	40	4.103	2.0515	0.5	400	4.33	2.75	3.51	3.53	3.12	1.36
2	66.81	266	40	4.773	2.3865	0.5	400	-	2.07	2.65	2.99	2.48	1.12
3	77.72	258	42	5.851	2.9255	0.5	400	3.38	1.76	2.18	2.45	2.25	1.02
4	56.31	254	42	0.61	0.61	1	398	11.84	9.89	11.91	12.74	10.27	6.04
5	69.5	254	42	0.61	0.61	1	398	10.25	19.13	23.98	11.26	10.80	6.46
6	63.48	250	47	1.25	0.61	0.488	401	6.84	6.68	8.13	6.76	5.12	2.15
7	70.5	250	47	1.25	0.61	0.488	401	5.38	8.22	10.31	5.99	5.02	2.10
8	63.21	251	42	2.03	1.01	0.4975	373	5.75	5.53	6.87	5.93	4.34	2.00
9	70.8	251	42	2.03	1.01	0.4975	373	4.52	5.34	6.65	4.68	3.92	1.76
10	71.45	250	47	2.51	1.24	0.494	401	5.60	4.75	5.87	5.08	4.41	1.84
11	72.8	250	47	2.51	1.24	0.494	401	2.82	3.64	4.48	3.10	2.58	1.16

IV.3. Interprétation des figures

Les figures IV.1, IV.2 et IV.3 illustrent l'évolution de la ductilité locale des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, pour différentes configurations de taux d'armatures tendues et comprimées. La résistance à la compression du béton est fixée à 20 MPa, tandis que la limite d'élasticité est prise égale 400, 500 et 600 MPa, respectivement. Les résultats des figures montrent que la ductilité locale des poutres en béton armé diminue lorsque le taux de porosité augmente. Cette diminution de la ductilité locale est due à la présence de pores dans le béton, qui affaiblissent la matrice et réduisent la capacité du béton à se déformer plastiquement. La résistance du béton à la compression a également un effet important sur la ductilité locale. La diminution de la ductilité locale est plus importante que pour les figures

présentant un faible taux d'armatures, ce qui indique que les armatures tendues et de compression ont un effet important sur la ductilité locale. Ces résultats ont des implications importantes pour la conception des structures en béton armé. Il est important de prendre en compte le taux de porosité du béton lors de la conception des structures, afin de s'assurer qu'elles ont une ductilité locale suffisante pour résister aux charges appliquées.

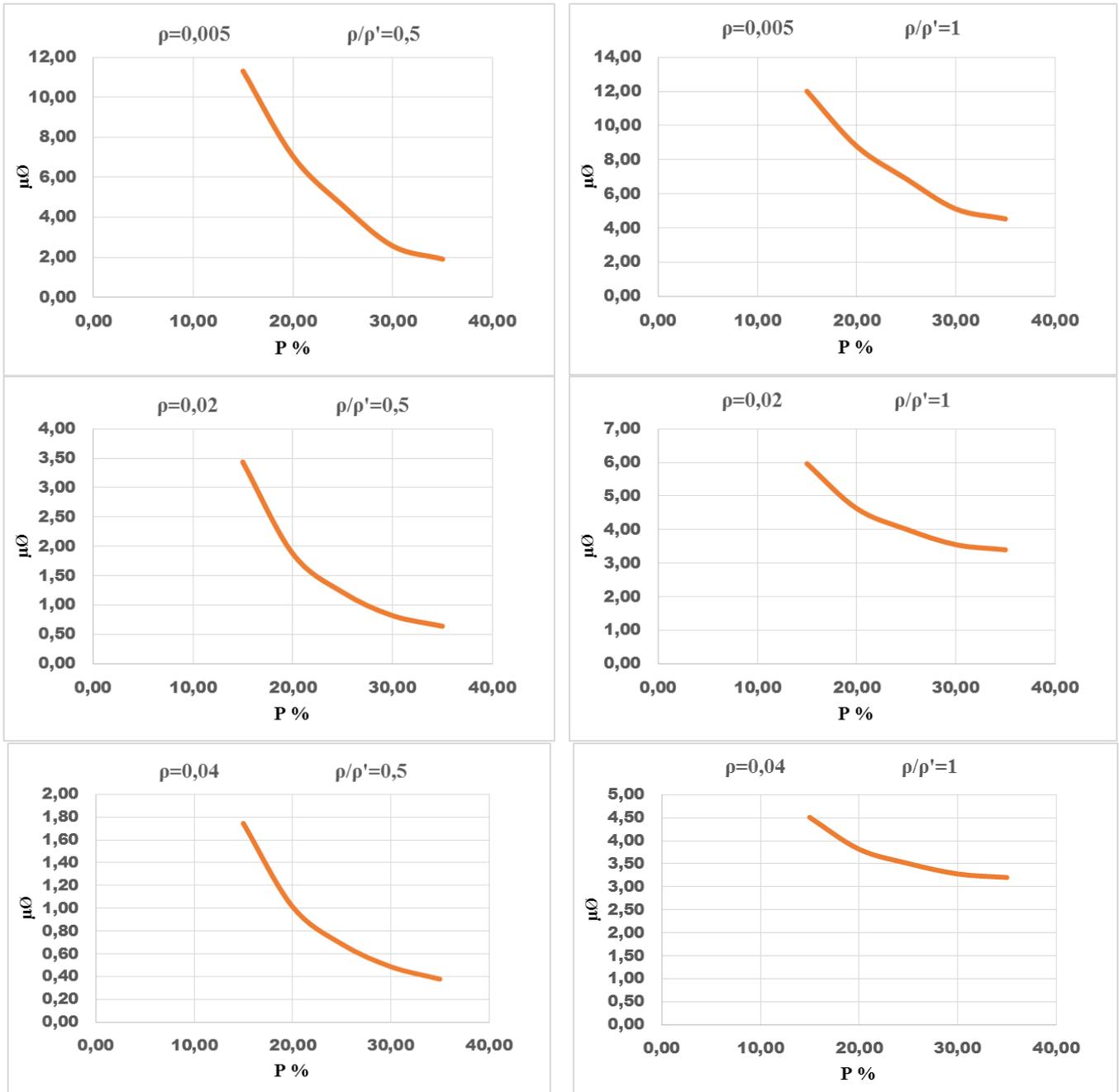


Figure IV.1. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 20 \text{ MPa} ; F_e = 400 \text{ MPa}$$

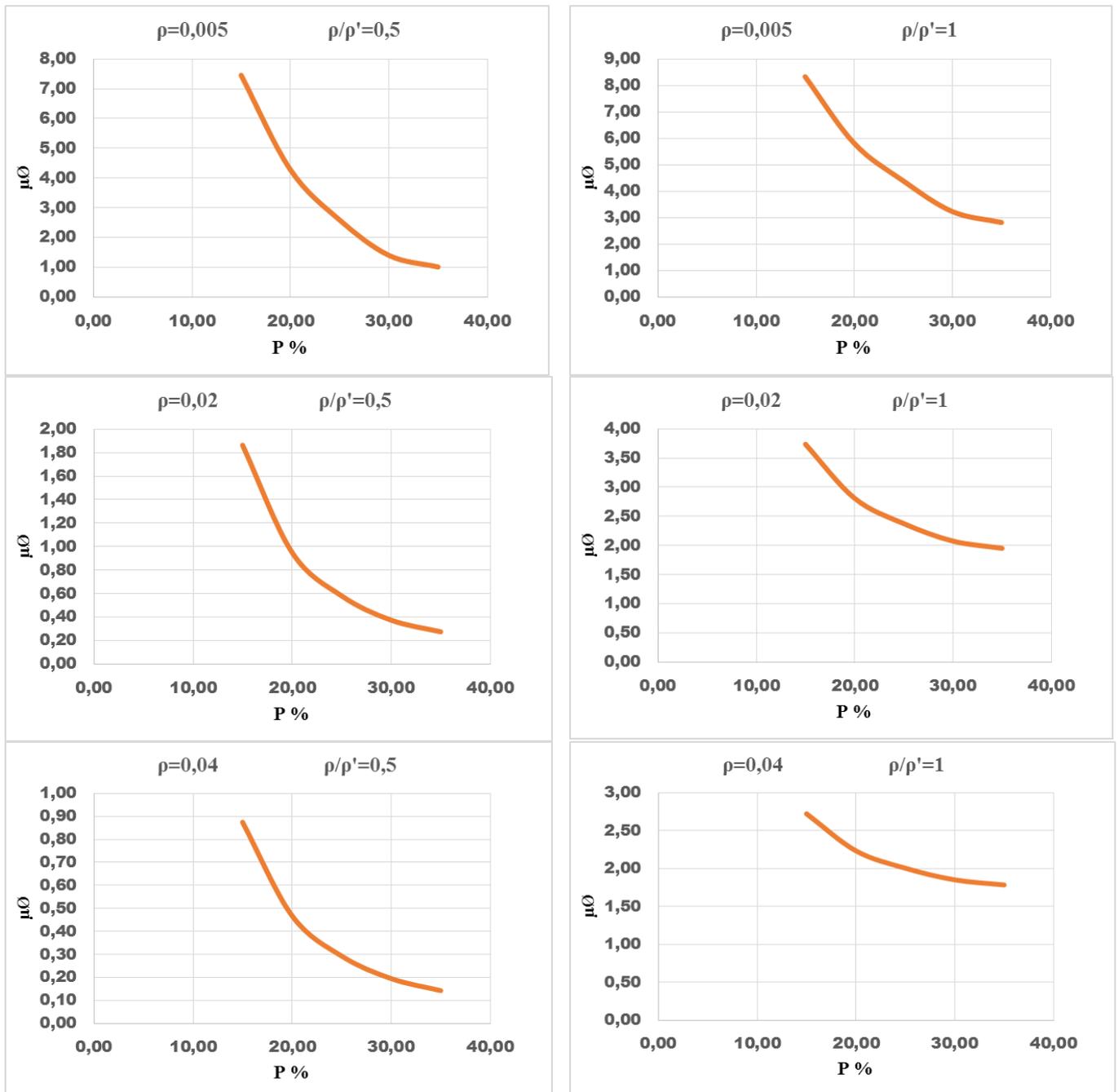


Figure IV.2. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 20 \text{ MPa} ; F_e = 500 \text{ MPa}$$

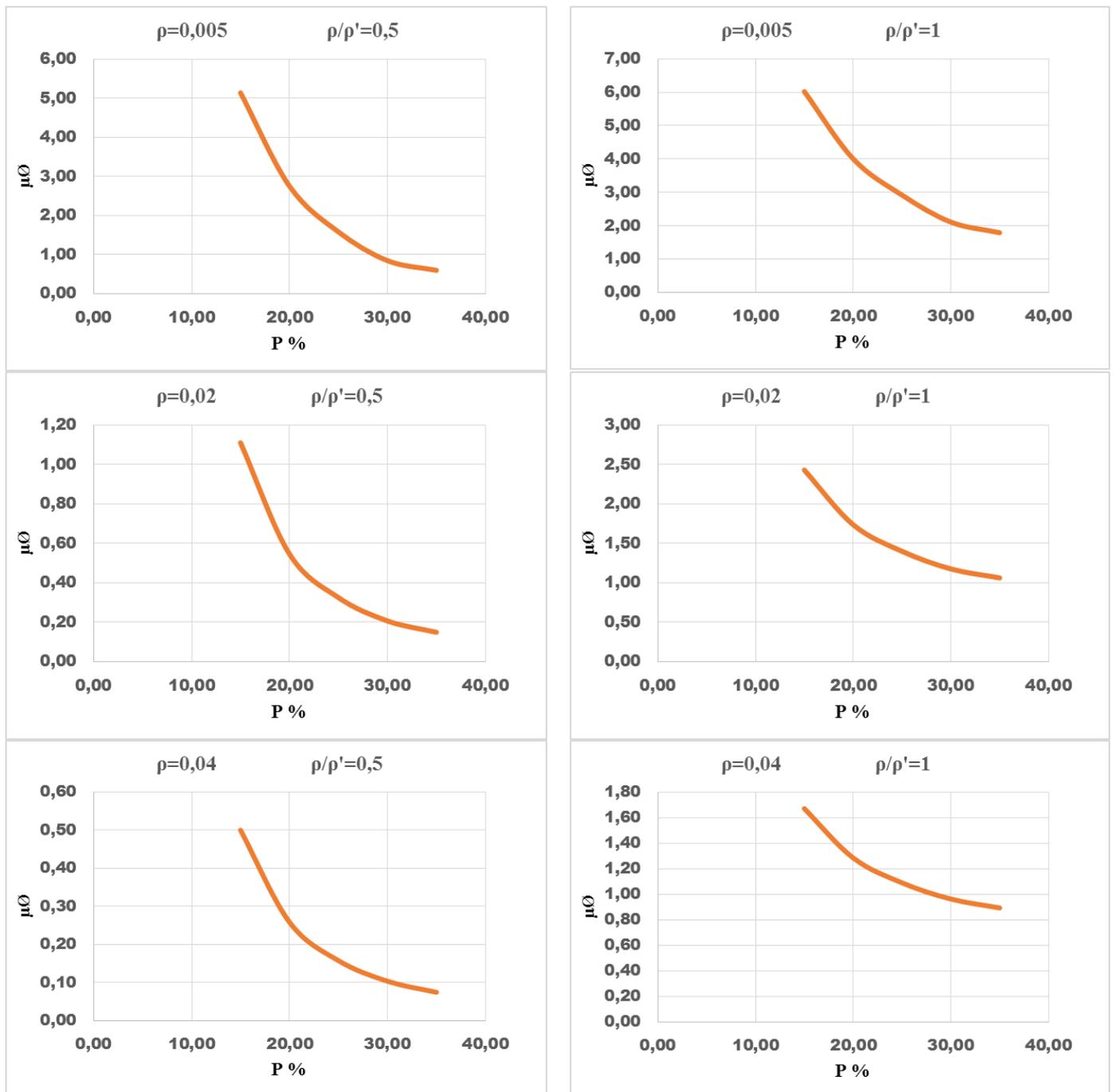


Figure IV.3. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 20 \text{ MPa} ; F_e = 600 \text{ MPa}$$

L'évolution de la ductilité locale des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité est illustrée dans les figures IV.4, IV.5 et IV.6, pour différentes configurations de taux d'armatures tendues et comprimées. Le béton est défini comme ayant une résistance à la compression de 30 MPa, tandis que la limite d'élasticité est de 400, 500 et 600 MPa. Il est

important de souligner que la ductilité locale est la plus élevée pour un taux de porosité de 10% et la plus faible pour un taux de porosité de 40 %. La ductilité locale est davantage influencée par le taux de porosité pour les poutres avec un faible taux d'armatures tendues. La ductilité locale du béton est favorisée par sa résistance à la compression.

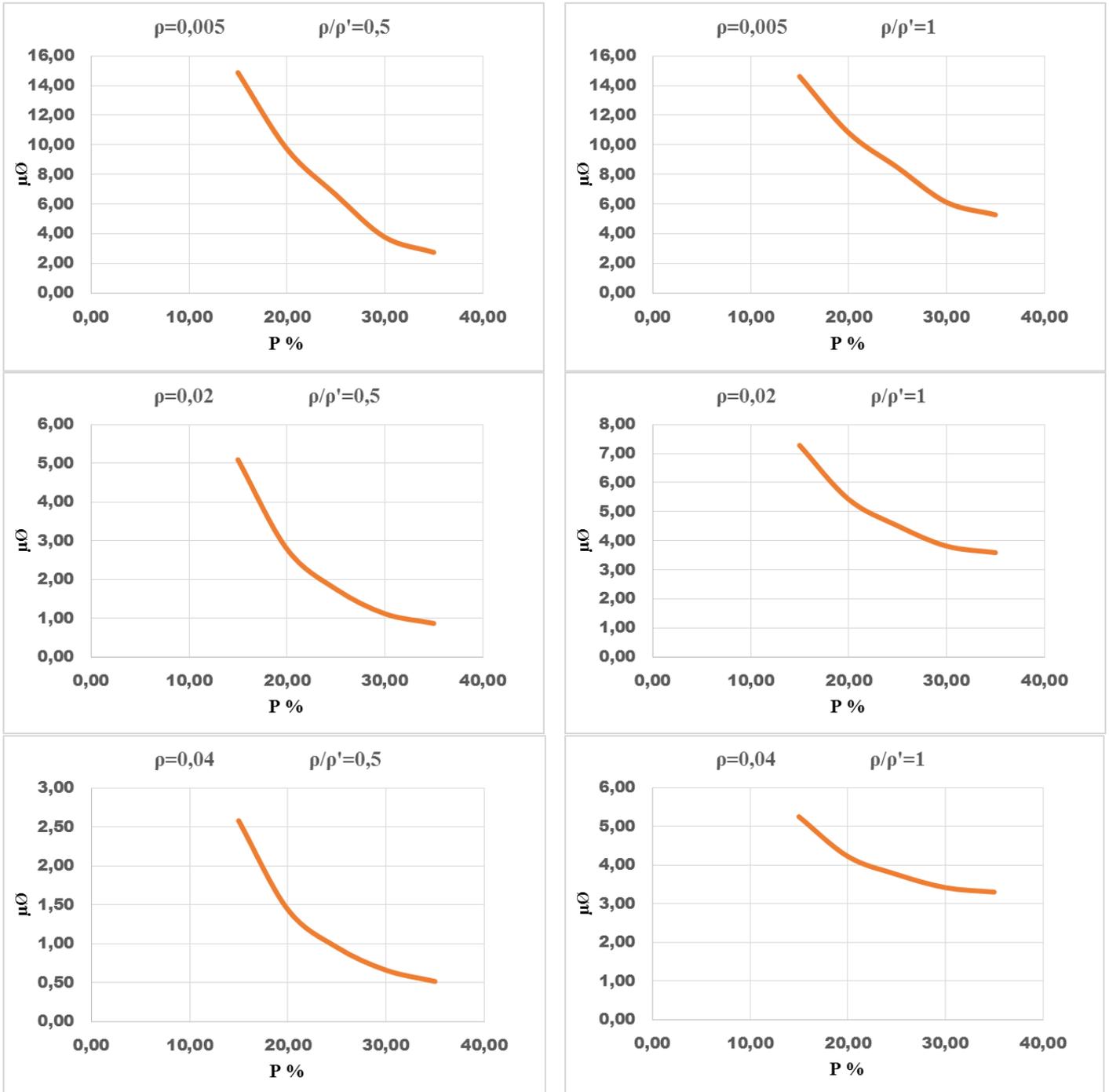


Figure IV.4. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 30 MPa ; F_e = 400 MPa$$

*

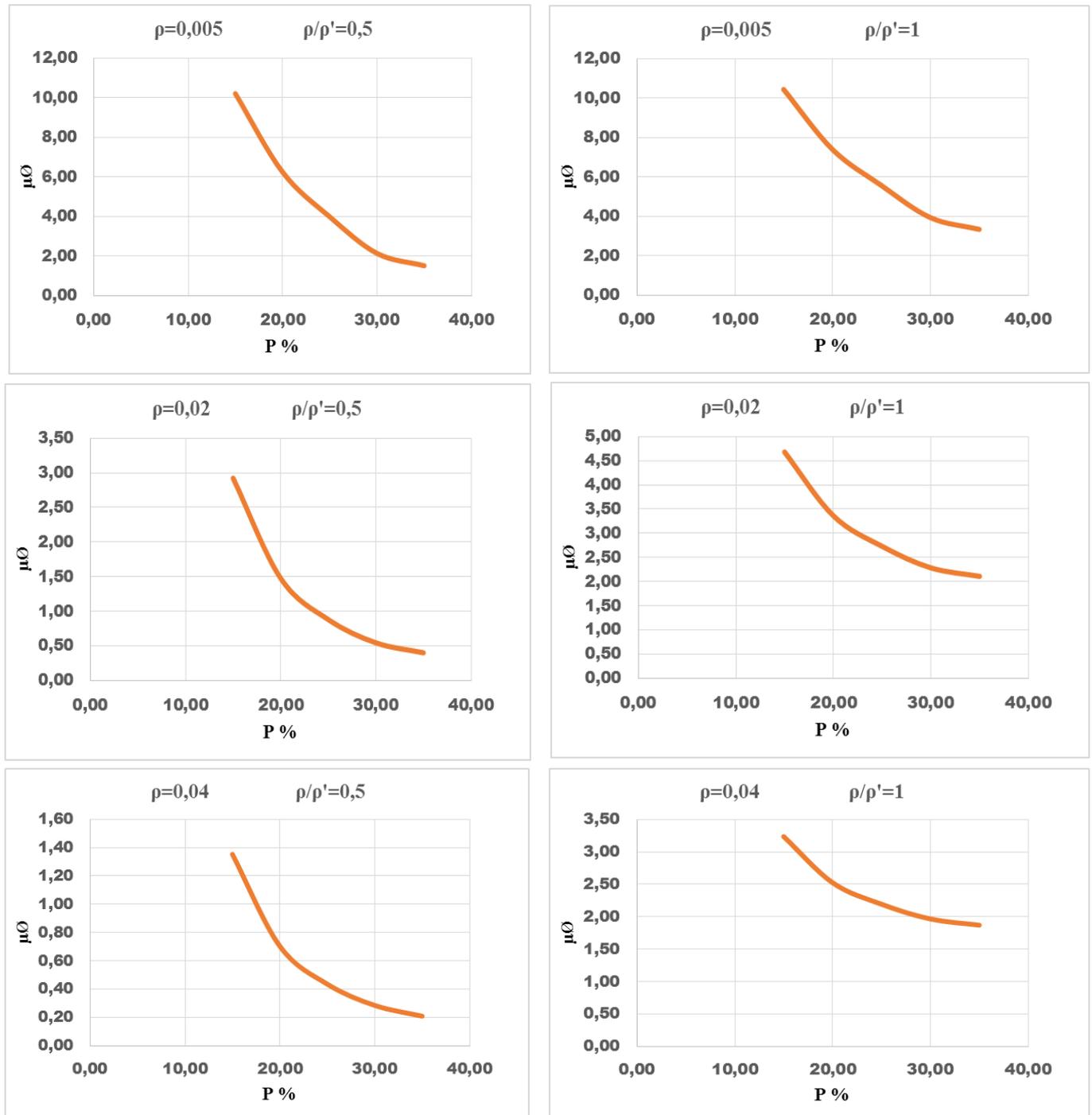


Figure IV.5. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 30 \text{ MPa} ; F_e = 500 \text{ MPa}$$

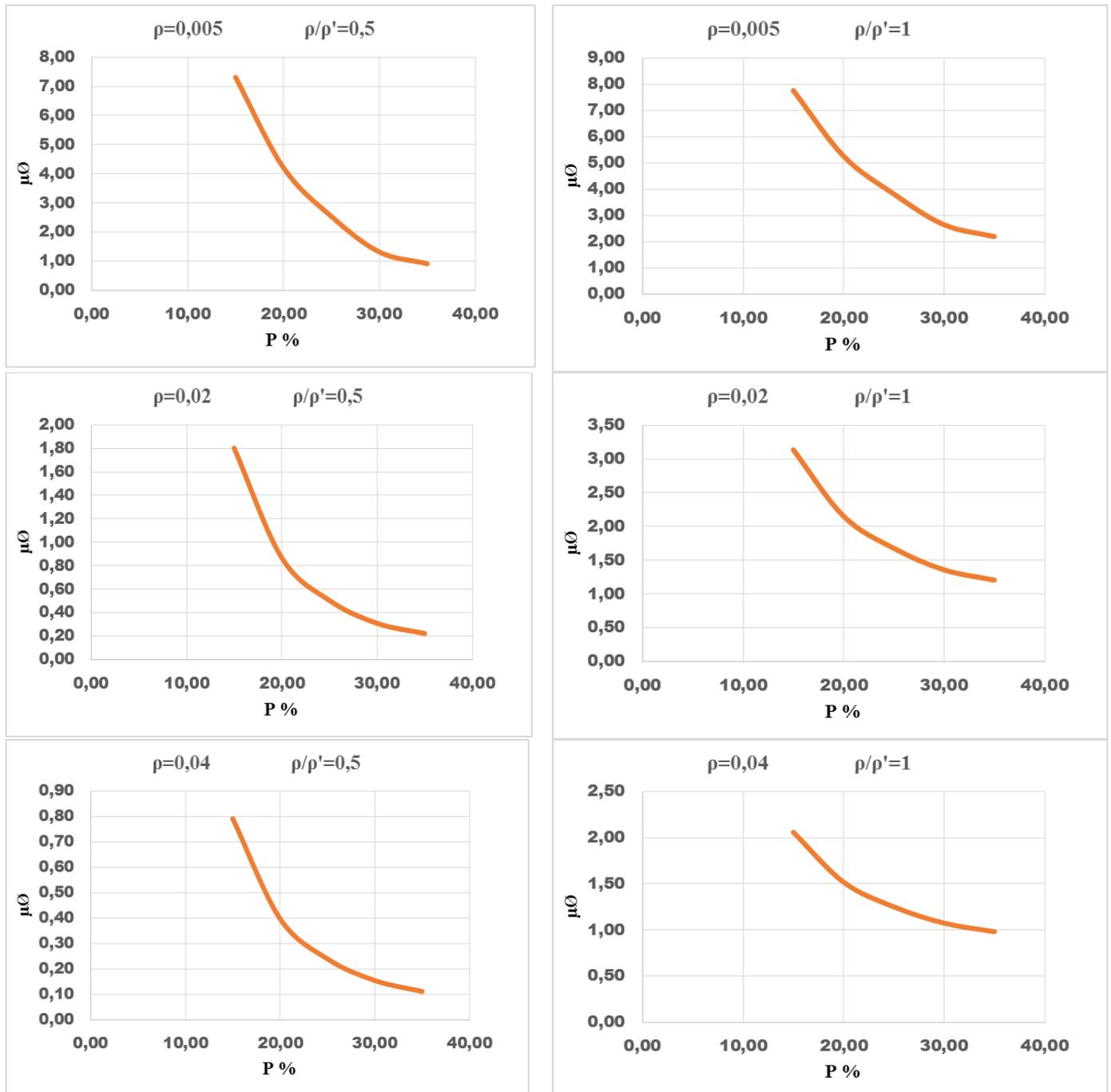


Figure IV.6. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 30 \text{ MPa}$; $F_e = 600 \text{ MPa}$

La ductilité locale des poutres en béton armé est illustrée dans les figures IV.7, IV.8 et IV.9, en prenant en considération diverses combinaisons de taux d'armatures tendues et comprimées. La résistance à la compression du béton utilisé dans cette étude est de 40 MPa, tandis que les armatures ont des limites d'élasticité de 400, 500 et 600 MPa. Le taux de porosité, le niveau d'armatures tendues et comprimées et la résistance à la compression du béton sont les facteurs qui influencent directement la ductilité locale, comme le montrent les

analyses. Ces constatations jouent un rôle essentiel dans la création des structures en béton armé. Notamment, l'effet du taux d'armatures comprimées sur la ductilité est moins significatif comparé à celui des armatures tendues, en raison de leur moindre influence sur la capacité du béton à subir des déformations plastiques.

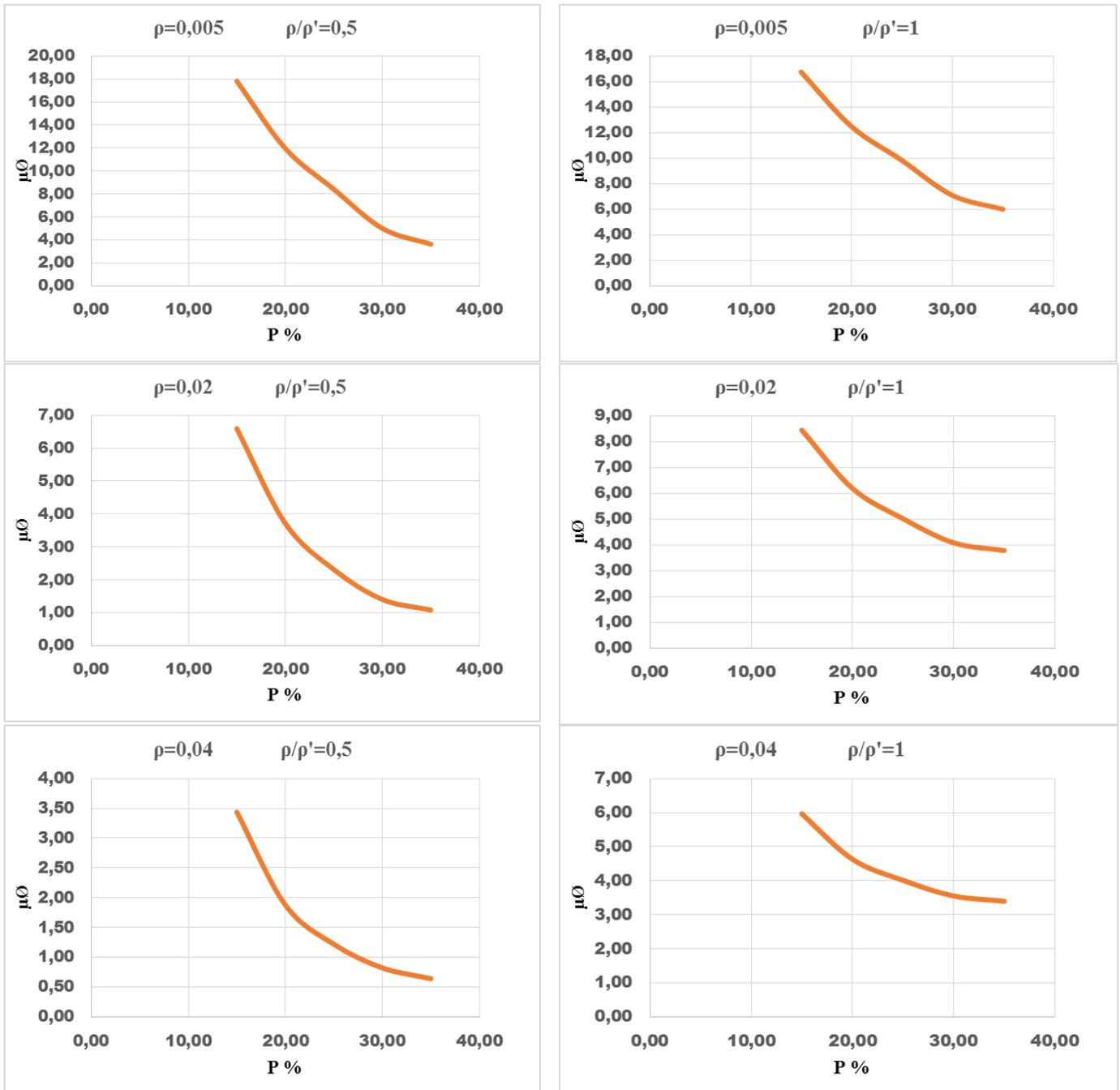


Figure IV.7. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 40 \text{ MPa} ; F_e = 400 \text{ MPa}$$

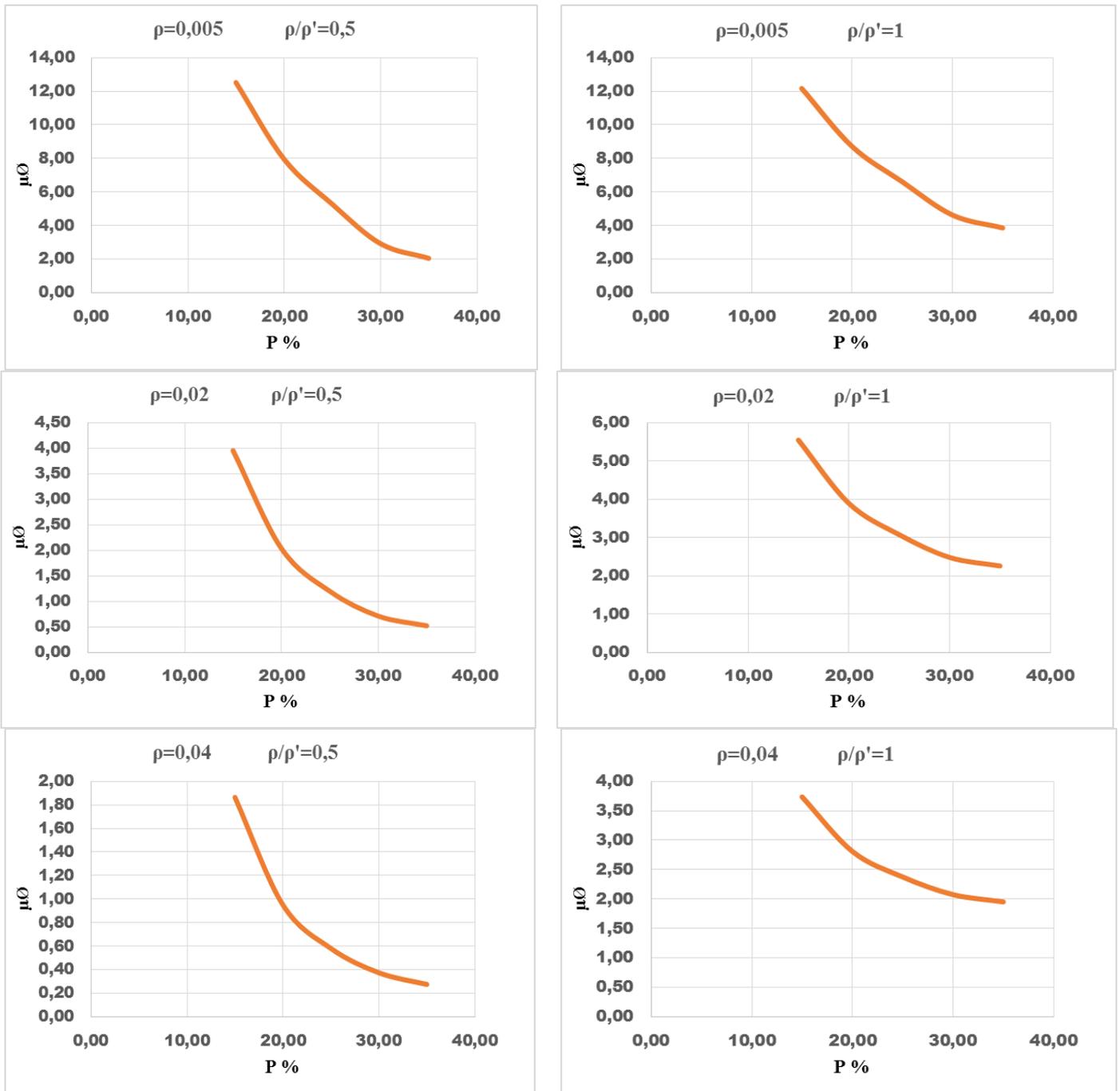


Figure IV.8. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 40 \text{ MPa} ; F_e = 500 \text{ MPa}$$

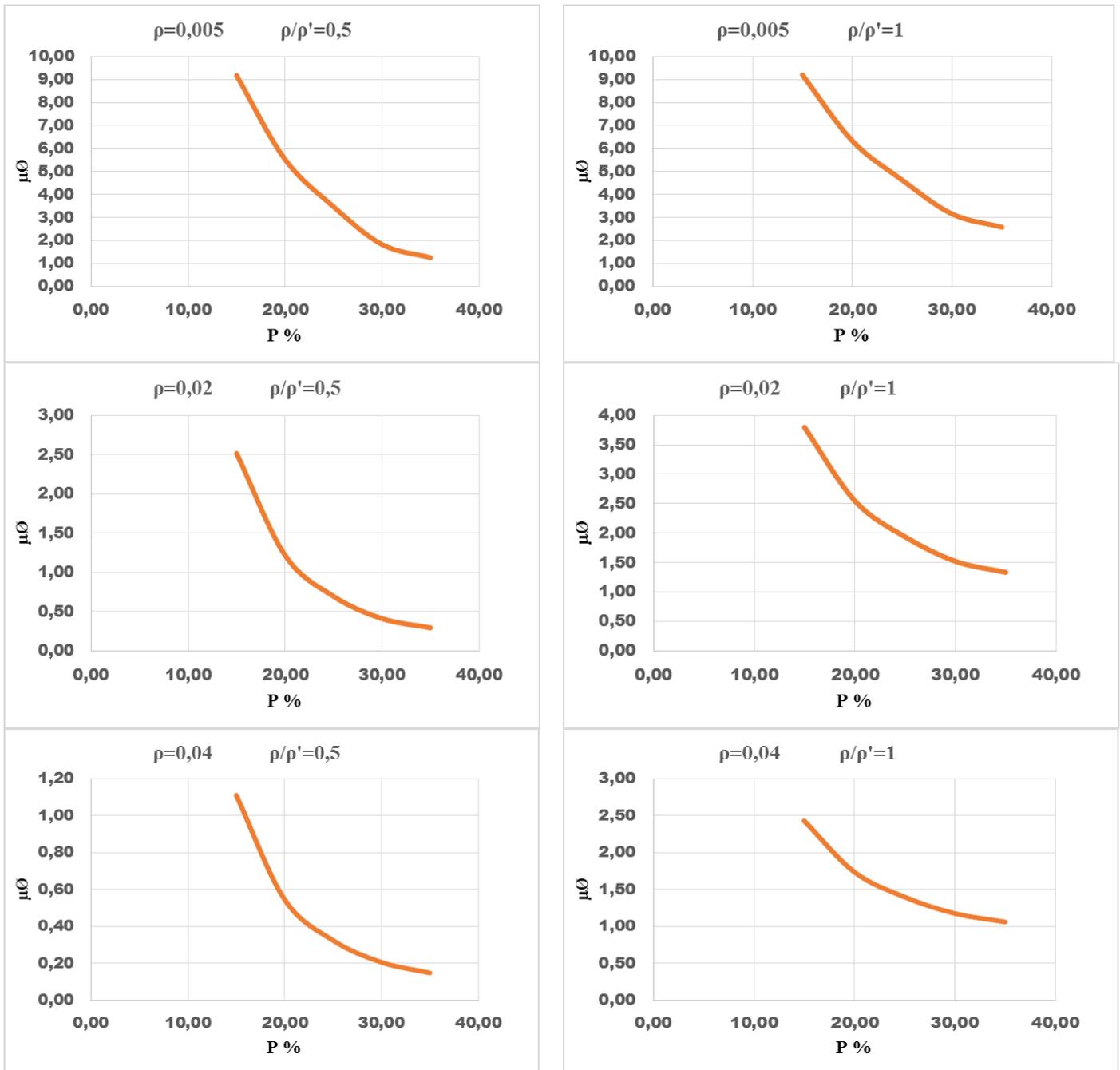


Figure IV.9. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 40 \text{ MPa} ; F_e = 600 \text{ MPa}$$

Les figures IV.10, IV.11 et IV.12 montrent la variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec trois différentes valeurs de la résistance à la traction de l'acier. Ces figures illustrent comment le taux de porosité affecte la ductilité du béton armé, et comment cette relation est influencée le taux de renforcement des armatures. On observe que pour tous les niveaux d'armature ($\rho=0,005$, $\rho=0,02$, $\rho=0,04$), la ductilité diminue avec l'augmentation de la porosité. La courbe est plus abrupte pour les faibles valeurs

de ρ , ce qui indique que l'impact de la porosité sur la ductilité est plus prononcé pour des niveaux d'armature plus faibles. En comparant les trois figures, on peut voir que l'augmentation de la résistance à la traction de l'acier (de 400 MPa à 600 MPa) améliore la ductilité pour un même taux de porosité.

En résumé, pour minimiser l'impact négatif de la porosité sur la ductilité des poutres en béton armé, il est avantageux d'utiliser de l'acier avec une résistance à la traction plus élevée et d'augmenter le taux d'armature. Ces deux facteurs permettent d'améliorer la performance des poutres face à l'augmentation de la porosité.

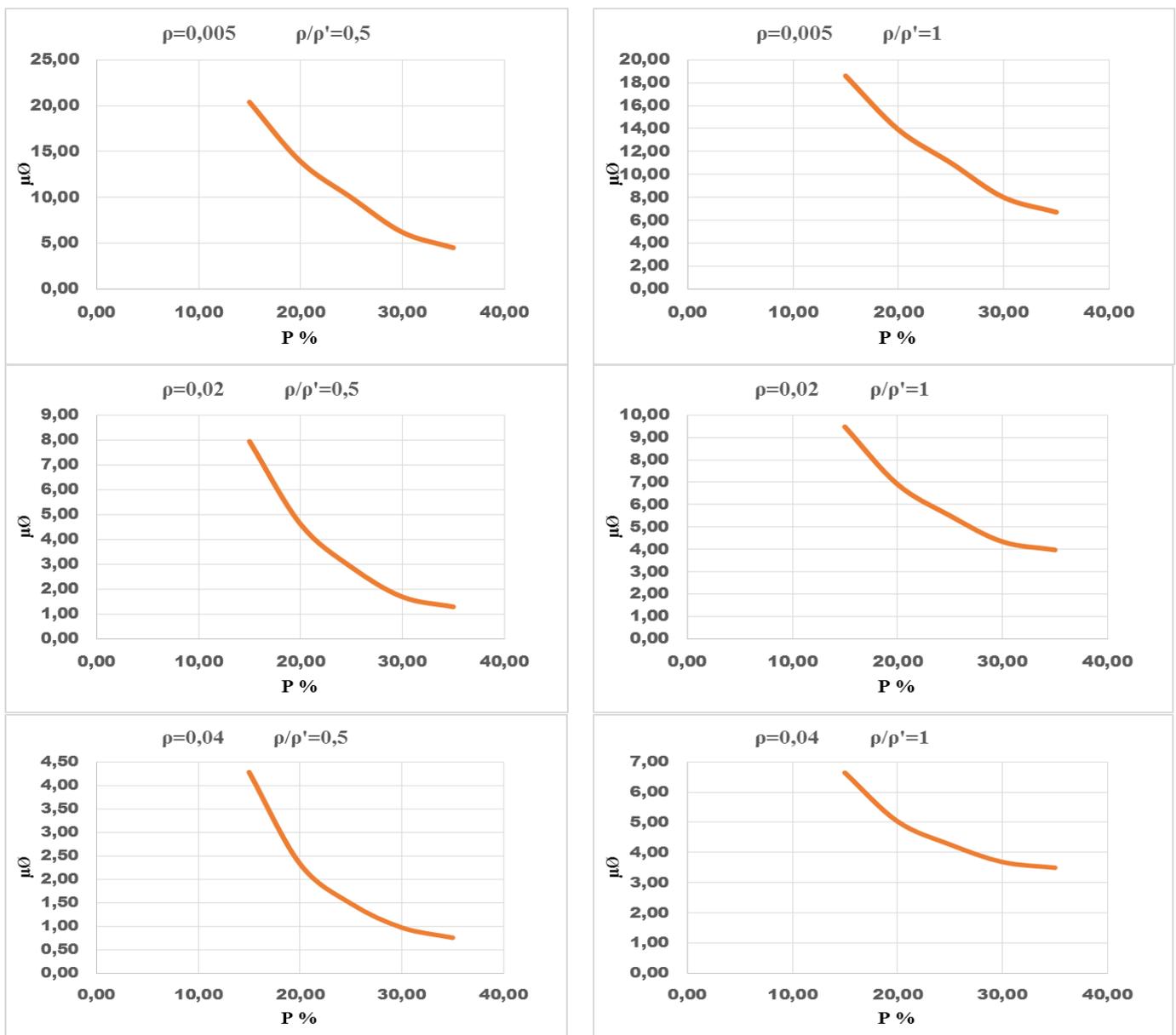


Figure IV.10. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec $f'_c = 50 MPa$; $F_e = 400 MPa$

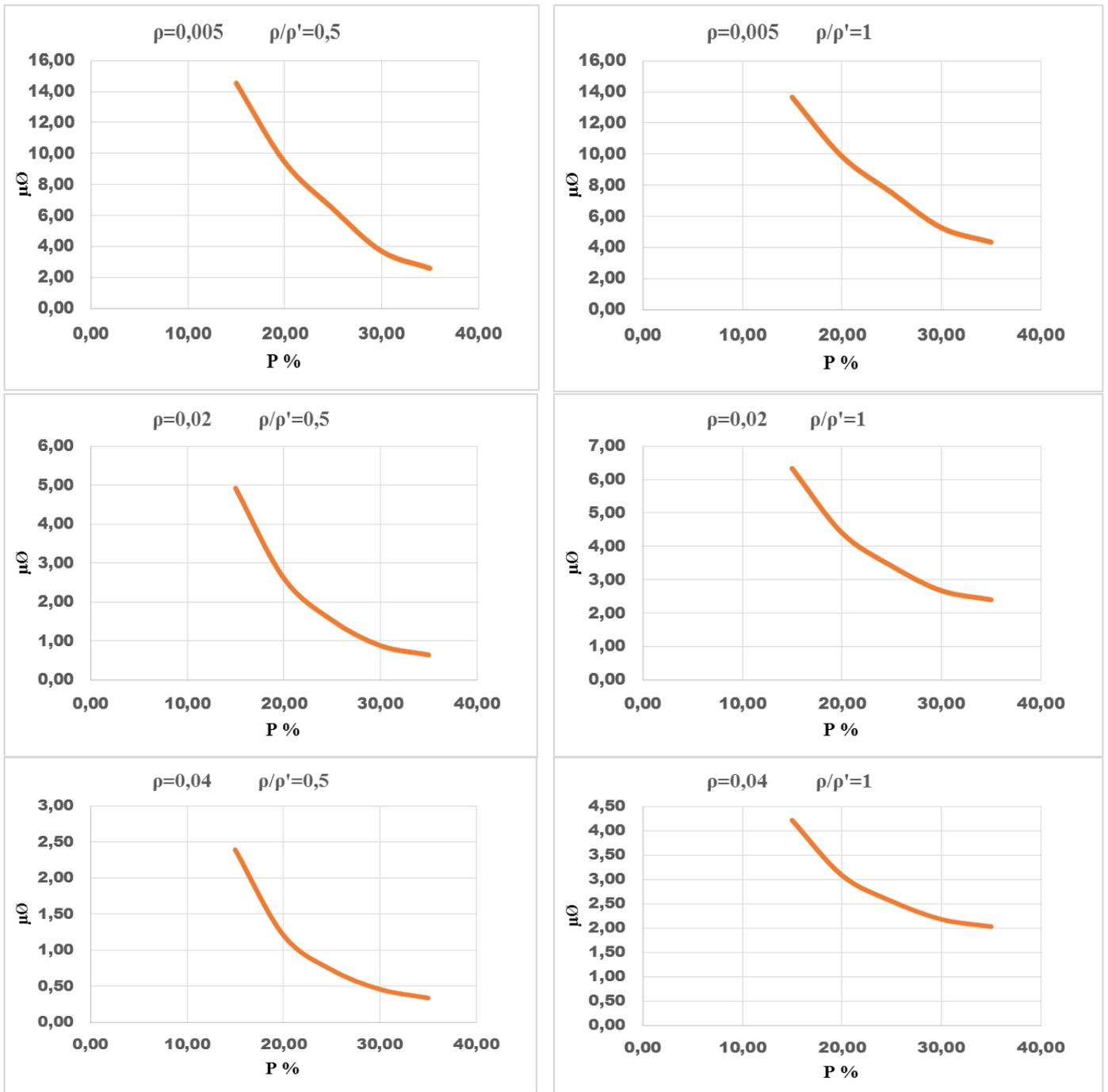


Figure IV.11. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 50 \text{ MPa} ; F_e = 500 \text{ MPa}$$

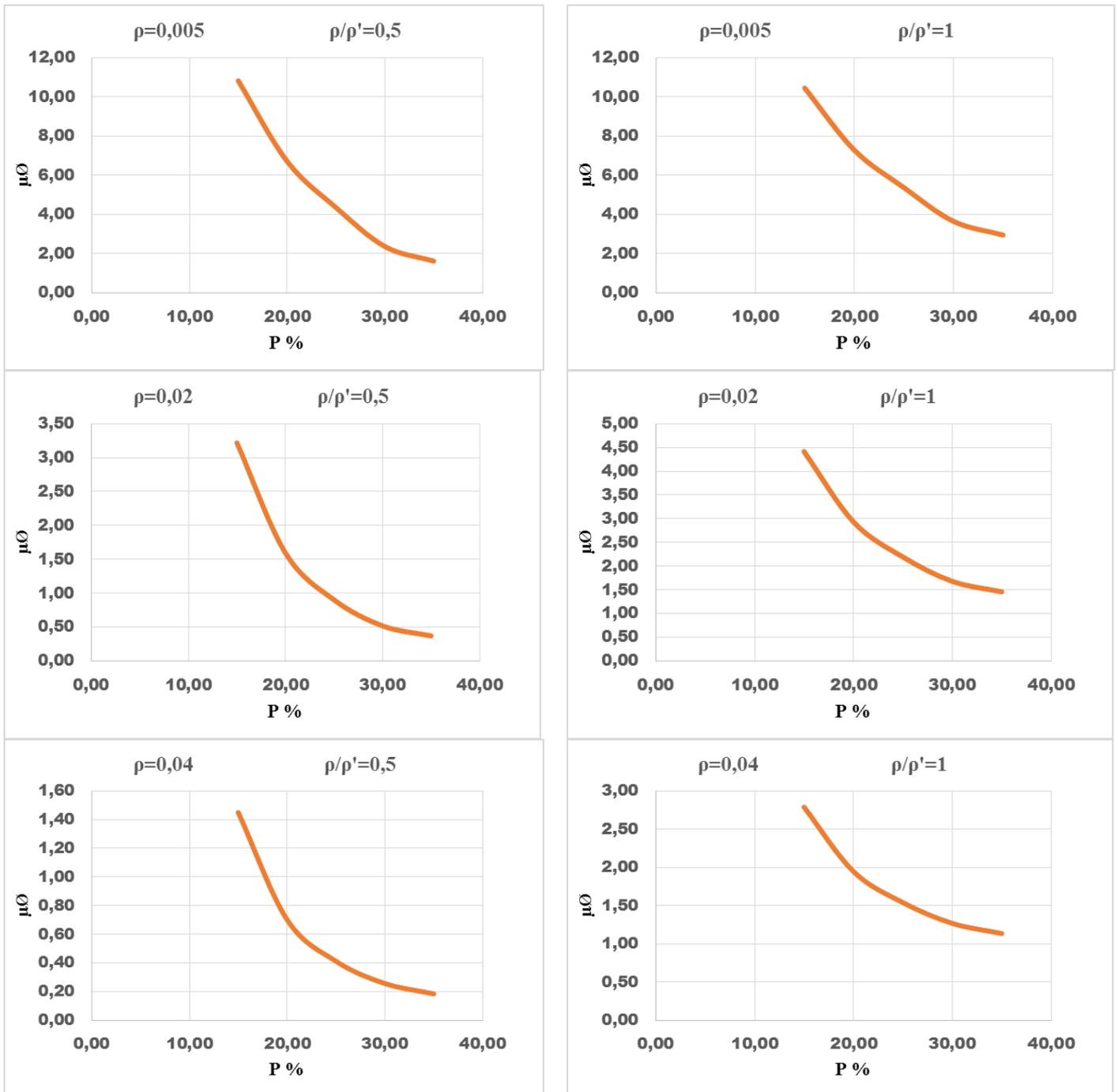


Figure IV.12. Variation de la ductilité des poutres en béton armé en fonction du taux de porosité, avec

$$f'_c = 50 \text{ MPa} ; F_e = 600 \text{ MPa}$$

IV.4. Solutions pour atténuer l'effet de porosité sur la ductilité locale des poutres en BA

IV.4.1. Vibration de béton pour réduire le taux des bulles d'air

L'utilisation de vibrateurs est une technique courante dans la production de béton pour réduire le taux de porosité et améliorer la qualité globale du béton.

Les vibrateurs sont utilisés pour compacter le béton frais dans les coffrages. L'action vibratoire permet de réduire les vides et les bulles d'air piégés dans le mélange, ce qui contribue à une meilleure consolidation du béton. En éliminant ces vides, on réduit le nombre de porosités dans le matériau final.

Lorsque le béton est coulé dans un coffrage, il a tendance à former des vides autour des armatures et dans les coins et les recoins du coffrage. Les vibrateurs sont utilisés pour agiter le béton et permettre à celui-ci de s'écouler dans ces zones difficiles d'accès, réduisant ainsi la formation de vides et de bulles d'air.

En réduisant la porosité du béton, l'utilisation de vibrateurs contribue à augmenter sa résistance et sa durabilité. Les vides et les bulles d'air dans le béton peuvent entraîner une faiblesse structurale et une augmentation de la perméabilité, ce qui rend le béton plus vulnérable à la pénétration d'eau, aux cycles de gel-dégel et à la corrosion des armatures.

L'utilisation de vibrateurs peut également aider à obtenir une meilleure finition de surface du béton en éliminant les imperfections telles que les trous d'air et les marques de coffrage. Cela est particulièrement important dans les applications où une surface lisse et uniforme est requise.

IV.4.2. Renforcement des structures

Le renforcement est une méthode vitale dans le domaine de l'ingénierie structurelle, visant à renforcer les structures existantes telles que les poutres, les colonnes et les fondations. Ce processus commence par une évaluation minutieuse de la structure pour identifier ses faiblesses. Ensuite, il y a conçoit un plan de renforcement adapté, qui peut inclure l'application de matériaux tels que le béton projeté ou des fibres de carbone renforcé. Avant l'application de ces matériaux, la surface de la structure est préparée pour assurer une adhérence optimale. Une fois le matériau de renforcement appliqué, il est autorisé à durcir, créant ainsi un système intégré et renforcé. Des inspections et des tests rigoureux sont ensuite effectués pour garantir la conformité aux normes de sécurité et de performance. En somme, le renforcement est une technique essentielle, nécessitant une expertise professionnelle pour assurer la sécurité et la durabilité des structures.

IV.5. Conclusion

Ce chapitre analyse comment la porosité affecte la ductilité des poutres en béton armé. Nous avons observé que plus la porosité augmente, plus la capacité des poutres à se déformer sans casser diminue. Les bétons avec une haute résistance à la compression montrent une

meilleure ductilité même en présence de porosité, ce qui souligne l'importance de la résistance du béton pour la performance structurale.

De plus, les poutres dotées de taux élevés d'armatures comprimées résistent mieux aux effets négatifs de la porosité. En revanche, les armatures tendues ont un impact moins significatif. Les mesures expérimentales de ductilité sont souvent supérieures aux prévisions des normes théoriques (ACI, CSA et la présente méthode), indiquant que ces normes sont conservatrices.

Enfin, pour atténuer les effets de la porosité, nous proposons l'utilisation de vibrateurs pour compacter le béton et réduire les vides, ainsi que le renforcement pour restaurer la capacité des poutres à supporter des déformations et améliorer leur durabilité.

Conclusion Générale

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.

Le béton armé est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde, offrant une combinaison de résistance, de durabilité et de polyvalence. Cependant, sa qualité et ses performances dépendent de nombreux facteurs, dont la présence de bulles d'air. Les bulles d'air, des vides emprisonnés à l'intérieur de la masse de béton, peuvent influencer de manière significative les propriétés du matériau. Comprendre l'impact des bulles d'air sur le béton armé est crucial pour garantir la qualité, la durabilité et la sécurité des structures construites avec ce matériau.

Les résultats de cette étude démontrent clairement que la porosité a un effet dévastateur sur la ductilité des poutres en béton armé. À mesure que le taux de porosité augmente, la capacité des poutres à se déformer sans se rompre diminue de façon significative. Par exemple, une augmentation de la porosité de 0% à 30% peut réduire la ductilité d'une poutre de plus de la moitié. Toutefois, il est intéressant de noter que les bétons ayant une haute résistance à la compression parviennent à maintenir une meilleure ductilité malgré la présence de porosité. Cette observation souligne l'importance cruciale de la résistance du béton pour la performance structurale globale.

L'influence des armatures sur la ductilité est également mise en évidence. Les poutres dotées de taux élevés d'armatures tendues se montrent plus résistantes aux effets négatifs de la porosité en comparaison avec les armatures comprimées, dont l'impact sur la ductilité est moins significatif. De plus, l'utilisation d'acier avec une limite d'élasticité plus élevée s'avère bénéfique pour améliorer la ductilité des poutres, en particulier lorsque le taux de porosité est élevé.

Cette étude souligne que, bien que la porosité représente un défi majeur pour la ductilité des poutres en béton armé, des solutions efficaces existent pour maintenir et même améliorer la performance des structures. En réduisant la porosité et en renforçant les poutres, il est possible de concevoir des structures capables de résister aux contraintes sismiques sévères,

Conclusion Générale

Garantissant ainsi la sécurité et la durabilité des constructions en béton armé. Ces résultats fournissent des orientations précieuses pour les ingénieurs et les concepteurs dans l'optimisation de la résilience des structures face aux défis posés par la porosité et la ductilité.

L'étude menée sur l'impact de la porosité sur la ductilité des poutres en béton armé a mis en évidence des aspects cruciaux pour la performance structurelle et la sécurité des bâtiments. Cependant, plusieurs axes de recherche futurs peuvent être explorés pour approfondir cette compréhension et améliorer les pratiques actuelles. Voici quelques perspectives intéressantes pour prolonger cette étude :

- Influence des Cycles de Gel-Dégel sur la ductilité locale des poutres en béton armé,
- Évaluer l'efficacité de méthodes de renforcement avancées, comme le renforcement externe avec des bandes de carbone, pour restaurer et améliorer la ductilité des structures en béton armé.

Références bibliographiques

Référence bibliographiques

- Amar, K. A. (2003). *ANALYSE DU CRITERE DE LA DUCTILITE LOCALE DE QUELQUES STRUCTURES EN BETON ARME DIMENSIONNEES SELON LES REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES RPA99/v2003*. Département de génie civil, Université Hassiba Benbouali – Chlef.
- ABAMS.D. (1987, May-June). Influence of axial force variation of flexural behaviour of reinforced columns. *ACI Structural Journal*, 84(3).
- B. Bousalem, N. D. (Mai 1999.). "Concept de Demande de Ductilité et de Longueur Plastique dans la Performance des Portiques en Béton". Université de Constantine, : 2ème Séminaire National de Génie Civil et de l'Habitat.
- bertero. (1988). *state of the art report -ductility based structural design* (Vol. 3). proceedings of nirthworld. earthquake eng: tokyo.
- Bazant Z. P., C. F. (2000). *Fracture rate effect and creep in microplane model for dynamics* (Vol. 126). J. Eng. Mech.
- Bouزيد, Kasoul (2016). "Curvature ductility of high strength concrete beams according to Eurocode 2", *Structural Engineering and Mechanics*, 58, 1-19.
- Catherine. Doneux. (2001-2002). „*Etude du Mécanisme de Transfert des Flexions à la Jonction Poteau Poutre dans les Structures en Portiques Mixtes Soumises à Une Action Sismique*". Université de Liège,.
- Canteneur, B. (s.d.). Fissuration du béton. *guide béton*.
- Dhir, R. K. (1974). *Development and propagation of microcracks in plain concrete. Materials and Structures*. (Vol. 7).
- GUIRAUD, P. (2018). Notion de durabilité des bétons. *info Ciments*.
- Eurocode 2, E. (2004). "Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings". *Eurocode 2*,.
- Hentz, s. (2003). *Modélisation d'une structure en béton armé soumise à un choc par la méthode des éléments discrets*. Grenoble, Université Joseph Fourier, france: thèse de doctorat .
- J.KWIGHT and M.A. SOZEN. (1973). Shear strength decay in reinforced concrete columns subjected to large de flexion reversals Civil Engineering Studies. *Structures Research Series*,(403).
- KASSOUL, A. (2015). *Ductilité dans les structures en béton armé (Aspect qualitative et evaluation de la ductilité locale)*. Laboratoire de Structures, Géotechnique et Risques Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie.
- l'ingenieur, t. d. (s.d.). Conception L'adhérence béton - acier. *technique de l'ingenieur (L'expertise technique et scientifique de référence)* .
- Lian, C. Z. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and building materials*,, 25(11), 4294-4298.
- M.KAVERCHINE et A.GRELAT. (Mai 1979.). Ductilité des poteaux en flexion composée sous charges alternée. *AICAP- CEB Symposium*,, 2.
- Mander J.B, P. M. (Feb-1988). Theoretical stress – strain model for confined concrete. *Journal of the structural division*,, 114, 332-351,.

Référence bibliographiques

- Park, R. (1989). *Evaluation of ductility of structures and structural assemblages*. New Zealand society for earthquake engineering: laboratory testing.
- Park, R. P. (1975). *Ultimate deformation and ductility of members with flexure (in reinforced concrete structures)*. (J. Wiley, Éd.)
- P, P. (2011). *Structures en béton armé. Analyse et dimensionnement*. Canada: Polytechnique Montréal.
- Park, R. P. M. (apr-1982). Ductility of square confined concrete columns. *Journal of the structural division*, 106, 929-954.
- Paulay, T. &. (1974). *Shear transfer by aggregate interlock (Symposium Paper)* (Vol. 42).
- Phoummavong, V. (2003). *Cours en ligne: Matériaux de construction Chapitre 6*.
- Pijaudier-cabot, R. J. (2005). *Comportement mécanique du béton*.
- POPOV., V. a. (1977, January). Seismic behaviour of ductile Moment-Resisting reinforced concrete frames, Reinforced concrete structures in seismic zones. *ACI Publication*, 247-292.
- Priestly MNJ, a. P. (Jan-1987). Strength and ductility of reinforced and prestressed concrete columns and piles under seismic loading. *ACI structural Journal*(84), 61-76.
- R, P. (Aug. 1992). "Capacity Design of RC Building Structures for Earthquake Resistance". The structural Engineer.
- R.H.BROWN and J.O.JIRSA. (1971, May). Reinforced concrete beams under load reversals,. *Structural Journal of the ACI.*, 68.
- Ramirez.N.D. (2005). *Etude de liaison acier-béton, de la modélisation du phénomène à la formulation d'un élément fini enrichi (béton armé)*.
- ResearchGate, S. F. (s.d.). COMPORTEMENT DU BETON SOUS L'EFFET D'UNE ELEVATION DE LA TEMPERATURE. Récupéré sur https://www.researchgate.net/figure/Essai-PIED-comportement-uniaxial-du-beton-sous-chargement-cyclique-Ramt-1990_fig9_338066440
- SEBAI, K. ((2011)). *Quantification de la ductilité des constructions autos-tables en béton armé dimensionnées selon le règlement parasismique algérien RPA 99/V-2003 (Doctoral dissertation, Quantification de la ductilité des constructions autos-tables en béton armé dimensionné)*. Chlef, UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI.
- S.M, S. S. (May-1980). Strength and ductility of tied concrete columns. *Journal of the structural division*, 108(1079-1102).
- S.M.UZUMERI. (1977, January). Strength and ductility of cast in place beam-column joints reinforced concrete structures in seismic zones. *ACI Publication*.
- S.ZAID, H. S. (1998). *Test of new reinforcing Engineering*, (Vol. 46B). Japan.

Référence bibliographiques

- SAATCIOGLU, M, O. B. (1989, January- February). Responce of reinforced concrete columns to simulated seismic loading. *ACI Structural journal*, 84(1).
- salah, r. (1990). *Contribution à la modélisation du comportement multiaxial du béton endommagé avec description du caractère unilatéral (Doctoral dissertation)*. paris.
- Shiu, W. (2008). *Impact de missiles rigides sur structures en béton armé : analyse par la méthode des éléments discrets*. Université Joseph-Fourier - Grenoble I,.
- T.PAULAY, R. J. (novembre 1978). Reinforced concrete beam-column joints under seismic action. *Journal of American Concrete Institute*,.
- terrien, M. (1980). *Emission acoustique et comportement mécanique post critique d'un béton sollicité en traction*, *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées numéro 106*,.
- Vu, X. H. (2007). *Caractérisation expérimentale du béton sous fort confinement:influences du degré de saturation et du rapport eau/ciment*. grenoble, Univesité Jopeph Fourier,, france.
- V Gioncu. (2000). framed structure. Ductility and seismic reponse: general report,. *constructional steel reseearch* ,, 55, 125-154.